

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KATI ÇÖZELTİ SERTLEŞMESİNİN KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME
DEMİRİN DÖNEL EĞMELİ YORULMA DAVRANIŞINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Barış ATEŞ

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KATI ÇÖZELTİ SERTLEŞMESİNİN KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME
DEMİRİN DÖNEL EĞMELİ YORULMA DAVRANIŞINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Barış ATEŞ
(521111010)**

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU

HAZİRAN 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 521111010 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Barış ATEŞ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**KATI ÇÖZELTİ SERTLEŞMESİNİN KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN DÖNEL EĞMELİ YORULMA DAVRANIŞINA ETKİSİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Sakin ZEYTİN
Sakarya Üniversitesi

Teslim Tarihi : **02 Mayıs 2013**
Savunma Tarihi : **07 Haziran 2013**

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince, bana her konuda destek olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli danışman hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım boyunca bana yol gösteren ve yardımcı olan başta değerli hocalarım Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI ve Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN olmak üzere, Araş. Gör. Faiz MUHAFFEL'e ve Araş. Gör. Onur TAZEGÜL'e teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmamda bana yardımcı olan Malzeme Müh. Merve DEMİRLEK'e ve mekanik laboratuvarlarında çalışan meslektaşlarıma çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamda bana teknik destek sağlayan COMPONENTA DÖKÜMCÜLÜK TİCARET ve SANAYİ A.Ş.'ye ve Yük. Metalurji ve Malzeme Müh. Bülent ŞİRİN'e teşekkürü borç bilirim.

Bugünlere gelmemi sağlayan ve her zaman yanımda olan, eğitim hayatım boyunca ilgisini ve desteğini benden esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2013

Barış ATEŞ
Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
2. DÖKME DEMİRLER.....	3
2.1 Dökme Demirlerin Sınıflandırılması.....	5
3. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER	7
3.1 Katılaşma ve Grafit Oluşumu	9
3.2 Alaşım Elementlerinin Etkisi	10
3.3 Sınıflandırma ve Mekanik Özellikler	11
3.4 Kullanım Alanları.....	17
4. YÜKSEK SİLİSYUMLU KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER	19
4.1 Kimyasal Bileşim	20
4.2 Sınıflandırma ve Mekanik Özellikler.....	20
5. YORULMA.....	25
5.1 Yorulma Mekanizması	28
5.1.1 Çatlak oluşumu ve ilerlemesi	28
5.1.2 Yorulma kırılması	30
5.2 Yorulma Türleri	33
5.2.1 Çatlaksız malzemelerde yorulma	33
5.2.2 Çatlaklı malzemelerde yorulma	34
5.3 Yorulma Deneyleri.....	35
5.3.1 Dönel eğmeli yorulma deneyi	36
5.4 Yorulmaya Etki Eden Faktörler	37
5.5 Yorulma Dayanımını Artırıcı İşlemler	38
5.6 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yorulma Davranışı	39
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	45
6.1 Numunelerin Üretimi	45
6.2 Mikroyapı İncelemeleri	46
6.3 Sertlik Darbe ve Çekme Deneyleri	46
6.4 Yorulma Deneyi	48
6.5 Yorulma Kırılması Yüzeyi İncelemeleri	49
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	51
7.1 Kimyasal Analiz ve Mikroyapı İnceleme Sonuçları	51
7.2 Sertlik, Darbe ve Çekme Deneyi Sonuçları	53

7.3 Yorulma Deneyi Sonuçları.....	53
7.4 Yorulma Kırılması Yüzeyi İnceleme Sonuçları	57
8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR.....	65
EKLER.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	75

KISALTMALAR

SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EPMA	: Elektron Prob Mikro Analizi
HCF	: Uzun Ömürlü Yorulma
LCF	: Kısa Ömürlü Yorulma
AFS	: Amerikan Dökümcüler Derneği
CE	: Karbon Eş Değeri
GDD	: Gri Dökme Demir
BDD	: Beyaz Dökme Demir
KGDD	: Küresel Grafitli Dökme Demir
TDD	: Temper Dökme Demir
ÇD	: Çelik Döküm
BCIRA	: İngiliz Dökme Demir Araştırma Derneği
INCO	: Uluslararası Nikel Birliği
DDK	: Dökme Demir Küresel Grafitli
ISO	: Uluslararası Standart Organizasyonu
YDS	: Yorulma Dayanım Sınırı
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
ASTM	: Amerika Malzeme ve Test Standartları Kurumu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Dökme demirin ticari adı, mikroyapısı ve kırılma görünümüne göre sınıflandırılması.....	5
Çizelge 2.2 : Alaşımsız dökme demirlerin kimyasal bileşim aralığı.....	6
Çizelge 2.3 : Gri Dökme Demir (GDD), Beyaz Dökme Demir (BDD), Temper Dökme Demir (TDD), Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD) ve Çelik Döküm (ÇD) arasında çeşitli özelliklerin karşılaştırılması	6
Çizelge 3.1 : Gri, temper ve küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal bileşimi	8
Çizelge 3.2 : Küresel grafitli dökme demirlerin TSE'ye göre sınıflandırılması.....	12
Çizelge 3.3 : EN 1563:2011 standardına göre ferritik, perlitik, ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	13
Çizelge 3.4 : Küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapıları	14
Çizelge 3.5 : Küresel grafitli dökme demirlerin kullanım alanları.....	18
Çizelge 4.1 : EN 1563:2011 standardına göre katı çözelti sertleştirilmesi uygulanmış küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması	21
Çizelge 4.2 : EN-GJS-600-3 ile EN-GJS-600-10 kalite küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.....	23
Çizelge 5.1 : Çeşitli mühendislik uygulamalarında kırılmaya neden olan olayların istatistiksel yüzdeleri	25
Çizelge 5.2 : Hava taşıtı parçalarında kırılmaya neden olan olayların istatistiksel yüzdeleri	26
Çizelge 5.3 : Küresel grafitli dökme demir, gri dökme demir ve dövme karbonlu çeliğin yorulma değerlerinin karşılaştırılması	40
Çizelge 7.1 : EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerinin kimyasal analiz sonuçları	51
Çizelge 7.2 : EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerinin kantitatif analiz sonuçları	52
Çizelge 7.3 : EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerinin sertlik, darbe ve çekme deneyi sonuçları	53
Çizelge 7.4 : EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerinin Basquin sabitleri ve yorulma özellikleri.....	54
Çizelge A.1 : EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerine ait dönel eğmeli yorulma deneyi sonuçları	70
Çizelge B.1 : EN-GJS-600-3 numunesine ait dönel eğmeli yorulma kırılması yüzeyi fotoğrafları	71
Çizelge B.2 : EN-GJS-600-10 numunesine ait dönel eğmeli yorulma kırılması yüzeyi fotoğrafları	73

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Demir – Karbon denge diyagramı.	4
Şekil 3.1 : Küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısı: (a) kaba döküm ferrit, (b) kaba döküm perlit; 255 HB, (c) ferrit yumuşatma tavı 3h, 700°C, (d) perlit yağda su verilip 255 HB’e temperlenmiş, (hepsi; %2 Nital, x100).....	8
Şekil 3.2 : Yüksek kalitede küresel grafitli dökme demir elde etmek için gerekli karbon ve silisyum oranları	11
Şekil 3.3 : Küresel grafitli dökme demirde akma ve çekme mukavemetinin küreselliğe bağlı değişimi	15
Şekil 3.4 : Farklı küreselleşmelere sahip küresel grafitli dökme demir mikroyapıları: (a) %99, (b)% 80, (c) %50.....	15
Şekil 3.5 : Farklı sınıflardaki küresel grafitli dökme demirlerin sertliğe bağlı olarak değişen akma ve çekme mukavemeti ile % uzama ilişkisi	16
Şekil 4.1 : Yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirlerde silisyum içeriğinin malzemenin akma ve çekme mukavemetine etkisi.....	21
Şekil 4.2 : Yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirlerde silisyum içeriğinin malzemenin kopma uzamasına etkisi	22
Şekil 4.3 : Küresel grafitli dökme demirlerin sertliğe bağlı olarak akma mukavemetinin değişimi: (a) ferritik, perlitik, ferritik/perlitik KGDD, (b) katı çözelti ile sertleştirilmiş KGDD.....	23
Şekil 5.1 : Yorulma deneyi tipik gerilme-zaman eğrisi ve tanımlamaları	26
Şekil 5.2 : 1045 çeliği ile 2014-T6 Alüminyum malzemelerine ait S-N eğrileri	27
Şekil 5.3 : Malzeme yüzeyindeki girinti ve çıkıntılar.....	29
Şekil 5.4 : Yorulma çatlak ilerlemesi aşamaları	29
Şekil 5.5 : Çatlak ilerlemesinde 3 temel model	30
Şekil 5.6 : Dinamik yükleme altında çatlakın ilerlemesi	31
Şekil 5.7 : Yorulma kırılmasının şematik olarak gösterimi	31
Şekil 5.8 : Karakteristik yorulma kırılması yüzeylerinin görünümü: (a) çekme - çekme veya çekme-basma yüklemesi, (b) tek yönlü eğme, (c) tersine eğme, (d) dönel eğme	32
Şekil 5.9 : Dönel eğme durumundaki yorulma kırılması yüzeyi görünümleri: (a) aynı çevresel düzlemlerde değişik yerlerde başlayan dişli izleri oluşumu, (b) farklı çevresel düzlemlerde değişik yerlerde başlayan dişli izleri oluşumu.....	32
Şekil 5.10 : Yorulma türleri	33
Şekil 5.11 : Çatlak uzunluğu ile çevrim sayısı arasındaki ilişki	34
Şekil 5.12 : Gerilme şiddet aralığı – çatlak büyüme hızı değişimini gösteren şematik eğri	35
Şekil 5.13 : Yorulma deneyi türleri	36
Şekil 5.14 : Dönel eğmeli yorulma deneyi düzenekleri: (a) tek noktalı yükleme, (b) iki noktalı yükleme, (c) dört noktalı yükleme	37

Şekil 5.15 : Bazı dökme demir türlerinin yorulma dayanımlarının karşılaştırılması.	40
Şekil 5.16 : Ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demirde yorulma çatlak ilerlemesi	40
Şekil 5.17 : Küresel grafitli dökme demirlerde yorulma oranı, çekme mukavemeti ve matris yapısı arasındaki ilişki	41
Şekil 5.18 : Ferritik küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanımına çentik etkisi	42
Şekil 5.19 : Çentikli ve çentiksiz küresel grafitli dökme demirlerin S-N eğrileri: (a) 60-40-18 kalite ferritik tavllanmış, (b) 80-55-06 kalite perlitik.....	42
Şekil 5.20 : Çentikli ve çentiksiz perlitik küresel grafitli dökme demirde, küreselleşme yüzdesinin yorulma dayanım sınırına etkisi	43
Şekil 5.21 : Nodül çapı ve matris sertliği ile küresel grafitli dökme demirin dönel eğmeli yorulma dayanımı arasındaki ilişki	43
Şekil 5.22 : Metalik olmayan inklüzyon miktarının ve matris sertliğinin küresel grafitli dökme demirin dönel eğmeli yorulma dayanımına etkisi	44
Şekil 6.1 : Optik mikroskop.....	46
Şekil 6.2 : Sertlik ölçüm cihazı.....	47
Şekil 6.3 : Darbe deneyi cihazı	47
Şekil 6.4 : Çekme testi cihazı	47
Şekil 6.5 : Dönel eğmeli yorulma deney cihazı	48
Şekil 6.6 : Dönel eğmeli yorulma deney numunesi (birimler mm cinsindendir)	48
Şekil 6.7 : Stereo mikroskop.....	49
Şekil 6.8 : Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	49
Şekil 6.9 : Elektron prob mikro analiz (EPMA) cihazı	49
Şekil 7.1 : EN-GJS-600-3 numunesinin mikroyapısı (x100, %2 Nital)	52
Şekil 7.2 : EN-GJS-600-10 numunesinin mikroyapısı (x100, %2 Nital)	52
Şekil 7.3 : EN-GJS-600-3 numunesine ait S-N eğrisi	55
Şekil 7.4 : EN-GJS-600-10 numunesine ait S-N eğrisi	55
Şekil 7.5 : EN-GJS-600-3 numunesine ait P-S-N grafiği	56
Şekil 7.6 : EN-GJS-600-10 numunesine ait P-S-N grafiği	56
Şekil 7.7 : Uygulanan gerilme genliğinin numunenin çekme mukavemetine oranının çevrim sayısına göre değişimi.....	57
Şekil 7.8 : EN-GJS-600-3 numunesine ait yorulma kırılması yüzeyi ($\sigma = 350$ MPa, $N_f = 212658$).....	58
Şekil 7.9 : EN-GJS-600-10 numunesine ait yorulma kırılması yüzeyi ($\sigma = 411$ MPa, $N_f = 64461$).....	58
Şekil 7.10 : EN-GJS-600-3 numunesine ait yorulma kırılması yüzeyinin stereo mikroskop görüntüsü ($\sigma = 399$ MPa, $N_f = 105244$)	59
Şekil 7.11 : Yorulma çatlak ilerleme bölgesine ait SEM görüntüsü: (a) EN-GJS-600-3 ($\sigma = 411$ MPa, $N_f = 71543$, x1000), (b) EN-GJS-600-10 ($\sigma = 368$ MPa, $N_f = 211793$, x1000)	60
Şekil 7.12 : Nihai kırılma bölgesine ait SEM görüntüsü: (a) EN-GJS-600-3 ($\sigma = 411$ MPa, $N_f = 71543$, x1000), (b) EN-GJS-600-10 ($\sigma = 368$ MPa, $N_f = 211793$, x1000).....	60
Şekil 7.13 : Parlak noktaların bulunduğu bölgeye ait SEM görüntüsü: (a) EN-GJS-600-3 ($\sigma = 411$ MPa, $N_f = 71543$, x1000), (b) EN-GJS-600-10 ($\sigma = 368$ MPa, $N_f = 211793$, x1000)	61
Şekil 7.14 : EPMA ile incelenen EN-GJS-600-10 ($\sigma = 313$ MPa, $N_f = 3746289$) numunesinin intergranüler ve transgranüler kırılmaları içeren yorulma kırılması yüzeyi	61

Şekil 7.15 :EN-GJS-600-10 ($\sigma = 313$ MPa, $N_f = 3746289$) numunesinin
intergranüler ve transgranüler kırılmaları içeren yorulma kırılması
yüzeyinde C, Si, Mn ve Cr elementlerinin dağılımı..... 62

SEMBOL LİSTESİ

μm	: Mikrometre
MPa	: Mega Pascal
GPa	: Giga Pascal
J	: Joule
Hz	: Hertz
BSD	: Brinell Sertlik Değeri
HB	: Brinell Sertliği
HV	: Vickers Sertliği
Fe_3C	: Sementit
α	: Düşük Sıcaklıkta Kararlı Ferrit
γ	: Ostenit
δ	: Yüksek Sıcaklıkta Kararlı Ferrit
$R_{p0.2}$	: Akma Mukavemeti
R_m	: Çekme Mukavemeti
t	: Et kalınlığı
A	: Kesit alanı
N_f	: Kırılıncaya kadar geçen çevrim sayısı
σ	: Gerilme
$\sigma_{\max}$	: Maksimum gerilme
$\sigma_{\min}$	: Minimum gerilme
$\Delta\sigma$	: Gerilme aralığı
σ_a	: Gerilme genliği
σ_m	: Ortalama gerilme
R	: Gerilme oranı
K	: Gerilme şiddet faktörü
ΔK	: Gerilme şiddet aralığı
$\Delta\epsilon_{pl}$	: Plastik birim şekil değişimi aralığı
a	: Çatlak uzunluğu
σ_{TS}	: Çekme Mukavemeti
σ_y	: Akma Mukavemeti
e_f	: Kopma Uzaması

KATI ÇÖZELTİ SERTLEŞMESİNİN KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN DÖNEL EĞMELİ YORULMA DAVRANIŞINA ETKİSİ

ÖZET

Küresel grafitli dökme demirler yüksek çekme mukavemeti, yüksek aşınma direnci, yüksek süneklik, düşük ergime sıcaklığı, yüksek akışkanlık ve düşük maliyetle kolay üretilbilme gibi özelliklerinden dolayı birçok yapısal uygulamalarda; özellikle otomotiv sanayinde krank milleri, vites dişlileri, tekerlek poyrası, kam mili, ön aks taşıyıcısı, diferansiyel taşıyıcısı ve süspansiyon kolları gibi parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılan bir malzeme türüdür. Küresel grafitli dökme demirler çeliğin mekanik özelliklerine ve dökme demirin üretim özelliklerine sahip bir malzeme türü olarak da bilinmektedir.

Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri malzemenin mikroyapısı ile doğrudan ilişkilidir. Küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısı tamamen perlitik, ferritik/perlitik ya da tamamen ferritik olabilmektedir. Bu yapıyı belirleyen etkenlerin başında malzemenin kimyasal bileşimi ile soğuma hızı gelir. Yüksek soğuma hızı perlit oluşumuna katkı sağlamaktadır. Malzemenin yüzey bölgelerinde soğuma hızı yüksek, iç bölgelere doğru ise soğuma hızı azalır. Dolayısıyla malzemenin yüzeye yakın bölgelerinde perlit miktarı, iç bölgelerinde ise ferrit miktarı fazladır. Ferrit ile perlit yapılarının farklı özelliklere sahip olmalarından dolayı malzemenin yapısı her bölgesinde aynı olmamaktadır. Bu yüzden malzemenin mekanik özellikleri yüzeyden iç bölgelere doğru gidildikçe farklılık göstermektedir. Perlit yapısının ferrit fazına göre daha sert olması, malzemenin sertlik dağılımında farklılıklara neden olmaktadır. Bu durum malzemenin işlenmesinde bazı problemler meydana getirmektedir. En sık karşılaşılan problemler, talaşlı imalat sırasında kesici uç takım ömrünün kısalması ve zaman kaybına neden olmasıdır.

Malzemenin tek fazlı yapıya sahip olması, her bölgesinde sertlik dağılımının birbirine yakın olmasını sağlar. Bu koşulu sağlayabilmek için günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan öne çıkanı, katı çözelti sertleştirme uygulamasıdır. Bu işlem küresel grafitli dökme demire belirli miktarda alaşım elementi ilavesi ile gerçekleşmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda, alaşım elementi olarak silisyumun kullanılması uygun bulunmuştur. Küresel grafitli dökme demirin bileşimine silisyum ilavesi, mikroyapının tamamen ferritik olmasını sağlarken, aynı zamanda silisyum atomları yapı içerisinde demir atomlarının yerini alarak katı çözelti oluşturmaktadır. Bu sayede tek fazlı yapı elde edilmenin yanı sıra, katı çözelti sertleşmesi, perlitin mukavemet artırıcı görevine alternatif bir çözüm oluşturmaktadır. Bu şekilde üretilen yüksek silisyumlu ferritik mikroyapıya sahip küresel grafitli dökme demirler, ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demirlerin yerine kullanılabilir hale gelmiştir.

Yüksek silisyumlu ferritik küresel grafitli dökme demirler günümüzde otomotiv sanayinde piston, dişli kutusu, valf, tekerlek poyrası, süspansiyon kolu ve krank mili gibi parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Otomotiv sanayinde kullanılan

parçaların titreşimlere maruz kalması; dolayısıyla tekrarlı yüklere maruz kalması bu parçaların yorulma davranışlarının önemini artırmaktadır. Bu yüzden yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirlerin sertlik, akma dayanımı, çekme dayanımı, süneklik ve tokluk gibi özelliklerinin yanı sıra yorulma davranışlarının da önemi büyüktür. Literatürde ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demirlerin yorulma davranışlarıyla ilgili birçok çalışma mevcutken, yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirlerin yorulma davranışlarıyla ilgili çalışmaların sayısı oldukça azdır.

Bu çalışmada, EN-GJS-600-3 ile EN-GJS-600-10 kalite küresel grafitli dökme demirin uzun ömürlü yorulma davranışları incelenmiştir. Numuneler EN 1563 standardına uygun olacak şekilde üretilmiş olup, talaşlı imalat ile yorulma, çekme ve darbe testi numuneleri haline işlenmiştir. Mikroyapı incelemeleri optik mikroskop kullanılarak kantitatif yöntemle yapılmıştır. Numunelere çekme testi, oda sıcaklığında darbe testi ve sertlik testi uygulanmıştır. Uzun ömürlü yorulma deneyleri, dönel eğmeli yorulma cihazında, 50 Hz frekansta, dört noktalı yükleme sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yorulma deneylerini takiben S-N ve P-S-N grafikleri çizilerek numunelerin yorulma dayanım sınırları belirlenmiştir. Ayrıca yorulma kırılması yüzeyleri stereo mikroskop, taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve elektron prob mikro analizi (EPMA) yöntemi ile incelenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, küresel grafitli dökme demirin bileşimine silisyum ilavesi, malzemenin çekme mukavemetini ve sertliğini azaltmıştır. Ancak, silisyum ilavesi malzemenin mikroyapısını tamamen ferritik yapmakla birlikte, akma mukavemetini, sünekliğini, tokluğunu ve yorulma oranını (yorulma dayanımı / çekme mukavemeti) artırmıştır. Yorulma dayanım sınırlarının (YDS) birbirlerine çok yakın değerlerde olduğu belirlenmiştir (296 ve 300 MPa). SEM ile yapılan kırılma yüzeyi analizleri sonucuna göre, her iki numunede de iki çeşit kırılma bölgesi görülmüştür. Bunlar; nihai kırılma bölgesi (intergranüler kırılma) ve yorulma çatlak ilerleme bölgesidir. Bu bölgelere ilaveten, çatlak ilerleme bölgesi ile nihai kırılma bölgesi arasındaki bölgede yoğunlaşan transgranüler kırılmalar (klivaj kırılma) tespit edilmiştir. EPMA ile yapılan incelemeler sonucuna göre, intergranüler ve transgranüler kırılma içeren bölgede C, Si, Mn ve Cr elementlerinin dağılımında herhangi bir segregasyona rastlanmamıştır.

EFFECT OF SOLID SOLUTION STRENGTHENING ON ROTATING BENDING FATIGUE BEHAVIOUR OF DUCTILE CAST IRON

SUMMARY

Ductile cast iron has been used extensively in many structural applications especially in automotive industry due to its high tensile strength, good wear resistance, high ductility, low melting temperature and shrinkage, the highest fluidity and cost-effective way to produce. In automotive industry, ductile cast iron has been used in production of components such as crankshaft, camshaft, front axle carrier, differential carrier, transmission gears, wheel hub and suspension arms. In addition, ductile cast iron is known as a material that has mechanical properties as good as steels and has ease of manufacture of cast irons.

Ductile cast iron is produced with adding magnesium or cerium to the chemical composition of liquid metal. Graphite precipitates in spherical form by the aid of rare earth elements like magnesium and cerium. Precipitation of spherical graphite does not require any heat treatment. Ductile irons are different from gray irons in graphite morphology. In addition to this, nodular graphite does not lead to discontinuity in matrix as much as lamellar graphite so, stress concentration at the edges of nodular graphite is lower than lamellar graphite. In this respect, ductile irons have higher toughness, elongation and strength than other cast irons. In addition to these advantages, heat treatment can be applied to ductile irons in order to provide further improvements in the mechanical properties.

The mechanical properties of ductile cast irons are directly related to their microstructure. As-cast matrix microstructure of ductile cast irons may be entirely ferritic, entirely pearlitic or a combination of ferrite and pearlite with spheroidal graphite in the matrix. These microstructural properties are mainly affected by the chemical composition and the solidification-cooling rate related with the section size of the castings and alloying elements. Pearlitic matrix can be existed up to 50 mm thickness of component. This matrix is very hard and strength. There are two ways to obtain ferritic matrix: first one is adding 0,2% magnesium carbide alloy in chemical composition and second is annealing the material or cooling very slowly. In order to obtain bainitic matrix, quenching and tempering process are applied to material. Thus, high strength and hardness values can be achieved. Solidification of ferritic/pearlitic ductile cast irons starts with the precipitation of austenite in liquid phase. Matrix is austenite below the eutectic temperature and the first austenitic areas are transformed into ferrite, usually located around the graphite nodules below the eutectoid temperature. Carbon solubility of ferrite is much lower than austenite so, carbon atoms diffuse to the graphite nodules from the ferrite at a rapidly decreasing rate due to the increasing distance. Pearlite nucleates and grows rapidly because of the shorter diffusion distance between ferrite and cementite (Fe_3C). Thus, the remaining matrix will be pearlitic. The result is “bulls eye” microstructure, where graphite nodules are surrounded by a ring of ferrite in a matrix of pearlite.

Materials especially having thick section, show different cooling rate on surface and inner zone. Pearlite ratio is higher on the surface due to fast cooling rate while ferrite ratio is higher at internal region because of lower cooling rate. Ferrite and pearlite have different mechanical properties; especially in their hardness so, it results in variation of hardness range 30-40 HB for different locations on material. This high variation in Brinell hardness can lead incompatible mechanical properties on different sections of material. It also corresponds to a decrease by 50 % in machinability, decrease of cutting tool life due to increasing wear rate.

Materials having single phase have similar hardness values in every region. There are lots of studies related to provide this condition so far. The apparent solution is solid solution strengthening. Solid solution strengthening is a process that includes addition of particular elements to the matrix to make alloy. These elements can be interstitial or substitutional solid solution form. For ductile cast irons, it was found that silicon is the most appropriate element for making solid solution. Ductile cast irons which consist of 2,8-4,5 % silicon range can be categorized by high silicon alloyed ductile cast irons. Higher than 4,5 % Si detrimentally influences the mechanical properties. Elongation at fracture drops sharply at silicon concentrations higher than 4,5 %. In addition, higher amount of silicon encourages formation of a fully ferritic matrix and makes solid solution via replacing the iron atoms in the lattice. Silicon, as the solute atoms replace the solvent atoms (iron atoms) in their lattice positions. This causes distortion of the lattice, thus dislocation motion becomes more difficult. This process causes an increase in the strength of the material. As a result, nowadays, the fully ferritic ductile cast irons with high silicon content became an attractive alternative to ferritic/pearlitic ductile cast irons.

Numerous investigations have been carried out to determine influence of high silicon content on the mechanical behavior of ductile cast iron. Björkegren et al compared machinability and hardness of silicon alloyed ferritic and ferritic/pearlitic ductile irons. They reported 10 % lower machining cost and narrower hardness scatter in the component manufactured from the ferritic grade ductile iron. Larker investigated yield strengths and ductilities of solution strengthened ferritic and ferritic/pearlitic ductile irons having ultimate strengths about 500 MPa. They obtained remarkably higher ductility and yield strength from the ferritic ductile iron as compared to the ferritic/pearlitic ductile iron. Herfurth et al also examined mechanical properties of solution strengthened ferritic continuous cast material, hydraulic blocks. Their results also showed that in comparison with ferritic/pearlitic grade ductile cast iron with same tensile strength, the elongation at fracture is doubled and the hardness range is cut in half and machinability is improved.

High silicon alloyed ferritic ductile irons are widely used in automotive industry in manufacturing of pistons, gear boxes, valves, wheel hub, suspension arms and crankshafts in cars and trucks due to their high ductility and good corrosion resistance and good castability and machinability, high absorption of the vibrations. Parts that are used in automotive industry are exposed to vibrations along with dynamic loading under service conditions. Dynamic loading can lead to failure of that material, even if the maximum stress acting is below the yield strength of material. This failure consists of crack initiation, crack propagation and final fracture. Under dynamic loading conditions crack usually initiates at the surface of the material and propagates towards into the material. After particular number of cycles, the crack length reaches the critic value that is related to fracture toughness of that material. Then, material suddenly failures when the crack reaches the critic

length. Therefore, this case makes the fatigue behaviour of ductile cast irons significant. The crack shows different propagation characteristics in different matrices. There are several investigations about fatigue behaviour of conventional ductile irons containing 1,8-2,8 % silicon. However, to our knowledge, there is little information about fatigue strength of high silicon content ductile cast iron.

In this study, fatigue behavior of EN-GJS-600-3 and EN-GJS-600-10 grade ductile cast iron was investigated. Samples were produced according to EN 1563 standard and machined for tensile, impact and fatigue tests. Microstructural characterization was made by quantitative metallography with using light microscope. Tensile tests, hardness tests and unnotch impact tests were applied to samples at room temperature. High cycle fatigue (HCF) tests were performed in a rotating bending fatigue tester operating at 50 Hz and using four point loading configuration. Following fatigue tests, S-N and P-S-N curves were plotted and endurance limit was determined. Fatigue fracture surfaces were examined by stereo microscope, scanning electron microscopy (SEM) and electron probe micro analysis (EPMA).

Results of the experiments conducted in the scope of the present thesis revealed that higher amount of silicon causes a decrease in the tensile strength and hardness, while encouraging formation of a ferritic microstructure and providing higher toughness, ductility and yield strength with respect to the lower silicon content ductile iron. In addition, higher endurance ratio is achieved by the aid of higher amount of silicon. Endurance limit of the both samples were in the same range (296 and 300 MPa). According to SEM analysis, both samples exhibited similar characteristic of fatigue fracture. The regions of the fracture surfaces can be classified as final (intergranular) fracture and crack propagation. In the transition region between final (intergranular) fracture and crack propagation localized transgranular spots were detected.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Dökme demirler düşük ergime sıcaklığı, iyi akışkanlık, döküm ve kalıp şeklini alabilme kabiliyetinin yüksek olması, ergitme işlemlerinin kolaylığı ve ucuzluğu, karmaşık geometrilere sahip parçaların tek işlemle üretilmesi, iyi işlenebilirliği, titreşim söndürme özelliğinin çok iyi olması ve aşınma ve korozyona karşı dayanıklı olması gibi üstün özelliklerinden dolayı birçok yapısal uygulamalarda ve otomotiv sanayinde yaygın olarak kullanılan bir malzeme türüdür [1].

İlk dökme demir türü olan gri dökme demirin üretimiyle döküm sektöründe önemli bir gelişme kaydedilmekle birlikte, 1940'lı yılların sonlarına doğru Millis ve arkadaşları tarafından ilk kez tanıtılan küresel grafitli dökme demir, günümüzde dökme demir türleri arasında mekanik özellikleri bakımından çeliğe en yakın tür olarak bilinmektedir [2,3].

Amerikan Dökümcüler Derneği (AFS) 2011 yılı dünya döküm üretim raporuna göre dünyada toplam 98,6 milyon ton döküm üretimi gerçekleşmiştir. Dünya döküm üretiminde 41,2 milyon ton ile Çin birinci sırada yer alırken, 10 milyon ton ile Amerika Birleşik Devletleri ikinci sırada yer almaktadır. Türkiye 1,43 milyon tonluk döküm üretimiyle Avrupa'da 4., dünyada ise 13. sırada yer almıştır. Türkiye'deki döküm üretiminin 480 bin tonunu sfero döküm oluşturmaktadır. Döküm sektöründe üretilen ürünlerin endüstride kullanım alanlarına göre dağılımında dünyada yaklaşık %32, Türkiye'de ise yaklaşık %48'lik bir oranla otomotiv sektörü birinci sıradadır [4,5].

Yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirler yaklaşık 20 yıl önce Almanya'da otomobil üreticileri tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Küresel grafitli dökme demirler %1,8-2,8 oranında silisyum içermektedir. Yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirler ise %2,8-4,5 arasında silisyum içeriğine sahiptir. Yapılan çalışmalar sonucunda %4,5'ten fazla silisyum içeriği, küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini kötüleştirmektedir. Özellikle malzemenin kopma uzaması önemli

miktarda azalmaktadır. Yüksek silisyum içeriği, küresel grafitli dökme demirin mikroyapısını tamamen ferritik yapmakta ve mukavemet artışı silisyum atomlarının α -demir içerisinde çözünerek katı çözelti sertleşmesi meydana getirmesi ile gerçekleşmektedir. Bu sayede ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demirlerin işlenmesinde bir takım problemlere yol açan; malzemenin yüzeyi ve iç bölgesinin farklı soğuma hızlarına sahip olmasından ötürü yüzey ile iç bölge arasında ferrit/perlit oranlarının farklılığı, mikroyapının tamamen ferritik olması ile ortadan kalkmaktadır. Perlit yapısının kaybolması ile malzemede mukavemet düşüşü, yüksek oranda silisyum atomlarının matris içerisinde katı çözelti yapması ile telafi edilmektedir. Ayrıca kırılgan bir yapıya sahip olan perlitin ortadan kalkması ile malzemede önemli miktarlarda süneklik ve tokluk artışı meydana gelmektedir. Bu sayede ferritik yüksek mukavemetli küresel grafitli dökme demirler, ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demirlere bir alternatif malzeme olarak piyasaya çıkmaktadır [3,6].

Küresel grafitli dökme demirler, otomotiv sektöründe krank mili, vites dişlileri, süspansiyon kolu, tekerlek poyrası gibi birçok parçanın üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe kullanılmak üzere üretilen hemen hemen her parça servis koşulları altında titreşimlere maruz kalmaktadır. Titreşimler, malzeme üzerinde tekrarlı yüklemelere sebep olmakta ve yorulma etkin hasar mekanizması olarak ön plana çıkmaktadır. Bu sebepten dolayı, üretilen malzemelerin akma mukavemeti, çekme mukavemeti, süneklik gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra yorulma davranışı da önemli bir mekanik özellik olmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, otomotiv sektöründe kullanılan EN-GJS-600-3 kalite ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demir ile EN-GJS-600-10 kalite yüksek silisyumlu ferritik küresel grafitli dökme demirlerin uzun ömürlü yorulma davranışlarını incelemek ve karşılaştırmaktır.

2. DÖKME DEMİRLER

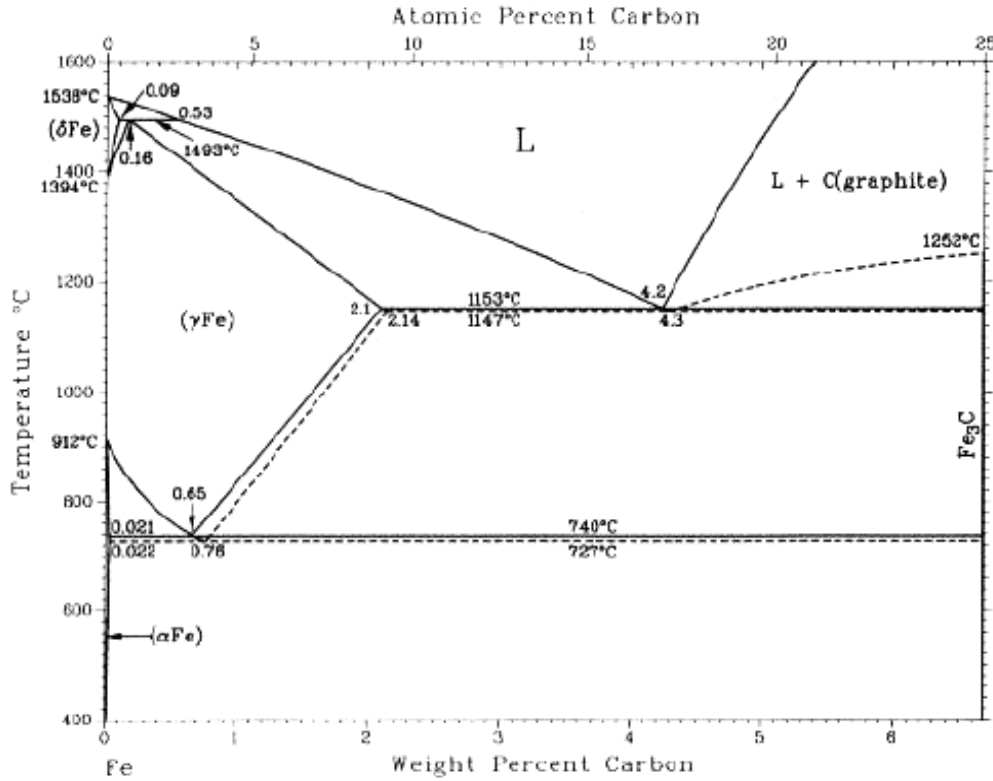
Dökme demir, genellikle yüksek fırında demir cevherinin indirgenmesi ve ergitilmesi ile elde edilen, içinde karbon ve demirin yanı sıra diğer alaşım elementlerinin de bulunduğu bir Fe-C alaşımı olan pikin ergitilip, bazı metalurjik işlemlere tabi tutulduktan sonra kalıp içerisine dökülerek katılaşması ile meydana gelen bir malzeme türüdür [1].

Dökme demirler, çeliklerde olduğu gibi birbirinden farklı demir esaslı geniş bir alaşım grubunu kapsamaktadır. Bu grubu oluşturan ana elementler demir, karbon ve silisyumdur. Genel olarak dökme demirler ağırlıkça yaklaşık %4'e kadar karbon ve %3,5'e kadar silisyum içeriğine sahiptirler. Bu elementlerin yanı sıra dökme demirlerin kimyasal bileşiminde manganez, fosfor ve kükürt de bulunur. Ayrıca dökme demirin türüne bağlı olarak eser miktarlarda nikel, krom, molibden, magnezyum, alüminyum, titanyum ve bakır gibi elementler de kimyasal bileşimde yer alabilir. Bazı durumlarda %2'den az karbon içeren bileşime sahip dökme demirler, silisyum ve diğer alaşım elementlerinin östenitin karbon çözünürlüğünü etkilemesinden dolayı ötektik reaksiyonla katılaşabilir. Bu bileşime sahip malzemeler de dökme demir olarak adlandırılır [7,8].

Dökme demirler, Şekil 2.1'de verilen Fe-C ikili denge diyagramı baz alınarak, kimyasal bileşime, soğuma hızına ve ergitme işlemlerine bağlı olarak termodinamik açıdan yarı kararlı Fe-Fe₃C (sementit) veya kararlı Fe-C (grafit) sisteminde katılaşabilir [7].

Yarı kararlı sisteme göre katılaşma gerçekleştiğinde ötektikteki zengin karbon fazı demir karbür; kararlı sisteme göre katılaşma gerçekleştiğinde ise ötektikteki zengin karbon fazı grafitir. Kararlı veya yarı kararlı ötektiğin oluşumu, kimyasal bileşim, sıvının çekirdekleşme potansiyeli ve soğuma hızı gibi birtakım faktörlere bağlıdır. Kimyasal bileşim ve çekirdekleşme potansiyeli aynı zamanda grafitleşme potansiyelini de belirler. Yüksek grafitleşme potansiyeli, yapıda zengin karbon fazı olarak grafit içeren bir yapı oluştururken, düşük grafitleşme potansiyeli ise yapıda

zengin karbon fazı olarak demir karbür oluşumuna neden olur. Bu iki ötektik tipi, mekanik özellikleri bakımından birbirinden farklılık gösterirler [2].



Şekil 2.1 : Demir – Karbon denge diyagramı [9].

Dökme demirin yapısında bulunun karbon, silisyum ve fosfor gibi alaşım elementlerinin miktarları, sıvılaşma ve katılaşma sıcaklığı ve ötektik bileşimi gibi parametreleri değiştirmekte ve bu durum ise dökme demirin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu yüzden karbon eş değeri (CE) olarak tanımlanan parametre ile bu etkinin derecesi hesaplanabilmektedir [1,7].

$$CE = \% C + \frac{\% Si + \% P}{3} \quad (2.1)$$

Bu formül ile alaşımın ötektik, ötektik altı veya ötektik üstü kompozisyonda olup olmadığı test edilir. Karbon eş değerinin %4,25 olması dökümün ötektik, %4,25'ten az olması dökümün ötektik altı, %4,25'ten fazla olması ise dökümün ötektik üstü bileşime sahip olduğunu gösterir [1,7].

2.1 Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Dökme demirler kimyasal bileşim, soğuma hızı, katılaşma şekli ve mikroyapıdaki değişikliklere göre sınıflandırılırlar. Dökme demirlerin tarihteki ilk sınıflandırılması kırılma şekline göre yapılmıştır. Buna göre iki tip dökme demir vardır [8]:

1. *Beyaz Dökme Demir*: Kırılma, demir karbür (sementit) plakaları boyunca gerçekleştiğinden dolayı kırılma yüzeyi beyaz ve kristalin görünümdedir. Bu yapı, yarı kararlı katılaşmanın (Fe_3C ötekiği) sonucudur.
2. *Gri Dökme Demir*: Kırılma, grafit plakaları boyunca gerçekleştiğinden dolayı kırılma yüzeyi gri renktedir. Bu yapı, kararlı katılaşmanın (grafit ötekiği) sonucudur.

Zamanla metalografi ve dökme demirler hakkında yeni bilgilere ulaşılnca mikroyapısal özelliklere dayanan başka sınıflandırmalar da yapılmıştır. Bunlardan en önemlisi matris yapısına ve grafit şekline göre yapılan sınıflandırmalardır. Grafitler, lamel halinde, küresel biçimde, yumru veya temperlenmiş halde bulunabilirler. Matris ise, ferritik, perlitik, östenitik, martensitik veya beynitik yapıda olabilmektedir. Çizelge 2.1’de dökme demirlerin ticari isimlerine, mikroyapısına ve uygulanan nihai işlemine göre sınıflandırması verilmiştir [8].

Çizelge 2.1 : Dökme demirlerin ticari adı, mikroyapısı ve kırılma görünümüne göre sınıflandırılması [8].

Ticari Adı (dökme demir)	Karbonca Zengin Faz	Matris	Kırılma Görünümü	Nihai İşlem
Gri	Lamel grafit	Perlit	Gri	Katılaşma
Sünek	Küresel grafit	Ferrit, Perlit, Östenit	Gümüş – Gri	Katılaşma veya ısıt işlem
Yumru grafitli	Yumru (vermiküler) grafit	Ferrit, Perlit	Gri	Katılaşma
Beyaz	Sementit	Perlit, Martensit	Beyaz	Katılaşma veya ısıt işlem
Benekli	Lamel grafit + sementit	Perlit	Benekli	Katılaşma
Temper	Temperlenmiş grafit	Ferrit, Perlit	Gümüş – Gri	Isıt işlem
Östemperlenmiş	Küresel grafit	Beynit	Gümüş – Gri	Isıt işlem

Çizelge 2.2’de ise gri, yumru grafitli, sünek, beyaz ve temper dökme demirlerin kimyasal bileşimine ait alt ve üst sınır değerler verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Alaşımsız dökme demirlerin kimyasal bileşim aralığı [8].

Dökme Demir	Ağırlıkça % 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
Yumru grafitli	2,5-4,0	1,0-3,0	0,2-1,0	0,01-0,1	0,01-0,03
Sünek	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

Dökme demirler, çeliklere göre farklı kimyasal bileşime sahip olmalarından dolayı; özellikle yüksek karbon içeriğinden dolayı kırılgan bir yapıya sahiptirler. Bu yüzden düşük süneklığe sahiptirler ve bundan dolayı sıcak veya soğuk şekilde şekillendirilemezler. Buna rağmen dökme demirler, aşınma ve korozyona karşı yüksek direnç, yüksek mukavemet ve yüksek işlenebilme kabiliyeti gibi üstün özelliklerinden dolayı oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. Çizelge 2.3’te bazı dökme demir türlerine ve dökme çeliğe ait çeşitli özelliklerin karşılaştırması verilmiştir [7].

Çizelge 2.3 : Gri Dökme Demir (GDD), Beyaz Dökme Demir (BDD), Temper Dökme Demir (TDD), Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD) ve Çelik Döküm (ÇD) arasında çeşitli özelliklerin karşılaştırılması [7].

Özellik	GDD	BDD	TDD	KGDD	ÇD
Dökülebilirlik	5	3	4	5	2
İşlenebilirlik	5	-	4	4	3
Güvenilirlik	1	2	3	5	4
Titreşim Söndürme Kabiliyeti	5	2	4	4	2
Yüzey Sertleşebilirliği	5	-	5	5	3
Elastisite Modülü	3	-	4	5	5
Darbe Direnci	1	-	3	4	5
Aşınma Direnci	3	5	2	4	1
Korozyon Direnci	5	4	4	5	2
Mukavemet/Ağırlık Oranı	1	-	2	5	3
Üretim Maliyeti	5	5	3	4	2

(1: En kötü, 5: En iyi)

3. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

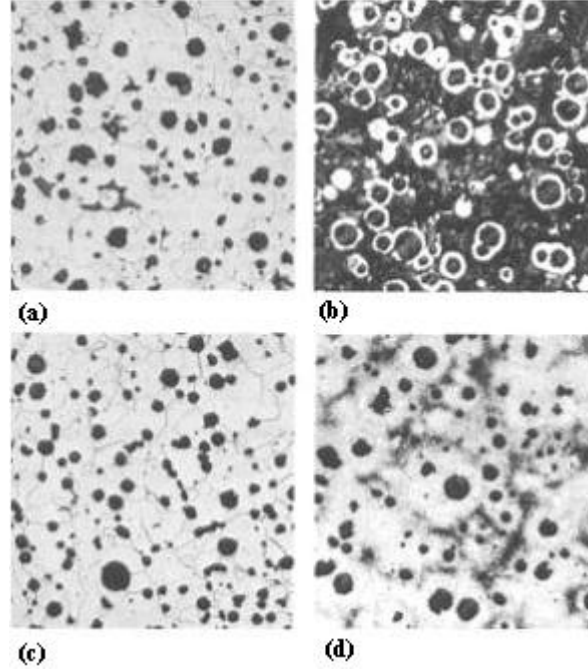
Küresel grafitli dökme demirler, British Cast Iron Research Association (BCIRA) ve International Nickel Company (INCO) tarafından birbirinden bağımsız olarak geliştirilmiş ve 1948 yılında Amerikan Dökümcüler Derneği'nin yıllık toplantısında tanıtılmış olup, önemi gün geçtikçe artan malzeme grubudur. Amerikan Dökümcüler Derneği (AFS) 2011 yılı dünya döküm üretim raporuna göre dünyada toplam 98,6 milyon tonluk döküm üretiminin %26,5'ini sfero döküm oluşturmaktadır. Türkiye'de ise 1,43 milyon tonluk döküm üretiminin %33,6'sını sfero döküm oluşturmaktadır [5,10].

Küresel grafitli dökme demirler (KGDD), nodüler, sfero veya sünek dökme demir olarak da adlandırılmaktadır. Küresel grafitli dökme demir adını, yapısındaki küreler halde bulunan grafitten almıştır. Dökümden önce dökme demirin kimyasal bileşimine ilave edilen magnezyum veya seryum gibi nadir toprak elementleri vasıtasıyla, grafitler küresel halde çökerler. Grafitlerin küre haline gelmesi ayrıca bir ısıtım işlemi gerektirmez. Gri dökme demirden temel farkı grafitlerin şeklidir. Ayrıca yapıdaki küresel grafitler, matriste bir süreksizliğe sebep olmayarak yükleme durumunda grafitin etrafında gerilme yoğunlaşması oluşturmazlar. Bundan dolayı küresel grafitli dökme demirlerin sünekliği, tokluğu ve mukavemeti diğer dökme demir türlerine göre daha yüksektir. Ayrıca küresel grafitli dökme demirlere ısıtım işlemi uygulanarak mekanik özellikleri geliştirilebilir [2,11].

Küresel grafitli dökme demirlerin matrisi ferritik, perlitik, ferritik/perlitik veya beynitik olabilmektedir. Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri grafitin şekli ve matrisin yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Şekil 3.1'de farklı matrislere sahip küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapıları gösterilmiştir [10].

Perlitik matris, adi kimyasal bileşime sahip ve kesit kalınlığı 50 mm'ye kadar olan iş parçalarında görülmektedir. Malzeme sert ve mukavemetli olup, gri dökme demirin iki katı çekme mukavemetine sahiptir. Ferritik matris yapabilmek için üç yol mevcuttur. Bunlar; kimyasal bileşime ağırlıkça %0,2 magnezyum karbür alaşımı eklemek, perlitik dökme demiri tavlama veya katılaşmayı çok yavaş bir şekilde

gerçekleştirmektedir. Beynitik yapıyı elde etmek için ise, küresel grafitli dökme demire su verilip temperleme işlemi uygulanır. Bu sayede yüksek mukavemet ve sertlik değerleri elde edilebilir [12].



Şekil 3.1 : Küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısı: (a) kaba döküm ferrit, (b) kaba döküm perlit; 255HB, (c) ferrit yumuşatma tavı 3h, 700°C, (d) perlit yağda su verilip 255HB’e temperlenmiş, (hepsi; %2 Nital, x100) [8].

Alaşımsız sfero dökümün kimyasal bileşimi, gri ve temper dökme demirden farklılık gösterir. Sfero döküm için kullanılacak hammaddeler yüksek saflıkta olmalıdır. Gri, temper ve küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal bileşim aralıkları Çizelge 3.1’de verilmiştir [8].

Çizelge 3.1 : Gri, temper ve küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal bileşimi [8].

Dökme Demir	Kimyasal Bileşim (ağ.%)										
	TC ^(a)	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	Ce	Mg
Gri	3,25	0,50	1,80	0,05	0,05	0,05	0,15	0,12 maks.	0,15 maks.	...	...
	-	-	-	-	-	-	-				
Temper	3,50	0,90	2,30	0,45	0,20	0,10	0,40	0,03 maks.	0,05-0,07	...	...
	-	-	-	-	-	-	-				
Sünek	2,45	0,35	1,40	0,04	0,05	0,03	0,03	0,03 maks.	0,002 maks.	0,005	0,03
	-	-	-	-	-	-	-				
	2,55	0,55	1,50	0,07	0,30	0,10	0,40	0,03 maks.	0,002 maks.	0,20 ^(b)	0,06
	-	-	-	-	-	-	-				
	3,60	0,15	1,80	0,03	0,05	0,01	0,15	0,03 maks.	0,002 maks.	0,20 ^(b)	0,06
	-	-	-	-	-	-	-				
	3,80	1,00	2,80	0,07	0,20	0,10	1,00	0,03 maks.	0,002 maks.	0,20 ^(b)	0,06
	-	-	-	-	-	-	-				

(a) TC, toplam karbon.

(b) Tercihen.

Küresel grafitli dökme demirler, gri dökme demirlerin avantajlarından olan iyi dökülebilme, düşük ergime sıcaklığı ve iyi işlenebilirlik gibi özelliklere sahip

olmakla birlikte, çeliğin avantajlarından olan yüksek mukavemet, yüksek süneklik, yüksek tokluk ve sertleşebilirlik gibi üstün özelliklere de sahiptir [10].

3.1 Katılaşma ve Grafit Oluşumu

Küresel grafitli dökme demirin katılaşması, gri dökme demirin katılaşmasına benzemektedir. Aynı karbon eş değerlerinde küresel grafitli dökme demirin katılaşması daha yüksek sıcaklıklarda başlar. Likidüs eğrisinin altına inildiğinde küresel grafit, ostenit kabuğu ile örtülüdür ve ötektik sıvı sadece ostenit fazı ile temas halindedir. Bu tür katılaşma neoötektik katılaşma olarak adlandırılır. Küresel grafitlerin büyüebilmesi için, karbonun ostenit kabuğundan içeriye doğru difüze olması gerekmektedir. Bir yayılım durumu söz konusu olduğundan katılaşma gri dökme demire göre daha yavaş gerçekleşmekte ve neoötektik katılaşma aralığı 49°C kadar olabilmektedir. Bu sebepten dolayı, küresel grafitli dökme demirlerin katılaşmasında, ötektik sıvı gri dökme demirlere göre daha geniş aralıkta ve daha düşük sıcaklıklarda mevcut olabilmektedir. Ostenit kabuğu içerisinde küresel grafit yapısı bir hücre olarak kabul edilebilir ve neoötektik büyüme başladıktan sonra başka küresel grafit çekirdeklenmesi olmaz; dolayısıyla katılaşmanın başlangıcında küresel grafit tanelerinin sayısı belirlenmiş olur. Ötektoid sıcaklığına kadar mevcut küresel grafitlerin üzerine karbon birikmesi olur ve bu sayede küresel grafitler büyür [10].

Ötektoid sıcaklığının altına inildiğinde ostenit fazının dönüşümü ile matris belirlenir. Matris, soğuma hızına ve kimyasal bileşime bağlı olarak değişir. Matris içerisinde tamamen küresel halde grafit elde edebilmek için belirli sayıda kürenin mevcut olması gerekir. Eğer yeterli sayıda küre mevcut değilse, karbonun difüzyonu zorlaşır ve bunun sonucunda işlem değişkenlerine ve bileşime bağlı olarak lamel şekilli grafitler veya demir karbürler oluşur. Bu olay, küresel grafitli dökme demirlerde istenilmeyen bir durumdur [10].

Küresel grafitli dökme demirlerin üretiminde sıvı işlemi olarak tanımlanabilecek iki işlem vardır: küreselleştirici ilavesi ve aşılama. Günümüzde en verimli ve ekonomik küreselleştirici element olarak magnezyum (genellikle bir miktar kalsiyum, seryum ve bazı diğer nadir toprak metalleriyle birlikte) tercih edilmektedir. Bileşime eklenecek magnezyum miktarı, ana bileşimdeki kükürt ve oksijen miktarına doğrudan bağlıdır. Çünkü magnezyum, kükürtle birleşerek magnezyum sülfür ve oksijenle birleşerek magnezyum oksit yapabilmektedir. Bu durumda bileşime ilave

edilen magnezyum, küreselleştirme görevini yerine getirememektedir. Küresel grafitli dökme demirin bileşiminde kükürt ve oksijenin çok az miktarlarda olması istenirken, bileşimde %0,015 ila %0,05 arasında magnezyum kalması uygun kabul edilir. Aşılama işleminin temel amacı, ergimiş metal üzerinde katılaşmanın başlayacağı çekirdekleri sağlamaktır. Küresel grafitli dökme demir üretiminde en yaygın kullanılan aşılایıcılar ferro silisyum alaşımlarıdır. Yeni kristallerin oluşması için aşılایıcıların katılaşma başlayana kadar katı halde kalması gerekir. Fazla sayıda çekirdeklerin varlığı fazla sayıda grafit kürelerinin oluşacağı anlamına gelir. Bu sayede lamel grafit veya demir karbür oluşumu engellenirken, aynı zamanda yüksek küreselleşme yüzdesine sahip küreler oluşur [7,10].

3.2 Alaşım Elementlerinin Etkisi

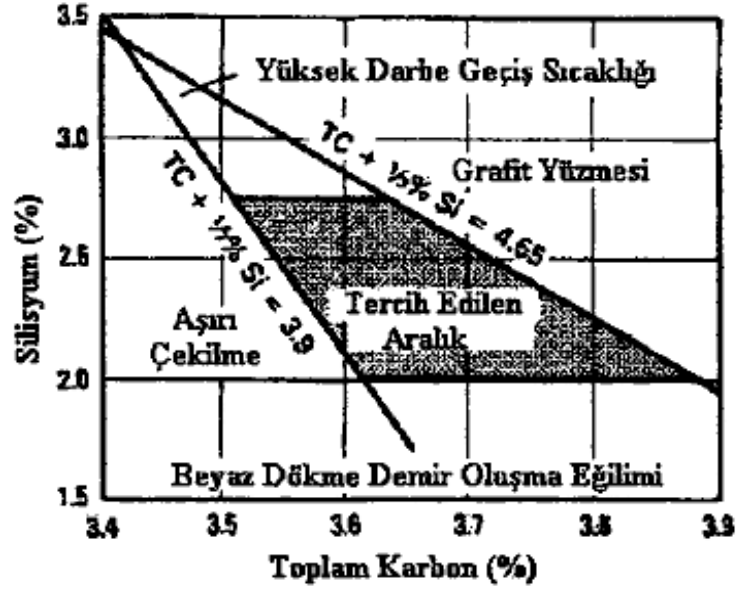
Küresel grafitli dökme demir üretiminde bazı alaşım elementlerinin etkisi aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Karbon: Bileşimde karbon miktarı %3 ila %4 arasında değişmektedir. Karbon miktarı arttıkça grafit kürelerinin sayısı artar. Ayrıca bileşimdeki karbon yüzdesinin artması dökme demirin dökülebilirliğini artırır [10].

Silisyum: Bileşimde silisyum miktarı %1,8 ila %2,8 arasında değişmektedir. Silisyum karbon eş değerini etkilediği için grafitleşmeyi artırır. Ötektoid dönüşümden sonra oluşan ferritin sertliğini artırarak dökme demirin sertliğini ve mukavemetini artırır. Ancak, sünek-gevrek geçiş sıcaklığını artırır. Bileşimde silisyum miktarı arttıkça dökme demirin sünekliği ve tokluğu düşer. Şekil 3.2’de istenen ideal özellikleri elde edebilmek için en uygun karbon ve silisyum oranları verilmiştir. [2,10].

Manganez: Tane sınırlarında karbür oluşumunu tetikleyerek segregasyona neden olur. Tokluğu ve sünekliği düşürür. Ferritik yapılarda %0,2’den az olması istenir. Ancak perlitik yapılarda bu oran %1’e kadar çıkabilmektedir [13].

Fosfor: Kırılgenliği artırır. Yapıda maksimum %0,05 olması istenir [7,13].



Şekil 3.2 : Yüksek kalitede küresel grafitli dökme demir elde etmek için gerekli karbon ve silisyum oranları [13].

Kükürt: Küreselleştirici olarak kullanılan magnezyumla birleşerek magnezyumun küreselleştirici görevini engellemesinden dolayı magnezyum işleminden önce yapıda maksimum %0,02 olması istenir [7,13].

Bu elementlerin dışında antimon, kurşun, titanyum, tellür, bizmut ve zirkonyum gibi elementler de çekirdekleşme potansiyeline etki ederler. Bu yüzden yapıda hiç bulunmamalıdır veya çok az miktarda olmaları gerekir. Krom, nikel, bakır, vanadyum ve bor gibi alaşım elementleri ise karbür yapıcı, perlitli kararlılaştırıcı ya da ferrit oluşumunu teşvik edici elementler olarak bilinir [7].

3.3 Sınıflandırma ve Mekanik Özellikler

Küresel grafitli dökme demirlerin Türk Standartları Enstitüsü (TSE)'ne göre sınıflandırılması Çizelge 3.2'de verilmiştir. DDK kısaltması "Dökme Demir Küresel grafitli" anlamına gelmektedir. DDK kısaltmasını takip eden sayı kg/mm^2 cinsinden minimum çekme mukavemetini gösterir.

Avrupa standardında küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması, malzemenin mekanik özellikleri göz önüne alınarak yapılmıştır. Çizelge 3.3'te verilen, EN 1563:2011 standardına göre yapılan sınıflandırmada akma ve çekme mukavemeti MPa cinsinden, uzama yüzde cinsinden belirtilmiştir. Bu standartta, küresel grafitli dökme demirler iki grupta toplanmıştır. Birinci grup, ferritik/perlitik küresel grafitli

dökme demirlerden, ikinci grup ise katı çözelti sertleşmesi uygulanmış küresel grafitli dökme demirlerden oluşmaktadır. İkinci grupta yer alan küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması bir sonraki bölümde anlatılacaktır. Çizelge 3.4’te ise EN 1563:2011 standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıfına göre mikroyapıları verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Küresel grafitli dökme demirlerin TSE’ye göre sınıflandırılması [10].

Kısa Gösterilişi	Çekme Muk. min. kg/mm ²	Akma Muk. %0,2, min. kg/mm ²	Kopma Uzaması l ₀ =5d ₀ min., %	Sertlik (BSD)	Darbe Direnci min., kg/cm ²		Yapısı
DDK – 40	42	28	12	140 – 201	-	-	Daha çok Ferritik
DDK – 50	50	35	7	170 – 241	-	-	Ferrit + Perlit
DDK – 60	60	40	3	192 – 269	-	-	Perlit + Ferrit
DDK – 70	70	45	2	229 – 302	-	-	Daha çok Perlitik
DDK – 80	80	50	2	248 – 352	-	-	Perlitik
DDK – 35,3 ⁽¹⁾	35	22	22	-	1,9 ⁽²⁾	1,7 ⁽³⁾	Ferritik
DDK – 40,3 ⁽¹⁾	40	25	18	-	1,6 ⁽⁴⁾	1,4 ⁽⁵⁾	

⁽¹⁾ Darbeli çalışması öngörülen tiplerdir.

⁽²⁾ -40°C’de 1,4’tür.

⁽³⁾ -40°C’de 1,1’dir.

⁽⁴⁾ -20°C’de 1,4’tür.

⁽⁵⁾ -20°C’de 1,1’dir.

Çizelge 3.3 : EN 1563:2011 standardına göre ferritik, perlitik, ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması [14].

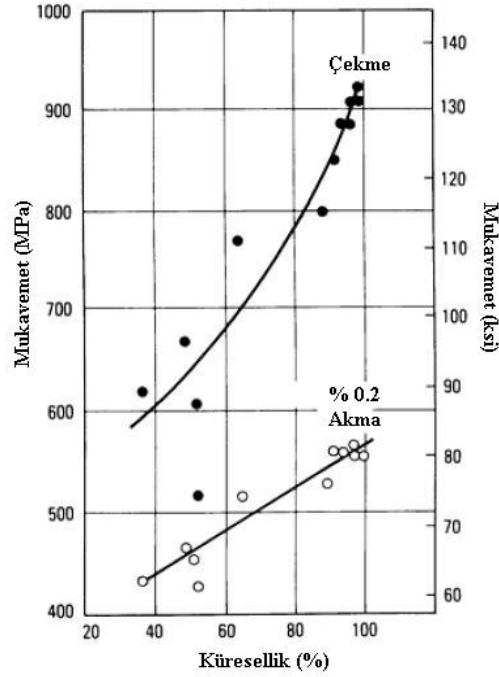
Malzeme Adı		Et Kalınlığı t mm	% 0.2 Akma Muk. R _{p0.2} MPa min.	Çekme Muk. R _m MPa min.	Uzama A % min.
Sembol	No				
EN-GJS-350-22-LT ^a	5.3100	t ≤ 30	220	350	22
		30 < t ≤ 60	210	330	18
		60 < t ≤ 200	200	320	15
EN-GJS-350-22-RT ^b	5.3101	t ≤ 30	220	350	22
		30 < t ≤ 60	220	330	18
		60 < t ≤ 200	210	320	15
EN-GJS-350-22	5.3102	t ≤ 30	220	350	22
		30 < t ≤ 60	220	330	18
		60 < t ≤ 200	210	320	15
EN-GJS-400-18-LT ^a	5.3103	t ≤ 30	240	400	18
		30 < t ≤ 60	230	380	15
		60 < t ≤ 200	220	360	12
EN-GJS-400-18-RT ^b	5.3104	t ≤ 30	250	400	18
		30 < t ≤ 60	250	390	15
		60 < t ≤ 200	240	370	12
EN-GJS-400-18	5.3105	t ≤ 30	250	400	18
		30 < t ≤ 60	250	390	15
		60 < t ≤ 200	240	370	12
EN-GJS-400-15	5.3106	t ≤ 30	250	400	15
		30 < t ≤ 60	250	390	14
		60 < t ≤ 200	240	370	11
EN-GJS-450-10	5.3107	t ≤ 30 30 < t ≤ 60 60 < t ≤ 200	310 Tedarikçi ile müşteri arasında anlaşmaya göre	450	10
EN-GJS-500-7	5.3200	t ≤ 30	320	500	7
		30 < t ≤ 60	300	450	7
		60 < t ≤ 200	290	420	5
EN-GJS-600-3	5.3201	t ≤ 30	370	600	3
		30 < t ≤ 60	360	600	2
		60 < t ≤ 200	340	550	1
EN-GJS-700-2	5.3300	t ≤ 30	420	700	2
		30 < t ≤ 60	400	700	2
		60 < t ≤ 200	380	650	1
EN-GJS-800-2	5.3301	t ≤ 30 30 < t ≤ 60 60 < t ≤ 200	480 Tedarikçi ile müşteri arasında anlaşmaya göre	800	2
EN-GJS-900-2	5.3302	t ≤ 30 30 < t ≤ 60 60 < t ≤ 200	600 Tedarikçi ile müşteri arasında anlaşmaya göre	900	2
Not: Döküm numunelerinden işlenerek elde edilen test numunelerinin mekanik özellikleri dökümün kendi özelliklerini tam olarak yansıtmayabilir.					
^a LT, düşük sıcaklıkta.					
^b RT, oda sıcaklığında.					

Çizelge 3.4 : Küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapıları [14].

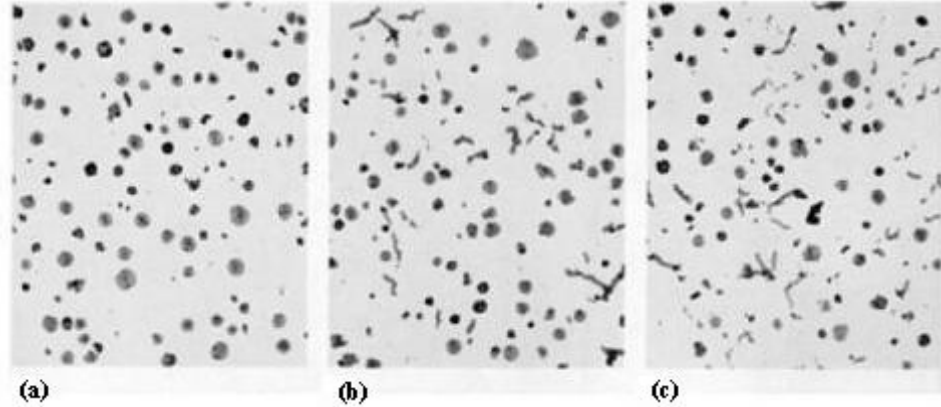
Küresel Grafitli Dökme Demir	Mikroyapı
EN-GJS-350-22	Ferrit
EN-GJS-400-18	
EN-GJS-450-10	
EN-GJS-500-7	Ferrit + Perlit
EN-GJS-600-3	
EN-GJS-700-2	Perlit
EN-GJS-800-2	Perlit veya Temperlenmiş Martensit
EN-GJS-900-2	Martensit veya Temperlenmiş Beynit ^(a)
^(a) Büyük döküm parçalarında perlit de olabilir.	

Mühendislik malzemeleri içerisinde küresel grafitli dökme demirlerin önemi, başka hiçbir demir esaslı malzemede olmayan, üstün mekanik ve dökülebilirlik özelliklerine sahip olmasıdır. Küresel grafitli dökme demirlerin özellikleri çelik ile dökme demirler arasında yer alır. Mekanik özellikler yönünden çeliğe benzerken, kimyasal ve fiziksel özellikleri yönünden dökme demirlere benzer [10,15]. Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri, matrisin türü ve grafitlerin sayısı, büyüklüğü ve küreselliği ile önemli ölçüde değişmektedir [8]. Şekil 3.3'te küreselliğe bağlı olarak çekme ve akma mukavemetinin değişimi görülmektedir. %90'dan fazla küreselleşme iyi mekanik özelliklerin elde edilmesi için gereklidir. %80 ve üzeri küreselleşme ise kabul edilebilir seviyededir. Şekil 3.4'te ise farklı küreselleşme yüzdelerine sahip küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapı fotoğrafları gösterilmiştir [13].

Küresel grafitli dökme demirlerin çekme mukavemeti 40 kg/mm² ila 80 kg/mm² arasında değişmektedir. Uzama/gerilme diyagramı adi dökme demirlerden çok çeliğinkine benzer. Akma mukavemeti, temper dökme demirinkinden çok daha yüksektir [13,15].



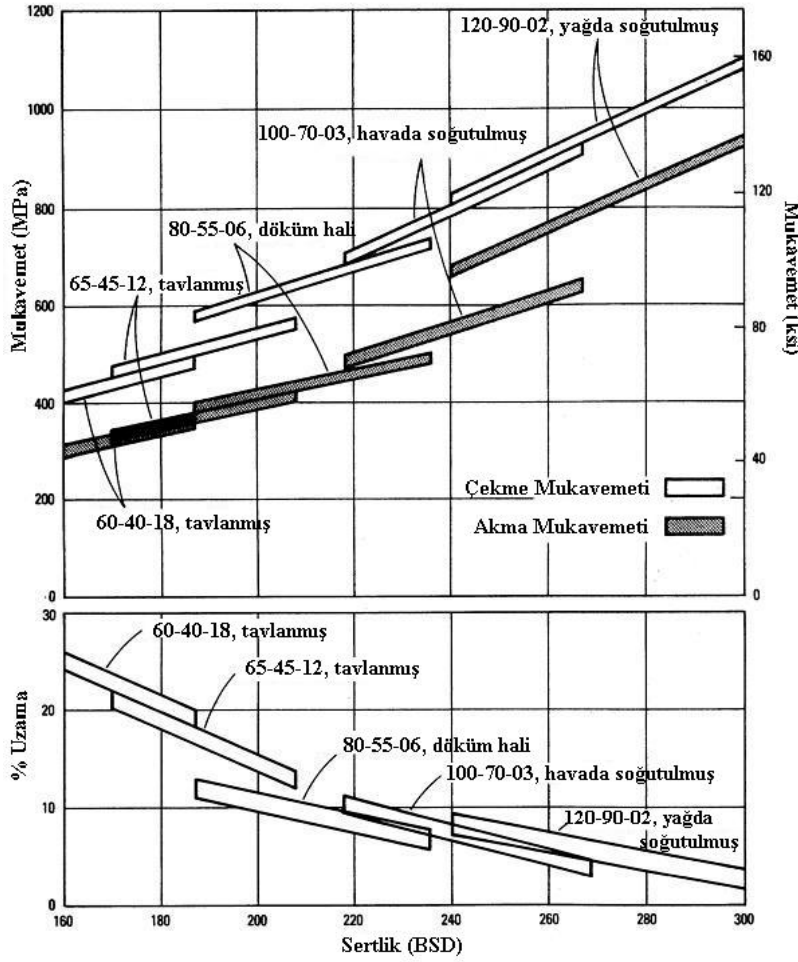
Şekil 3.3 : Küresel grafitli dökme demirde akma ve çekme mukavemetinin küreselliğe bağlı değişimi [13].



Şekil 3.4 : Farklı küreselleşmelere sahip küresel grafitli dökme demir mikroyapıları: (a) %99, (b) %80, (c) %50 [13].

Küresel grafitli dökme demirlerin basma mukavemeti çekme mukavemetinden fazladır. Basmada %0,2 akma gerilmesi, çekmedeki %0,2 akma gerilmesinin yaklaşık 1,05 katıdır. Bu değer 1,2 katına kadar çıkabilir [7,13].

Çekme deneyinden elde edilen mekanik özellikler, farklı sınıflardaki küresel grafitli dökme demirlerin bileşimlerinin ve matrislerinin farklılığından dolayı değişiklik gösterir [7]. Şekil 3.5'te farklı sınıflardaki küresel grafitli dökme demirlerin çekme ve akma mukavemeti ile yüzde uzama değerlerinin sertliğe bağlı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Farklı sınıflardaki küresel grafitli dökme demirlerin sertliğe bağlı olarak değişen akma ve çekme mukavemeti ile % uzama ilişkisi [8].

Elastisite modülü çekmede ve basmada küresel grafitin morfolojisine bağlı olarak 162-176 GPa arasında değişir [2,7,13].

Kayma mukavemeti çekme mukavemetinin yaklaşık 0,9 katıdır [7,13].

Poisson oranı birçok küresel grafitli dökme demirler için 0,275'tir [13].

Burma mukavemeti, çekme mukavemetinin yaklaşık 0,9 katıdır [8,13].

%90'ın üzerinde küreselleşme oranına sahip küresel grafitli dökme demirlerin sönüm kapasitesi çeliklerden 6-7 kat daha fazladır. Sönüm kapasitesi grafitlerin küreselleşme yüzdeleri ile doğrudan ilişkilidir. Küresellikten çok az bir sapma olması veya lamel grafit oluşumu, malzemenin sönüm kapasitesini oldukça büyük oranda etkiler [2,7,8].

Küresel grafitli dökme demirlerde yorulma dayanım sınırı, yüzey pürüzlülüğü, çentik etkisi, yükleme şekli ve parça boyutu gibi birçok parametrelere bağlıdır. Çentiksiz

ferritik küresel grafitli bir dökme demirin yorulma dayanım sınırı, çekme mukavemetinin yaklaşık 0,5 katı kadardır. Mukavemet arttıkça bu oran 0,4'e kadar düşmektedir. Ayrıca grafitlerin küreselleşme oranı azaldıkça yorulma dayanım sınırı düşer [2,13,14].

Küresel grafitli dökme demirlerin darbe direnci sıcaklığa bağlı olup, matris yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Ferritik küresel grafitli dökme demirler en yüksek tokluk ve en düşük sünek-gevrek geçiş sıcaklığı değerine sahiptir. Perlit miktarı arttıkça tokluk düşer. Ayrıca bileşimdeki silisyum ve fosfor miktarının artması sünek-gevrek geçiş sıcaklığını artırır ve küresel grafitli dökme demirin tokluğunu düşürür.

Kırılma tokluğu değeri $25-54 \text{ MPa}\sqrt{m}$ arasında değişir. Ferrit oranının artması kırılma tokluğu değerini artırır [13].

Küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirliği aynı sertlikteki gri dökme demirden ve aynı mukavemete sahip çelikten daha iyidir. Bunun yanı sıra, korozyon direnci gri dökme demirinkine eşit ve genellikle karbon çeliğine göre 5 kat daha iyidir. Deniz suyuna, alkalilere ve zayıf asitlere karşı mukavimdir [2,7,15].

Dökme demirlerin oldukça yüksek aşınma direnci en bilinen özelliklerindendir. Dinamik ve statik yükler altında gelişigüzel dağılmış gerilmelere karşı küresel grafitli dökme demir çok iyi mukavemet gösterir [15].

3.4 Kullanım Alanları

Küresel grafitli dökme demirler, üstün özelliklerinden dolayı birçok uygulama alanlarında kullanıma sahiptir ve bazı parçaların üretiminde gri dökme demirin yerini alabilmektedir. Otomotiv sektöründe krank mili, egzoz manifoldu, ön teker çatalları, direksiyon donanımının karışık parçalarında ve mafsallarında, disk frenleme parçalarında, motor biyel kollarında, avara kasnak mesnetlerinde, kampana poyralarında, kamyon akslarında, süspansiyon sistemi parçalarında ve vites kutusu çatallarında gibi birçok parçanın üretiminde küresel grafitli dökme demirler kullanılır [11,13]. Çizelge 3.5'te küresel grafitli dökme demirlerin kullanım alanları ve kullanıldığı parça adları verilmiştir.

Çizelge 3.5 :Küresel grafitli dökme demirlerin kullanım alanları [15].

Kullanım Alanı	Kullanılan Parça
Madencilik ve Metalurji	Kırıcı gövdeleri, konveyör dirsekleri, pompa gövdeleri, alüminyum ve kurşun ergitme potaları, cüruf potaları, pres makinaları, kalıplama dereceleri, sıcak hadde merdaneleri vs.
Makina	Hidrolik presler, silindirler, dövme presleri kafa ve silindirleri, krank presleri dişlileri, eğme makinaları çerçeveleri, akslar, bilumum dişliler vs.
Ziraat	Traktör parçaları, ön tekerlek çatalları, transmisyon kutuları, pedallar vs.
İnşaat	Kreyn parçaları, beton karıştırıcı parçaları, yol inşaatı makinaları vs.
Kimya	Kurutma silindirleri, valfler, pompalar, plastik ekstrüzyon silindirleri, plastik karıştırıcılar, rafineri valfleri vs.
Ulaştırma	Uçak konstrüksiyonu, diferansiyel dişli kutusu, volanlar, dişli kutuları, dişli selektör çatalları, tekerlek kalıpları vs.
Güç	Kompresör gövde ve kafaları, gaz türbini kompresör kutuları, kontrol halkaları, su türbinleri dökme parçaları, brülör gövdeleri, sıcağa mukavim fırın parçaları vs.

4. YÜKSEK SİLİSYUMLU KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

Küresel grafitli dökme demirlerin ferritik, perlitik veya ferritik/perlitik yapıda olması bazı durumlarda malzemedeki istenen özelliklerin bir arada bulunamamasına neden olmaktadır. Örneğin, yaygın olarak kullanılan ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demirler ele alındığında bazı problemlerin mevcut olduğu görülmektedir. Kimyasal bileşim ve soğuma hızına bağlı olarak küresel grafitli dökme demirlerde ferrit/perlit oranı değişebilmektedir. Yüksek soğuma hızı perlit oluşumuna katkı sağlamaktadır. Büyük hacimli malzemelerin yüzey bölgelerinde soğuma hızı yüksek, iç bölgelere doğru ise soğuma hızı azalmaktadır. Dolayısıyla malzemenin yüzeye yakın bölgelerinde perlit miktarı, iç bölgelerinde ise ferrit miktarı fazladır. Ferrit ile perlit yapılarının farklı özellikte olmalarından dolayı malzemenin mekanik özellikleri yüzey bölgesinden iç bölgelere doğru gidildikçe farklılık göstermektedir. Perlit yapısının ferrit fazına göre daha sert olması, malzemenin sertlik dağılımının 170-230 HB aralığında olmasına neden olabilmektedir. Bu durum malzemenin işlenmesi sırasında kesici uç takım ömrünün kısılmasına ve zaman kaybına neden olmaktadır. [3,16,17].

Birinci jenerasyon küresel grafitli dökme demirlerin yetersiz kalan mekanik özelliklerini geliştirmek için yapılan çalışmalar olumlu sonuçlar doğurmuştur. Bu konuda birçok çalışma yapılsa da bunlardan öne çıkanı, katı çözelti sertleştirme uygulamasıdır. Bu işlem küresel grafitli dökme demire belirli miktarda alaşım elementi ilavesi ile gerçekleşmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda, en uygun alaşım elementi olarak silisyumun kullanılması kararına varılmıştır. Küresel grafitli dökme demirin bileşimine silisyum ilavesi, yapının tamamen ferritik olmasını sağlarken, aynı zamanda silisyum atomları yapı içerisinde demir atomlarının yerini alarak katı çözelti oluşturmaktadır. Bu sayede tek fazlı yapı elde edilmenin yanı sıra katı çözelti sertleşmesi, perlitin mukavemet artırıcı görevine alternatif bir çözüm olmuştur. Bu sayede malzemenin sertlik dağılım aralığının 60 HB'den 30 HB'e düşmesi, işleme kolaylığı sağlarken, işleme maliyetini %10 civarında azaltmıştır. İşleme sırasındaki zaman kazancı ise %5-20 dolaylarındadır. Ayrıca ferritik matrisin

mukavemetinde, ferritik/perlitik yapıdaki ferritin mukavemetine göre %70 oranlarında bir artış sağlanmıştır. Matriste ferrit baskın olmakla birlikte, perlit oranı maksimum %5'e kadar ve serbest sementit miktarı maksimum %1'e kadar izin verilebilir. Bu şekilde üretilen yüksek silisyumlu ferritik küresel grafitli dökme demirler, birinci jenerasyon küresel grafitli dökme demirlerin yerine kullanılabilir hale gelmiştir [16,17,18].

Yaklaşık 30 yıl önce, Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan çalışmalar sonucu yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirler üretilmiştir. Kovacs ve arkadaşları, 1984 yılında "Yüksek mukavemetli ferritik küresel grafitli dökme demir parçaların üretimi" isimli çalışmalarına patent almışlardır [19]. 1998 yılında yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demir malzemeler, ilk kez İsveç standardında (SS 140725) yer almıştır. Aynı zamanda, Uluslararası Standart Organizasyonu (ISO) tarafından ISO 1083 standardında yer almıştır. Güncel hali ise, EN 1563:2011 standardında, katı çözelti sertleştirilmesi uygulanmış küresel grafitli dökme demirler başlığı altında yer almaktadır [6,14].

4.1 Kimyasal Bileşim

Birinci jenerasyon küresel grafitli dökme demirler olarak da bilinen ferritik, perlitik ve ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demirler %1,8-2,8 aralığında silisyum içeriğine sahiptir. İkinci jenerasyon küresel grafitli dökme demirler olarak da adlandırılan yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirler ise %2,8-4,5 aralığında silisyum içeriğine sahiptir. Karbon miktarı, karbon eş değerini sabit tutabilmek için birinci jenerasyon küresel grafitli dökme demirlere göre daha düşüktür. Diğer elementlerin bileşimi birbirine yakın değerlerdedir [6,8].

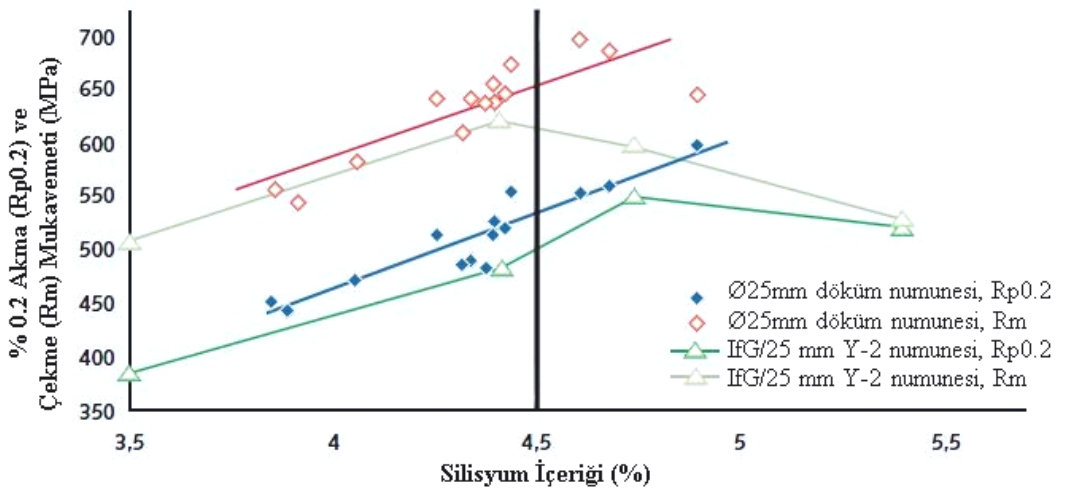
4.2 Sınıflandırma ve Mekanik Özellikler

İkinci jenerasyon küresel grafitli dökme demirler Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere, EN 1563:2011 standardına göre katı çözelti sertleştirilmesi uygulanmış küresel grafitli dökme demirler başlığı altında sınıflandırılmıştır. Birinci jenerasyonda olduğu gibi, malzemenin mekanik özellikleri göz önüne alınarak sınıflandırma yapılmıştır [14].

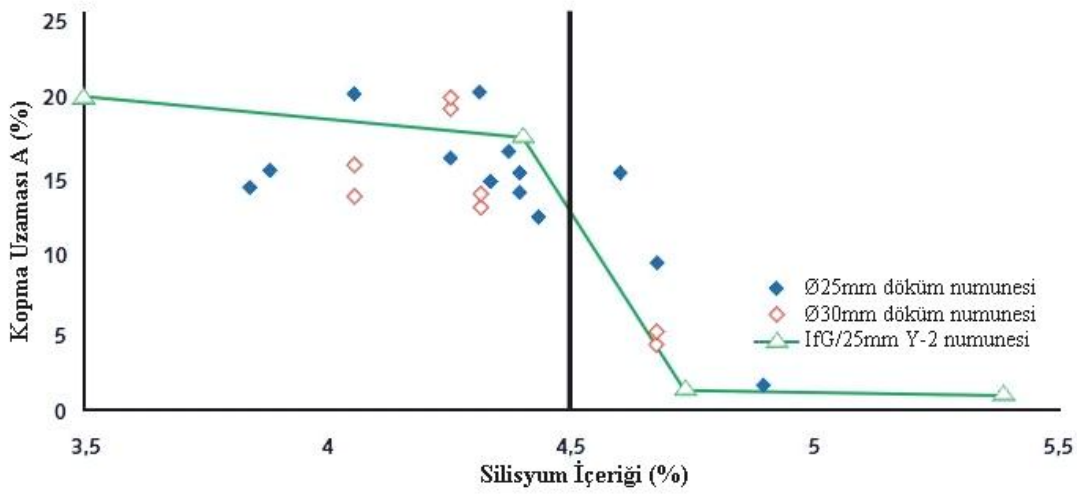
Bileşimde silisyum miktarı arttıkça malzemenin mukavemeti, kırılgenliği ve sünek-gevrek geçiş sıcaklığı artar. Şekil 4.1’de silisyum içeriğinin malzemenin mekanik özelliklerine etkisi görülmektedir. Şekil 4.2’de görüldüğü üzere, malzemenin kopma uzaması, %4,5 silisyum içeriğinden sonra keskin bir düşüş göstermesi, silisyum miktarının üst sınırını belirlemektedir [6,8].

Çizelge 4.1 : EN 1563:2011 standardına göre katı çözelti sertleştirilmesi uygulanmış küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması [14].

Malzeme Adı		Et Kalınlığı t mm	% 0.2 Akma Muk. R _{p0.2} MPa min.	Çekme Muk. R _m MPa min.	Uzama A % min.
Sembol	No				
EN-GJS-450-18	5.3108	t ≤ 30	350	450	18
		30 < t ≤ 60	340	430	14
		60 < t	Tedarikçi ile müşteri arasında anlaşmaya göre		
EN-GJS-500-14	5.3109	t ≤ 30	400	500	14
		30 < t ≤ 60	390	480	12
		60 < t	Tedarikçi ile müşteri arasında anlaşmaya göre		
EN-GJS-600-10	5.3110	t ≤ 30	470	600	10
		30 < t ≤ 60	450	580	8
		60 < t	Tedarikçi ile müşteri arasında anlaşmaya göre		
Not: Döküm numunelerinden işlenerek elde edilen test numunelerinin mekanik özellikleri dökümün kendi özelliklerini tam olarak yansıtmayabilir.					



Şekil 4.1 : Yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirlerde silisyum içeriğinin malzemenin akma ve çekme mukavemetine etkisi [6].



Şekil 4.2 : Yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirlerde silisyum içeriğinin malzemenin kopma uzamasına etkisi [6].

İkinci jenerasyon yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirler, birinci jenerasyon küresel grafitli dökme demirlere göre mekanik özellikleri bakımından bazı üstünlüklere sahiptir. Bu üstünlüklerden en önemlisi, katı çözelti sertleştirmesi ile ferritik yapının mukavemeti artarken malzemenin sünekliğinin ve tokluğunun da artmasıdır. Çizelge 4.2’de EN-GJS-600-3 ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demir ile EN-GJS-600-10 yüksek silisyumlu ferritik küresel grafitli dökme demirin bazı mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Şekil 4.3’te, katı çözelti sertleştirmesi ile malzemenin akma mukavemetinin, birinci jenerasyon küresel grafitli dökme demirlere göre arttığı gösterilmiştir [14].

Yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirlerin diğer mekanik özellikleri aşağıda verilmiştir:

Elastisite modülü 170 GPa’dır. Grafitin morfolojisine bağlı olarak değişiklik gösterebilir [14].

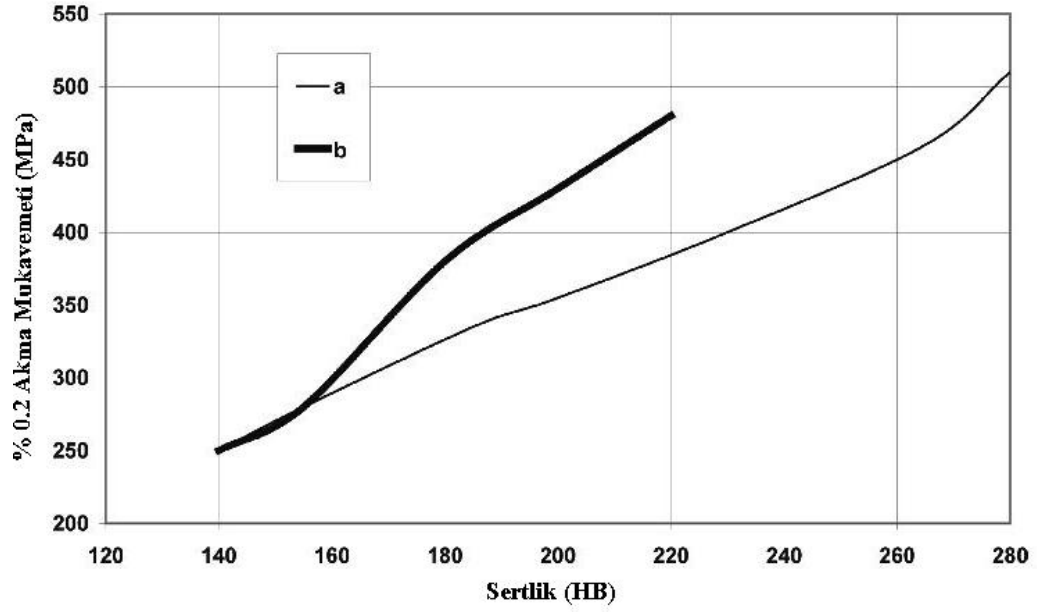
Poisson oranı 0,28 – 0,29 arasında değişmektedir [14].

Yorulma dayanım sınırı, yüzey pürüzlülüğü, çentik etkisi, yükleme şekli ve parça boyutu gibi birçok parametrelere bağlıdır. Çentiksiz yüksek silisyumlu dökme demirin yorulma dayanım sınırı, çekme mukavemetinin yaklaşık 0,45 katı kadardır. Malzemenin mukavemeti değişse bile bu değer büyük oranda değişmemektedir [14].

Kırılma tokluğu değeri 65 – 75 MPa $\sqrt{m}$ aralığında değişmektedir [14].

Çizelge 4.2 : EN-GJS-600-3 ile EN-GJS-600-10 kalite küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [14].

Malzeme	Akma Muk. %0.2 MPa min.	Çekme Muk. MPa min.	Kopma Uzaması % min.	Sertlik (HB)	Çentiksiz Darbe Direnci (23°C ± 5°C) J min.
EN-GJS-600-3	370	600	3	190 – 270	40
EN-GJS-600-10	470	600	10	200 – 230	70



Şekil 4.3 : Küresel grafitli dökme demirlerin sertliğe bağlı olarak akma mukavemetinin değişimi: (a) ferritik, perlitik ve ferritik/perlitik KGDD, (b) katı çözelti ile sertleştirilmiş KGDD [14].

5. YORULMA

Birçok makine parçaları, otomobil parçaları ve yapı elemanları servis şartları altında tekrarlanan gerilmelere (yükler) ve titreşimlere maruz kalmaktadır. Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik parçalarda, gerilmeler malzemenin statik dayanımından daha az olmalarına rağmen, belirli bir tekrarlanma sayısı sonunda genellikle yüzeyde çatlak oluşumu ve bunu takiben kopma olayına neden olur. “Yorulma” adı verilen bu olay ilk kez 1850-1860 yılları arasında Wöhler tarafından incelenmiş ve zaman geçtikçe önemi artmıştır [20].

Tasarımda malzemelerin ekonomik kullanılması gereklidir. Bu sebeple düşük güvenlik katsayılarının kullanılabilmesi için yorulma mekanizmasının incelenmesi gerekli olmuştur. Servis şartları altında malzemeye etkiyen yüklerin statikten ziyade dinamik olmasından dolayı, yorulma günümüzde önemli bir hasar nedenidir. Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’de görüldüğü gibi çeşitli alanlarda meydana gelen hasarlar istatistiksel değerlendirildiğinde yorulmanın büyük bir payı olduğu görülmektedir [21].

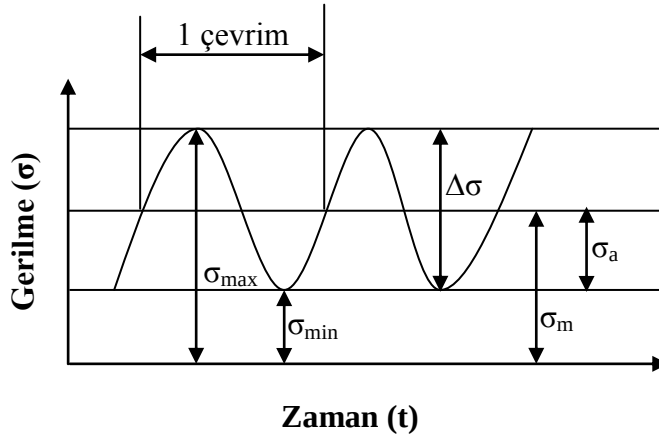
Yorulma olayında gerilmelerin alt ve üst sınır değerleri önemli olduğundan, gerilmeler sinüzoidal olarak kabul edilebilir. Şekil 5.1’de yorulma deneyinde gerilmenin zamana bağlı değişimini gösteren grafik verilmiştir. Grafik üzerinde gösterilen terimler aşağıda açıklanmıştır [21,22].

Çizelge 5.1 : Çeşitli mühendislik uygulamalarında kırılmaya neden olan olayların istatistiksel yüzdeleri [21].

Nedeni	%
Korozyon	29
Yorulma	25
Gevrek kırılma	16
Aşırı yükleme	11
Yüksek sıcaklık korozyonu	7
Gerilme korozyonu / Korozyonlu yorulma / Hidrojen gevrekliği	6
Sürünme	3
Aşınma, erozyon	3

Çizelge 5.2 : Hava taşıtı parçalarında kırılmaya neden olan olayların istatistiksel yüzdeleri [21].

Nedeni	%
Yorulma	61
Aşırı yükleme	18
Gerilme korozyonu	8
Aşırı aşınma	7
Korozyon	3
Yüksek sıcaklık oksidasyonu	2
Gerilme kopması	1



Şekil 5.1 : Yorulma deneyi tipik gerilme-zaman eğrisi ve tanımlamaları [21].

Gerilme Oranı (R): Alt ve üst gerilmelerin oranına denir ($R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$). Bu oran -1 ile +1 arasında değişir. $R = -1$ ise değişken yükleme; alt ve üst gerilmelerin değerleri aynı yönleri farklı, $R = 0$ ise dalgalı yükleme; alt gerilme sıfır, $R = +1$ ise statik yükleme; alt ve üst gerilmeler eşit denir.

Çevrim: Gerilme – zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasıdır.

Maksimum Gerilme ($\sigma_{\max}$): Uygulanan gerilmeler arasında en büyük cebirsel değeri olan gerilmedir.

Minimum Gerilme ($\sigma_{\min}$): Uygulanan gerilmeler arasında en büyük cebirsel değeri olan gerilmedir.

Ortalama Gerilme (σ_m): Maksimum ve minimum gerilmelerin cebirsel ortalamasıdır.

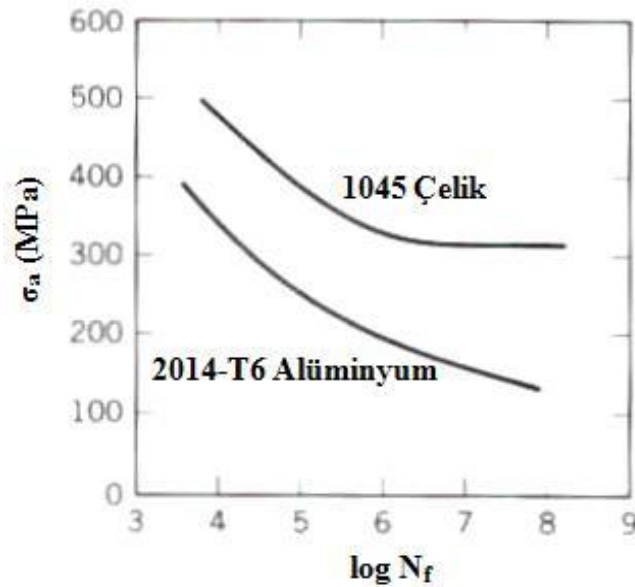
$$(\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2)$$

Gerilme Aralığı ($\Delta\sigma$): Maksimum gerilme ile minimum gerilme arasındaki cebirsel farktır. ($\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$)

Gerilme Genliği (σ_a): Gerilme aralığının yarısıdır. ($\sigma_a = \Delta\sigma / 2$)

Yorulmada kullanılan S-N (Wöhler) eğrisi ile bir malzemenin kaç çevrim (N_f) sonunda kırılacağı hesaplanabilir. Malzemenin, belirli bir çevrim sayısı sonunda kırıldığındaki çevrim sayısı yorulma ömrünü, gerilme değeri ise yorulma dayanımını veya yorulma dayanım sınırını gösterir. Demir alaşımlarında S-N eğrisi belirli bir noktadan sonra yataylaşır. Yataylaşmanın başladığı noktaya karşılık gelen gerilme değerine “Yorulma Sınırı” veya “Yorulma Dayanım Sınırı” (YDS) denir. Demir alaşımlarında $10^6 - 10^7$ çevrim sayısından sonra yataylaşma görülür. Demir dışı malzemelerde ise bu yataylaşma görülmez. Bu yüzden, demir alaşımları YDS altındaki gerilmelerde sonsuz ömüre sahipken, demir dışı malzemelerin yorulma ömrü sınırlıdır. Demir dışı malzemelerde malzemenin cinsine göre $5 \times 10^7 - 5 \times 10^8$ çevrim sayısına karşılık gelen gerilme değeri, yorulma dayanım sınırı olarak kabul edilir. Şekil 5.2’de 1045 çeliğine ve 2014-T6 Alüminyuma ait S-N eğrileri verilmiştir [20,21].

Pratikte; demir-çelik grubu malzemeler için yorulma dayanım sınırı malzemenin çekme mukavemetinin yaklaşık 0,5 katı kadardır. Malzemenin sertlik değeri kullanılarak hesap yapıldığında, yorulma dayanım sınırı malzemenin Brinell sertlik değerinin yaklaşık 0,18 katı kadardır. Demir dışı malzemeler için ise yorulma dayanım sınırı, malzemenin çekme mukavemetinin yaklaşık 1/3 katı kadardır [20,21].



Şekil 5.2 : 1045 çeliği ile 2014-T6 Alüminyum malzemelerine ait S-N eğrileri [21].

5.1 Yorulma Mekanizması

Yorulma mekanizmasının gerçekleşebilmesi için üç faktörün aynı anda olması gerekmektedir. Bu faktörler, yeterli büyüklükte dinamik yüklemenin olması, yeterli büyüklükte çekme gerilmesinin olması ve plastik şekil değişiminin olmasıdır. Bu üç faktörden en az biri olmazsa, malzemede yorulma mekanizması gerçekleşmez [23].

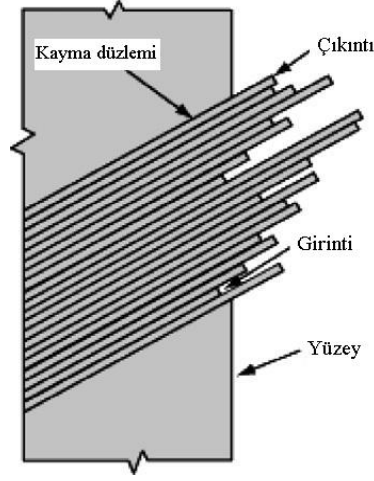
Yorulma olayı üç kademede incelenebilir: çatlak oluşumu, çatlağın ilerlemesi ve kırılma [24].

5.1.1 Çatlak oluşumu ve ilerlemesi

Yorulma, malzeme yüzeyi hassasiyetine oldukça bağlı bir prosestir. Çatlak oluşumu çevrimsel mikro plastik deformasyon tarafından kontrol edilir. Mikro plastik deformasyon ise kristal tanelerin birbiri üzerinde kayması ile gerçekleşir. Bu kaymanın gerçekleşebilmesi için tercihli düzlemlere tercihli doğrultularda etkiyen kritik kayma gerilmesinin belirli büyüklükte olması gerekir. Çevrimsel mikro plastik deformasyonun yüksek olduğu; başka bir deyişle plastik şekil değişim yoğunluğunun yüksek olduğu yerlerde çatlak başlangıcı muhtemeldir. Plastik şekil değişim yoğunluğu ise gerilme yoğunlaşması ile ilgilidir. Malzemenin şeklinden ötürü yüzey bölgelerindeki gerilmenin iç bölgelerde oluşan gerilmelere göre daha yüksek olması, yorulma çatlağının genellikle yüzeyden başlamasına sebep olmaktadır [23,24].

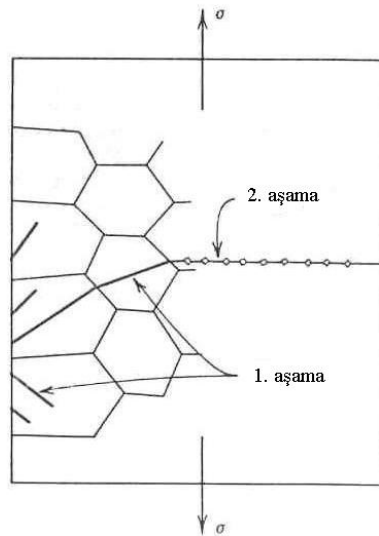
Yapılan araştırmalar sonucunda yorulma çatlaklarının birçoğunun başlangıç noktası malzeme yüzeyleridir. Çatlak başlangıcının başka bir bölgede olabilmesi için maksimum kayma gerilmesinin malzemenin o bölgesinde oluşması lazımdır. Bazı durumlarda yorulma çatlağı yüzeyden başlamaz. Bu duruma örnek olarak, karbonitürlenmiş çelik verilebilir. Malzeme yüzeyinde plastik deformasyona sebep olacak gerekli gerilme, yüzeye göre daha yumuşak olan matriste plastik deformasyona sebep olacak gerekli gerilmeye göre çok daha fazladır. Bu yüzden çatlak, yüzeydeki sert tabaka ile yumuşak matris ara yüzeyinde oluşur. Ayrıca, malzeme yüzeyinde veya iç bölgesinde gerilme yoğunlaşmasına neden olabilecek her türlü kusur çatlak başlangıcı olabilmektedir. Örnek olarak tane sınırları, içyapı inklüzyonları, yüzey inklüzyonları, poroziteler, malzeme yüzeyindeki veya iç bölgesindeki süreksizlikler ve sert ikincil fazlar çatlak başlangıcına sebep olabilmektedirler [24]. Malzemeye etkiyen maksimum kayma gerilmesi ile hareket eden dislokasyonlar, karakteristik kayma bantlarını ortaya çıkarır ve Şekil 5.3'te görülen malzeme yüzeyinde mikro

boyutta girinti ve çıkıntılara sebep olur. Malzeme yüzeyindeki bu girintiler çatlak başlangıcı noktaları olarak etki ederler ve bu nedenle yorulma çatlakları genellikle yüzeyden başlar [23,24].



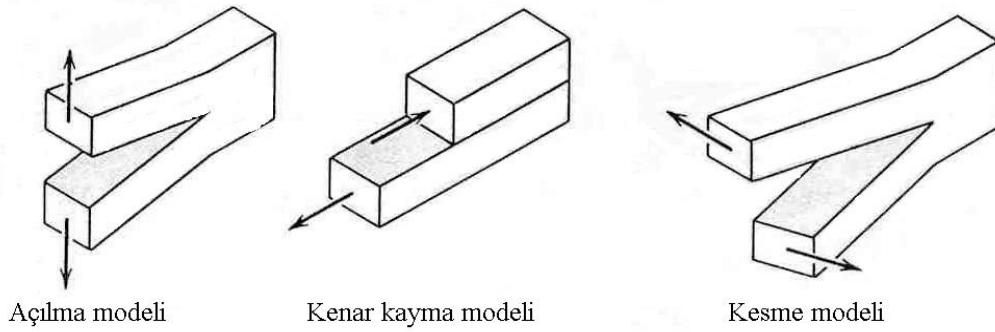
Şekil 5.3 : Malzeme yüzeyindeki girinti ve çıkıntılar [30].

Kayma gerilmesinin maksimum olduğu kayma düzlemleri boyunca çatlak oluşur. Eksenel yüklemelerde maksimum kayma gerilmesi, uygulanan gerilme ile 45° 'lik açı yapar. Bu yüzden çatlak, uygulanan gerilmeye göre 45° 'lik açı doğrultusunda ilerler. Çatlağın bu açıda ilerlemesi çatlak ilerlemesinin 1. aşamasını oluşturur. Çatlak belirli bir uzunluğa geldikten sonra, uygulanan gerilmeye dik yönde ilerlemeye başlar. Çatlağın uygulanan gerilmeye dik yöndeki ilerleme süreci ise 2. aşamayı oluşturur. 2. aşamada genellikle bir çatlak ilerler, diğer mikro çatlakların ilerlemesi 1. aşamada son bulur. Şekil 5.4'te çatlak ilerlemesinin 1. ve 2. aşaması gösterilmiştir [24].



Şekil 5.4 : Yorulma çatlak ilerlemesi aşamaları [24].

Çatlak ilerlemesinde 3 temel model mevcuttur: açılma modeli, kenar kayma modeli ve kesme modeli. Şekil 5.5'te 3 temel model gösterilmiştir [24].

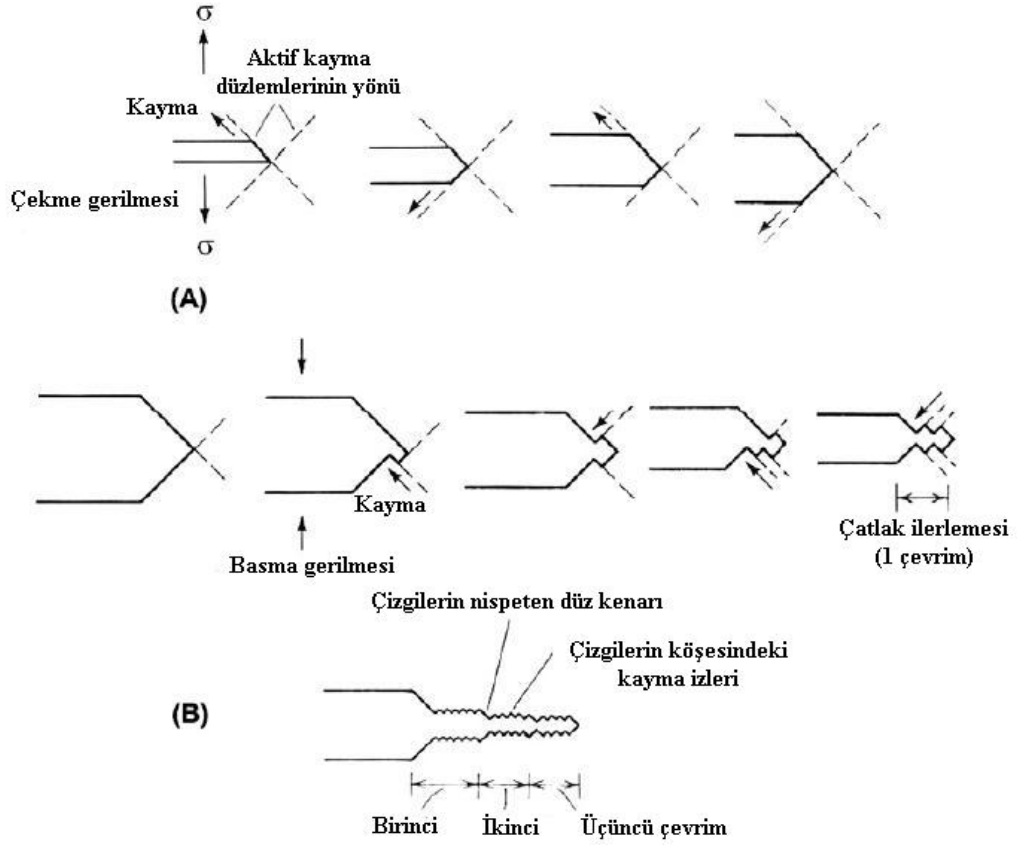


Şekil 5.5 : Çatlak ilerlemesinde 3 temel model [24].

Malzemenin geri kalanı elastik deformasyona uğrarken, gerilme yoğunlaşmasının meydana geldiği çatlak ucundaki küçük bölgede plastik deformasyon meydana gelir. Malzeme çekme mukavemetinin etkisinde iken, çatlak ucundaki kayma düzlemlerinin kayması sonucu çatlak ucu açılır. Kayma ilerledikçe çatlak ucu körelir. Gerilme şiddetinin azalması ile bazı düzlemlerin kayması sonucu çatlak ucu yeniden sivrileşir. Bu durum malzemede kalıntı elastik gerilmeleri gidererek çatlak ucunda basma gerilmesine neden olur. Çatlak ucunun açılması sırasında yeni kayma yüzeylerinin anında oksitlenmesinden dolayı çatlak ucu kapanmaz ve her çevrimde çatlak boyu uzar. Şekil 5.6'da çatlakın ilerleme kademeleri gösterilmiştir [25].

5.1.2 Yorulma kırılması

Çatlak ilerlemesi çatlakın kritik bir boya ulaşması ile son bulur. Çatlak, bu kritik boya ulaştıktan sonra malzeme aşırı yüklemekten dolayı aniden kırılır. Yorulma kırılması yüzeyi iki bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölge, yorulma çatlakının ilerlediği pürüzsüz bölge, ikinci bölge ise nihai kırılmanın gerçekleştiği pürüzlü-yarıklı bölgedir. Yorulma çatlakının ilerlediği pürüzsüz bölgede kumsal çizgileri olarak adlandırılan duraklama çizgileri bulunabilir. Bu duraklama çizgileri yükün değişimi, makinanın hızının değişimi gibi durumlarda çatlak ilerleme hızlarının değişmesi, dolayısıyla çatlak uçlarındaki oksidasyonun farklı şiddette olmasından kaynaklanır. Bu duraklama çizgileri, yorulma çatlakının ilerlemesi sırasındaki, çeşitli kademelerde, çatlak cephesinin aldığı şekiller hakkında bilgi verir. Duraklama çizgileri çevrim çizgileri ile karıştırılmamalıdır. Bir yorulma kırılmasının karakteristik özellikleri Şekil 5.7'de şematik olarak gösterilmektedir [21,27].



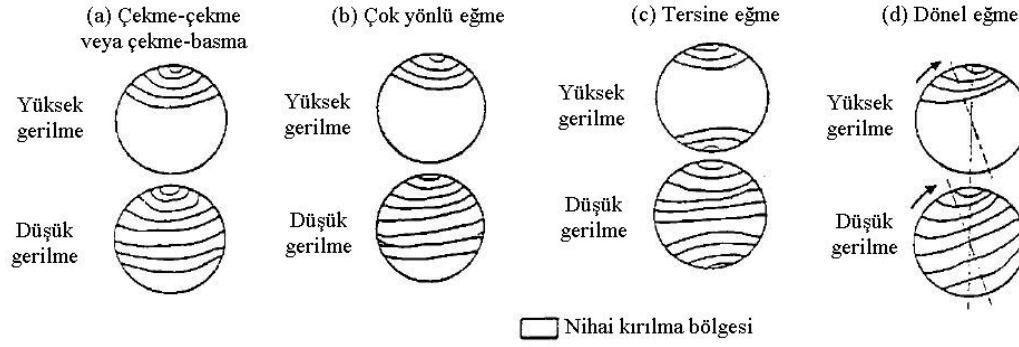
Şekil 5.6 : Dinamik yükleme altında çatlağın ilerlemesi [25].



Şekil 5.7 : Yorulma kırılmasının şematik olarak gösterimi [21].

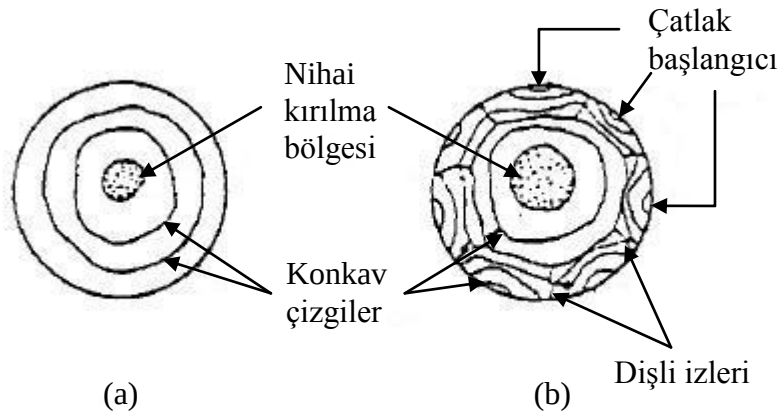
Hasar yüzeyi incelenerek yorulma çatlağının yüzeyinin nihai kırılma bölgesine göre konumu ve her iki yüzeyin büyüklüğü yardımı ile kırılma nedeni hakkında gerilmenin türü, gerilmenin yaklaşık büyüklüğü ve malzemenin çentik duyarlılığı hakkında ipuçları elde edilir [21,27].

Düşük yüklerde, malzemenin kırılması için gerekli çevrim sayısı yüksektir; yani kumsal izlerinin olduğu alan geniştir. Yüksek yüklerde ise, çatlak fazla ilerleyemez, düşük çevrim sayılarında kırılma gerçekleşir ve nihai kırılma bölgesinin olduğu alan geniş olur. Yükleme koşullarına ve gerilme şiddetine bağlı olarak yorulma kırılması yüzeylerinin görünümü Şekil 5.8’de görülmektedir [21,27].



Şekil 5.8 : Karakteristik yorulma kırılması yüzeylerinin görünümü: (a) çekme-çekme veya çekme-basma yüklemesi, (b) tek yönlü eğme, (c) tersine eğme, (d) dönel eğme [21].

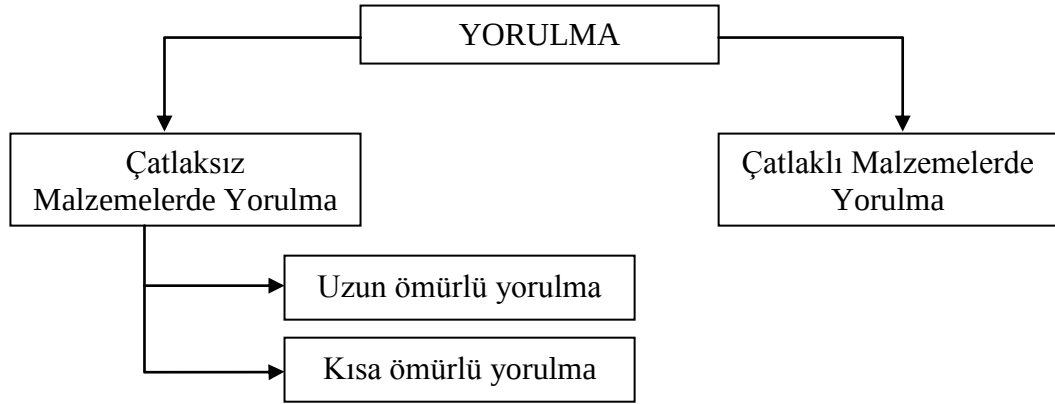
Şekil 5.9’da görüldüğü gibi, dönel eğme sırasında, yorulma çatlakları aynı anda birden fazla yerde başlayabilir ve çevreden içeriye doğru ilerler. Eğer yorulma çatlakları birkaç yerde, fakat farklı çevresel düzlemlerde başlayıp ve değişik miktarlarda ilerleyip değişik seviyelerde birleşerek yorulma kırılmasını oluşturursa, kırık yüzeyin görünümü dişliye benzer. Bu tip kırılmanın olduğu yüzeylerdeki izler, dişli izleri olarak adlandırılır [21,27].



Şekil 5.9 : Dönel eğme durumundaki yorulma kırılması yüzeyi görünümüne: (a) aynı çevresel düzlemlerde değişik yerlerde başlayan dişli izleri oluşumu, (b) farklı çevresel düzlemlerde değişik yerlerde başlayan dişli izleri oluşumu [21].

5.2 Yorulma Türleri

Malzemelerin yorulma olayı Şekil 5.10'daki gibi sınıflandırılabilir [21].



Şekil 5.10 : Yorulma türleri [21].

5.2.1 Çatlaksız malzemelerde yorulma

Çatlaksız malzemelerde yorulma, çatlak oluşumu ile kontrol edilir. Çatlak oluşumu, çatlak ilerlemesi ve nihai kırılma süreçlerini kapsar. Çatlaksız malzemelerde iki tip yorulma vardır: uzun ömürlü yorulma ve kısa ömürlü yorulma [21].

Uzun ömürlü yorulmada, $|\sigma_{\max}|$ ve $|\sigma_{\min}|$ değerleri malzemenin akma mukavemetinden düşüktür ve kırılıncaya kadar geçen çevrim sayısı 10^4 'ten fazladır. Uzun ömürlü yorulma deney sonuçları teorik olarak Basquin bağıntısı olarak ifade edilen;

$$\Delta\sigma (N_f)^a = C_1 \quad (5.1)$$

denklemleri ile yorumlanır. Burada $\Delta\sigma$; gerilme aralığı, N_f ; kırılıncaya kadar geçen çevrim sayısı, a ve C_1 ise malzeme sabitleridir.

Kısa ömürlü yorulmada, $|\sigma_{\max}|$ ve $|\sigma_{\min}|$ değerleri malzemenin akma mukavemetinden büyüktür, bu yüzden malzemede plastik deformasyon meydana gelir ve kırılıncaya kadar geçen çevrim sayısı 10^4 'ten azdır. Kısa ömürlü yorulma deney sonuçları ise teorik olarak Coffin-Manson bağıntısı olarak ifade edilen;

$$\Delta\varepsilon_{pl} (N_f)^b = C_2 \quad (5.2)$$

denklemleri ile yorumlanır. Burada $\Delta\varepsilon_{pl}$; plastik birim şekil değiştirme, N_f ; kırılıncaya kadar geçen çevrim sayısı, b ve C_2 ise malzeme sabitleridir [21].

5.2.2 Çatlaklı malzemelerde yorulma

Yorulma olayı, çatlak içeren malzemelerde çatlakların ilerlemesi ile kontrol edilir. Köprü, gemi ve büyük kaynaklı yapılar gibi çatlak içeren malzemelerde yorulma olayı önemli hale gelmektedir. Bu tip yapılarda çatlakların ilk uzunluğu, belirli bir uzunluktan kısa olmalıdır. Bu tip yorulma olayının daha iyi anlaşılabilmesi için, gerilme şiddet faktörü ve gerilme şiddet aralığı terimlerinin bilinmesi gerekir [21].

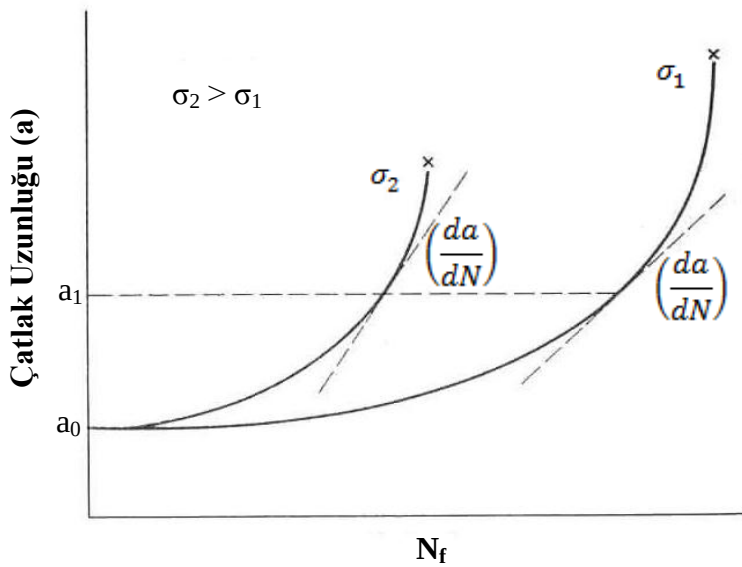
Gerilme şiddet faktörü;

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (5.3)$$

gerilme şiddet aralığı ise;

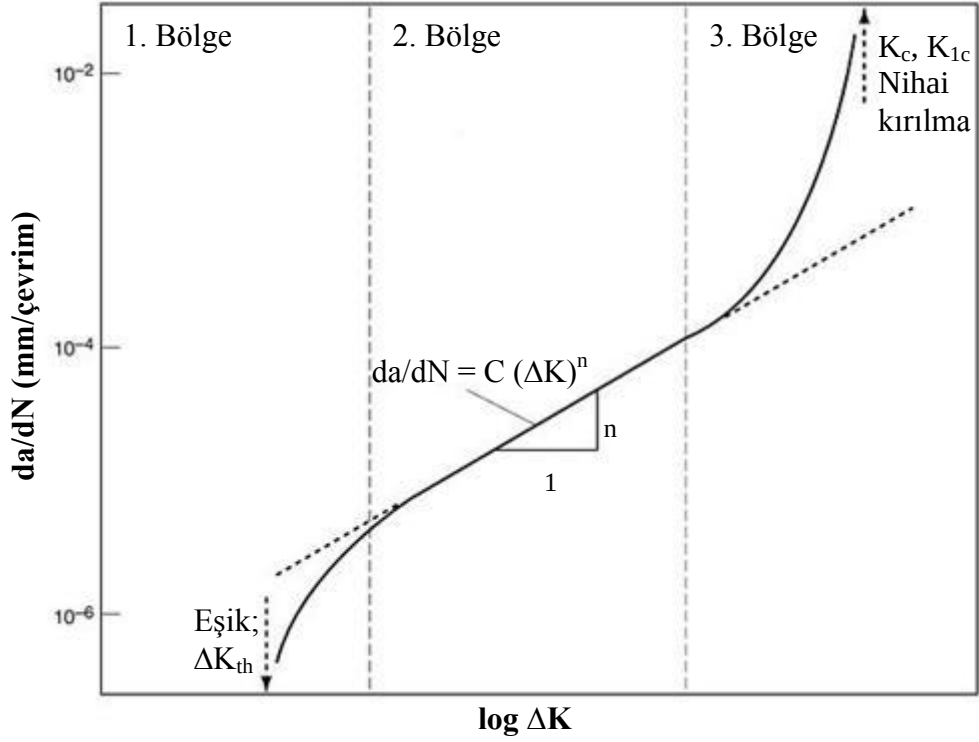
$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (5.4)$$

şeklinde ifade edilir. Burada σ ; gerilmeyi, $\Delta\sigma$; gerilme aralığını, a ; çatlak boyunu ifade eder. Burada önemli olan kavram “Çatlak büyüme hızı”dır. Şekil 5.11’de çevrim sayısı ile çatlak uzunluğunun değişimi verilmiştir. Çevrim sayısı – çatlak uzunluğu grafiğinin eğimi, o andaki çatlak büyüme hızını verir. Çatlak boyu arttıkça, çatlak büyüme hızı da artar [21].



Şekil 5.11 : Çatlak uzunluğu ile çevrim sayısı arasındaki ilişki [21].

Çatlak boyunun artmasına bağlı olarak gerilme şiddet aralığı (ΔK) da artacaktır. Gerilme şiddet aralığının artması, her çevrimde çatlak büyüme hızının (da/dN) da artmasına neden olacaktır. Şekil 5.12’de gerilme şiddet aralığına bağlı olarak çatlak büyüme hızının değişimi verilmiştir [21,26].



Şekil 5.12 : Gerilme şiddet aralığı – çatlak büyüme hızı değişimini gösteren şematik eğri [26].

Şekil 5.11’den de görüleceği gibi 1. bölgede yani; düşük gerilme şiddet aralığı değerlerinde çatlak büyüme hızı oldukça düşüktür. ΔK_{th} ; yorulmaya karşı güvenli tasarım sınırını gösterir. 2. bölgede ise gerilme şiddet aralığı ile çatlak büyüme hızı arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bu bölge kararlı durum bölgesi olarak da adlandırılır. Bu bölgede çatlak büyüme hızı ile gerilme şiddet aralığı arasında;

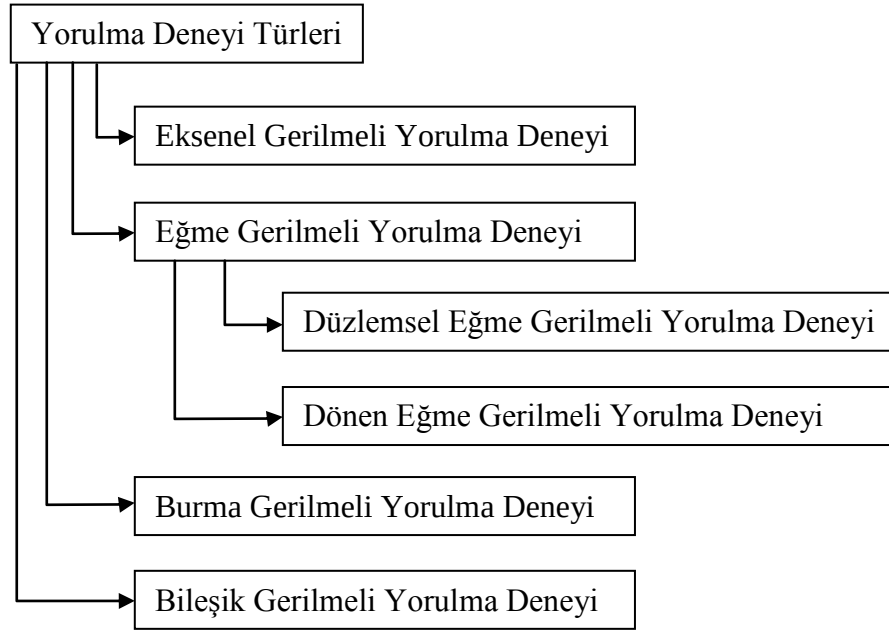
$$da/dN = A (\Delta K)^m \quad (5.5)$$

şeklinde bir bağıntı mevcuttur. Burada A; malzeme ve gerilme oranına bağlı sabit, m ise 2 ila 7 arasında bir sabittir. 3. bölgede ise gerilme şiddet aralığının artmasıyla çatlak büyüme hızı artar ve $K_{max} = K_{1c}$ olduğunda kırılma meydana gelir [21].

5.3 Yorulma Deneyleri

Servis şartları altında bir parça üzerinde oluşan gerilme değişik tür ve şiddette olabilir. Ancak yorulma deneylerinde, dinamik zorlanmalar altında malzemenin göstereceği direnç hakkında kantitatif bilgiler elde edebilmek için, uygulamada en sık rastlanan belirli gerilme türleri ele alınmıştır. Bu tür gerilmelerin düzgün periyotlarla uygulanması halinde elde edilen sonuçlar kriter olarak kabul edilerek teknik yorumlar yapılabilmektedir. Deneyde kullanılan gerilme türü, yorulma

deneyine de adını vermektedir. Gerilme türüne göre başlıca yorulma deneyi türleri Şekil 5.13'te gösterilmiştir [20].



Şekil 5.13 : Yorulma deneyi türleri [20].

5.3.1 Dönel eğmeli yorulma deneyi

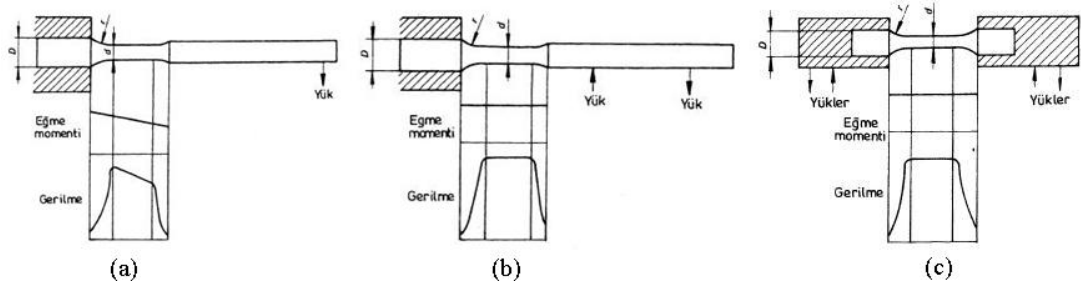
Dönel eğmeli yorulma deneyinde numune, devamlı dönen bir nötr eksene göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Dönel eğmeli yorulma deneyinin özgün yanı, her bir çevrimde numunenin tüm çevresinde hem minimum hem de maksimum gerilmelerin oluşmasıdır. Çünkü yükleme, nötr eksene göre simetriktir. Yorulma çatlağı, numunenin yüzeyindeki herhangi bir veya birden fazla noktadan başlayıp içeriye doğru ilerleyebilir. Bu durumda kırılma yüzeyinde dişli izleri olarak adlandırılan izler görülebilmektedir. Birden fazla çatlak oluşumu, yüksek gerilmenin ve dönel eğmenin varlığını gösterir [27,28].

Nötr eksen etrafında dönen numunede eğme gerilmesi oluşturmak için uygulanan yüklerin yüklenme şekli farklı olabilir. BS ISO 1143:2010 standardına göre yükler, tek noktalı, iki noktalı ve dört noktalı olacak şekilde yüklenebilir. Şekil 5.14'te bir, iki ve dört noktalı yükleme sisteminin şematik gösterimi verilmiştir. Dört noktalı yükleme sisteminde numune üzerine etkiyen gerilme,

$$\sigma = \frac{32 P l}{\pi D^3} \quad (5.6)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada, gerilme MPa cinsinden olup “ σ ” simgesi ile, yük N cinsinden olup “P” simgesi ile, moment kolunun uzunluğu mm cinsinden olup “l”

simgesi ile ve numunenin anma çapı mm cinsinden olup “D” simgesi ile gösterilmiştir [29].



Şekil 5.14 : Dönel eğmeli yorulma deneyi düzenekleri: (a) tek noktali yükleme, (b) iki noktali yükleme, (c) dört noktali yükleme [29].

Dönel eğmeli yorulmaya maruz kalan parçalara örnek olarak, hareket halindeki taşıtların aksları gösterilebilir. Aks başlıklarına (yatakları içinde kalan kısım) gelen yükün etkisi ve tekerleklerdeki tepkiden dolayı aksta eğme gerilmeleri oluşur. Ancak aks devamlı döndüğünden, aksın herhangi bir ekseni her turda bir çekme bir basma gerilmesine uğrar ve aks dönel eğmeli yorulmaya maruz kalır [20].

5.4 Yorulmaya Etki Eden Faktörler

Yorulmaya etki eden faktörler aşağıda kısaca açıklanmıştır:

Gerilmenin etkisi: Gerilme türüne göre malzemelerin yorulma dayanımları farklılık göstermektedir. Genellikle eksenel gerilme ile düzlemsel gerilmenin uygulandığı durumlarda sonuçlar birbirine yakın çıkmaktadır. Ancak burma gerilmesinin uygulanması ile bulunan yorulma dayanım sınırının, düzlemsel eğme gerilmesinin uygulanması ile bulunan yorulma dayanım sınırına oranı karbonlu çeliklerde 0,48-0,64, alaşımlı çeliklerde 0,44-0,71, demir dışı malzemelerde ise ortalama 0,52'dir. Aynı türde gerilmede, ortalama gerilme arttıkça malzemenin dayanabileceği gerilme aralığı azalır. Dolayısıyla yorulma dayanım sınırı azalır. Malzeme içerisindeki kalıcı gerilmeler de yorulma dayanım sınırını etkiler. Genelde malzeme yüzeyine bilya püskürtülerek yüzeyde basma gerilmeleri oluşturulması, malzemenin yorulma dayanımını artırır [20,21,23].

Çentik etkisi: Malzemede çentik, delik, ani değişimlerin bulunması gibi bu tür süreksizlikler gerilme yoğunlaşmasına neden olacağından çatlak başlangıcına sebep olurlar ve yorulma dayanım sınırını düşürürler [20,21].

Malzeme yüzeyinin etkisi: Yüzey pürüzlülüğü çentik etkisine benzer. Pürüzlülük ne kadar fazla ise yorulma dayanımı o kadar düşük olur. Malzeme yüzeyinin nitrür ve karbür gibi sert kaplamalarla kaplanması yorulma dayanımını artırır [20,21,23].

Çekme mukavemetinin etkisi: Genellikle malzemenin çekme mukavemeti arttıkça yorulma dayanımı artar. Ayrıca malzemenin çekme mukavemetini artıran işlemler; ısıtma işlemi, alaşımlandırma, tane küçültme gibi, malzemenin yorulma dayanımını artırır [20,21].

Sıcaklığın etkisi: Sıcaklık, malzemenin yorulma dayanımını hem artırıcı hem de azaltıcı etki gösterebilir. Sıcaklığın etkisi, malzemenin mukavemetine yapmış olduğu etkiye benzerdir. Yorulmada, sıcaklık düştükçe çentiksiz malzemelerin yorulma dayanımları artar. Fakat malzemelerin; özellikle de çeliklerin çentik hassasiyetleri artar. Sıcaklık düştükçe kritik çatlak boyu azalır ve malzeme daha gevrek olur. Düşük sıcaklıklardaki yorulma daha küçük çatlaklarla meydana gelir. Ayrıca sıcaklığın artması malzemede faz değişikliklerine neden olabilir. Faz değişikliği, malzemenin hacmini artırıp azaltacağından çatlak oluşumuna sebep olabilir ve malzemenin yorulmasını hızlandırır [20,21].

Temas yorulması: Birbirine sürekli temas halinde olan yüzeylerde temas yorulması görülür. Bu durumda gerilme, standart eğilme ve eksenel gerilme durumundan daha karışıktır. Yüzey alanlarının küçük bir kısmı temas halinde olduğu için yüksek gerilmeler oluşabilir. Oyuklanma ve yenme gibi yüzeyde süreksizliklere neden olur [20,21].

Korozyon yorulması: Korozyonlu ortam, malzemede çatlak oluşumunu tetikler. Çatlak ilerleme hızı korozyonun varlığıyla artar. Ayrıca korozyon, malzeme yüzeyinde birden fazla çatlağın oluşup ilerlemesine neden olabilir [20,21].

5.5 Yorulma Dayanımını Artırıcı İşlemler

Gerilme yoğunlaşmasına neden olabilecek her türlü çentik, ani kesit değişimi ve keskin köşelerden kaçınarak uygun geometri ve boyutlarda parça tasarlanmalıdır. Ayrıca, yüklerin malzemenin her bölgesinde oluşturacağı gerilmelerin yorulma dayanım sınırının altında olması gerekir. Malzeme yüzeyinin sertleştirilmesi veya malzeme yüzeyinde basma gerilmelerin oluşturulması yorulma dayanımını artırır. Malzemenin yüzey pürüzlüğünün oldukça düşük olması, yorulmaya karşı direnci

artırır. Çalışma ortamına göre uygun malzeme seçimi, yorulma dayanımını artırır. Örneğin, korozyonlu ortamda korozyona dayanıklı malzeme kullanılırsa yorulmaya karşı direnç sağlanmış olur. Deformasyon yaşanmasında doğan çökelti kaymayı engellediklerinden metalin yorulma ömrünü uzatabilir. Bu yöntemle mukavemetleri artırılarak alaşımlarda deformasyon yaşanmasını çabuklaştırmak için daha yüksek genlikli gerilmeler altında veya daha yüksek sıcaklıklarda bir ön işlem uygulanır [21].

5.6 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yorulma Davranışı

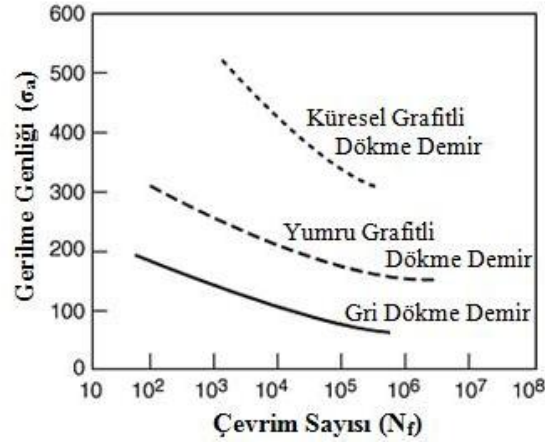
Gri dökme demirlerin üretim kolaylığını ve çeliklerin mekanik özelliklerini bünyesinde barındıran küresel grafitli dökme demirler, makine ve otomotiv sanayinde kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Küresel grafitli dökme demirler otomotiv sektöründe, birçok parçanın üretiminde kullanılmaktadır. Titreşim ve değişken yüklerin bulunduğu servis şartlarında, küresel grafitli dökme demir malzemelerin yorulma özellikleri önem kazanmaktadır [33].

Küresel grafitli dökme demirlerin yorulma davranışı, matris yapısı, matristeki küresel grafit sayısı, küreselleşme miktarı, küresel grafitlerin büyüklüğü, matrisin sertliği, matrisin mukavemeti ve yapıdaki metalik olmayan inklüzyonlar gibi birtakım parametrelere bağlıdır.

Şekil 5.15'te görüldüğü üzere dökme demir türleri arasında en yüksek yorulma dayanımına sahip malzeme grubu küresel grafitli dökme demirlerdir. Küresel grafitli dökme demirlerde, yorulma dayanımının çekme mukavemetine oranı olarak tarif edilen yorulma oranı, dövme karbonlu çeliklere göre daha yüksektir. Ayrıca gerilim derişme faktörü çelikten düşük olduğu için, özellikle şaft üretimine elverişlidir. Çizelge 5.3'te kır dökme ve dövme karbonlu çelik ile bu değerlerin karşılaştırması verilmiştir [15,26].

Küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısı, matris içerisine dağılmış grafit nodüllerinden dolayı homojen değildir. Yapının homojen olmamasından dolayı küresel grafitli dökme demirlerin düşük yükler altında kırılması beklenebilir, ama bu doğru değildir. Bu gerilme yoğunlaşmalarına neden olan nodüller ve nodüllerin çevresi çatlak oluşturmada, büyük miktarda mekanik enerjiyi absorblama yeteneğine sahiptir. Hatta grafit nodülleri çatlak oluştuktan sonra, çatlak ilerlemesini

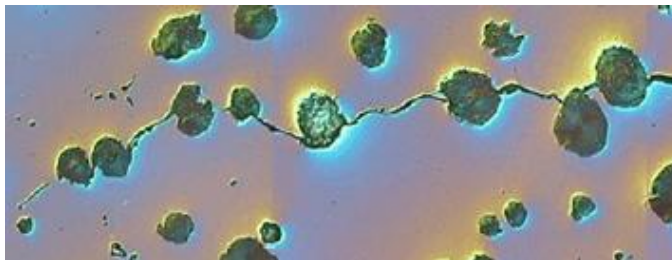
durdurucu etki oluşturabilirler. Çünkü çatlak matraste ilerlerken, karşısına engel olarak çıkan grafit nodülünü geçemez ve etrafından dolanır. Bu durum, çatlağın yolunu uzattığı için küresel grafitli dökme demirin yorulma dayanımına katkı sağlar. Bu durum gri dökme demirlerde yoktur. Yorulma çatlağı gri dökme demirlerde komşu grafit lamelleri arasında kolayca ilerler. Şekil 5.16'da ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demirde yorulma çatlak ilerlemesi gösterilmiştir [33-35].



Şekil 5.15 : Bazı dökme demir türlerinin yorulma dayanımlarının karşılaştırılması [26].

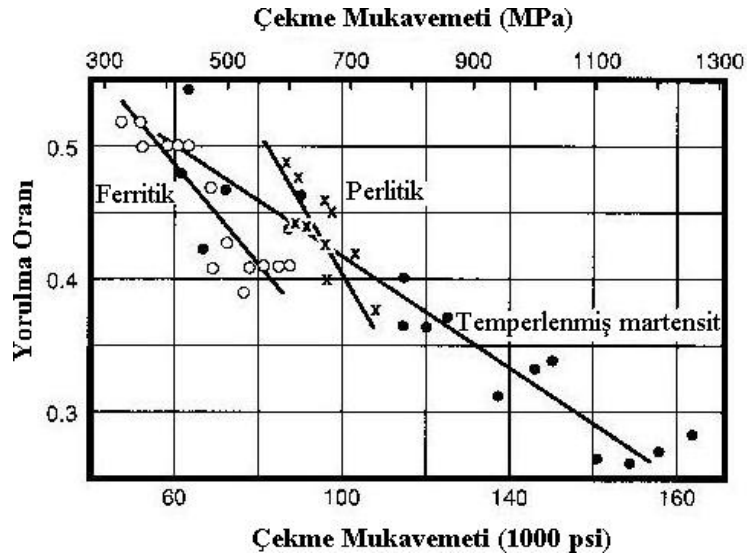
Çizelge 5.3 : Küresel grafitli dökme demir, gri dökme demir ve dövme karbonlu çeliğin yorulma değerlerinin karşılaştırılması [15].

Malzeme	Çekme muk. (kg/mm ²)	Yorulma muk.		Yorulma oranı	Gerilim derişme faktörü
		Çentiksiz (kg/mm ²)	Çentikli (kg/mm ²)		
Kır dökme	31,5	12,6	9,5	0,40	1,3
Küresel dökme	63	28,3	18	0,44	1,5
Küresel dökme (900°C su, 500°C tav.)	94,5	34,6	21,3	0,34	1,6
Dövme karbon çeliği	55,1	25,2	12,6	0,45	2,0



Şekil 5.16 : Ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demirde yorulma çatlak ilerlemesi [33].

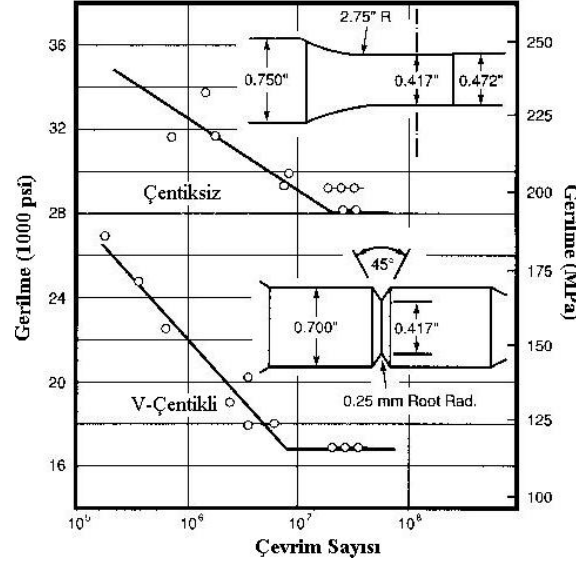
Küresel grafitli dökme demirlerde, matrisin yapısı malzemenin yorulma davranışını önemli miktarda etkiler. Malzemenin mukavemeti arttıkça yorulma dayanımı artar; bu yüzden mukavemeti yüksek olan matrise sahip küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanım sınırı daha yüksektir. Ancak, küresel grafitli dökme demirin mukavemeti arttıkça yorulma oranı düşer. Bu yüzden, en yüksek yorulma oranına sahip matris ferrittir. Şekil 5.17’de matrisin türüne ve malzemenin çekme mukavemetine bağlı olarak yorulma oranlarının değişimi verilmiştir. Yapılan bir çalışmaya göre, küresel grafitli dökme demirlerde en yüksek yorulma dayanım sınırı ince beynitik matrise sahip malzemeye ait iken, en düşük yorulma oranı ise temperlenmiş martensitik yapıda olan küresel grafitli dökme demire aittir [31,32].



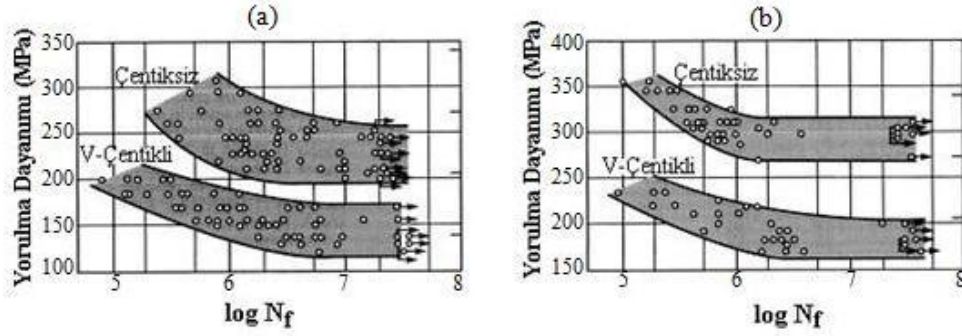
Şekil 5.17 : Küresel grafitli dökme demirlerde yorulma oranı, çekme mukavemeti ve matris yapısı arasındaki ilişki [31].

Çentikli küresel grafitli dökme demirler, çentiksiz küresel grafitli dökme demirlere göre daha düşük yorulma dayanımına sahiptir. Malzemede çentiğin varlığı, çentik uçlarında gerilme yoğunlaşmasına sebep olmakta ve yorulma çatlağının oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Şekil 5.18’de çentikli ve çentiksiz ferritik küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanım sınırları verilmiştir [31].

Şekil 5.19’da ASTM 60-40-18 kalite ferritik tavlanmış küresel grafitli dökme demir ile ASTM 80-55-06 kalite perlitik küresel grafitli dökme demirin çentikli ve çentiksiz durumdaki S-N eğrileri verilmiştir. Perlitik küresel grafitli dökme demirin yorulma dayanım sınırı, ferritik küresel grafitli dökme demire göre daha yüksektir. Ayrıca, ferritik küresel grafitli dökme demirin S-N eğrisinin daha geniş bir bant aralığını kapsadığı görülmektedir [8].



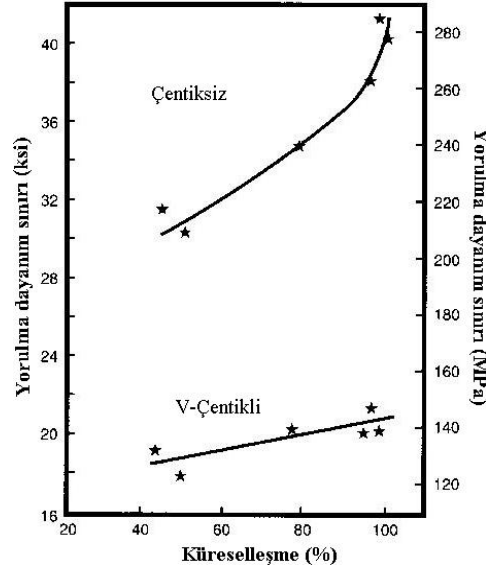
Şekil 5.18 : Ferritik küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanımına çentik etkisi [31].



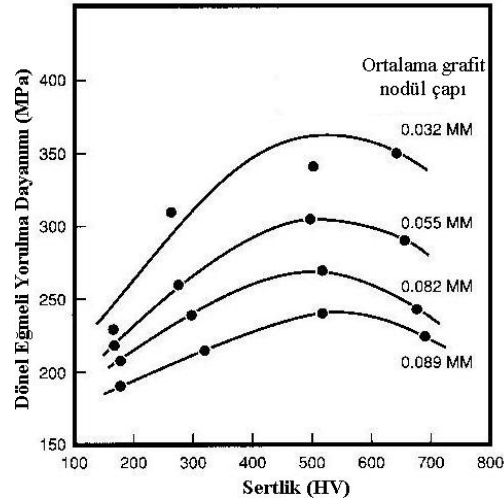
Şekil 5.19 : Çentikli ve çentiksiz küresel grafitli dökme demirlerin S-N eğrileri: (a) 60-40-18 kalite ferritik tavllanmış, (b) 80-55-06 kalite perlitik [8].

Küresel grafitli dökme demirlerde, küreselleşme miktarı ile yorulma dayanımı arasında önemli bir ilişki vardır. Şekil 5.20’de küreselleşme yüzdesine bağlı olarak perlitik küresel grafitli dökme demirin yorulma dayanımının değişimi verilmiştir. Hem çentikli hem de çentiksiz numunelerde, küreselleşme miktarı arttıkça malzemenin yorulma dayanımı artar [31].

Küresel grafitli dökme demirlerde grafit kürelerinin büyüklüğü malzemenin yorulma dayanım sınırını etkiler. Grafit kürelerinin büyüklüğü ve matris sertliği ile malzemenin yorulma dayanımı arasındaki ilişki Şekil 5.21’de verilmiştir. Grafit küreleri küçüldükçe malzemenin yorulma dayanımı artmaktadır. Aynı zamanda matris sertliği arttıkça malzemenin mukavemeti arttığından dolayı, yorulma dayanımı da artmaktadır [31].

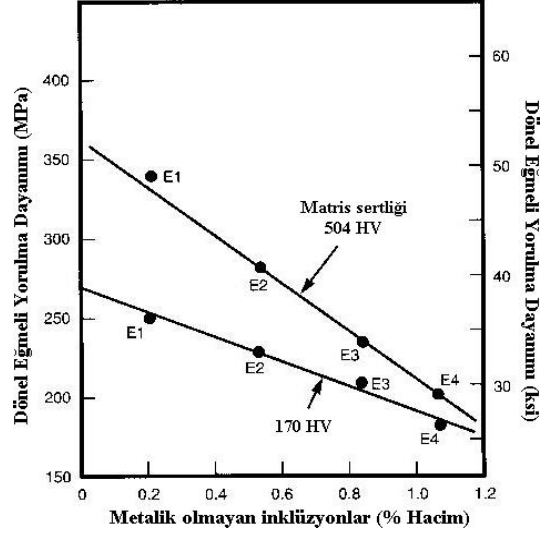


Şekil 5.20 : Çentikli ve çentiksiz perlitik küresel grafitli dökme demirde, küreselleşme yüzdesinin yorulma dayanım sınırına etkisi [31].



Şekil 5.21 : Nodül çapı ve matris sertliği ile küresel grafitli dökme demirin dönel eğmeli yorulma dayanımı arasındaki ilişki [31].

Küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanımını etkileyen bir başka parametre ise malzeme içerisindeki metalik olmayan inklüzyonların varlığıdır. Bu inklüzyonlar matriste süreksizliklere neden olarak gerilme yoğunlaşmalarına; dolayısıyla çatlak oluşumuna neden olmaktadır. Şekil 5.22’de malzeme içerisindeki metalik olmayan inklüzyonların hacimce yüzde miktarına bağlı olarak, farklı sertliklerdeki küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanımlarına etkisi gösterilmiştir [31].



Şekil 5.22 : Metalik olmayan inklüzyon miktarının ve matris sertliğinin küresel grafitli dökme demirin dönel eğmeli yorulma dayanımına etkisi [31].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, EN-GJS-600-3 kalite ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demir ile EN-GJS-600-10 kalite yüksek silisyumlu ferritik küresel grafitli dökme demirin uzun ömürlü yorulma davranışları incelenmiştir. Numunelerin mikroyapı karakterizasyonları kantitatif yöntemle optik mikroskop kullanılarak yapılmıştır. Uzun ömürlü yorulma deneyleri, dönel eğmeli yorulma test cihazında, 50 Hz frekansta ve dört noktalı yükleme sistemi kullanılarak yapılmıştır. Numunelere çekme, darbe ve sertlik testleri uygulanmıştır. Ayrıca, dönel eğmeli yorulma deneyi sonucu kırılan numunelerin yorulma kırılması yüzeyleri stereo mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve elektron prob mikro analizi (EPMA) yöntemi ile incelenmiştir. Deneysel çalışmaları 5 grupta incelemek mümkündür:

- Numunelerin üretimi
- Mikroyapı incelemeleri
- Sertlik, darbe ve çekme deneyleri
- Yorulma deneyi
- Yorulma kırılması yüzeyi incelemeleri

6.1 Numunelerin Üretimi

EN-GJS-600-3 kalite ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demir ile EN-GJS-600-10 kalite yüksek silisyumlu ferritik küresel grafitli dökme demir numuneleri EN 1563:2011 standartlarına uygun olacak şekilde Componenta Dökümcülük Tic. ve San. A.Ş. Orhangazi / Bursa fabrikasında üretilmiştir. EN 1563:2011 standardında belirtilen numune hazırlama yöntemi uygulanarak, kum kalıba döküm ile Ø25 mm ve 200 mm uzunluğunda yuvarlak çubuk şeklinde numuneler üretilmiştir. Ayrıca döküm potasındaki ergimiş metalden spektral analiz yöntemi ile kimyasal analiz yapılmıştır. Üretilen döküm çubuklar talaşlı imalat ile çekme, darbe ve yorulma test numuneleri haline işlenmiştir [14].

6.2 Mikroyapı İncelemeleri

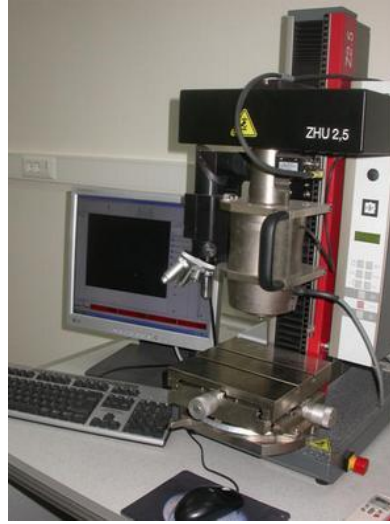
Mikroyapı incelemeleri, numunelerden kesilen parçalar üzerinden yapılmıştır. Mikroyapı incelemelerinden önce, kesilen parçalar metalografik yöntemlerle hazırlanmıştır. Kesilen parça yüzeyleri, sırasıyla 320, 600, 800, 1000, 1200 ve 2500 kalite su geçirmez SiC kâğıtlarıyla zımparalanmıştır. Ardından çuha yardımıyla 3 µm elmas çözeltisi kullanılarak parlatılmıştır. Dağlama işlemi ise, %2 Nital çözeltisi kullanılarak yapılmıştır. Hazırlanan numunelerin mikroyapı incelemeleri, dağlanmış ve dağlanmamış numuneler üzerinden, Şekil 6.1’de gösterilen Leica DM750M model optik mikroskop yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Kantitatif incelemeler ise ISO 945-1 standardına göre ve Clemex Image Analysis® yazılımı ile gerçekleştirilmiştir [36].



Şekil 6.1 : Optik mikroskop.

6.3 Sertlik Darbe ve Çekme Deneyleri

Metalografik işlemlerle hazırlanmış numuneler üzerinden 5'er adet ölçüm alınarak Şekil 6.2'de gösterilen Zwick marka universal sertlik cihazı yardımıyla ASTM E10 standardına uygun olarak Brinell sertlik ölçümü yapılmıştır. Test sırasında Ø 1 mm tungsten bilya ve 30 N yük uygulanmıştır. Çentiksiz charpy darbe deneyi Şekil 6.3'te gösterilen Mohr & Federhaff A.G. marka darbe testi cihazı yardımıyla ASTM A327 standardına uygun olarak ve 12'şer adet numune kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Darbe deneyi numuneleri 10x10x55 mm ebatlarındadır. Çekme deneyi ise, Şekil 6.4'te gösterilen Instron 8801 marka universal test cihazı ile 3'er adet çekme testi numunesi kullanılarak ASTM E8 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [37-39].



Şekil 6.2 : Sertlik ölçüm cihazı.



Şekil 6.3 : Darbe deneyi cihazı.



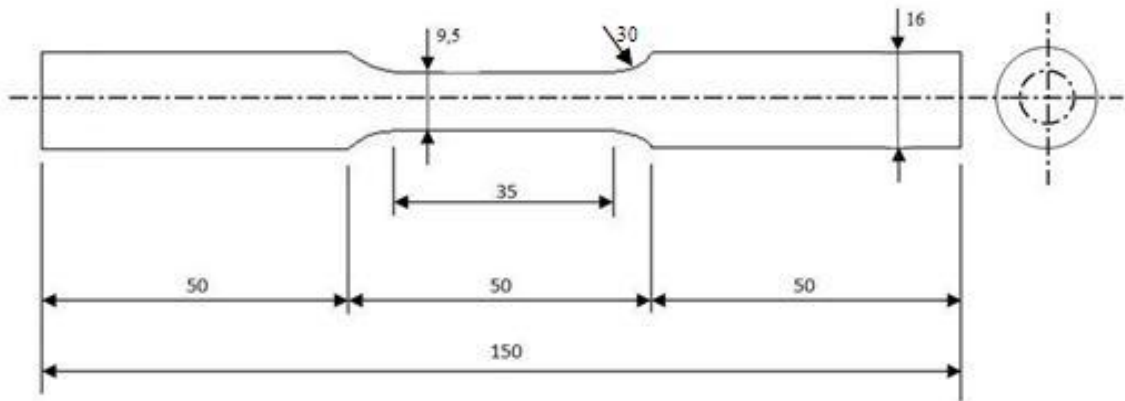
Şekil 6.4 : Çekme testi cihazı.

6.4 Yorulma Deneyi

Uzun ömürlü yorulma deneyleri Şekil 6.5'te gösterilen Walter-Bai AG marka dönel eğmeli yorulma test cihazında, BS ISO 1143:2010 standardına göre, 50 Hz frekansta, gerilme oranı (R) -1 olacak şekilde, dört noktalı yükleme sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler oda sıcaklığında yapılmıştır. Yorulma deneylerinden önce, yorulma numunelerinin yüzeyi, talaşlı imalat sırasında oluşan kalem izlerini gidermek amacıyla, sırasıyla; 320, 600, 800 ve 1000 kalite SiC kâğıdıyla zımparalanmıştır. Zımparalama işleminden sonra, yorulma numunelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü $0,06 \mu\text{m}$ olmuştur. Yorulma deneylerinde, 10^7 çevrime kadar kırılmayan numunelerin testleri durdurulmuştur. Şekil 6.6'da yorulma deneyi numunesinin ebatları verilmiştir [29].



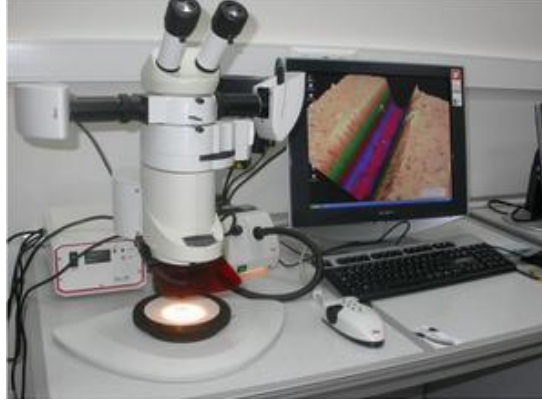
Şekil 6.5 : Dönel eğmeli yorulma deney cihazı.



Şekil 6.6 : Dönel eğmeli yorulma deney numunesi (birimler mm cinsindendir).

6.5 Yorulma Kırılması Yüzeyi İncelemeleri

Dönel eğmeli yorulma deneylerinde kırılan numunelerin yorulma kırılması yüzeyleri, Şekil 6.7’de gösterilen Leica 3D marka stereo mikroskobu, Şekil 6.8’de gösterilen Hitachi TM-1000 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Şekil 6.9’da gösterilen Cameca SX-100 marka elektron prob mikro analiz (EPMA) cihazı ile incelenmiştir.



Şekil 6.7 : Stereo mikroskop.



Şekil 6.8 : Taramalı elektron mikroskobu (SEM).



Şekil 6.9 : Elektron prob mikro analiz (EPMA) cihazı.

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Deney sonuçları;

- Kimyasal analiz ve mikroyapı inceleme sonuçları
- Sertlik, darbe ve çekme deneyi sonuçları
- Yorulma deneyi sonuçları
- Yorulma kırılması yüzeyi inceleme sonuçları

olmak üzere 4 ana başlık altında incelenmiştir.

7.1 Kimyasal Analiz ve Mikroyapı İnceleme Sonuçları

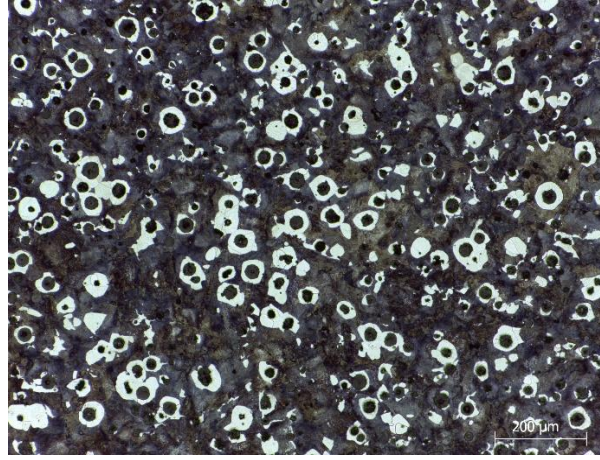
EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerinin Çizelge 7.1’de verilen kimyasal analiz sonuçlarına göre, EN-GJS-600-3 kalite ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demirde karbon ve manganez miktarı EN-GJS-600-10 kalite yüksek silisyumlu ferritik küresel grafitli dökme demire göre daha yüksektir ancak; silisyum miktarı daha düşüktür.

Çizelge 7.1 : EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerinin kimyasal analiz sonuçları.

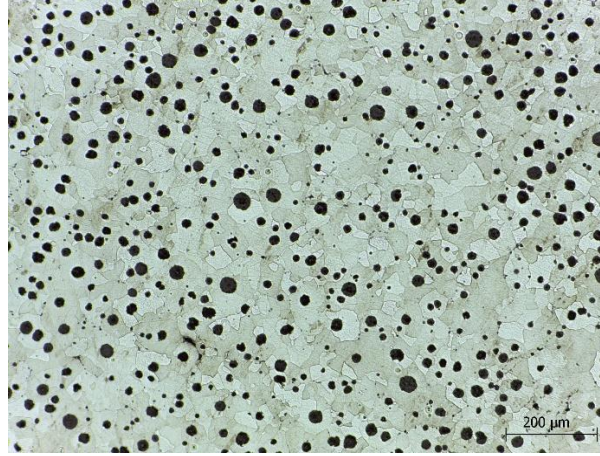
Numune	Kimyasal Bileşim % ağı.						
	C	Si	Mn	P	S	Mg	Diğer
EN-GJS-600-3	3,85	2,22	0,45	0,02	0,01	0,04	< 0,30
EN-GJS-600-10	3,03	4,10	0,28	0,03	0,01	0,06	< 0,30

Şekil 7.1’de görüldüğü gibi EN-GJS-600-3 numunesinin mikroyapısı küresel grafit, ferrit ve perlitten oluşmaktadır. Şekil 7.2’de görüldüğü gibi EN-GJS-600-10 numunesinin mikroyapısı ise küresel grafit ve ferritten oluşmaktadır. Yüksek silisyum içeriği, mikroyapıyı tamamen ferritik yapmıştır. EN-GJS-600-3 numunesinin mikroyapısı incelendiğinde, grafit küreleri ferrit fazı tarafından

çevrilmiş olup, ferrit halkaları arasındaki kısımda perlit yer almaktadır. Bu mikroyapı boğa gözü (bulls eye) olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 7.1 : EN-GJS-600-3 numunesinin mikroyapısı (x100, %2 Nital).



Şekil 7.2 : EN-GJS-600-10 numunesinin mikroyapısı (x100, %2 Nital).

ISO 945-1 standardı ve Clemex Image Analysis® yazılımı yardımıyla her iki numune için x100 büyütmede çekilmiş ve dağlanmamış 3'er adet mikroyapı fotoğrafı üzerinden yapılan kantitatif inceleme sonuçları Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.2 : EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerinin kantitatif analiz sonuçları.

Numune	Ortalama Nodül Çapı (µm)	Küresellik (%)	Küresel Grafit Sayısı (1/mm ²)	Küresel Grafit Oranı (%)	Matris
EN-GJS-600-3	21 ±1,5	90	204 ±10	9,2 ±0,6	%22 Ferrit - %78 Perlit
EN-GJS-600-10	19 ±0,7	90	223 ±15	9,8 ±0,5	%100 Ferrit

7.2 Sertlik, Darbe ve Çekme Deneyi Sonuçları

EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerinin sertlik, darbe ve çekme deneyi sonuçları Çizelge 7.3'te verilmiştir. Her iki numune de EN 1563:2011 standardının gerektirdiği minimum özellikleri sağlamaktadır.

Çizelge 7.3 : EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerinin sertlik, darbe ve çekme deneyi sonuçları.

Mekanik Özellik / Numuneler	EN-GJS-600-3	EN-GJS-600-10
% 0.2 Akma Muk. (σ_y , MPa)	438 $\pm$ 6	492 $\pm$ 9
Çekme Muk. (σ_{TS} , MPa)	771 $\pm$ 4	617 $\pm$ 8
Kopma Uzaması (e_f , %)	9,4 $\pm$ 0,6	15,6 $\pm$ 1,5
Tokluk ($\sigma_{TS} \times e_f$, J/m ³)	7,25 x 10 ⁷	9,63 x 10 ⁷
Sertlik (HB)	246 $\pm$ 3	225 $\pm$ 4
Çentiksiz Darbe Enerjisi (oda sıcaklığında, J)	51 $\pm$ 9	93 $\pm$ 21

Yüksek silisyum içerikli EN-GJS-600-10 numunesinin mikroyapısında sert ve mukavemetli bir karakterde olan perlit tanelerinin olmaması, malzemenin sertliğinde ve çekme mukavemetinde düşüş meydana getirmiştir. Ancak silisyum ile demir atomları ferrit fazı olarak katı çözelti oluşturmuştur ve katı çözelti sertleştirme malzemenin akma mukavemetinde artış sağlamıştır. Ayrıca, yapının tamamen ferritik olması, malzemenin sünekliğini, tokluğunu ve darbe direncini artırmıştır.

7.3 Yorulma Deneyi Sonuçları

Dönel eğmeli yorulma deneyinden elde edilen sonuçlar ekteki Çizelge A.1'de verilmiştir ve incelenen her iki numune için S-N (Wöhler) eğrisi çizilmiştir. Şekil 7.3 EN-GJS-600-3 numunesine ait S-N eğrisini, Şekil 7.4 ise EN-GJS-600-10 numunesine ait S-N eğrisini göstermektedir. 10⁷ çevrimde kırılmayan numuneler için testler durdurulmuş olup, bu numunelere ait veriler S-N eğrileri üzerinde ok ile belirtilmiştir. Her iki numunede S-N eğrisi, artan gerilme genliği ile kırılıncaya kadarki çevrim sayısının logaritmasının doğrusal olarak azaldığını göstermektedir. Yorulma dayanım sınırı olarak tanımlanan gerilme genliğinden daha düşük değerlerde numunelerde yorulma kırılması görülmemiştir. Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'e göre EN-GJS-600-3 numunesi 300 MPa, EN-GJS-600-10 numunesi ise 296 MPa yorulma dayanım sınırı değerlerine sahiptir.

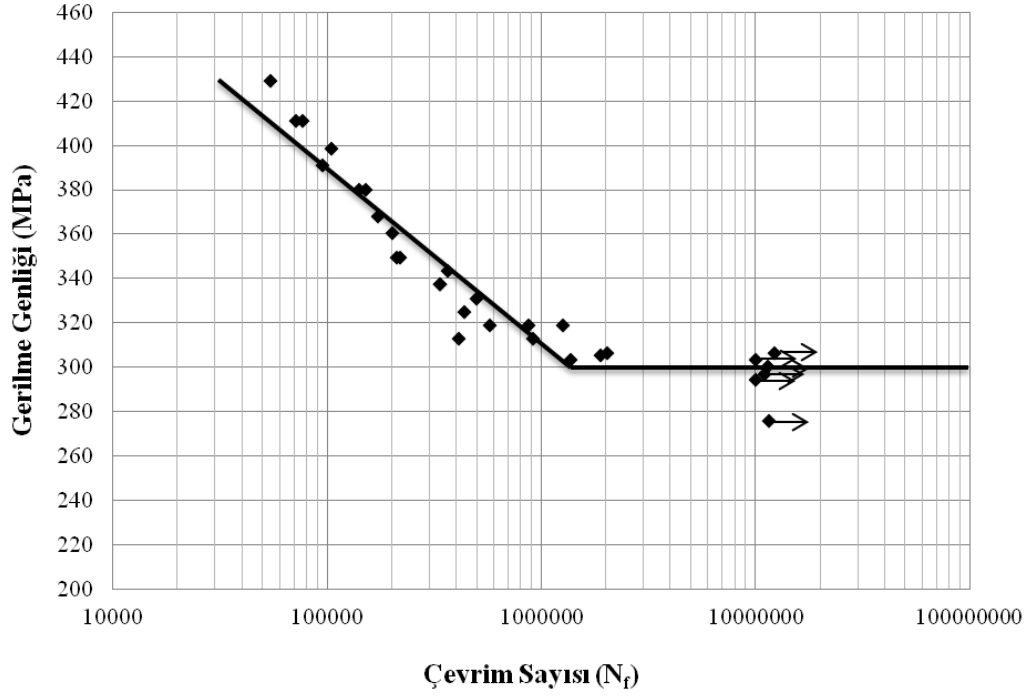
Ayrıca yorulma deneylerinde yorulma dayanım sınırı üzerindeki gerilmelerde elde edilen veriler kullanılarak her iki numunenin Basquin bağıntısı çıkarılmıştır. Çizelge 7.4'te her iki numunenin Basquin sabitleri (a ve C_1), yorulma dayanım sınırları, yorulma oranları ve akma mukavemetlerinin çekme mukavemetlerine oranı verilmiştir.

Her iki numune de birbirine yakın yorulma dayanım sınırlarına sahip olmalarına rağmen, EN-GJS-600-3 numunesi, aynı gerilme değerinde EN-GJS-600-10 numunesine göre daha büyük çevrim sayılarında kırılmıştır. Bunun nedeni, ferritik/perlitik matriste küresel grafitlerin etrafını saran ferrit fazında yorulma çatlağının ilerleme hızının yavaş olmasıdır. Perlitin, küresel grafit etrafındaki ferrit fazına baskı uygulaması, çatlağı kapatıcı etki oluşturmakta ve bu sayede yorulma çatlağının ferrit fazında ilerleme hızı azalmaktadır [34,40].

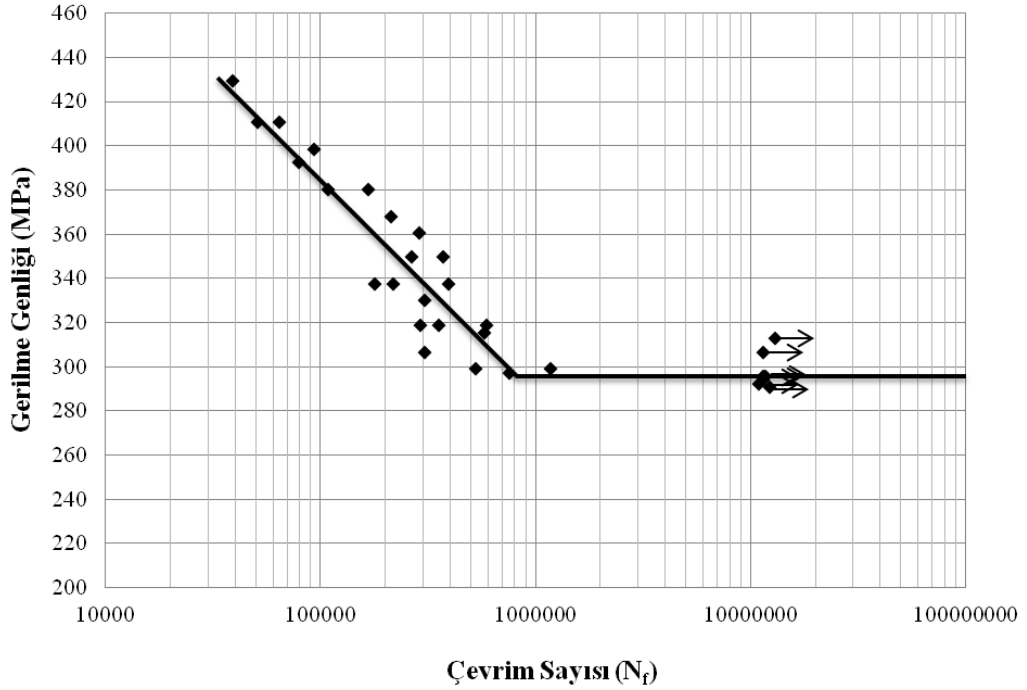
Yorulma dayanım sınırının çekme mukavemetine oranı olarak tanımlanan yorulma oranı, EN-GJS-600-3 numunesi için 0,39 değerinde olup, EN-GJS-600-10 numunesi için 0,48 değerindedir. Ferritik matrisli küresel grafitli dökme demirlerde yorulma oranı yaklaşık 0,5 değerlerinde olup, ferritik/perlitik ve perlitik küresel grafitli dökme demirlerde malzemenin mukavemeti arttıkça bu değer 0,4'ün altına düşmektedir. Katı çözelti sertleştirilmesi uygulanmış yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirlerde ise yorulma oranı 0,45 civarındadır [14].

Çizelge 7.4 : EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerinin Basquin sabitleri ve yorulma özellikleri.

	EN-GJS-600-3	EN-GJS-600-10
a	0,096	0,117
C_1	2342	2960
Yorulma Dayanım Sınırı (MPa)	300	296
Yorulma Oranı (YDS/σ_{TS})	0,39	0,48
σ_y/σ_{TS}	0,57	0,80



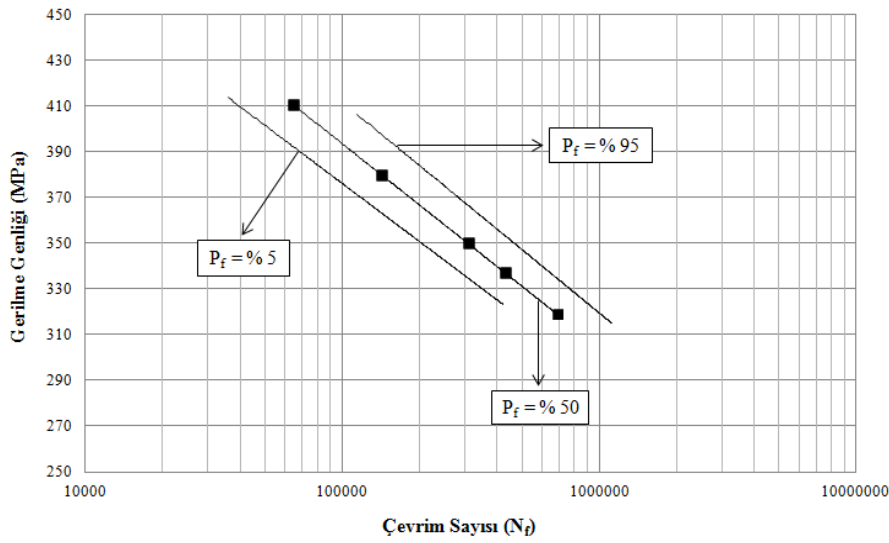
Şekil 7.3 : EN-GJS-600-3 numunesine ait S-N eğrisi.



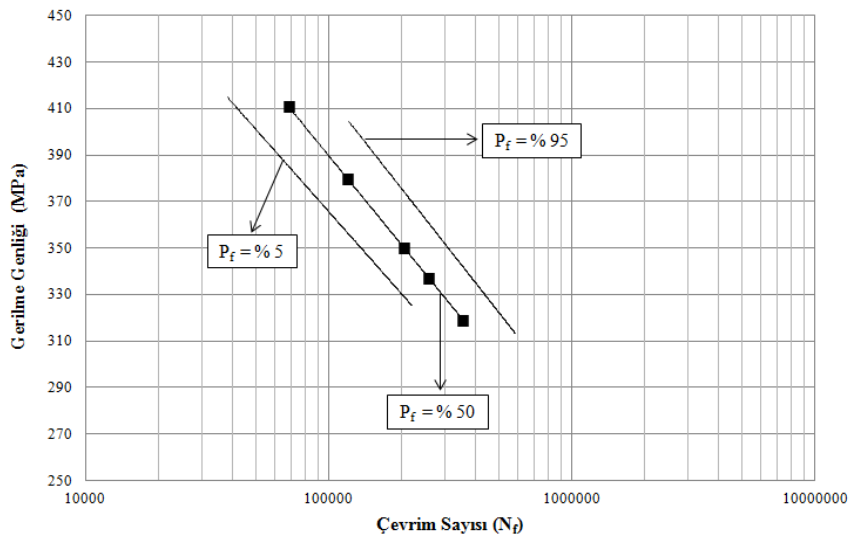
Şekil 7.4 : EN-GJS-600-10 numunesine ait S-N eğrisi.

S-N eğrisinde malzemenin belirli bir gerilmede veya belirli bir çevrim sayısında kırılma olasılığının %50 olduğunu gösteren Basquin eğrisine ilaveten, her iki numune için de kırılma olasılığının %5 ve %95 olduğunu gösteren istatistiksel eğriler çizilmiştir. Kırılma olasılığının %5 ve %95 olduğu eğrileri kapsayan grafiğe P-S-N grafiği denilmektedir. Bu eğriler, istatistiksel bir çalışma sonucu ASTM E739

standardına uygun olarak, seçilen 5 farklı gerilme değerinde, her gerilmede 2’şer numune kullanılarak; toplamda 10 adet numune kullanılarak elde edilmiştir [41]. EN-GJS-600-3 numunesine ait P-S-N grafiği Şekil 7.5’te, EN-GJS-600-10 numunesine ait P-S-N grafiği ise Şekil 7.6’da verilmiştir. Grafiklerdeki “ P_f ” ifadesi, numunenin belirli bir gerilme genliği ve çevrim sayısındaki kırılma olasılığını ifade eder. Her iki numunenin P-S-N grafikleri incelendiğinde, EN-GJS-600-10 numunesinin bant aralığının, EN-GJS-600-3 numunesine göre daha geniş olduğu görülmektedir. Ayrıca, aynı gerilmede ve aynı çevrim sayısında EN-GJS-600-10 numunesinin kırılma ihtimali EN-GJS-600-3 numunesine göre daha yüksektir.

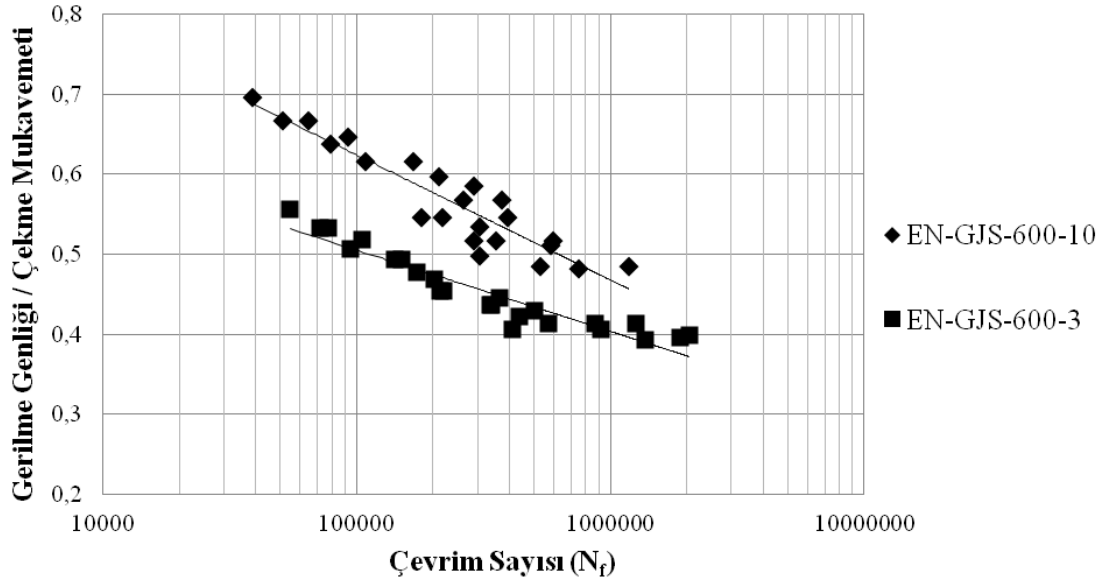


Şekil 7.5 : EN-GJS-600-3 numunesine ait P-S-N grafiği.



Şekil 7.6 : EN-GJS-600-10 numunesine ait P-S-N grafiği.

Her iki numunenin yorulma deneylerinde, yorulma dayanım sınırı üzerinde uygulanan gerilme genliklerinin numunenin çekme mukavemetine oranının çevrim sayısı ile değişimi Şekil 7.7’de verilmiştir. EN-GJS-600-10 numunesinin çekme mukavemeti EN-GJS-600-3 numunesine göre düşük olmasına rağmen, benzer karakterde yorulma davranışına sahip olması, EN-GJS-600-10 numunesinin yorulma oranının yüksek olmasını sağlamaktadır.



Şekil 7.7 : Uygulanan gerilme genliğinin numunenin çekme mukavemetine oranının çevrim sayısına göre değişimi.

7.4 Yorulma Kırılması Yüzeyi İnceleme Sonuçları

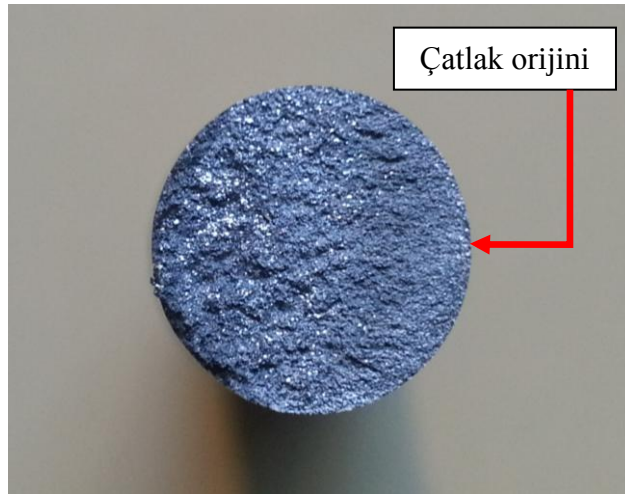
Yorulma dayanım sınırlarından daha yüksek gerilme genliklerinde kırılan numunelerin gerilme genlikleri, kırılma çevrim sayıları ve kırılma yüzeylerinin fotoğrafları EN-GJS-600-3 numunesi için ekteki Çizelge B.1’de ve EN-GJS-600-10 numunesi için ekteki Çizelge B.2’de verilmiştir.

Şekil 7.8’de 350 MPa gerilmeye ve 212658 çevrimde kırılmış EN-GJS-600-3 numunesine ait yorulma kırılması yüzeyi görülmektedir. Kırık yüzey incelendiğinde, yüzeyin açık renkli ve koyu renkli olmak üzere iki bölgeden oluştuğu anlaşılmaktadır. Yapılan incelemeler sonucunda açık renkli bölgenin, yorulma çatlak ilerlemesinin gerçekleştiği bölge, koyu renkli bölgenin ise nihai kırılmanın gerçekleştiği bölge olduğu belirlenmiştir.



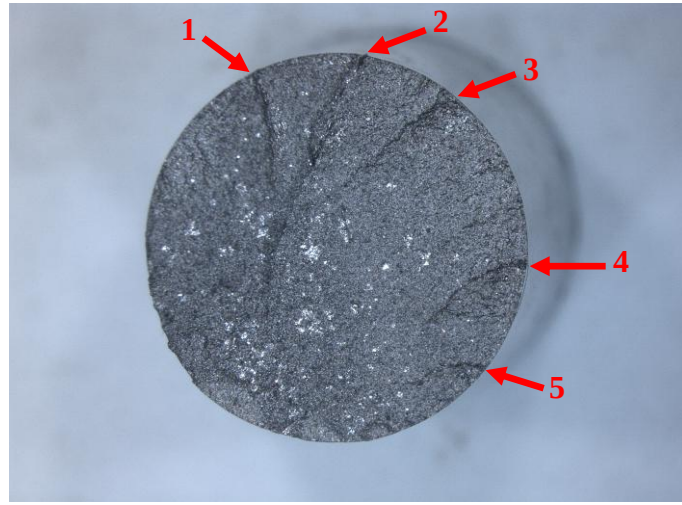
Şekil 7.8 : EN-GJS-600-3 numunesine ait yorulma kırılması yüzeyi ($\sigma = 350$ MPa, $N_f = 212658$).

EN-GJS-600-10 numunesi de EN-GJS-600-3 numunesi ile aynı karakterde yorulma kırılmasına sahiptir. Dökme demir malzemelerin, yorulma kırılması yüzeylerinde çatlak orijininin tespiti zordur ancak, yorulma çatlaklarının genellikle yüzeyden başladığı düşünüldüğünde çatlak orijininin tespiti mümkün olmaktadır. Şekil 7.9’da 411 MPa ve 64461 çevrimde kırılmış EN-GJS-600-10 numunesine ait yorulma kırılması yüzeyi görülmektedir. EN-GJS-600-10 numunesinin yorulma kırılması yüzeyi, EN-GJS-600-3 numunesinde olduğu gibi çatlak ilerleme bölgesi ve nihai kırılma bölgesi olmak üzere 2 bölgeden oluşmaktadır. Yorulma çatlak ilerlemesinin gerçekleştiği bölgedeki radyal izler takip edilerek çatlak orijininin belirlenmesi mümkündür.



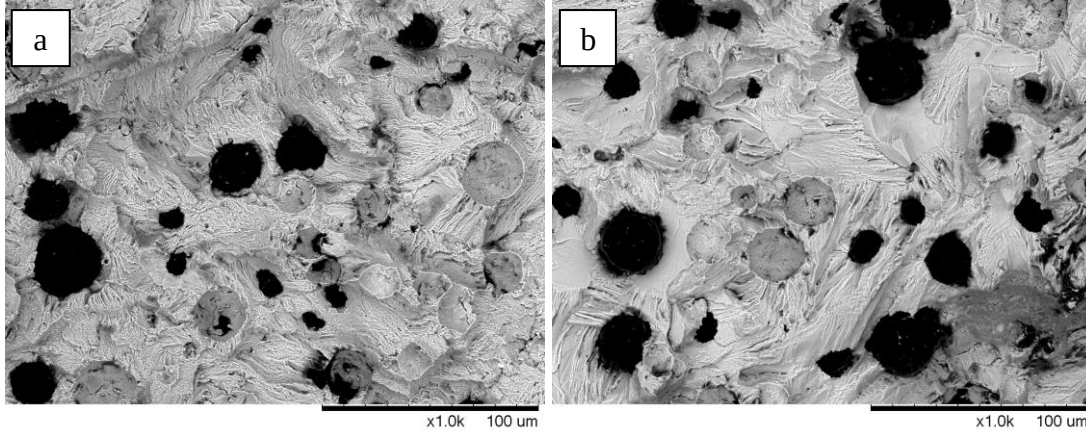
Şekil 7.9 : EN-GJS-600-10 numunesine ait yorulma kırılması yüzeyi ($\sigma = 411$ MPa, $N_f = 64461$).

Şekil 7.10'da 399 MPa ve 105244 çevrimde kırılmış EN-GJS-600-3 numunesine ait yorulma kırılması yüzeyinin stereo mikroskop görüntüsü verilmiştir. Yüksek gerilmelerde, dönel eğmeli yorulma kırılmasının tipik karakteristiği olan birden fazla çatlağın yüzeyden başlayıp ilerlemesi dişli izleri olarak adlandırılan izleri oluşturmakta ve belirli bir uzunluktan sonra bu izlerin birleşmesi Şekil 7.10'da görülmektedir. Şekil 7.10'da, 1,2 ve 3 ile numaralandırılmış okların işaret ettiği dişli izlerini oluşturan çatlaklar ilerleyip belirli bir mesafeden sonra birleşmişlerdir. 4 ve 5 numaralı okların işaret ettiği dişli izleri ise, yüzeyden başlayıp belirli bir uzunluğa kadar ilerleyen ve sonra ilerlemeleri duran çatlakları göstermektedir.

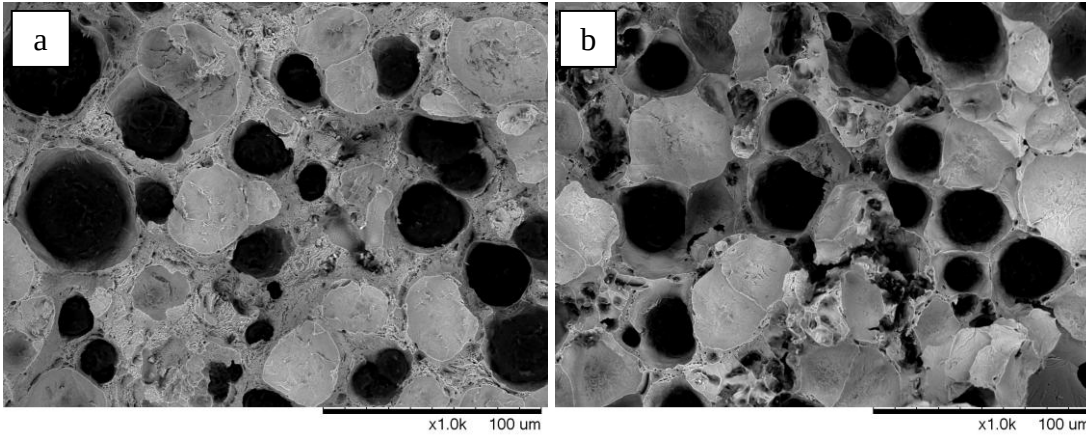


Şekil 7.10: EN-GJS-600-3 numunesine ait yorulma kırılması yüzeyinin stereo mikroskop görüntüsü ($\sigma = 399$ MPa, $N_f = 105244$).

EN-GJS-600-3 ile EN-GJS-600-10 numuneleri aynı karakterde kırılma davranışı sergilemektedir. Yorulma kırılması yüzeyinin, çatlak ilerleme bölgesi ve nihai kırılma bölgesi olmak üzere iki bölgeden oluştuğu Şekil 7.8'de belirtilmişti. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan incelemeler sonucunda, her iki numunenin kırılma yüzeyinde iki farklı kırılma tipi tespit edilmiştir. Şekil 7.11'de, her iki numunenin yorulma çatlak ilerlemesinin gerçekleştiği bölgeden alınan SEM görüntüleri, Şekil 7.12'de her iki numunenin nihai kırılmalarının gerçekleştiği bölgeden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, yorulma çatlak ilerlemesinin gerçekleştiği bölgede yorulma izlerinin bulunduğu tespit edilmiştir. Nihai kırılma bölgesinde ise grafit küreleri etrafında mikro boşlukların birleşmesi ile intergranüler kırılma gerçekleşmiştir.

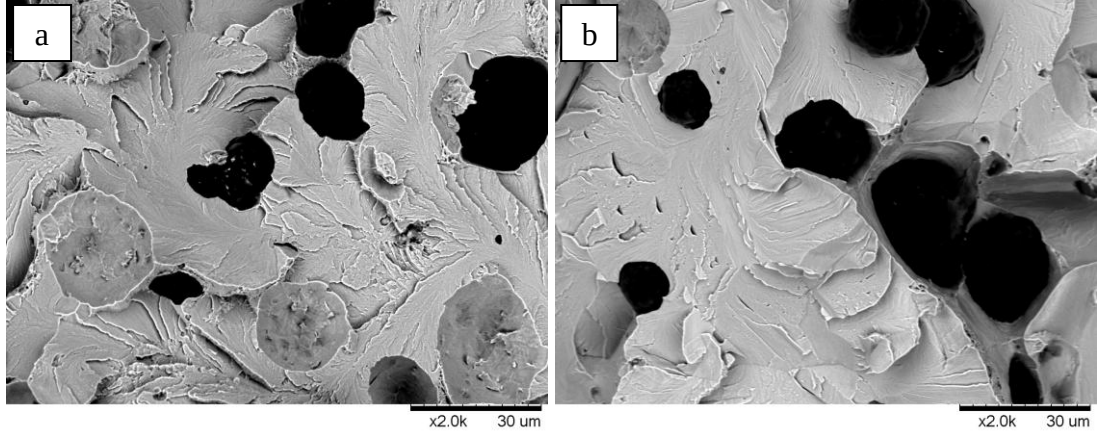


Şekil 7.11 : Yorulma çatlak ilerleme bölgesine ait SEM görüntüsü:
 (a) EN-GJS-600-3 ($\sigma = 411$ MPa, $N_f = 71543$, x1000),
 (b) EN-GJS-600-10 ($\sigma = 368$ MPa, $N_f = 211793$, x1000).



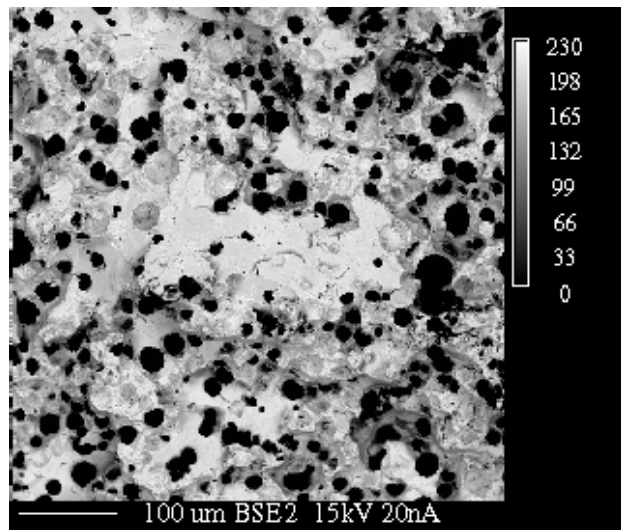
Şekil 7.12 : Nihai kırılma bölgesine ait SEM görüntüsü:
 (a) EN-GJS-600-3 ($\sigma = 411$ MPa, $N_f = 71543$, x1000),
 (b) EN-GJS-600-10 ($\sigma = 368$ MPa, $N_f = 211793$, x1000).

Kırılma yüzeyleri incelendiğinde, bu iki bölgeye ek olarak parlak noktalar şeklinde görülen bazı bölgelerin mevcut olduğu görülmektedir. Şekil 7.13'te her iki numunenin kırılma yüzeyinde parlak nokta olarak görünen bölgelerden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. Bu bölgelerde transgranüler kırılma olan klivaj kırılmalarının gerçekleştiği tespit edilmiştir. Klivaj kırılmaların daha çok, çatlak ilerleme bölgesi ile nihai kırılma bölgesi arasındaki bölgede yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, EN-GJS-600-10 numunesinde klivaj kırılmaların miktarı, EN-GJS-600-3 numunesine göre daha çoktur.

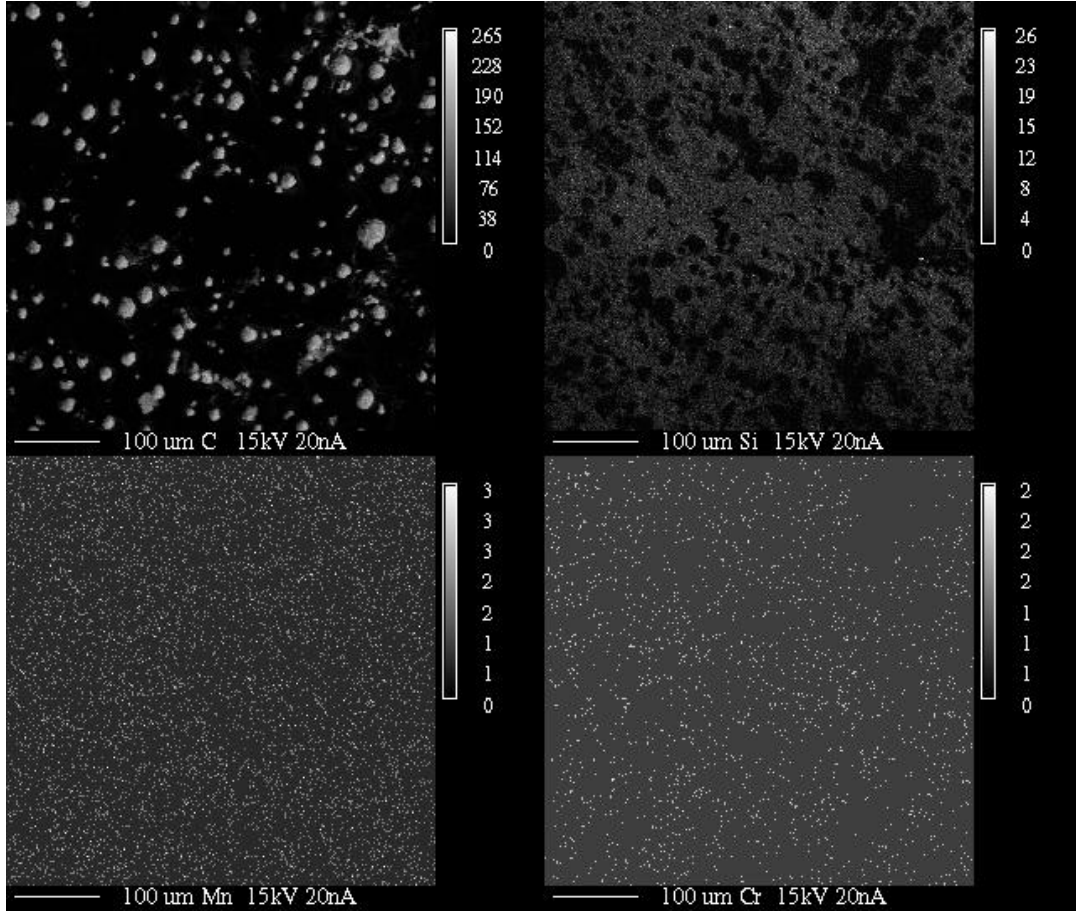


Şekil 7.13 : Parlak noktaların bulunduğu bölgeye ait SEM görüntüsü:
 (a) EN-GJS-600-3 ($\sigma = 411$ MPa, $N_f = 71543$, x2000),
 (b) EN-GJS-600-10 ($\sigma = 368$ MPa, $N_f = 211793$, x2000).

Transgranüler ve intergranüler kırılma içeren bölgelerde, numunenin kimyasal bileşimindeki bazı elementlerin dağılımını belirlemek için elektron prob mikro analizi (EPMA) uygulanmıştır. Bu çalışmada EPMA uygulamasının temel amacı, her iki numunede de birbirine çok yakın bölgelerde hem transgranüler hem de intergranüler kırılma olmasının nedeninin kimyasal segregasyon olup olmadığının araştırılmasıdır. Bu amaçla, Şekil 7.14'te gösterilen, hem intergranüler hem de transgranüler kırılma içeren bölgede C, Si, Mn, Cr elementlerinin dağılımı incelenmiştir. Şekil 7.15'te, belirtilen elementlerin dağılımı görülmektedir. Yapılan incelemeler sonucunda, hem intergranüler hem de transgranüler kırılma içeren bölgede, belirtilen elementlerin dağılımının homojen olduğu görülmüştür.



Şekil 7.14 : EPMA ile incelenen EN-GJS-600-10 ($\sigma = 313$ MPa, $N_f = 3746289$) numunesinin intergranüler ve transgranüler kırılmaları içeren yorulma kırılması yüzeyi.



Şekil 7.15 : EN-GJS-600-10 ($\sigma = 313$ MPa, $N_f = 3746289$) numunesinin intergranüler ve transgranüler kırılmaları içeren yorulma kırılması yüzeyinde C, Si, Mn ve Cr elementlerinin dağılımı.

8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, EN-GJS-600-3 kalite ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demir ile EN-GJS-600-10 kalite yüksek silisyum içerikli ferritik küresel grafitli dökme demirin uzun ömürlü yorulma davranışları karşılaştırılmıştır. Mikroyapı incelemeleri optik mikroskop yardımıyla kantitatif yöntemlerle yapılmıştır. Numunelere sertlik, çekme ve oda sıcaklığında çentiksiz charpy darbe deneyleri uygulanmıştır. Yorulma deneyleri, dönel eğmeli yorulma cihazında, 50 Hz frekansta, dört noktalı yükleme sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yorulma deneyleri sonuçlarına göre her iki numune için S-N ve P-S-N grafikleri çizilmiştir. Ayrıca, yorulma kırılması yüzeyleri, stereo mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve elektron prob mikro analizi (EPMA) yöntemi ile incelenmiştir. Yapılan çalışmaların genel sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

1. EN-GJS-600-10 kalite küresel grafitli dökme demirdeki yüksek silisyum içeriği, mikroyapıyı tamamen ferritik yapmaktadır. EN-GJS-600-10 numunesinin yüksek silisyum içeriği, EN-GJS-600-3 numunesine göre malzemenin sertliğini %8,5 azaltarak 246 HB'den 225 HB'e düşürmüştür ancak; oda sıcaklığında çentiksiz darbe enerjisini %82 oranında artırarak 51 j'den 93 j'e çıkarmıştır; kopma uzamasını %66 ve malzemenin tokluğunu %33 artırmıştır.
2. EN-GJS-600-10 kalite küresel grafitli dökme demirde silisyum atomları ferritik matris içerisinde yer alan katı çözelti oluşturmaktadır. EN-GJS-600-10 kalite küresel grafitli dökme demirin çekme mukavemeti, EN-GJS-600-3'e göre %20 oranında azalarak 771 MPa'dan 617 MPa değerine düşmüştür. Ancak, EN-GJS-600-10 kalite küresel grafitli dökme demirin akma mukavemeti, EN-GJS-600-3'e göre 438 MPa'dan %12'lik bir artışla 492 MPa değerine yükselmiştir.
3. EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerinin yorulma dayanım sınırları sırasıyla 300 MPa ve 296 MPa'dır. Yorulma oranları (yorulma dayanım sınırı / çekme mukavemeti) ise sırasıyla 0,39 ve 0,48'dir.

4. Her iki numunenin Basquin sabitleri bulunmuş olup, EN-GJS-600-3 numunesine ait a ve C_1 değerleri sırasıyla 0,096 ve 2342'dir. EN-GJS-600-10 numunesine ait a ve C_1 değerleri ise sırasıyla 0,117 ve 2960'tır.
5. P-S-N grafiklerine göre, EN-GJS-600-10 numunesinin bant aralığı, EN-GJS-600-3 numunesine göre daha geniştir. Aynı gerilme genliğinde ve aynı çevrim sayısında EN-GJS-600-10 numunesinin kırılma olasılığı EN-GJS-600-3 numunesine göre daha yüksektir.
6. EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numuneleri aynı karakterde yorulma kırılması davranışı göstermektedir. Klivaj kırılmalar genellikle çatlak ilerleme bölgesi ile nihai kırılma bölgesi arasında yoğunlaşmakla birlikte, tamamen ferritik matrise sahip EN-GJS-600-10 numunesinde klivaj kırılmaların miktarı ferritik/perlitik matrisli EN-GJS-600-3 numunesine göre daha çoktur. EPMA sonuçlarına göre, EN-GJS-600-10 numunesindeki intergranüler ve transgranüler kırılmaları içeren bölgede C, Cr, Mn ve Si elementlerinin dağılımında herhangi bir segregasyona rastlanmadığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] **Yılmaz, F.** (2003). İçme-atık su ve gaz dağıtım şebekelerinde dökme demirler ve düktil demir uygulamaları, *İstanbul Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi*, 9-10, İstanbul.
- [2] **Çelik, Ö.** (2001). Küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışları, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Larker, R.** (2008). Solution strength ferritic ductile iron ISO 1083/JS/500-10 offer superior and consistent properties in hydraulic rotators, *Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron*, İsveç.
- [4] **TÜDÖKSAD**, (2012). 2012 yılına girerken mevcut durum, *Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği Raporu*. İstanbul.
- [5] **TÜDÖKSAD**, (2012). Türkdöküm, *Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği Yayın Organı*, Sayı 25, İstanbul.
- [6] **Herfurth, K., Gorski, R., Beute, K. ve Hering, M.** (2011). GOPAG C 500 F, *Gontermann-Peipers*, Almanya.
- [7] **Baydoğan, M.** (1996). GGG-60 sınıfı küresel grafitli dökme demirde östemperleme ısıtılmasının çekme, yorulma ve aşınma özelliklerine etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] **ASM Metals Handbook**, (1990). Properties and selection: irons, steels and high performance alloys, Vol.1, Tenth Edition, *ASM International*.
- [9] **ASM Metals Handbook**, (1992). Alloy phase diagrams, Vol.3, Tenth Edition, *ASM International*.
- [10] **Çavuşoğlu, E. N.** (1992). Döküm teknolojisi I, *İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi*, 355-409, İstanbul.
- [11] **Yazganoğlu, A. N.** (2010). Dökme demir grubu, *Tükelmat A.Ş.*, 153-194, İzmir.
- [12] **Ersümer, A. ve Şen, Y.** (1972). Genel döküm, *Ofset Matbaacılık*, 97-102, İstanbul.
- [13] **ASM Metals Handbook**, (1992). Casting, Vol.15, Tenth Edition, *ASM International*.
- [14] **EN 1563**, (2011). Founding-Spheroidal graphite cast irons, *European Standard*.
- [15] **Ersümer, A. ve Uzunova, T.** (1967). Demir dökümü, *İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası*, 250-262, Gümüşsuyu.
- [16] **Björkegren, L. E. ve Hamberg, K.** (2003). Silicon alloyed ductile iron with excellent ductility and machinability, *Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron*, İsveç.

- [17] **Olsson, A.** (2011). Fatigue strength of truck components in cast iron, *Yüksek Lisans Tezi*, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- [18] **Prihti, T.** (2011). Wear behaviour of ductile irons in continuous sliding motion, *Yüksek Lisans Tezi*, Tampere University of Technology, Finlandiya.
- [19] **Kovacs, B. V.** (1984). Method of making high strength ferritic ductile iron parts, *United States Patent*, No: 4,475,956 tarih: 09.10.1984.
- [20] **Kayalı, E. S., Ensari, C. ve Dikeç, F.** (1996). Metalik malzemelerin mekanik deneyleri, *İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi*, 143-170, İstanbul.
- [21] **Kayalı, E. S., Eruslu, N., Ürgen, M., Taptık, Y. ve Çimenoglu, H.** (1997). Hasar analizi seminer notları, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası*, İstanbul.
- [22] **Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R. ve Fuchs, H. O.** (2001). Metal fatigue in engineering, *John Wiley & Sons Inc.*, New York.
- [23] **Dieter, G. E.** (1988). Mechanical metallurgy, *McGraw-Hill*, 375-431, Singapore.
- [24] **Klesnil, M. ve Lukas, P.** (1992). Fatigue of metallic materials, *Elsevier*, New York.
- [25] **Martinez, R. A.** (2010). Fracture surfaces and the associated failure mechanism in ductile iron with different matrices and load bearing, *Engineering Fracture Mechanics*, 77, 2749-2762, Arjantin.
- [26] **ASM Metals Handbook**, (1996). Fatigue and fracture, Vol.19, Tenth Edition, *ASM International*.
- [27] **ASM Metals Handbook**, (2002). Failure analysis and prevention, Vol.11, Tenth Edition, *ASM International*.
- [28] **ASM Metals Handbook**, (2000). Mechanical testing and evaluation, Vol.8, Tenth Edition, *ASM International*.
- [29] **BS ISO 1143** (2010). Metallic materials – Rotating bar bending fatigue testing, *İngiliz Standartları Enstitüsü*, İngiltere.
- [30] **Karuskevich, M., Karuskevich, O., Maslak, T. Ve Schepak, S.** (2012). Extrusion/intrusion structures as quantitative indicators of accumulated fatigue damage, *International Journal of Fatigue*, 39, 116-121, Ukrayna.
- [31] **Url-1** <<http://www.ductile.org/didata/Section3/3part1.htm>>, alındığı tarih: 18.04.2013.
- [32] **Toktaş, G., Toktaş, A. ve Tayanç, M.** (2008). Influence of matrix structure on the fatigue properties of an alloyed ductile iron, *Materials and Design*, 29, 1600-1608, Balıkesir.
- [33] **Bubenko, L. Konecna, R. ve Nicoletto, G.** (2009). Observation of fatigue crack paths in nodular cast iron and ADI microstructures, *Materials Engineering*, 16, 13-18, Slovakya.

- [34] **Cavallini, M., Di Bartolomeo, O. Ve Iacoviello, F.** (2008). Fatigue crack propagation damaging micromechanisms in ductile cast irons, *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 694-704, Italya.
- [35] **Ferro, P., Lazzarin, P. ve Berto, F.** (2012). Fatigue properties of ductile cast iron containing chunky graphite, *Materials Science and Engineering A*, 554, 122-128, Italya.
- [36] **ISO 945-1** (2008). Microstructure of cast irons – Part 1: Graphite classification by visual analysis, *International Standards Organization*.
- [37] **ASTM E10** (2012). Standard test method for Brinell hardness of metallic materials, *American Society for Testing and Materials*.
- [38] **ASTM A327** (2011). Standard test methods for impact testing of cast irons, *American Society for Testing and Materials*.
- [39] **ASTM E8** (2011). Standard test methods for tension testing of metallic materials, *American Society for Testing and Materials*.
- [40] **Hamberg, K., Mörtzell, M., Björkblad, A. ve Samuelsson, J.** (2005). Fatigue crack growth in ductile iron, *Nordic Project*, 287-310, Helsinki.
- [41] **ASTM E739** (2004). Standard practice for statistical analysis of linear or linearized stress-life (S-N) and strain-life (ϵ -N) fatigue data, *American Society for Testing and Materials*.

EKLER

EK A: EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerine ait dönel eğmeli yorulma deneyi sonuçları.

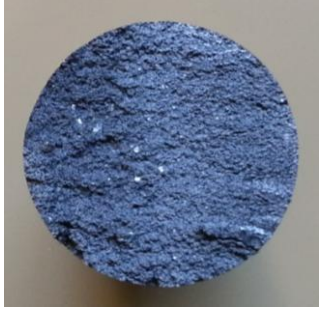
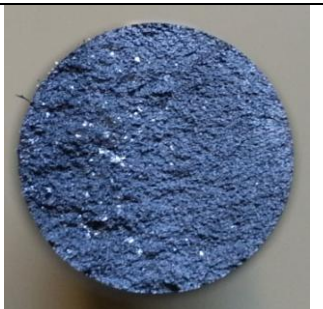
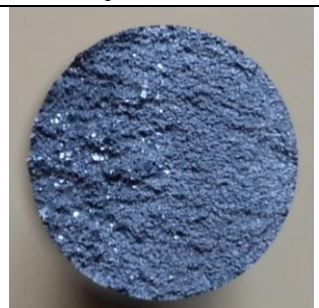
EK B: EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerine ait dönel eğmeli yorulma kırılması yüzeyi fotoğrafları.

EK A**Çizelge A.1 :** EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerine ait dönel eğmeli yorulma deneyi sonuçları.

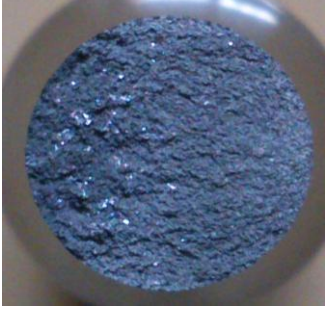
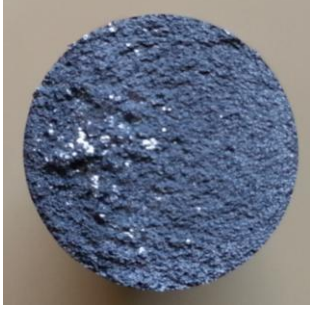
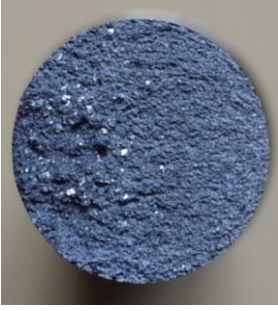
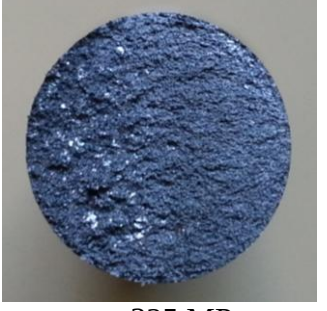
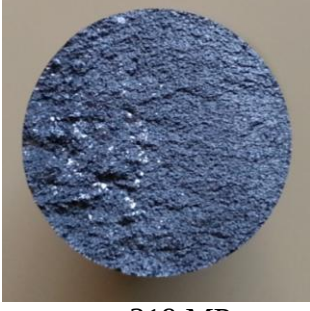
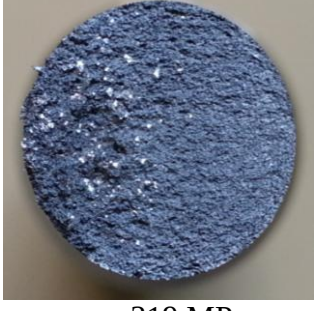
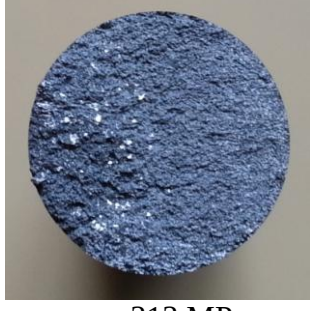
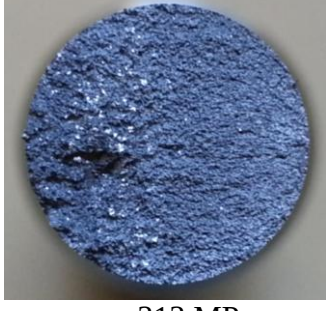
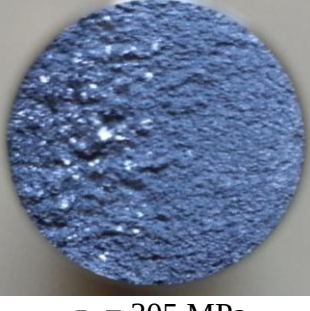
No	EN-GJS-600-3			EN-GJS-600-10		
	Gerilme Genliği (MPa)	Çevrim Sayısı (N_f)	Sonuç	Gerilme Genliği (MPa)	Çevrim Sayısı (N_f)	Sonuç
1	429	54748	Kırıldı	429	38922	Kırıldı
2	411	71543	Kırıldı	411	51110	Kırıldı
3	411	77088	Kırıldı	411	64461	Kırıldı
4	399	105244	Kırıldı	399	92897	Kırıldı
5	391	94848	Kırıldı	393	78909	Kırıldı
6	380	141019	Kırıldı	380	108076	Kırıldı
7	380	150706	Kırıldı	380	167563	Kırıldı
8	368	172544	Kırıldı	368	211793	Kırıldı
9	361	202427	Kırıldı	361	289137	Kırıldı
10	350	219488	Kırıldı	350	264374	Kırıldı
11	350	212658	Kırıldı	350	372394	Kırıldı
12	343	367869	Kırıldı	337	394004	Kırıldı
13	337	338168	Kırıldı	337	217192	Kırıldı
14	337	337924	Kırıldı	337	179408	Kırıldı
15	331	500210	Kırıldı	330	305374	Kırıldı
16	325	438499	Kırıldı	319	594975	Kırıldı
17	319	572171	Kırıldı	319	355297	Kırıldı
18	319	1262764	Kırıldı	319	289786	Kırıldı
19	319	867687	Kırıldı	315	580612	Kırıldı
20	313	918452	Kırıldı	313	13002100	Kırılmadı
21	313	411308	Kırıldı	307	306825	Kırıldı
22	307	2040585	Kırıldı	307	11407200	Kırılmadı
23	307	12275068	Kırılmadı	299	1180042	Kırıldı
24	305	1881269	Kırıldı	299	529290	Kırıldı
25	303	10026229	Kırılmadı	297	753244	Kırıldı
26	303	1368949	Kırıldı	296	11420664	Kırılmadı
27	300	11404715	Kırılmadı	296	11753888	Kırılmadı
28	297	11080920	Kırılmadı	294	11473260	Kırılmadı
29	294	10000054	Kırılmadı	292	10869666	Kırılmadı
30	276	11604893	Kırılmadı	291	12252288	Kırılmadı

EK B

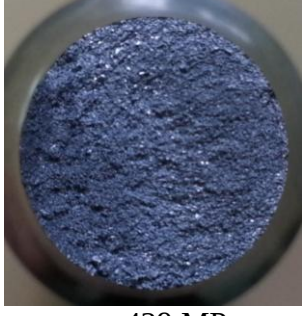
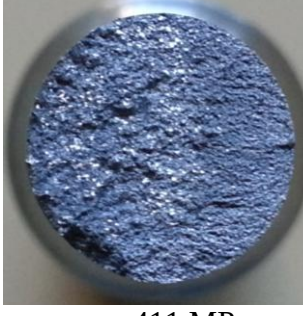
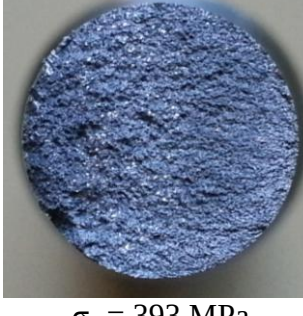
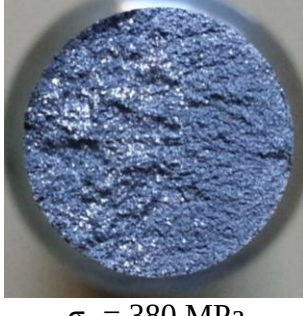
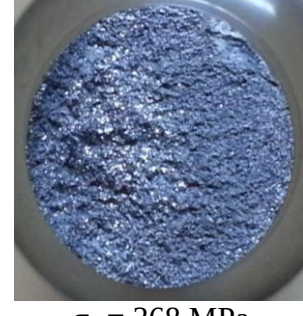
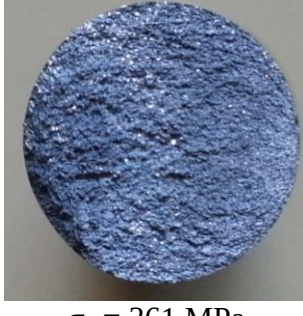
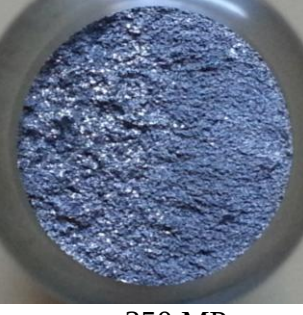
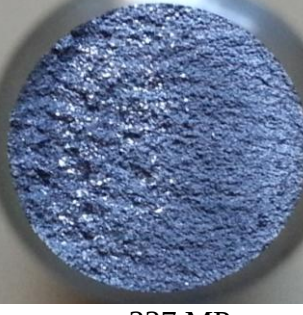
Çizelge B.1 : EN-GJS-600-3 numunesine ait dönel eğmeli yorulma kırılması yüzeyi fotoğrafları.

		
$\sigma_a = 429 \text{ MPa}$ $N_f = 54748$	$\sigma_a = 411 \text{ MPa}$ $N_f = 71543$	$\sigma_a = 411 \text{ MPa}$ $N_f = 77088$
		
$\sigma_a = 399 \text{ MPa}$ $N_f = 105244$	$\sigma_a = 391 \text{ MPa}$ $N_f = 94848$	$\sigma_a = 380 \text{ MPa}$ $N_f = 141019$
		
$\sigma_a = 380 \text{ MPa}$ $N_f = 150706$	$\sigma_a = 368 \text{ MPa}$ $N_f = 172544$	$\sigma_a = 361 \text{ MPa}$ $N_f = 202427$
		
$\sigma_a = 350 \text{ MPa}$ $N_f = 219488$	$\sigma_a = 350 \text{ MPa}$ $N_f = 212658$	$\sigma_a = 343 \text{ MPa}$ $N_f = 367869$

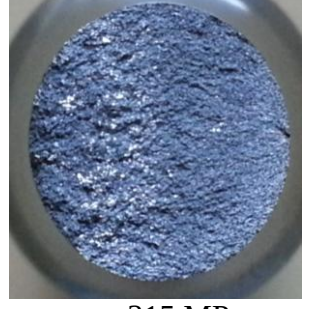
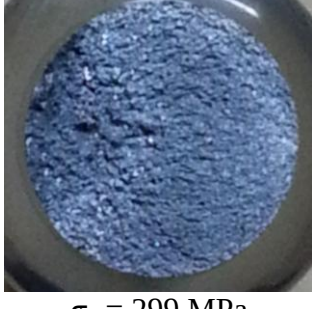
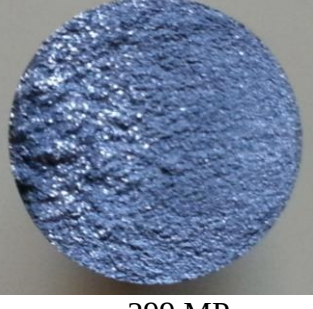
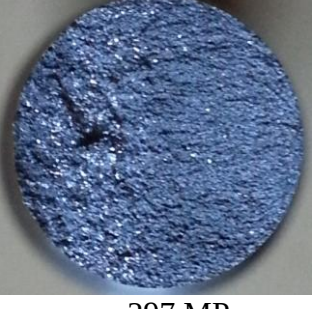
Çizelge B.1 (devam) : EN-GJS-600-3 numunesine ait dönel eğmeli yorulma kırılması yüzeyi fotoğrafları.

 $\sigma_a = 337 \text{ MPa}$ $N_f = 338168$	 $\sigma_a = 337 \text{ MPa}$ $N_f = 337924$	 $\sigma_a = 331 \text{ MPa}$ $N_f = 500210$
 $\sigma_a = 325 \text{ MPa}$ $N_f = 438499$	 $\sigma_a = 319 \text{ MPa}$ $N_f = 572171$	 $\sigma_a = 319 \text{ MPa}$ $N_f = 1262764$
 $\sigma_a = 319 \text{ MPa}$ $N_f = 867687$	 $\sigma_a = 313 \text{ MPa}$ $N_f = 918452$	 $\sigma_a = 313 \text{ MPa}$ $N_f = 411308$
 $\sigma_a = 307 \text{ MPa}$ $N_f = 2040585$	 $\sigma_a = 305 \text{ MPa}$ $N_f = 1881269$	 $\sigma_a = 303 \text{ MPa}$ $N_f = 1368949$

Çizelge B.2 : EN-GJS-600-10 numunesine ait dönel eğmeli yorulma kırılması yüzeyi fotoğrafları.

 $\sigma_a = 429 \text{ MPa}$ $N_f = 38922$	 $\sigma_a = 411 \text{ MPa}$ $N_f = 51110$	 $\sigma_a = 411 \text{ MPa}$ $N_f = 64461$
 $\sigma_a = 399 \text{ MPa}$ $N_f = 92897$	 $\sigma_a = 393 \text{ MPa}$ $N_f = 78909$	 $\sigma_a = 380 \text{ MPa}$ $N_f = 108076$
 $\sigma_a = 380 \text{ MPa}$ $N_f = 167563$	 $\sigma_a = 368 \text{ MPa}$ $N_f = 211793$	 $\sigma_a = 361 \text{ MPa}$ $N_f = 289137$
 $\sigma_a = 350 \text{ MPa}$ $N_f = 264374$	 $\sigma_a = 350 \text{ MPa}$ $N_f = 372394$	 $\sigma_a = 337 \text{ MPa}$ $N_f = 394004$

Çizelge B.2 (devam) : EN-GJS-600-10 numunesine ait dönel eğmeli yorulma kırılması yüzeyi fotoğrafları.

 $\sigma_a = 337 \text{ MPa}$ $N_f = 217192$	 $\sigma_a = 337 \text{ MPa}$ $N_f = 179408$	 $\sigma_a = 330 \text{ MPa}$ $N_f = 305374$
 $\sigma_a = 319 \text{ MPa}$ $N_f = 594975$	 $\sigma_a = 319 \text{ MPa}$ $N_f = 355297$	 $\sigma_a = 319 \text{ MPa}$ $N_f = 289786$
 $\sigma_a = 315 \text{ MPa}$ $N_f = 580612$	 $\sigma_a = 307 \text{ MPa}$ $N_f = 306825$	 $\sigma_a = 299 \text{ MPa}$ $N_f = 1180042$
 $\sigma_a = 299 \text{ MPa}$ $N_f = 529290$	 $\sigma_a = 297 \text{ MPa}$ $N_f = 753244$	

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Barış ATEŞ
Doğum Yeri ve Tarihi: MERSİN / 03.04.1989
Adres: Menteş Mah. 2584 Sok. Sema 2 Apt. No:2 K:3
Yenişehir/MERSİN
E-Posta: atesba@itu.edu.tr
Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi – Metalurji ve Malzeme
Mühendisliği (Eylül 2007- Şubat 2012)
Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi – Malzeme Bilimi ve
Mühendisliği (Şubat 2012- Haziran 2013)

Mesleki Deneyim & Ödüller:

- Trakya Cam Sanayii A.Ş. Mersin Fabrikası – Staj (06.2009-07.2009, 06.2010-07.2010, 06.2011-07.2011)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- **Ates, B.**, Demirlek, M., Baydogan, M. and Cimenoglu, H., 2013: Rotating Bending Fatigue Behaviour of a High Silicon Content Ductile Iron. *Poster Presentation – International Journal of Arts and Sciences*, May 28-31, 2013 Prague, Czech Republic.