

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN YÜKSEK ÇEVİRİMLİ
YORULMA DAVRANIŞINA SİLİSYUM ORANININ ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve DEMİRLEK

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN YÜKSEK ÇEVİRİMLİ
YORULMA DAVRANIŞINA SİLİSYUM ORANININ ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Merve DEMİRLEK
(506111213)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Üretim Metalurjisi Ve Teknolojileri Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN

HAZİRAN 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506111213 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Merve DEMİRLEK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN YÜKSEK ÇEVİRİMLİ YORULMA DAVRANIŞINA SİLİSYUM ORANININ ETKİSİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI**
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 Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım boyunca bana yol gösteren ve yardımcı olan başta değerli hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU olmak üzere, Araş. Gör. Faiz MUHAFFEL'e ve Araş. Gör. Onur TAZEGÜL'e teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmamda bana yardımcı olan Metalurji ve Malzeme Müh. Barış Ateş 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.

Haziran 2013

Merve DEMİRLEK
Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. DÖKME DEMİRLER	3
2.1 Tanımı ve Sınıflandırılması.....	3
3. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER	7
3.1 Giriş.....	7
3.2 Standartlara Göre Sınıflandırılması.....	7
3.3 Katılaşması ve Grafit Oluşumu	9
3.4 Kimyasal Bileşimi	12
3.5 Mikroyapısı ve Çeşitleri.....	14
3.6 Uygulama Alanları	16
3.7 Mekanik Özellikleri	17
4. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER	25
4.1 Döküm Profili Boyutunun Etkisi	25
4.2 Mikroyapının Etkisi	26
4.3 Alaşım Elementlerinin Etkisi	28
5. YÜKSEK ALAŞIMLI KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER	31
5.1 Yüksek Silisyumlu Küresel Grafitli Dökme Demirler.....	31
5.1.1 Tanımı ve standartlara göre sınıflandırılması	31
5.1.2 Mikroyapısı ve mekanik özellikleri	32
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	37
6.1 Deneysel Malzemelerin Hazırlanması	37
6.2 Metalografik Çalışmalar.....	37
6.3 Mekanik Deneyler	38
6.3.1 Sertlik deneyi	38
6.3.2 Çekme deneyi.....	39
6.3.3 Charpy darbe deneyi	40
6.3.4 Yorulma deneyi.....	40
6.4 Yorulma Kırılma Yüzeyi İncelemeleri.....	42
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	45
7.1 Mikroyapısal İncelemelerin Sonuçları	45
7.2 Sertlik, Çekme ve Darbe Deneylerinin Sonuçları	46

7.3 Yorulma Deneyi Sonuçları.....	47
7.4 Yorulma Kırılma Yüzeyi İncelemelerinin Sonuçları	51
8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR.....	59
EKLER.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	69

KISALTMALAR

KGDD	: Küresel Grafitli Dökme Demir
INCO	: Uluslararası Nikel Birlięi
DDK	: Dökme Demir Küresel Grafitli
ASTM	: Amerika Malzeme ve Test Standartları Kurumu
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
SAE	: Otomotiv Mühendisleri Cemiyeti
ISO	: Uluslararası Standart Organizasyonu
EPMA	: Elektron Prob Mikro Analizi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
HCF	: Uzun mrl Yorulma
YDS	: Yorulma Dayanım Sınırı
SGGS	: Sünek Gevrek Geçiş Sıcaklığı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Dökme demirlerin ticari adı, mikroyapısı ve kırılma görünümüne göre sınıflandırılması.....	6
Çizelge 2.2 : Bazı dökme demirlerin kimyasal bileşimi.....	6
Çizelge 3.1 : Küresel grafitli dökme demirlerin TSE'ye göre sınıflandırılması.....	7
Çizelge 3.2 : Küresel grafitli dökme demirlerin EN 1563 standardına göre sınıflandırılması.....	8
Çizelge 3.3 : Küresel grafitli dökme demirlerin çeşitli ulusal standartlara göre sınıflandırılması.....	9
Çizelge 3.4 : Alman DIN 1693 standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	9
Çizelge 5.1 : EN 1563:2011 Standardına göre kimyasal kompozisyon	32
Çizelge 5.2 : Yüksek silisyum içerikli küresel grafitli dökme demirlerin EN 1563 standardına göre mekanik özellikleri	33
Çizelge 6.1 : Deneysel çalışmalarda kullanılan EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal bileşimi (%ağ).....	37
Çizelge 7.1 : Bu çalışmada kullanılan EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 kalite KGDD'nin kantitatif özellikleri	46
Çizelge 7.2 : EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin sertlik, çekme ve çentiksiz darbe deneyi sonuçları.....	47
Çizelge 7.3 : Basquin bağıntısına göre hesaplanan a ve C ₁ sabitleri, yorulma dayanım sınırı ve yorulma oranı değerleri	49
Çizelge A.1 : EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin gerilme genliği (MPa) ve kırılıncaya kadarki çevrim sayısı (N _f) değerleri.....	64
Çizelge B.1 : S-N eğrilerinde kullanılan EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 KGDD numunelerinin kırıldıkları gerilme genliği(MPa) çevrim sayısı (N _f) ve kırık yüzey fotoğrafları	65

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Dökme demirlerde katılaşmanın ve grafit oluşumu sıcaklık aralığının şematik gösterimi	10
Şekil 3.2 : Demir-karbon faz diyagramı	11
Şekil 3.3 : Farklı mikroyapılarda küresel grafitli dökme demirlerin optik mikroskop görüntüleri	16
Şekil 3.4 : Çelik, gri, ferritik ve perlitik küresel grafitli dökme demirlerin elastik özellikleri.....	18
Şekil 3.5 : Küresel grafitli dökme demirler için gerilme-şekil değiştirme eğrisi.	18
Şekil 3.6 : Ferritik küresel grafitli dökme demirler için tipik gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrileri.	20
Şekil 3.7 : Küresel grafitli dökme demirlerde dayanıklılık oranının matris ve çekme mukavemetiyle ilişkisi.	20
Şekil 3.8 : Küreselliğin çentikli ve çentiksiz perlitik küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanım sınırına etkisi	21
Şekil 3.9 : Küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanım sınırına grafit nodüllerinin boyutu ve matris sertlik değerinin etkisi.....	22
Şekil 3.10 : Küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanım sınırına matris mikro-sertliği ve inklüzyon oranının etkisi	23
Şekil 4.1 : Ferritik küresel grafitli dökme demirlerde karbon oranının V-Charpy darbe enerjisine etkisi	28
Şekil 5.1 : Dökme demir malzemeler için referans grafit formları.....	32
Şekil 5.2 : Küresel grafitli dökme demirlerde silisyum oranının çekme ve akma mukavemetine etkisi.....	34
Şekil 5.3 : Küresel grafitli dökme demirlerde silisyum oranının kopma uzamasına etkisi.....	34
Şekil 5.4 : Farklı sınıfların farklı sıcaklıklardaki darbe direnci değerleri.....	35
Şekil 5.5 : Değişen silisyum ve fosfor oranlarına göre darbe enerjisi	36
Şekil 6.1 : Lecia DM750M marka optik mikroskobu.....	38
Şekil 6.2 : Zwick derinlik duyarlı universal sertlik cihazı	39
Şekil 6.3 : Instron 8801 marka test cihazı.....	39
Şekil 6.4 : ASTM E 8 M standardına göre hazırlanmış çekme deney numunesi şekil ve boyutları.	40
Şekil 6.5 : Mohr & Federhaff A.G. Pendulum darbe testi cihazı.	40
Şekil 6.6 : Walter+Bai UBM 0,1-500Nm marka sabit dönel eğmeli yorulma test cihazı.....	41
Şekil 6.7 : ASTM E 466 Standardına göre hazırlanmış yorulma deney numunesi şekil ve boyutları (mm).....	41
Şekil 6.8 : Hitachi TM-100 taramalı elektron mikroskobu cihazı (SEM).	42
Şekil 6.9 : Cameca Sx100 markalı elektron prob mikro analizörü (EPMA) cihazı.	43
Şekil 7.1 : EN-GJS-500-7 sınıfı KGDD'in mikroyapısı.....	45

Şekil 7.2 : EN-GJS-500-14 sınıfı KGDD'in mikroyapısı.....	46
Şekil 7.3 : Gerilme genliği-çevrim sayısı grafiği (S-N) , a) EN-GJS-500-7 (S-N) grafiği b) EN-GJS-500-14 (S-N) grafiği	48
Şekil 7.4 : P-S-N grafiği , a) EN-GJS-500-7 P-S-N grafiği, b) EN-GJS-500-14 P-S-N grafiği	50
Şekil 7.5 : Uygulanan gerilme genliğini kendi çekme mukavemetine oranının çevrim sayısına göre değişimi.	51
Şekil 7.6 : Küresel grafitli dökme demirlerin yorulma kırılma yüzey görüntüleri a) EN-GJS-500-7 KGDD ($\sigma = 380$ MPa, $N_f = 51148$ çevrim), b) EN-GJS-500-7 KGDD ($\sigma = 283$ MPa, $N_f = 825752$ çevrim)	52
Şekil 7.7 : EN-GJS-500-7 sınıf küresle grafitli dökme demirin üzerinde dişli izleri bulunan yorulma kırılma yüzeyi görüntüsü.....	52
Şekil 7.8 : KGDDlerin kırılma sırasında oluşan ikincil çatlak SEM görüntüleri a) EN-GJS-500-14 ($\sigma = 368$ MPa, $N_f = 124312$, x1500), b) EN-GJS-500-7 (23) ($\sigma = 350$ MPa, $N_f = 224873$, x1000)	53
Şekil 7.9 : EN-GJS-500-14 ($\sigma = 368$ MPa, $N_f = 124312$, x1000) , a) Çatlak ilerleme bölgesi SEM görüntüsü b) Nihai kırılma bölgesi SEM görüntüsü	53
Şekil 7.10 : EN-GJS-500-7 ($\sigma = 350$ MPa, $N_f = 224873$, x1000), a) Çatlak ilerleme bölgesi SEM görüntüsü b) Nihai kırılma bölgesi SEM görüntüsü.....	54
Şekil 7.11 : Parlak noktaların SEM görüntüleri a) EN-GJS-500-7, b) EN-GJS-500-14.....	54
Şekil 7.12 : EPMA ile incelenen EN-GJS-500-14 numunesinin klivaj kırılmasını içeren yorulma kırılması yüzeyi	55
Şekil 7.13 : EN-GJS-500-14 numunesinin yorulma kırılma yüzeyindeki klivaj kırılmanın gerçekleştiği bölgedeki C, Si, Mn ve Fe elementlerinin dağılımı ($\sigma = 294$ MPa, $N_f = 454838$)	48

SEMBOL LİSTESİ

σ	: Gerilme
σ_{maks}	: Maksimum Gerilme
σ_{min}	: Minimum Gerilme
$\Delta\sigma$	: Gerilme Aralığı
CV	: Darbe Enerjisi
L_0	: Çekme deneyi numunesinin ilk ölçü uzunluğu
d_0	: Çekme deneyi numunesinin ilk çapı
t	: Et kalınlığı
$\emptyset$	: Numune Çapı
R_p	: Malzemenin % 0,2 akma mukavemet değeri
R_m	: Malzemenin çekme mukavemet değeri
P	: Uygulana yük
l	: Moment kolunun uzunluğu
D	: Numune çapı
$\sigma_{\check{c}}$	: Çekme mukavemeti
σ_{YDS}	: Akma mukavemeti
N_f	: Kırılıncaya kadarki çevrim sayısı
a	: Basquin sabiti
C_1	: Basquin sabiti
P_f	: Malzemenin kırılma olasılığı
e_k	: Kopma uzaması
α	: Düşük Sıcaklıkta Kararlı Ferrit
γ	: Östenit
δ	: Yüksek Sıcaklıkta Kararlı Ferrit
Hz	: Hertz
Ceş	: Karbon eşdeğeri

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN YÜKSEK ÇEVİRİMLİ YORULMA DAVRANIŞINA SİLİSYUM ORANININ ETKİSİ

ÖZET

Dökme demirler %2'den fazla karbon içeren demir alaşımlarıdır. Ergimiş demir-karbon-silisyum alaşımında silisyum grafit oluşumunu desteklerken, karbür oluşumunu engelleyici etkisi vardır, bu ergimiş alaşıma Ce veya Mg eklenerek, karbonun nodüler grafit halinde çökmesi sağlanır ve küresel grafitli dökme demirler elde edilir.

Küresel grafitli dökme demirleri güvenli bir şekilde kullanabilmek için, mekanik özelliklerini; çekme mukavemeti, süneklik, sertlik, yorulma özellikleri hakkında ve bunları etkileyen parametreler hakkında bilgi sahibi olunmalıdır.

Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini etkileyen faktörler mikroyapı(matris, grafit yapısı ve sayısı), kimyasal bileşim ve soğuma hızıdır.

Küresel grafitli dökme demirler, yüksek mukavemet ve tokluk, iyi işlenebilirlik ve düşük maliyet gibi özelliklere sahiptir. Dökülebilirlik avantajının yanı sıra bu iyi mekanik özelliklere sahip olması küresel grafitli dökme demirlerin birden fazla endüstride tercih edilmesine sebep olmaktadır. Otomotiv endüstrisi bunlardan sadece biridir, örneğin otomotiv endüstrisinde krank mili, fren ve aks gibi parçaların üretiminde küresel grafitli dökme demirler tercih edilir. Bilindiği gibi bu otomotiv parçaları değişken tekrarlı yüklere maruz kaldığı için yorulma dayanımı bu endüstri için önemli bir mekanik özelliktir. Küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanımı, grafitlerin yapısı ve sayısı, matris yapısı ve sertliği, yapıdaki inklüzyonlar, döküm parçasının boyutu ve yüzey özelliklerine bağlıdır.

Bu çalışmada iki farklı kalite küresel grafitli dökme demir, EN-GJS-500-7 (%2,4 Si) ve EN-GJS-500-14 (%3,6 Si) malzemeleri incelenmiştir. Mikroyapı karakterizasyonu yapılmış, mikroyapısı ve kantitatif analizi gerçekleştirilmiştir. Dönel eğmeli yorulma testi ile yapılan deneylerde yüksek çevrimli yorulma davranışı incelenmiştir. İki farklı kalite küresel grafitli dökme demirin S-N eğrileri çizilmiştir. Yüksek silisyum oranının; geleneksel küresel grafitli dökme demirlerin çekme, akma mukavemeti, sünekliği, sertliği gibi mekanik özelliklerine etkisi ve yorulma sınırına etkisi incelenmiştir. Yorulma kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir.

Geleneksel EN-GJS-500-7 KGDD ferritik-perlitik mikroyapıya sahipken, yüksek silisyum içeren EN-GJS-500-14 malzemesinin ferritik mikroyapıya sahip olduğu görülmüştür, malzemenin sünekliğini arttırmıştır. Yapıdaki fazla Si akma mukavemetini artırırken, yorulma dayanım sınırı değerlerinin benzer olduğu sonucuna varılmıştır. Dayanıklılık oranları karşılaştırıldığında ise EN-GJS-500-14 kalite malzemenin daha yüksek bir orana sahip olduğu gözlemlenmiştir.

THE EFFECT OF SILICON CONTENT ON HIGH CYCLE FATIGUE BEHAVIOR OF SPHEROIDAL GRAPHITE CAST IRON

SUMMARY

Cast irons find widespread applications in automobiles, particularly in cast engine components (manifolds) and in the crankshaft. These ferrous alloys have much higher carbon content than steels, usually in the range 2.2-5 wt.%, and are widely popular because of their low cost and ease in fabrication by casting. Cast irons have lower melting points than steels and hence, can be melted in relatively cheaper furnaces. Because many of them have relatively higher amounts of silicon (about 2-3%), the liquid has good fluidity and castability. Their strength and heat resistance features have been improved considerably by alloy additions.

Even better mechanical properties can be achieved in cast irons, without destroying the excellent casting and machining properties, by the production of a spheroidal graphite and its called ductile iron. A distinguishing feature of this widely used type of cast iron, also known as spheroidal graphite iron or nodular iron, is that the graphite is present in ball-like form instead of in flakes as in ordinary gray cast iron. The spheroidal nodules are roughly spherical in shape and are composed of a number of graphite crystals, which grow radially from a common nucleus with their basal planes normal to the radial growth axis. This form of growth habit is promoted in an as-cast grey iron by the addition of small amounts of Mg or Ce to the molten metal in the ladle which changes the interfacial energy between the graphite and the liquid. Good strength, toughness and ductility can thus be obtained in castings that are too thick in section for malleabilizing and can replace steel castings and forgings in certain applications.

The internal notch effect of graphite nodules is significantly lower than that of flakes, so that the mechanical properties of cast iron with spheroidal graphite are superior to those containing flake graphite. The spherical shape is obtained by treating the melt with magnesium, calcium or cerium. However, the melt must be previously desulphurised to avoid growth of embrittling sulphides. Because magnesium evaporates easily on account of its high vapour pressure, it is more effective if added to the melt in the form of a Mg prealloy (NiMg or FeSiMg). Subsequent inoculation with 0.4 to 0.7% FeSi and other elements with an oxygen affinity (Al, Zr) increases the number of spheroidal graphite, produces an ideal graphite shape and counteracts chilling in small wall thicknesses. The effect of magnesium and inoculation gradually weakens so that large graphite nodules are often found in thicker walls.

Apart from limitations in the phosphorus (max. 0.08 %) and sulphur contents (max. 0.02 %), the basic composition of ductile cast iron corresponds to alloy concentrations in grey cast iron with Si contents of 1.7 - 2.8 %.

A saturation level close to unity is desirable to obtain a melt with good flow characteristics. The properties of ductile iron are essentially determined by the metal matrix. Its ferrite/pearlite ratio can be altered with specific alloying elements and by

adjusting the cooling rate. Slow cooling increases the ferrite fraction, which is frequently found as a shell around the graphites. This type of structure is known as a bull's eye.

The numerous, successful uses of ductile iron in critical components in all sectors of industry highlight its versatility and suggest many additional applications. In order to use ductile iron with confidence, the design engineer must have access to engineering data describing the following mechanical properties: elastic behavior, strength, ductility, hardness, fracture toughness and fatigue properties.

Mechanical properties of ductile iron depend on microstructure factors including the quantity, size and distribution of phases, number, size and shape of graphite particles and, the defects like porosities and inclusions. During solidification, graphite nodules nucleate homogeneously and heterogeneously on inclusions. Then, they will be surrounded by the austenite phase. The diffusion of carbon from the liquid phase through the austenite phase leads to the growth of graphite nodules. It is obvious that the graphite morphology is responsible for good ductility and toughness of ductile iron. The nodular graphite acts as crack arrester and consequently increases the ductility. The larger graphite loses its role of crack arrester, and thus, ductility decreases. Besides, sufficient amount of graphite nodules are required to avoid the formation of carbides during solidification. The presence of carbides in the microstructure has superior effect on mechanical properties. The number of graphite nodules influences the content of ferrite/pearlite in the matrix; therefore, the graphite nodule count is an important parameter in the characterization of the microstructure in ductile. Solidification rate is the most important factor which affects the formation and the morphology of graphite because graphite in ductile irons precipitates quickly compared with that in grey cast irons. Many parameters affect the microstructure of the ductile iron and its solidification process in the permanent molds including the chemical composition such as C and Si, nodulation process, inoculation, mold preheating and pouring temperature. The accurate control of the chemical composition in the ductile cast iron without using any riser in the feeding system leads to a casting specimen with no porosity. Carbon and silicon contents have significant effects on the graphite formation in the ductile cast iron.

Ductile cast iron is an alternative for lots of applications on account of its excellent damping capacity, high strength, high toughness, good machinability, and low cost. It has a high tendency to distortion and poor thermal conductivity. For instance, it is used in automotive components that are subjected to predominantly mechanical loads. These include housings for disc brakes, steering gear, rear axles (particularly engine brackets), steering knuckles and brake pads for commercial vehicles. As known these machine parts and many of others are often subjected to fluctuating loads in service. For example; connecting rods are pushed and pulled in piston engines. Crankshafts are generally subjected to torsional stress and bending stress due to self-weight or weight of components or possible misalignment between journal bearings.

It is well known that fatigue endurance of ductile cast iron, similar to other Fe alloys, is affected primarily by the matrix microstructure and by notch factors or surface conditions. The graphite nodules work as shrinkage cavities. In fatigue crack initiation stage, micro cracks initiate around these graphite nodules and then form the macro-crack, which then propagates and leads to the final failure of the specimen. For this reason, ductile cast iron is particularly sensitive to geometrical size effect and technological size effect. The larger the casting thickness, the lower the cooling

rate. Thus, also the nodularity and nodule count of the microstructure decrease. This yields a decrease in fatigue strength (technological size effect). Nadot et al. in their investigation on fatigue properties of nodular cast iron, observed that, in all the cases, a unique microshrinkage was at origin of the fatal crack that led the sample to failure. In such conditions, many approaches of fatigue resistance evaluation for defect containing materials consider that crack initiation stage is negligible.

A large scatter in fatigue strength of ductile irons indicates there are many variables on which the fatigue strength is dependent. These variables that influence the fatigue properties of ductile iron are graphite shape, graphite size, nonmetallic inclusions, matrix hardness and structure, specimen size, surface condition, surface degradation such as corrosion and the type of loading.

The aim of the current work is investigate the effect high silicon content on fatigue strength and other mechanical properties of conventional ferritic-pearlitic ductile iron. EN-GJS-500-14 which has %3,6 Si and is primarily used in the automotive industry where enhanced fatigue resistance is required and compare the result with ferritic-pearlitic grade ductile iron (EN-GJS-500-7 which has %2,4 Si) as it already has many properties advantages than ferritic-pearlitic one.

The matrix of EN-GJS-500-7 consists of a mixture of pearlite and ferrite. The mixture can vary within a component, depending on wall thickness and cooling time, leading to large variations in the hardness of the material. But EN-GJS-500-14, is solution strengthened with silicon and the matrix consists only of ferrite giving the material a more even hardness distribution. Large variation in hardness makes machining hard to optimize, which gives EN-GJS-500-14 an advantage in components requiring machining.

In this study, effect of silicon content on high cycle fatigue behavior of EN-GJS-500-7 and EN-GJS-500-14 grade ductile irons was investigated. Microstructural characterization was made by quantitative metallography and scanning electron microscopy (SEM). 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 scanning electron microscopy (SEM) and electron probe micro analysis (EPMA). Results revealed that higher amount of silicon encourages formation of a ferritic microstructure and provides higher toughness, higher ductility and yield strength values with respect to the lower silicon content ductile iron. Also, higher endurance ratio is achieved by the aid of higher amount of silicon.

1. GİRİŞ

Geçtiğimiz yüzyılın ilk yarısı, iyi dökünebilirlik ve yüksek tokluk değerlerinin birleşimi kısmen temper dökme demir yani beyaz dökme demirin tavlama ile oluşmasıyla oluşan temper dökme demir yerine getiriyordu. Bu ısıl işlem sırasında, sementit grafitte ayrışır ve tavlama sıcaklığından soğumasına bağlı olarak oluşan matriste kümeleşir. Tavlama işleminin yüksek maliyeti ve beyaz dökme demirin zor döküm prosesi temper dökme demirin kullanımı sınırlandırdı. 1943 yılında, International Nickel Company (INCO) araştırma laboratuvarlarında, döküm sıvısına magnezyum eklenerek küresel grafitli dökme demir elde edilmiştir. 1948 yılında ise az miktarda Ce eklenerek aynı sonuca ulaşılmıştır [1].

Küresel grafitli dökme demirler iyi işlenebilirlik ve iyi mekanik özelliklerinden dolayı birçok alanda kullanılır. Ulaştırma sektörü de bu alanlardan biridir. Bu sektörde çokça kullanılan krank mili üretimi için tercih edilen küresel grafitli dökme demirlerin tercih sebebi, bu malzemenin iyi işlenebilirlik ve yorulma dayanımı ve yüksek elastisite modülü özellikleridir. Buna ek olarak küresel grafitli dökme demirler, yüksek akma mukavemeti ve aşınma dayanımından dolayı dişli üretiminde de kullanılırlar [2].

Ulaştırma sektöründe kullanılan bu parçalar çevrimsel yüklere maruz kaldığından dolayı, yorulma bu parçaların tasarımı için önemli bir parametre haline gelmiştir. Günümüzde, ulaştırma sektöründe kullanılan bu parçalar için daha çok geleneksel ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demirler kullanılıyor (EN-GJS-500-7). Fakat geleneksel ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demirlerde, soğuma hızına bağlı ferrit/perlit oranındaki değişimden dolayı malzeme üzerindeki sertlik dağılımı çok geniştir. Bu malzemenin işlenebilirliğini düşürür ve kesme takımlarının ömrünü azaltır. Bu sorunlar göz önüne alınarak yakın geçmişte yapılan araştırmalar ile yeni %3,6-3,8 Si oranına sahip ferritik küresel grafitli dökme demirler ulaşım sektöründen tercih edilmeye başlanmıştır.

Bu yeni kalite küresel grafitli dökme demir tamamen ferritik matrise sahip olduğu için aşınma dayanımı daha düşük olsa da, sünekliği çok daha iyi, sertlik aralığı dar ve bu yüzden işlenebilirliği yüksektir. Yapıda bulunan yüksek Si oranı ile yüksek akma mukavemeti elde edilebilir [3].

2. DÖKME DEMİRLER

2.1 Tanımı ve Sınıflandırılması

Dökme demir terimi, çeliklerde olduğu gibi geniş, demir esaslı alaşım ailesini tarif eder. Benzer bileşen ve niteliklere sahip fakat gerçekte özellikleri, üretim karakterleri ve temel kullanımları birbirinden oldukça farklı malzemelerin meydana getirdiği grubun veya ailenin soy ismi olarak da tanımlanan dökme demirler, dökme endüstrisinin en yüksek tonaja sahip ürünüdür. Dökme demirlere olan gereksinimin başlıca nedenleri iyi bir mühendislik malzemesi oluşu ve ucuz üretilebilirliğidir [4,5]. Dökme demirler çeliklere oranla %20-40 daha az üretim maliyeti, daha iyi titreşim sönümleme ve katılaşma sırasında daha az hacim daralması gibi üretim ve mühendislik alanında avantajlara sahiptirler [6].

Genel olarak dökme demirler %4'e kadar karbon ve %3,5'e kadar silisyum içerirler. Bu elementlerden başka bileşimlerinde manganez, fosfor ve kükürt de bulunur. Ayrıca, elde edilecek dökme demir tipine bağlı olarak nikel, krom, molibden, magnezyum, alüminyum, titanyum ve bakır gibi elementler de dökme demirin bileşiminde bulunabilir [7].

Çelik ve dökme demirler prensip olarak demirin karbon ve silisyum ile alaşımlanmasıdır. Çelikler %2'den az miktarda karbon (çoğunlukla %1'den az C), dökme demirler %2'den fazla karbon içerirler. Katılaşma sırasında, tek fazda (östenit) çözünebilecek maksimum karbon oranı yaklaşık %2'dir. Sonuç olarak dökme demirler geriye artan karbon miktarının mikroyapıda oluşturacağı farklı bileşen çeşitlerinden dolayı, heterojen alaşımlar olarak da adlandırılırlar. Bileşenlerdeki bu farklılık da birden fazla dökme demir sınıfı oluşmasına neden olur [4]. Bu nedenden dolayı, dökme demirler çok geniş aralıkta değişen mukavemet, sertlik, işlenebilirlik, aşınma direnci ve diğer özelliklere sahip olabilirler. Özet olarak, dökme demirlerin geniş aralıkta farklı özellikler sağlaması, bu malzemenin kullanım alanının artmasına neden olmaktadır [5].

Çeliklerle karşılaştırsak, dökme demirler daha düşük ergime sıcaklığı, daha iyi akışkanlık ve kalıp malzemelerine karşı daha az reaktiflik gösterir. İçerisinde bulunan yüksek karbon iyi dökülebilirlik, düşük yoğunluk özelliklerini sağlarken, silisyum mikroyapıyı güçlendirici etki gösterir fakat döküm halinde sünek olmadıklarından soğuk ve sıcak işleme şekillendirilemezler [4,5].

Kompozisyona, ergitme işlemine ve soğutma hızına bağlı olarak dökme demirler termodinamik olarak yarı kararlı Fe-Fe₃C (sementit) ya da kararlı Fe-C (grafit) sisteminde katılaşabilir. Eğer kararsız yol takip ediliyor ise, ötektik içindeki zengin karbon fazı demir karbürdür. Kararlı katılaşma fazı takip edildiğinde ise zengin karbon fazı grafit olur. Dökme demirler %2'den fazla karbon içeren bir demir karbon alaşımı şeklinde de tanımlanabilir fakat silisyum ve diğer alaşım elementleri östenit içerisinde çözünebilen maksimum karbon miktarını değiştirebildiğinden dolayı bazı durumlarda %2'den daha az karbon içeren demir alaşımları da ötektik reaksiyonla katılaşarak, dökme demir sınıfına dahil edilirler.

Kararlı ya da yarı kararlı ötektiğin oluşumu, sıvının çekirdekleşme potansiyeli, kimyasal kompozisyon ve soğuma hızına bağlıdır. Demirin grafitleşme potansiyelini, sıvının çekirdekleşme potansiyeli ve kimyasal kompozisyon belirler. Grafitleşme potansiyeli de zengin karbon fazı olarak yapıda grafit mi, demir karbür olarak mı oluşacağını belirler. Buna bağlı olarak yapıda zengin karbon fazı, grafitleşme potansiyeli yüksek ise grafit, düşük ise demir karbür olarak oluşur [4]. Ayrıca, yapıda bulunan krom, manganez ve diğer karbür oluşturu elementler ince kesitlerde katılaşmayı hızlandırarak yarı kararlı sistemin oluşumuna katkı sağlarken, silisyum, bakır, fosfor ve nikel katılaşmayı yavaşlatarak kararlı sistem oluşumuna yardımcı olur.

Dökme demirin metalurjisinde soğuma hızı, kimyasal kompozisyon, ısıtma işlemi, sıvı işlemi dökme demirin yapısını, sınıfını buna bağlı olarak özelliklerini belirleyen temel faktörlerdir [8].

Kararsız östenit-demir karbür (Fe₃C) ve kararlı östenit-grafit fazının mukavemet, sertlik, tokluk, süneklik gibi mekanik özellikleri birbirinden çok farklıdır. Bu yüzden dökme demirlerin metalurjik prosesinin temel amacı ötektiğin şekillenmesini ve miktarını istenilen özelliklere uygun bir şekilde elde etmektir [9].

Dökme demirin yapısında bulunan silisyum, fosfor, karbon elementlerinin bileşimlerindeki değişiklik, sıvılaşma ve katılaşma sıcaklıklarını ve ötektik bileşimi değiştireceğinden, mekanik özellikleri etkiler. Bu etkiyi, karbon eşdeğeri (Ceş) olarak tanımlanan bir parametre ile belirlemek mümkün olmuştur [7].

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

Bu formül ile test edilen; alaşımın ötektik, ötektik altı veya ötektik üstü kompozisyonunda olup olmadığıdır. Karbon eşdeğeri %4,25'den çok ise ötektik üstü, az ise ötektik altı, %4,25 ise ötektik yapı vardır. Ötektik altı kompozisyona sahip alaşımlarda sıvılaşma sıcaklığı bileşime bağlı olarak değişir [10].

Aynı karbon eşdeğerine sahip fakat farklı karbon, silisyum ve fosfor içeriğine sahip dökme demirler aynı döküm özelliklerine sahip değildir. Örneğin, karbon katılaşma sırasında çekilmeyi, karbon eşdeğerinin önleyebileceğinden iki katı daha etkili bir şekilde engeller. Silisyum ise ince kesitlerin sertleşmesinin önlenmesinde çok daha etkilidir. Fakat bu ilişki genelde dökme demirlerle ilgili tartışma söz konusu olunca kullanılır [4].

Dökme demir, geçmiş en az 14. yüzyıla dayanan bir mühendislik malzemesidir [11]. Dökme demirlerin tarihsel olarak ilk sınıflandırılması gri ve beyaz dökme demirler olarak kırılma yüzeylerine göre yapılmıştır, günümüzde hala geçerlidir. Metalografinin gelişmesi ile dökme demirlerle ilgili bilgi arttıkça sınıflandırmalar mikroyapıya göre yapılmıştır [9]. Dökme demirler günümüzde endüstride en çok kullanılan, gri, temper, beyaz, küresel grafitli ve alaşımlı dökme demirler olarak 5 ana gruba ayrılabilirler. 5 ana dökme demir grubu şematik olarak Çizelge 2,1'de gösterilmiştir [8,11].

En eski dökme demir sınıfı gri dökme demirdir, hala geniş alanlarda kullanılmakta olan, yüksek karbon içerikli karbon-silisyum alaşımıdır. Çizelge 2.2'de bazı dökme demirlerin kimyasal bileşimleri verilmiştir. Temper dökme demir benzer kompozisyonda fakat süneklik özelliğini verebilmek için yapısı ısıtma işlemi ile değiştirilmiştir. Beyaz dökme demir, sert ham döküm yapısına sahiptir. Küresel grafitli dökme demir süneklik olarak temper dökme demire benzer, fakat bu sünekliği grafitleri küreselleştirici bazı alaşım elementleri eklenerek elde edilir. Alaşımlı dökme demirler ise genelde gri veya beyaz dökme demirlere alaşım

eklenerek daha sert ve korozyon direnci daha iyi dökme demirler elde edilmesiyle oluşur [11].

Çizelge 2.1 : Dökme demirlerin ticari adı, mikroyapısı ve kırılma görünümüne göre sınıflandırılması [9].

Ticari Adı (dökme demir)	Karbonca Zengin Faz	Matris	Kırılma Görünümü	Nihai İşlem
Gri	Lamelli 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	Isıl işlem
Östemperlenmiş	Küresel grafit	Beynit	Gümüş – Gri	Isıl işlem

Çizelge 2.2 : Bazı dökme demirlerin kimyasal bileşimi [5,9]

Dökme Demir	Kimyasal Bileşim %Ağ.				
	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

3. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

3.1 Giriş

Küresel grafitli dökme demirler ilk olarak 1948 yılında Amerika’da P. Gagnebin ve arkadaşları, İngiltere’de H. Morrogh ve W. J. Williams tarafından üretilip, dökme demir ailesine yeni bir soluk olmuştur. Sfero veya nodüler dökme demir olarak da isimlendirilen küresel grafitli dökme demirler ergimiş haldeki demir-karbon-silisyum alaşımına magnezyum ya da seryum eklenerek elde edilirler. İlaveten, iyi fiyat/performans oranı ve kontrol edilebilir döküm teknolojisi bu dökme demir çeşidinin kullanım oranının artmasına sebep olmuştur. Nodüler dökme demirin bugünkü küresel üretim kapasitesi yılda 20 milyon tondur [12].

3.2 Standartlara Göre Sınıflandırılması

Küresel grafitli dökme demirler, Türk standartlarına göre sınıflandırıldığında DDK (Dökme Demir Küresel Grafitli) işareti ile gösterilir. Bu harflerin sonuna gelen rakamlar ise minimum çekme mukavemetini gösterip kg/mm^2 olarak ifade edilirler (Çizelge 3.1) [13].

Çizelge 3.1 : Küresel grafitli dökme demirlerin TSE’ye göre sınıflandırılması [13].

Kısa Gösteriliş	Çekme Muk. min. kg/mm^2	Akma Muk. min. kg/mm^2	Uzama (%) min.	Sertlik (BHN)	Mikroyapı
DDK 40	42	28	12	140-201	Daha çok Ferritik
DDK50	50	35	7	170-241	Ferritik+Perlitik
DDK60	60	40	3	192-269	Ferritik+Perlitik
DDK70	70	45	2	229-302	Daha çok Perlitik
DDK80	80	50	2	248-352	Perlitik
DDK35.3	35	50	22	-	Ferritik
DDK40.3	40	22	18	-	Ferritik

Avrupa standardı EN 1563 küresel grafitli dökme demiri GJS olarak tanımlar ve bu harfleri minimum çekme mukavemeti ve minimum % uzama değerleri izler (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2 : Küresel grafitli dökme demirlerin EN 1563 standardına göre sınıflandırılması [14].

Sınıf	Çekme Muk. min. (MPa)	Akma Muk. min. (MPa)	Uzama min. (%)	Sertlik (HBW)	Mikroyapı
EN-GJS-350-22	350	220	22	160'dan az	Ferrit
EN-GJS-400-18	400	250	18	130-175	Ferrit
EN-GJS-450-10	450	310	10	160-210	Ferrit
EN-GJS-500-7	500	320	7	170-230	Ferrit+Perlit
EN-GJS-600-3	600	370	3	190-270	Perlit+Ferrit
EN-GJS-700-2	700	420	2	225-305	Perlit

Küresel grafitli dökme demirlerin Amerikan ASTM A 536-84 standartlarına göre yapılan sınıflandırılmasında çekme ve akma mukavemeti ksi, uzama yüzde olarak belirtilmiştir. Örneğin A 536'ya göre 80-60-03 sınıfı (80 ksi veya 552 MPa minimum çekme mukavemeti; 60 ksi veya 414 MPa akma dayanımı ve %3 uzama) yüksek sünekliğin önemli olmadığı uygulamalarda kullanılırlar. 65-45-12 ve 60-40-18 sınıfları ise yüksek süneklik ve darbe direnci gereken yerlerde kullanılırlar. 60-42-10 ve 70-50-05 sınıfları tavllanmış boru ve dökme boru bağlantı parçaları gibi özel uygulamalarda kullanılırlar. ASTM A 536'da üstelenenler dışındaki diğer küresel grafitli dökme demirler müşteri ve üretici arasındaki mekanik özellikler üzerindeki karşılıklı anlaşmaya bağlı olarak A 536'da belirtilen genel uygulama alanlarına göre üretilebilir (Çizelge 3.3).

SAE International (Otomotiv Mühendisleri Cemiyeti), büyük miktarlarda dökümler için küresel grafitli dökme demirleri sınıflandırmada, dökümlerin matris mikroyapısı ve Brinell sertliğine dayalı bir sistem kullanır. Hem ASTM hem de SAE standartları çekme özellikleri ve sertlik için standarttır.

Uluslararası tanımlama sistemi (ISO 1083), minimum çekme mukavemetini MPa ve minimum uzamayı % olarak verir. Çizelge 3.3'te ASTM, SAE ve ISO standartlarına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılmasında kullanılan özellikler görülmektedir [9].

Alman DIN 1693 standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılmasında ise çekme mukavemeti, akma mukavemeti, % uzama ve Brinell cinsinden sertlik esas alınmıştır. Çizelge 3.4'te gösterilen bu sınıflandırmada küresel grafitli dökme demir kısaca GGG olarak belirtilmektedir [8].

Çizelge 3.3 : Küresel grafitli dökme demirlerin çeşitli ulusal standartlara göre sınıflandırılması [9].

Sınıf	Çekme Mukavemeti		Akma Mukavemeti		Uzama min. (%)	Darbe Direnci		Sertlik (HB)	Yapı
	MPa	ksi	MPa	Ksi		J	Ft.lb		
ISO Standartları 1083 (Uluslararası)									
800-2	800	116	480	70	2	-	-		Perlit
700-2	705	102	420	61	2	-	-		Perlit
600-3	600	87	370	54	3	-	-		Perlit + Ferrit
500-7	500	73	320	46	7	-	-		Ferrit + Perlit
400-12	400	58	250	36	12	-	-		Ferrit
370-17	370	54	230	33	17	13	9.5		Ferrit
ASTM A536 (ABD)									
60-40-18	414	60	276	40	18	-	-	-	-
60-42-10	414	60	290	42	10	-	-	-	-
65-45-12	448	65	310	45	12	-	-	-	-
70-50-0.5	485	70	345	50	12	-	-	-	-
80-55-0.6	552	80	379	55	5	-	-	-	-
80-60-0.3	552	80	414	60	6	-	-	-	-
100-70-0.3	690	100	483	70	3	-	-	-	-
120-90-0.2	827	120	621	90	3	-	-	-	-
SAE J 434 (ABD)									
D4018	414	60	276	40	18	-	-	170 maks.	Ferrit
D4512	448	65	310	45	12	-	-	156-217	Ferrit + Perlit
D5506	552	80	379	55	6	-	-	187-255	Ferrit + Perlit
D7003	690	100	483	70	3	-	-	241-302	Perlit
DQ&T	-	-	-	-	-	-	-	-	Martenzit

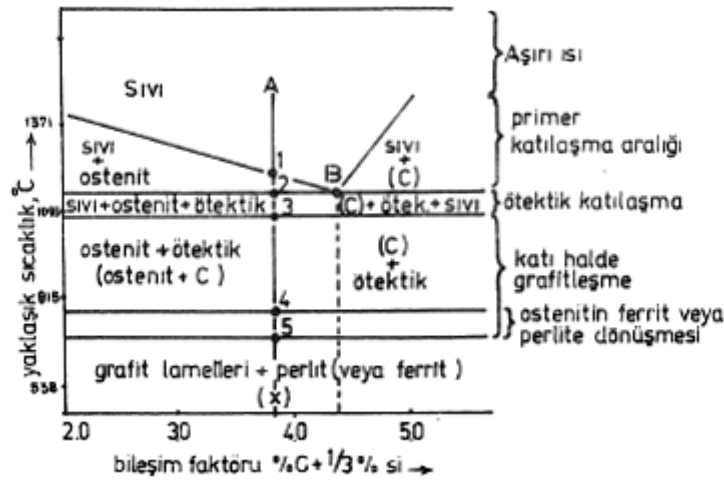
Çizelge 3.4 : Alman DIN 1693 standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması [8].

Sınıf	Çekme Muk. min.(MPa)	Akma Muk. min.(MPa)	Uzama min. (%)	Sertlik (HBW)	Mikroyapı
GGG 35-3	350	220	22	-	-
GGG 40-3	400	250	18	-	-
GGG 40	400	250	15	120	Ferrit
GGG 50	500	320	7	156	Ferrit+Perlit
GGG 60	600	380	3	170	Perlit+Ferrit
GGG 70	700	440	3	302	Perlit
GGG 80	800	500	2	210	Perlit

3.3 Katılaşması ve Grafit Oluşumu

Küresel grafitli dökme demirler üçlü Fe-C-Si alaşımlarıdır. Gri dökme demirde lamel şeklinde çökmüş olan grafitlerin aksine küresel grafitli dökme demirde grafitler küreler şeklinde katılaşmışlardır [15]. Alaşımın karbon ve silisyum içeriğine bağlı

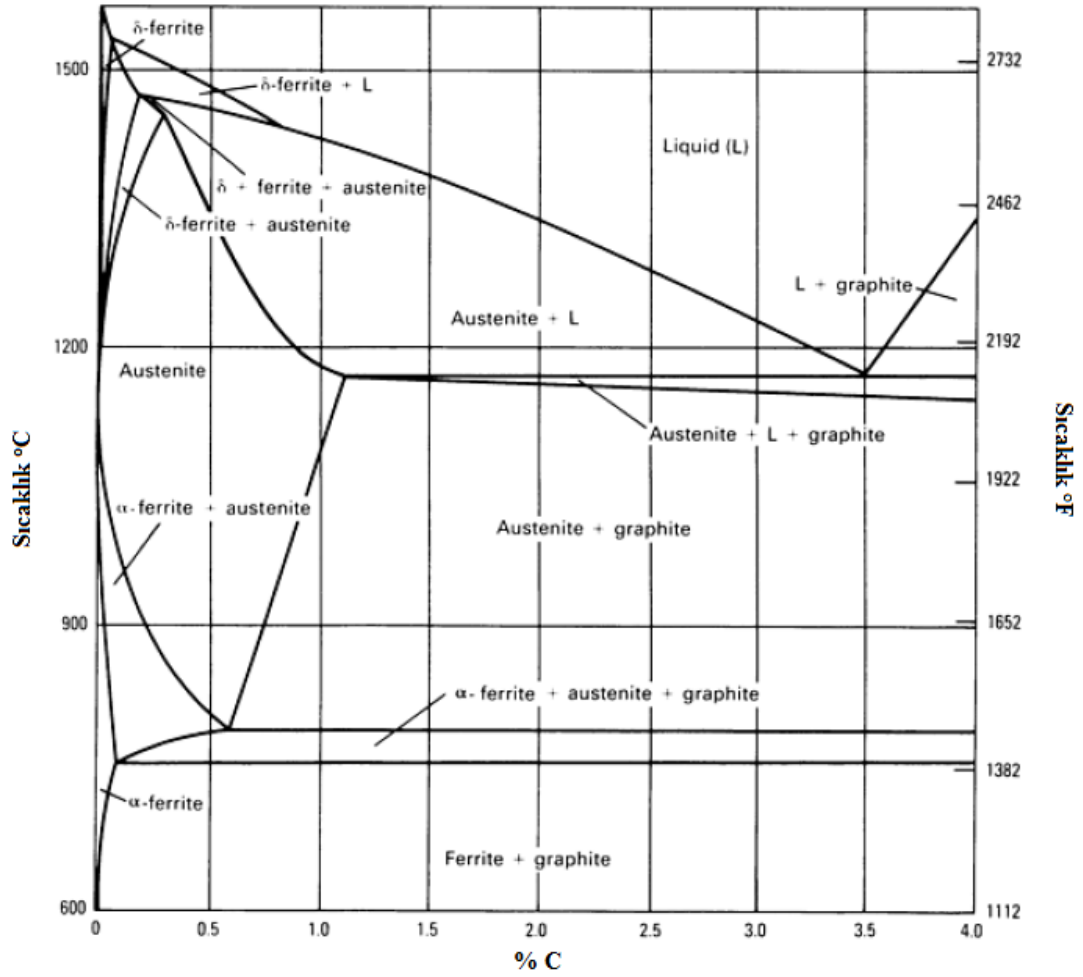
olarak küre oluşumu, alaşımın saflık seviyesi, küreleştirici elementlerin ilavesi ve soğuma parametreleri ile kontrol edilir. Küresel grafitli dökme demirlerin katılaşması, çekirdeklenme ve iki farklı fazın büyümesinden oluşur ve karmaşıktır. Grafit nodüllerinin büyümesi karbonun östenit hücrelerinden difüzyonu ile gerçekleşir [16]. Grafit çekirdekleri yavaşça büyüyerek östenit tarafından çevrelenirler ve yalnız östenit sıvı faz ile temas halindedirler. Östenit ve grafitin bu şekilde birleşimi ötektik sıcaklığında ve ötektik noktasındaki kompozisyona karşılık gelmektedir. Bu tip katılaşmaya neoötektik denilmektedir. Her bir grafit küresi ve östenit kabuğu bir ötektik hücre olarak kabul edilebilir. Grafit kürelerinin büyüebilmesi için karbonun östenit kabuğundan içeriye doğru yayılması gerekmektedir. Karbon ile aşırı doymuş östenit soğur ve fazla karbon grafitlere doğru difüze olur ve oraya çöker. Bu nedenle katılaşma nispeten yavaş olmakta ve neoötektik katılaşma aralığı yaklaşık 49 °C'ye kadar varabilmektedir (Şekil 3.1) [17,18].



Şekil 3.1 : Dökme demirlerde katılaşmanın ve grafit oluşumu sıcaklık aralığının şematik gösterimi [7].

Neoötektik'in büyümesi başladıktan sonra, başka küresel grafit çekirdeklenmesi olmaz, dolayısıyla grafit kürelerinin sayısı daha katılaşmanın başlangıcında belirlenmiştir. Ötektoid sıcaklığa ulaşılan kadar mevcut grafit küreleri üzerine grafit çökmesi meydana gelir.

Küresel grafitli dökme demirin, ötektikaltı ve ötektiküstü bileşimine sahip olmasına göre katılaşma mekanizması birtakım değişiklikler gösterir. Ötektikaltı bileşimlerde katılaşma östenit dendritlerinin oluşumuyla başlar. Ötektiküstü (%C veya $C_{\text{eş}} = 4,5$) bileşime sahip küresel grafitli dökme demirlerde ise katılaşma genel hatlarıyla aynı olup ilk katılaşan faz küresel grafitlerdir.



Şekil 3.2 : Demir-karbon faz diyagramı [4].

Şekil 3.2’de gösterilen demir-karbon faz diyagramında gösterildiği gibi östenit, katı hal dönüşümü ile birlikte metalin kompozisyonuna ve sıcaklığa bağlı olarak ferrit+grafit veya ferrit+perlit+grafite dönüşebilir. Aynı zamanda sementitin grafit ve ferrite ayrışması da gözlenebilir. Eğer perlit teşvik edici elementler dönüşüm sıcaklığını düşürür ve ferrit oluşum hızını azaltırsa perlit, östenit-östenit sınırlarında veya östenit-grafit ara yüzeyinde çekirdeklenebilir [4].

Küresel grafitli dökme demir üretiminde, sıvı işlemleri olarak bilinen iki aşama vardır. Bu aşamalardan birincisi küreleştirici ilavesidir. Küreleştirici olarak magnezyum (bir miktar kalsiyum, seryum ve diğer nadir toprak elementleriyle birlikte) bu amaç için en etkili ve ekonomik elementtir. Bileşimde minimum %0,015-0,050 magnezyum yeterli kabul edilir. Sıvı işleminin ikinci aşaması ise aşılama aşamasıdır. Bu aşamada, ergimiş metale üzerinde katılaşmanın başlayacağı çekirdekler sağlanmaktadır. Küresel grafitli dökme demirde, en uygun aşılama ajanları ferro silisyum alaşımlarıdır. Yeni kristallerin oluşması için en uygun ortam, aşılama taneciklerinin katılaşma

başlayana kadar erimeden kalmasıyla sağlanır. Sonuç olarak, daha fazla grafit küresinin oluşması anlamına gelir. Bu bakımdan aşılama, grafit oluşturma eğiliminin artmasını ve karbür oluşumunun önlenmesini sağlar [7-9].

3.4 Kimyasal Bileşimi

ISO 1083 ve EN 1563 küresel grafitli dökme demirin metal kompozisyonu için gereklilikleri belirtmemiştir, üreticinin kendi kararına bırakmıştır. Kompozisyonun seçimi döküm parçasının boyutuna ve hedeflenen mekanik özelliklere bağlıdır [19].

Kimyasal bileşim, grafit şekli ve boyutu üzerinde birincil etkiye sahip olmanın yanı sıra, matris yapısı üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Her element, metalik matris yapısı veya grafitlerin katılma yapısı üzerinde farklı etki gösterirler. Küresel grafitli dökme demirlerin bileşiminde birçok element mevcuttur ve mikroyapıya olan etkilerine göre sınıflandırılabilir. Bunlar:

- Birincil elementler (C, Si, Mn, S ve P),
- Küreleştirici elementler (Mg, Ce, La ve diğer nadir toprak elementleri, Ca vs.),
- Alaşım elementleri (Cu, Sn, Ni ve Mo),
- Kalıntı ve özel amaçlı elementler (Al, Bi, Sb, Pb vb.)
- Perlit ve karbür yapıcı elementler (As, B, Cr, Sn ve V)
- Gazlar (H, N ve O).

İstenilen mikroyapı ve küresel grafit yapısını elde edebilmenin temel şartı, kimyasal bileşimin kontrolüdür [20].

Küresel grafitlerin oluşumu başlıca karbon ve silisyum oranı tarafından kontrol edilse de, saf alaşımlar ve küreselleştirici elementler de küresel grafitlerin oluşumunda büyük etkiye sahiptir. Karbon ve silisyum oranı ve soğutma parametreleri metalik matriste gömülü grafitlerin miktarını kontrol eder. Bu elementler genellikle Fe fazı içerisinde birlikte bulunurlar ve yaygın olarak bilinen karbon eşdeğeri ($Ceş = \%C + \%Si/3$) ile ifade edilirler. Araştırmacılar, küre sayısındaki artışın $Ceş$ 'in artışına bağlı olduğunu saptamışlardır. Daha yüksek $Ceş$ 'e bağlı olarak küre sayısının artması, diğer süreç değişkenlerinin etkisi ile (örneğin artan aşılama gibi) azalır [19,21]. Prensip olarak, bütün küresel grafitli dökme demir sınıfları dar bir karbon silisyum oranı aralığında elde edilebilir [19].

Ticari dökme demirlerde karbon oranı genellikle %3,0-4,0 arasındadır. KGDD bileşiminde karbon oranı arttıkça, grafit sayısı da artar, ayrıca akışkanlık ve beslenme özelliklerini de iyileştirerek dökülebilirliği artırır [18,21].

KGDD'de silisyum oranı normal olarak % 1,80-2,80 arasındadır. Silisyum en iyi grafit yapıcı elementtir. Silisyum, karbonun östenit içindeki çözünübilirliğini düşürür ve ötektik sıcaklığının stabilizesini artırır, grafitin oluşmasını teşvik eder. Sonuç olarak, östenit-grafit sistemini destekler. Düşük silisyum oranlarında, taneler arası ve tanelerin içinde oluşan karbürlerin oluşumundaki eğilim artar. Silisyumdaki artış, küre sayısını artırırken ötektik hücre boyutunu azaltır ve karbür oluşumuna eğilimin azalması ile sonuçlanır. Bu etkiler zamana bağımlı olan aşılama yönteminin etkinliği ile giderilir [19-21].

Grafit oluşumunu teşvik ettiği bilinse bile fosfor, küresel grafitli dökme demirlerde zararlı bir elementtir çünkü fosfor katılma sırasında grafit kürelerini çevreleyen hücrelerin sınırlarında yoğunlaşır ve kırılgan bir demir fosfür ağı oluşturur. Fosfor perlitin oluşumunu artırır. Küresel grafitli dökme demirlerde fosfor oranı genellikle %0.04'ten azdır.

Kükürdün grafit tanelerinin çekirdeklenmesi ve büyümesine büyük etkisi vardır. Kükürt yüzeyi aktif olan bir elementtir ve grafit kristalleri tarafından absorbe edilebilir. Kükürt grafitlerinin küresel yerine lamel şeklinde oluşmasını teşvik eder. Küresel grafitli dökme demirler kükürt oranına karşı hassastırlar; çok fazlası lamel grafit oluşumuna neden olabilirken çok az miktarı da nodüler grafitlerin azalmasına sebep olabilir. Tavsiye edilen kükürt oranı %0,01 ve 0,015 arasındadır [19].

Manganez oranı maksimum sünekliği elde etmek için sınırlandırılabilir. Döküm halindeki ferritik dökme demirlerde manganez bileşimi %0,2 ya da daha az olabilir. Ancak, perlitik döküm yapısı için manganez bileşimi %1'e kadar çıkabilir. İstenmeyen mikrosegregasyona sebep olur. Özellikle kalın kesitli dökümlerde, manganez tane sınırı karbürlerinin oluşumunu teşvik eder [4,7,18].

Karbonun küresel grafit halinde kristalleşmesini etkileyen birden fazla element vardır. Magnezyum, kalsiyum, seryum, nadir elementler karbonun küresel grafit şeklinde çökmesini sağlar. Bu elementlerin görevi kükürt ve oksijen gibi yüzey aktivitesi yüksek olan elementleri etkisizleştirmektir. Ucuz ve çok geniş aralıklarda

Ceş değerlerinde uygulanabilirliğinden dolayı Mg en yaygın kullanılan küreselleştiricidir [20].

Kalsiyumun en önemli rolü ise magnezyumun uçuculuğunu azaltıp, sıvı metalde kalma süresini artırır. Magnezyum oldukça uçucu bir elementtir ve kaynama sıcaklığı olan 1107°C, genellikle küreselleştirme işlemi sıcaklığının oldukça altındadır. Sıvıdaki Mg miktarı, artan sıcaklık ve artan tutma süresi ile azalır. Ancak magnezyumun kimyasal olarak alaşımlanması ile kimyasal reaksiyonun hızını kontrol etmek mümkündür. Örneğin kalsiyum (Ca) ile alaşımlandığında, sıvı demir-Mg reaksiyonu sonucu buharlaşma miktarı azalırken; Mg' un sıvı metalde kalma süresi, Ca ve Si'un oksitleri ile yaptığı bileşikler sonucu artar [21].

KGDD kompozisyonunun kontrolünde birincil elementler olan C ve Si yanı sıra bazı alaşım elementlerinin de mikroyapıya etkisinde önemli bir rolü vardır. Örneğin, kurşun, alüminyum ve zirkonyum grafit lamellerini oluşmasını teşvik ettiklerinden sıkı kontrolleri sağlanmalıdır. Perlit oluşumuna katkısı olan bakır, krom, vanadyum, kalay elementleri de sünekliğe zarar verici etkisinden dolayı kontrolüne dikkat edilmelidir. Kalayın perlit oluşumuna etkisi bakırdan 10 kat daha fazladır. Kalay küresel grafitlerin yüzeyine çöker bariyer özelliği göstererek karbon atomlarının grafitlere transfer olmasını engeller Nikel de karbür kararlılığını azaltıp perlit oluşumunu attırdığı için yaygın olarak kullanılan bir elementtir [20,22,23].

3.5 Mikroyapısı ve Çeşitleri

Küresel grafitli dökme demirler sıvı metale döküm öncesi uygun kompozisyonda magnezyum eklenerek elde ediliyor. Magnezyum, grafitlerin lamel grafit yerine küresel grafit olarak çökmesini destekler. Katılaşma yöntemi gri dökme demirden tamamen farklıdır bu da gri dökme demir ile elde edilebilecek çekme özelliklerinden daha iyi özelliğe sahip geniş aralıkta küresel grafitli dökme demir sınıfları oluşmasına neden olur. Özelliklerdeki bu farklılık grafitin morfolojisinden kaynaklanır. Grafit lamellerin neden olduğu gerilme yoğunlaşmasına küresel grafitler neden olmaz, bunun nedeni küresel grafitle en uygun yüzey alanı-hacim oranına ulaşılmasıdır. Küresel grafitli dökme demirlerde matris yapısı ferritikten perlitliğe kadar çeşitlenebilir. Kimyasal kompozisyonun, alaşımlamanın ve ısıtılmanın kontrolü ile farklı matrislere sahip küresel grafitli dökme demirler elde edilebilir.

Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demir:

Ferrit matrisli küresel grafitli dökme demir elde etmek için üç yol mevcuttur. Birincisi dökme demirlerin ağırlığına göre %0,20 magnezyum alaşımı kullanmaktır. İkincisi, perlitik dökme demiri tavlama; üçüncüsü, sıvı demir katılaşmasını çok yavaş şekilde gerçekleştirmektir. Elde edilen küresel grafitli dökme demir çok yüksek uzama kabiliyetine sahiptir.

Perlitik Küresel Grafitli Dökme Demir:

Kimyasal bileşimlerin normal şartlarda kesit kalınlıkları 50 mm'ye kadar olan iş parçalarında gösterdiği yapıdır. Malzeme sert ve kuvvetli olup gri dökmenin iki misli çekme mukavemetine sahiptir.

Ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demirlerde; matrislerin oranı, kompozisyonun veya soğutma hızının ayarlanmasıyla kontrol edilebilir [20].

Beynitik Küresel Grafitli Dökme Demir:

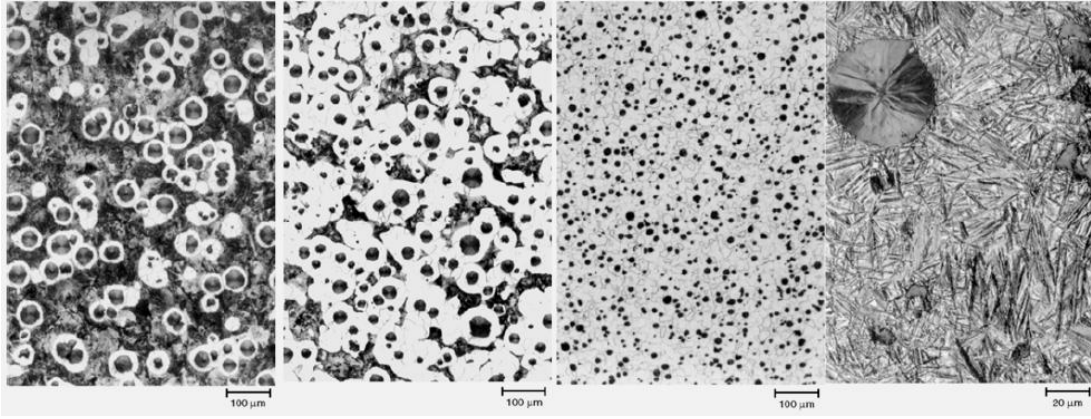
Diğer demir alaşımları gibi su verme ve temperleme ile küresel grafitli dökme demirin yapısı değiştirilebilir. Elde edilen yapı beynitik matris içerisinde küresel grafitlerdir. Beynitik küresel grafitli dökme demirin yüksek mekanik mukavemeti ve sertliği vardır.

Östenitik Küresel Grafitli Dökme Demir:

%35'e kadar Ni içerir. Korozyona dayanıklı olup yüksek mekanik mukavemeti mevcuttur. Grafitler bir miktar küresel şekillerini kaybederler. Matris östenit ve birazda perlitten meydana gelmiştir [24].

Martenzitik Kürese Grafitli Dökme Demir:

Küresel grafitli dökme demire alaşım elementi ilavesiyle veya ısı işleme uygulayarak martenzitik yapıda oluşumu sağlanır. Çok sert ve gevrek bir fazdır. Küresel grafitli dökme demirin aşınma direncini artırır. Düşük sıcaklıklarda temperlenebilir. Temperleme sıcaklığına bağlı olarak çok farklı mekanik özellikler elde edilebilir. Alaşım elementlerinden manganez, nikel, molibden, krom, bakır ve kalay sertleşebilirliği arttırarak martenzit oluşumunu teşvik eder [7]. Farklı mikroyapılarda küresel grafitli dökme demirler Şekil 3.3'te gösterilmektedir, soldan sağa; perlitik-ferritik matrisli, ferritik-perlitik matrisli, ferritik matrisli, beynitik matrisli küresel grafitli dökme demirdir.



Şekil 3.3 : Farklı mikroyapılarda küresel grafitli dökme demirlerin optik mikroskop görüntüleri [20].

3.6 Uygulama Alanları

Küresel grafitli dökme demirler üstün özelliklerinden dolayı otomotiv ve tarım endüstrisi gibi geniş bir yelpazede artan uygulama alanları vardır [25]. Küresel grafitli dökme demirler; otomotiv endüstrisinde iyi işlenebilirlik, düşük maliyet özellikleri yanı sıra yüksek yorulma dayanımı, gri dökme demire göre yüksek elastik modülü özelliklerinden dolayı krank milli üretiminde, yüksek akma dayanımı ve aşınma direnci özellikleri sayesinde ise dişli üretiminde kullanılır [2].

Aşınma direnci, sönümleme özelliği, düşük sıcaklıkta şok özelliği sayesinde silindir blok, silindir başı, biyel, piston segmanı ve otomobil fren parçalarında kullanılır [26]. Bunlara ek olarak, kamyon aksları, tekerlek mili, motor bağlantı çubuklarında da küresel grafitli dökme demirler kullanılır [27].

Tarım ve yeryüzü hareketleriyle ilgili uygulamalarda, yüksek mukavemet ve tokluğa sahip dirsekler, kavramalar, bilyalar, hidrolik valfler, zincir dişlileri ve ray parçalarında küresel grafitli dökme demirlerden yapılmaktadır. Küresel grafitli dökme demirlerin diğer mühendislik uygulamalarına örnek olarak; hidrolik silindirler, mandraller, hadde merdaneleri, tünel parçaları, demiryolu ray destekleri, kömür ve mineral ezme parçaları, yüksek sıcaklık uygulamalarında güvenlik valfleri, nükleer yakıt konteynerleri ve taşıyıcıları, kompresör gövdeleri ve kağıt üretim makineleri verilebilir [8,28].

3.7 Mekanik Özellikleri

Endüstrinin tüm alanlarında kritik parçaların birçok başarılı kullanım alanına sahip olması, küresel grafitli dökme demirin çok kullanışlı olduğunu gösterir. Küresel grafitli dökme demirleri güvenle kullanmak için, tasarım mühendisleri küresel grafitli dökme demirlerin elastik davranışı, mukavemeti, sünekliği, sertliği, kırılma tokluğu ve yorulma özellikleri hakkında bilgi sahibi olmalıdır [29].

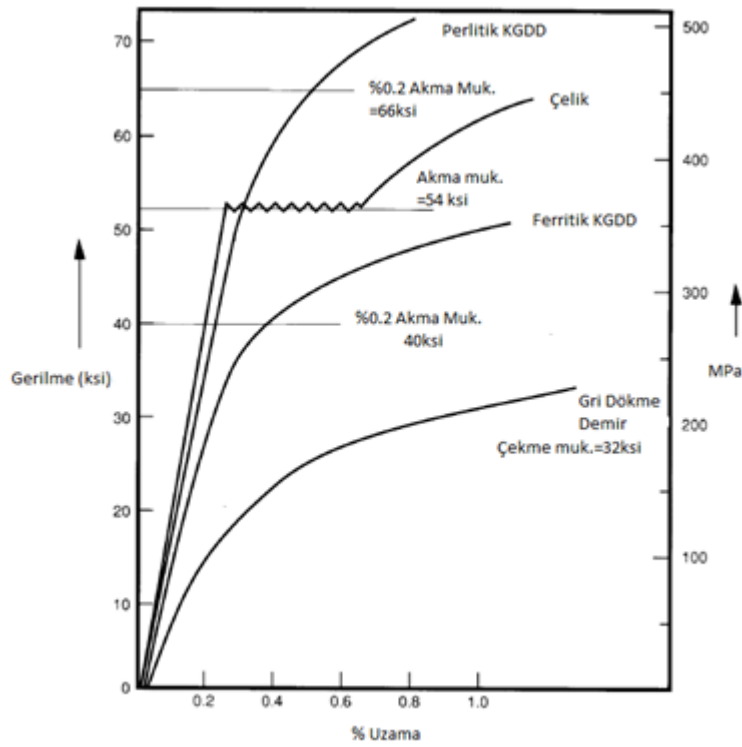
Küresel grafitlerin çentik etkisi, lamel grafitlere göre önemli ölçüde daha azdır bu da küresel grafitli dökme demirlerin, lamel grafitte sahip olan dökme demirlere göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olmasını sağlamıştır [12].

Geleneksel küresel grafitli dökme demirlerin çekme özellikleri, özellikle çekme ve akma mukavemeti ve süneklik değeri mekanik özellikler için belirleyicidir. Poisson oranı küresel grafitli dökme demirlerde biraz çeşitlilik gösterir. Genel olarak kabul edilen değer 0,275'tir. Orantı sınırının, %0,2 akma mukavemetine oranı ferritik küresel grafitli dökme demirler için tipik olarak 0,71 iken perlitik ve tavlanmış martenzitik küresel grafitli dökme demirler için bu değer 0,56'ya düşmektedir.

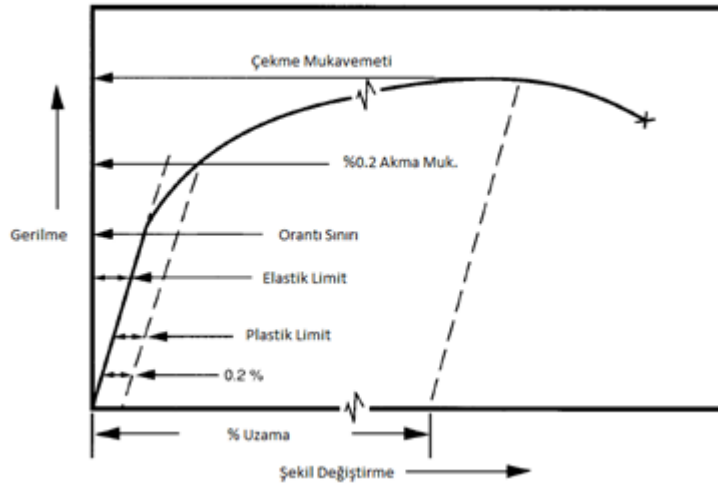
Küresel grafitli dökme demirlerin akma mukavemet aralığı ise farklı sınıflar için 275 MPa ile 620 MPa arasındadır. Geleneksel küresel grafitli dökme demirlerin çekme mukavemeti ise yine farklı sınıflar için genel olarak 414 MPa ile 1380 MPa arasında değişmektedir. Şekil 3.4'te farklı sınıflarda küresel grafitli dökme demir, gri dökme demir ve çeliğin akma mukavemetini gösteren gerilme şekil değiştirme eğrisi görülmektedir [19].

Küresel grafitli dökme demirlerin elastik modülü 162-170 GPa arasında değişir. Şekil 3.5 küresel grafitli dökme demirlerin tipik gerilme-şekil değiştirme eğrisini göstermektedir.

Kopma uzaması genelde sünekliğin temel göstergesi olarak kullanılan bir özelliktir ve birçok küresel grafitli dökme demirin özellikleri arasında belirtilir. Gevrek malzemeler, gri dökme demir gibi, çekme sırasında hiç uzama göstermeden kırılır. Fakat ferritik dökme demirler %25'ten bile fazla uzaman gösterirler [19].



Şekil 3.4 : Çelik, gri, ferritik ve perlitik küresel grafitli dökme demirlerin elastik özellikleri [19].



Şekil 3.5 : Küresel grafitli dökme demirler için gerilme-şekil değiştirme eğrisi [19].

Tüm küresel grafitli dökme demirler burma etkisiyle oluşan kayma gerilmeleri altında önemli ölçüde deforme olur. Burma mukavemeti, çekme mukavemetinin yaklaşık 0,9 katıdır. Orantı sınırı ve %0,2 akma mukavemeti ise sırasıyla çekmedeki değerlerin 0,7-0,775 katıdır.

%90'dan fazla küreselliğe sahip bir küresel grafitli dökme demirin sönüm kapasitesi çeliklerinkinden yaklaşık 6-7 kat fazladır. Bu değer grafit yapısındaki değişmeye karşı son derece duyarlıdır ve az miktarda lamel grafit oluşumunda dahi bu değeri

önemli miktarda düşürecektir. Kırılma tokluğu değerleri ise 25-54 MPa√m arasındadır ve bu değer ferrit oranındaki artışa bağlı olarak artar [7].

Küresel grafitli dökme demirlerin darbe direnci çeliklerde olduğu gibi sıcaklığa bağlı olup, yapı ve bileşim tarafından önemli oranda etkilenmektedir. Matris yapısı tamamen ferritik olan küresel grafitli dökme demirler en yüksek tokluğa sahip olanlardır. Tokluk derecesi matriste artan perlit yüzdesi ile azalmaktadır. Ancak tamamen ferritik veya çoğunlukla ferrit ve az perlitli matrise sahip olanlar düşük sıcaklıklara inildikçe çok dar bir sıcaklık aralığında (~100 °C) darbe dirençlerinin %80-90'ını kaybetmektedirler. Matris yapısı beynitik olan veya temperlenmiş martenzit veya tamamen perlitik olanların darbe dirençleri yüksek sıcaklıklarda ferritliklere nazaran çok daha düşük olmasına karşı deney sıcaklığının düşürülmesiyle dirençteki azalma yüzdesi bu matrisli küresel grafitli dökme demirlerde daha azdır [24].

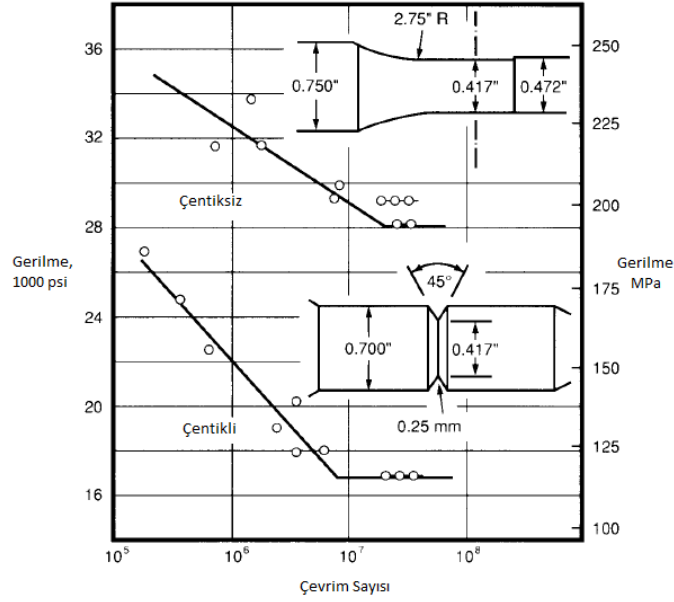
Gri dökme demir ve çeliğin özelliklerini bünyesinde toplayan küresel grafitli dökme demirlerden üretilmiş olan parçaların makine ve otomotiv sanayilerinde kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Küresel grafitli dökme demirler ticari taşıtlarda, otomobillerde, traktörlerde, buldozerlerde, motor bloğu, krank mili, bağlantı mili vb gibi parçalarda kullanılmaktadır. Titreşim ve değişken yüklemelerin bulunduğu bu uygulama alanlarında küresel grafitli dökme demir malzemelerinin yorulma özellikleri önem kazanmaktadır [30].

Metal malzemelerde yorulma hasarı tekrarlı yükler altında çatlak başlangıcı ve ilerlemesi şeklinde ortaya çıkar. Yorulma hasarları makine tasarımında ve malzeme seçimi için önemlidir, önemli olmasının nedenleri:

- Yorulma makinelerin servis hasarlarının %75'inin temel nedeni büyük bir olasılıkla yorulmadır.
- Yorulma hasarları akma değerinin altındaki gerilmelerde görülür.
- Yorulma çatlak ilerlemesi yavaşça ve kolay saptanamadan gerçekleşir ve kritik boyuta gelince şiddetli bir şekilde hasar meydana gelir.

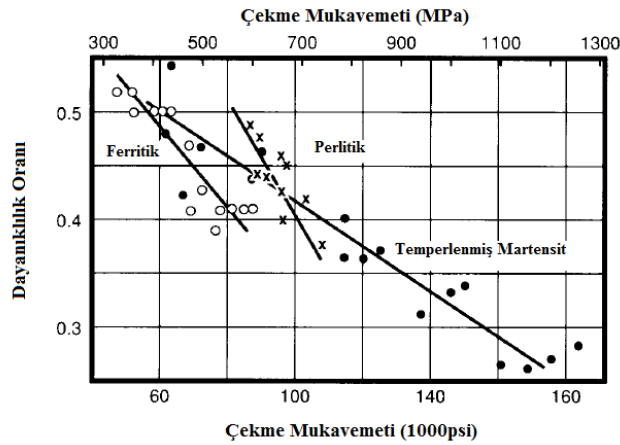
Bir malzemenin yorulma sınırı çekme mukavemetine bağlıdır. Küresel grafitli dökme demirlerin yorulma sınırı çekme mukavemeti, grafitin şekli, büyüklüğü ve dağılımı, inklüzyonların hacimsel oranı, karbürler, porozitenin yeri ve miktarı, gerilim arttırıcılar, malzemenin yüzeyine bağlıdır.

Şekil 3.6’da çentikli ve çentiksiz tavllanmış ferritik küresel grafitli dökme demirlerin gerilme-çevrim sayısı eğrileri görülmektedir (çekme mukavemeti 454 MPa). Çentikli ve çentiksiz yorulma sınırı sırasıyla 117 MPa ve 193 MPa’dır.



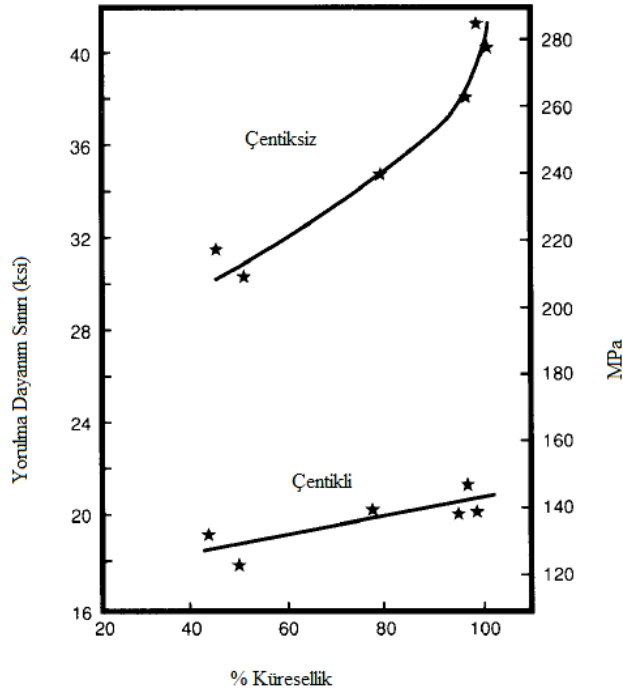
Şekil 3.6 : Ferritik küresel grafitli dökme demirler için tipik gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrileri [19].

Küresel grafitli dökme demirlerin dayanıklılık oranı çekme mukavemetine ve matris yapısına bağlıdır. Şekil 3.7 ferritik ve perlitik sınıfın dayanıklılık oranının benzer olduğunu ve mukavemet arttıkça bu oranların 0,5’ten 0,4’e düştüğünü göstermektedir. Temperlenmiş martenzitik matrisli de ise dayanıklılık oranının çekme mukavemetinin artmasıyla azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.7 : Küresel grafitli dökme demirlerde dayanıklılık oranının matris ve çekme mukavemetiyle ilişkisi [19].

Şekil 3.8 küreselliğin perlitik küresel grafitli dökme demirin çentikli ve çentiksiz yorulma sınırına etkisini göstermektedir. Çentikli yorulma sınırı büyük küresellik değişimine karşılık küçük aralıklarda artış gösterirken çentiksiz yorulma sınırı küreselliğin artması ile fazlaca artar. Bu sonuçlar, küresel olmayan grafitlerin çentiksiz küresel grafitli dökme demirlerin yorulma hasarının başlangıcı olduğunun bir göstergesidir. Çentikli olanlarda ise çatlak küresellikten çok daha önce çentik kısmından başlar.



Şekil 3.8 : Küreselliğin çentikli ve çentiksiz perlitik küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanım sınırına etkisi [19].

Şekil 3.9'da ise farklı matris sertlikleri için küresel grafit boyutunun yorulma dayanımına etkisi gösterilmiştir. Bütün sertlik değerlerinde küresel grafit boyutunun azalmasıyla yorulma dayanımı artar ve yüksek sertliklerde bu değişim daha belirgindir.

Çevrimsel gerilmenin numune yüzeyinde maksimum düzeye ulaştığı eğme ve burma yorulma durumlarında, yorulma dayanımı inklüzyonların, yüzey hatalarının artmasıyla azalır, bunlar çatlak başlangıcı bölgeleri oluştururlar. Şekil 3.10, metalik olmayan inklüzyonların oranı arttıkça yorulma dayanımının azaldığını gösterir. Matris sertliği arttıkça bu inklüzyonların yorulma dayanımı üzerindeki etkisi artar. Optimum yorulma dayanımın gerektiği uygulamalarda yüzey hatalarını elimine

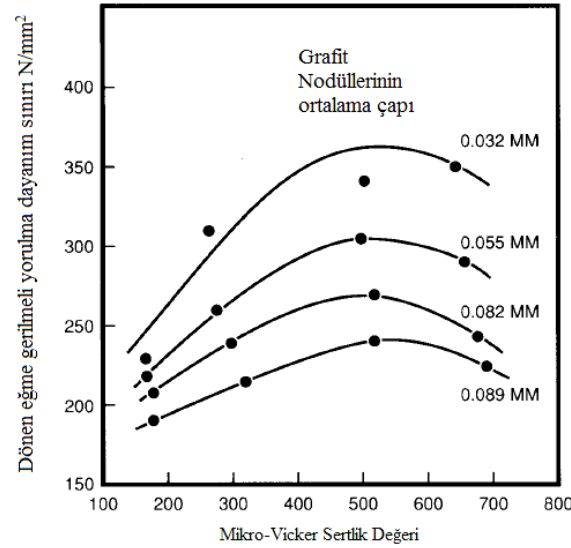
etmek için ham dökme demirlerin yüzeyini bir işlem uygulamadan kullanmak önemlidir.

Şekil 3.7, 3.9, 3.10 farklı matrislerin mekanik özelliklere, özellikle çekme, sertlik ve yorulma dayanımına etkisini göstermektedir.

Çekme mukavemeti arttıkça dayanıklılık oranının azaldığı gösteren Şekil 3.7'den anlaşıldığı üzere küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanımı çekme mukavemeti ile orantılı bir artış göstermiyor.

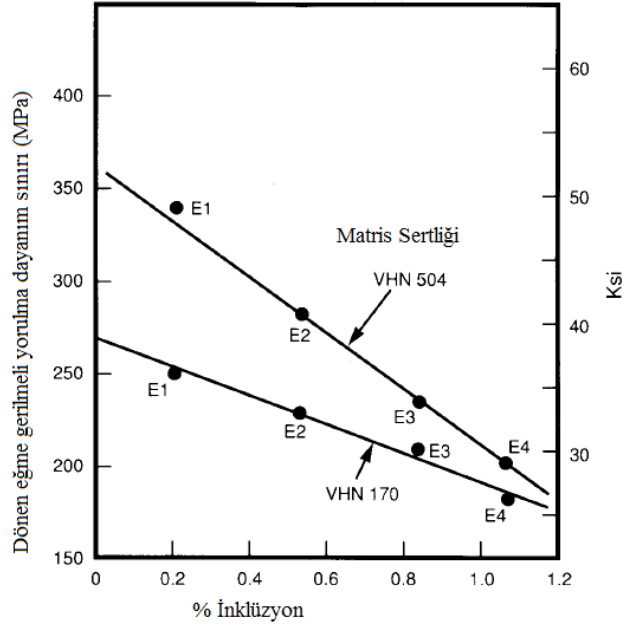
Şekil 3.9'da sabit grafit boyutunda, Vickers mikro sertlikle değişen yorulma dayanımına bakılırsa, artan sertlikle yorulma dayanımının arttığı gözlenebilir (maks. 500 VH sertlik).

Şekil 3.10 matrisin mikro sertliğinin yorulma dayanımı üzerinde etkisi görülmektedir ve ters orantılıdır.



Şekil 3.9 : Küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanım sınırına grafit nodüllerinin boyutu ve matris sertlik değerinin etkisi [19].

Eğme ve burma yorulmalarında, çevrimsel yükün yüzeyde maksimum seviyeye geldiği yorulma çeşitlerinde, yorulma dayanımı kuvvetli olarak parçanın yüzey geometrisine, kalıntı streslere ve malzeme yüzeyindeki malzeme özelliklerine bağlıdır. Yüzeyin özelliklerini geliştirecek işlemler yapmak küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanımını artırır. Bu uygulamalar, çekme mukavemetini ve yüzeydeki basma gerilmesini arttırarak yorulma dayanımını %20 oranında artırır. Yüzeydeki gerilme durumunu geliştirmek için bilya püskürtme ile yüzey pürüzlülüğünün gerilme oranına etkisi düşürülebilir [19,29].



Şekil 3.10 : Küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanım sınırına matris mikro-sertliği ve inklüzyon oranının etkisi [29].

4. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Küresel grafitli dökme demirler yüksek mukavemet ve sünekliğin birleştiği, özel bir malzeme çeşididir. Bu özelliklerini mikroyapı özelliklerinden kazanır, mikroyapı özellikleri de kimyasal kompozisyona, ısıtma ve prosas değişkenlerine bağlıdır. Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini etkileyen önemli değişkenler; döküm profili boyutu, mikroyapısı ve alaşım elementleri olarak sınıflandırılabilir [3].

4.1 Döküm Profili Boyutunun Etkisi

Döküm parçasından etkilenen başlıca değişken soğuma hızıdır. Soğuma hızı da grafit boyutunu ve matrisin mikroyapısını etkiler. Büyük kesitli profillerde, soğuma daha yavaş olur, bunun sayesinde katılaşma sırasında küçük ve az küresel grafitler elde edilir. Matris yapısı alaşım elementleri ile kontrol edilebilmesine rağmen aslında bunu belirleyen ötektik sıcaklık aralığında soğuma hızıdır. Büyük kesitli profillerde düşük soğuma hızı ferrit dönüşümünü destekler, eğer perlitik bir yapı isteniyorsa eriyik metale perlit oluşturmaları eklenmelidir (Cu gibi). Yeterli soğuma zamanı verilmezse çok ince perlitler oluşur ve bu perlitler işlenebilirliği düşürür. Perlit oluşturmaları olmaz ise farklı kalınlıklara sahip döküm parçasının sertlik çeşitliliği artar. İnce kesitli döküm parçalarındaki hızlı soğuma karbür oluşumuna sebep olur [9].

Döküm parçasının boyutu azaldıkça, katılaşma ve soğuma hızı artar ve hızlı tavlatabilen, ince taneli bir yapının oluşmasını sağlar. İnce döküm parçalarında, oluşabilecek karbürler sertliği artırır, işlenebilirliği düşürür ve kırılabilirliğe yol açar. İnce döküm parçalarında sünek yapı elde etmek için grafit oluşumunu teşvik eden aşılama prosesi gerekir.

Döküm parçasının boyutu arttıkça, küresel grafit sayısı azalır ve mikrosegregasyonlar oluşur. Bu durum, daha büyük grafit boyutuna, ferrit oranının

düşmesine ve tavlama sırasında ferritik yapının oluşmasına karşı direncin artmasına neden olur [9].

4.2 Mikroyapının Etkisi

Mekanik özelliklerinin gri dökme demirden çok farklı olmasından da anlaşılabileceği gibi, grafitlerin şekli küresel grafitli dökme demirlerin özelliklerini belirlemede önemli bir role sahiptir. Küresellik grafitlerin kalitesini anlatan bir tanımdır, %100 küreselliğe sahip bir dökme demirin bütün grafitleri tamamen küredir. Genel olarak gerekli küresellik %80-90'dır. Küreselliğin akma ve çekme mukavemetine karşı güçlü bir etkisi vardır. Eğer küresellik düşük ise grafitler uzamaya başlar fakat keskin, sivri bir yapıya bürünmezler. Eğer küresellik %30 azalırsa, akma mukavemeti %10, çekme mukavemeti ise %15 oranında azalır. Yüksek küresellik yorulma özellikleri için de yararlıdır. Yapısı bozulmuş küresel grafitler bu bölgelerde gerilim arttırıcı etki göstererek çatlak başlangıç bölgesi oluşturur [3,29].

Grafit morfolojisi küresel grafitli dökme demirlerin sünekliği ve tokluğu için önemli bir parametredir. Küresel grafitli dökme demirler çatlak ilerlemesini engeller ve böylece sünekliği artırır. Grafitler ne kadar büyük olursa çatlakları durdurma üzerindeki etkisi o kadar azalır bu da sünekliği azaltır [31].

Küresel grafit sayısı mm^2 'deki küresel grafitlerin sayısını gösterir. Grafit şekli kadar olmasa da grafit sayısı da mekanik özellikleri etkiler. Genelde grafit sayısının fazla olması yüksek kaliteyi gösterir fakat farklı döküm boyutlarında parçalar için optimum grafit sayısı aralığı vardır ve bu aralıktan çıkılırsa mekanik özellikleri düşürebilir [29]. Küresel grafit yapısı mikroyapıda ve özelliklerde şu gibi değişiklikler yapabilir;

- Küresel grafit sayısını mikroyapıdaki ferrit/perlit oranını etkiler. Küresel grafit sayısı arttıkça perlit oranı azalır, mukavemet düşer süneklik artar [31,32].
- Küresel grafit sayısı karbür oranını azaltarak çekme mukavemeti, süneklik ve işlenebilirliği artırır.
- Küresel grafit sayısı arttıkça daha düzgün, homojen mikroyapı oluşur. Matrisin bu şekilde gelişmesi karbür, perlit veya yapısı bozulmuş grafitlere sebep olabilecek elementlerin segregasyonunu azaltır.

- Küresel grafit sayısı arttıkça grafitlerin boyutu küçülür ve sonuç olarak çekme, yorulma ve kırılma özellikleri gelişir. Küresel grafit sayısını arttırmak için kullanılan aşılama yöntemi grafitlerin küreselliğini artırır yani küresel grafit sayısını arttırmak küreselliği geliştirmekle bağlantılıdır [29].

Küresel grafitlerin oranı da çekme özelliklerini etkiler. Döküm parçasının büyüklüğü hem küresel grafit sayısını hem de boyutunu etkiler. Döküm parçasının büyüklüğü arttıkça soğuma hızı azalır bu karbonun hızlı soğuma hızında görülen karbür yerine kararlı grafit fazında çökmesini sağlar. Soğuma hızının düşük olması grafit çekirdeklenme potansiyelini de etkiler, bu da büyük fakat az sayıda küresel grafitlerin oluşmasına sebep olur [29].

Matris yapısının mekanik özellikler üzerindeki önemi, farklı sınıflarda küresel grafitli dökme demirleri adlandırmakta kullanılarak vurgulanmıştır.

Ferritik KGDD: Yüksek süneklik ve darbe direncine sahip bu küresel grafitli dökme demirlerin çekme ve akma mukavemeti, düşük karbon çeliklerinkiyle eşittir.

Perlitik KGDD: Bu dökme demirler yüksek mukavemet, iyi aşınma direnci, düşük süneklik ve darbe direnci özellikleri ile karakterize edilirler.

Ferritik-Perlitik KGDD: En yaygın kullanılan küresel grafitli dökme demir olan bu sınıfın özellikleri ferritik KGDD ile perlitik KGDD özellikleri arasındadır.

Östenitik KGDD: Bu sınıf dökme demirler yüksek korozyon ve oksidasyon direncine sahiptirler ayrıca yüksek mukavemet ve yüksek sıcaklıkta boyutsal kararlılığa sahiptir.

Martenzitik KGDD: Bu sınıf küresel grafitli dökme demirler kimyasal kompozisyon (perlit oluşumunu engellemek için) ve ısıtılma işlemi (su verme ve temperleme) kontrolü ile elde edilirler. Yüksek mukavemet ve aşınma direnci fakat düşük süneklik ve tokluğa sahiptirler.

Beynitik KGDD: Kimyasal kompozisyon ve ısıtılma işlemi kontrolü ile elde edilen bu sınıf, sert ve aşınma direnci yüksek bir malzemedir.

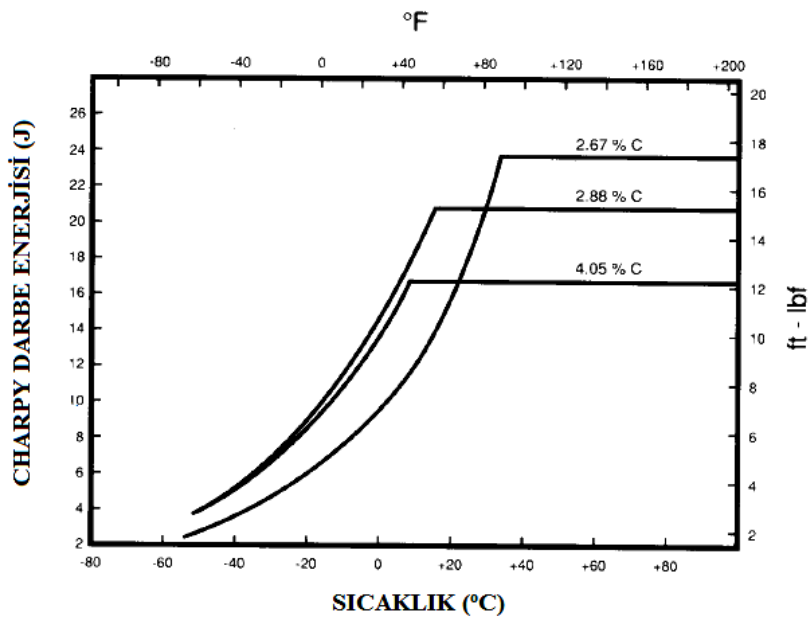
Östemperlenmiş KGDD: Östemperlenme ısıtılma işlemi ile elde edilirler. Yüksek mukavemet (perlitle elde edilebilenin iki katı) yüksek uzama ve tokluğa sahiptir [33].

4.3 Alaşım Elementlerinin Etkisi

Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri üzerinde kompozisyonun ve alaşım elementlerinin belirgin bir etkisi vardır.

Karbon:

Karbon küresel grafitli dökme demirlerin ana elementidir. Küresel grafit şeklinde bulunur ve çatlak ilerlemesini engelleyici etkiye sahiptir. Karbon oranı arttıkça, çentikli darbe enerjisi azalır (Şekil 4.1) [29]. Eğer karbon oranı fazla ise, grafitler gereğinden fazla miktarda çökebilir bu da grafitlerin katılaşan dökümün üst bölümünde yüzmesiyle sonuçlanır. Bu durum karbonun yüzmesi olarak adlandırılır ve grafit yapısına zarar veren bir durum olarak tanımlanır. Ayrıca karbon oranı arttıkça, tüm grafit yapılarının bozulma riski bulunduğu da bilinmektedir [35].



Şekil 4.1 : Ferritik küresel grafitli dökme demirlerde karbon oranının V-Charpy darbe enerjisine etkisi [29].

Silisyum:

Silisyum, küresel grafitli dökme demirin bir diğeri ana elementidir. Ferrit ve grafit oluşumunun kuvvetli destekleyicisidir. Mukavemetin gerektiği durumlarda, Si artırılması ile malzemenin akma ve çekme mukavemeti ve sertliğinin artırılması sağlanır. Fakat bunun tam tersi Si artması ile sünek gevrek geçiş sıcaklığı artar böylece darbe tokluğu azalır. Bu yüzden düşük sıcaklıkta darbe tokluğunun önemli

olduğu uygulama alanlarında, Si oranı ferritik matrisi koruyabilecek fakat SGGS artışına sebep olmayacak oranda olabildiğince düşük tutulmalıdır.

Magnezyum:

Magnezyum, çoğunlukla küreselleştirici olarak kullanılır. Magnezyum-genelde FeMgSi ya da NiMg alaşımı formunda-sıvı demir ile şiddetli bir reaksiyon gerçekleştirip, etkili bir şekilde kalıntı oksit sıvılarını temizler. MgS oluşturarak, küresel grafitlerin çekirdeklenme yeri gibi davranır. Grafitlerin yüzey enerjisini değiştirerek lamel yerine küre şeklinde çökmesini sağlar. Döküm sıvısının içindeki varlığı zamanla azalır bu yüzden küreselleşme reaksiyonu tamamlandıktan hemen sonra magnezyumu uzaklaştırmak önemlidir. Fazla Mg döküm için zararlı olabilir, yüksek miktarda kalıntı Mg yapısı bozulmuş grafit, karbür ve cüruf hatalarının oluşumuna sebep olur. Mg güçlü bir karbür oluşturunusudur ayrıca porozite ve büzüşmeye de sebep olur. Çok az miktarda Mg, yumru grafitlerin oluşmasına sebep olabilir.

Fosfor:

Fosfor genelde döküm için empürite olarak düşünülen bir elementtir. Tane sınırlarında birikerek fosfürleri oluşturur ayrıca perlit oluşumunu destekler. SGGS ve matrisin kırılabilirliğini artırır. Bu etkiler P oranı %0,005'den fazla olduğunda daha belirginleşir.

Kükürt:

Kükürdün döküm sıvısının içindeki varlığı malzeme özelliklerine zarar verir ve miktarı olabildiğince düşük olmalıdır. Mg ile birleşerek MgS oluşturur, ya cüruf oluşturur ya da küresel grafitlerin çekirdeklenme yeri gibi davranır. Eğer kum döküm kalıbında fazla miktarda varsa, döküm yüzeyinde lamel grafit oluşmasına sebep olur. CaCO₃ (limestone) ve CaC₂ eklenerek kükürt yapıdan uzaklaştırılabilir. Alternatif çözüm olarak eğer yapıya Ce eklenirse yüksek orandaki kükürt tolare edilebilir.

Nikel:

Bakırdan güçlü perlit sabitleyicisi olmasına rağmen, Ni ferrit mukavemetleştiricisi olarak kullanılır ve SGGS arttırıcı etkisi bakır kadar fazla değildir. %1 Bakır geçiş sıcaklığını 45°C arttırırken Ni sadece 10°C arttırır. Ni genelde Mg ile eklenir NiMg

formunda küreselleştirici olarak kullanılır. Genelde ham dökümün yüksek mukavemet ve süneklik elde edilmesine yardımcı olur.

Mn, Cr, Mo, Sn, Ti ve Cu karbür ve perlit yapıcı elementler olarak bilinirler, perlit ve karbürlerde mikroyapıya sert ve mukavemetleştirici etki gösterdiğinden dolayı, süneklik ve darbe tokluğunu azaltırlar. Bu elementlerin zararlı etkilerini azaltmak için Ce ilavesi yapılabilir. Mn, SGGS'yi artırır ve malzemenin sünekliğini azaltır. Bununla birlikte, büyük kesitli profillerde yapılan bazı çalışmalar % 0,07 den %0,2 ye çıkarılan Mn oranının chunky grafitleri azalttığı görülmüştür. Mn oranı iğnesel grafiti minimize edebilecek fakat SGGS da arttırmayacak şekilde dengelenmelidir.

Molibden ham döküm koşullarındaki perlitli güçlendirir. Bu mukavemetin tercih edildiği yerlerde iyi bir seçenek gibi gözükse de darbe tokluğuna olan zararlı etkisinden dolayı tokluğun önemli olduğu büyük kesitli profillerin dökümde kaçınılması gereken bir elementtir. Sn perlit oluşumunu desteklemesinin yanı sıra, kusurlu grafit oluşumunu da destekler. Mekanik özelliklere, özellikle tokluğa olan negatif etkisinden dolayı Sn elementini minimize etmek önemlidir [34].

5. YÜKSEK ALAŞIMLI KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

Küresel grafitli dökme demirler, yüksek mukavemet ve sertlik için nikel, molibden, silisyum ve bakır ile alaşımlandırılabilirler. Molibden eklenirken taneler arası segregasyona sebep olabileceğinden dolayı dikkat edilmelidir. Yüksek miktarda silisyum, krom, nikel, bakır korozyon, oksidasyon ve aşınmaya dayanıklılık arttırmak için ya da yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılması için küresel grafitli dökme demirlere eklenebilir. Küresel grafitli dökme demir bileşimine daha fazla silisyum, krom, nikel, molibden ve bakır ilavesiyle elde edilen yüksek alaşımlar, her ne kadar üretimleri nispeten zor ise de özel özellikleri açısından aranan malzeme grubunu oluştururlar. Bunların arasında başta östenitik küresel grafitli dökme demir gelmektedir; oda sıcaklığında östenitin stabilitesini arttıran alaşım elementi nikeldir. Östenitik küresel grafitli dökme demirde (Ni-Resist), nikel %18-36 arasında değişmektedir. Östenitik küresel grafitli dökme demirdeki krom ise kullanma yerine göre %1,75-5,5 oranlarında bulunabilir. Yüksek alaşımlı küresel grafitli dökme demirlerde silisyum oranı arttıkça oksidasyona karşı direnç de artar; ancak bazı mekanik özellikler ve ısı şokuna karşı dirençte azalma görülür. Dolayısıyla optimum özellikler elde etmek için genellikle silisyum oranı %3-4 arasında sınırlanır [9,35].

5.1 Yüksek Silisyumlu Küresel Grafitli Dökme Demirler

5.1.1 Tanımı ve standartlara göre sınıflandırılması

Yüksek silisyum içerikli, katı çözelti sertleştirilmesi uygulanmış küresel grafitli dökme demirler EN 1563:2011 standardına dahil olmuş yeni bir dökme demir malzemesidir. Yüksek silisyum içerikli bu küresel grafitli dökme demirler ferritik yapıdadır ve ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demirler ile karşılaştırıldığında benzer çekme dayanımı fakat daha yüksek akma dayanımı ve uzama gösterirler. Düşük sertlik dağılım aralığı en dikkat çekici özelliklerinden biridir. Sonuç olarak işlenebilirlik artar ve işleme maliyeti düşer [20]. Geleneksel küresel grafitli dökme

demirden farkları, yüksek silisyum oranları olan bu sınıfın EN1563:2011 standardında bulunan kimyasal kompozisyon aralığı Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

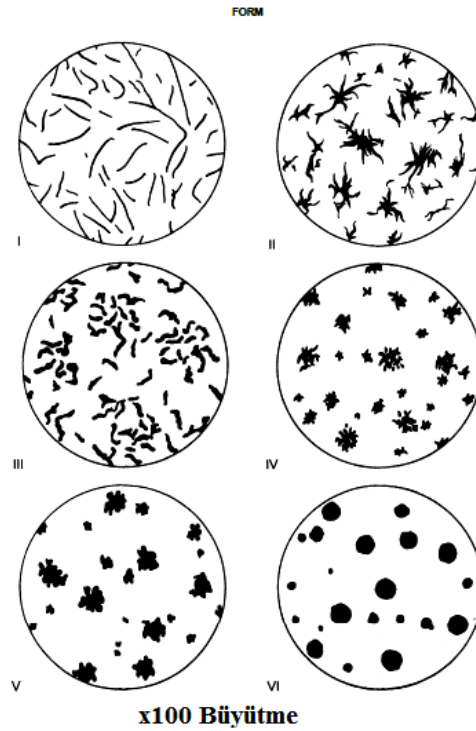
Çizelge 5.1: EN 1563:2011 Standardına göre kimyasal kompozisyon [14].

Sembol	Numara	% Si ort. ^a	%P maks.	%Mn maks. ^b
EN-GJS-450-18	5.3108	3,20	0,05	0,05
EN-GJS-500-14	5.3109	3,80	0,05	0,05
EN-GJS-600-10	5.3110	4,30	0,05	0,05

^a Si oranı eklenen diğer alaşım elementlerine göre düşürülebilir.
^b Daha düşük Mn oranı ile (örn: %0,03) işlenebilirlik ve süneklik geliştirilebilir.

5.1.2 Mikroyapısı ve mekanik özellikleri

Matris ağırlıklı olarak ferrit olmalıdır, maksimum perlit oranı %5’i, sementit oranı ise %1’i geçmeyecek şekilde sınırlandırılmıştır. Grafit yapısı ağırlıklı olarak, BS EN ISO 945-1 standardında gösterilmiş olan V ve VI formunda olmalıdır (Şekil 5.1). Yüksek Si oranından dolayı bu tip dökme demirlerde, yumru grafitli dökme demirlerde bulunan III. formundaki grafitlere rastlanabilir. Fakat yüksek silisyumlu ferritik matrisli küresel grafitli dökme demirlerde, bu tip grafitlerin küreselliği düşürme hassasiyeti perlitik olanlara kıyasla daha azdır. %20 oranında III. formda grafit kabul edilebilir [36].



Şekil 5.1 : Dökme demir malzemeler için referans grafit formları [37].

Silisyumun oda sıcaklığında ferrit içinde çözünürlüğü %4'e kadar ulaşır. Silisyum ferrosilisyum (FeSi) ile aşıl原因 olarak eklenirse, çekirdeklenmeyi ve küresel grafit sayısını artırır. Sonuç olarak, ötektik dönüşüm sırasında karbon difüzyonunu azaltır ve yapıdaki ferrit miktarını artırır [20]. Silisyum atomları, α -ferrit katı çözeltilisinin hacim merkezli kübik kristal yapısına yer alan konumunda Fe atomları ile yer değiştirir. Yerleştiğinde kristal yapı bozulur ve kafesteki bu değişim kristal yapıda kayma hareketini engeller. Atomik düzeydeki bu proses, mukavemetin artmasını ve plastisitenin azalmasını sağlayarak mekanik özellikleri değiştirir [37].

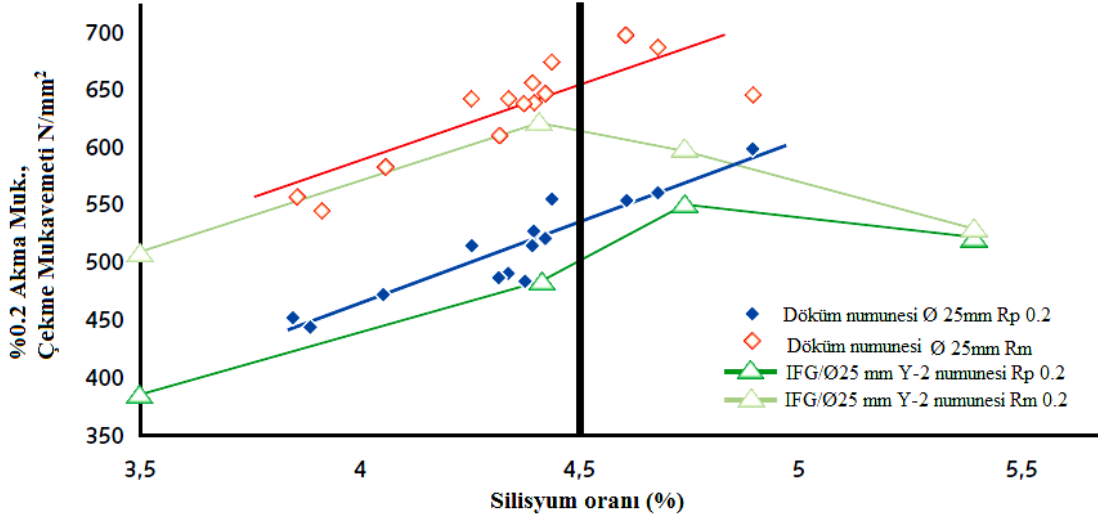
Silisyumun ferritik matriste katı çözelti oluşturması, matrisin çekme ve akma mukavemetini artırırken, yüzdece uzaması ve tokluğunun azalmasına sebep olur. Silisyum perlitin mukavemetleştirici etkisinin yerini alarak yapıyı güçlendirir ve perlitin malzemenin sünekliğini düşürücü etkisini de ortadan kaldırır. Bu şekilde elde edilen ferritik yapı, aynı malzemenin perlitik-ferritik yapısındaki ferritten %70 çok daha güçlü olur [3].

Yüksek silisyumlu ferritik küresel grafitli dökme demirlerin EN1563:2011 standardına göre mekanik özellikleri Çizelge 5.2'de gösterilmiştir [14].

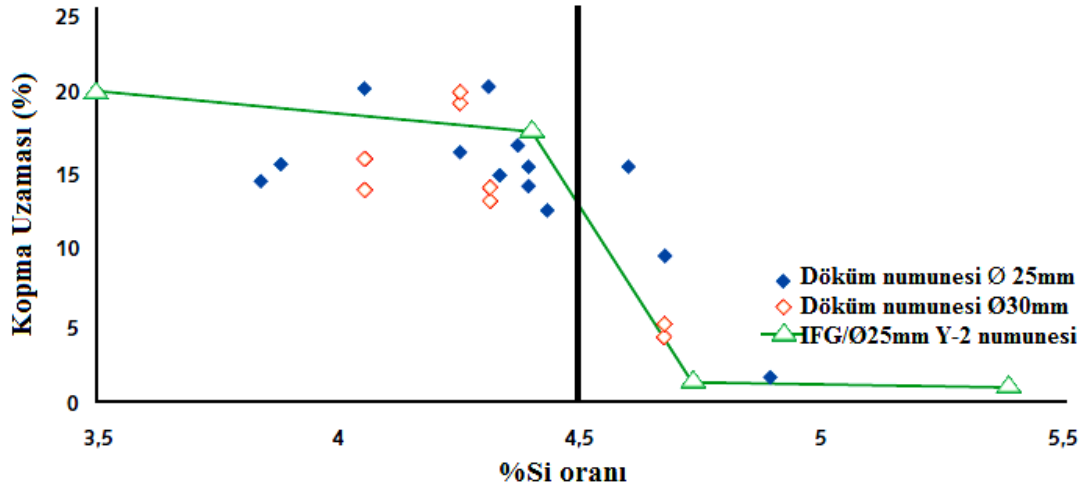
Çizelge 5.2 : Yüksek silisyum içerikli küresel grafitli dökme demirlerin EN1563 standardına göre mekanik özellikleri [14].

Sembol	Numara	Et Kalınlığı (mm)	%0.2 Akma Mukavemeti (MPa) min	Çekme Mukavemeti (MPa) min	Uzama (%) min
EN-GJS-450-18	5.3108	$t \leq 30$	350	450	18
		$30 \leq t \leq 60$	340	430	14
		$t > 60$	üreticiyle alıcı arasında kararlaştırılır		
EN-GJS-500-14	5.3109	$t \leq 30$	400	500	14
		$30 \leq t \leq 60$	390	480	12
		$t > 60$	üreticiyle alıcı arasında kararlaştırılır		
EN-GJS-600-10	5.3110	$t \leq 30$	470	600	10
		$30 \leq t \leq 60$	450	580	8
		$t > 60$	üreticiyle alıcı arasında kararlaştırılır		

Silisyum oranının çekme mukavemeti ve %0,2 akma mukavemetine etkisi Şekil 5.2'de görülmektedir. Çekme mukavemeti, %0,2 akma mukavemeti ve Brinell sertlik silisyum oranı ile artarken, kopma uzaması azalır. Silisyum oranı %4,5'e kadar pozitif etkisini göstermektedir. Yüzde uzama miktarı %4,5'e kadar hafifçe azalırken, daha yüksek silisyum oranlarında keskin olarak düşmektedir (Şekil 5.3) [37].



Şekil 5.2 : Küresel grafitli dökme demirlerde silisyum oranının çekme ve akma mukavemetine etkisi [37].



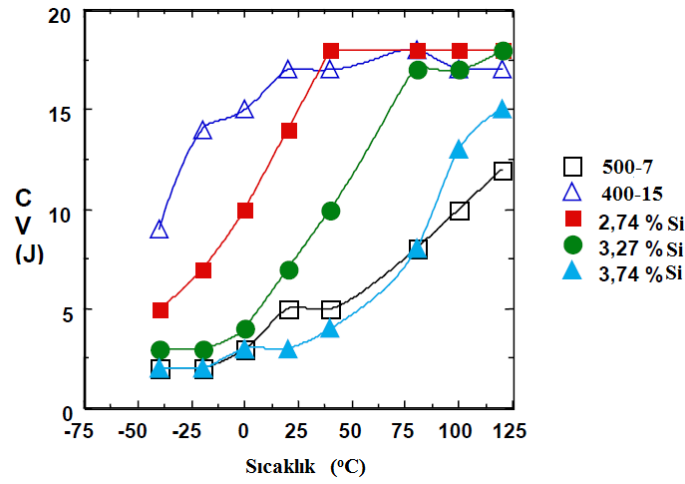
Şekil 5.3 : Küresel grafitli dökme demirlerde silisyum oranının kopma uzamasına etkisi [37].

Yapılan araştırmalara göre artan silisyum oranı ile kopma uzamasındaki azalma (%1 silisyum artışı, % 3,23 azalmaya sebep olur) gerçekte akma mukavemetindeki artıştan (%1 silisyum artışı, 138 MPa artışa sebep olur) çok daha düşük seviyelerdedir. Dökme demir, küresel grafitli bir yapıya sahip ise kopma uzaması genelde çok yüksektir %20-25 arası ve kesinlikle %15'ten az değildir. Sonuç olarak yüksek silisyum içerikli küresel grafitli dökme demirler akma mukavemetini arttırır ve ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demirlerin 2 katı süneklığe sahip olmasını sağlar [38].

Küresel grafitli dökme demirlerde manganez oranının önemi büyüktür. Çok düşük oranlarda bile katılaşma sırasında taneler arasında segregasyona yol açarak sünekliliği

düşürücü etkisi vardır. Önerilen manganez oranı Çizelge 5.2’de EN 1563 standardına göre verilmişti [3].

Yüksek silisyumun küresel grafitli dökme demirlerin SGGS’ ini düşürdüğü ile ilgili bir araştırma yapan Björkerger ve arkadaşları, yaptığı bu çalışmada EN-GJS 500-7 ve EN-GJS 450-15 Charpy-V darbe testi uygulanmıştır. Şekil 5.4’te gösterildiği gibi %2,25 Si oranına sahip 500-7 kalite KGDD’nin SGGS +50°C olarak bulunmuşken %2,35 Si oranına sahip 400-15 kalitedeki ise SGGS -50°C olarak tespit edilmiştir. Silisyum ile alaşımlandırılmış ferritik matrisli bu malzemenin SGGS’si 500-7 kalitedeki ile eşit veya daha azdır.

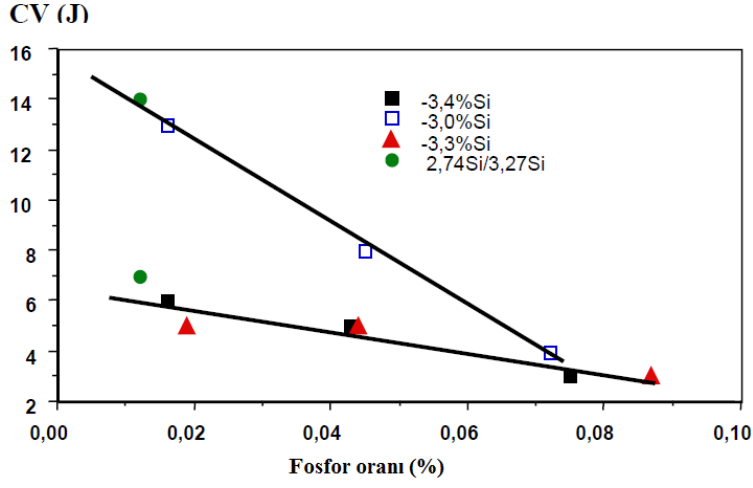


Şekil 5.4 : Farklı sınıfların farklı sıcaklıklardaki darbe direnci değerleri [39].

Fosforun yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirlerin sünekliği üzerindeki etkisini incelemek için, yine Björkerger ve arkadaşlarının farklı silisyum ve fosfor oranlarında yaptığı deneyler sonucunda, düşük silisyum oranlarında fosforun süneklik üzerindeki hassasiyeti arttığı görülmüştür. Yüksek silisyumlu ferritik KGDDlerin, yüksek fosfor oranlarında bile süneklik değerlerinin emniyet payı geleneksel 500-7 kalite KGDDlere göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Fosfor oranının geleneksel 500-7 için maksimum % 0,05 oranında tutulması gerektiği gözlemlenmiştir (Şekil 5.5) [39].

Yüksek ısı iletkenliğinin gerektiği uygulama alanlarında grafit yapısı önemli etkiye sahiptir fakat matrisin etkisi de göz ardı edilemez. Yapılan çalışmalara göre %2,5 ten %3,7 ye çıkartılan Si oranı ferritin ısı iletkenliğini % 20 oranında düşürür fakat yine de %2,5 Si içerikli perlitik küresel grafitli dökme demirden bir parça daha iyi termal iletkenliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yani bu uygulama alanında geleneksel

perlitik küresel grafitli dökme demir yerine, hem mekanik özellikleri ve işlenebilirliği iyileştirilmiş hem de termal iletkenliğinden taviz verilmeden yüksek silisyum içerikli küresel grafitli dökme demirler kullanılabilir [38].



Şekil 5.5: Değişen silisyum ve fosfor oranlarına göre darbe enerjisi [39].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada iki farklı kalite küresel grafitli dökme demir, EN-GJS-500-7 ve yüksek silisyumlu EN-GJS-500-14 malzemeleri incelenmiştir. Malzemelere uygulanan deneysel çalışmalar bu bölümde ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

6.1 Deneysel Malzemelerin Hazırlanması

Deneysel çalışmalarda kullanılan EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 kalite küresel grafitli dökme demirler, Componenta Dökümcülük Tic. ve San. A.Ş. tarafından EN 1563:2011 standardına uygun olarak, kum kalıba 25 mm çapında, 200 mm boyunda, yuvarlak çubuk şeklinde dökülmüştür.

Çizelge 6.1’de kullanılan küresel grafitli dökme demir malzemelerin firma tarafından spektral analiz yöntemiyle yapılan kimyasal analiz sonuçları ve 6.1 eşitliği yardımıyla hesaplanmış karbon eşdeğerleri gösterilmektedir.

Çizelge 6.1 : Deneysel çalışmalarda kullanılan EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 kalite küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal bileşimi (%ağ.)

Kimyasal bileşim % ağ.								
Malzeme	Ceş*	C	Si	Mn	P	S	Mg	Diğer
500-7	4,56	3,74	2,44	0,39	0,03	0,01	0,05	<0,3
500-14	4,47	3,26	3,60	0,30	0,03	0,01	0,05	<0,3

$$* Ceş = \%C + \% \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (6.1)$$

6.2 Metalografik Çalışmalar

EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 kalite küresel grafitli dökme demirlerin metalografik çalışması için yorulma numunelerinin baş kısmından 15 mm boyunda parçalar kesilerek elde edilen 16 mm çaplı dairesel numuneler kullanılmıştır. Her bir kalite küresel grafitli dökme demir için numuneler öncelikle sırasıyla 120-180-240-320-600-800-1200-2500 meş kademelerinde zımparalanmış daha sonra 3µm’lik elmas pasta ile parlatılmıştır. Mikroyapının kantitatif özellikleri için her iki kalite

küresel grafitli dökme demir numunelerinden, Leica DM750M (Şekil 6.1) optik mikroskobundan 5 farklı bölgeden 100 büyütmede görüntüleri alınmıştır. Clemex Image Analysis® programı ile mikroyapının kantitatif metalografisi (grafit boyutları, hacim oranları, sayısı, küreselliği, mikroyapısı) yapılmıştır. Zımpara ve parlatma işlemlerinden sonra mikroyapı (matris ve grafit) görüntüleri için %3 Nital ile dağlanmış, su ile yıkanıp hava ile kurutulmuş ve yine aynı optik mikroskoptan dağlanmış görüntüleri elde edilmiştir.

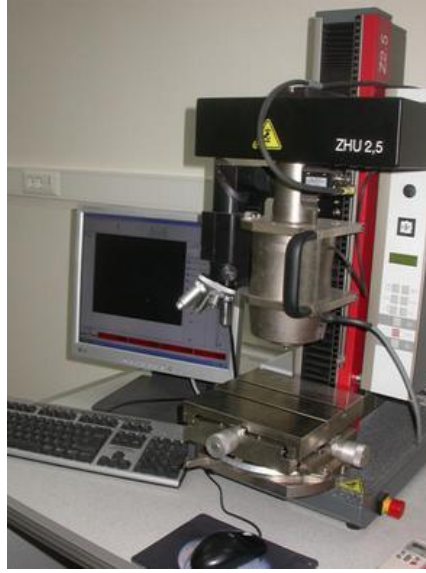


Şekil 6.1 : Lecia DM750M marka optik mikroskobu.

6.3 Mekanik Deneyler

6.3.1 Sertlik deneyi

Sertlik ölçümleri; yorulma numunelerinin baş kısmının düzlemsel yüzeyleri üzerinden, ASTM E10-12 standardına uygun olarak, Zwick Derinlik Duyarlı Universal Sertlik Cihazı (Şekil 6.2) ile 30N (F) yük altında 1 mm (D) tungsten bilye ile yapılmıştır (F/D^2). EN-GJS 500-7 ve EN-GJS 500-14 kalite küresel grafitli dökme demir numunelerinden beşer adet Brinell sertlik değerleri alınarak, sonuçta bunların ortalaması rapor edilmiştir [43].



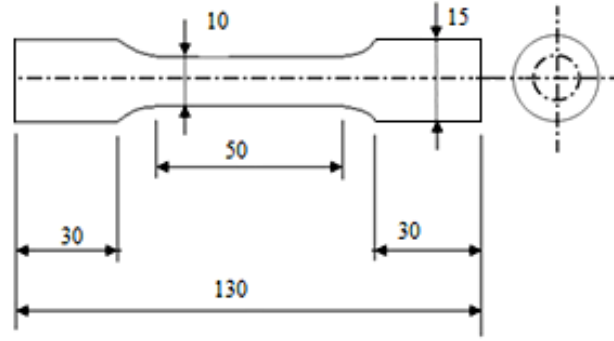
Şekil 6.2 : Zwick derinlik duyarlı universal sertlik cihazı.

6.3.2 Çekme deneyi

Çekme deneyleri Şekil 6.3'te görülen Instron 8801 marka test cihazı ile boyutları ASTM E 8M standardına uygun, Şekil 6.4'te gösterilmiş olan numuneler kullanılarak yapılmıştır, tüm ölçüler mm şeklindedir. Her bir numune üzerine $L_0 = 5d_0$ olacak şekilde ilk ölçü uzunluğu alınmıştır. Çekme deneyleri her iki kaliteden KGDD için üçer deney yapılmıştır. Deneyler sırasında çene hızı 3mm/dk olarak ayarlanmıştır [41].



Şekil 6.3 : Instron 8801 marka test cihazı.



Şekil 6.4 : ASTM E 8 M standardına göre hazırlanmış çekme deney numunesi şekil ve boyutları [41].

6.3.3 Charpy darbe deneyi

Charpy Darbe deneyleri Şekil 6.5’de görülen, Mohr & Federhaff A.G. Pendulum darbe testi cihazı ile oda sıcaklığında yapılmıştır. Her iki farklı kalite küresel grafitli dökme demir için, boyutları 10x10x55 mm olan, çentiksiz, ASTM A327 standardına uygun hazırlanmış darbe numuneleri kullanılarak, her iki kalite dökme demir için onyedışer deney yapılmıştır [42].



Şekil 6.5 : Mohr & Federhaff A.G. Pendulum darbe testi cihazı.

6.3.4 Yorulma deneyi

Yüksek çevrimli yorulma deneyleri Şekil 6.6’da görülen Walter+Bai UBM 0,1-500Nm marka dönel eğmeli yorulma test cihazı ile yapılmıştır. Dönel eğmeli yorulma deneyleri, BS ISO 1143:2010 standardına uygun olarak, oda sıcaklığında, dört noktalı yükleme sistemi kullanılarak, deney frekansı 50Hz, gerilme oranı

$R=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=-1$ olacak şekilde ve tüm numuneler için aynı şartlarda gerçekleştirilmiştir. Cihazda numune sürekli dönen nötr eksene göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır [40].

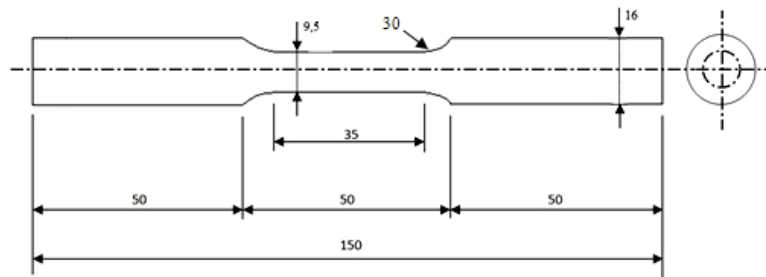
Yorulma deneyi öncesi, boyutları Şekil 6.7’de gösterilen yorulma numuneleri, dikey yönde, sırasıyla; 320, 600, 800 ve 1000 kalite SiC kağıdıyla zımparalanmış, yüzey pürüzlülüğü ortalama 0.06 μm olarak ölçülmüştür.

Her iki farklı kalite KGDD için 24 adet numune kullanılmıştır ve numunelerin kırılmaya kadar maruz kaldıkları çevrim sayısı kaydedilmiştir. Her iki kalite küresel grafitli dökme demirin yorulma davranışları, BS ISO 1143:2010 standardına göre gerilme genliği (σ_a)- çevrim sayısı (S-N) eğrisi çizerek incelenmiştir. Numunelerin 10^7 çevrim sonunda kırılmadan dayanabildikleri gerilme değeri yine aynı standarda göre yorulma dayanım sınırı olarak kabul edilmiştir. Gerilme genliği şu şekilde ifade edilir:

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{\max}-\sigma_{\min}}{2} \quad (6.1)$$



Şekil 6.6 : Walter+Bai UBM 0,1-500Nm marka sabit dönel eğmeli yorulma test cihazı.



Şekil 6.7 : ASTM E 466 Standardına göre hazırlanmış yorulma numunesi şekil ve boyutları (mm) [40].

Yorulma deneylerinde dönel eğmeli yorulma cihazı kullanılmıştır ve numunelere eğme gerilmesi uygulanmıştır. Deney sırasında uygulanan gerilme;

$$\sigma = \frac{32 P l}{\pi D^3} \quad (6.2)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada,

P= Uygulanan yük (N)

l= Moment kolunun uzunluğu (500mm)

σ = Eğme gerilmesi (MPa)

D = Numune çapı (mm)

olarak tanımlanmıştır.

6.4 Yorulma Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 kalite küresel grafitli dökme demirlerin kırılmış yorulma numunelerinin kırık yüzeyleri Samsung 8 Megapixel fotoğraf makinesi, Hitachi TM-1000 SEM (Şekil 6.8) taramalı elektron mikroskop ve Cameca SX100 markalı elektron prob mikro analizörü (EPMA) (Şekil 6.9) ile yüksek büyütmelere çıkılıp hassas analizleri yapılmıştır. Numunelerin kırılma yüzey fotoğrafları çekilmiş ve kırılma karakterleri incelenmiştir.



Şekil 6.8 : Hitachi TM-100 taramalı elektron mikroskobu cihazı (SEM).

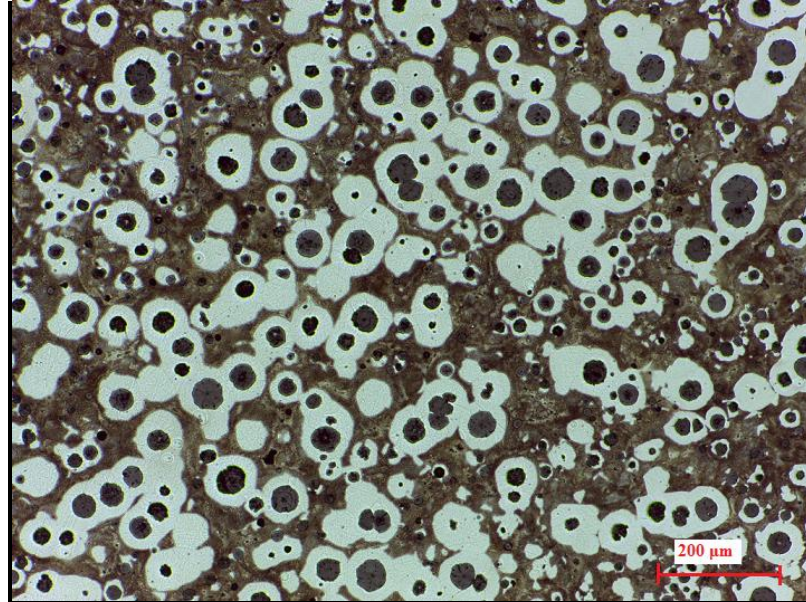


Şekil 6.9 : Cameca SX100 markalı elektron prob mikro analizörü (EPMA) cihazı.

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

7.1 Mikroyapısal İncelemelerin Sonuçları

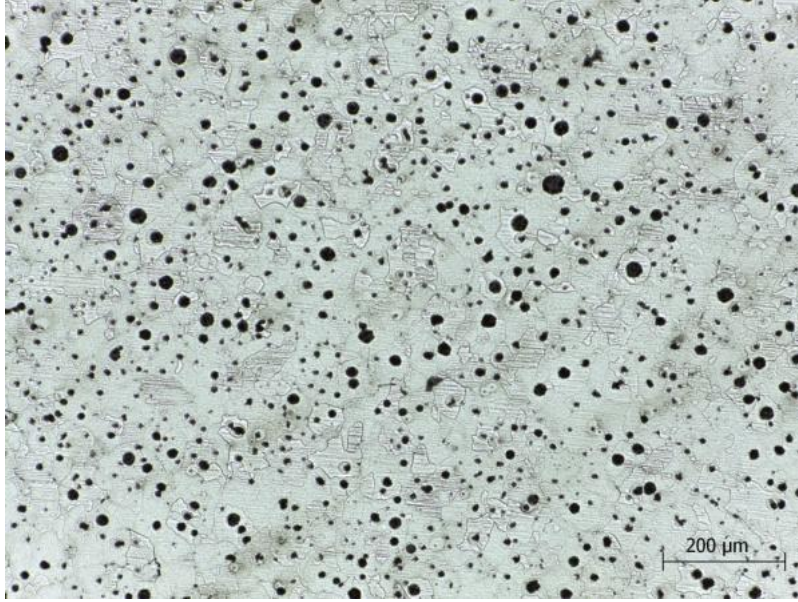
EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 kalite küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal bileşimi Çizelge 6.1’de verilmişti. Şekil 7.1’de ve Şekil 7.2’de sırasıyla EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin dağlanmış mikroyapıları gösterilmektedir. Şekil 7.1’de görüldüğü gibi EN-GJS-500-7 kalitede KGDD’nin mikroyapısı ferrit, perlit, küresel grafitlerden oluşmaktadır. Grafit küreleri ferrit fazı tarafından çevrilmiş olup, ferrit halkaları arasındaki kısımda perlit yer almaktadır, bu mikroyapı bazı dökme demirler için karakteristik olup, boğa gözü yapısı olarak adlandırılmaktadır. Yüksek silisyumlu EN-GJS-500-14 kalite KGDD’nin mikroyapısı Şekil 7.2’de gösterildiği gibi tamamen ferritik yapıda olduğu gözlemlenmiştir, sonuçlar literatürle ve EN 1563 standardıyla uyum içindedir [14].



Şekil 7.1 : EN-GJS-500-7 sınıfı KGDD’in mikroyapısı.

Çalışmada kullanılan iki farklı kalitede KGDDlerden x100 büyütmede beşer adet dağlanmamış mikroyapı fotoğrafları üzerinden alınan görüntülerle, BS EN ISO 945-1 standardı ve Clemex Image Analysis® yazılımı yardımıyla yapılan kantitatif metalografik analiz sonuçları Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Her iki kalite KGDD de standartlara uygun özelliklere sahiptir. 500-14 kalite KGDD'nin küre çapı 500-7'den daha küçük ve mm^2 'deki küresel grafit sayısı daha fazladır. Yüksek küresellik, çekme ve akma mukavemetini artırırken, yorulma özelliklerinin üzerinde de pozitif etkisi bulunmaktadır [19]. Nodüler grafitlerin artması, grafitlerin çatlak ilerlemesini engelleyici etkisinden dolayı sünekliği ve tokluğu artırır ve yorulma özelliklerini pozitif olarak etkiler [29].



Şekil 7.2 : EN-GJS-500-14 sınıfı KGDD'in mikroyapısı.

Çizelge 7.1 : Bu çalışmada kullanılan EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 kalite KGDD'nin kantitatif özellikleri

Malzeme	Küresellik (%)	Ortalama Küre Çapı (µm)	Küre Sayısı ($1/\text{mm}^2$)	Grafit Hacim Oranı (%)	Ferrit/perlit (%)
EN-GJS-500-7	90	$21 \pm 1,8$	193 ± 27	$12 \pm 1,1$	42/58
EN-GJS-500-14	90	$15 \pm 0,5$	220 ± 10	$8,3 \pm 1,1$	100 Ferrit

7.2 Sertlik, Çekme ve Darbe Deneylerinin Sonuçları

EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 kalite küresel grafitli dökme demirlerin sertlik, çekme ve çentiksiz darbe deneyi sonuçları Çizelge 7.2'de verilmiştir. Sonuçlara göre EN-GJS-500-14 kalite yüksek silisyumlu ferritik küresel grafitli dökme demirin akma mukavemeti 500-7'ye göre %8 artmıştır. Çekme mukavemeti 500-7'de 687 MPa iken 500-14 için bu değer 551 MPa'a düşmüştür fakat bu değer EN1563 standardına uygundur. EN-GJS-500-14 malzemesinin çentiksiz darbe enerjisi ise %63 oranında artmıştır ki bu silisyumun ferriti sabitleyici etkisi sayesinde

malzemenin sünekliğinin fazlaca geliştiğinin göstergesidir. Malzemenin çekme mukavemetinin, kopma uzamasıyla çarparak bulunan tokluk değerinde ise 500-14 malzemesinde %53 artış gözlemlenmiştir. Brinel sertlik değerleri incelendiğinde 500-7 213 HB değerine sahipken 500-14 kalitedeki malzeme 195 HB sertlik değerine sahiptir, sertlik değerinde %9 azalma gözükmemektedir. % 0,2 akma mukavemetinin çekme mukavemetine oranı (R_p/R_m) EN-GJS-500-7 için 0,59 iken EN-GJS-500-14’te bu değer 0,79’a yükselmiştir. Sonuçlar literatüre ve standarda uygundur.

Çizelge 7.2 : EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 sınıfı küresel grafitli demirlerin sertlik, çekme ve çentiksiz darbe deneyi sonuçları.

	EN-GJS-500-7	EN-GJS-500-14
Akma Mukavemeti (%0.2 MPa)	403±8	436±5
Çekme Mukavemeti (MPa)	687±17	551±2
Kopma Uzaması (%)	11±0,5	21±1
Brinell Sertlik (HB)	214±2	194±4
Çentiksiz Darbe Enerjisi (J)	70±6	114±16
Tokluk ($\sigma_C \times e_k, J/m^3$)	7,56x10 ⁷	11,57 x10 ⁷

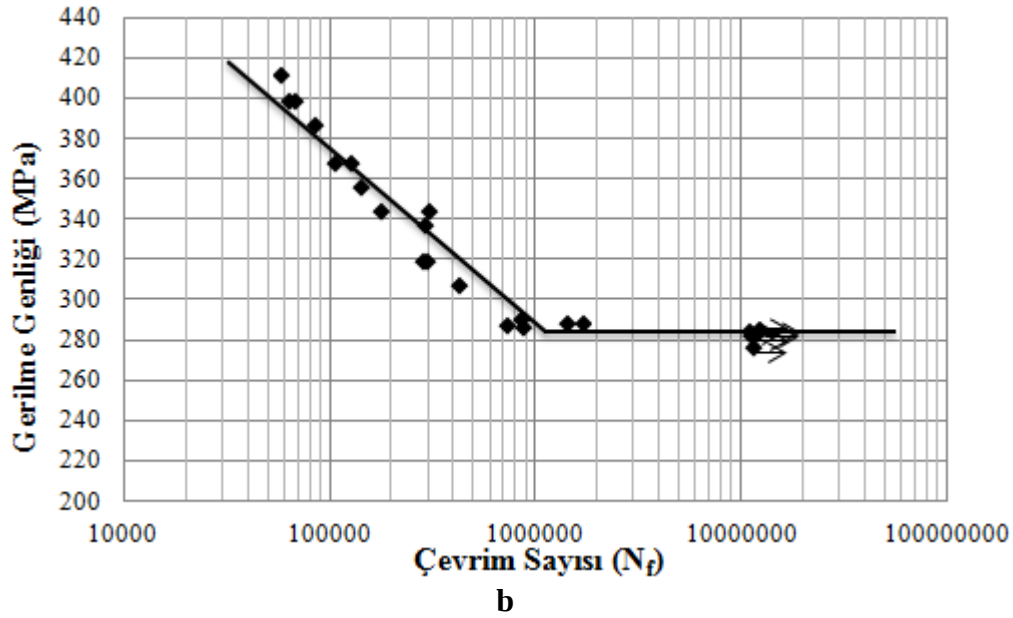
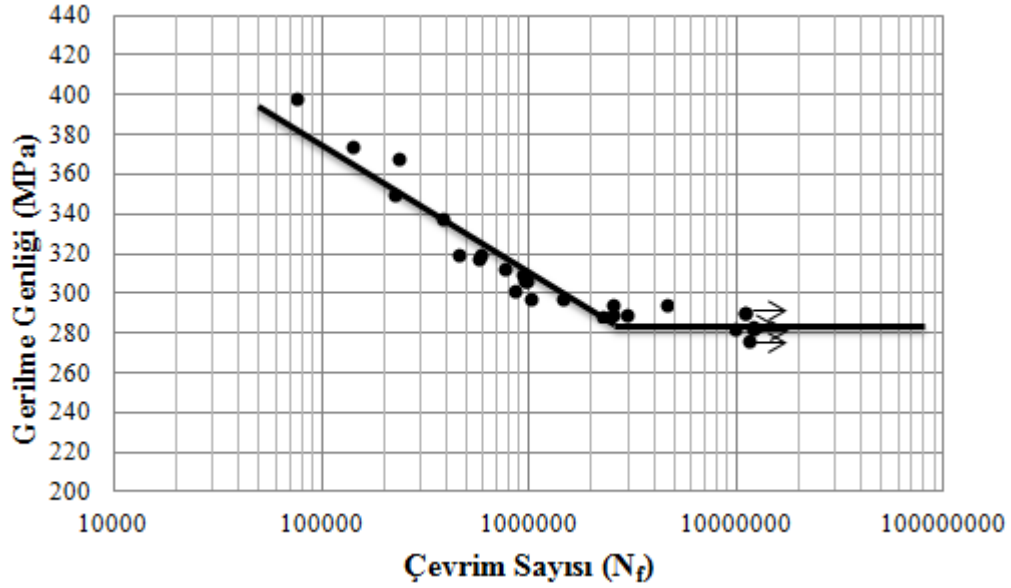
7.3 Yorulma Deneyi Sonuçları

Dönel eğmeli yorulma deneyine tabii tutulan EN-GJS 500-7 ve EN-GJS 500-14 küresel grafitli dökme demirlere uygulanan gerilme genlikleri ve bu genliklerde kırılıncaya kadarki çevrim sayıları (N_f) ekler bölümünde, Çizelge A.1’de verilmiştir.

Şekil 7.3’te sırasıyla EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 kalite küresel grafitli dökme demirlerin Çizelge A.1’e göre çizilmiş gerilme genliği (MPa)- çevrim sayısı (N_f) grafikleri verilmiştir. 10⁷ çevrimi geçen testler durdurulmuş olup grafik üzerinde ok ile belirtilmiştir.

Şekil 7.3’te EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanım sınırlarının benzer, sırasıyla 284 MPa ve 285 MPa olduğu gözlemlenmiştir. Fakat, EN-GJS-500-7 numunesi, aynı gerilme değerinde EN-GJS-500-14 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 [44].



Şekil 7.3 : Gerilme genliği-çevrim sayısı grafiği (S-N)

a) EN-GJS-500-7 S-N grafiği,

b) EN-GJS-500-14 S-N grafiği.

Şekil 7.3'te EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanım sınırlarının benzer, sırasıyla 284 MPa ve 285 MPa olduğu gözlemlenmiştir. Fakat, EN-GJS-500-7 numunesi, aynı gerilme değerinde EN-GJS-500-14 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 [44].

Basquin bağıntısı yüksek çevrimli yorulmada kullanılan, uygulanan gerilme ve çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi vermektedir. Basquin sabitleri hesaplanırken 10^7 çevrimi geçip kırılmayan numuneler hesaba katılmamış, sadece kırılan numuneler kullanılarak,

$$\Delta\sigma.(N_f)^a = C_1 \quad (7.1)$$

denklemleri yardımıyla hesaplanmıştır.

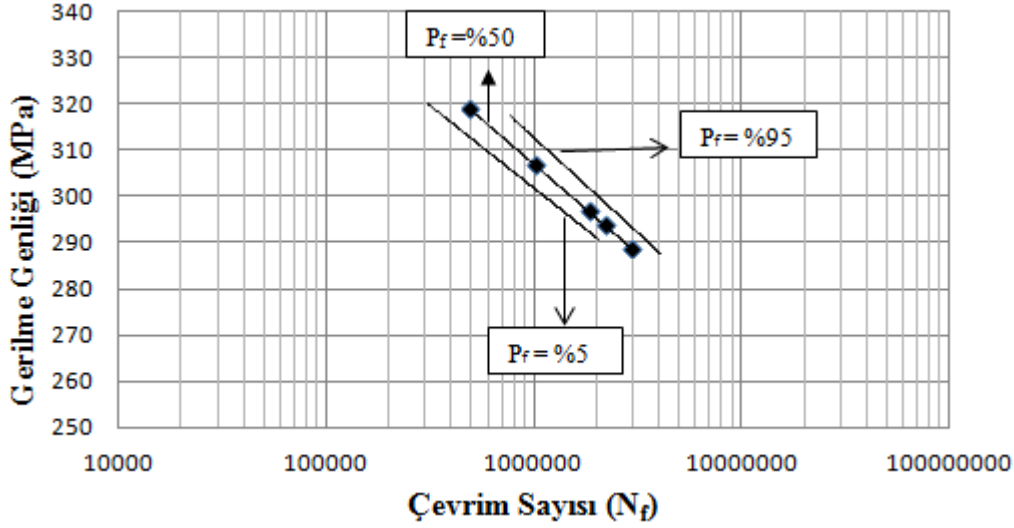
Çizelge 7.3'te EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 sınıfı malzemelerin hesaplanan a , C_1 Basquin sabitleri, malzemelerin hesaplanan yorulma dayanım sınırı ve yorulma oranı gösterilmiştir. Malzemelerin yorulma dayanım sınırının çekme mukavemetine oranı yani yorulma oranları karşılaştırıldığında EN-GJS-500-7 sınıfının yorulma oranı 0,41 iken, EN-GJS-500-14 sınıfının ise 0,52'dir. EN1563 standardına göre ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demirlerde bu oran ortalama 0,40'tır ve çekme mukavemeti arttıkça yorulma oranı azalmaktadır, katı çözelti sertleştirilmiş küresel grafitli dökme demirler ise bütün çekme mukavemet değerlerinde yorulma oranı 0,45 civarlarındadır [14].

Çizelge 7.3 : Basquin bağıntısına göre hesaplanan a ve C_1 sabitleri, yorulma dayanım sınırı ve yorulma oranı değerleri.

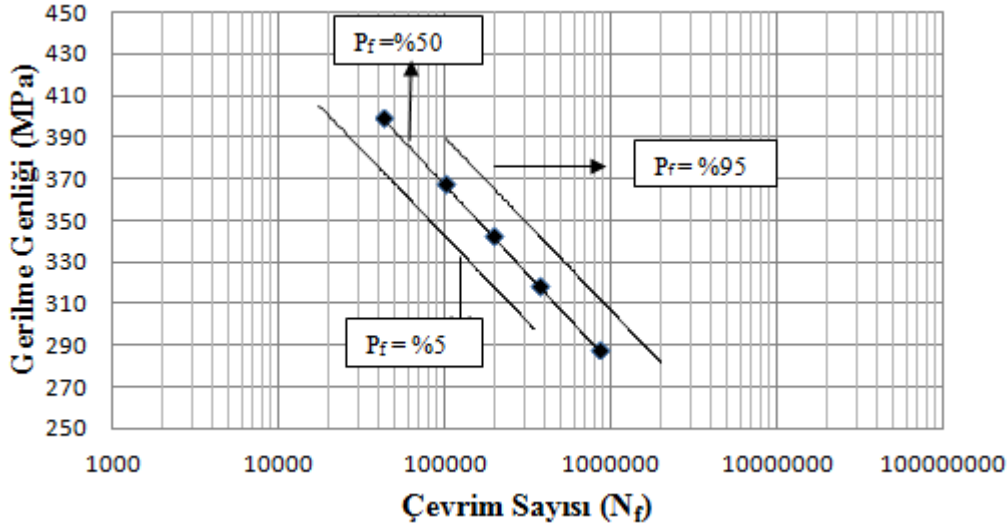
	EN-GJS-500-7	EN-GJS-500-14
a	0,082	0,114
C_1 (MPa)	1945	2771
Yorulma Dayanım Sınırı (MPa)	284	285
Yorulma Oranı, σ_{YDS}/σ_C	0.41	0.52

EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 kalite küresel grafitli dökme demirlerin gerilme genliği-çevrim sayısı eğrileri, bu malzemelerin %50 kırılma olasılıklarını gösteren eğridir. Şekil 7.4'te EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 kalite KGDDlerin P-S-N grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerde P_f malzemenin kırılma olasılığını ifade etmektedir. Grafiklerde %50 kırılma olasılıklarını gösteren eğrinin yanında, %5 ve

%95 olasılıkta kırılma eğrilerini de gösterilmektedir, Grafikler ASTM 739 standardına uygun olarak birbirinden farklı 5 gerilmede 2'şer numune kullanılarak yapılan deneyler sonucunda çizilmiştir [45].



a



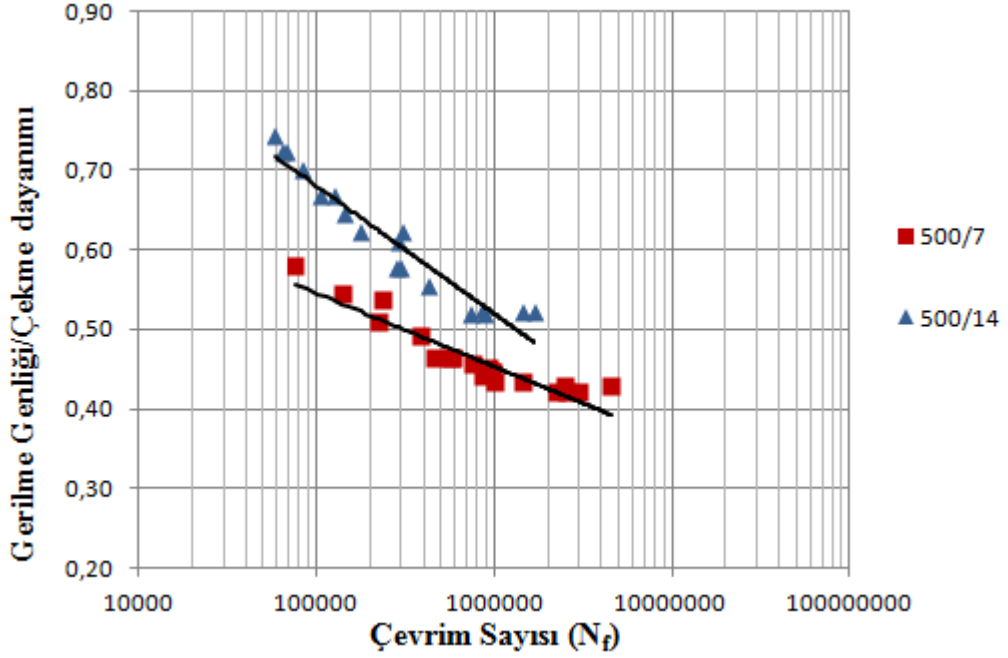
b

Şekil 7.4 : P-S-N grafiği a) EN-GJS-500-7 P-S-N grafiği,
b) EN-GJS-500-14 P-S-N grafiği.

Şekil 7.4'te P-S-N grafikleri karşılaştırıldığında EN-GJS-500-7 kalite KGDD'nin bant aralığının EN-GJS-500-14'e göre daha dar olduğu görülmektedir, bu durum her kalitede KGDD'in kendi içinde aynı gerilmede yapılan birden fazla deney sırasında aynı çevrim sayısında kırılma olasılığının, EN-GJS-500-7 kalite KGDD'de daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Şekil 7.5'te ise EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 kalite KGDDLere uygulanan gerilme genliklerinin çekme mukavemetlerine oranının çevrim sayısına göre

değişimi tek bir grafik üzerinde gösterilmiştir. EN-GJS-500-7'nin çekme mukavemeti 500-14'e göre daha yüksek olmasına rağmen yorulma dayanım sınırları benzer olduğu için 500-14'e ün yorulma oranının daha yüksek olduğu grafikten de açıkça anlaşılmaktadır.

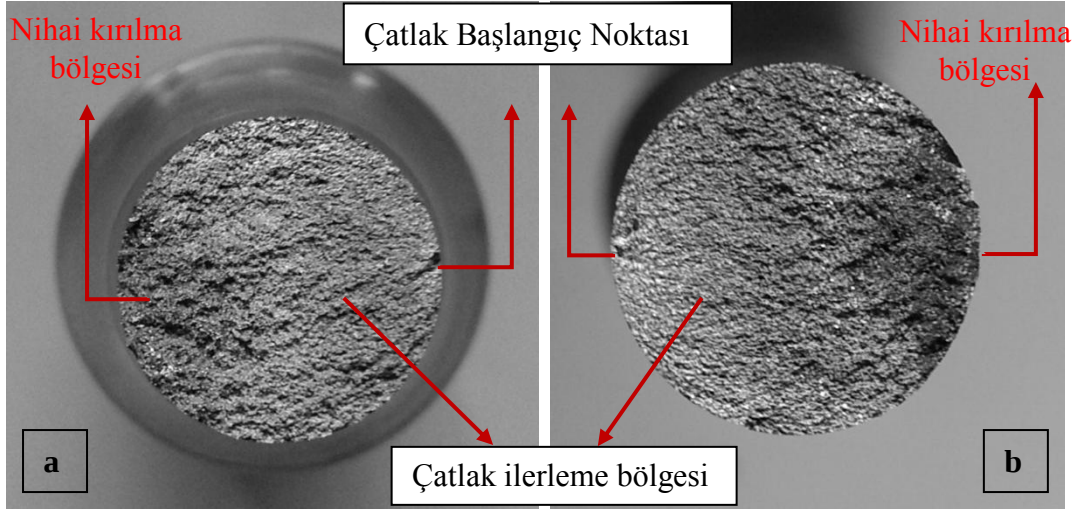


Şekil 7.5 : Uygulanan gerilme genliğini kendi çekme mukavemetine oranının çevrim sayısına göre değişimi.

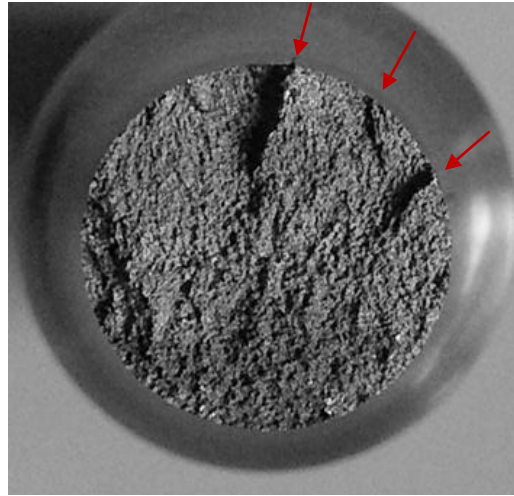
7.4 Yorulma Kırılma Yüzeyi İncelemelerin Sonuçları

Çalışmada kullanılan tüm EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 kalite küresel grafitli dökme demir numunelerini gerilme genliği-çevrim sayısı-kırılma yüzey görüntüleri Çizelge B.1'de gösterilmektedir. Şekil 7.6'da EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 kalite küresel grafitli dökme demirin yorulma kırılma yüzeyleri gösterilmektedir. Her iki kalite KGDD de aynı karakterde kırılma yüzeyine sahiptir. Yüzey incelendiğinde yüzeyde iki bölge olduğu görülmektedir, nispeten daha açık olan bölge çatlak başladığı ve ilerlediği koyu olan bölge ise nihai kırılmanın gerçekleştiği bölgedir. Çatlak yüzeyden başlamış ve okla gösterilmiştir. Çatlak başlangıç noktasından iç bölgelere doğru radyal izler görülmektedir.

Şekil 7.7'da EN-GJS-500-7 kalite küresel grafitli dökme demirin 374 MPa gerilme altında 139290 çevrimde kırılmış yorulma kırılma yüzeyi gösterilmektedir, burada dönel eğmeli yorulma kırılmasına özel dişli izleri okla gösterilmiştir ve bu dişli izleri çatlak başlangıcının birden fazla yerde başladığını göstermektedir.



Şekil 7.6 : Küresel grafitli dökme demirlerin yorulma kırılma yüzey görüntüleri
a) EN-GJS-500-7 KGDD ($\sigma = 380$ MPa, $N_f = 51148$ çevrim),
b) EN-GJS-500-14 KGDD ($\sigma = 283$ MPa, $N_f = 825752$ çevrim).

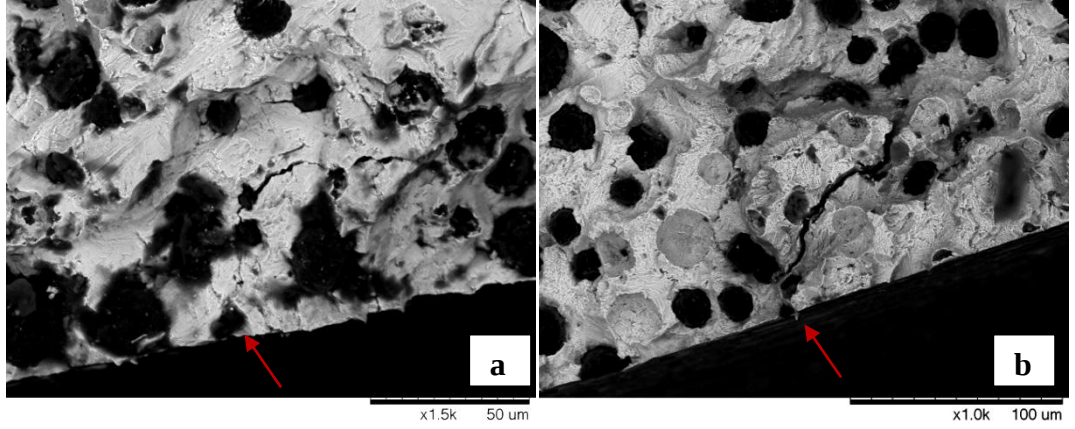


Şekil 7.7 : EN-GJS-500-7 kalite küresel grafitli dökme demirin üzerinde dişli izleri bulunan yorulma kırılma yüzeyi görüntüsü.

Şekil 7.8’da EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 kalite küresel grafitli dökme demirlerin yüzeyden başlamış ikincil çatlaklarının taramalı elektron mikroskobundaki (SEM) görüntülerini göstermektedir. Yorulma çatlak ilerlemesini gerçekleştirirken çatlakın küresel grafitlerle matris ara yüzeyi arasında ilerlediği görülmektedir.

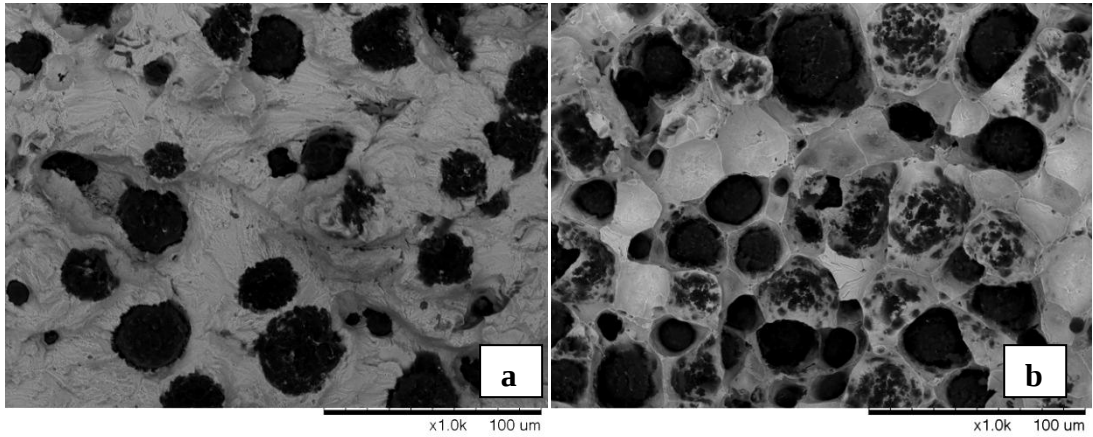
Şekil 7.9 ve Şekil 7.10’de EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 kalite küresel grafitli dökme demirin yorulma çatlak ilerleme ve nihai kırılma bölgelerinin taramalı elektron mikroskobundaki (SEM) görüntüleri gösterilmektedir. Yorulma çatlak ilerleme bölgesi ve nihai kırılma bölgesi farklı kırılma karakterine sahiptir. Yorulma çatlak ilerleme bölgesinde yorulma çizgileri görülürken, grafitler matrisin içinde

gömülüdür bu yüzden numuneye çıplak gözle bakıldığında bu bölge daha açık renkte gözükmemektedir. Nihai kırılmanın gerçekleştiği bölgede ise grafit nodülleri matriste nodül yuvası kavitelerinde küreselliğini koruyacak şekilde bulunduklarından dolayı, bu bölge daha koyu bir renkte gözükmemektedir (Şekil 7.6). Nihai kırılma bölgesinde intergranüler kırılma gerçekleşir. Bu bölgede kırılma grafitlerin etrafındaki mikro boşlukların birleşmesiyle oluşur.



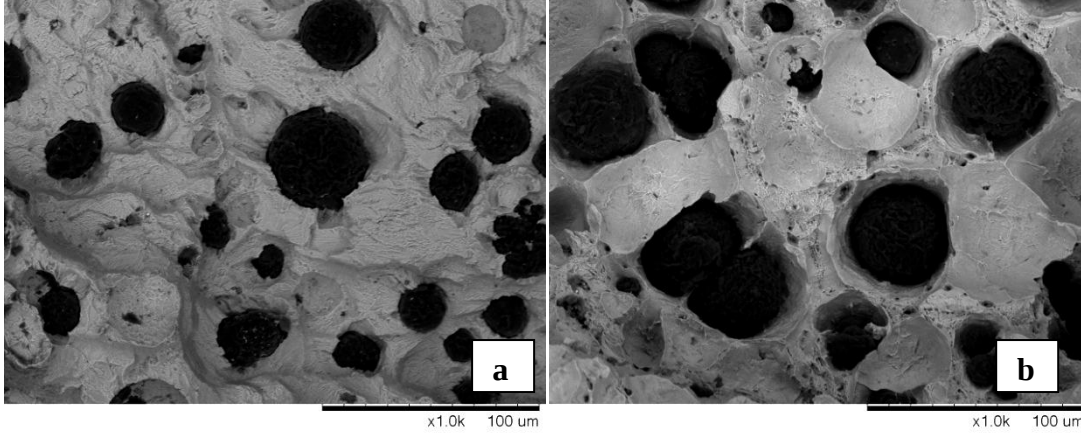
Şekil 7.8 : KGDDlerin kırılma sırasında oluşan ikincil çatlak SEM görüntüleri

- a)** EN-GJS-500-14 ($\sigma = 368$ MPa, $N_f = 124312$, x1500),
b) EN-GJS-500-7 ($\sigma = 350$ MPa, $N_f = 224873$, x1000).



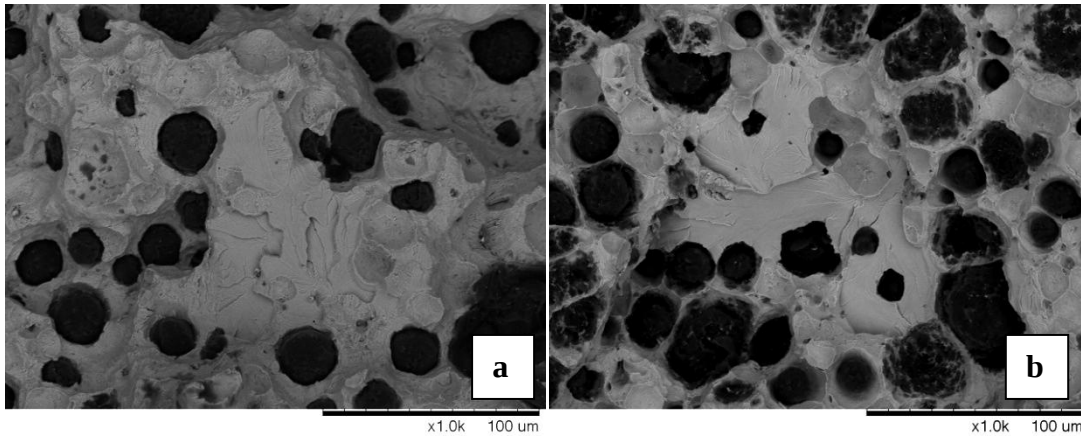
Şekil 7.9 : EN-GJS-500-14 ($\sigma = 368$ MPa, $N_f = 124312$, x1000),

- a)** Çatlak ilerleme bölgesi SEM görüntüsü,
b) Nihai kırılma bölgesi SEM görüntüsü.



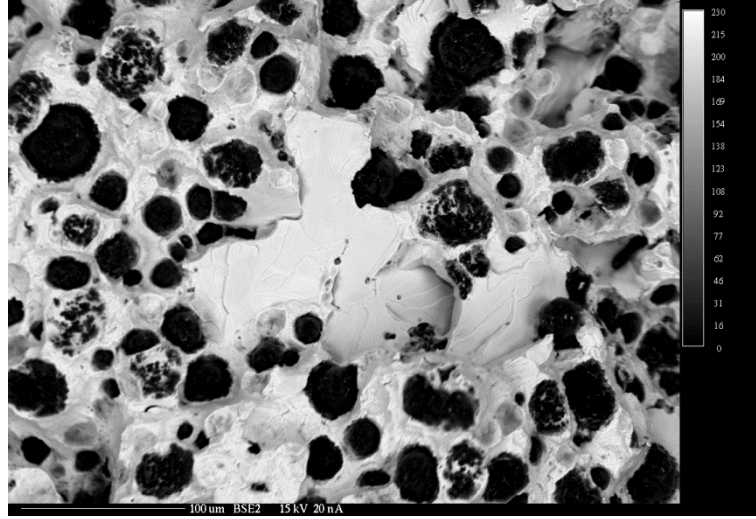
Şekil 7.10 : EN-GJS-500-17 ($\sigma = 350$ MPa, $N_f = 224873$, $\times 1000$),
a) Çatlak ilerleme bölgesi SEM görüntüsü,
b) Nihai kırılma bölgesi SEM görüntüsü.

Yorulma kırılma yüzeylerinde yorulma çatlak ilerlemesi ve nihai bölge dışında, yüzeyde parlayan bazı noktalar bulunmaktadır, bu noktalar taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve elektron prob mikro analizi (EPMA) ile incelenmiştir. EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14’de bulunan bu bölgelerin Şekil 7.9 ve 7.10’de gösterilen ile aynı numunelerden alınan, taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (SEM) Şekil 7.11’de gösterilmektedir. Bu noktaların parlak gözükmesinin nedeni bu bölgelerde kırılmanın transgranüler olması yani klivaj kırılma gerçekleşmesidir [46].



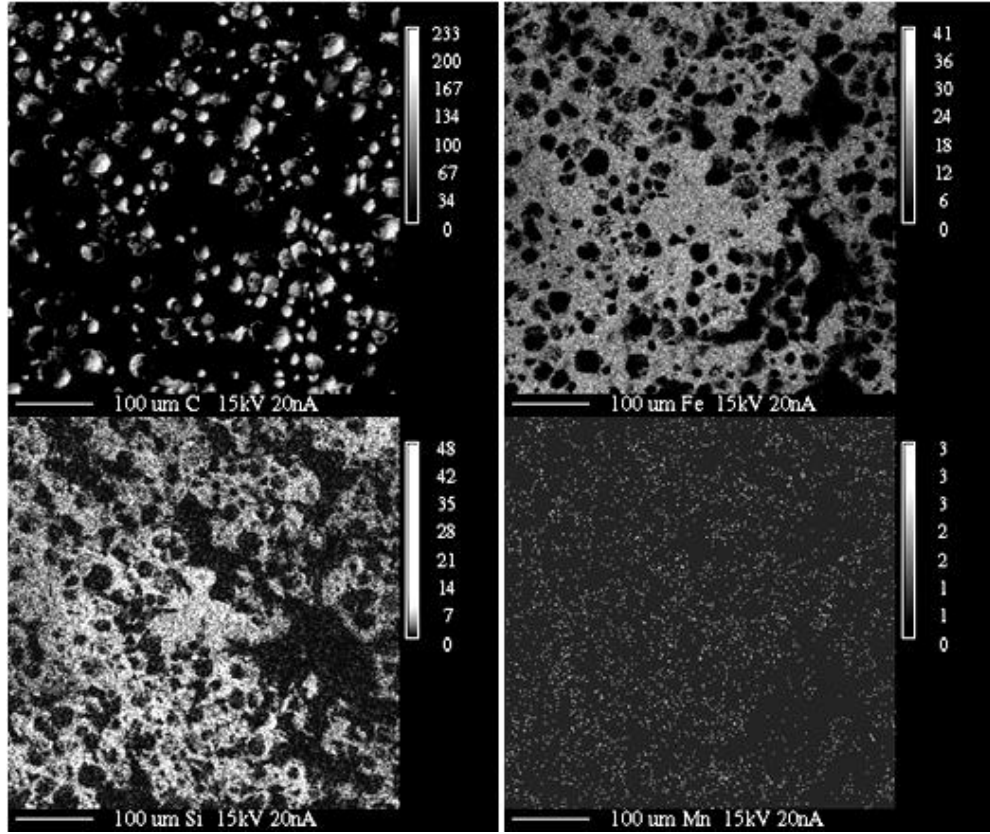
Şekil 7.11 : Parlak noktaların SEM görüntüleri
a) EN-GJS-500-7,
b) EN-GJS-500-14

Parlak noktaların oluşma sebebinin bir kimyasal element segregasyonu olup olmadığını araştırmak amacıyla EPMA çalışmaları yapılmıştır. Şekil 7.12’te 294 MPa’da 4548388 çevrimde kırılmış EN-GJS-500-14 kalite KGDD’nin EPMA ile çekilmiş görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 7.12 : EPMA ile incelenen EN-GJS-500-14 numunesinin klivaj kırılmasını içeren yorulma kırılması yüzeyi.

Şekil 7.13'te ise bu görüntü üzerinden C, Si, Mn ve Fe elementlerinin dağılımı incelenmiştir. Sonuçlar, klivaj kırılmanın sebebinin kimyasal segregasyon olmadığını göstermektedir, C, Si, Mn ve Fe için yapılan araştırmalarda, bu elementlerin yüzeyde homojen olarak dağıldığı gözlenmiştir.



Şekil 7.13 : EN-GJS-500-14 numunesinin yorulma kırılma yüzeyinde klivaj kırılmanın gerçekleştiği bölgedeki C, Si, Mn ve Fe elementlerinin dağılımı. ($\sigma = 294\text{MPa}$ $N_f = 4548388$).

8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada %2,4 Si içeren ferritik-perlitik EN-GJS-500-7 ve %3,6 Si içeren ferritik EN-GJS-500-14 sınıfı küresel grafitli dökme demirler kullanılarak, silisyumun küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapı, sertlik, çekme, çentiksiz darbe ve yüksek çevrimli yorulma davranışını etkisinin incelenmiş ve aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir.

1- Yapılan mikroyapı incelemeleri sonucu, EN-GJS-500-7 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin %42 ferritik-%58 perlitik, EN-GJS-500-14 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerde ise fazla silisyumun ferrit oluşumunu destekleyici etkisinden dolayı %100 ferritik yapıya sahip olduğu görülmüştür.

2- EN-GJS-500-14 kalite küresel grafitli dökme demirlerde silisyumun ferritik matriste katı çözelti oluşturması ile küresel grafitli dökme demirin akma mukavemeti 500-7 serisine göre %8,1 arttığı gözlemlenmiştir, akma mukavemeti 403 MPa'dan 436 MPa'a çıkmıştır. Çekme mukavemeti 500-7 serisinde 687 MPa iken 500-14 serisinde 551 MPa'a düşmüştür fakat EN1563 standardına uygundur. %0.2 akma mukavemetinin çekme mukavemetine oranı (R_p/R_m) yüksek silisyum oranı ile birlikte 0,59'dan 0,79'a artmıştır. Brinell sertlik değeri 500-7 sınıfında 213HB iken 500-14 sınıfında 195HB'ye düşmüştür.

3- 500-14 kalite KGDD'de çentiksiz darbe enerjisi 70 J'den 114 J'e; %63 oranında artmıştır ki bu silisyumun ferriti sabitleyici etkisi sayesinde malzemenin sünekliğinin fazlaca geliştiğinin göstergesidir. Malzemenin çekme mukavemetinin, kopma uzamasıyla çarparak bulunan tokluk değerinde 500-7 sınıfında $7,56 \times 10^7$ J/m³ iken yüksek silisyum oranı ile bu değer $11,7 \times 10^7$ J/m³ çıkarak %53 artış gözlemlenmiştir.

4- EN-GJS-500-7 kalite küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanım sınırları 284MPa iken, EN-GJS-500-14 sınıf için bu değer 285 MPa olduğu gözlemlenmiştir. Yorulma dayanım sınırlarının birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir fakat, EN-GJS-500-7 numunesi, aynı gerilme değerinde EN-GJS-500-14 numunesine göre daha büyük çevrim sayılarında kırılmıştır.

5- P-S-N eğrileri değerlendirildiğinde ise EN-GJS-500-7'nin bant aralığının EN-GJS-500-14'e göre daha dar olduğu görülmektedir, bu da her sınıfın kendi içinde, aynı gerilmede aynı çevrim sayısında kırılma olasılığının, EN-GJS-500-7'de daha yüksek olduğunu göstermektedir.

6- Malzemelerin yorulma dayanım sınırının çekme mukavemetine oranı yani yorulma oranları karşılaştırıldığında EN-GJS-500-7 sınıfının yorulma oranı 0,41 iken, EN-GJS-500-14 sınıfının ise 0.52 olarak bulunmuştur.

7- Her iki kalite KGDD'nin Basquin sabitleri hesaplanmıştır. EN-GJS-500-7 kalite malzemeleri a ve C_1 Basquin sabitleri sırasıyla 0,082 ve 1945 iken EN-GJS-500-14 kalite KGDD için a ve C_1 sabitleri sırasıyla, 0,114 ve 2771 olarak hesaplanmıştır.

8- Yorulma kırılma yüzeyi incelemelerinde her iki sınıfın da aynı karakterde kırılma yüzey karakterine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yüzey incelendiğinde yüzeyde iki bölge olduğu görülmektedir, nispeten daha açık olan bölge çatlağın başladığı ve ilerlediği bölge, koyu olan bölge ise nihai kırılmanın gerçekleştiği bölgedir. Bunların dışında yüzeyde ara ara görülen parlak noktaların taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendiğinde klivaj kırılma gösterdiği tespit edilmiştir. Çatlağın, yorulma çatlak ilerleme bölgesinde (açık renkli bölge) intergranüler olarak ilerlerken, parlak noktaların bulunduğu yerde transgranüler olarak ilerlemektedir ve koyu olan bölgede nihai kırılma gerçekleşmektedir.

9- Yüzeyde rastgele bazı bölgelerde oluşan parlak noktaların oluşma sebebinin bir kimyasal element segregasyonu olup olmadığını araştırmak amacıyla yapılmış elektron prob mikro analizi (EPMA) çalışmaları sonucu klivaj kırılmanın sebebinin kimyasal segregasyon olmadığını göstermektedir. C, Si, Mn ve Cr için yapılan araştırmalarda bu elementlerin yüzeyde homojen olarak bulunduğu gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Cavallini, M., Di Bartolomeo, O. ve Iacoviello, F.** (2008). Fatigue crack propagation damaging micromechanisms in ductile cast irons, *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 694–704, İtalya
- [2] **Reardon, A. C.** (2011). Metallurgy for the non-metallurgist, *ASM International*, Ohio, USA.
- [3] **Olsson, A.** (2011). Fatigue strength of truck components in cast iron, *Yüksek Lisans Tezi*, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- [4] **ASM Handbook**, (2008) Casting, Vol.15, Formerly Tenth Edition, *ASM International*,
- [5] **Çavuşoğlu, E. N.** (1992). "Döküm Teknolojisi I", *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 289-299
- [6] **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
- [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] **Çelik, Ö.** (2001). Küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışları, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] **ASM Metals Handbook**, (1990). Properties and selection: irons, steels and high performance alloys, Vol.1, Tenth Edition, *ASM International*.
- [10] **Yılmaz, F.** (1985). Alaşımlar, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 169-172
- [11] **Budinski, K. G. ve Budinski, M. K.** (2010). Engineering Materials : Properties and Selection, *Prentice Hall*, Upper Saddle River, N.J.490
- [12] **Berns, H. ve Theisen W.** (2008). Ferrous materials; Steel and Cast Iron, *Springer-Verlag*, 150-152, Heidelberg Berlin.
- [13] **TS 526** (1977). Küresel Grafitli Dökme Demirler, Genel Esaslar, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [14] **EN 1563** (2011). Founding-Spheroidal graphite cast irons, *European Standard*
- [15] **Karsay, S. I.** (1976). Ductile Iron I Production, Quebec Iron and Titanium Corporation, Canada.

- [16] **Pedersen, K. M. ve Tiedje, N.** (2005). Nucleation and solidification of thin walled ductile iron—Experiments and numerical simulation, *Materials Science and Engineering A*, 413–414, 358–362, Danimarka.
- [17] **Mittal, R. ve Nanda, S.** (2009). Property Enhancement Of Spheroidal Graphite Cast Iron By Heat Treatment, *Yüksek Lisans Tezi*, National Technology of University, Rourkela.
- [18] **Kökden, M. U.** (1998). GGG 50 ve GGG 80 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin abrasiv aşınma davranışına östemperleme işleminin etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, I.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] **Ductile Iron Data for Design Engineers**, (1990). *Rio Tinto Iron& Titanium Inc.*, Canada.
- [20] **Prihti, T.** (2011). Wear behaviour of ductile irons in continuous sliding motion, *Yüksek Lisans Tezi*, Tampere University of Technology, Finlandiya.
- [21] **Aypek, M.** (1999). Termal analiz yöntemiyle küresel grafitli dökme demirlerin kalitesinin belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, I.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [22] **Hsu, C., Chen, M. ve Hu, C.** (2007). Microstructure and mechanical properties of 4% cobalt and nickel alloyed ductile irons, *Materials Science and Engineering A*, 444, 339–346, Tayvan.
- [23] **Minkoff, I.** (1983). The Physical Metallurgy of Cast Iron, *Wiley*, 185–187, Canada.
- [24] **Url-1** <<http://www.haddemetal.com/tr/Download/Dokmedemirler.pdf>>, alındığı tarih: 10.04.2013.
- [25] **Winiczenko, R., Salat, R. ve Awtoniuk, M.** (2013). Estimation Of Tensile Strength Of Ductile Iron Friction Welded Joints Using Hybrid Intelligent, *Methods Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 23, 385–391, Polonya.
- [26] **Costa, N., Machado, N. ve Silva, F. S.** (2008). Influence of graphite nodules on fatigue limit of nodular cast iron, *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, 20, 120–127, Portekiz.
- [27] **Asi, O.** (2006). Failure Analysis of a crankshaft made from ductile cast iron, *Engineering Failure Analysis*, 13, 1260–1267, Uşak.
- [28] **ASM Metals Handbook**, (2008). Properties and selection: irons, steels and high performance alloys, Vol.1, 9th edition *ASM International*.
- [29] **Swain, S. K.** (2008). Effect of Chemistry and Processing Variables on the Mechanical Properties of Thin-wall Ductile iron castings, *Yüksek Lisans Tezi*, National Technology of University, Rourkela.
- [30] **Başman, G.** (1998). GGG40 Sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin yorulma davranışına TiN kaplamanın etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, I.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [31] **Khalil-Allafi, J. ve Amin-Ahmadi, B.** (2011). Influence of mold preheating and silicon content on microstructure and casting properties of ductile iron in permanent mold, *Journal of iron and steel research, International*, 18, 34–39, Tahran.

- [32] **Shinde, V. D., Ravi, B. ve Narasimhan, K.** (2012). Solidification Behaviour and mechanical Properties of ductile Iron castings and varying thickness, *International Journal of Cast Metals Research*, 25, 364-373, Hindistan.
- [33] **Cavallini, M., Di Bartolomeo, O. ve Iacoviello, F.** (2008). Fatigue crack propagation damaging micromechanisms in ductile cast irons, *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 694-704, İtalya.
- [34] **Haycock, M.** (2011). Effect of silicon content and cooling rate on mechanical properties of heavy section ductile iron, *Yüksek Lisans Tezi*, Michigan Technological University, Michigan.
- [35] **Url-2** <<http://home.uludag.edu.tr/users/mumintutar/edm/14.pdf>>, alındığı tarih: 16.04.2013.
- [36] **ISO 945-1**, (2008). Microstructure of cast irons – Part 1: Graphite classification by visual analysis, *International Standards Organization*.
- [37] **Herfurth, K., Gorski, R., Beute, K. ve Hering, M.** (2011). GOPAG C 500 F, *Gontermann-Peipers*, Almanya.
- [38] **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.
- [39] **Björkegren, L. E. ve Hamberg, K.** (2003). Silicon alloyed ductile iron with excellent ductility and machinability, *Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron*, İsveç.
- [40] **BS ISO 1143**, (2010). Metallic materials – Rotating bar bending fatigue testing, *İngiliz Standartları Enstitüsü*, İngiltere.
- [41] **ASTM E8M**, (2011). Standard test methods for tension testing of metallic materials, *American Society for Testing and Materials*.
- [42] **ASTM A327**, (2011). Standard test methods for impact testing of cast irons, *American Society for Testing and Materials*.
- [43] **ASTM E10**, (2012). Standard test method for Brinell hardness of metallic materials, *American Society for Testing and Materials*.
- [44] **Hamberg, K., Mörtzell, M., Björkblad, A. ve Samuelsson, J.** (2005). Fatigue crack growth in ductile iron, *Nordic Project*, 287-310, Helsinki.
- [45] **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*.
- [46] **ASM Metals Handbook**, (1996). Fractography, Vol.12, Third Edition, *ASM International*.

EKLER

Ek A: EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin gerilme genliği (MPa) ve kırılncaya kadarki çevrim sayısı (N_f) değerleri.

Ek B: EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 KGDD numunelerinin kırık yüzey görüntüleri.

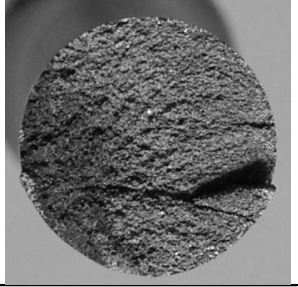
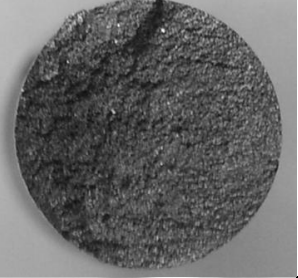
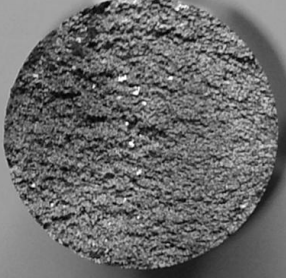
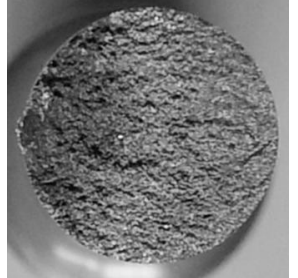
EK A

Çizelge A.1 : EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin gerilme genliği (MPa) ve kırılncaya kadarki çevrim sayısı (N_f)değerleri.

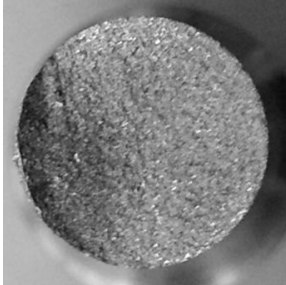
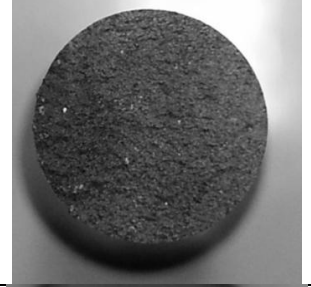
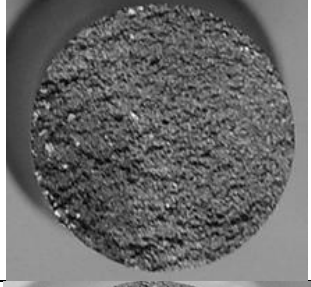
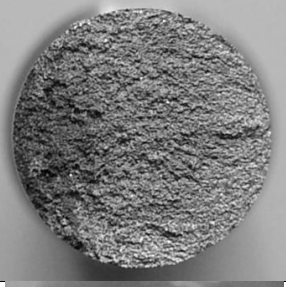
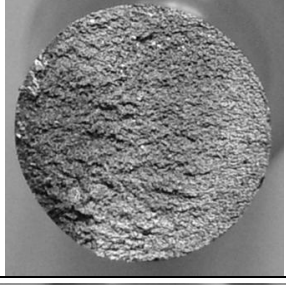
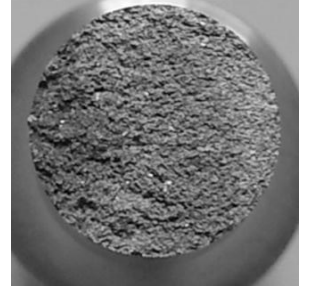
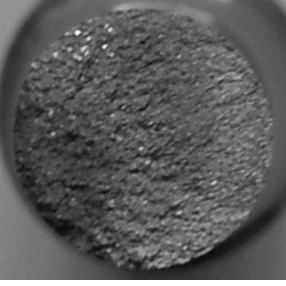
No	EN-GJS-500-7			EN-GJS-500-14		
	Gerilme Genliği (MPa)	Çevrim Sayısı (N _f)	Sonuç	Gerilme Genliği (MPa)	Çevrim Sayısı (N _f)	Sonuç
1	276	11472849	Kırılmadı	276	11368794	Kırılmadı
2	282	10003754	Kırılmadı	282	11265826	Kırılmadı
3	282	12113801	Kırılmadı	282	11256675	Kırılmadı
4	284	12000000	Kırılmadı	283	12000000	Kırılmadı
5	288	2267502	Kırıldı	285	11103133	Kırılmadı
6	289	2953420	Kırıldı	285	12268614	Kırılmadı
7	289	2528861	Kırıldı	286	862455	Kırıldı
8	294	2511748	Kırıldı	287	722035	Kırıldı
9	294	4548388	Kırıldı	288	1412089	Kırıldı
10	297	1011241	Kırıldı	288	1685077	Kırıldı
11	297	1450629	Kırıldı	290	847576	Kırıldı
12	302	847104	Kırıldı	307	423977	Kırıldı
13	307	970319	Kırıldı	319	280498	Kırıldı
14	307	944454	Kırıldı	319	291980	Kırıldı
15	309	929882	Kırıldı	337	286635	Kırıldı
16	313	762881	Kırıldı	343	174992	Kırıldı
17	318	571220	Kırıldı	343	299914	Kırıldı
18	319	458138	Kırıldı	356	140590	Kırıldı
19	319	579440	Kırıldı	368	104802	Kırıldı
20	337	381746	Kırıldı	368	124312	Kırıldı
21	350	224873	Kırıldı	386	83048	Kırıldı
22	368	233266	Kırıldı	399	66713	Kırıldı
23	374	139290	Kırıldı	399	62912	Kırıldı
24	399	75865	Kırıldı	411	57942	Kırıldı

Ek B

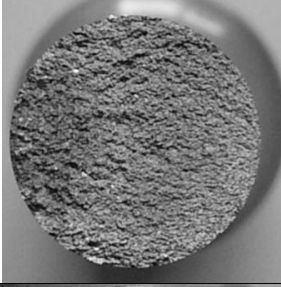
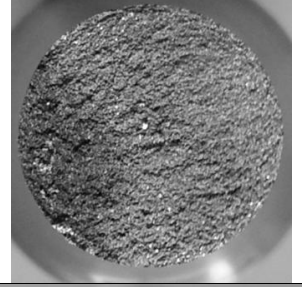
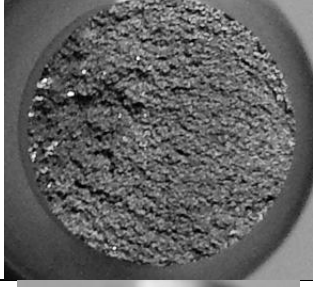
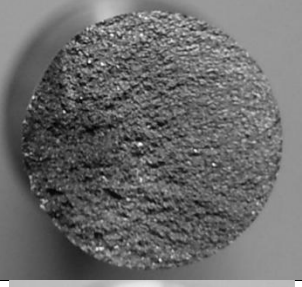
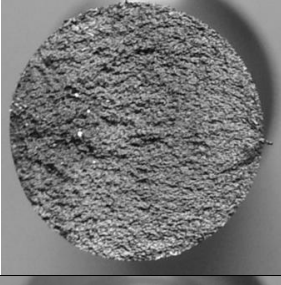
Çizelge B.1 : S-N eğrilerinde kullanılan EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 KGDD numunelerinin kırıldıkları gerilme genliği(MPa) çevrim sayısı (N_f) ve kırık yüzey fotoğrafları.

EN-GJS-500-7			EN-GJS-500-14		
σ_a MPa	N_f	Kırık Yüzey Fotoğrafi	σ_a MPa	N_f	Kırık Yüzey Fotoğrafi
399	75865		411	57942	
374	139290		399	62912	
368	233266		399	66713	
350	224873		386	83048	
337	381746		368	124312	

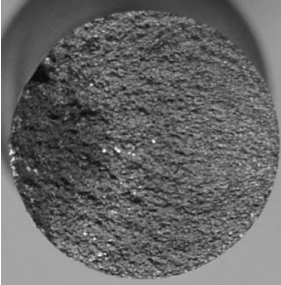
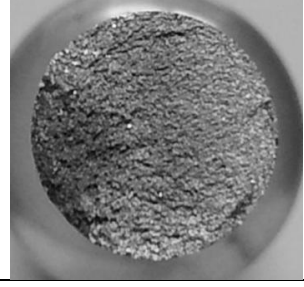
Çizelge B.1 (devam) : S-N eğrilerinde kullanılan EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 KGDD numunelerinin kırıldıkları gerilme genliği (MPa) çevrim sayısı (N_f) ve kırık yüzey fotoğrafları.

EN-GJS-500-7			EN-GJS-500-14		
σ_a MPa	N_f	Kırık Yüzey Fotoğrafi	σ_a MPa	N_f	Kırık Yüzey Fotoğrafi
319	458138		368	104802	
319	579440		356	140590	
318	571220		343	174992	
313	762881		343	299914	
309	929882		337	286635	

Çizelge B.1 (devam) : S-N eğrilerinde kullanılan EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 KGDD numunelerinin kırıldıkları gerilme genliği (MPa) çevrim sayısı (N_f) ve kırık yüzey fotoğrafları.

EN-GJS-500-7			EN-GJS-500-14		
σ_a MPa	N_f	Kırık Yüzey Fotoğrafi	σ_a MPa	N_f	Kırık Yüzey Fotoğrafi
307	970319		319	280498	
307	944454		319	291980	
302	847104		307	423977	
297	1450629		290	847576	
297	1011241		288	1685077	

Çizelge B.1 (devam) : S-N eğrilerinde kullanılan EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-500-14 KGDD numunelerinin kırıldıkları gerilme genliği (MPa) çevrim sayısı (N_f) ve kırık yüzey fotoğrafları.

EN-GJS-500-7			EN-GJS-500-14		
σ_a MPa	N_f	Kırık Yüzey Fotoğrafi	σ_a MPa	N_f	Kırık Yüzey Fotoğrafi
294	2511748		288	1412089	
294	4548388		287	722035	
289	2953420		286	862455	
289	2528861				
288	2267502				

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Merve Demirlek

Doğum Yeri ve Tarihi: İSTANBUL / 03.08.1987

Adres: Tantavi mah. Yenişsen sok. Ünverbey apt. No:14 D:9 Ümraniye/İSTANBUL

E-Posta: mdemirlek@itu.edu.tr

Lisans: Anadolu Üniversitesi – Malzeme Bilimi ve Mühendisliği (2006-2011)
Institute of Chemical Technology, Prague (09.2009 - 02.2010)

Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi – Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri Mühendisliği (2011-2013)

Mesleki Deneyim & Ödüller:

- Eczacıbaşı Vitra Karo - Staj (06.2010-07.2010)
- Eczacıbaşı Artema. - Staj (07.2009-08.2009)
- MDA İleri Teknoloji Seramikleri - Staj (01.2011-02.2011)

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