

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN AŞINMA
DAVRANIŞLARI

İ.G. YAKAR
DOKÜMANTASYON MÜHÜRÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Met. Müh. Özgür ÇELİK
(506981053)

104080
104080

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Haziran 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Haziran 2001

Tez Danışmanı : Prof.Dr. E.Sabri KAYALI
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Niyazi ERUSLU
Prof.Dr. Mehmet KOZ (M.Ü.)

HAZİRAN 2001

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında desteğini esirgemeyen ve her konuda bana yardımcı olan hocam sayın Prof.Dr.E.Sabri KAYALI'ya ve kıymetli değerlendirmeleriyle tezime katkılarda bulunan sayın Prof.Dr.Hüseyin ÇİMENÖĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin deneysel kısımlarında ve hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen Araş.Gör.Hayrettin AHLATCI'ya ve tezimin şekillendirilmesinde bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım mekanik metalurji laboratuvarında çalışan diğer tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca, yüksek öğrenim hayatım boyunca, gerek maddi gerekse manevi bakımdan desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 2001

Özgür ÇELİK

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. DÖKME DEMİRLER	3
2.1. Dökme Demir Metalurjisi	3
2.2. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması ve Mekanik Özellikleri	9
2.2.1. Gri Dökme Demirler	10
2.2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirler	14
2.2.3. Beyaz Dökme Demirler	15
2.2.4. Temper Dökme Demirler	16
2.2.5. Diğer Dökme Demirler	17
2.2.5.1. Çil Uygulanmış Dökme Demirler	17
2.2.5.2. Benekli (Mottled) Dökme Demirler	18
2.2.5.3. Yumru Grafitli Dökme Demirler	18
2.2.5.4. Yüksek Alaşımli Dökme Demirler	18
3. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER	21
3.1. Giriş	21
3.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Katılaşması	22
3.3. Küresel Grafitli Dökme Demirin Kimyasal Bileşiminin Kontrolü	25
3.3.1. Küreleştirici Elementler	26
3.3.1.1. Magnezyum	26
3.3.1.2. Kalsiyum	26
3.3.1.3. Nadir Toprak Elementleri	26
3.3.2. Alaşım Elementleri	27
3.3.2.1. Karbon	27
3.3.2.2. Silisyum	27
3.3.2.3. Manganez	28
3.3.2.4. Molibden	29
3.3.2.5. Nikel	29
3.3.2.6. Bakır	30
3.3.2.7. Kalay	30
3.3.2.8. Kalıntı Elementler	31
3.4. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Karakterizasyonu	33
3.4.1. Grafit Yapısı ve Dağılımının Özellikler Üzerindeki Etkisi	33
3.4.2. Mikroyapının Özellikler Üzerine Etkisi	36
3.5. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi	38

3.6. Küresel Grafitli Dökme Demir Spesifikasyonları	42
3.7. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri	44
3.8. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları	47
4. OSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER	49
4.1. Giriş	49
4.2. Ostemperleme Isıl İşlemi	49
4.3. Üretim Parametrelerinin Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir Karakteristiklerine Etkisi	56
4.3.1. Ostenitleme Koşullarının Etkisi	56
4.3.2. Ostemperleme Koşullarının Etkisi	57
4.3.3. Alaşım Elementlerinin Etkisi	63
4.4. Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir Spesifikasyonları	67
4.5. Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri	69
4.6. Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları	71
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	73
5.1. Çalışmanın Amacı	73
5.2. Deneysel Malzemeler	73
5.3. Ostenitleme ve Ostemperleme Isıl İşlemleri	73
5.4. Metalografik Çalışmalar ve Sertlik Ölçümleri	75
5.5. Aşınma Deneyleri	75
6. DENEYSEL SONUÇLAR	78
6.1. Mikroyapı Karakterizasyonu	78
6.2. Aşınma Deneyleri	83
6.2.1. Metal-Metal Aşınma Deneyleri	83
6.2.2. Metal-Abrasiv Aşınma Deneyleri	84
6.2.2.1. Oda Sıcaklığında Yapılan Metal-Abrasiv Aşınma Deneyleri	85
6.2.2.2. Yüksek Sıcaklıklarda Yapılan Metal-Abrasiv Aşınma Deneyleri	85
7. DENEYSEL SONUÇLARIN İRDELENMESİ	87
7.1. Mikroyapı ve Sertlik İncelemeleri	87
7.2. Aşınma Deneyleri	89
7.2.1. Metal-Metal Aşınma Deneyleri	89
7.2.2. Metal-Abrasiv Aşınma Deneyleri	94
7.2.2.1. Oda Sıcaklığında Yapılan Metal-Abrasiv Aşınma Deneyleri	94
7.2.2.2. Yüksek Sıcaklıklarda Yapılan Metal-Abrasiv Aşınma Deneyleri	95
8. GENEL SONUÇLAR	97
KAYNAKLAR	99

**EK-A. METAL-METAL ve METAL-ABRASİV AŞINMA DENEY
VERİLERİ ve GRAFİKLERİ**

103

ÖZGEÇMİŞ

115



KISALTMALAR

AFS	: American Foundrymen's Society
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BCIRA	: British Cast Iron Research Association
BHN	: Brinell Hardness Number
DIN	: Deutsches Institut für Normung
HRC	: Rockwell C Hardness
HV	: Vickers Hardness
INCO	: International Nickel Company
ISO	: International Organization for Standardization
JIS	: Japanese Industrial Standards
SAE	: The Society of Automotive Engineers
SIS	: Sweden Industrial Standards
VDG	: Verein Deutscher Giessereifachleute

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Alaşım elementlerinin küresel grafitli dökme demirlerin özellikleri ve yapıları üzerindeki etkileri.....	32
Tablo 3.2. Kalıntı elementlerin ve imrütelerin (< % 0.1) küresel grafitli dökme demire etkileri.....	34
Tablo 3.3. ISO, ASTM ve SAE standartlarına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	43
Tablo 3.4. Alman DIN 1693 standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	44
Tablo 4.1. ASTM A 897 ve A 897M'e göre sınıflandırılan ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri.....	68
Tablo 4.2. Japon (JIS), Alman (VDG) ve İsveç (SIS) standartlarına göre ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir sınıfları.....	69
Tablo 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal bileşim ve standartları.....	74
Tablo 6.1. İncelenen küresel grafitli dökme demir malzemelerin mikroyapısal özellikleri.....	82
Tablo 6.2. İncelenen küresel grafitli dökme demir malzemelerin metal-metal aşınma hızı ve rölatif aşınma dirençleri.....	84
Tablo 6.3. İncelenen küresel grafitli dökme demir malzemelerin oda sıcaklığında metal-abrasiv aşınma hızı ve rölatif aşınma dirençleri.....	85
Tablo 6.4. İncelenen küresel grafitli dökme demir malzemelerin 150 °C ve 250 °C metal-abrasiv aşınma hızları ve rölatif aşınma dirençleri.....	86
Tablo A.1. İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin metal-metal aşınmasında uğradıkları ağırlık kayıpları.....	104
Tablo A.2. İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin metal-metal aşınmasında uğradıkları yükseklik kayıpları.....	105
Tablo A.3. İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin oda sıcaklığında metal-abrasiv aşınmasında uğradıkları ağırlık kayıpları.....	106
Tablo A.4. İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin oda sıcaklığı, 150 ve 250 °C'lerdeki metal-abrasiv aşınmasında uğradıkları ağırlık kayıpları.....	106

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Yaygın olarak kullanılan ticari dökme demirlerin temel mikroyapıları ve bu mikroyapıları gözlemlemek için uygulanan prosesler.....	4
Şekil 2.2. Demir-karbon denge diyagramı.....	5
Şekil 2.3. Fe-Fe ₃ C-Si üçlü denge diyagramının % 2 silisyum oranında dikey kesiti.....	6
Şekil 2.4. Demir-karbon sisteminde çözünürlük eğrilerine ve denge sıcaklıklarına silisyum içeriğinin etkisi.....	8
Şekil 2.5. ASTM A 247'ye [6] göre dökme demirlerde tipik grafit şekilleri, I- Küresel grafit, II-hatalı biçimlenmiş küresel grafit, III- temper grafit, IV- yumru grafit, V- yengeç şekilli grafit, VI- düzensiz tipte küreler, VII- lamel grafit.....	10
Şekil 2.6. Gri dökme demirde grafit lamellerinin tipleri (AFS-ASTM)....	11
Şekil 2.7. Gri dökme demirlerde kesit kalınlığı, karbon eşdeğeri ve likidüs sıcaklığı ile mekanik özellikler arasındaki ilişki.....	12
Şekil 2.8. Çeşitli dökme demirlerin gerilme-uzama eğrilerine grafit morfolojisinin etkisi.....	14
Şekil 2.9. Yüksek alaşımlı özel küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması	19
Şekil 3.1. Dökme demirde değişik faz bölgelerinin sıcaklık aralıkları.....	23
Şekil 3.2. Bir grafit küresinin bir katı kabuk içerisinde izotermal büyümesi ve kabuğun düzgün bir ara yüzeyle büyümesi (a) ötektik altı faz katılaşması:eriyik ile temas halindeki kürenin büyümesi, (b) ötektik katılaşma: grafit kürelerinin kabuk ile çevrilmesi, (c) kürelerin katı kabuk içerisinde büyümesi.....	24
Şekil 3.3. Yüksek kalitede küresel grafitli dökme demir elde etmek için gerekli karbon ve silisyum oranları.....	28
Şekil 3.4. Alaşım elementlerinin perlit oluşumuna etkileri.....	31
Şekil 3.5. Küresel grafitli dökme demirlerde küreselliğin çekme ve akma mukavemeti ile değişimi.....	35
Şekil 3.6. Küresel grafitli dökme demirlerin üretim akış şeması.....	39
Şekil 3.7. Küresel grafitli dökme demirlerde aşılama üzerine sıcaklığın etkisi.....	41

Şekil 3.8.	Küresel grafitli dökme demirlerde farklı kesit boyutları için tavsiye edilen döküm sıcaklıkları.....	42
Şekil 3.9.	Değişik sınıflardaki küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri.....	46
Şekil 4.1.	İzotermal dönüşüm diyagramında ostemperleme ısı işlemi için işlem basamakları.....	50
Şekil 4.2.	Ostemperleme sırasında ostenitin katı hal dönüşümü.....	51
Şekil 4.3.	Alt ve üst beynit oluşum mekanizmaları.....	52
Şekil 4.4.	Ostemperlemenin I. ve II. aşamaları ile işlem aralığında meydana gelen mikroyapısal değişiklikler ve yüzde dönüşüm.....	54
Şekil 4.5.	Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin (a) akma ve çekme mukavemetine (b) darbe mukavemetine ostemperleme sıcaklığının etkisi.....	58
Şekil 4.6.	Ostemperleme süresinin mekanik özelliklere etkisi.....	59
Şekil 4.7.	Ostemperlenmiş küresel grafitli dökümlerde manganez'in (a) hücrelerarası faz çökmesine (b) martensit oluşumundan kaçınmak için gerekli ostemperleme zamanına etkisi.....	66
Şekil 5.1.	ASTM G99 standardına göre hazırlanan aşınma deney numunesi.....	76
Şekil 5.2.	(a) Metal-metal (b) metal-abrasiv aşınma deney düzeneğinin şematik olarak gösterilişi. (1) Dengeliyici ağırlık (2) yük (3) numune (4) aşındırıcı disk (5) iletici silindir (6) abrasiv bant (7) çelik destek plakası.....	76
Şekil 6.1.	(a) 1, (b) 2, (c) 3, ve (d) 4 numaralı küresel grafitli dökme demirlerin dağlanmamış durumdaki mikroyapıları (100x).....	78
Şekil 6.2.	1 numaralı küresel grafitli dökme demirin döküm halinde (a) 100x (b) 500x ve ostemperlenmiş durumda (c) 100 x (d) 500x mikroyapısı.....	79
Şekil 6.3.	2 numaralı küresel grafitli dökme demirin döküm halinde (a) 100x (b) 500x ve ostemperlenmiş durumda (c) 100 x (d) 500x mikroyapısı.....	80
Şekil 6.4.	3 numaralı küresel grafitli dökme demirin döküm halinde (a) 100x (b) 500x ve ostemperlenmiş durumda (c) 100x (d) 500x mikroyapısı.....	81
Şekil 6.5.	4 numaralı küresel grafitli dökme demirin ostemperlenmiş durumda (a)100x (b) 500x mikroyapısı.....	81
Şekil 6.6.	İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin metal-metal aşınması sırasında meydana gelen yanıl taşmalar.....	84
Şekil 7.1.	İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin metal-metal aşınmasında (a) ağırlık kaybına ve (b) yükseklik kaybına göre belirlenen rolatif aşınma dirençlerine nemin etkisi.....	90

Şekil 7.2.	İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin metal-metal aşınmasında (a) ağırlık kaybına ve (b) yükseklik kaybına göre belirlenen rolatif aşınma dirençlerine sertliğin etkisi.....	92
Şekil 7.3.	İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin metal-metal aşınmasında (a) ağırlık kaybına ve (b) yükseklik kaybına göre belirlenen rolatif aşınma dirençlerine grafit hacim oranının etkisi.....	93
Şekil 7.4.	Metal-abrasiv deneylerinde incelenen küresel grafitli dökme demirlerin ağırlık kaybına göre belirlenen rolatif aşınma dirençlerine sertliğin etkisi.....	94
Şekil 7.5.	150 ve 250 °C sıcaklıklarında yapılan metal-abrasiv aşınma deneylerinde incelenen küresel grafitli dökme demirlerin ağırlık kaybına göre belirlenen rölatif aşınma dirençlerinin oda sıcaklığında ölçülen sertliklere bağlı olarak değişimi	95
Şekil 7.6.	Sıcaklığın, (a) döküm halinde ve (b) ostemperlenmiş durumda incelenen küresel grafitli dökme demirlerin metal-abrasiv aşınma direncine etkisi.	96
Şekil A.1.	1 numaralı malzemenin (a) ağırlık kaybı ve (b) yükseklik kaybı cinsinden metal-metal aşınma davranışı.....	107
Şekil A.2.	2 numaralı malzemenin (a) ağırlık kaybı ve (b) yükseklik kaybı cinsinden metal-metal aşınma davranışı.....	108
Şekil A.3.	3 numaralı malzemenin (a) ağırlık kaybı ve (b) yükseklik kaybı cinsinden metal-metal aşınma davranışı.....	109
Şekil A.4.	4 numaralı malzemenin (a) ağırlık kaybı ve (b) yükseklik kaybı cinsinden metal-metal aşınma davranışı.....	110
Şekil A.5.	1 numaralı malzemenin ağırlık kaybı cinsinden metal-abrasiv aşınma davranışı.....	111
Şekil A.6.	2 numaralı malzemenin ağırlık kaybı cinsinden metal-abrasiv aşınma davranışı.....	111
Şekil A.7.	3 numaralı malzemenin ağırlık kaybı cinsinden metal-abrasiv aşınma davranışı.....	112
Şekil A.8.	4 numaralı malzemenin ağırlık kaybı cinsinden metal-abrasiv aşınma davranışı.....	112
Şekil A.9.	1 numaralı malzemenin sıcaklığa bağlı olarak ağırlık kaybı cinsinden metal-abrasiv aşınma davranışı.....	113
Şekil A.10.	2 numaralı malzemenin sıcaklığa bağlı olarak ağırlık kaybı cinsinden metal-abrasiv aşınma davranışı.....	113
Şekil A.11.	3 numaralı malzemenin sıcaklığa bağlı olarak ağırlık kaybı cinsinden metal-abrasiv aşınma davranışı.....	114
Şekil A.12.	4 numaralı malzemenin sıcaklığa bağlı olarak ağırlık kaybı cinsinden metal-abrasiv aşınma davranışı.	114

SEMBOL LİSTESİ

α	: Ferrit
γ	: Ostenit
γ_{yk}	: Yüksek karbonlu ostenit
Fe_3C	: Sementit
M_S	: Martensit dönüşümünün başladığı sıcaklık
M_F	: Martensit dönüşümünün bittiği sıcaklık
T_A	: Ostemperleme sıcaklığı



KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN AŞINMA DAVRANIŞLARI

ÖZET

Küresel grafitli dökme demirler, çeliğin mekanik özelliklerine ve dökme demirin üretim özelliklerine sahip yeni bir dökme demir grubu olarak tanımlanmıştır. Yalnızca 1940'ların sonlarından itibaren tanınmasına rağmen küresel grafitli dökme demirler, yüksek mukavemet ve tokluk ile mükemmel dökülebilirliklerinin yanı sıra yüksek korozyon ve aşınma direnci, düşük üretim maliyeti, yüksek işlenebilirlik ve sönümleme kabiliyetleri nedeniyle kullanım alanlarını her geçen gün biraz daha genişletmişlerdir. Günümüzde, küresel grafitli dökme demirler, özellikle otomotiv endüstrisinde krank milleri, vites dişlileri, egsoz sistemleri ve motor bağlantı çubukları gibi birçok parçada başarıyla kullanılmaktadırlar.

Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini arttırmak amacıyla yapılan çalışmalarda, ostemperleme ısı işlemi ile, küresel grafitli dökme demirlere beynitik bir mikroyapı kazandırılmış ve küresel grafitli dökme demirlere göre çok daha yüksek mukavemet, süneklik ve tokluk ile birlikte daha üstün aşınma ve yorulma direnci gösteren ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler elde edilmiştir. Yüksek mekanik özelliklerinden dolayı ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler, başta otomotiv dişlileri olmak üzere, iş makinelerinin kepçe ve paletleri, trenlerin krank milleri ve fren pabuçları, soğutma kompresörleri ve petrol ekipmanları gibi birçok uygulamada kullanılmaktadırlar.

Bu çalışmada, ferritik-perlitik mikroyapıya sahip döküm halindeki ve beynitik mikroyapıya sahip ostemperlenmiş durumdaki küresel grafitli dökme demirlerin metal-abrasiv ve metal-metal aşınma davranışları incelenmiştir. Oda sıcaklığında yapılan metal-metal aşınma deneyleri, M2 kalite takım çeliği üzerinde, oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklarda (150 ve 250 °C) yapılan metal-abrasiv aşınma deneyleri ise 125 µm boyutundaki Al₂O₃ abrasiv bantlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Metal-metal aşınma deneyleri, ortamın nem miktarının artmasıyla aşınma dirençlerinin arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, küresel grafitli dökme demirlerin sertlik ve grafit hacim oranlarının da metal-metal aşınmasında etkili birer parametre oldukları, en üstün aşınma direncinin sertlik ve grafit hacim oranının en yüksek olduğu şartlarda elde edildiği belirlenmiştir. Metal-abrasiv aşınma deneylerinde ise, küresel grafitli dökme demirlerin sertliklerinin artmasıyla aşınma direncinin de arttığı bulunmuştur. Yüksek sıcaklıklarda yapılan metal-abrasiv aşınma deneylerinde genel olarak metal-abrasiv aşınma direnci, sertliğin artmasıyla artarken, deney sıcaklığının artmasıyla düşmektedir. Döküm halinde incelenen küresel grafitli dökme demirlerin metal-abrasiv aşınma davranışlarına sıcaklığın etkisinin çok belirgin olmamasına karşın, ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde sıcaklığın artması ile aşınma direnci belirgin bir şekilde düşmüştür.

WEAR BEHAVIOURS OF DUCTILE IRONS

SUMMARY

Ductile irons are a relatively new group of cast irons, which combine the mechanical properties of steel with the fabrication properties of cast irons. Although ductile irons have been known since the late 1940's, besides having high strength, toughness and castability, their high corrosion and wear resistance, low cost, high machinability and damping characteristics are continuously increasing their applications. Today ductile irons are successfully used in the automotive industry as crankshafts, gears, exhaust systems and engine connecting rods.

In studies aimed on increasing the mechanical properties of ductile iron, the bainitic microstructure formed in the ductile irons by austempering heat treatment has increased their wear and fatigue resistance along with their high strength, ductility and toughness. Due to their superior mechanical properties austempered ductile irons are used especially in automotive gears, construction machines and equipment, train parts as crankshafts and disc brake calipers, compressors and oilfield equipment.

In this study, metal-abrasive and metal-metal wear behaviour of ferritic-pearlitic as-cast and bainitic austempered ductile irons were investigated. Metal-metal wear tests were performed at ambient temperatures against a M2 quality tool steel disc without lubricant. Metal-abrasive wear tests were conducted on 125 μ m Al₂O₃ abrasive bands at ambient and high temperatures (150 and 250 °C). The metal-metal wear tests revealed that the wear resistance increased with increasing humidity. However, the hardness and graphite volume fractions were also found to have a strong influence on the wear resistance, with the highest wear resistance being obtained highest hardness and graphite volume fraction. On the other hand, metal-abrasive wear tests revealed that the wear resistance increased with increasing hardness. At high temperatures, abrasive wear resistance increased with increasing hardness and decreased with increasing temperature. The effect of temperature on the wear resistance of ductile iron was negligible at as-cast conditions, while was noticeable at austempered conditions which wear resistance decreased significantly with increasing temperature.

1. GİRİŞ

Dökme demirler, mukavemet, sertlik, işlenebilirlik, aşınma direnci ve korozyon direnci gibi iyi mekanik özellikler göstermelerinin yanısıra kolay üretilebilir ve ekonomik olmalarından dolayı yaygın olarak kullanılan mühendislik malzemeleridir.

Dökme demir üretimindeki ilk gelişme aşılama işleminde başarıya ulaşılarak gri dökme demirlerin üretilmesi olmuştur. Daha sonra magnezyum ve seryum ilavesi işlemlerinin uygulanması ile gri dökme demirlere nazaran iki kat daha mukavemetli olan küresel grafitli dökme demirlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Gri dökme demirlere göre mukavemetin iki kat arttırılabilmesi, grafitin küreselleştirilebilmesi ile mümkün olmuştur. Günümüzde, küresel grafitli dökme demirler özellikle otomotiv endüstrisinde başarıyla kullanılmaktadırlar. Dökme demir teknolojisinin gelişmesine paralel olarak, küresel grafitli dökme demirin mekanik özelliklerini daha da geliştirmenin yolları aranmıştır. Ancak, yapılan çalışmalarda, grafitte küreselden başka bir morfoloji kazandırmanın imkansız olduğunun anlaşılması, araştırmacıları mekanik özellikleri, matriksin modifikasyonu yoluyla geliştirmek için çalışmaya itmiştir.

Bu çalışmalara bağlı olarak, ostemperleme ısıl işleminin uygulanmasıyla küresel grafitli dökme demire beynitik bir mikroyapı kazandırılarak “Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler” geliştirilmiştir. Aynı tokluğa sahip standart küresel grafitli dökme demir malzemeye göre iki kat daha fazla mukavemet göstermesi, çok iyi darbe, yorulma ve aşınma özelliklerine sahip olması ve bunların ötesinde birçok teknik ve ticari avantajlar taşıması ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin daha önce düşünülmeyen alanlarda bile kullanılmasını gündeme getirmiştir. Özellikle otomotiv endüstrisinde dövme ve yüzeyi sertleştirilmiş çeliğe alternatif dişli malzemesi olarak kullanılabilme imkanının görülmesi dünya çapında büyük ilgi uyandırmıştır. Amerika Birleşik Devletleri, Finlandiya ve Çin’de ticari olarak üretilip kullanılmaya başlaması ise bu malzemeye duyulan ilgiyi had safhaya ulaştırmıştır.

Günümüzde ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler, otomotiv dişlileri, hidrolik valf gövdeleri, egzoz sistemleri, iş makineleri ve petrol ekipmanları gibi pek çok endüstriyel parçalarda giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, dört farklı kalitedeki küresel grafitli dökme demirin metal-metal ve metal-abrasiv aşınma davranışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında ilk olarak, döküm halindeki GGG 40 ve GGG 50 kalite küresel grafitli dökme demir numunelere ostemperleme ısı işlemini uygulanmıştır. Yaygın olarak kullanılan ostemperleme prosesine maruz kalan küresel grafitli dökme demirler, 900 °C'de 120 dakika süre ile ostenitlendikten sonra, 340 °C'de 60 dakika ostemperlenmiştir. Daha sonra, aşınma davranışlarının belirlenmesi amacıyla GGG 40 ve GGG 50 kalite ve döküm halinde ve ostemperlenmiş durumda hazır olarak temin edilen ASTM A 536-84 standardına göre 100/70/03 ve ostemperlenmiş olarak temin edilen ASTM A 897-90 standardına göre 200/155/1 kalite küresel grafitli dökme demirler metal-metal ve metal-abrasiv aşınma deneylerine tabi tutulmuşlardır. Metal-metal aşınma deneyleri, oda sıcaklığında M2 kalite takım çeliğinden imal edilmiş bir disk üzerinde, metal-abrasiv aşınma deneyleri ise oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklarda (150 ve 250 °C) 120 mesh (120 µm) Al₂O₃ bantlar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

2. DÖKME DEMİRLER

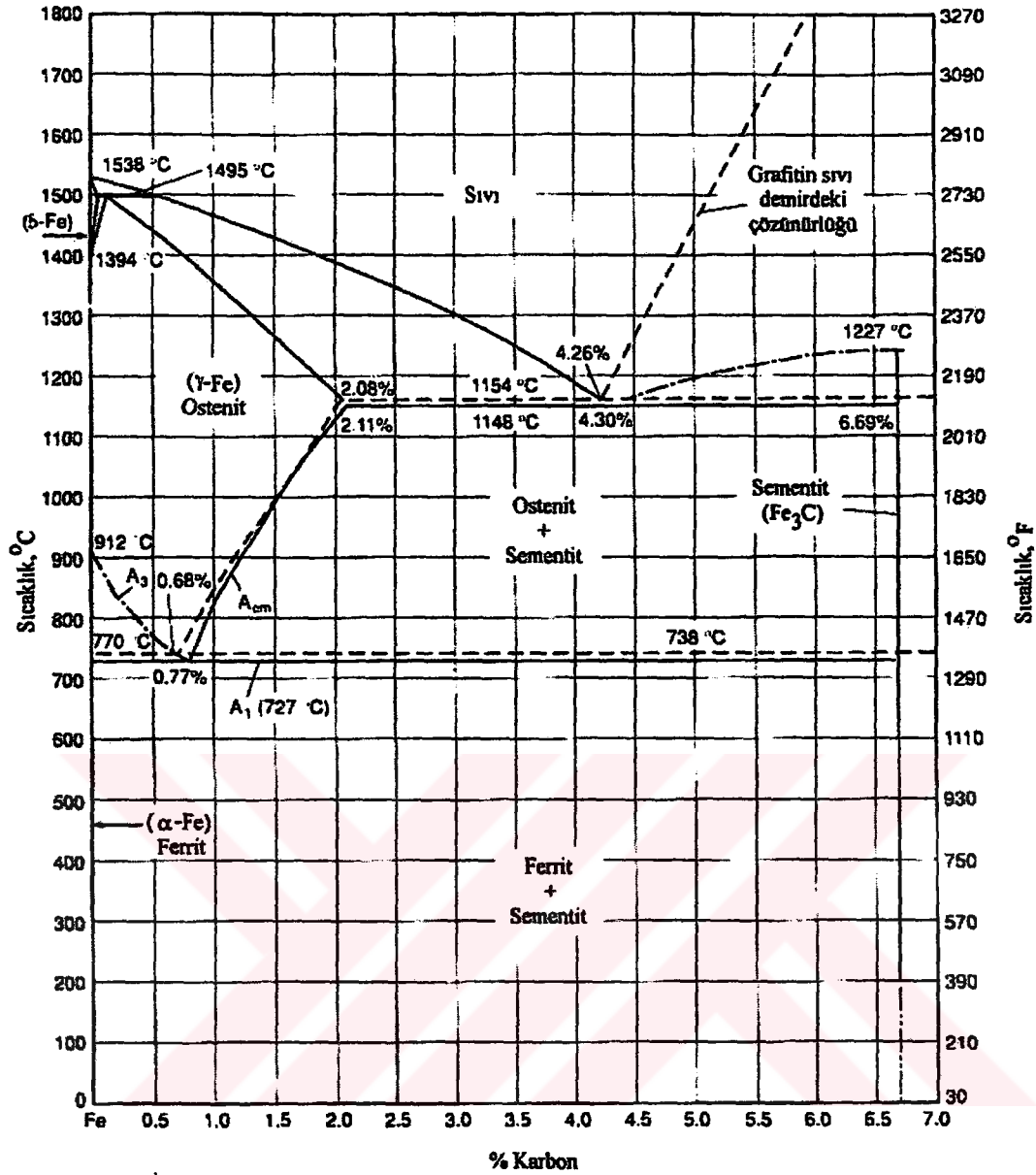
2.1. Dökme Demir Metalurjisi

Döküm endüstrisinde en yüksek tonaja sahip ürün olan dökme demirler, demir alaşımlarının geniş bir ailesini temsil etmektedirler. Dökme demirler, bir ötektik ile katılan çok bileşenli demir alaşımlarıdır. Karbon içerikleri % 2 ile % 6,67 arasında değişen demir-karbon alaşımları olmalarına rağmen, yüksek karbon içeriğinin dökme demirleri gevrekletirmesi nedeniyle, ticari olarak üretilen dökme demirlerde karbon miktarı % 2-4 arasındadır. Dökme demirler ayrıca ana alaşım elementi olarak % 1-3,5 arasında silisyum içermektedirler. Dökme demirler yapılarında, ana alaşım elementlerinin (demir, karbon, silisyum) yanı sıra, genellikle % 0,1'den daha yüksek oranlarda varolan alaşım elementlerini (nikel, krom, molibden, manganez, bakır gibi) ve çok küçük oranlarda bulunan (< %0,1) eser elementleri (kükürt, fosfor, kalay, titanyum gibi) de ihtiva etmektedirler [1,2]. Silisyum ve diğer alaşım elementleri, ostenit (γ) içerisindeki karbon çözünürlüğünü önemli ölçüde değiştirebileceği için, bazı özel durumlarda bir ötektik reaksiyon ile katılaşabilen % 2'den daha az karbon içeren alaşımlar da dökme demirler ailesine dahil edilmektedir [1,3,4].

Başta bileşim olmak üzere soğuma hızı ve ergitme işlemlerine bağlı olarak dökme demir termodinamik olarak yarı kararlı Fe-Fe₃C (demir-demir karbür) veya kararlı Fe-C (demir-grafit) sistemine göre katılaşır. Yarı kararlı sisteme göre katılaşma meydana geldiğinde ötektikteki zengin karbon fazı karbür; kararlı katılaşma yolu izlendiğinde ise karbonca zengin faz grafitir. Kararlı veya yarı kararlı ötektiğin oluşumu sıvının çekirdekleşme potansiyelini, kimyasal bileşimi ve soğuma hızını içeren çeşitli faktörlerin bir fonksiyonudur. Yapıda bulunan silisyum, fosfor, bakır ve nikel katılaşmayı yavaşlatarak kararlı sistem oluşumuna yardımcı olurlarken, manganez, krom ve diğer karbür oluşturu elementler ince kesitlerde katılaşmayı hızlandırır ve yarı kararlı sistemin oluşumuna katkıda bulunurlar [1,2,5]. Kimyasal

[illegible]

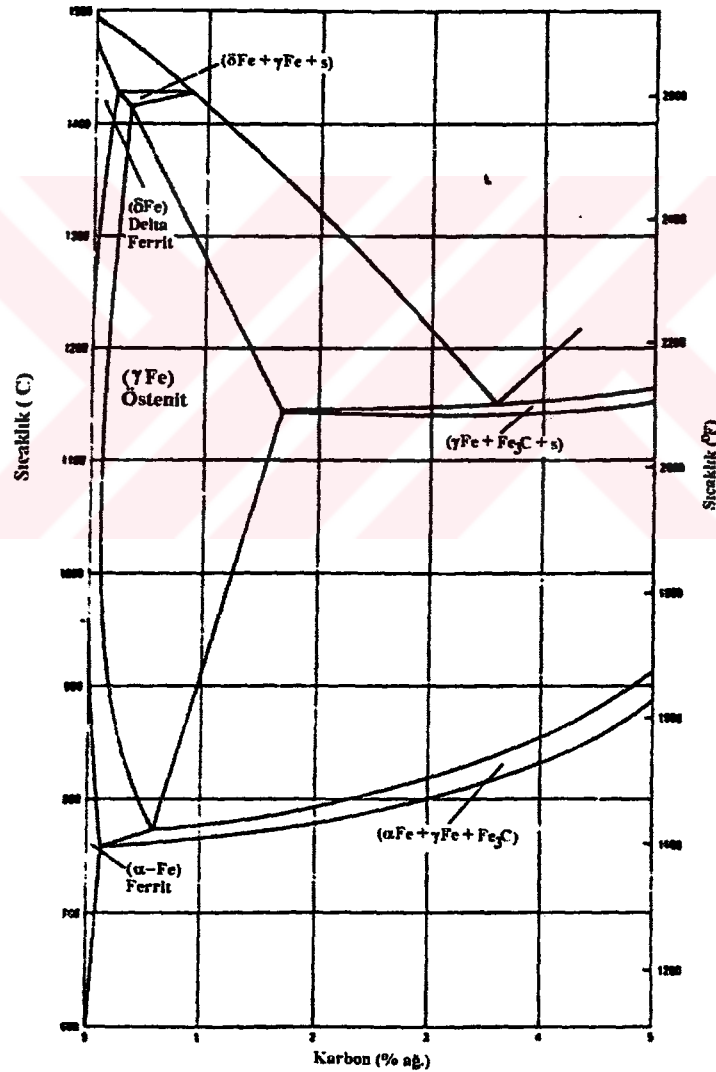
İki temel tip ötektik olan kararlı ostenit-grafit ve yarı kararlı ostenit-demir karbür mukavemet, sertlik ve sünelik gibi mekanik özellikler açısından oldukça geniş farklılıklara sahiptirler. Bununla birlikte dökme demirlerdeki metalurjik prosesin temel amacı, ötektiğin tipini, miktarını ve morfolojisini arzulanan mekanik özellikleri elde etmek için ayarlamaktır [1].



Şekil 2.2. Demir-karbon denge diyagramı [2].

Dökme demirlerin metalurjisi çeliğinki ile birçok benzerlik göstermesine rağmen, dökme demirler ile çalışan metalurjistler için farklılıklar oldukça önemlidir. Yaygın olarak kullanılan çelik sınıflarında bulunan alaşım elementleri miktarı nispeten düşük olduğundan bu çelikler temel olarak ikili demir-karbon alaşımları olarak kabul edilirler. Bu nedenle demir-karbon diyagramı (Şekil 2.2), yavaş soğuma veya denge dönüşüm şartları altında bu çeliklerin yapılarını açıklamak amacıyla kullanılabilir. Bununla birlikte, dökme demirler yüksek karbon içeriğine ilave olarak önemli miktarlarda silisyum içerirler. Dökme demirler bu nedenle Fe-C-Si üçlü alaşımları olarak kabul edilirler (Şekil 2.3). Silisyumun dökme demire ilavesi demir-karbon

denge diyagramını değiştirmektedir. Silisyumun etkisi, Fe-C-Si üçlü sisteminden alınan dikey kesitler yardımıyla daha iyi gösterilebilir. Özellikle Şekil 2.3'de gösterildiği gibi % 2 silisyum (yaklaşık olarak çoğu dökme demirin silisyum içeriğidir) için Fe-C-Si üçlü diyagramından alınan dikey kesit dökme demirin metalurjisini tartışmak için iyi bir referanstır. Şekil 2.3'deki Fe-Fe₃C-Si üçlü denge diyagramı Fe-Fe₃C diyagramına (Şekil 2.2) benzemesine rağmen üçlü sistemlerin önemli özelliklerini yansıtmaktadır. Ötektik ve ötektoid sıcaklıklar, Fe-Fe₃C diyagramında sabit bir değere sahipken, Fe-Fe₃C-Si üçlü sisteminde ötektik ve ötektoid sıcaklık aralıkları mevcuttur. Ayrıca üçlü sistemde, ötektik ve ötektoid noktalar daha düşük karbon oranlarına taşınmaktadır [1,2].



Şekil 2.3. Fe-Fe₃C-Si üçlü denge diyagramının %2 silisyum oranında dikey kesiti [1]

Demir ve demir karbür (sementit) arasındaki yarı kararlı denge Şekil 2.3’de görülmektedir. Demirdeki katı çözeltide (gerek ferrit gerekse ostenitte) bulunan silisyum, yalnızca soğuma sırasında karbür oluşumunun kinetiğini ve şartlarını etkiler. Karbür fazının bileşimine ise herhangi bir etkide bulunmaz. Bir miktar silisyum karbür boyunca çökmesine rağmen farklı bir faz olarak ayırt edilemez. Belirli bileşimlerdeki katılaşma ise, yarı kararlı sistem yerine karbonca zengin faz olarak grafitin olduğu kararlı sistemde meydana gelir. Kararlı katılaşmanın olduğu bu bileşimler gri, küresel grafitli ve yumru grafitli dökme demirlerde görülür [1].

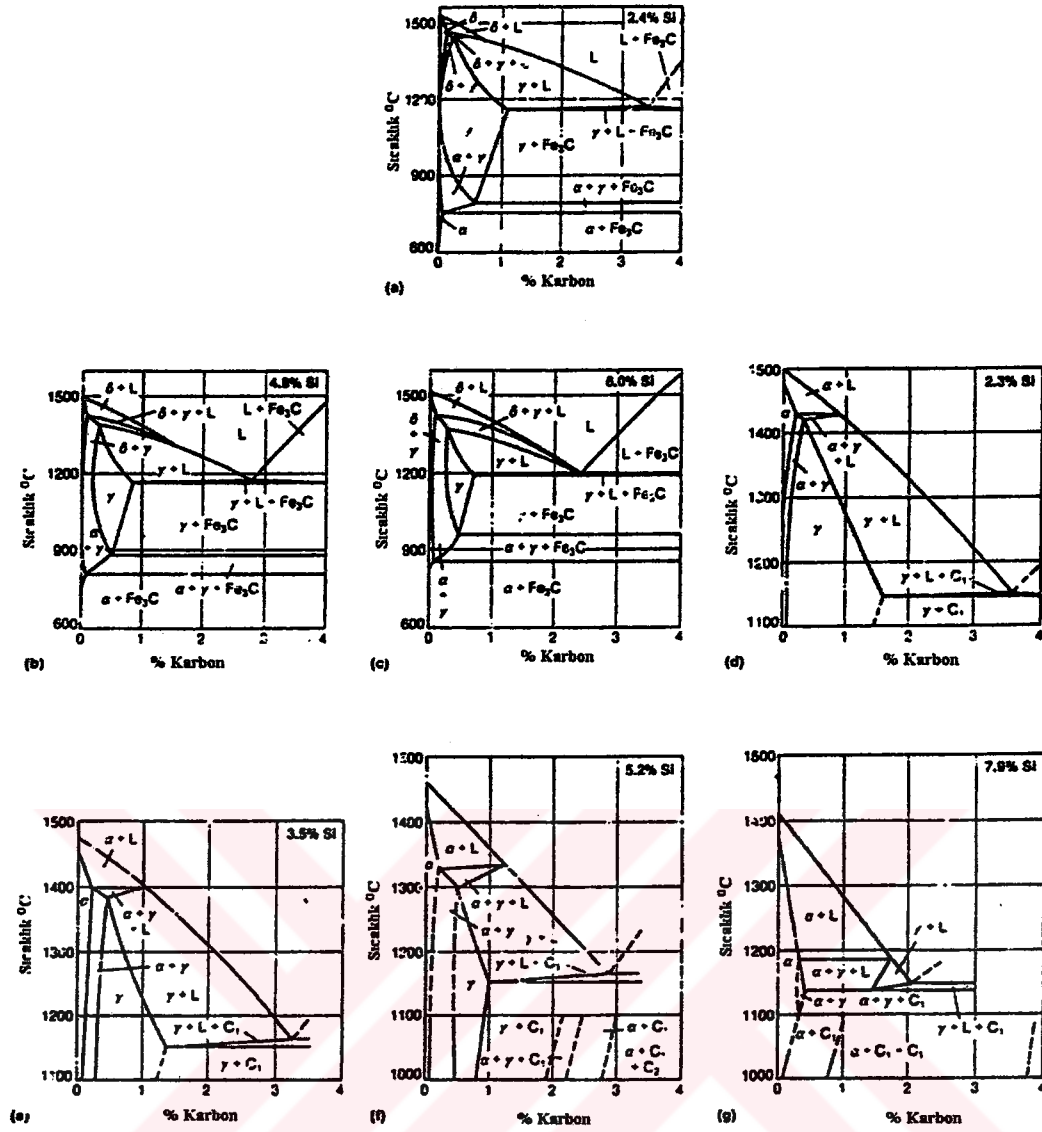
Faz değişikliklerinin izini saptamak ve üçlü diyagramın % 2 silisyumda kullanımını kanıtlamak için bütün koşullarda alaşımın her bölümünde silisyum konsantrasyonunun % 2 olarak kaldığı farzedilmektedir. Ancak bu doğru değildir; silisyumun dökme demirde belirgin derecede segregasyon olduğuna dair küçük bir kanıt vardır. Bu nedenle üçlü diyagram boyunca sadece sabit silisyum bölümünün kullanılması yanlıştır. Aynı zamanda Fe-Fe₃C diyagramı da kullanılmalıdır.

Sonuç olarak, silisyumun bir ikili demir-karbon alaşımına ilavesi, yarı kararlı durumda bulunan Fe₃C’nin kararlılığını düşürerek ferritin (α) kararlılığını artırır (ferrit alanı genişletilerek ostenit alanı daraltılır). Şekil 2.4’den de rahatça görülebileceği gibi Fe-C-Si sisteminde silisyum içeriği artarken, ötektik ve ötektoid karbon içerikleri düşmekte, ötektik ve ötektoid sıcaklıklar artmaktadır [1,2].

Dökme demir yapısında bulunan karbon, silisyum, fosfor gibi alaşım elementlerinin bileşimlerindeki değişiklik, sıvılaşma ve katılaşma sıcaklığı ve ötektik bileşim gibi parametreleri, dolayısıyla mekanik özellikleri etkiler. Bu etkinin derecesi “Karbon Eşdeğeri (C_{es})” parametresi ile hesaplanır [3].

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

Bir dökme demirin karbon eşdeğeri, verilen bir bileşimin ötektik bileşime ne kadar yakın olduğunu tanımlar. Karbon eşdeğeri % 4.3 olan bir dökme demirde ötektik yapıya rastlanır. Karbon eşdeğerinin % 4.3’ten küçük veya büyük olmasına göre ise, dökme demir sırası ile ötektik altı yada ötektik üstü yapı gösterir [1].



Şekil 2.4. Demir-karbon sisteminde çözünürlük eğrilerine ve denge sıcaklıklarına silisyum içeriğinin etkisi [1].

Karbon eşdeğeri dökme demirler için gerek yapı ve gerekse malzeme özelliklerini tasvir edebilen, oldukça önemli bir kriterdir. Karbon eşdeğerine bağlı olarak alaşımın toplam karbon ve silisyum içeriği, alaşımın katılaşma aralığını tanımlaması yanında aynı zamanda döküm karakteristikleri ve özellikleri ile de ilgilidir. Bununla birlikte, sabit karbon eşdeğerine sahip fakat farklı karbon ve silisyum oranları içeren dökme demirler bulunabilmektedir. Bu tip dökme demirler aynı döküm özelliklerine sahip olmamaktadırlar. Örneğin, karbon katılaşma sırasında meydana gelen çekilmeyi önlemede, karbon eşdeğeri ile belirtilene nazaran iki kat daha fazla etkilidir. Silisyum ise ince kesitlerin sertleşmesini önlemede oldukça etkilidir. Kullanım özelliklerinin

bazılarında benzer farklılıklar görülmesine rağmen bunlar spesifikasyonlarda karbon eşdeğeri ile sınırlandırılır [1].

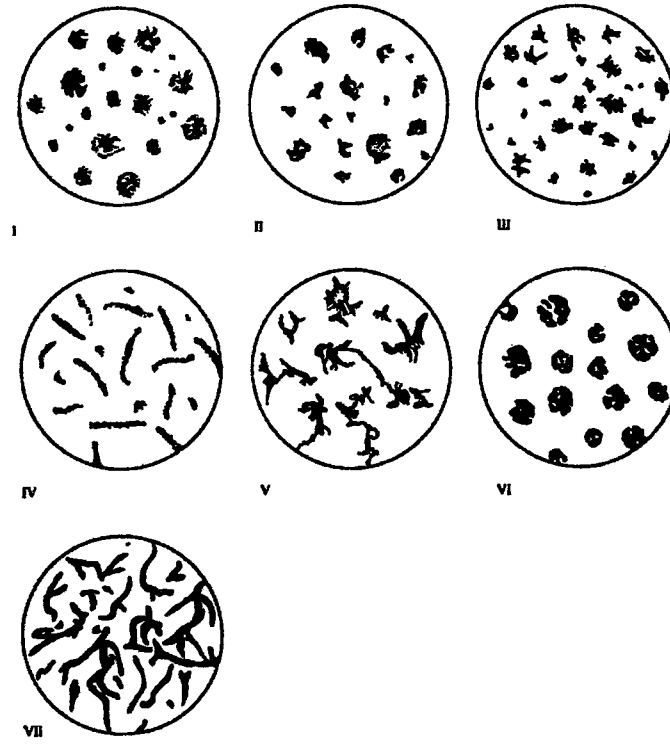
2.2. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması ve Mekanik Özellikleri

Dökme demirler hem iyi bir mühendislik malzemesi, hem de ucuz olmalarından dolayı oldukça ihtiyaç duyulan malzeme gruplarının başında gelmektedir. Dökme demirlerin sünekliklerinin düşük olmasından dolayı mekanik işlemlerle şekillendirilmeleri oldukça zordur. Ancak, kolayca ergitilebilirler ve karmaşık şekillerdeki son boyutlarda rahatlıkla dökülebiller [2]. Dökme demirlerde, karbon ve silisyum oranları arasındaki denge değiştirilerek, çeşitli metalik ve metalik olmayan elementler ile alaşımlandırma yapılarak, ergitme, döküm ve ısıtma işlem uygulamaları değiştirilerek; mukavemet, sertlik, işlenebilirlik, aşınma ve korozyon direnci özellikleri arzulanan değerlere çekilebilir [3]. Dökme demirler, kimyasal bileşim, üretim sırasındaki soğuma hızı, uygulanan sıvı işlemi ve ısıtma işlemin farklılık göstermesine bağlı olarak çeşitli sınıflara ayrılırlar.

Dökme demirlerin tarihsel bakımdan ilk sınıflandırması hasara uğrama şekillerine göre yapılmıştır. Buna göre iki tip dökme demir dikkati çekmektedir [1]:

- 1- Beyaz Dökme Demir:** Kırılma, demir karbür tabakaları boyunca oluştuğu için beyaz kristalin bir kırılma yüzeyi gösterir. Bu yapı, yarı kararlı katılaşmanın (Fe_3C ötekiği) bir sonucudur [1].
- 2- Gri Dökme Demir:** Kırılma, grafit tabakaları boyunca meydana gelir ve kararlı katılaşmanın (grafit ötekiği) bir sonucudur. Bu yüzden gri bir kırılma yüzeyi gösterir [1].

Metalografi ve dökme demirler hakkındaki temel bilgilerin gelişmesi ile birlikte özellikle mikroyapısal özelliklere dayanan başka sınıflandırmaların yapılması da mümkün olmuştur. Bu sınıflandırmalardan en önemlileri grafit şekline ve matris yapısına göre yapılanlardır [1,3]. Dökme demirlerde grafit şekli mekanik özellikleri etkileyen en önemli parametredir. Dökme demirler Şekil 2.5'den görüldüğü gibi grafitlerin yapıda bulunuş şekline göre, lamel, küresel, yumru (vermicular) ve temper grafitli olmak üzere dört gruba ayrılabilir [1].



Şekil 2.5. ASTM A 247'ye [6] göre dökme demirlerde tipik grafit şekilleri, I- Küresel grafit, II- hatalı biçimlenmiş küresel grafit, III- temper grafit, IV- yumru grafit, V- yengeç şekilli grafit, VI- düzensiz tipte küreler, VII- lamel grafit [1].

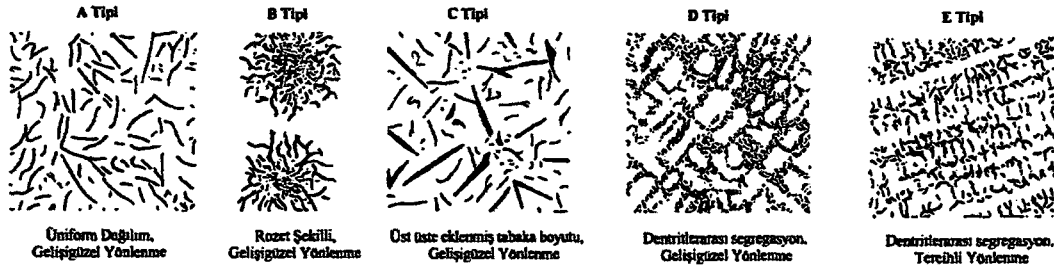
Dökme demirler günümüzde en yaygın olarak, endüstride en çok kullanılan dökme demir çeşitleri olan gri dökme demir, küresel grafitli dökme demir, beyaz dökme demir ve temper dökme demir olmak üzere dört ana grup şeklinde sınıflandırılmaktadır.

2.2.1. Gri Dökme Demirler

Gri dökme demirler uygulamada en yaygın kullanılan demir döküm alaşımlarından birisidir. Gri dökme demirler, ötektik sıcaklığında ostenitin katı eriyik olarak içerebileceğinden daha fazla karbonu olan demir-karbon-silisyum alaşımlarıdır. Bileşimdeki bu fazla karbon yapıda grafit lamelleri halinde çökmüştür [7]. Gri dökme demirler genellikle % 1.7-4.5 C, % 1-3 Si ve arzulanan mikroyapıya bağlı olarak değişen oranlarda manganez (ferritik dökme demirlerde % 0.1'e kadar düşük, perlitik dökme demirlerde ise % 1.2'ye kadar yüksek olabilir) içerirler. Genellikle ötektik üstü demirlerdir [1]. Gri dökme demirlerin mekanik özellikleri doğrudan döküm yapısına ve grafit morfolojisine bağlıdır. Grafit-ferrit karışımı bir mikroyapı,

en düşük mukavemetli dökme demiri verirken karbon miktarının artmasına bağlı olarak mukavemet ve sertlikte de artma görülür [3].

Gri dökme demirlerde grafitin şekli ve yapısı alaşımın mekanik özellikleri üzerinde oldukça önemli bir rol oynamaktadır [1,3]. Gri dökme demirlerde, grafit lamellerinin şekil, boyut ve dağılımı katılaşma esnasında oluşur ve daha sonra herhangi bir işlem ile değiştirilemez. Grafit tip ve boyutları arasındaki farklılıklar incelenmiş, ASTM ve AFS tarafından kabul edilen standartlarla belirlenmiştir (Şekil 2.6) [7].



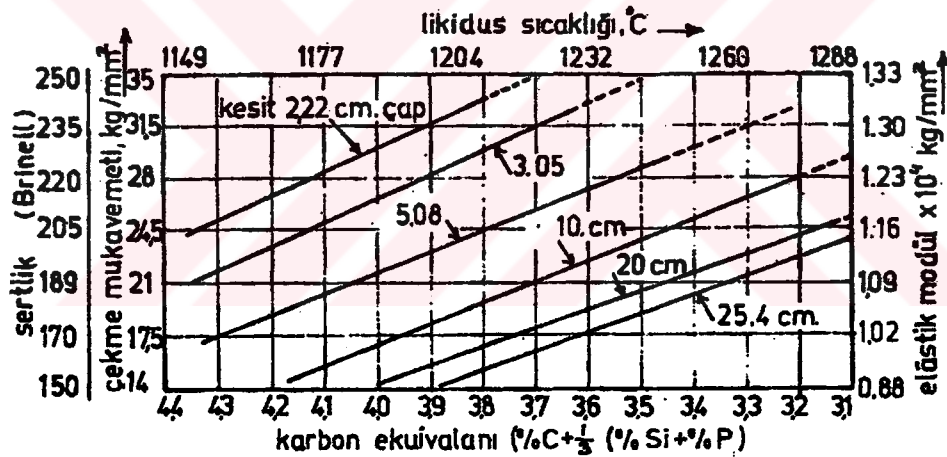
Şekil 2.6. Gri dökme demirde grafit lamellerinin tipleri (AFS-ASTM) [2].

A tipi grafitler, orta hızlarda soğuyan aşılınmış dökme demirlerde bulunur ve gri dökme demirlerde genel olarak gelişigüzel yönlendirilmiş ve üniform dağılmış bu tip lameller tercih edilir. Ergitme ve aşılama uygun yapıldığında istenen boyutta A tipi grafitlerin elde edilmesi mümkündür. B tipi grafitler ötektik bileşime yakın dökme demirlerde düşük soğuma hızlarında görülür ve sınırlı sayıdaki çekirdek üzerinde katılaşır. Bu tip grafitler daha ziyade ferritik matriks içerisinde oluşan rozet grupları şeklinde ve gelişigüzel yönlendirilmiştir; yüksek mukavemet için iyi değildir. C tipinde grafitler ise ötektik üstü demirlerde minimum soğuma hızlı bir katılaşmanın sonucu olarak oluşur. Bu tip grafitler, termal şoka dayanıklıdır, ancak düşük mukavemet ve işlendikten sonra kaba bir yüzey verir. D tipi grafitler daha çok yüksek silisyum içeren ve yüksek soğuma hızlarında katılaşan ötektik altı veya ötektik dökme demirlerde görülür. İyi işlenebilme özelliği vermesine karşılık, düşük mukavemet ve düşük aşınma direncine neden olurlar. E tipi grafitlere ise daha çok karbon oranı düşük ötektik altı dökme demirlerde rastlanır; bu durumda grafitler tercihli yönlendirme gösterir. D ve E tipi grafitler katılaşma sırasındaki yüksek soğuma hızlarıyla ilişkilidir. Daha fazla bir aşırı soğuma ise çekirdekleşme ve grafitleşmeyi önleyebilir ve bu durumda beyaz dökme demir oluşur. Dolayısıyla bütün mikroyapılar ve grafit

tipleri herhangi bir dökme demirde oluşabilir; bu, dökme demirin katılaşma esnasındaki soğuma hızına ve/veya sonradan gördüğü işlemlere bağlıdır. Grafit tipinin yanı sıra, grafit boyutu da mekanik özellikler açısından önemlidir. Çünkü grafit boyutu direk olarak mukavemet ile ilişkili bir parametredir. Lamel grafit boyutunun artması ile gri dökme demirin çekme mukavemeti düşer [1,2,5,7].

Gri dökme demirler, mikroyapıya hassas bir malzeme grubudur. Mikroyapı, kimyasal bileşim ve mekanik özellikler birbirine sıkı bir şekilde bağlıdır. Bununla birlikte kimyasal bileşim, mikroyapı ve soğuma hızını etkileyen üretim koşulları ile ilgili faktörler de gri dökme demir özelliklerini değiştirebilir [1].

Mekanik özellikleri etkileyen başlıca bileşim elementleri karbon ve silisyumdur. Karbon eşdeğeri ile birçok mekanik özellik arasında çeşitli ilişkiler geliştirilmiştir. Kesit kalınlığı, karbon eşdeğeri ve likidüs sıcaklığı ile mekanik özellikler arasındaki ilişkinin şematik olarak gösterilişi Şekil 2.7’de verilmiştir [7].



Şekil 2.7. Gri dökme demirlerde kesit kalınlığı, karbon eşdeğeri ve likidüs sıcaklığı ile mekanik özellikler arasındaki ilişki [7].

Karbon eşdeğerinin azalışı, bir oranda bileşimdeki karbonun azalışından ileri gelmekte ve sonuçta çekme mukavemeti artmaktadır. Karbon eşdeğerinin azalması ile mukavemet artışının pratik limiti 32 kg/mm²’dir; daha yüksek mukavemet alaşım elementi ilavesi gerektirir. Sertlik ve çekme mukavemeti arasındaki ilişkiye grafit lamel tipinin büyük etkisi vardır. Verilen bir sertlik değeri için en yüksek çekme mukavemeti, küçük A tipi grafitler mevcut olduğunda elde edilir. Diğer yandan

verilen bir sertlik değeri için D tipi grafit lamelleri ile düşük bir çekme mukavemeti elde edilecektir [7].

Soğuma hızı mikroyapıyı etkilediğinden özellikler üzerinde önemli değişmeler meydana getirir. Hızlı soğuma, sertliği ve çekme mukavemetini arttırır; ancak bunun mümkün olabilmesi için hızlı soğumanın beyaz bir yapı veya çok kötü grafit tipi olan D tipi grafitler meydana getirmemesi gerekir. Yavaş soğuma ile grafit lamelleri irileşir ve kaba yapılı perlit oluşur. Daha yavaş soğumada ise ferritin ortaya çıktığı görülür [7].

Gri dökme demirler ötektik bileşimine yakın alaşımlar olduklarından, akışkanlıkları oldukça iyidir. Bu bakımdan çok ince kesitli parçalar bile kolaylıkla dökülebilir [1]. Gri dökme demirlerde basma mukavemeti çekme mukavemetinin genellikle 3-5 katıdır. Yüksek basma mukavemeti gri dökme demirlerin en önemli özelliklerinden birisidir. Çekmede elastik modül mikroyapıya bağlı olarak $0,8 \times 10^4 - 1,5 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ değerleri arasında değişir, ince grafit lamelleri ve perlitik matriks yüksek değerlere tekabül eder. Sertlik ise daha çok çekme mukavemetine benzer değişim gösterir. Çekme mukavemeti ile sertlik arasındaki ilişkiyi bir bağıntı yardımı ile ifade etmek mümkündür [7].

$$\text{ekme Mukavemeti (kg/mm}^2\text{)} = \text{Brinell sertlik değeri} \times K \quad (2.2)$$

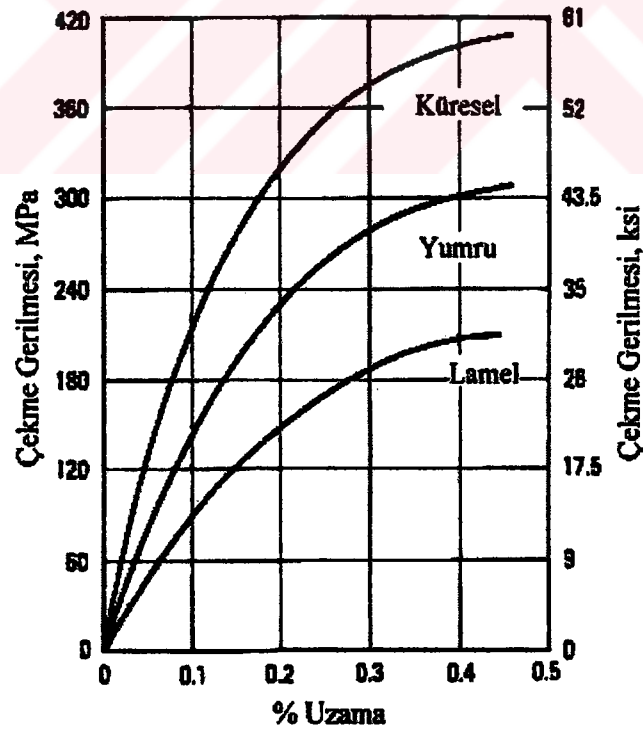
Burada $K = 0,11$ ile $0,15$ arasında değişmektedir.

Gri dökme demirlerin sürtünme ve aşınma dirençleri çok yüksektir. Bundan dolayı özellikle piston halkaları, silindir gömlekleri, krank milleri ve dişliler gibi oldukça yaygın uygulama alanlarına sahiptirler. Ayrıca gri dökme demirler en iyi işlenebilen demir esaslı alaşımlardır [7].

Isıya karşı direnç veya bir başka ifadeyle tufalleşme direnci ve yüksek sıcaklıkta bir dereceye kadar mukavemetini muhafaza etmesi, gri dökme demirlerde istenen özelliklerdir. Bu zellikler daha çok alaşımlı dökme demirlerde geliştirilebilir. Gri dökme demirlerin titreşim söndürme kabiliyetleri de çeliklere göre çok daha fazladır ve özellikle titreşimin bir çalışma karakteristiği olduğu içten yanmalı motorlarda kullanılışları işleme bir ölçüde esneklik kazandırır [7].

2.2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirler

Aynı zamanda nodüler, sfero veya sünek demir (uluslararası ismi ductile iron olarak bilinir) olarak da adlandırılan bu tip dökme demir yapısında, karbonun büyük bir kısmı grafit küreleri şeklinde bulunmaktadır. Küresel grafitli dökme demirde ötektik grafitin katılma sırasında ergimiş demirden çökmesinin gri dökme demirdeki gibi olmasına rağmen, grafitlerin lamel yerine küre şeklinde katılması küresel grafitli dökme demirde ergimiş demirin dökümden önce az miktarda seryum (Ce), magnezyum (Mg) veya başka bir element ilavesi ile “aşılmasından” kaynaklanmaktadır. Yapıda bulunan grafit küreleri, ferritik, perlitik veya ferritik-perlitik matriks içerisinde dağılmış durumdadır. Grafit şeklinin küre oluşu, lamel grafitlerin aksine herhangi bir yükleme anında gerilme yoğunlaşması etkisi yaratmayarak çatlak önleyici bir rol oynar. Bu da, birçok yapısal uygulamalarda küresel grafitli dökme demire yüksek mukavemet, tokluk ve süneklik gibi oldukça üstün özellikler kazandırır (Şekil 2.8). Küresel grafitli dökme demirin kırık yüzeyi parlak çelikimsi görünümündedir [1-4,7]. Bölüm 3’de küresel grafitli dökme demirler ile ilgili daha geniş bilgiye yer verilmiştir.



Şekil 2.8. Çeşitli dökme demirlerin gerilme-uzama eğrilerine grafit morfolojisinin etkisi [2].

2.2.3. Beyaz Dökme Demirler

Beyaz dökme demirler adından da anlaşılacağı gibi kırıldığında beyaz kristalin bir yüzey gösteren bir dökme demir grubudur. Beyaz dökme demirler katılaşma sıcaklığından hızlı soğuma ile elde edilen ötektik altı alaşımlarıdır. Bu tip dökme demirler Fe-Fe₃C sisteminde katılaşırlar ve yapılarında grafitik karbon içermezler. Katılaşmadan sonra içerdiği karbon yapıda, özellikle sementit (Fe₃C) olmak üzere karbürler şeklinde kimyasal olarak birleşik şekilde bulunur. Özellikleri geliştirmek amacıyla yapıya alaşım elementleri ilave edilmesi durumunda ise karbon, daha kompleks bileşimlerdeki karbürler olarak yer alır. Örneğin % 3-5 Ni ve % 1,5-2,5 Cr ilavesinde (Fe,Cr)₃C, % 11-35 Cr ilavesinde ise (Cr,Fe)₇C₃ oluşur. Alaşımsız beyaz dökme demirin tipik mikroyapısı sementit (Fe₃C) ve perlitten oluşur. Alaşım elementlerinin ilavesi ise beyaz dökme demirin mikroyapısını değiştirerek özelliklerini geliştirir. Karbürlerin bileşimi daha kompleks hale gelerek, matriks yapısı kaba perlitten asiküler yapıya beynit veya martensite dönüşür. Alaşım elementlerinin ilavesinin, mukavemet, sertlik, darbe direnci, aşınma direnci, korozyona ve ısıya karşı direnci üzerindeki olumlu etkisi bu tür dökme demirler için çok geniş bir uygulama alanı sağlar. Elde edilen özellikler, ilave edilen alaşım elementlerinin cins ve miktarlarına bağlı olarak gelişir. Dolayısıyla çok sayıda değişik alaşımlı beyaz dökme demir mevcuttur; ancak bunlar matriks yapılarının gerek alaşım elementi gerekse soğuma hızı etkisi ile a) ince perlit veya beynit, b) martensit oluşuna göre başlıca iki grup altında toplanabilirler.

Yüksek oranda sementit içermelerinden dolayı, bütün beyaz dökme demirler sert ve aşınmaya karşı oldukça dirençlidirler. Aynı zamanda son derece gevrektiler ve işlenebilmeleri zordur. Beyaz dökme demirler yüksek aşınma dirençleri yanında, kritik sıcaklığa yakın (650 °C) yüksek sıcaklık uygulamalarında da başarı ile kullanılabilir. Çünkü bu sıcaklık seviyelerinde, beyaz dökme demirin sertliği sade karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerde olduğu gibi önemli miktarlarda düşüş göstermez. Beyaz dökme demirlerin düşük darbe dirençleri ve işlenebilme kabiliyetlerinin kötü oluşu, uygulama alanlarını sınırlar. Başlıca kullanım alanları için, hadde merdaneleri, cevher veya çimento değirmen astarları, öğütücü bilyalar, seramik kalıpları ve konveyör parçaları örnek olarak gösterilebilir [1,3,7].

2.2.4. Temper Dökme Demirler

Temper dökme demir, grafitiz, sert ve kırılğan beyaz dökme demirin temperleme (veya maleabilizasyon) olarak adlandırılan ısı işlem ile karbürlerinin parçalanması sonucu oluşan, yüksek mukavemetli, sünek, iyi işlenebilme özelliğine sahip ve mikroyapısı ferrit ve temper karbonundan meydana gelen dökme demir tipidir. Aslında temper dökme demir adı, hem ferritik hem de perlitik matriksli olanları kapsamasına rağmen uygulamada temper döküm daha çok ferritik olanlar için kullanılmaktadır [7].

Temper dökme demir eldesinde, beyaz dökme demir 800-970 °C sıcaklık aralığına kadar tavlanaarak yapısında bulunan sementit ve perlit parçalanır. Temel katı hal reaksiyonu aşağıdaki gibidir [3]:



Yapıda bulunan sementit ve perlit parçalandıktan sonra, serbest kalan karbon çok yavaş soğuma hızı ile rozet şeklini alır ve temper karbonunu oluşturur. Nihai mikroyapı, grafit ve perlit, perlit ve ferrit veya yalnızca ferritten oluşur. Matriks yapısı tavlamaadan sonraki soğuma hızının bir fonksiyonudur [3]. Kaliteli bir temper dökme demir üretimi için ergitmede esas kriter, serbest lamel grafitleri içermeyen tamamen beyaz bir yapı elde etmektir. Çünkü grafit, temper özelliklerine kötü etki gösterir [7].

Başlıca beyaz ortalı ve siyah ortalı olmak üzere iki tip ferritik temper dökme demir bulunmaktadır. Beyaz ortalı olanlar daha çok Avrupa'da, siyah ortalı olanlar ise Amerika'da üretilmektedir. Bu iki tipin birbirinden başlıca farklılığı, temper karbonu şeklinin bir miktar farklı oluşu ve genellikle ortası beyaz olanın bir miktar birleşik karbon içermesinden kaynaklanmaktadır. Bu fark bileşimden ve üretim yöntemlerindeki değişiklikten ileri gelmektedir. Ancak Avrupa'da da günümüzde, üstün özellikleri nedeniyle daha çok ortası siyah temper döküm üretilmektedir. Bir üçüncü tip olarak, kullanımı giderek artan perlitik matriksli siyah ortalı temper dökme demir belirtilebilir. Bu tip temper dökme demirler birleşik karbon içerdikleri için, ferritik temper dökümlerden daha yüksek mukavemet, aşınma direnci ve süneklik gösterirler [7].

Ortası beyaz temper döküm, beyaz dökme demirin oksitleyici bir ortamda tavllanmasıyla elde edilir. Dekarbürizasyon esasına dayanan bu yöntemde, karbonun tümü Fe_3C halinde bulunan beyaz dökme demir parçalar, demir oksitle kaplanarak uzun süre yüksek sıcaklıkta tutulurlar. Parça yüzeyinin devamlı dekarbürize olması, bünyedeki sementitin giderek parçalanmasına ve karbonun difüzyon yoluyla yüzeye doğru yayınmasına neden olur. Bu sırada bir kısım rozet şekilli temper karbonlar oluşur. Parça yüzeyi tamamen ferritik olup içeri doğru temper karbonu içeren perlitik ve ferritik matriks mevcuttur. Bu tür temperleme işlemi, meydana gelen yapının üniform olmayışından, ancak belirli kalınlıklar için pratik ve ekonomik olabilmektedir. Beyaz temper dökme demir yapısı elde etmek için perlitlerin parçalanması gerekir, bu ise kritik sıcaklıktan hızlı bir soğuma ile geçmek suretiyle gerçekleştirilir [7].

Siyah ortalı temper döküm ise, beyaz dökme demirin nötr bir ortamda tavllanmasıyla (temperlenmesiyle) elde edilir. Temperlenecek iş parçaları, nemi önceden giderilmiş kuma gömülü durumda kutulara yerleştirilir. Kutuların hava alabilecek yerleri şamot çamuru ile sıvandıktan sonra, parçanın kesit kalınlığı ve uygulanan yöntemle göre iki ile altı gün arasında değişen bir tavlama tabi tutulur. Bu ısı işlem, grafit çekirdeklenmesi, birinci ve ikinci grafitleşme kademeleri olmak üzere başlıca üç kademe gerçekleştirilir. Üçüncü kademe A_1 dönüşüm sıcaklığında geçiş hızına göre yapı; ferritik, ferritik+perlitik veya perlitik olabilir [7].

Temper dökme demirler uygulamada, boru bağlantı parçaları, fren tamburu, küçük tekerlekler, zincir egzost parçaları, kum püskürtme memesi ve salyangoz gövdeleri gibi çeşitli alanlarda kullanılabilirler [1,3].

2.2.5. Diğer Dökme Demirler

Uygulamada sıkça kullanılan dört temel tipten başka, özel adlarla belirtilen diğer spesifik formlarda dökme demirler de vardır.

2.2.5.1. Çil Uygulanmış Dökme Demirler

Normal olarak gri dökme demir halinde katılaştıracak bir bileşime sahip, ancak bazı bölgeleri beyaz dökme demir haline geçecek şekilde hızlı katılaştırılmış (çil uygulanmış) dökme demirlerdir. Bu tür dökme demirlerin kırık yüzeylerinde

katılaşmanın hızlı olduğu bölgelerde beyaz, normal olduğu bölgelerde ise gri dökme demir yapısı görülür [7].

2.2.5.2. Benekli (Mottled) Dökme Demirler

Normal soğuma şartlarında kısmen gri kısmen de beyaz dökme demir halinde katılaşacak şekilde bir ara bileşime sahip dökme demirlerdir ve her iki dökme demir tipinin mikroyapısal ve kırılma yüzeyi karakteristiklerini yansıtır [7].

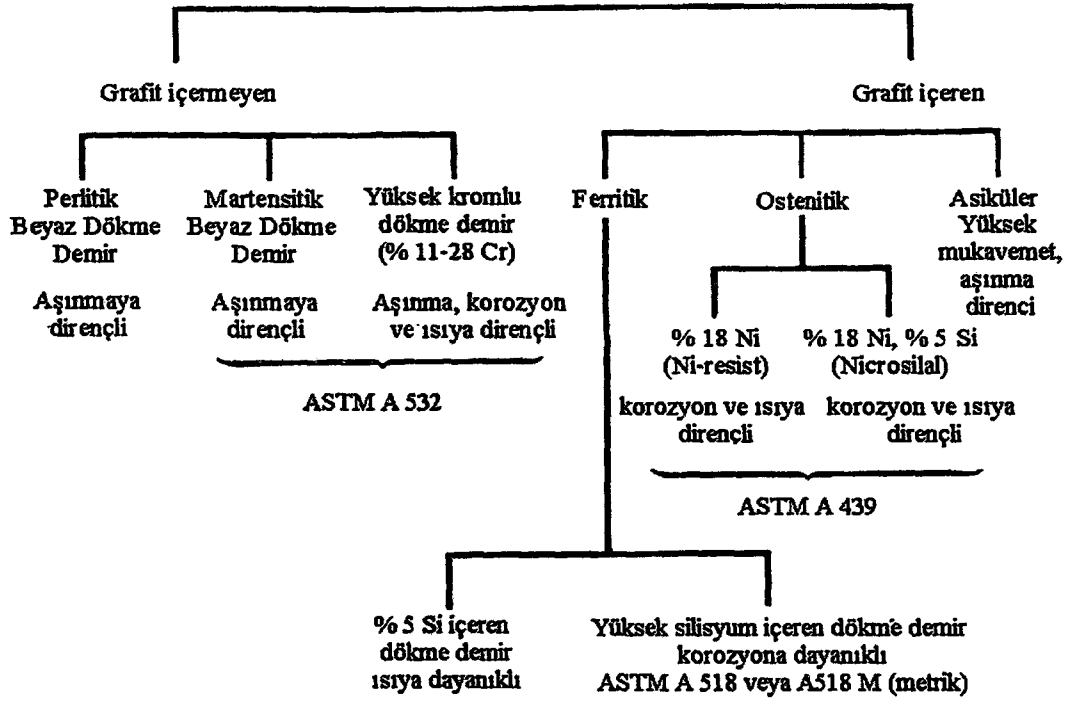
2.2.5.3. Yumru Grafitli Dökme Demirler

Bu tip dökme demirdeki grafitler, gri dökme demirdeki lamel grafitlere benzemesine rağmen daha kaba ve uçları yuvarlanmış şekillidir. Yapısı ise gri dökme demirle küresel grafitli dökme demir yapısı arasındadır. Bu tip dökme demir, gri dökme demire kıyasla daha yüksek mukavemete ve sünekliğe sahiptir. Küresel grafitli dökme demirle karşılaştırıldığında ise termal iletkenliği yüksek ve işlenebilirliği iyidir [1,7].

2.2.5.4. Yüksek Alaşımli Dökme Demirler

Bu tip dökme demirler, mukavemet, aşınma direnci, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilme gibi özellikleri geliştirmek amacıyla genellikle gri veya küresel grafitli dökme demirlere belirli oranlarda nikel, krom ve molibden gibi alaşım elementlerin ilavesi ile elde edilirler. Yüksek alaşımli dökme demirler ve sahip oldukları özelliklerin genel bir sınıflandırması Şekil 2.9'da verilmiştir.

Korozyona dayanıklı dökme demirlerin bileşimine silisyum, krom ve nikel olmak üzere üç alaşım elementi egemendir. Yapıda % 15'e kadar bulunabilen silisyum özellikle sülfürik asite, % 35'e kadar bulunabilen nikel daha çok redükleyici asitlere ve alkalilere, % 28'e kadar bulunabilen krom ise koruyucu oksit tabakası oluşumuna yardım ederek oksitleyici asitlere karşı direnç sağlar. Korozyona dayanıklı dökme demirler, ferritik, perlitik, martensitik veya ostenitik mikroyapıya sahip olabilirler. Ayrıca bileşim, soğuma hızı ve aşılama işlemine bağlı olarak beyaz, gri veya küresel grafitli dökme demir yapısında olabilirler.



Şekil 2.9. Yüksek alaşımlı özel küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması [1]

Isıya dayanıklı dökme demirler, yüksek sıcaklıkta oksidasyon direnci ile yumuşamaya veya mikroyapısal bozulmaya karşı dayanımı içeren dökme demirlerdir. Oksidasyona karşı direnç, öncelikle yüksek alaşım içeriğine bağlıken, yumuşamaya karşı direnç başlangıç mikroyapısı ve ilave olarak karbon içeren fazın kararlılığı ile ilgilidir. Isıya dayanıklı dökme demirlerde en çok kullanılan alaşım elementi kromdur. Kromun hem karbürleri kararlı yapan etkisi hem de sıkı ve koruyucu bir oksit tabakası oluşturması, dökme demirin yüksek sıcaklıklardaki kullanımını kolaylaştırır. Buna karşılık nikel, oksitlenmeye karşı bir direnç sağlamakla beraber, yüksek sıcaklıklarda tokluk ve mukavemeti artırır. Molibden yüksek sıcaklıkta mukavemeti, alüminyum ve silisyum ise oksitlenmeye karşı direnci arttırmalar. Isıya karşı dayanıklı dökme demirler gri veya küresel grafitli dökme demirlerden oluşmakta ve genellikle ferritik veya ostenitik döküm yapısına sahip olmaktadır. Isıya karşı dayanıklı dökme demirler aynı zamanda ferritik ve ostenitik beyaz dökme demir sınıflarından da meydana gelebilir fakat kullanımları azdır.

Yüksek aşınma direnci istenen uygulamalar için ise yüksek krom ve molibden içeren martensitik beyaz dökme demirler üretilirler. Yüksek alaşım içeriği nedeniyle bu

dökme demirlerin mikroyapılarında oldukça fazla dönüşmemiş ostenit bulunur. Perlitik beyaz dökme demir de aynı zamanda aşınmaya dayanıklı bir malzeme tipi olarak kullanılabilir [1,7].



3. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

3.1. Giriş

Küresel grafitli dökme demir, birbirinden bağımsız olarak BCIRA ve INCO tarafından geliştirilmiş ve ilk defa Amerikan Dökümcüler Birliğinin 1948'deki yıllık toplantısında döküm endüstrisi için yeni bir malzeme olarak tanıtılmıştır.

BCIRA yöntemi esas olarak, gri dökme demirle aynı bileşimde olan ötektik üstü demirlere ergimiş halde, Seryum (Ce) ilavesinden ibarettir. Seryum'un büyük bir kısmı, bileşimdeki kükürt'ü gidermekte ve geri kalan seryum ise, grafitlerin lamel yerine küre şeklini almalarını sağlamaktadır. INCO yönteminde ise, ötektik altı ve ötektik üstü dökme demirlere benzer olarak magnezyum ilavesi yapılmaktadır. Bu yöntemlerin ilk tanıtılmasından sonra bugün hemen her yerde uygulanan magnezyum ile aşılama yöntemi daha ekonomik oluşu nedeniyle tercih edilmektedir [7].

Aynı zamanda sfero veya nodüler dökme demir olarak da isimlendirilen bu tip dökme demirlerde grafit partikülleri, ferritik, perlitik ya da ferritik-perlitik matriks içerisinde küre şeklinde dağılmış durumdadır. Yapıda grafitlerin lamel yerine küre şeklinde bulunması, gri dökme demirdekinin aksine herhangi bir yükleme altında gerilim yoğunlaşması etkisi oluşturmazarak yapıya yüksek süneklik ve mukavemet kazandırır. Bu üstün mukavemet ve süneklik, bir çok uygulamada küresel grafitli dökme demiri avantajlı hale getirmektedir. Küresel grafitli dökme demirin özellikleri ısıtılma işlemi ile ayrıca yükseltilebilir [1,4,8].

Küresel grafitli dökme demirler genel olarak, gri dökme demirin başlıca avantajları (düşük ergime derecesi, iyi akışkanlık ve dökülebilirlik, mükemmel işlenebilirlik ve iyi kesme mukavemeti) ile, çeliğin mühendislik özelliklerini (yüksek mukavemet, tokluk, süneklik, sıcak işlenebilirlik ve sertleşebilirlik) birleştiren önemli bir dökme

demir grubudur [3,7]. Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri grafit şekli ve büyük ölçüde matriks yapısı tarafından etkilenmektedir [8].

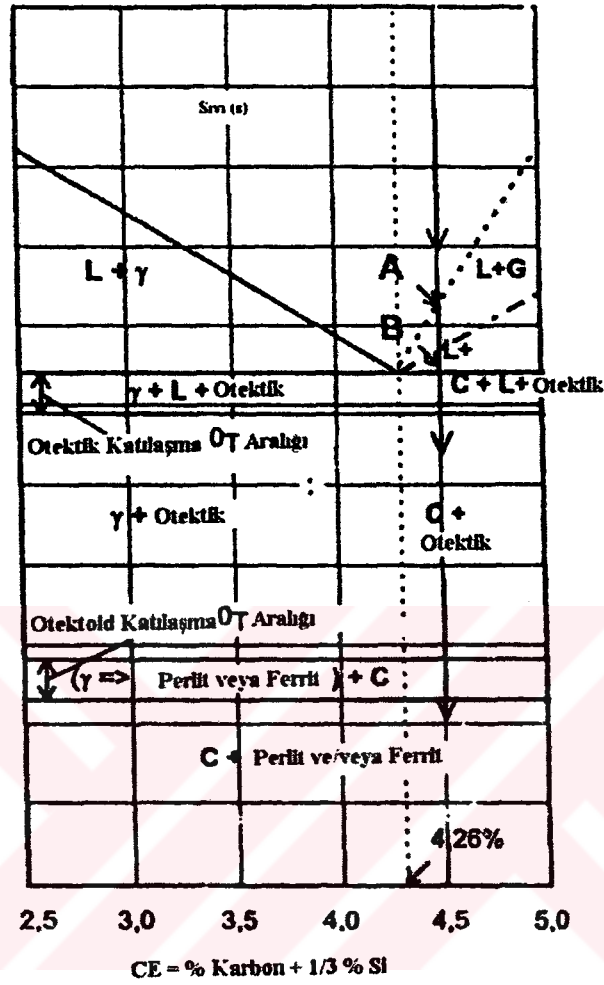
3.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Katılaşması

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 [8]. Alaşımın karbon ve silisyum içeriğine bağlı olarak, küre oluşumu alaşımın saflık seviyesi, küreleştirici elementlerin ilavesi ve soğuma parametreleri ile kontrol edilir. Karbon ve silisyumun küresel grafitli dökme demire etkisi, Fe-C-Si üçlü faz diyagramından gözlemlenebilir [1,9].

Küresel grafitli dökme demirlerin katılaşma prosesini açıklamak için Fe-C ve Fe-C-Si üçlü faz diyagramları kullanılmaktadır. Şekil 3.1’de kesikli çizgiler kararlı fazların (grafit ve ferrit) limitlerini gösterirken, koyu devamlı çizgiler yarı kararlı fazları (karbür ve perlit) temsil etmektedir. İyi aşılınmış bir dökme demirin soğumasının, denge şartları altında (soğuma hızı~0) gerçekleştiği kabul edilir. Küresel grafitli dökme demirin, ötektik altı ve ötektik üstü bileşimine sahip olmasına göre, katılaşma mekanizması da biraz farklılaşır [4]. Katılaşma, ötektik altı bileşimli küresel grafitli dökme demirde ostenit dendritlerinin oluşumu ile başlar. Ötektik üstü bileşime sahip küresel grafitli dökme demirlerde ise katılaşma genel hatları ile aynı olup, ilk katılaşan faz küre şekilli grafitlerdir [7].

Ötektik üstü demirde (% C veya CE = % 4.5) ilk kristalleşen katı, grafit fazıdır (Şekil 3.1, A noktası). Bu grafit partikülleri, sıcaklık ötektik dönüşüm seviyesine ulaşıncaya kadar sıvı demirin karbon atomlarının tükenmesi ile büyürler (Şekil 3.1, B noktası). Karbonu tükenen bölgelerde ostenit çekirdeklenir ve sonuç olarak ostenit kabukları grafit kürelerinin etrafını çevirir (Şekil 3.2). Bu ötektik katılaşma sırasında, yalnızca ostenit sıvıyla temas halindedir ve küre büyümesi için kontrol mekanizması katı ostenit kabuğu boyunca karbon atomlarının difüzyonudur. Bu tip katılaşmaya neoötektik katılaşma denilmektedir ve her bir grafit küresi ve ostenit kabuğu bir ötektik hücre olarak kabul edilir. Neoötektik’in büyümesi başladıktan sonra, başka küresel grafit çekirdeklenmesi olmaz; dolayısıyla grafit kürelerinin sayısı

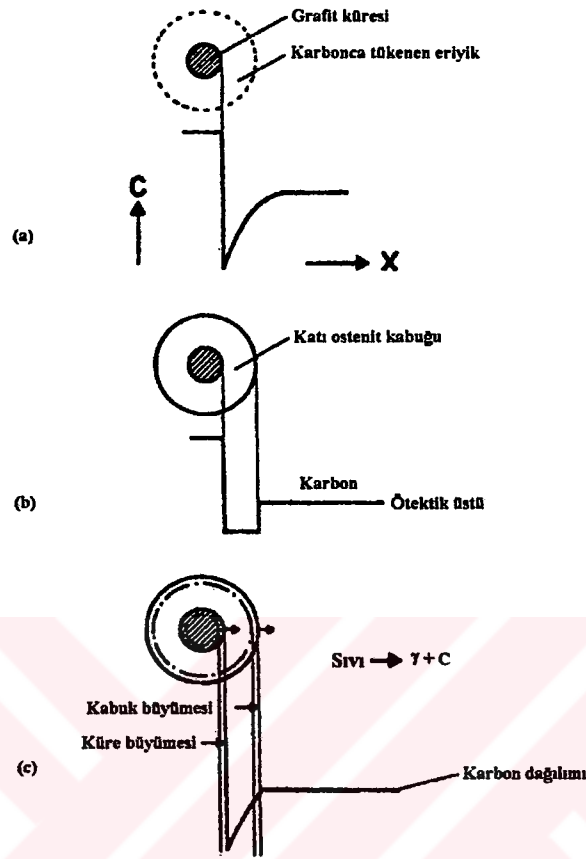
katılaşmanın hemen başlangıcında belirlenmiş olmaktadır. Ötektoid sıcaklığına kadar mevcut grafit küreleri üzerine grafit çökelmesi meydana gelir [1,3,7,9].



Şekil 3.1. Dökme demirde değişik faz bölgelerinin sıcaklık aralıkları [9].

Ostenit, 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. Yavaş soğuma şartları altında ferrit, genellikle grafit partiküllerinin etrafında karbon tükenmiş bir bölgenin meydana gelmesinden dolayı ostenit-grafit ara yüzeyinde çekirdeklenir; küreler ostenitteki karbon çözünürlüğünün düşen sıcaklık ile birlikte düşmesiyle karbon çöktürücü rol oynarlar. Bu evrede ferrit-ostenit ara yüzeyi, ostenitin yüksek karbon içeriği nedeniyle perlit için tercih edilen çekirdekleşme bölgeleri haline gelir. Eğer perlit teşvik edici elementler dönüşüm sıcaklığını düşürür ve ferrit oluşum hızını azaltırsa

perlit, ostenit-ostenit sınırlarında veya ostenit-grafit ara yüzeyinde çekirdeklenebilir [1].



Şekil 3.2. Bir grafit küresinin bir katı kabuk içerisinde izotermal büyümesi ve kabuğun düzgün bir ara yüzeyle büyümesi (a) ötektik altı faz katılaşması: eriyik ile temas halindeki kürenin büyümesi, (b) ötektik katılaşma: grafit kürelerinin kabuk ile çevrilmesi, (c) kürelerin katı kabuk içerisinde büyümesi [9].

Küresel grafitli dökme demir gibi üçlü bir alaşımda, ötektik katılaşma, ana alaşım elementleri ve fazların büyüme kinetikleri ile karar verilen bir sıcaklık aralığı boyunca meydana gelir (Şekil 3.1). Grafit kürelerinin, gri dökme demirde olduğu gibi sıvı demirle direk teması yerine karbon atomlarının ostenitik kabuk boyunca taşınımı yoluyla büyümesi nedeniyle, bu neoötektik katılaşma aralığı küresel grafitli dökme demirde gri dökme demirde olduğundan çok daha geniştir. Katılaşmadan sonra, ostenitteki karbon çözünürlüğü sıcaklık ile birlikte düştüğü için (1154°C ' de % 2 iken ötektoid sıcaklıkta yaklaşık olarak % 0,8'dir) karbonun daha önceden varolan grafit kürelerine doğru difüzyonu devam eder. Ötektoid dönüşüm de aynı zamanda bir sıcaklık aralığında meydana gelir. Bu safhada, ostenit ferrite dönüşür ve

çok daha fazla karbon atomu kürelere difüze olur. Ferritteki karbon çözünürlüğü ostenitte olduğundan daha düşüktür (yaklaşık olarak % 0,025). Sonuç mikroyapısı grafit kürecikli ferritik bir matriksdir [9].

Bu durum, eğer karbon atomları ostenitten ve/veya ferritten kaçmak için yeterli zamana veya teşvik edici kuvvete sahipse meydana gelebilir. Eğer katılaşma ve soğuma karbon atomlarının difüze olabilmesinden daha hızlı bir şekilde olursa, toplamda farklı bir yapı şekillenir. Örneğin, ötektik altı katılaşma sırasında yüksek aşırı soğumaların bulunuşu, grafit yerine yarı kararlı bir faz olan Fe_3C 'nin kristalleşmesine yol açar. Grafit çekirdeklenmesi olmadan önce ötektik yarı kararlı sıcaklığa ulaşırsa bir karbür ötektik oluşur ve bu ostenitin perlite dönüşümüyle takip edilir [9].

Küresel grafitli dökme demir üretiminde, sıvı işlemi 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. Bu aşamada, ergimiş metale üzerinde katılaşmanın başlayacağı çekirdekler sağlanmaktadır. Küresel grafitli dökme demirde, en uygun aşılama 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 [3,4].

3.3. Küresel Grafitli Dökme Demirin Kimyasal Bileşiminin Kontrolü

Küresel grafitli dökme demirlerde istenen mikroyapısal ve mekaniksel özelliklerin elde edilebilmesi için kontrol edilmesi gereken en önemli parametrelerden birisi kimyasal bileşimdir [8]. Küresel grafitli dökme demirlerde, yapıya etki eden küreleştirici ve alaşım elementleri olmak üzere iki ana element grubu vardır.

3.3.1. Küreleştirici Elementler

Karbonun yapıda grafit küreleri şeklinde kristalleşmesi, başta magnezyum olmak üzere kalsiyum ve nadir toprak elementlerinin etkisinin bir sonucudur. Bu elementlerin görevi, karbon atomlarının lamel grafit oluşturacak şekilde çökmesini sağlayan kükürt ve oksijen gibi yüzey aktif elementlerini nötrale ederek karbonun küreler şeklinde oluşması için gerekli koşulları sağlamaktır. Küreleştirici elementler, oksijen veya kükürt ile reaksiyona girerek curuf üzerinde yüzebilen ve çekirdekleşme bölgeleri olarak hizmet veren bileşikler oluştururlar. Bu sayede ergimiş metal, oksijen ve kükürt bakımından da temizlenmiş olur [8,9].

3.3.1.1. Magnezyum

Magnezyum düşük maliyeti ve büyük döküm kesitlerine ve geniş karbon eşdeğeri değerlerine sahip dökme demirlere uygulanabilme özelliğinden dolayı küreleştirici olarak en yaygın kullanılan elementtir. Küresel grafitli dökme demirlerdeki içeriği % 0.02-0.08 seviyelerinde olmasına karşın etkinliği dökme demirin kükürt ve oksijen içeriği ile ilgilidir. Aşını magnezyum konsantrasyonu karbürük bir döküm ile sonuçlanır. Optimize edilmiş bir magnezyum içeriği yüksek küre sayısı ve iyi bir küreleşmenin gözlenmesi için gereklidir. Bununla birlikte küreleşmeyi emniyete almak için magnezyum çok küçük oranlarda nadir toprak elementleri ile birlikte eklenir [9].

3.3.1.2. Kalsiyum

Küresel grafitli dökme demirlerde tek başına küreleştirici olarak kullanılmasına rağmen kalsiyumun ana rolü, magnezyum reaksiyonunun uçuculuğunu düşürmek ve magnezyumun etkinliğini geliştirmektir. Kalsiyum aynı zamanda eriyikteki oksijenle reaksiyona girip CaO oluşturarak aşılama prosesinin etkinliğini arttırır. Buna karşılık eklenen kalsiyum miktarının % 0.03'ü aşması durumunda magnezyumun karbür oluşturma eğilimi ortaya çıkar [9].

3.3.1.3. Nadir Toprak Elementleri

Nadir toprak elementleri atom numaraları 57-71 arası olan elementlerdir. Seryum (Ce), Lantanyum (La), Praseodmiyum (Pr) ve Neodmiyum (Nd) nadir toprak

elementleri ailesinden küreleştirici olarak en çok kullanılan elementlerdir. Ergimiş şarja genellikle %50 Ce, %25 La ve %25 Nd karışımı şeklinde eklenirler. Eğer nadir toprak elementleri düşük kükürt bazlı demirde yalnızca küreleştirici olarak kullanılırsa, tamamen küresel bir yapı meydana getirilmesine karşılık küresellik seviyesi genellikle %60'ın altında olur. Seryum, Pb, Bi, As, Sb ve Al gibi elementlerin zararlı etkilerini nötralize eder. Genelde magnezyum ile muamele edilmiş eriyikteki bu elementlerin etkisini gidermek için % 0.002-0.005 seryum ilavesi yeterlidir. Eğer seryum haddinden fazla konsantrasyonda bulunursa (> 0.01) yapıdaki küresel grafit sayısını düşürerek karbür oluşum riskini yükseltir. Grafit oluşumu için nadir toprak elementleri içerisinde en yararlısı seryum iken, lantanyum şiddetli bir şekilde karbür kristalleşmesini teşvik edici rol oynar [9].

3.3.2. Alaşım Elementleri

Alaşım elementleri küresel grafitli dökme demirin sertliğini yükseltmek, mikroyapı özelliklerini değiştirmek ve küresel grafit oluşumuna katkıda bulunmak gibi çok çeşitli nedenlerden dolayı yapıya katılabilir.

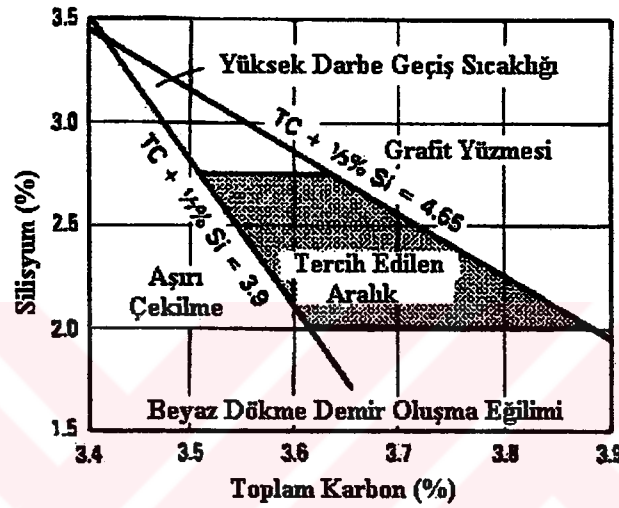
3.3.2.1. Karbon

Karbon, küresel grafitli dökme demir yapısında ana alaşım elementi olarak yer alır. Karbon miktarı, grafit çekirdekleşme merkezlerinin sayısı ve aşılama pratiğinin seçimi ile birlikte grafit kürelerinin boyut ve sayısını etkileyen en önemli etkenlerden birisidir. Küresel grafitli dökme demir bileşiminde karbon oranı arttıkça, grafit kürelerinin sayısı da artar. Bununla birlikte karbon, akışkanlık ve beslenme özelliklerini de iyileştirerek dökülebilirliği artırır [7].

3.3.2.2. Silisyum

Grafit oluşumunu kolaylaştırmak bakımından, küresel grafitli dökme demir üretiminde yapılan aşılamanın temel elementi silisyum (Si) olup, yapıya ferro-silis yoluyla ilave edilmektedir [8]. Silisyum, ötektoid dönüşüm sırasında oluşan ferritin oranını ve sertliğini artırarak, küresel grafitli dökme demir mukavemetinde de önemli bir artış meydana getirir [7]. Bunun yanı sıra silisyum oranı yükseldikçe, ferritik dökme demirdeki sünek-gevrek geçiş sıcaklığı yükselir ve grafitler

küresellikten sapmaya başlarlar [1]. Bu yüzden maksimum sünekliğin ve tokluğun sağlanabilmesi için silisyum bileşimi % 2'nin altında tutulmalıdır. Artan silisyum oranı ile sertlik, akma ve çekme mukavemetleri yükselir. Isı değıştiriciler gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında ise yüksek sıcaklık oksidasyon direnci ve boyutsal kararlılık sağlamak amacıyla silisyum oranı % 3.75'den % 4.25'e kadar değışmektedir. Daha yüksek silisyum içerikleri ise abrasiv aşınma direnci sağlamak amacıyla kullanılmaktadır [7]. Arzulanan özelliklerin eldesi için en uygun karbon ve silisyum oranları Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Yüksek kalitede küresel grafitli dökme demir elde etmek için gerekli karbon ve silisyum oranları [2].

3.3.2.3. Manganez

Manganez (Mn), üst ötektik kritik sıcaklığı düşürür, grafit/metal ara yüzeyinde ferrit çekirdeklenmesini geciktirir ve ferritteki karbon difüzivitesini düşürür. Manganez perlit oluşumunu etkiler fakat bu etki kalay, bakır veya arseniğin etkisi kadar belirgin değildir. Manganez ilavesiyle, dökümdeki perlit oranının artması yüzünden sertliğin yanı sıra çekme ve yorulma mukavemeti artarken uzama ve işlenebilirlik düşer. Bununla birlikte, döküm halindeki tamamen perlitik bir yapı elde etmek için % 0.5'in üzerinde bir manganez içeriği gereklidir. Ancak manganez'in yüksek oranlarda kullanılması istenmeyen mikrosegregasyonlara sebep olur. Özellikle kalın kesitli dökümlerde, manganez tane sınırı karbürlerinin oluşumunu teşvik eder. Bundan dolayı manganez içeriği, yapıdaki silisyum oranı ve kesit kalınlığına bağlı olarak bir maksimum değerde sınırlandırılmalıdır [3,8,9].

3.3.2.4. Molibden

Küresel grafitli dökme demirlerin molibden (Mo) ile alaşımlandırılmasının iki amacı vardır. Bunlardan ilki, molibden'in küresel grafitli dökme demirin sertliğini artırmasıdır. İkincisi ise, yapıyı yüksek sıcaklıklarda kararlı halde tutmasıdır. Molibden, özellikle tavllanmış ferritik sınıflarda yüksek sıcaklık çekme dayanımını, sürünme dayanımını (400°C) ve termal yorulma direncini arttırmaktadır. Molibden'in bakır veya nikel ile birlikte kullanılması durumunda sertliği artırıcı etkisi daha belirgindir. Bununla birlikte molibden de manganez gibi katılaşma sırasında hücre sınırlarında segregasyon olur ve karbürleri oluşturur. Bu molibden'ce zengin karbürler, yapıda çatlaklar için çekirdekleşme ve ilerleme bölgeleri olarak davranırlar. Bu da mukavemet ve süneklikte kayıp anlamına gelmektedir. Özellikle ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde molibden içeriği % 0.2-0.3'ü aşmamalıdır [9].

3.3.2.5. Nikel

Nikel (Ni), sıvı ve katı küresel grafitli dökme demirde çözünebilen bir elementtir. Aynı zamanda, karbonun sıvı veya katı demirde çözünebilirliğini düşürdüğü için bir grafitleştirici olarak da sınıflandırılır. Nikel oranındaki % 1'lik bir artış karbonun ergimiş demirdeki çözünürlüğünü % 0.05 düşürür ve grafit-ostenit geçiş sıcaklığını $3-4^{\circ}\text{C}$ yükseltir. Nikel, diğer demir alaşımlarında olduğu gibi, ostenit-ferrit dönüşüm sıcaklığını düşürerek bir ostenit kararlaştırıcı rol oynar. Bununla birlikte, sertleştirilecek, temperlenecek veya izotermal olarak dönüştürülecek dökme demirlerin üretiminde en yaygın kullanılan alaşım elementidir. Örneğin, ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin sertliklerinin geliştirilmesinde oldukça etkilidir. Nikel'in perlit oluşturmaya etkisi zayıf olmasına rağmen, yapıda % 0.75'den daha az bulunması durumunda etkisi önemsizdir. % 2.5'e kadar bir nikel ilavesi, ferritin dayanımını artırıcı etkisi ve zayıf perlit oluşturma eğilimi yüzünden döküm halindeki küresel grafitli dökme demirde çekme ve yorulma mukavemetini artırırken sünekliği bir miktar düşürür. Benzer bir etki tavllanmış ferritik dökme demirlerde de görülür. Sünek-gevrek geçiş sıcaklığı nikel ilavesi ile birlikte artmasına rağmen, artış aynı miktarda alaşım elementi ilavesi için bakır veya manganez'in sebep olduğu artıştan daha küçüktür [9].

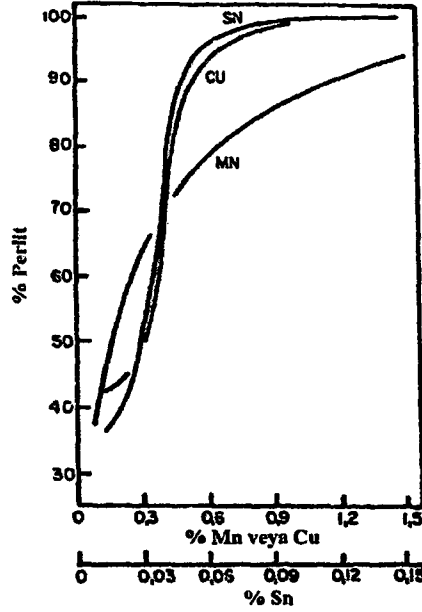
3.3.2.6. Bakır

Bakır (Cu), küresel grafitli dökme demirlerde en yaygın kullanılan alaşım elementlerinden birisidir. Bakır, orta derecede bir grafitleştiricidir ve kontrolsüz katılaşmayı kontrol etmek için silisyum'un yerine kullanılabilir. Bakır'ın grafitleştirici etkisi kararlı ve yarı kararlı ötektik sıcaklıkları arasındaki mesafenin artışıının bir sonucudur. Bakır aynı zamanda ostenitteki karbon difüzyonunu geciktirerek perlit oluşumunu teşvik eder. Ancak bakırın perlit oluşumunu artırıcı etkisi manganez ile birlikte yapıya katıldığında çok daha belirgindir. Örneğin % 0.6 bakır ve % 0.1'den daha az oranlarda manganez kullanılarak tamamen perlitik dökümler üretilebilir. Bakır perlit oluşumunu teşvik etmesi nedeniyle küresel grafitli dökme demirin çekme ve yorulma mukavemeti ile sertliğini artırırken, sünekliğini ve darbe direncini düşürerek sünek-gevrek geçiş sıcaklığını yükseltir. Bakırın perlit teşvik edici potansiyelinin manganez ve kalay ile karşılaştırılması Şekil 3.4'de verilmektedir. Bakır aynı zamanda molibden ve/veya nikel ile birlikte kullanıldığında sertleşebilirliği yükseltici etkiye sahiptir. Bakır sertliği geliştirici olarak molibden'den daha az fakat nikel'den daha fazla etkilidir [9].

3.3.2.7. Kalay

Kalay (Sn), döküm hali durumunda perlitli kuvvetli bir şekilde teşvik edici olduğundan zaman zaman bir alaşım elementi ilavesi olarak kullanılabilir. Kalay grafit küreleri yüzeylerine segrege olarak karbon atomlarının grafit partiküllerine transferine karşı bir bariyer olarak rol oynar. Bu, Şekil 3.4'de verilmiştir; bu diyagramdan da görüldüğü gibi perlit oluşumunda % 0.1 Sn, % 1 Cu veya Mn kadar etkilidir. Normalize edilmiş kalın kesitli dökümlerde perlit oluşumunu teşvik etmek veya perlitli kararlı hale getirmek için kalay % 0.08'in üzerindeki konsantrasyonlarda ilave edilirken, eğer döküm halinde ferritik dökümler hedefleniyorsa kalay ilavesi mutlaka düşük tutulmalıdır [9].

Tablo 3.1, alaşım elementlerinin küresel grafitli dökme demirlerin özellikleri ve yapısı üzerindeki etkilerini özetlemektedir.



Şekil 3.4. Alaşım elementlerinin perlit oluşumuna etkileri [9].

3.3.2.8. Kalıntı Elementler

Alaşım elementlerinin dışında küresel grafitli dökme demir yapısında kükürt, fosfor, kurşun, titanyum, arsenik gibi şarjdaki hammaddeler ile birlikte girmiş kalıntı elementler bulunabilmektedir.

Kükürt (S), malzeme yapısında karbürleri kararlaştırıcı etkide bulunan FeS segregasyonlarına yol açtığı için malzemenin sertliğinde değişimlere ve işlenebilme zorluklarına sebep olur [5]. Ayrıca grafitleri küreleştirmek için kullanılan magnezyum miktarının daha fazla kullanımını gerektirdiği için, küresel grafitli dökme demirin nihai kükürt miktarı genellikle % 0.015'in altındadır [3,7].

Fosfor (P) ise, grafit oluşumunu teşvik edici bir element olmasına rağmen küresel grafitli dökme demir yapısında zararlı bir element olarak sınıflandırılır. Yapıdaki yüksek miktarlardaki fosfor, sert ve gevrek olan Fe_3P oluşumuna yol açar. Fe_3P ise $980^{\circ}C$ civarında ergiyen Fe- Fe_3P ötektiğinin (steadit) oluşumunu sağlar. Steadit yapısı dökme demirdeki fosfor miktarı ile orantılı olarak artar; buna bağlı olarak malzemenin sertlik ve gevrekliğinin artmasına karşılık tokluğu düşer [5].

Tablo 3.1. Alaşım elementlerinin küresel grafitli dökme demirlerin özellikleri ve yapıları üzerindeki etkileri [9].

Alaşım Elementi	Max. Bileşim Aralığı	Kararlı ve yarı kararlı ötektik sıcaklığına etkisi	Ötektoid sıcaklığına etkisi	Matriks yapısına etkisi	Sertleşebilirliğe etkisi	Grafit yapısına etkisi
Cu	Ferritik yapılarda % 0.03 ve perlitik yapılarda % 1	Kararlı ve yarı kararlı ötektik sıcaklıklar arasındaki farkı artırır.	Ötektoid sıcaklığı düşürür (Ostenit kararlaştırıcıdır).	Karbon difüzyonunu geciktirerek perlit oluşumunu teşvik eder. Perlit kararlaştırıcıdır.	Sertleşebilirliği yükseltir, ancak Mo'den daha az etkilidir	Eğer Ti ve Pb ile birlikte katılırsa hücrelerarası lamel grafit oluşumunu teşvik eder.
Ni	Ferritik yapılarda % 0.1 ve perlitik yapılarda % 0.25	Kararlı ve yarı kararlı ötektik sıcaklıklar arasındaki farkı artırır.	Ötektoid sıcaklığı düşürür (Ostenit kararlaştırıcıdır).	Perlit oluşturma etkisi zayıftır.	Sertleşebilirliği yükseltir, ancak Cu'dan daha az etkilidir.	Çil oluşum eğilimini azaltır, gelişmemiş grafit oluşumunu teşvik eder.
Mo	Ferritik yapılarda % 0.02 ve perlitik yapılarda çok düşük oranda	Kararlı ve yarı kararlı ötektik sıcaklıklarını düşürür.	Ötektoid sıcaklığını artırır (Ferrit kararlaştırıcıdır).	Döküm halinde perlitli oluşturma eğilimi Cu ve Sn'dan daha azdır.	Perlit oluşumunu geciktirerek sertleşebilirliği artırmada en etkili elementtir.	Hücrelerarası karbür oluşturma eğilimindedir.
Mn	Ferritik yapılarda % 0.15 ve perlitik yapılarda %0.35	Kararlı ve yarı kararlı ötektik sıcaklıklarını düşürür.	Ötektoid sıcaklığı düşürür (Ostenit kararlaştırıcıdır).	Perlit oluşturmada Ni'den 5 kat daha etkilidir.	Sertleşebilirliği yükseltir, perlit oluşumunu düşük sıcaklıklara çeker.	İnce kesitlerde segregasyon olduğunda hücrelerarası karbür ağı oluşturma eğilimindedir.

Steadit, düşük sıcaklıkta katılaşmasından dolayı sıvı demirin akışkanlığının artmasında önemli bir rol oynar [5]. Bu etkenler göz önüne alındığında fosforun kontrolü yüksek mekanik özellikler elde etmek için oldukça kritiktir.

Kurşun, antimon, bizmut, titanyum, tellür ve zirkonyum gibi elementler, şarja hammaddeler ile birlikte eser miktarlarda girmiş istenmeyen elementlerdir. Ancak, etkileri seryum ilavesi ile nötralize edilebilir. Bu elementler ayrıca çekirdekleşme potansiyeline de etki ederler [9].

Yapıdaki arsenik ve antimon elementleri perlit oluşumunu teşvik ederken, vanadyum ve bor karbür yapıcı veya perlitli kararlaştırıcı olarak davranırlar [3].

Tablo 3.2, belli başlı kalıntı element ve emprütelerin küresel grafitli dökme demirlerde bulunması gereken oranları, geldiği kaynakları ve yapıya etkilerini göstermektedir.

3.4. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Karakterizasyonu

3.4.1. Grafit yapısı ve dağılımının özellikler üzerindeki etkisi

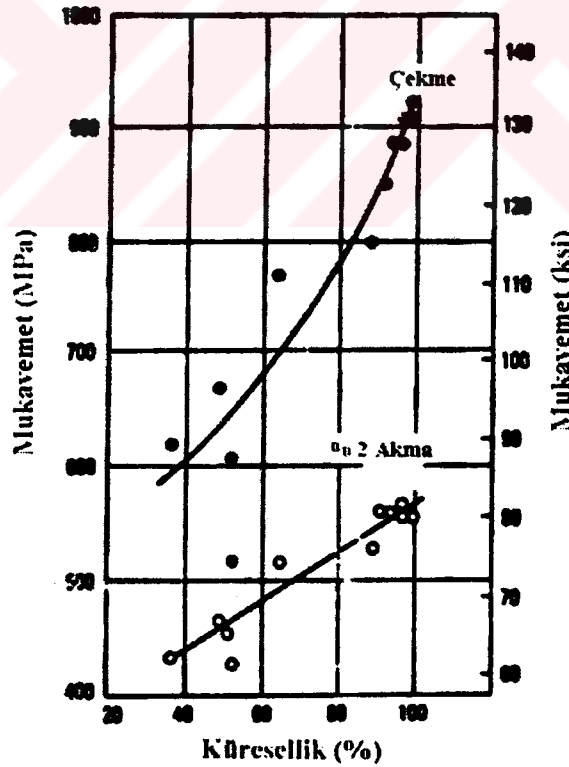
Grafit dağılımı, birim hacimdeki grafit kürelerinin sayısı olarak tanımlanabilir. Bu değer kesit üzerinde birim alana düşen grafit küre sayısı ile doğru orantılıdır ve “grafit küre sayısı / mm²” olarak ölçülür [7]. Küresel grafitli dökme demirlerdeki grafitin şekline ve dağılımına katılma esnasında karar verilir ve daha sonra ısı işlem gibi herhangi bir etki ile değiştirilemez. Küresel grafitli dökme demirde grafitin gri dökme demirlerdeki keskin köşeli tabakalar yerine küreler şeklinde bulunuşu bu döküm metalinin mukavemetinin gri dökme demire nazaran 5-7 kat daha yüksek olmasına neden olur. Grafit kürelerinin şekli mekanik özellikleri etkiler ve tam küresellikten uzaklaştıkça küresel grafitli dökme demirin mekanik özelliklerinde düşme görülür. Aynı zamanda grafit kürelerinin boyut ve dağılımının üniformluğu da özellikleri etkiler, fakat bu etki grafit şeklinin etkisine göre daha azdır. Aşılama küre sayısını arttırıcı etkiye sahiptir. Bu sayede karbürlerin oluşumu önlenerek yapıdaki ferrit oranı arttırılarak sert ve gevrek dökümlerin oluşumu önlenir. Yapıda bulunan küçük ve çok sayıda küreler, genellikle çekme özelliklerini

Tablo 3.2. Kalıntı elementlerin ve imprütelerin (< % 0.1) küresel grafitli dökme demire etkileri [9].

Element	Ferritik sınıflarda limit (%)	Perlitik sınıflarda limit (%)	Hücreler arası lamel grafit	Karbür yapıcı	Perlit teşvik edici	Etkileri	Geldiği Kaynak
Cr	0.035-0.04	0.05-0.10		x	x	Küre sayısı artırır ve hücrelerarası bölgelerde perlit oluşturur. Kararlı ve yarı kararlı ötektik sıcaklık aralığını düşürür.	Çelik hurdası ve pik demir
V	0.04	0.05		x		Kararlı ve yarı kararlı ötektik sıcaklık aralığını düşürür.	Çelik Hurdası
Ti	0.02-0.07	0.04-0.07	x		x	Yumru şekilli grafit oluşturur. Kararlı ve yarı kararlı ötektik sıcaklık aralığını düşürür.	Pik demir, bazı ferro alaşımlar, yapısal çelik hurdası, kaplamalar ve boyalar
Al	0.02-0.05	0.05-0.08	x			Yumru ve lamel grafit oluşumunu teşvik eder, Ancak, lamel grafit oluşumu Ce ile kontrol edilir.	Ferro alaşımlar, çelik hurdası, aşındırıcılar ve işlem alaşımları
Pb	0.002	0.002	x		x	Hidrojenin varlığında grafit yapısını tamamen bozar, ancak bu etki Ce ilavesi ile kontrol edilebilir.	Boylanmış çelik hurdası
As	0.01-0.02	0.05	x		x	Ce ilavesi ile birlikte lamel grafit oluşumunu kontrol eder.	Çelik hurdası

geliştirir ve ince kesitlerde veya keskin köşelerde aşırı soğumayı azaltarak yapısal kararlılık oluştururlar. Bununla beraber küresel grafitli dökme demirlerde optimum bir küre yoğunluğu vardır. Aşırı sayıda küreler, istenen uygulamalardaki sertliklere direnç gösteremeyecek şekilde dökümün zayıflamasına neden olabilir. Bunun için her malzeme kendi spesifik uygulama alanına göre değerlendirilmelidir [1].

Küresel grafitli dökme demirlerin bütün mekaniksel ve fiziksel özellikleri grafitin tamamen küresel şekle sahip olmasından kaynaklanmaktadır, küresellikten herhangi bir sapma durumunda bu özelliklerde de bir sapma meydana gelecektir. Genel olarak küresel grafitli dökme demir üretiminde mekanik özellikler açısından % 90'dan fazla küresellik istenir. Ancak bazı durumlarda % 80-% 100 arasında küreselliğe sahip olan yapılar da kabul edilebilir. Mukavemet ve süneklik ile ilişkili bütün özellikler küresel olmayan grafit oranı arttıkça azalır ve çekme ve yorulma mukavemeti gibi hasarla ilgili olan özellikler bu grafitlerden akma dayanımı gibi hasara neden olmayan özelliklerden daha fazla etkilenirler (Şekil 3.5) [1].



Şekil 3.5. Küresel grafitli dökme demirlerde küreselliğin çekme ve akma mukavemeti ile değişimi [1].

Yapıda grafitlerin küresel olarak bulunması oldukça önemlidir. Eğer grafitler keskin köşeli ince lameller halinde yer alırsa malzemenin gerilme yüklemesine maruz kalması durumunda grafit köşelerinde gerilim yükselmesi oluşur ve böylelikle lamellerde çatlak oluşumu başlayarak matriksde süreksizlik oluşacaktır. Bu da mukavemet ve süneklik özelliklerine oldukça ters bir şekilde yansıyacaktır. Bu nedenle küresellik yüzdesinin saptanması özelliklere kaba bir kılavuzluk yapmaktadır. Grafit şekli aynı zamanda rezonans frekansı ve ultrasonik hız ölçümleri ile ölçülen elastisite modülünü de etkiler. Bu ölçümler küresellik ve küreselliğin etkilediği diğer özellikler için oldukça iyi bir yol göstericidirler. Küreselliğin düşük yüzdesi aynı zamanda sünek koşullarda darbe enerjisini düşürür, yorulma mukavemetini azaltır, sönüm kapasitesini ve termal iletkenliği artırır ve elektriksel direnci azaltır [1]. Yüksek küresellikteki bir küresel grafitli dökme demir aynı kesit boyutuna sahip çelikten % 10 daha az ağırlığa sahiptir [3]. Grafit aynı zamanda, küresel grafitli dökme demirin başka bir metal ile teması neticesinde aşınması sırasında yağlayıcı olarak davranır ve servis koşullarında ortamda yağlayıcı olmaması durumunda bile ara yüzeydeki sürtünme katsayısını düşürerek örneğin dişli parçaları gibi elemanların oldukça etkili ve sessiz çalışmasına izin verir [1,7,10-13].

3.4.2. Mikroyapının özellikler üzerine etkisi

Spesifikasyonlarda farklı sınıflardaki küresel grafitli dökme demirlere karar vermede geçerli olan esas faktör matriks yapısıdır. Küresel grafitli dökme demirlerde döküm halinde matriks, döküm kesit boyutuna ve alaşım kompozisyonuna bağlı olarak değişen oranlarda perlit ve ferrit içerir. Malzemenin mukavemet ve süneklik gibi mekanik özelliklerine de matriksdeki perlit ve ferrit oranları ile karar verilir.

Alaşımsız küresel grafitli dökme demir sınıflarında ostenit oda sıcaklığında kararlı değildir ve demirin bir başka kristalografik şekli olan ferrite dönüşür. Ferrit, kübik hacim merkezli demirin çok küçük miktarlardaki karbon ile meydana getirdiği katı çözelti halidir ve yapıda serbest halde veya perlit bileşeni olarak bulunabilir. Ferrit, oldukça yumuşak sünek ve orta derecede mukavemetli bir yapı elemanıdır. Bileşimdeki silisyumu içeren faz olduğundan, silisyum ferriti sertleştirir ve mukavemetini bir miktar artırır. Ferrit dönüşüm sıcaklığı 723 °C'den daha yüksektir ve silisyum içeriği tarafından etkilenir. Küresel grafitli dökme demirlerdeki ostenit-ferrit dönüşümü aynı zamanda matriksin karbon içeriğinin değişimini zorunlu kılar.

Kristalleşmesi sırasında ostenitin karbon içeriği yaklaşık olarak %1 seviyelerindeyken soğuma ile birlikte düşer. Ostenit-ferrit dönüşümü sıcaklığında ostenitteki karbon çözünürlüğü yaklaşık olarak % 0.55'dir (Si: % 2.5). Tersine , bütün pratik uygulamalarda, ferritte karbon çözünmez. Karbon daha sonra dönüşüm esnasında kusulur. Ferritin yapıda serbest halde bir yapı elemanı olarak bulunabilmesi genel olarak kimyasal bileşim, soğuma hızı ve grafit dağılımına bağlıdır. Malzeme içerisinde karbon grafit halinde serbest kalabiliyorsa (bileşimde karbon, silisyum ve grafitleşmeyi teşvik eden diğer elementlerin miktarı fazla, aynı zamanda yavaş bir soğuma hızı mevcutsa) anayapı elemanı olarak ferritin serbest olarak bulunma şansı çok yüksektir. Tamamen ferritik yapılar normalde ancak yalnızca tavlama ile görülür. Bu durumda, ince ferrit tanelerinden dolayı döküm halindeki ferritik demirlere nazaran daha düşük darbe geçiş sıcaklığına sahip daha sünek bir matriks elde edilir. Özellikle kullanımda şiddetli aşınma gösteren parçaların yapısında ferritten kaçınılmalıdır [1].

Bazı durumlarda ise, yapıda meydana gelen hızlı soğuma ve diğer etmenler karbonun grafitte göç etmesine izin vermezler. Ancak bu, karbonun ferritte çözünmediği ve ostenitin oda sıcaklığında kararsızlığından ötürü dönüşmesi gerektiği gerçeğini değiştirmez. Bu ikilem, orjinal ostenit içerisinde oldukça ince demir karbür tabakalarının biçimlenmesine yol açar. Böylece ortaya yan yana sıralanmış ferrit ve sementit tabakalarından oluşan iki faz karışımı bir yapı ortaya çıkar. Bu sonuç matriks mikroyapısı perlit olarak isimlendirilir. Perlit yüksek mukavemetli, orta sertlik ve süneklığe sahip bir fazdır. Perlitin bu özelliklerinden dolayı, yüksek mukavemet uygulamalarında kullanılacak küresel grafitli dökme demirler perlitik yapıya sahiptirler. Perlitin incelik derecesi soğuma hızına bağlıdır. Soğuma hızının artması perlitin inceltir, dolayısıyla dökme demirin sertliğini yükseltir. Perlit fazı aynı zamanda aşınmaya karşı da dayanıklıdır ve özellikle adhesiv aşınma için perlit oldukça arzu edilen bir matriksdir. Küresel grafitli dökme demirlerde perlit oluşumu yapıya katılan nikel, bakır, manganez, kalay, arsenik ve antimon gibi perlit teşvik edici elementlerin ilavesi ile kolaylaştırılır.

Döküm halindeki küresel grafitli dökme demirlerin matriks yapısı çoğunlukla, grafitlerin çevrelerinin ferrit ile çevrildiği geri kalan bölgelerde ise perlitin yer aldığı ve "boğa gözü" yapısı olarak adlandırılan farklı oranlardaki ferrit ve perlit fazlarının karışımından oluşur. Bu yapıdaki ferrit ve perlit fazlarının oranları soğuma hızına,

grafit miktarına ve alaşım elementlerinin cinsine ve miktarına göre değişmektedir.

Ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demirlerde grafit kürelerinin ferrit ile çevrili olması, akma mukavemetini düşürürken sünekliği, darbe ve yorulma dayanımını artırır. Perlit miktarı arttıkça dökme demirin mukavemeti ve sertliği artmasına karşın perlit oranının düşmesi sünek koşulda darbe enerjisini yükseltir ve sünek-gevrek geçiş sıcaklık seviyesini düşürür [1,8].

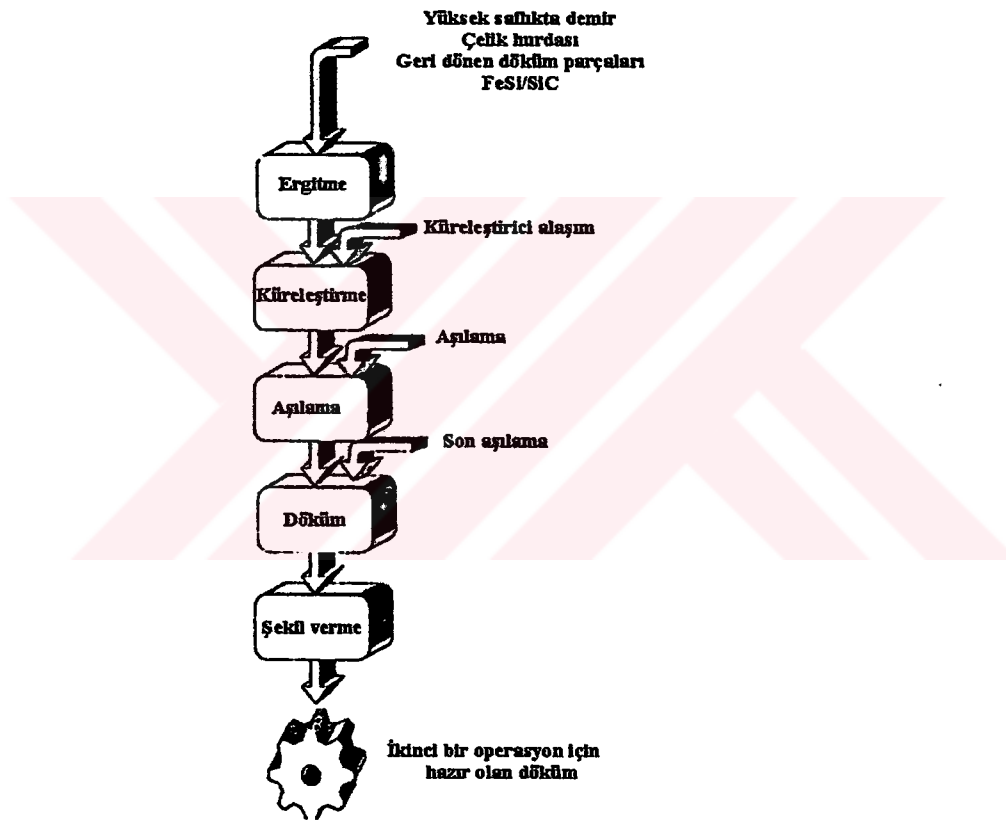
Küresel grafitli dökme demir yapısında karbürlerin bulunması özellikleri olumsuz yönde etkiler. Karbürler yapının sünekliğini düşürür, sertliğini artırır ve çekme, yorulma ve darbe yüklemelerinde hasarın erken oluşmasını teşvik ederler. Karbürlerin küresel grafitli dökme demir matriksinde bulunması aynı zamanda elastisite modülünü yükseltir ve işlenebilirliği önemli derecede azaltır. Karbürlerin tahribatsız yöntemlerle saptanması zor olduğundan yapıda bu zararlı fazı oluşturmamak için özel ilgi gösterilmelidir. Bu amaçla küresel grafitli dökme demir üretiminde, yüksek saflıkta şarj malzemesi kullanılarak karbür yapıcı elementlerin seviyeleri azaltılmalı ve aşılama pratiğinin doğru olarak uygulanması ile küre sayısı artırılmalıdır. Gerekğinde karbürlerin yapıdan uzaklaştırılmasında ısıtma işlemi kullanılabilir [1].

3.5. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi

Küresel grafitli dökme demir üretiminde kullanılan ergitme yöntemi ile kullanılan küreleştirici alaşım cins ve miktarı arasındaki ilişki, dökümün kalitesi ve mekanik özellikler açısından önem taşır. Dökme demir bileşiminin, şarjın ve ergitme yönteminin kontrolü ile, gerekli limitlerde tutulması, sağlam döküm oranında artış ve küreleştirici element ilavesinde azalış sağlar. Bir başka ifade ile, yüksek kalitede küresel grafitli dökme demir üretimi için oldukça fazla parametre sıkı bir şekilde kontrol edilmelidir [5,7,9].

Küresel grafitli dökme demirler için tipik üretim akış şeması Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Küresel grafitli dökme demir üretiminde kullanılan metalik şarj başlıca pik, çelik hurdası, küresel grafitli döküm hurdası, katı halde redüklenmiş demir cevheri, ferro alaşımlar ve silisyum karbürden oluşmaktadır. Piyasada

“SORELMETAL” olarak adlandırılan çok düşük kükürt ve manganez (% 0.01) içeren pikler, küresel grafitli dökme demir üretiminde en uygun şarj malzemesi olmaktadır. Küresel grafitli dökme demir üretiminde kullanılacak pik seçimi, gerek kupol ürünü metalde kükürt giderme ek işlemini kaldırmak, gerekse küreleştirici ve aşılama ilavelerinin verimini artırıp masrafını azaltmak amacını taşımaktadır. Şarjda bulunan çelik hurdası ise pike nazaran daha ucuz olması ve kolay temin edilebilmesi nedeniyle kullanılmaktadır. Şarja katılacak çelik hurdasının özellikle kimyasal bileşimi göz önünde tutulmalıdır. Çelik hurdasında manganez oranı ne kadar düşük olursa şarj için gerekli pik miktarı da o kadar azalır.



Şekil 3.6. Küresel grafitli dökme demirlerin üretim akış şeması [9].

Küresel grafitli dökme demir için en genel ergitme ünitesi kupol ocağıdır, ancak bir çok işletmede aynı amaçla indüksiyon fırını da kullanılmaktadır. Küresel grafitli dökme demir üretimi için tercih edilen ergitme ünitesi bazik kupol ocağıdır. Ancak büyük kapasitelerde üretimler için optimum kalite ve ekonomi, kupol-indüksiyon çalışmasıyla elde edilir. Bazik yöntemde ergitmenin en belirgin özelliği, kükürt

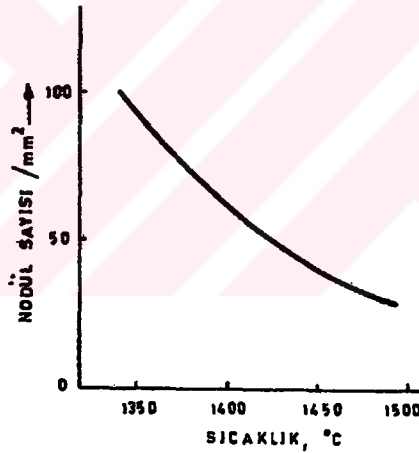
kontrolündeki avantajdır. Bu yöntemde küreleştirici ilavesinden hemen önce banyodaki kükürt %0.025-%0.035 oranlarındadır. Asit kupol fırını ile üretim yapıldığı takdirde ürünlerdeki yüksek kükürt içeriği, küreleştirici ilavesinden önce azaltılmadığı durumda çok fazla küreleştirici harcanmasını gerektirecektir. Asit kupol fırını ile üretimden hemen sonra mutlaka kükürt giderilmesi yapılmalıdır. İndüksiyon fırınlarında ise, metal bileşiminin ve sıcaklığının çok yakın kontrolü mümkün olduğundan kaliteli bir üretim gerçekleştirilebilir [7,9].

Küreleştirme işlemi ergitmeyi, yapıyorsa kükürt gidermeyi takip eder. Küresel grafitli dökme demirlerde grafitleri küreleştirmek için magnezyum (kalsiyum ve bir miktar nadir toprak elementleri ile birlikte) en efektif ve ekonomik küreleştirici olarak kullanılmaktadır. Magnezyum miktarı, dökme demirin ana bileşimindeki kükürt ve oksijen miktarlarına büyük ölçüde bağlıdır. Magnezyum ile muamele esnasında, hem asit hem bazik usulde ergitme için, dökme demir sıcaklığı 1538-1566 °C civarında olup, magnezyumun buharlaşma sıcaklığının oldukça üzerindedir. Dolayısıyla sıvı metal ile temas eden magnezyum aniden buharlaşır ve uygun şekilde yapılmadığı takdirde reaksiyon çok şiddetli olabilir. Gerek reaksiyon şiddetini azaltmak gerekse optimum metalurjik şartları (örneğin döküm halinde karbürsüz yapı) sağlamak için, genellikle magnezyum başka elementler ile alaşımlandırılır. Bazı uygulamalarda küreleştirici ilavesi öncesinde sıvı metal, bir ön hazırlama aşamasına tabi tutulur. Bu işlemde çeşitli ilaveler kullanılırsa da, SiC (silisyum karbür) ilavesi ile ön hazırlama, küreleştirme işleminin başarısını arttırmakta, ayrıca döküm yapısında karbür oluşum eğilimini de azaltmaktadır [5,7-9].

Küreleştirme işlemi ile birlikte veya daha sonra yapılan aşılama işlemi ise, metale katılaşmanın üzerinde oluşacağı çekirdekleri sağlamak amacıyla uygulanmaktadır. Çekirdek görevi görecektir tanecikler katılaştıran fazın aynı olabildiği gibi bir başka malzemeden de olabilirler. Bu tanecikler ilave edildikleri sıvı metal içerisinde katılaşma başlayana kadar erimedikleri zaman yeni kristallerin oluşması ve büyümesi için en uygun zemini oluştururlar. Daha fazla sayıda grafit küresi, daha fazla sayıda grafitleşme merkezi anlamına gelmekte ve dolayısıyla aşılama, grafitleşme eğiliminin artışına, hücrelerarası segregasyonun ve karbür oluşumunun azalışına neden olmaktadır. Aşılama ile yapısal üniformluk sağlandığı için mekanik özellikler de artmaktadır [1,7,9].

Küresel grafitli dökme demirlerde en verimli aşılایıcılar Al, Ca, Ba, Mn ve Zr içeren ferro-silisyum alaşımlarıdır. Yapıda bulunan elementler, çözünürlüğü ve alaşımanın gücünü arttırmak için kullanılırlar. En çok bilinenler % 50 ile % 80 silisyum içerenlerdir [7,9].

Aşılama için çeşitli yöntemler uygulanabilir, fakat uygulamada üç temel yöntem benimsenmiştir. Bunlar, küreleştirici ilavesi ile birlikte veya daha sonra potada yapılan aşılama, döküm sırasında akışta aşılama ve kalıpta aşılama şeklindedir. Düşük küre sayısına ve ötektik karbür biçimlenmesine neden olan zayıf aşılama nedeniyle aşılama ne kadar geç yapılırsa döküm kalitesi de o derece yüksek olur. Aşılama sonrası geçen zamanla aşılamanın etkisi kaybolduğu gibi, bu zaman ısı kaybına da yol açmaktadır ve düşen ısı grafit küre sayısını da azaltacaktır. Ayrıca aşılama sıcaklığı ne kadar yüksek ise aşılama verimi de o kadar düşük olur (Şekil 3.7). Dolayısıyla mümkün olan en düşük sıcaklıkta en son anda kalıpta yapılan aşılama döküm yapısı açısından en uygun sonucu verecektir [7].

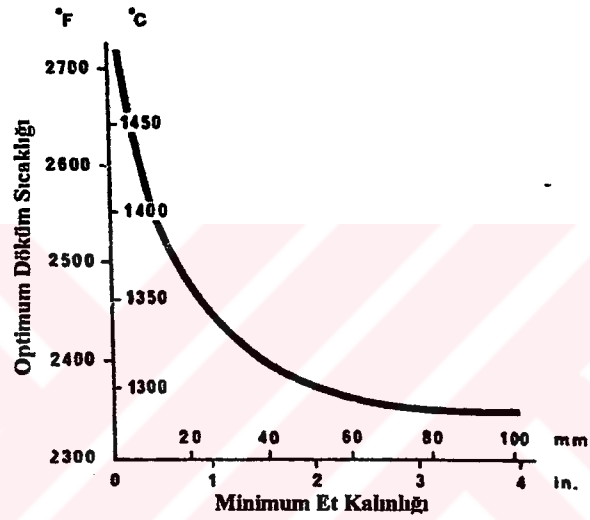


Şekil 3.7. Küresel grafitli dökme demirlerde aşılama üzerine sıcaklığın etkisi [7].

Seçilen aşılama prosesi en az küreleştirme adımı kadar kritiktir; kaliteli bir döküm elde etmek için bileşim, ilave edilen miktar, partikül boyutu ve sıcaklık gibi aşılama parametrelerinin sıkı bir şekilde kontrolü gereklidir. Bunun yanı sıra aşılama işleminde aşılama maddesi tamamen kuru olmalıdır, aksi takdirde döküm yüzeyinde karıncalanma hatasına neden olabilir. Aşılama maddesinin boyutu hızlı ergiyecek kadar küçük, hemen okside olmayacak ve ani patlama göstermeyecek kadar büyük

olmalıdır. Ayrıca, sıvı metal aşılama esnasında curuftan tamamen arınmış olmalıdır [7].

Yüksek kalitede küresel grafitli dökme demir üretimi sırasında küreleştirme ve aşılama işlemlerinin dışında, diğer birçok proses adımı da çok dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir. Örneğin, küreleştirme işleminden önceki tutma sıcaklığı ve süresi eriyiğin yüksek çekirdekleşme potansiyelini sürdürmek ve sıvı metalin yüksek metalurjik kalite faktörünü devam ettirmek için sınırlandırılmalıdır. Döküm sıcaklığı da aynı zamanda çekilmesiz dökümler üretmek için döküm boyutunun bir fonksiyonu olarak optimize edilmelidir (Şekil 3.8) [9].



Şekil 3.8. Küresel grafitli dökme demirlerde farklı kesit boyutları için tavsiye edilen döküm sıcaklıkları [9].

3.6. Küresel Grafitli Dökme Demir Spesifikasyonları

Standart sınıf küresel grafitli dökme demirler için çoğu spesifikasyonlar malzemenin özelliklerine dayanır. Her sınıf küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılmasında mukavemet ve/veya sertlik esas alınır ve bileşim mekanik özelliklere göre ikinci planda önemlidir. Küresel grafitli dökme demirlerin Amerikan ASTM standartlarına göre yapılan sınıflandırmasında çekme ve akma mukavemeti ksi, uzama yüzde şeklinde belirtilmiştir (Tablo 3.3). ASTM sistemi aynı zamanda A 536 [14] ile genel uygulamalarda karşılaşılan standart olmayan sınıfların da açıklanmasını kolaylaştırır. Örneğin A 536'ya (Tablo 3.3). 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 geniş bir şekilde 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 tavlanmış boru ve dökme boru bağlantı parçaları gibi özel uygulamalarda kullanılırlar. ASTM A 536'da listelenenler 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.

SAE, büyük miktarlarda dökümler için küresel grafitli dökme demirleri sınıflandırmada, dökümlerin matriks 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), çekme mukavemetini MPa ve uzamayı % olarak verir. Tablo 3.3'de ASTM, SAE ve ISO standartlarına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılmasında kullanılan özellikler görülmektedir.

Tablo 3.3. ISO, ASTM ve SAE standartlarına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması [1].

Sınıf	Çekme Mukavemeti		Akma Mukavemeti		Minimum% Uzama	Darbe Direnci		Sertlik,HB	Yapı
	MPa	ksi	MPa	ksi		J	ft.lb		
ISO Standartları 1083 (Uluslararası)									
800-2	800	116	480	70	2	-	-	248-352	Perlit
700-2	705	102	420	61	2	-	-	229-302	Perlit
600-3	600	87	370	54	3	-	-	192-269	Perlit +Ferrit
500-7	500	73	320	46	7	-	-	170-241	Ferrit+Perlit
400-12	400	58	250	36	12	-	-	<201	Ferrit
370-17	370	54	230	33	17	13	9.5	<179	Ferrit
ASTM A 536 (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) b									
D4018	414	60	276	40	18	-	-	170 max.	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

Alman DIN 1693 standartına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılmasında ise çekme mukavemeti, akma mukavemeti, % uzama ve Brinell cinsinden sertlik esas alınmıştır. Bu sınıflandırmada küresel grafitli dökme demir kısaca GGG olarak belirtilmektedir (Tablo 3.4).

Tablo 3.4. Alman DIN 1693 standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması [15].

Kısa Gösteriliş	Çekme Mukavemeti N/mm ²	Akma Mukavemeti N/mm ²	Uzama (%)	Sertlik (BHN)	Mikroyapı
GGG 35-3	350	220	22	-	-
GGG 40-3	400	250	18	-	-
GGG 40	400	250	15	120	Ferritik
GGG 50	500	320	7	156	Ferritik-Perlitik
GGG 60	600	380	3	170	Perlitik-Ferritik
GGG 70	700	440	3	302	Perlitik
GGG 80	800	500	2	210	Perlitik

3.7. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri

Mühendislik malzemeleri içerisinde küresel grafitli dökme demirlerin özel yeri, başka hiçbir demir esaslı malzemenin, küresel grafitli dökme demirlerin sahip olduğu mekanik özellikleri ve dökülebilirlik özelliğini birarada sağlayamamasından ileri gelmektedir. Küresel grafitli dökme demir mikroyapısı değişen oranlarda ferrit, perlit ve grafit kürelerinden ibarettir. Bu yapı bileşenlerinin oranlarındaki değişimler mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilemektedir.

Küresel grafitli dökme demirlerde, grafit kürelerinin boyut ve dağılımı katılaşma sırasında belirlenmektedir. Bu özellikler, dökme demire daha sonra uygulanacak bir ısıtma işlemiyle değiştirilemez. Küre boyutu ve dağılımı, küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Bu yüzden, üretim sırasında iyi bir aşılamayla yeterli küre sayısı elde edilmesi ve grafit kürelerinin % 90'dan daha fazla küreselliğe sahip olması istenir [3]. Mukavemet ve süneklik ile ilgili tüm mekanik özellikler küresel olmayan grafit miktarından olumsuz bir şekilde etkilenir. Özellikle, çekme ve yorulma mukavemeti, azalan grafit küreselliğine bağlı olarak önemli ölçüde düşerken akma mukavemetindeki azalma nispeten daha düşük olmaktadır [1].

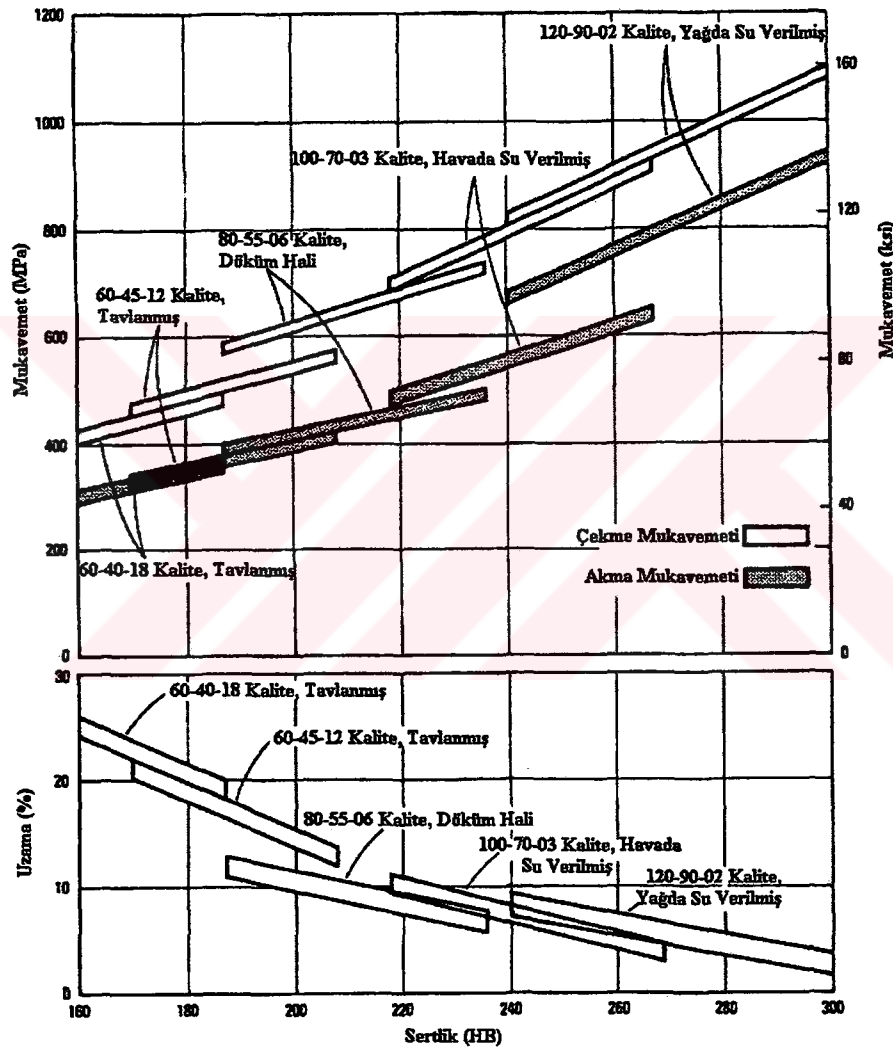
Çekme deneyinden elde edilen mekanik özellikler, farklı küresel grafitli dökme demir sınıflarının bileşimlerindeki farklılıklara bağlı olarak değişmektedir. Şekil 3.9'dan da görülebileceği gibi, ASTM A 536 standardına göre sınıflandırılmış her küresel grafitli dökme demir sınıfının mukavemet ve süneklik değerleri, sertlik ile bağlantılı olarak bir miktar değişmektedir. Bazı durumlarda, istenen mukavemet ve süneklik değerleri diğer sınıfın aynı değerleri ile üst üste gelebilir. Elastisite modülü, hem çekme hem de basma durumunda genellikle grafit miktarı ve grafit yapısının mükemmelliğine bağlı olarak 162-176 GPa arasında değişmektedir. Küresel grafitli dökme demir sınıfına göre elastisite modülü fazla değişmemekte ve genelde çekme ve basma için bulunan değerler birbirine eşit olmaktadır [1,3]. Farklı standartlardaki küresel grafitli dökme demirlerin sertlik-çekme özellikleri ilişkisi Şekil 3.9'da verilmiştir.

Küresel grafitli dökme demirlerin basma mukavemeti ise, çekme mukavemetinden daha yüksektir. Basma halindeki % 0.2 akma mukavemeti, çekme durumundaki % 0.2 akma mukavemetinin genelde 1 ile 1.2 katıdır.

% 90'dan fazla küreselliğe sahip bir küresel grafitli dökme demirin sönüm kapasitesi çeliklere oranla yaklaşık 6-7 kat fazladır. Bu değer, grafit yapısına karşı çok duyarlıdır ve küresellikten çok az bir sapmada bile önemli ölçüde düşer [3].

Küresel grafitli dökme demirlerin darbe direnci (çeliklerde olduğu gibi) sıcaklığa bağlı olup, yapı ve bileşim tarafından önemli ölçüde etkilenmektedir. Matriks yapısı tamamen ferritik olan küresel grafitli dökme demirler, en yüksek tokluğa ve en düşük sünek-gevrek geçiş sıcaklığına sahip olan malzemelerdir. Tokluk derecesi, matriksde artan perlit yüzdesi ile azalmaktadır. Ancak tamamen ferritik veya çoğunlukla ferrit+az perlitten matrikse sahip olanlar, düşük sıcaklıklara inildikçe çok dar bir sıcaklık aralığında ($\sim 100^{\circ}\text{C}$) darbe dirençlerinin % 80 ile 90'ını kaybetmektedirler. Matriks yapısı tamamen perlitik olan küresel grafitli dökme demirlerin darbe dirençleri yüksek sıcaklıklarda, ferritik olanlara nazaran çok daha düşük olmasına karşı deney sıcaklığının düşürülmesiyle dirençteki azalma yüzdesi daha azdır. Bileşimdeki silisyum ve fosfor oranındaki artış darbe direncinde azalma meydana getirerek geçiş sıcaklığının daha yüksek sıcaklıklara kaymasına neden olur.

Küresel grafitli dökme demirlerin yorulma özellikleri değerlendirilirken yorulma mukavemetini etkileyen yüzey pürüzlülüğü, çentik varlığı ve yükleme şekli gibi birçok faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Ferritik bir küresel grafitli dökme demir için, çentiksiz durumda yorulma mukavemeti, çekme mukavemetinin yaklaşık 0.5 katıdır. Yorulma mukavemeti, 740 MPa'ya kadar setleştirilmiş küresel grafitli dökme demirlerde, artan sertlikle çekme mukavemetinin 0.4 katına kadar düşer. Grafit küreselliğinin azalması ve dökümün kesit boyutunun kalınlığının artması da, yorulma mukavemetini düşürür [1,3,7-9].



Şekil 3.9. Değişik sınıflardaki küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri [1].

Küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirliği aynı sertlikteki gri dökme demirden ve aynı mukavemete sahip çelikten daha iyidir. Aynı zamanda korozyona karşı direnci de gri dökme demirinkine eşit, genellikle karbon çeliğinkinden daha iyidir.

Termal şok direnci bakımından ise küresel grafitli dökme demirler, gri dökme demir ve çelikten daha üstündür. Çok az oranda molibden ilavesi ile hem ferritik hem de perlitik küresel grafitli dökme demir sınıfları için kısa süreli sıcak mukavemet ve sürünme özellikleri önemli ölçüde artmaktadır [3,7,9].

Yapısındaki küre şekilli grafitler, yağlayıcı olarak davrandıklarından aşınmaya maruz parçalarda kullanılan küresel grafitli dökme demirlerin performansı en kaliteli gri dökme demirinkine eşit ve karbon çeliğinin gösterdiği performanstan yüksektir [1,7-8,10-14]

Küresel grafitli dökme demirlerde kesit kalınlığının özellikler üzerindeki etkisi gri dökme demirde olduğu kadar ciddi değildir. Ancak kesit boyutlarının, katılaşmada soğuma hızını etkilemesi sonucu, bileşime de bağlı olarak, ferrit ve perlitin sertliği ve yapıdaki perlitin oranı ve tane küçüklüğü değişmektedir. Yüksek mukavemet ve sertlik, dolayısıyla düşük süneklik, ince perlitik veya asiküler yapılı matriks ile elde edilir. Buna karşılık, mukavemet ve sertlikteki azalmayla beraber, yüksek süneklik, matriksin tamamen ferritik olmasıyla mümkündür. Ayrıca çok kalın kesitlerde grafit şeklinin bozulma ihtimali daha fazla olmaktadır [7].

3.8. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları

Dökme demir boru endüstrisi küresel grafitli dökme demirlerin en büyük kullanıcısı durumundadır (küresel grafitli dökme demir borular toplam küresel grafitli dökme demir üretiminin % 44'ünü oluşturmakta). Küresel grafitli dökme demir borular genellikle savurmalı döküm tekniği ile üretilmektedirler. Ayrıca boru endüstrisinde kullanılan birçok valf ve bağlantı parçası da yine küresel grafitli dökme demirlerden üretilmektedir [1].

Küresel grafitli dökme demirlerin ikinci büyük kullanım alanı % 29 tüketim oranıyla otomotiv ve taşımacılık endüstrisidir [1]. Ekonomik avantajlarından ve yüksek güvenilirliğinden dolayı küresel grafitli dökme demirler otomobillerin krank milleri, motor bağlantı çubukları, direksiyon mafsalları, egsoz manifoldları, avare dişli kolu, piston halkaları, tekerlek göbeği, silindir gömlekleri ve süspansiyon sistemi parçaları gibi kritik parçalarında yaygınca kullanılmaktadır [3].

Tarım ve yeryüzü hareketleriyle ilgili uygulamalarda, yüksek mukavemet ve tokluğa sahip dirsekler, kavramalar, bilyalar, hidrolik valfler, zincir dişlileri ve ray parçaları da 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, petrol kuyusu donanımları, kompresör gövdeleri ve kağıt üretim makineleri verilebilir [1,3-5,7-10].



4. OSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

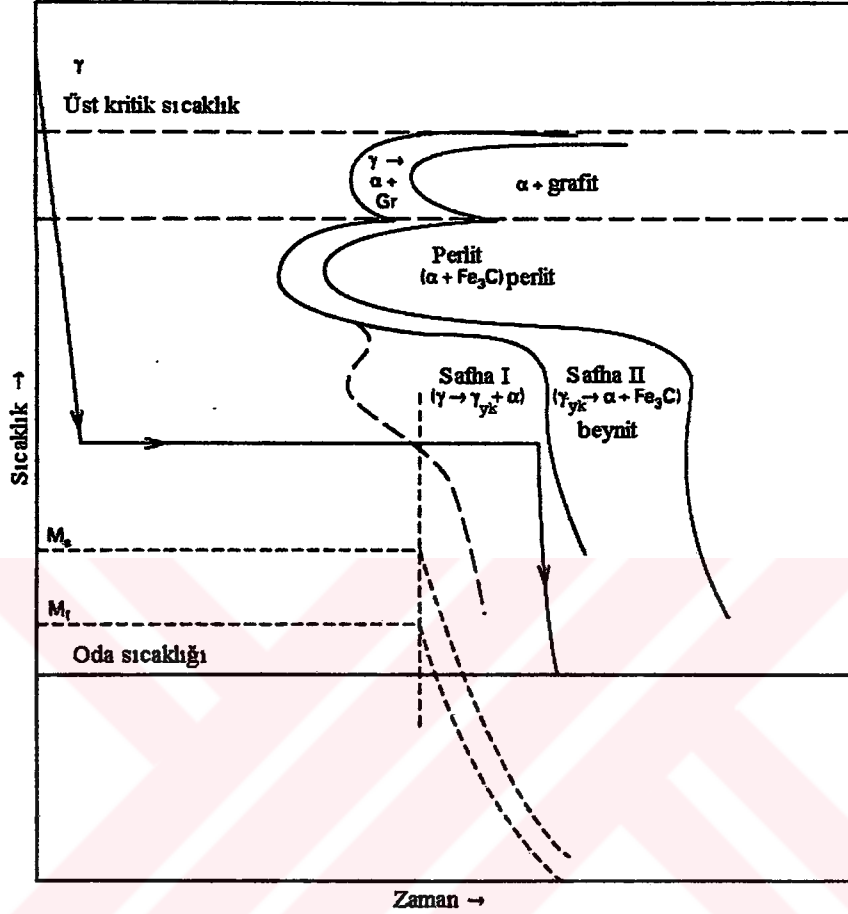
4.1. Giriş

Küresel grafitli dökme demir teknolojisinin gelişmesine paralel olarak daha yüksek mukavemete sahip küresel grafitli dökme demir üretmek amacıyla çalışmalar devam etmiş, ancak grafit şeklini küreselliğin ötesinde bir morfolojiye dönüştürebilmenin imkansız olduğu fark edilerek, malzemenin mekanik özellikleri, matriks yapısının modifikasyonu yoluyla geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalara bağlı olarak, 1950'li yıllarda ostemperleme ısı işlemi adı verilen bir ısı işlemi uygulanarak oldukça mukavemetli, tok ve aşınmaya karşı dirençli bir küresel grafitli dökme demir yapısı elde edilmiş ve elde edilen bu malzeme ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir olarak adlandırılmıştır [3]. Ancak ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin oldukça kabul edilen bir mühendislik malzemesi olarak kullanılması 1980'li yıllardan itibaren ağırlık kazanmıştır [16]. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler, ekonomik avantajlarından dolayı mühendisliğin birçok sektöründe özellikle de otomotiv ve tarım makineleri endüstrisinde kullanılan yüksek mukavemetli dövme çelik parçaların yerine geçebilecek bir malzeme olarak geliştirilmişlerdir. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir matriksi, "ausferrite" olarak bilinen ferrit ve yüksek karbonlu ostenitin karışımı bir mikroyapıdan oluşmaktadır. Bu çift bileşenli mikroyapı, yapıdaki grafitlerin küresellikleri ile de birleşince ortaya mukavemet ve sünekliğin çok iyi bir bileşiminin sağlandığı ürünler çıkmaktadır [17].

4.2. Ostemperleme Isıl İşlemi

Küresel grafitli dökme demirde gerçekleştirilen ostemperleme ısı işleminin amacı, yüksek karbonlu ostenitin eşlik ettiği, karbürsüz ferritten meydana gelmiş asiküler

(beynitik) bir matriks yapısı oluşturmaktır [18]. Ostemperleme ısıt işleminin şematik olarak gösterimi, Şekil 4.1’de küresel grafitli bir dökme demirin izotermal dönüşüm (IT) diyagramında verilmiştir.

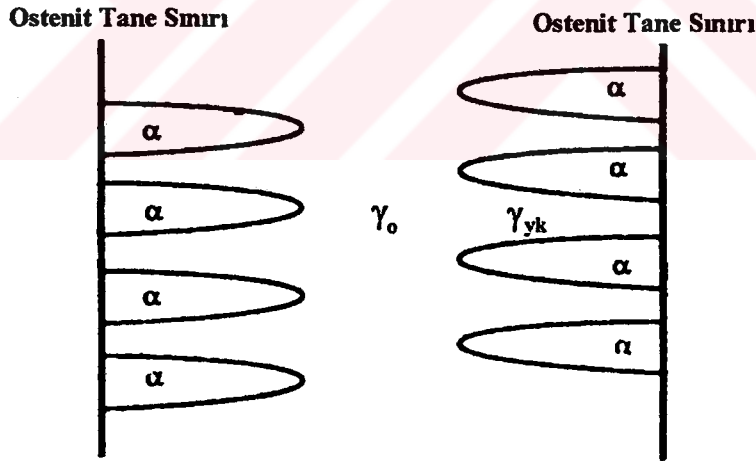


Şekil 4.1. İzotermal dönüşüm diyagramında ostemperleme ısıt işlemi için işlem basamakları [1].

Ostemperleme, iki basamaklı bir ısıt işlemdir. İlk aşamada döküm matriks yapısı, 850-950 °C’lik bir sıcaklık aralığına ısıtılarak tamamen ostenite dönüştürülür. Bu aşamada, ostenitin karbon miktarı, ostenitleme sıcaklığı ve küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimine bağlıdır. Ostemperleme işleminin ikinci aşaması, ostenitlenen dökümlerin, izotermal bir tuz banyosunda 250-400 °C arasında değişen bir ostemperleme sıcaklığına çabuk soğutulması ve bu sıcaklıkta izotermal dönüşüm tamamlanana kadar belirli bir süre tutulmasını içerir. Ostenitleme sıcaklığından ostemperleme sıcaklığındaki bir izotermal tuz banyosuna geçiş, perlitik ve ferritik dönüşüme meydan vermeyecek kadar hızlı olmalıdır. Alaşımız küresel grafitli dökme demir, perlit dönüşümünü önlemek için yaklaşık 20 saniye içerisinde

ostenitleme sıcaklığından ostemperleme banyosuna aktarılmalıdır. Ancak yapıya ilave edilen nikel ve molibden bu süreyi daha yüksek seviyelere çeker ve böylece daha kalın parçalar ostemperlenebilir [1,3,16,19].

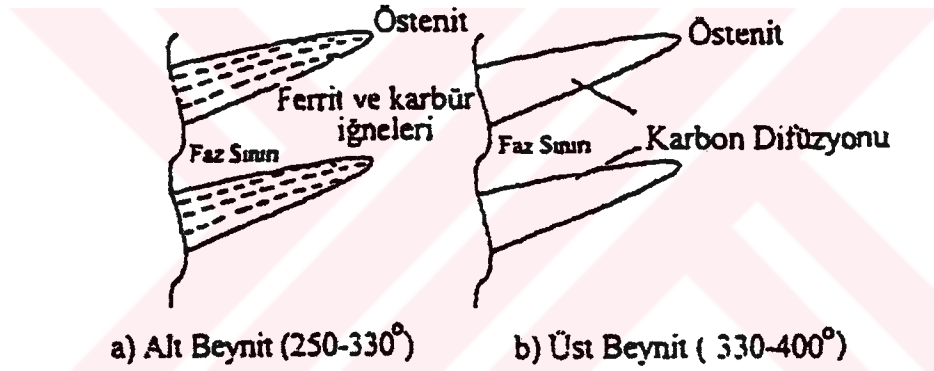
Ostemperleme sırasında meydana gelen yapısal değişiklikler Şekil 4.2’de verilmiştir. Birbirlerinden karbonca doymuş ince ostenit tabakaları ile ayrılan ferrit tabakaları, ostenit tane sınırlarında çekirdeklenirler. Daha sonra boyutu büyük ölçüde ostemperleme sıcaklığının bir fonksiyonu olan beynitik ferritin ostenit içerisinde büyümesi meydana gelir. Beynitik ferritin büyümesi esnasında büyüyen ferrit tabakalarının bünyesindeki karbonun bir kısmı ostenite doğru yayılır. Sonuçta, artan ostemperleme süresine bağlı olarak, ostenit karbonca zenginleşir ve böylece kararlılığı yükselir. Karbonca zenginleşmiş ostenit “yüksek karbonlu ostenit” olarak bilinir. Karbon seviyesi, osteniti termal olarak kararlı hale getirmeye yetecek kadar yüksektir. Bu yüzden, ostemperleme işleminin sonundaki havada soğutmada ostenit kalıntı olarak kalır. Reaksiyon ilerledikçe, ferritik tabakalardan ostenite karbon difüzyonu oldukça güçleşir, ferrit tabakalarının büyümesi durur ve sonuçta “ausferrite” olarak da adlandırılan beynitik bir yapı oluşur [3,16,20,21].



Şekil 4.2. Ostemperleme sırasında ostenitin katı hal dönüşümü [16].

Şekil 4.1’de martensit dönüşüm sıcaklığının (M_s) hemen üzerindeki bir izotermal işlem sonrası oluşan beynit yapısı alt beynit, perlitik dönüşüm sıcaklığının hemen altında ve alt beynit oluşum sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta oluşan yapı ise üst beynit olarak adlandırılır. İzotermal dönüşümü takip eden mikroyapı büyük ölçüde ostemperleme sıcaklığı T_A ’ya bağlıdır. Yaklaşık 330 °C’nin altındaki (240-

330°C sıcaklık aralığı) düşük bir ostemperleme sıcaklığı T_A , ostenitin çok aşırı soğumasına ve karbonun difüzyon hızının düşük olmasına sebep olur. Bu yüzden, beynitik ferritten ostenite doğru yayınan karbon miktarı çok azdır ve karbonun geri kalanı ferrit tabakalarında sementit (Fe_3C) olarak çökelir (Şekil 4.3.a). Sonuçta, ferrit tabakalarının çekirdekleşme hızı, ferrit tabakalarının büyüme hızından daha yüksek olduğu için, 240-330°C sıcaklık aralığındaki izotermal dönüşüm “alt beynit” olarak bilinen yapıyı ortaya çıkartır. Bu yapı, her ne kadar beynitik ferrit ve yüksek karbonlu ostenitten ibaret olarak kabul edilse de, çok düşük oranda martensit de içermektedir. Maksimum tokluğun elde edildiği şartlarda yapı, % 10 ila % 20 oranında yüksek karbonlu ostenit ihtiva eder. Benzer şekilde, komşu ferrit tabakçıkları arasında oluşan iğne şeklindeki yüksek karbonlu ostenit bölgesi de ince bir görünümündedir [3,22].



Şekil 4.3. Alt ve üst beynit oluşum mekanizmaları [3].

330 °C-400 °C sıcaklık aralığında değişen daha yüksek ostemperleme sıcaklıklarında karbonun difüzyon hızı bir önceki duruma göre (ostemperleme sıcaklığı T_A 'nın 240-330°C arasında değiştiği durum) oldukça yüksektir ve böylece karbon büyüyen ferrit tabakalarından ostenite doğru daha hızlı yayınabilir. Bu durum, özellikle büyüyen ferrit tabakaları arasındaki ostenitin karbonca zenginleşmesine sebep olur. Ostemperleme sıcaklığının yükselmiş olması, martensit oranını düşürürken, kalıntı ostenit miktarını arttırır. Bütün bu değişiklikler hep birlikte “üst beynit” yapısının oluşumuna sebep olur (Şekil 4.3.b). Dönüşüm süresi ilerledikçe, ostenitin karbon miktarı artar ve beynit reaksiyonunu itici gücü azalır. Bu esnada yapıda bulunan

yüksek silisyum miktarı (% 2-3 Si), karbür oluşumunu engeller. Ayrıca, yüksek karbon oranı M_s (martensit başlangıç sıcaklığı) sıcaklığını düşürür ve bu yüzden ortam sıcaklığına soğuma esnasında ostenit kararlı bir durumdadır. Üst beynit yapısında, ostemperleme sıcaklığı T_A 330-400 °C aralığında bir değer aldığı için nihai mikroyapı, alt beynit yapısına göre daha kaba ve karbürsüz ferrit tabakaları ve kalıntı ostenit yapısından ibarettir. Yüksek karbonlu ostenit, kütsel bir şekle sahiptir (blocky austenite), yapı içinde rasgele dağılmış durumdadır ve maksimum tokluğun elde edildiği şartlarda yapıda %45 oranında bulunduğu bildirilmiştir [3,22,23].

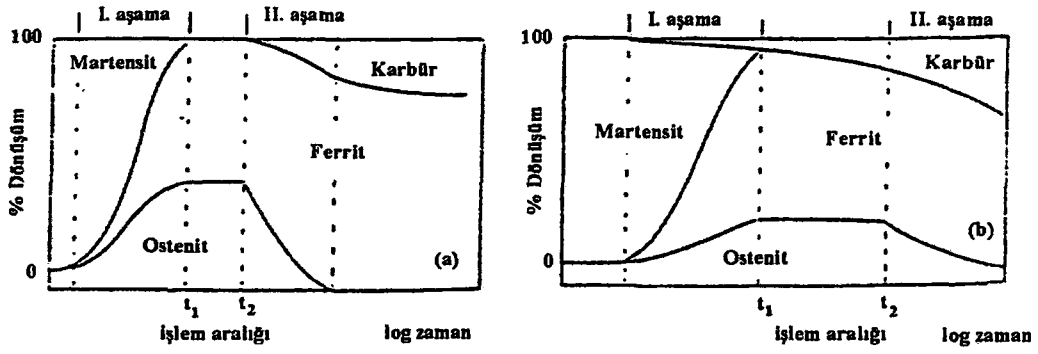
Genelde, 240-330 °C arasında ostemperlenen ve alt beynit yapısı gösteren bir kütsel grafitli dökme demir parça, çok yüksek (neredeyse maksimum) mukavemet, sınırlı süneklilik ve oldukça yüksek sertlik değerine sahiptir [1].

330-400 °C arasında ostemperlenen ve üst beynit yapısı gösteren bir kütsel grafitli dökme demir parça ise, yüksek süneklilik ve toklukla ilişkili olarak nispeten yüksek mukavemet, orta derecede sertlik değeri gösterir. Maksimum aşınma direnci ve deformasyon sertleşmesi, ortamda yüksek miktarda kalıntı ostenit olduğunda, yani üst beynit yapısı gösteren bir malzemede görülür [1,3].

Ostenitin karbon bileşimi Fe-C denge diyagramındaki maksimum karbon çözünürlüğü oranına (yaklaşık % 1.7-2) ulaştığında yüksek karbonlu ostenit, ferrit ve karbüre ayrışır. Sonuç olarak kütsel grafitli dökme demirlerde izotermal işlem sırasında meydana gelen dönüşümler ostemperleme zamanına bağılı olarak iki aşamalı bir reaksiyon ile meydana gelmektedir [21,24]. Şekil 4.4'den ostemperleme işlemi esnasında meydana gelen mikroyapısal değışiklikler görülebilir [21].

Ostemperleme işlemi esnasında mikroyapıda meydana gelen değışimler, bir alt beynit yapısının (Şekil 4.4.a) ve bir üst beynit yapısının (Şekil 4.4.b) değışen ostemperleme sıcaklığına bağılı olarak ortaya çıkmasını sağlar [3,21,24].

Birinci aşamada (numunenin izotermal işlem banyosuna daldırılması ile başlamıştır), düşük karbonlu ostenit, yüksek ostemperleme sıcaklıklarında beynitik ferrit (α) ve yüksek karbonlu ostenite (γ_k) düşük ostemperleme sıcaklıklarında ise beynitik ferrit/karbür ve yüksek karbonlu ostenite dönüşür [3,16].



Alt Beynit

(a)

Üst Beynit

(b)

Şekil 4.4. Ostemperlemenin I. ve II. aşamaları ile işlem aralığında meydana gelen mikroyapısal değişiklikler ve yüzde dönüşüm [21].

Ostemperleme işleminin birinci aşamasını,



eşitliği ile ifade etmek mümkündür [16]. Bu işlem süresinin artması ile, daha sonra I. aşamada oluşan yüksek karbonlu ostenit, ostemperleme prosesinin II. aşamasında,



reaksiyonu gereğince termodinamik olarak daha kararlı olan ferrit ve karbüre (Fe_3C) ayırır [16].

I. aşamanın sonunda ferrit oluşumundan dolayı, ostenit karbonca doyar ve oda sıcaklığına soğuma sırasında matensite dönüşmeyecek kadar kararlı hal alarak “tam ostemperlenmiş” küresel grafitli dökme demir yapısını oluşturur. Oysa I. aşamanın herhangi bir yerinde ostemperleme işlemine son verildiğinde (yani ostemperleme süresi azaltıldığında) yapıdaki ostenit henüz karbonca doygunluğa erişmediği için oda sıcaklığına soğuma sırasında martensite dönüşecektir. I. aşama sonunda ortaya çıkan mikroyapı, karbürsüz ferrit ve yüksek karbonlu ostenitten ibarettir (I. aşama ürünleri “ausferrite” olarak adlandırılır) [3,16].

II. aşama sonunda ortaya çıkan mikroyapı ise ferrit ve karbürden ibarettir. Şekil 4.4'den ostemperleme süresi arttıkça martensit miktarının azaldığı ve beynitik ferrit ve kalıntı ostenit miktarının arttığı görülmektedir [24,25]. I. aşamada martensitin mevcudiyeti (dönüşmemiş düşük karbonlu ostenitten kaynaklanmaktadır) ve II. aşamada ise ürün olarak karbürün oluşması mekanik özelliklere zararlıdır [25,26]. Karbür oluşumunun özellikle mukavemet, sünelik ve tokluğu düşürmesinden dolayı II. aşama ürünleri kullanışlı değildir [4]. Maksimum mekanik özelliklere, yapıda % 60-80 oranında beynitik ferrit ve % 20-40 oranında kalıntı ostenit olduğunda ulaşılmaktadır. Başlangıçta oluşan ferrit tabakalarının sayısı, şekli ve boyutu I. aşama ile belirlenir. Dolayısıyla, faydalı nihai yapıyı kontrol edebilmek ve istenen özellikleri elde edebilmek için I. kademeyi kontrol etmek gerekir. Bu kademenin kontrolü, seçilen ostemperleme sıcaklığında ostemperleme süresinin kontrolüyle gerçekleşir. Sonuç olarak, Şekil 4.4'den optimum mekanik özelliklerin, sadece "işlem (proses) aralığı" olarak tanımlanan bir zaman aralığında elde edilebileceği sonucuna ulaşılmaktadır [24,25].

Şekil 4.4 incelendiğinde, yüksek karbonlu kalıntı ostenit miktarının I. aşamada ostemperleme süresinin artmasına bağlı olarak arttığı ve t_1 zamanında I. aşama reaksiyonunun $[\gamma \rightarrow \alpha + \gamma_{yk}]$ sonuna karşılık gelen bir platoya ulaştığı (bu plato, yüksek karbonlu ostenitin ulaştığı maksimum değeri belli bir süre koruduğunu ifade etmektedir) görülür. t_2 zamanından itibaren, yüksek karbonlu ostenit daha kararlı ferrit ve karbür fazlarına dönüşmeye başladığında, yani II. aşama reaksiyonu $[\gamma_{yk} \rightarrow \alpha + Fe_3C]$ oluştuğunda, kalıntı ostenit miktarı azalmaya başlar. I. ve II. aşama reaksiyonları arasında "işlem (proses) aralığı" $t_2 - t_1$ olarak tanımlanan, bir ostemperleme zaman aralığı yani bir plato bölgesi mevcuttur. Yüksek ostemperleme sıcaklıklarındaki bu işlem aralığında, yarı kararlı bir beynitik ferrit ve yüksek karbonlu ostenit yapısı mevcuttur ve daha düşük ostemperleme sıcaklıklarında ise beynitik ferrit/karbür ve yüksek karbonlu ostenitten biri meydana gelir. Bu tarz yapıya sahip (yarı kararlı beynitik ferrit ya da beynitik ferrit/karbür ve yüksek karbonlu ostenitten ibaret olan yapı) ve "ausferrite" denilen bir küresel grafitli dökme demir optimum mekanik özellikleri gösterir. t_1 zamanının altında (I. aşamada), termal olarak kararsız düşük karbonlu ostenitten kaynaklanan martensitin varlığı, t_2 zamanının üzerinde ise (II. aşamada) yapıdaki karbürlerin varlığı, mekanik özelliklere (özellikle tokluk ve süneliğe) zararlıdır. Dolayısıyla optimum mekanik özelliklerin, yalnızca

ostemperleme işlem aralığı içinde gerçekleştiğinde elde edileceği sonucuna ulaşılır [23-26].

Ostemperleme sürecinde, yüksek karbonlu ostenit oranının zamana bağlı olarak sabit kaldığı bir işlem aralığının olmadığı durumlarda ($t_1 > t_2$) optimum mekanik özellikler elde edilemez ve bu durumda işlem aralığı kapalı olarak tanımlanır [3].

4.3. Üretim Parametrelerinin Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir Karakteristiklerine Etkisi

İstenen mikroyapı ve mekanik özelliklerde ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin elde edilebilmesi ostenitleme ile ostemperleme koşulları ve alaşım elementlerinin sıkı bir şekilde kontrolüne bağlıdır.

4.3.1. Ostenitleme Koşullarının Etkisi

Uygun kimyasal bileşimdeki küresel grafitli dökme demir dökümlerin ostenitlenmesi, ostemperleme ısıl işleminin ilk adımıdır. Ostenitleme sıcaklığı, ostemperlenmiş dökümlerin yapısı ve özelliklerini etkileyen ostenitin karbon içeriğini kontrol eder. Ostenitleme sıcaklığının yükselmesi ostenitin karbon içeriğini de arttırmaktadır. Ostenitin yüksek karbon içeriği ostenitin sertleşebilirliğini ve kararlılığını artırarak, ostemperleme sürecinde reaksiyon hızının yavaşlamasına neden olmaktadır. Ostenitleme sıcaklığının düşürülmesi, I. aşama reaksiyonu için itici gücü artırır ancak, II. aşama reaksiyonu üzerinde çok küçük bir etkisi vardır. Sonuçta işlem aralığı daha da genişler. Bu yüzden segregasyon bölgelerinde, I. aşama reaksiyonun yavaşlatılmasıyla daha yüksek ostenitleme sıcaklıklarında kapanmış olan işlem aralığı, ostenitleme sıcaklığının düşürülmesi ve mekanik özelliklerdeki olumlu gelişmelerle beraber yeniden açılır. Üstelik, ostenitleme sıcaklığının düşürülmesi ile işlem aralığına daha kısa ostemperleme süreleri sonucunda ulaşılır ve ostemperlemeden sonra elde edilen mikroyapı daha karardır ve daha az martensit içerir [3,4,27,28]. Ancak ostenitleme sıcaklığının azaltılmasının, ostemperlenebilirlikte bir azalma ve matriks içerisinde ferrit oluşması olasılığı şeklinde dezavantajları da vardır. Ostenitleme sıcaklığının artması ile ostemperlenmiş yapıdaki beynitik ferrit tabakalarının uzunluğu artar, sayıları ve dağılımlarındaki düzensizlik azalır. Ayrıca ostenitleme sıcaklığının artması ile, sertlik

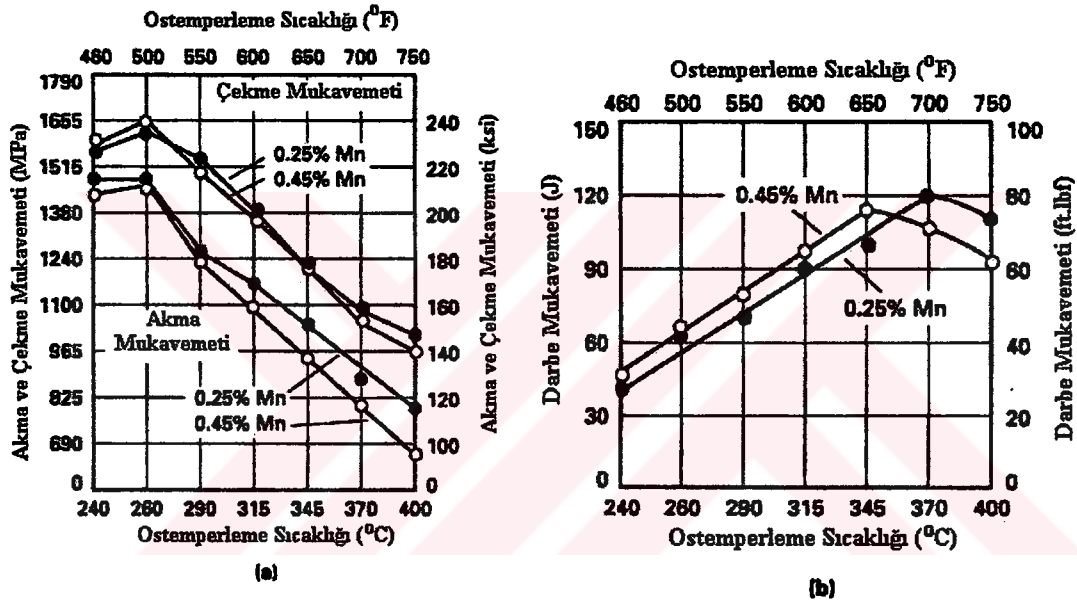
ve kalıntı ostenitin hacim oranı da artmaktadır [4,27]. Ostenitleme sıcaklığının aşınma direnci üzerindeki etkisi ise çeşitli çalışmalar ile incelenmiştir. Küresel grafitli dökme demirlerin abrasiv aşınma özellikleri üzerinde yapılan bir çalışmada [29], su verilmiş küresel grafitli dökme demirler ve çeliğin aşınma performanslarının yüksek ostenitleme sıcaklıklarında ostenitlendiklerinde daha iyi olduğu belirtilmiştir. Bir diğer çalışmada ise artan ostenitleme sıcaklığı ile birlikte abrasiv aşınma direncinin arttığı saptanmıştır [30].

Ostenitleme süresi ise, karbonca doymuş ostenite tamamen dönüşmüş dökümleri sağlayacak minimum zaman olarak seçilmelidir. 900 °C ostenitleme sıcaklığında 2.5 cm çapındaki dökümler için 1 saat yeterli olmaktadır. Ancak ostenitleme sıcaklığının düşmesi ile birlikte alaşım elementlerinin mikrosegregasyonlarını azaltmak için ostenitleme süresi artmaktadır. Çeliklerde olduğu gibi, ostenitleme zamanı ve sıcaklığı dökümün kesit boyutunun bir fonksiyonu olarak ayarlanmalıdır [16]. Ayrıca küresel grafitli dökme demir yapısındaki ferrit, perlit ve grafit gibi bileşenlerin miktarı da ostenitleme süresini etkiler. Perlitik bir matrikse sahip yarı kararlı sistemde (Fe-Fe₃C) ostenitin çekirdekleşmesi ve büyümesi ferritik bir matrikse göre daha kolaydır dolayısıyla perlitik bir matriks, ostenitleme süresini kısaltır. Grafit kürelerinin sayısının fazla olması da ostenitleme sürecini kısaltmasına rağmen, etkisi perlitik matriks kadar fazla değildir. Yüksek küre sayısı, ostemperleme sürecinde daha fazla çekirdekleşme merkezinin oluşmasına ve sonuçta segregasyon bölgelerinin daralmasına yol açar [3].

4.3.2. Ostemperleme Koşullarının Etkisi

Gerek ostenitleme sıcaklığı, gerekse ostemperleme sıcaklığı ve süresinin, ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri üzerinde etkisi vardır. Ancak ostenitleme sıcaklığının mekanik özellikler üzerindeki etkisi, ostemperleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, ostemperleme sıcaklığı ve süresinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi, ostenitleme sıcaklığına göre daha önemli olmaktadır. Önceden seçilmiş ostemperleme ve ostenitleme sıcaklıkları için mekanik özelliklerin optimum seviyeye getirilebilmesi için ostemperleme süresinin doğru seçilmesi gereklidir. Benzer şekilde, ostemperleme sıcaklığının doğru seçimi de üretilen ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin sınıfını belirtmesi açısından önemlidir [3,25].

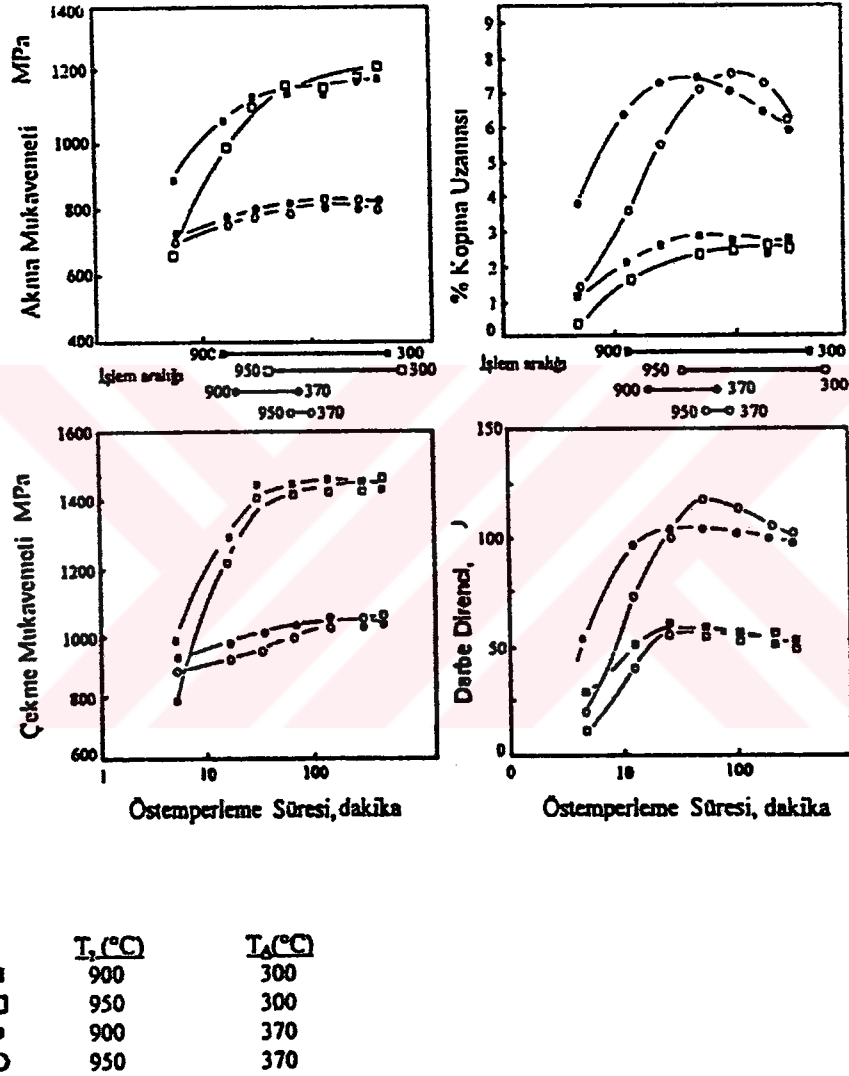
Ostemperleme sıcaklığı, nihai mikroyapının ve dolayısıyla mekanik özelliklerin birinci belirleyicisidir. Daha önce de açıklandığı üzere, ostemperleme ısı işlemi 250-400 °C arasındaki bir sıcaklıkta yapılır. Yaklaşık 330 °C'nin altındaki sıcaklıklarda elde edilen yapı alt beynit iken, bu sıcaklığın üzerinde meydana gelen yapı üst beynittir. Alt beynit yapısı yüksek mukavemetli, sert ve aşınmaya dayanıklı bir yapı iken, üst beynit yapısı nispeten daha az mukavemetli fakat, daha sünek ve daha tok bir yapıdır. Ostemperleme sıcaklığındaki artışa bağlı olarak üst beynit yapısı, alt beynit yapısına göre daha az martensit ve daha fazla kalıntı ostenit içerir [3,25]. Şekil 4.5'de ostemperleme sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi görülmektedir [1].



Şekil 4.5. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin (a) akma ve çekme mukavemetine (b) darbe mukavemetine ostemperleme sıcaklığının etkisi [1].

Ostemperleme süresinin seçimi de oldukça önemli bir parametredir. Ostemperleme süresi, belirli ostenitleme ve ostemperleme sıcaklıkları için mekanik özellikleri optimize etmek amacıyla seçilir. Ostemperleme süresinin artmasıyla birlikte mukavemet, süneklik ve darbe direnci artarken sertlik azalır. Kısa ostemperleme sürelerinde mekanik özelliklerde görülen düşük değerler, büyük oranda martensitten kaynaklanmaktadır. Bu martensit, ostemperleme sıcaklığından oda sıcaklığına soğuma sırasında dönüşmemiş düşük karbonlu ostenitten ileri gelmektedir. Ostemperleme süresi arttıkça martensit miktarı azalır fakat, beynitik ferrit ve yüksek

karbonlu ostenit miktarları artar. Bu duruma paralel olarak, mekanik özelliklerde bir artış olmasına rağmen, bu artış sürekli değildir. Uzun ostemperleme sürelerinde, mukavemet neredeyse sabit kalırken, süneklik ve darbe enerjisi II. aşama reaksiyonun oluşmasına paralel olarak keskin bir şekilde azalır. II. aşama reaksiyonu ilerledikçe yapıdaki yüksek karbonlu kalıntı ostenit miktarı azalır [3,31]. Ostemperleme süresinin mekanik özelliklere etkisi Şekil 4.6'da görülmektedir [25].



Şekil 4.6. Ostemperleme süresinin mekanik özelliklere etkisi [25].

Genel olarak, kırılma tokluğu artan ostemperleme sıcaklığı ile birlikte darbe direncine benzer şekilde artmaktadır. Ancak Yamamoto ve Kobayashi, ostemperleme süresinin artmasıyla birlikte, karbür oluşumuna bağlı olarak kırılma tokluğunun

azaldığını belirtmişlerdir. Yorulma mukavemeti ise ostemperleme sıcaklığına bağlı olarak önemli bir değişme göstermemektedir. Diğer taraftan sertliğin yorulma mukavemetini belirlemede en önemli parametre olduğu ve artan sertlikle yorulma mukavemetinin azaldığı belirlenmiştir. Grafit kürelerinin ortalama çapı azaldıkça, grafit kürelerinin çentik etkisi azalmakta ve yorulma mukavemeti yükselmektedir [4].

Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin adhesiv ve abrasiv aşınma davranışlarının ostemperleme sıcaklığı ile ilgisini araştırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla yapılan bir çalışmada [29], küresel grafitli dökme demirlerin ve yüksek karbonlu çeliğin aşınma dirençlerinin ostemperleme sıcaklığındaki bir artış ile artabileceği saptanmıştır. Ayrıca aynı çalışmada küresel grafitli dökme demirlerin matriks yapısından önemli ölçüde etkilenecek ve sahip olduğu tahrip edici özellikteki grafit fazı ile birlikte aşınma direncinin benzer matrikse sahip çeliğin aşınma direncine göre daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Aynı zamanda, su verilmiş yapıların ostemperlenmiş yapıya göre daha yüksek abrasiv aşınma direncine sahip oldukları yine aynı çalışmada belirtilmiştir.

Jeng [30], kullandığı ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler için ağırlık kaybının artan ostemperleme sıcaklığı ile arttığını ve abrasiv direnç yeteneği açısından bakıldığında en uygun ostemperleme sıcaklığının 270-300 °C aralığında olduğunu bulmuştur. Ayrıca, aynı ostemperleme sıcaklığı için ağırlık kaybının, genelde artan ostemperleme süresi ile azaldığını ve 4 saat sonra minimum değere ulaştığını belirtmiştir.

Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin abrasiv aşınma özelliklerinin incelendiği bir başka çalışmada [32], ostemperleme sıcaklığı 250 ile 400 °C aralığında değiştirilmiş ve ostemperleme sıcaklığına bağlı olarak oluşan alt ve üst beyrit yapılarının aşınma özellikleri döküm halindeki malzemenin aşınma özellikleri ile kıyaslanmıştır. Sonuçta, döküm halindeki küresel grafitli dökme demirin düşük sertlik en kötü aşınma direncine sahip olduğu saptanırken, üst beyrit yapısının orta seviyede bir aşınma direncine sahip olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda, aşınma direncinin artan ostemperleme sıcaklığı ile birlikte azaldığı görülmüştür.

Alüminyum içeren bir ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin aşınma davranışının incelendiği çalışmada [33] ise, ostemperleme sıcaklığı 250-400 °C, ostemperleme süresi ise 5-240 dakika arasında değiştirilmiştir. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin abrasiv aşınma direncinin hem ostemperleme sıcaklığına hem de ostemperleme süresine bağlı olduğu bulunmuştur. Yüksek ostemperleme sıcaklığı ve süresinde ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin abrasiv aşınma direncinde artış belirlenmiştir.

Fordyce ve Allen [34], ostemperlenmiş bir küresel grafitli dökme demirin kuru kayma aşınmasını incelemişlerdir. Ostemperleme sıcaklığı 250-350 °C aralığında, ostemperleme süresi ise 30 dakikada tutulmuştur. Ancak kayma hızı 0.5 m/s'den 2 m/s'ye değiştirilmiştir. Sonuçta, ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin kayma aşınma direncinin oldukça iyi olduğu ve özellikle yüksek hızlarda sertleştirilmiş çeliğine eşit olduğu bulunmuştur. Ayrıca 1 m/s'den daha düşük kayma hızlarında şiddetli aşınma şartlarının olduğu, bu koşullar altında aşınma direncinin yapıya bağımlı olduğu ve ostemperleme sıcaklığının düşüşü ile birlikte aşınma direncinin arttığı saptanmıştır. 1.5 m/s'den yüksek kayma hızlarında ise hafif aşınma şartlarının olduğu gözlenmiştir.

Prado ve arkadaşları da [35], ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin kuru kayma aşınmasını incelemişlerdir. Uygulanan düşük yükler için ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin kuru kayma aşınması dirençlerinin, ostemperleme sıcaklığından bağımsız olduğu ancak, uygulanan yüksek yükler için (500 ve 800 N) ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin kuru kayma aşınması dirençlerinin ostemperleme sıcaklığına kuvvetli bir şekilde bağlı olduğu bulunmuştur. Ayrıca yüksek yükler uygulandığında, en yüksek aşınma direncinin 340 °C'lik ostemperleme sıcaklığında elde edildiği saptanmıştır.

Yüksek manganez içerikli (% 1.5) ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin aşınma davranışının incelendiği bir başka çalışmada [36] ise, kullanılan küresel grafitli dökme demirler önce çeşitli ostenitleme sıcaklıklarında (870, 920, 970 °C) ostenitlenmişler, ardından 270 °C'de ostemperleme ısı işlemine maruz bırakılmışlardır. Sonuçta, yüksek manganez içerikli ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirde maksimum darbe enerjisinin uzun ostemperleme zamanları ile elde edileceği, dönüşmemiş ostenit hacminin darbe direncinin geliştirilmesinde ana

parametre olduğu ve % 5-10'luk bir dönüşmemiş ostenit hacminin yüksek manganezli ostenperlenmiş küresel grafitli dökme demirin aşınma direncini geliştireceğı belirlenmiştir. Ayrıca, yüksek ostenitleme sıcaklıklarının en iyi aşınma direnci ile sonuçlanacağı fakat bunun, darbe direncini azaltacağı ve maksimum aşınma direncini elde etmek için gerekli zamanın, maksimum darbe enerjisini elde etmek için gerekli olan zamandan daha düşük olacağı saptanmıştır.

Joel Hemanth [37], değişik oranlarda nikel içeren çil uygulanmış ostenperlenmiş küresel grafitli dökme demirin aşınma karakteristiklerini incelemiştir. Çil uygulanmış küresel grafitli dökme demirler 950 °C'de ostenitlenip 200-400 °C aralığında ostenperlendikten sonra disk üzerinde aşınan pim yöntemine göre aşınma davranışı saptanmıştır. Ostenperlenmiş küresel grafitli dökme demirin aşınma direncinin soğuma hızı kadar nikel ve molibden içeriğinin kombinasyonuna da bağılı olduğı bulunmuştur. Bunun yanı sıra, malzemenin soğuma hızının ve nikel içeriğinin artması sertliğin, tokluğun mukavemetin ve küre sayısının da artışına neden olacağından aşınma direncinin artması ile sonuçlanacağı saptanmıştır.

Yapılan bir başka çalışmada [10], sürekli ostenperlemenin küresel grafitli dökme demirlerin tribolojik davranışları üzerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla küresel grafitli dökme demirler, düşük ostenperleme sıcaklıklarında, yüksek ostenperleme sıcaklıklarında ve sürekli ostenperleme olarak adlandırılan ilk önce 375 °C'de ostenperlemenin ardından 315 °C'de ikinci bir ostenperlemeyi içeren ostenperleme işlemlerine tabi tutulmuşlardır. Sonuçta klasik ostenperleme işlemi ile karşılaştırıldığında sürekli ostenperleme prosesinin ostenperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin hem mekanik özelliklerini hem de aşınma direncini geliştirdiğı bulunmuştur. Ayrıca, düşük küre sayısına (uzun katılma süresi) sahip numunelerin daha yüksek küre sayısı (kısa katılma süresi) içeren numunelere nazaran daha düşük aşınma hızına sahip olduğı ve yüksek karbon içerikli kalıntı ostenitin sürekli ostenperlemeye maruz bırakılmış numunelerin aşınma dirençlerinin gelişmesinde ana neden olduğı belirlenmiştir.

Aynı sertlik seviyesinde su verilmiş ve temperlenmiş ve ostenperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin kuru kayma aşınması davranışlarının karşılaştırıldığı çalışmada [38] ise, bütün test koşulları altında, ostenperlenmiş küresel grafitli dökme demirin aşınmaya karşı su verilmiş ve temperlenmiş küresel grafitli dökme

demire kıyasla son derece dirençli olduğu ve aşınmaya karşı bu direncinin yüksek yüklerde ve uzun kayma mesafelerinde daha belirgin olduğu belirlenmiştir.

İslam ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [39], döküm halinde ve ısıtıl işlem uygulanmış küresel grafitli dökme demirlerin kuru kayma aşınması incelenmiştir. Döküm halindeki malzemelere ısıtıl işlem, 900 °C'den itibaren sertleştirme ve bu numunelerin 550 °C'de temperlenmesi şeklinde uygulanmıştır. Sonuçta, daha sert bir matriks yapısına sahip olan ısıtıl işlemli malzemenin aşınma hızının daha düşük olduğu, ısıtıl işlemli küresel grafitli dökme demir abrasiv aşınma mekanizması ile aşınırken, döküm halindeki küresel grafitli dökme demir adhesiv aşınma ve alt yüzey yorulmasının bir kombinasyonuna maruz kalmaktadır.

Bir başka çalışmada [22] ise, özel ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin abrasiv aşınma özellikleri belirlenmiştir. Özel ostemperleme işlemi, GGG 50 ve GGG 80 olarak sınıflandırılan küresel grafitli dökme demirlere, 900 °C'de 100 dakika süreyle ostenitleme ve suda soğutma ardında da bu numunelerin yeniden 730 °C'de 1 saat ostenitlendikten sonra 250 °C'de ostemperleme şeklinde uygulanmıştır. Sonuçta, özel ostemperleme işlemi ile hacimsel aşınma miktarlarının döküm haline göre GGG 50 kalite küresel grafitli dökme demir için yaklaşık % 10, GGG 80 kalite küresel grafitli dökme demir için ise yaklaşık % 35 oranında arttığı saptanmıştır. Ayrıca, hacimsel aşınma miktarlarındaki artışın yaklaşık olarak sertlik değerlerindeki azalmayla aynı oranda olduğu belirlenmiştir.

Ostenitik ve beyritik küresel grafitli dökme demirlerin çeşitli özelliklerinin incelendiği çalışmada [40], ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısının abrasiv ve adhesiv aşınmaya karşı aynı sertlikteki su verilmiş ve temperlenmiş çelikten yaklaşık iki kat daha dirençli olduğu belirlenmiştir.

4.3.3. Alaşım Elementlerinin Etkisi

Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri kimyasal bileşimi ile yakından ilişkilidir. Alaşım elementleri hem sertleşebilirliği (ostemperlenebilirlik) arttırmak hem de ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir malzemeleri ekonomik açıdan daha etkili kılabilmek için küresel grafitli dökme demir yapısına düşük oranlarda katılırlar.

Ostempirlenebilirlik, küresel grafitli dökme demirlerin dönüşüm sırasında yapıda perlit olumaksızın ostempirlenebilmeleridir. Alaşım elementlerinin düşük oranlarda yapıya katılması temelde yeterli ostempirlenebilirliğin sağlanabilmesi içindir. Çünkü alaşım elementlerinin aşırı oranda katılması daha yüksek ostempirleme sürelerini gerektirir. Kalın kesitli bir döküm söz konusu olduğunda alaşım elementlerinin ilavesi, ısıl işlem esnasında ostenitleme sıcaklığından ostempirleme sıcaklığına soğutulurken, küresel grafitli dökme demirin perlit oluşumundan sakınılabilecek şekilde yeterli ostempirlenebilirliğe ulaşabileceği seviyede olmalıdır. Farklı şekillerde ostempirlenmi küresel grafitli dökme demirler incelendiğinde, perlit miktarı arttıkça mekanik özelliklerin hep azaldığı görülür. Perlit oluşumundan bu yüzden sakınılmalıdır. Küresel grafitli dökme demirlerde ilave edilen alaşım elementlerinin beynitik dönüşüm üzerinde hiçbir ters etkisi olmamalıdır. Katılaşma sırasında çözünen element segregasyonu, çözünen bileşimini arttırarak difüzyon hızını etkiler. Sonuçta homojen olmayan bir matriks meydana gelir. Böyle bir yapıda ise farklı hızlarda dönüşebilen farklı bölgeler ortaya çıkabilir. Bu ise, mekanik özelliklerde ve ilenebilirlikte azalmalara sebep olur. Bu yüzden segregasyon etkisi minimuma indirilmelidir. Segregasyonu azaltmanın en etkili yolu, ostempirlenmi küresel grafitli dökme demirlerde küre sayısını arttırmak ya da alaşım elementlerini sınırlamaktır [3,16,41]. Alaşım elementlerinin ostempirlenmi küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri aşağıda açıklanmıştır.

Karbon: % 3-4 aralığında artan karbon çekme mukavemetini arttırır fakat uzama ve sertliğe etkisi ihmal edilebilecek seviyededir. Karbon % 3.6-3.8 seviyelerinde kontrol edilmelidir [3].

Silisyum: Grafit oluşumunu teşvik ettiği, karbonun ostenitteki çözünürlüğünü düşürdüğü, ötektoid sıcaklığı yükselttiği ve beynitik yapıda karbürlerin oluşumunu engellediği için silisyum, ostempirlenmi küresel grafitli dökme demirdeki en önemli elementlerden birisidir. Artan silisyum içeriği, ostempirlenmi küresel grafitli dökme demirin darbe direncini arttırır ve sünek-gevrek geçiş sıcaklığını düşürür. Silisyum, ostempirlenmi küresel grafitli dökme demirlerde % 2.4-2.8 seviyelerinde tutulmalıdır [3].

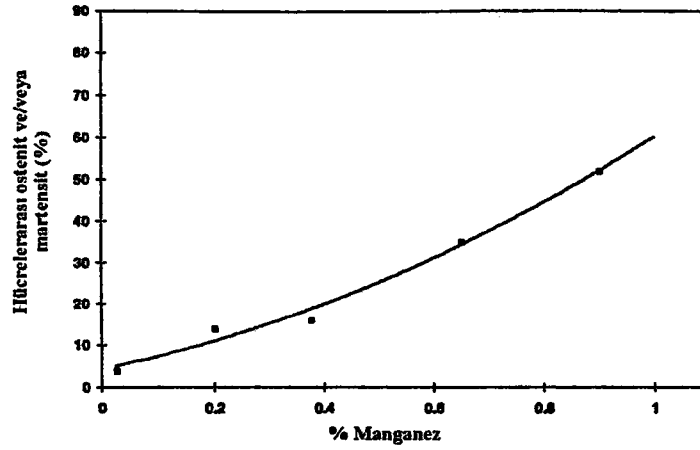
Manganez: Manganez, hem yararı hem de zararı olan bir elementtir. Manganez sertleebilirliği kuvvetli bir şekilde arttırırken, katılaşma sırasında hücre sınırlarında

segrege olarak buralarda karbürler oluşturur ve ostemperleme reaksiyonunu geciktirir. Yavaş hızlarda katılaşıp, düşük küre sayısına veya 19 mm'den daha fazla kesit boyutuna sahip dökümlerde manganez, hücre sınırlarına segrege olarak hücrelerarası kompleks Fe-Mn karbürlerinin çökmesine neden olur. Bu manganez'ce kararlı hale getirilmiş karbürler genellikle ostemperleme işleminden sonra yapıda oldukça gevrek bir faz olarak kalır ve işlenebilirliği düşürerek mekanik özellikleri azaltır. Manganez'in hücre sınırlarında segregasyonu aynı zamanda hücrelerarası ostenitin kararlılığının artması ile heterojen bir sertleşebilirlikle sonuçlanır. Manganezin segrege olduğu bu bölgeler, ostemperleme sıcaklığından oda sıcaklığına soğuma sırasında martensite dönüşebilir veya geniş dönüşmemiş ostenit bölgeleri olarak kalır. Şekil 4.7.a ve b'de ostemperlenmiş parçalarda manganezin hücrelerarası fazların miktarlarına etkisi ve martensit oluşumundan kaçınmak için gerekli ostemperleme süresi görülmektedir. Mekanik özellikleri geliştirmek ve ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin kesit boyutuna ve küre sayısına hassasiyetini azaltmak için manganez seviyesi % 0.3 ile sınırlandırılmalıdır. Manganez ayrıca yapıda önemli miktarda kalıntı ostenit kalmasına da sebep olur [3,16].

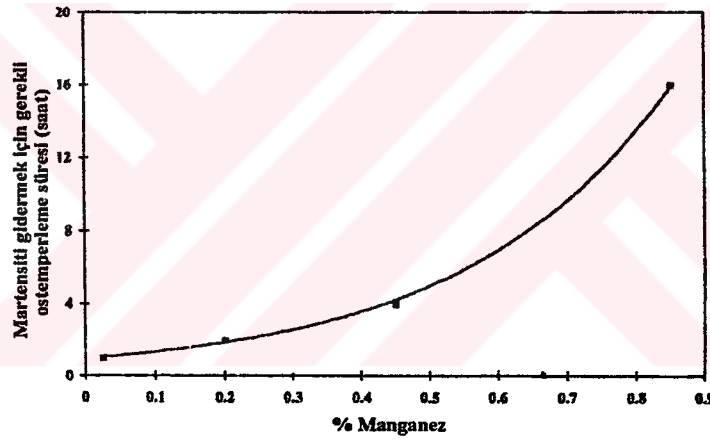
Molibden: Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde sertliği en etkili arttıran elementtir ve kalın kesitli dökümlerde perlit oluşumunu önlemek için gerekebilir. Sertleşebilirliğe etkisi bakır veya nikel ile birlikte kullanıldığında daha güçlüdür. Bununla birlikte sertleşebilirlik için gerekenden daha fazla molibden içeriği çekme mukavemeti ve sünekliği düşürür. Molibden, ostemperleme süresini kısaltır. Manganez'den farklı olarak molibden, ostenit yerine ferriti kararlı yapan bir elementtir. Molibden miktarı arttıkça kalıntı ostenitin hacim oranı düşer. Ancak molibden de aynı manganez gibi hücrelerarası bölgelerde güçlü segregasyon eğilimine sahiptir. Özellikle kalın kesitli dökümlerde molibden karbürler oluşur ve bu karbürler, çatlak çekirdekleşme ve ilerleme merkezleri olarak davranırlar. Molibden yüksek segregasyon eğiliminden dolayı yapıda % 0.2 ile sınırlandırılmalıdır [3,16,41].

Nikel: Nikel ilavesinin kolaylığı ve ötektik karbürlerin oluşmasını önleyici özelliklerinin diğer alaşım elementlerine göre çok üstün olmasından dolayı ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir üretiminde en çok kullanılan

elementlerden birisidir. % 2'ye kadar nikel ilavesi, ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin sertleşebilirliğini arttırmak için kullanılabilir.



(a)



(b)

Şekil 4.7. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökümlerde manganez'in (a) hücrelerarası faz çökmesine (b) martensit oluşumundan kaçınmak için gerekli ostemperleme zamanına etkisi [16].

Nikel aynı zamanda ostemperleme süresini artırır. Ancak en önemli etkilerinden birisi, tokluğu azaltmaksızın istenen nihai mikroyapı ve özellikleri elde etmek için ostemperleme sıcaklığında daha uzun tutma süresine imkan vererek yüksek karbonlu osteniti kararlı kılmasıdır. 350 °C'nin altındaki ostemperleme sıcaklıklarında nikel, çekme mukavemetini hafif bir şekilde düşürmesine karşın süneklik ve kırılma tokluğunu arttırmaktadır. Yüksek nikel oranı, segregasyondan dolayı ostenit

hücresinin farklı noktalarında beynitik dönüşümün farklı hızlarda ilerlemesine neden olur. Bu segregasyon etkisinin engellenmesi için, manganez gibi bir element ile birlikte kullanılması gerekir. Böylece ostenit hücresinin her noktasında beynitik reaksiyon homojen bir şekilde ilerleyebilir. Nikel ve molibden birlikte kullanıldığında, molibden nikel ile aşırı alaşımlamanın etkisini nötralize eder. 400 °C'nin altındaki ostemperleme sıcaklıklarında nikel ve molibden'in birlikte kullanılması, süneklikte önemli bir artışa sebep olur. Bunun sebebi, molibden'in karbür çökmesini önleyici etkisinden kaynaklanmaktadır. Ancak, 400 °C ve üzerindeki ostemperleme sıcaklıklarında (400-450°C), nikel ve molibden'in birlikte bulunması süneklikte önemli bir azalmaya sebep olur. Bunun sebebi ise hücre sınırlarında aşırı miktarda martensit meydana gelmesidir [3,16,41].

Bakır: Alaşım elementi olarak bakır kullanımının en önemli sebebi sertleşebilirliği arttırmasıdır. Molibden ile birlikte kullanıldığında, sertleşebilirliğe etkisi bu iki elementin ayrı ayrı kullanıldığı duruma göre daha fazladır. Bakırın çekme özellikleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmamasına karşın 350 °C'nin altındaki ostemperleme sıcaklıklarında sünekliği arttırır. Bakırın alt beynit yapısında karbür oluşumunu engellediği için artan bakır miktarı ile kalıntı ostenit hacmi artar. Ayrıca bakır, ostemperlemenin II. aşama reaksiyon hızını yavaşlatarak, daha geniş bir işlem aralığının elde edilmesini de sağlamaktadır. İşlem aralığının içerisinde yer alan işlem sürelerinde, yüksek karbonlu ostenitin miktarı sabit olduğu ve optimum mekanik özellikler bu bölgede elde edildiği için, işlem aralığının genişlemesi önemlidir [3,16,41].

4.4. Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir Spesifikasyonları

Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılmasında, farklı ülkeler tarafından kabul edilen farklı standartlar kullanılmaktadır. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılmasında, başta ABD olmak üzere Japonya, Almanya ve İsveç tarafından dört değişik standart resmileştirilmiştir. Bu dört ülkenin resmileştirdiği standartlardan başka, ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılmasında çeşitli yaklaşımlar da mevcuttur. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin için hazırlanan standartların tümünde çekme

mukavemeti, akma mukavemeti, süneklik, darbe enerjisi ve Brinell sertlik değerleri göz önüne alınmıştır.

Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler ile ilgili en yaygın kullanılan standart, Amerikan ASTM standartları tarafından ASTM A 897 [42] ve ASTM A 897 M [43] şeklinde belirtilmektedir. Burada, "M" harfi metrik versiyonu tanımlamaktadır ve içerdiği 5 ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir sınıfı, minimum çekme ve akma mukavemeti, maksimum % uzama, çentiksiz darbe enerjisi ve Brinell sertlik değerlerine göre sınıflandırılmıştır (Tablo 4.1) [1].

Amerika Birleşik Devletleri'nde olduğu gibi, Japonya, Almanya ve İsveç'te de ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması ile ilgili benzer çalışmalar yapılmıştır [3].

Tablo 4.1. ASTM A 897 ve A 897M'e göre sınıflandırılan ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin mekanik zellikleri [1].

Sınıf	Minimum ekme Mukavemeti		Minimum Akma Mukavemeti		Minimum %Uzama	entiksiz Charpy Darbe Enerjisi		Brinell Sertlik Değeri
	(MPa)	(ksi)	(MPa)	(ksi)		(J)	(ft.lbf)	
125/80/10	850	125	550	80	10	100	75	269-321
150/100/7	1050	150	700	100	7	80	60	302-363
175/125/4	1200	175	850	125	4	60	45	341-444
200/155/1	1400	200	1100	155	1	35	25	388-477
230/185/-	1600	230	1300	185	-	-	-	444-555

Japon Endüstriyel Standartları'nda (JIS), minimum çekme mukavemeti esas alınarak ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler 3 sınıfa ayrılmıştır. Almanya' da ise bu konuda yapılan çalışmalara bağlı olarak, yine minimum çekme mukavemeti esas alınarak, alaşımlı ve alaşımsız OKGDD sınıfları için, VGD (Verein Deutscher Giessereifachleute) standartları W 52 şeklinde oluşturulmuştur. Bu sınıflandırmadaki "B" harfi beynitik yapıyı ifade etmektedir. İsveç SIS standartlarında ise, iki ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir sınıfı yaygın olarak kullanılmaktadır (Tablo 4.2) [3].

4.5. Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri

Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler uygulamada, yüksek mukavemet ve aşınma direncini iyi tokluk ve düşük maliyet ile birleştiren mühendislik açısından oldukça avantajlı malzemelerdir. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler, ısıtılma sırasında meydana gelen izotermal dönüşümün bir sonucu olarak oldukça sert ve mukavemetli malzemelerdir. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri, ısıtılma sonucu oluşan mikroyapıdan oldukça etkilenmektedir. Genelde alt beyritik bir yapıya sahip olan parça maksimum mukavemet, fakat sınırlı bir süneklik göstermektedir. Üst beyritik bir yapıdan oluşan parça ise, nispeten yüksek bir mukavemet ile birlikte yüksek süneklik ve tokluk gösterir [4]. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin daha düşük sertliğe sahip sınıfları yapısal uygulamalarda kullanılırken, daha yüksek sertliğe sahip sınıflar aşınma uygulamalarında kullanılmaktadır [3].

Tablo 4.2. Japon (JIS), Alman (VDG) ve İsveç (SIS) standartlarına göre ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir sınıfları [3].

Sınıf	Minimum Çekme Mukavemeti (kg/mm ²)	Minimum Akma Mukavemeti (kg/mm ²)	Minimum% Uzama	Çentiksiz Charpy Darbe Enerjisi (J)	Brinell Sertlik Değeri
JIS G 5503					
FCD 900 A	90	60	8	100	-
FCD 1000 A	100	70	5	-	-
FCD 1200 A	120	90	2	-	340
VDG W 52					
GGG-80 B	80	50	6-15	-	250-310
GGG-90 B	90	60	5-12	-	270-340
GGG-120 B	120	95	2-5	-	330-390
GGG-140 B	140	120	1-2	-	43-47 HRC
GGG-150 B	150	-	-	-	45-51 HRC
SIS (İsveç)					
	90	60	8	-	280-320
	140	120	1	-	45 HRC

Yüksek mukavemet ve sünekliklerinin kombinasyonu, ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlere oldukça yüksek tokluk kazandırır. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin kırılma tokluğu değerleri, bütün diğer küresel grafitli dökme demir sınıfları ile karşılaştırıldığında oldukça iyi, çoğu su verilmiş ve temperlenmiş çeliklerinki ile aynı seviyede ve/veya daha yüksektir. Ayrıca

ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin elastisite modülü çeliğinkinin yaklaşık % 70-80'i kadardır [1,3].

Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler, hem adhesiv hem de abrasiv aşınmaya karşı oldukça yüksek dirence sahiptirler. Yapılan çalışmalar, aynı sertliğe sahip su verilmiş ve temperlenmiş çeliğe göre ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin yaklaşık iki kat daha fazla aşınma direncine sahip olduğunu göstermiştir [29,38,40]. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin en büyük avantajlarından birisi olan üstün aşınma direnci, yapıda bulunan dönüşmemiş yüksek karbonlu ostenitin aşınma sırasında ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin yüzeyinde meydana gelen deformasyonun etkisi ile martensite dönüşmesi sonucu yüzey sertliğinde meydana gelen artıştan kaynaklanmaktadır. Bu dönüşüm, aşınan yüzeyin sertliğinin artmasına neden olurken, malzemenin kütleli sünegliğinde belirgin bir değişim olmaz [9,35,39,44].

Yüksek mukavemet ve aşınma direnci, benzer özelliklerdeki diğer malzemelerle karşılaştırıldıklarında ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlere aynı zamanda oldukça iyi işlenebilirlik özelliği kazandırır [9]. Ancak, ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirlik özellikleri mikroalaşımli çelikler ile karşılaştırıldığında düşüktür. Daha düşük sertliğe sahip ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir sınıfları ısıtıl işlem gördükten sonra işlenebilirler. Ancak, daha yüksek sertlik değerlerine sahip ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir sınıflarının ısıtıl işlem görmeden işlenmesi en iyisidir [3].

Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin yorulma mukavemetleri de benzer özelliklerdeki diğer malzemelerle karşılaştırıldıklarında oldukça yüksektir. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin yorulma ömrü, püskürtmeyle sertleştirme yoluyla artırılabilir. Ayrıca, çelikten daha az çentik duyarlılığı olduğu için ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin yüzey işlemlerinin çelik kadar hassas yapılmasına gerek yoktur [9].

4.6. Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları

Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler son yıllarda daha önce dökme demirlerin kullanılmasının uygun olmadığı birçok alanda başarıyla kullanılmaya başlanmıştır. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler, mukavemet, yorulma özellikleri ve aşınma direncinin bir kombinasyonunu sunarak otomotiv dişlilerinde kullanımları için büyük ilgi uyandırmaktadır [3]. Dişlilerin yanı sıra krank mili, direksiyon kolu ve piston kolu gibi parçaların da darbeli ve/veya alternatif yükler altında çalıştıkları bilinmektedir. Sertlik ve mukavemetin belki birinci dereceden önemli olmadığı bu tür uygulamalarda eğme-yorulma özellikleri oldukça önemli bir tasarım kriteridir [24]. BCIRA'da bu konuda yapılan araştırmalarda, ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin eğme-yorulma dayanımı hem tümüyle hem de sadece yüzeyi nitrasyon ile sertleştirilmiş çeliklerden daha üstün, ancak yüzeyi karbürленerek sertleştirilmiş çeliklerden daha alt konumda bulunmaktadır. Bir diğer nokta ise, olağanüstü eğme-yorulma dayanımı gerektiren dişli uygulamaları haricinde, uygun şekilde bilyalanmış ve haddelenmiş ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin, yüzeyi sertleştirilmiş çelikler ile ve hem de çok daha az bir üretim maliyeti ile aynı performansı gösterebileceğinin anlaşılmasıdır. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler demiryolu taşıtlarında bağlantı elemanı olarak kullanıldığında ise, aşınma direncinin iki kat arttığı ve trenlerin fren pabuçlarında kullanıldığında ise, aşınma dirençlerinin normal dökme demirlere nazaran yaklaşık 6.5 kat arttığı gözlenmiştir [3]. Benzer örnekleri tekrarlamak mümkündür. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler, kullanıldıkları alanlara göre kısaca aşağıdaki şekilde sıralanabilir [24].

- 1- Otomotiv ve kamyon: Krank mili, ekzantrik mili, tekerlek mili, ayna ve piston dişlisi, diferansiyel kutusu, direksiyon yatağı, direksiyon kolu, krank kolu, irtibat kolu, kontrol kolları, kavrama kolları, dingil, süspansiyon kolları, zincir baklaları, kamyon tekerlek göbeği, yay askı dayanağı, amortisör, fren parçaları, dizel piston başı.
- 2- Ziraat ve inşaat: Kazma uçları, gübreleme bıçakları, tırpan koruyucusu, pulluk, mısır öğütme plakaları, hidrolik pompa parçaları, çekme kancaları, merdaneler, ezme çekiçleri, kepçeler, palet çeneleri, aşınma

klavuzları, dişli çarklar, tekerlek göbekleri, kaldırım kırma makinesi, kavramalar.

- 3- Makine ve teçhizat: G iletim dişlileri, zincir dişli çarklar, dişli çarklar, sondaj dişlileri, yataklar, kamlar, haddeler ve klavuzlar, krank milleri, taşıyıcı hat tutucuları, taşıyıcı zincirler, taşıyıcı mafsalları, maden aşındırma parçaları, kalıplar, ızgaralar, kompresör, pompa parçaları, tekstil makineleri.
- 4- Demiryolu parçaları: Travers plakaları, dingil tutucuları, şok absorblayıcılar, vagon tekerleri, fren sürgüsü, aşınma pabuçları, fren blokları, koruyucu kapaklar, yaylı tutucuları, motor parçaları.
- 5- Savunma sanayi: Zırh, mermiler, roket gövdeleri, tank paletleri, motor rotorları, süspansiyon kolları, gergi kolu.



5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, döküm halinde ve ostemperleme ısı işlemi uygulanmış dört farklı kalitedeki küresel grafitli dökme demirlerin oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda metal-abrasiv ve metal-metal aşınma davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

5.2. Deneysel Malzemeler

Bu çalışmada kullanılan küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal bileşimleri Tablo 5.1’de verilmiştir. 1 ve 2 numaralı olarak kodlandırılan küresel grafitli dökme demirler, döküm halinde temin edilmiş olup, Bölüm 5.3’de açıklanan ostemperleme ısı işlemine tabi tutulmuşlardır. 3 numaralı küresel grafitli dökme demir hem döküm halinde hem de ostemperlenmiş durumda, 4 numaralı küresel grafitli dökme demir ise yalnızca ostemperlenmiş halde temin edilmiştir.

5.3. Ostenitleme ve Ostemperleme Isıl İşlemleri

Bu çalışmada incelenen 1 ve 2 numaralı küresel grafitli dökme demirler, daha önceki çalışmaların [3,4,24] ışığında, önce 900 °C’de 120 dakika süreyle ostenitlendikten sonra 340 °C’de 60 dakika ostemperlenmiştir. Ostenitleme işlemi Nabertherm L3/C6 tipi elektrikli direnç fırınında yapılmıştır. Deney numunelerinin, oksidasyon ve dekarbürizasyonunu önlemek amacıyla dökme demir talaşı ile örtülü olarak ostenitlenmesine özen gösterilmiştir. Ostemperleme ısı işlemi ise Nabertherm HO 60/E tipi elektrikli direnç fırınında AS 135 tuz banyosu içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.1.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal bileşim ve standartları.

Malzeme Kodu	Malzeme Standardı	Temin Edildiği Durum	Bileşim (%)										
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Mg	Cu	Sn
1	DIN 1693-GGG40	Döküm	3.68	2.90	0.16	-	-	-	-	0.042	0.18	-	
2	DIN 1693-GGG50	Döküm	3.78	2.46	0.32	0.038	0.065	0.031	-	0.05	0.0089	0.0042	
3	ASTM A 536-84-100/70/03	Döküm ve Ostemperlenmiş	3.25	2.75	0.22	0.04	0.04	0.25	0.35	1.50	-	-	
4	ASTM A 897-90-200/155/1	Ostemperlenmiş	3.21	2.18	0.55	0.08	0.0067	0.47	0.68	1.90	-	-	

Ostempereleme ısııl işleminde sonra havada soğutulan numuneler, 600 mesh zımpara ile temizlenerek ostempereleme sırasında oluşturulan kalıntılardan arındırılmışlardır.

5.4. Metalografik Çalışmalar ve Sertlik Ölçümleri

Metalografik incelemeler için reçineye alınan numuneler, sırasıyla 150, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh zımpara kademelerinden geçirilerek zımparalanmıştır. Parlatma işlemi ise, üzeri keçe kaplı döner disklerde gerçekleştirilmiş, parlaticı olarak % 98, 99'luk Al_2O_3 kullanılmıştır. Parlatma işleminden sonra numuneler, su ile yıkanıp etil alkol ile iyice temizlendikten sonra, % 3'lük nital ile dağlanarak mikroyapı incelemelerine hazır hale getirilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde Zeiss ve Nikon marka optik mikroskop kullanılmıştır. Bu mikroskopta 100x büyötmelerde çekilen mikroyapı fotoğrafları 10.98×14.66 cm. boyutlarında basılıp, Kontron marka görüntü analiz cihazında incelenerek küresel grafitli dökme demirlerin yapısındaki grafitlerin boyutları, hacim oranları ve küresellikleri belirlenmiştir. Ayrıca Leica DMLM marka cihaz yardımıyla Q Win programı kullanılarak kantitatif analizlerle mikroyapı bileşenlerinin hacim oranları saptanmıştır.

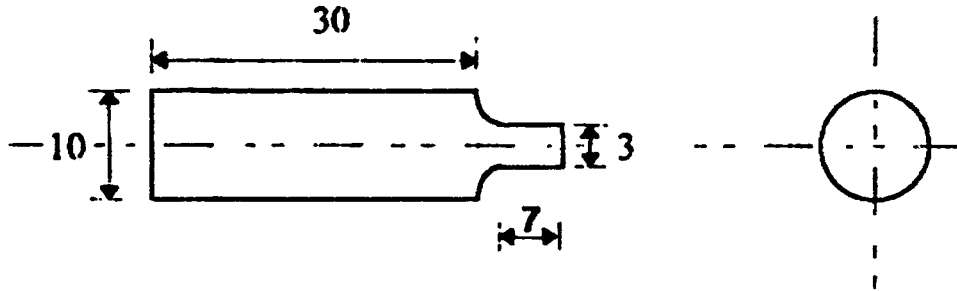
İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin kütesel sertliği, mikroyapı çalışmalarında kullanılan numuneler üzerinde Wolpert marka cihaz ile 20 kg yük altında Vickers sertliği cinsinden belirlenmiştir. Sertlik çalışmalarında, her numuneden en az beş ölçüm alınarak, sonuçta bunların aritmetik ortalaması belirtilmiştir.

5.5. Aşınma Deneyleri

Döküm halinde ve ısııl işlem görmüş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışları, disk üzerinde aşınan pim (pin on disc) tipi metal-metal aşınması ve şerit zımpara üzerinde aşınan pim (pin on flat) tipi metal-abrasiv yöntemine göre incelenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda da metal-abrasiv aşınma deneyleri yapılmıştır.

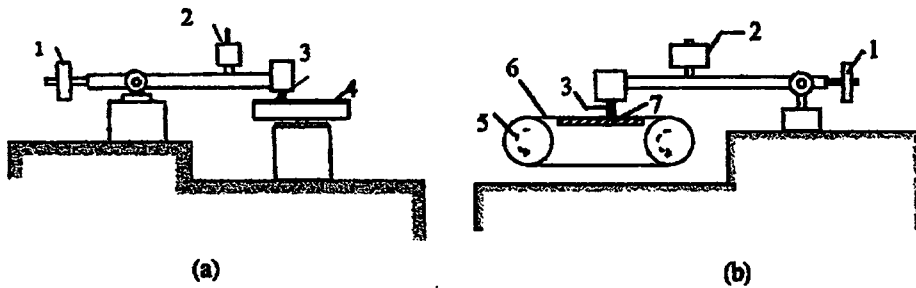
Aşınma deneylerinde kullanılan deney numuneleri, ASTM G 99 [45] standardında olup, aşınma ucu 3 mm. çapındadır (Şekil 5.1.). 3 ve 4 numaralı küresel grafitli

dökme demirlerin aşınma deney numuneleri aşınma numunesi halinde hazır olarak temin edilmiştir. 1 ve 2 numaralı küresel grafitli dökme demir numuneler ise sırasıyla Keel ve Y bloğu ayağından kesilen parçalardan hazırlanmışlardır.



Şekil 5.1. ASTM G 99 standardına göre hazırlanan aşınma deney numunesi.

Metal-metal aşınma deneylerinde, Şekil 5.2.a'da görüldüğü gibi deney numuneleri, sabit hızla dönen bir metal disk üzerine, sabit bir yük altında bastırılmaktadır. Deneyler, M2 kalite takım çeliğinden imal edilmiş bir disk üzerinde 0.52 m/s kayma hızında, 40 N yük altında ve toplam 10000 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Metal-metal aşınma deneyleri oda sıcaklığında yapılmış olup, deneyler sırasında ortamın rutubetinin % 41.3 ile % 62.3 arasında değiştiği ölçülmüştür.



Şekil 5.2. (a) Metal-metal (b) metal-abrasiv aşınma deney düzeneğinin şematik olarak gösterilişi. (1) Dengeliyici ağırlık (2) yük (3) numune (4) aşındırıcı disk (5) iletilici silindir (6) abrasiv bant (7) çelik destek plakası.

Metal-abrasiv aşınma deneyleri ise, sabit hızla dönen bir şerit zımpara üzerine numunelerin 40 N yük ile bastırılmaları suretiyle yapılmıştır (Şekil 5.2.b).

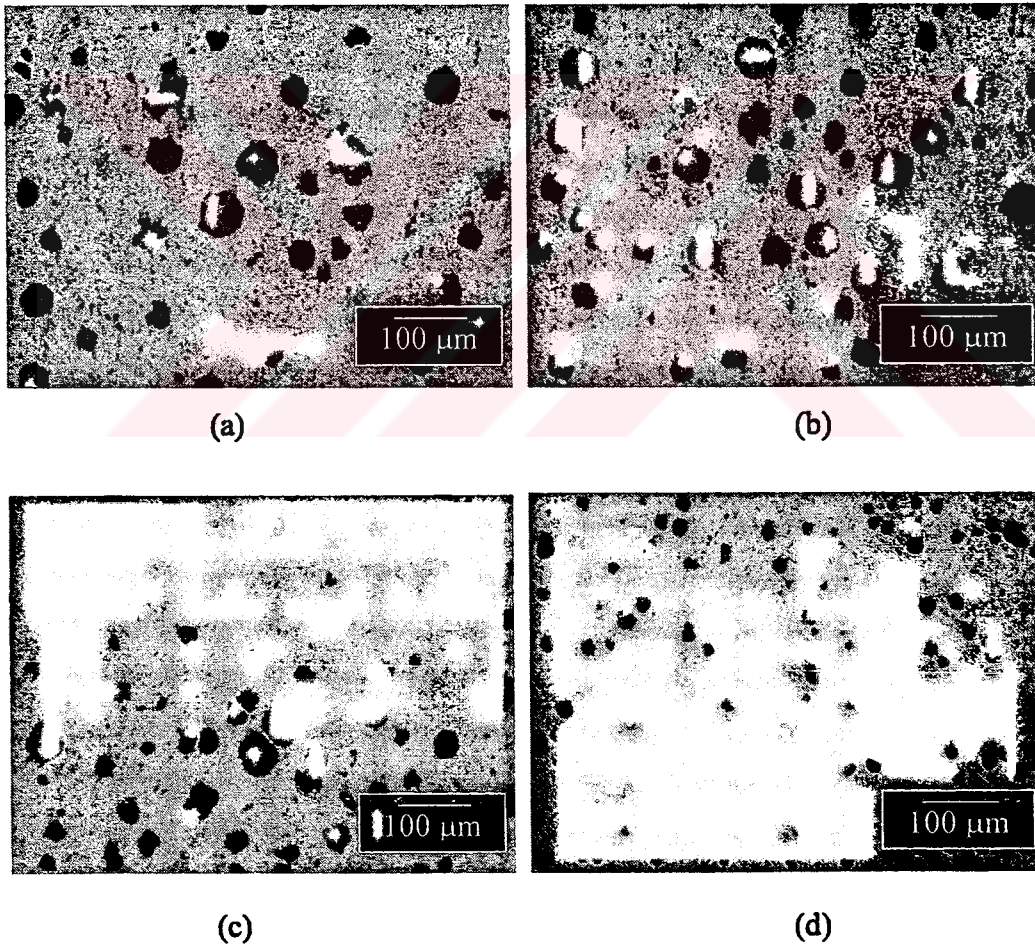
Metal-abrasiv aşınma deneylerinde, 120 mesh'lik ($125\mu\text{m}$) Al_2O_3 zımparalar kullanılmıştır. Şerit zımpara bandının ilerleme hızı 0.2 m/s olarak belirlenmiştir. Metal-abrasiv aşınma deneyleri süresince abrasiv şerit zımpara üzerinde sürtünen numune, devamlı temiz abrasiv yüzey üzerinden geçmesi için kayma yönüne dik olarak hareket etmektedir. Metal-abrasiv aşınma deneyleri oda sıcaklığı, 150 ve 250 °C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında yapılan deneylerde, numunelerin aşındırıcı şerit zımpara üzerindeki kayma mesafesi, toplam 22 m, 150 ve 250 °C sıcaklıklarında yapılan deneylerde ise kayma mesafesi 5.5 ve 11 m olarak belirlenmiştir.

Metal-metal aşınma deneylerinin öncesi ve sonrasında, her numunenin yüksekliği 0.01 mm ve ağırlığı 0.1 mg hassasiyetle ölçülerek numunelerin yükseklik kayıpları (ΔH) ve ağırlık kayıpları (ΔG) 2000 m'lik kayma mesafeleri aralıklarında hesaplanmıştır. Metal-abrasiv aşınma deneylerinde ise her numunenin ağırlığı deney öncesi ve sonrası 0.1 mg hassasiyetle ölçülerek, numunelerin her 5.5 m kayma mesafesi için ağırlık kayıpları belirlenmiştir.

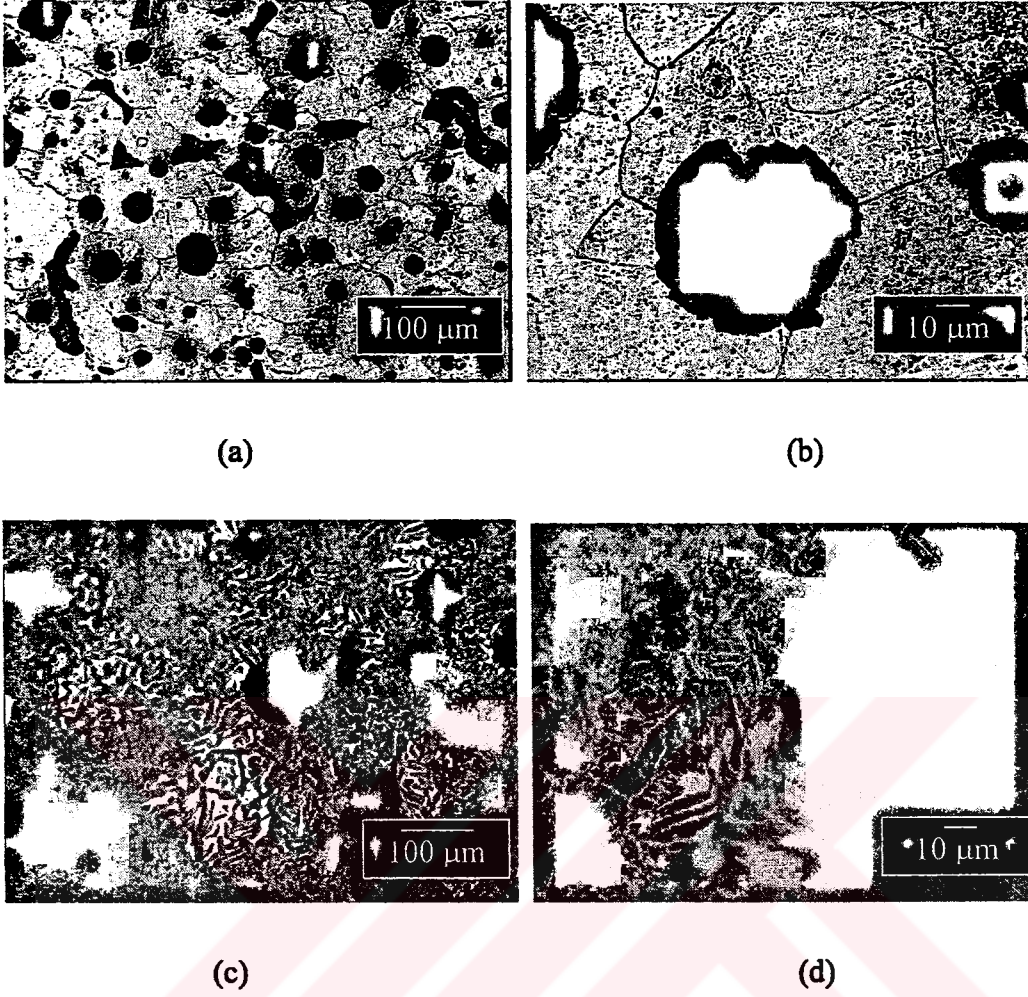
6. DENEYSEL SONUÇLAR

6.1. Mikroyapı Karakterizasyonu

Bu çalışmada kullanılan ve kimyasal bileşimleri Tablo 5.1’de verilen küresel grafitli dökme demirlerin dağlanmamış durumdaki mikroyapıları Şekil 6.1’de, dağlanmış durumdaki mikroyapıları ise Şekil 6.2- Şekil 6.5’de verilmiştir.

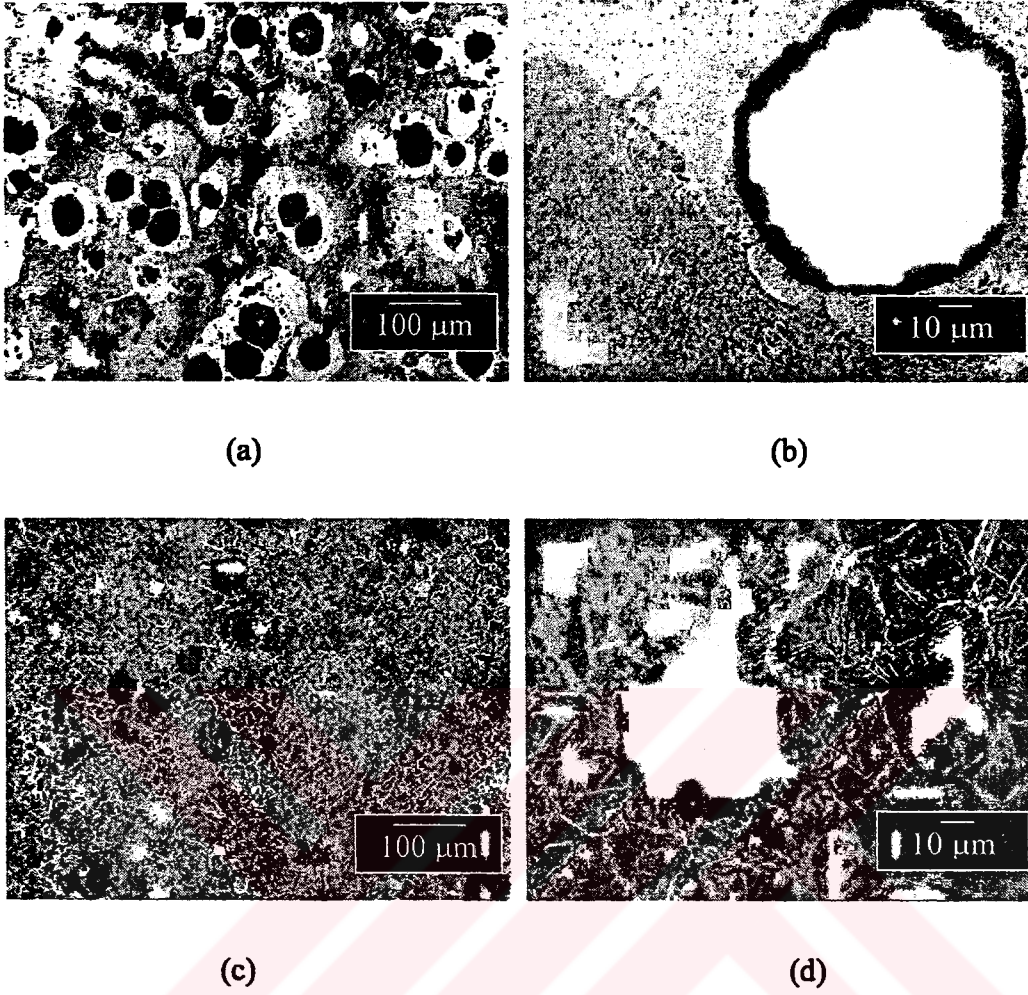


Şekil 6.1. (a) 1, (b) 2, (c) 3, ve (d) 4 numaralı küresel grafitli dökme demirlerin dağlanmamış durumdaki mikroyapıları (100x).



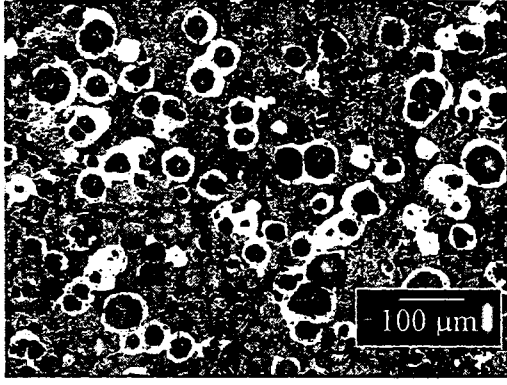
Şekil 6.2. 1 numaralı küresel grafitli dökme demirin döküm halinde (a) 100x (b) 500x ve ostemperlenmiş durumda (c) 100 x (d) 500x mikroyapısı.

Mikroskobik çalışmalar, incelenen küresel grafitli dökme demirlerin döküm halindeki mikroyapılarının ferrit ve perlitten oluştuğunu ortaya çıkarmıştır. Ostemperleme ısı işlemi ise mikroyapının beynite dönüşümüne sebep olmuştur. Bu beynitik yapıda bir miktar da kalıntı ostenit yer almaktadır.

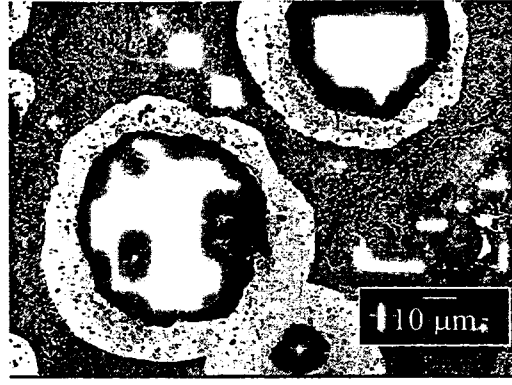


Şekil 6.3. 2 numaralı küresel grafitli dökme demirin döküm halinde (a) 100x (b) 500x ve ostemperlenmiş durumda (c) 100 x (d) 500x mikroyapısı.

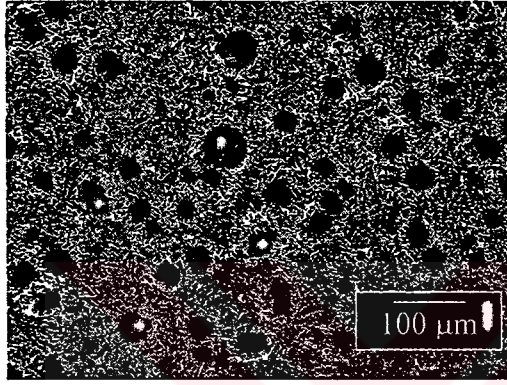
Tablo 6.1’de bu çalışmada kullanılan küresel grafitli dökme demirin yapısında bulunan grafitlerin boyutları, hacim oranları, küresellikleri ve mikroyapı bileşenlerinin hacim oranları verilmiştir. Bu tablo aynı zamanda 20 kg yük altında ölçülen kütesel Vickers sertlik değerlerini de içermektedir.



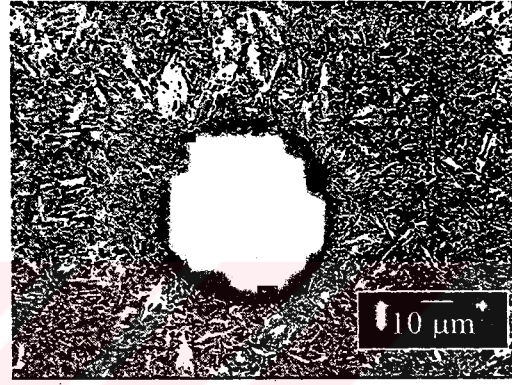
(a)



(b)

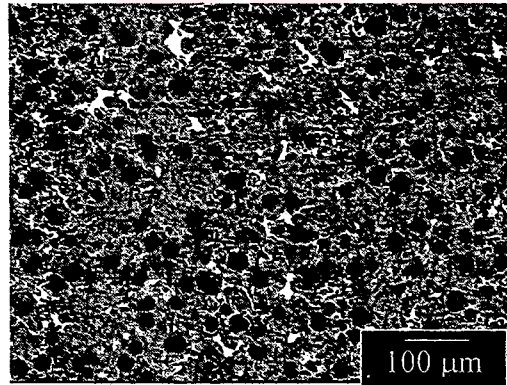


(c)

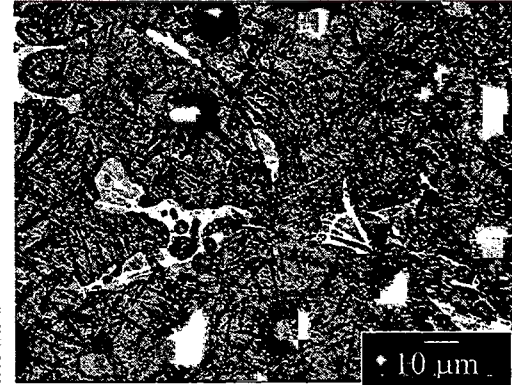


(d)

Şekil 6.4. 3 numaralı küresel grafitli dökme demirin döküm halinde (a) 100x (b) 500x ve ostemperlenmiş durumda (c) 100x (d) 500x mikroyapısı.



(a)



(b)

Şekil 6.5. 4 numaralı küresel grafitli dökme demirin ostemperlenmiş durumda (a)100x (b) 500x mikroyapısı.

Tablo 6.1. İncelenen küresel grafitli dökme demir malzemelerin mikroyapısal özellikleri.

Malzeme Kodu	Koşul	Sertlik (HV ₂₀)	Matriks	Grafit Hacim Oranı (%)	Grafit Boyutu (µm)	Küresellik
1	Döküm	155 ± 7	% 5 Perlit + % 84 Ferrit	11 ± 1.4	25.3 ± 2.25	% 78
	Ostemperlenmiş	285 ± 9	Beynit + Kalıntı ostenit			
2	Döküm	175 ± 10	% 69 Perlit + % 15 Ferrit	16 ± 1.1	40.2 ± 2.85	% 84
	Ostemperlenmiş	290 ± 9	Beynit + Kalıntı ostenit			
3	Döküm	205 ± 3	% 75 Perlit + % 11 Ferrit	14 ± 1.6	25.5 ± 1.5	% 81
	Ostemperlenmiş	380 ± 11	Beynit + Kalıntı ostenit			
4	Ostemperlenmiş	457 ± 14	Beynit + Kalıntı ostenit	8 ± 1.3	15.4 ± 1.2	% 90

6.2. Aşınma Deneyleri

6.2.1. Metal-Metal Aşınma Deneyleri

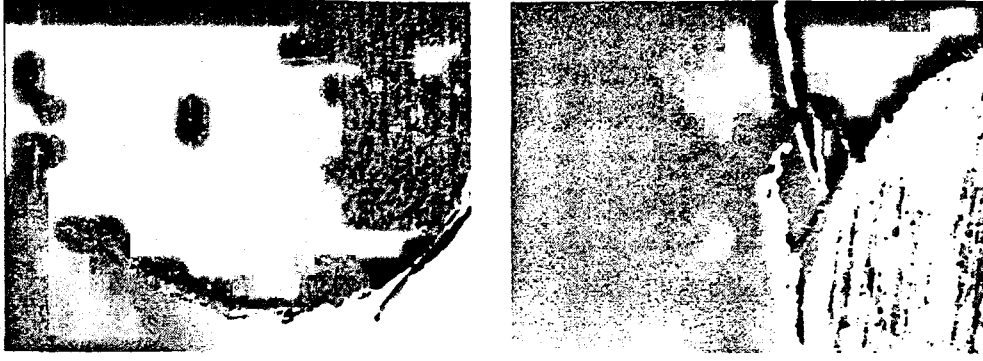
Döküm hali ve ostemperlenmiş durumdaki küresel grafitli dökme demirlerin M2 kalite takım çeliği üzerinde oda sıcaklığında yapılan aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlar ağırlık ve yükseklik kaybı cinsinden sırasıyla Tablo A.1 ve Tablo A.2’de verilmiştir. Aşınma deneylerinde elde edilen ağırlık ve yükseklik kayıpları her bir malzeme için kayma mesafesine bağlı olarak grafikler şeklinde Şekil A.1-Şekil A.4’de gösterilmiştir. İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin metal-metal aşınmasında ağırlık kayıplarının yanı sıra yükseklik kayıplarının da kriter olarak alınması, metal-metal aşınması sırasında meydana gelen yanal taşmalar (Şekil 6.6) nedeniyle ağırlık kayıplarının sonuçlara sağlıklı olarak yansımamasından kaynaklanmaktadır.

Çizilen “ağırlık kaybı-kayma mesafesi” ve “yükseklik kaybı-kayma mesafesi” eğrileri doğrusal olup bu doğruların eğimi gr/m ve mm/m cinsinden numunelerin aşınma hızlarını vermektedir. Şekil A.1-Şekil A.4’deki grafiklerden elde edilen aşınma hızı ve rölatif aşınma direnci değerleri Tablo 6.2’de verilmiştir.

Rölatif aşınma dirençleri (RAD), incelenen küresel grafitli dökme demirler arasında sertliği en yüksek olan ostemperlenmiş durumda temin edilmiş 4 numaralı küresel grafitli dökme demirin aşınma hızı referans alınarak;

$$\% \text{ RAD} = \frac{\text{Malzeme 4'ün aşınma hızı}}{\text{Diğer malzemenin aşınma hızı}} \times 100 \quad (6.1)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır. Metal-metal aşınma deneyleri için % rölatif aşınma dirençleri, deney numunelerinin ağırlık ve yükseklik kaybı kriterleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır.



Şekil 6.6. İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin metal-metal aşınması sırasında meydana gelen yanıl taşınmalar.

6.2.2. Metal-Abrasiv Aşınma Deneyleri

Metal-abrasiv aşınma deneyleri, oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda (150 ve 250 °C) yapılmış olup, sonuçlar ayrı ayrı belirtilmiştir.

Tablo 6.2. İncelenen küresel grafitli dökme demir malzemelerin metal-metal aşınma hızı ve rölatif aşınma dirençleri.

Malzeme	Koşul	Nem (%)	Aşınma Hızı ($\times 10^{-6}$)		Rölatif Aşınma Direnci (%)	
			Ağırlığa Göre (gr/m)	Yükseklığe Göre (mm/m)	Ağırlığa Göre	Yükseklığe Göre
1	Döküm	49.4	2.268	62.63	159.0	26.9
	Ostemper	42.4	3.057	56.57	117.9	29.8
2	Döküm	41.3	6.612	72.44	54.5	23.3
		50.8	2.484	50.75	145.2	33.3
		51.3	2.305	57.61	156.1	29.3
	Ostemper	46.9	2.126	47.09	169.6	35.8
3	Döküm	46.4	6.180	120.63	58.3	14.0
		56.9	2.469	56.54	146.0	29.8
		62.3	11.462	25.86	31.4	65.3
	Ostemper	52.5	2.195	13.71	164.3	123.2
4	Ostemper	50.4	3.607	16.90	100	100

6.2.2.1. Oda Sıcaklığında Yapılan Metal-Abrasiv Aşınma Deneyleri

Döküm halinde ve ostemperlenmiş durumdaki küresel grafitli dökme demirlerin 120 mesh Al_2O_3 zımpara üzerinde oda sıcaklığında ve % 47 ile % 51 nem aralığında yapılan aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlar ağırlık kaybı olarak Tablo A.3'de verilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında elde edilen ağırlık kayıpları her bir malzeme için kayma mesafesine bağlı olarak grafikler halinde Şekil A.5-Şekil A.8'de gösterilmiştir.

Çizilen ağırlık kaybı-kayma mesafesi eğrileri doğrusal olduğundan bu doğruların eğimi gr/m cinsinden numunelerin aşınma hızlarını vermektedir. Şekil A.5-Şekil A.8'deki grafiklerden elde edilen aşınma hızı değerleri Tablo 6.3'de verilmiştir. Bu tabloda (6.1) bağıntısından malzeme 4'ün aşınma hızı referans alınarak ağırlık kaybı kriterine göre hesaplanan % RAD değerleri de yer almaktadır.

Tablo 6.3. İncelenen küresel grafitli dökme demir malzemelerin oda sıcaklığında metal-abrasiv aşınma hızı ve rölatif aşınma dirençleri.

Malzeme	Koşul	Aşınma Hızı (gr/m) ($\times 10^{-4}$)	Rölatif Aşınma Direnci (%)
1	Döküm	94.6	35.9
	Ostemper	37.5	80.0
2	Döküm	68.9	43.5
	Ostemper	35.2	85.2
3	Döküm	43.0	69.7
	Ostemper	33.7	89.0
4	Ostemper	30.0	100

6.2.2.2. Yüksek Sıcaklıklarda Yapılan Metal-Abrasiv Aşınma Deneyleri

Döküm halinde ve ostemperlenmiş durumdaki küresel grafitli dökme demirlerin 120 mesh Al_2O_3 zımpara üzerinde 150 °C'de % 60 ile % 64 nem aralığında ve 250 °C'de % 57 ile % 62 nem aralığında yapılan metal-abrasiv aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlar ağırlık kayıpları olarak Tablo A.4'de verilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında elde edilen ağırlık kayıpları her bir malzeme ve sıcaklık için kayma mesafesine bağlı olarak grafikler halinde Şekil A.9- Şekil A.12'de gösterilmiştir.

Çizilen ağırlık kaybı-kayma mesafesi eğrileri doğrusal olduğundan bu doğruların eğimi gr/m cinsinden numunelerin aşınma hızlarını vermektedir. Şekil A.9-Şekil A.12'deki grafiklerden elde edilen aşınma hızı değerleri Tablo 6.4'de verilmiştir. Bu tablo aynı zamanda her bir malzeme için ağırlık kaybı kriterine göre hesaplanan rölatif aşınma dirençlerini de içermektedir.

Yüksek sıcaklıklarda yapılan metal-abrasiv aşınma deneylerinde rölatif aşınma dirençleri (RAD), incelenen küresel grafitli dökme demirler arasında sertliği en yüksek olan ostemperlenmiş durumda temin edilmiş 4 numaralı küresel grafitli dökme demirin oda sıcaklığındaki aşınma hızı referans alınarak;

$$\% \text{ RAD} = \frac{\text{Malzeme 4'ün oda sıcaklığındaki aşınma hızı}}{\text{Diğer malzemenin aşınma hızı}} \times 100 \quad (6.2)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır.

Tablo 6.4. İncelenen küresel grafitli dökme demir malzemelerin 150 °C ve 250 °C metal-abrasiv aşınma hızları ve rölatif aşınma dirençleri.

Malzeme	Koşul	Aşınma Hızı (gr/m) ($\times 10^{-4}$)			Rölatif Aşınma Direnci (%)		
		Oda sıcaklığı	150 °C	250 °C	Oda sıcaklığı	150 °C	250 °C
1	Döküm	98.9	73.7	92.2	29.7	39.9	31.8
	Ostemper	37.6	43.6	48.6	78.2	67.4	60.5
2	Döküm	69.1	63.7	72.1	42.5	46.1	40.7
	Ostemper	36.1	39.9	47.7	81.4	73.7	61.6
3	Döküm	43.4	58.4	45.1	67.7	50.3	65.2
	Ostemper	34.7	38.4	44.0	84.7	76.5	66.8
4	Ostemper	29.4	36.4	43.4	100	80.7	67.7

7. DENEYSEL SONUÇLARIN İRDELENMESİ

7.1. Mikroyapı ve Sertlik İncelemeleri

Bu çalışmada kullanılan ve bileşimleri Tablo 5.1’de belirtilen küresel grafitli dökme demirler Şekil 6.1’deki dağlanmamış mikroyapılarından görüldükleri gibi değişik boyutta ve küresellikte grafitler içermektedirler. İncelenen küresel grafitli dökme demir malzemeler içerisinde en yüksek grafit hacim oranı ve aynı zamanda en iri grafit partikül boyutu 2 numaralı malzemede mevcuttur (Tablo 6.1). En düşük grafit hacim oranına ve boyutuna sahip olan küresel grafitli dökme demir ise ostemperlenmiş durumda temin edilen 4 numaralı malzemedir. Küresel grafitli dökme demirlerde yapıda bulunan grafit kürelerinin sayısı ve boyutu, metalin kimyasal bileşimi ve soğuma şartlarının bir fonksiyonudur [1,7-9]. Küresel grafitlerin sayısı, katılaşmanın hemen başında belirlenir ve daha sonra herhangi bir etki ile değiştirilemez [1,8,9]. Küresel grafitli dökme demir bileşiminde karbon yüzdesi arttıkça yapıdaki grafit miktarı artmaktadır [1,7,8]. Bu durumda yapısında en yüksek oranda karbon içeren küresel grafitli dökme demir olan 2 numaralı malzemenin aynı zamanda en yüksek grafit hacim oranını içermesi beklenir. Küresel grafitli dökme demirin üretimi sırasında küreleştirici element olarak yapıya katılan optimize edilmiş bir magnezyum içeriği yüksek küre sayısı ve iyi bir küreleşmenin gözlenmesi için gereklidir. Grafit kürelerinin şekli mekanik özellikleri etkiler ve tam küresellikten uzaklaştıkça küresel grafitli dökme demirin mekanik özelliklerinde düşme görülür [1,3,9]. Malzeme 4’de magnezyum’un diğer malzemelere göre daha yüksek oranlarda bulunması bu malzemenin içermiş olduğu grafitlerin küreselliklerine de yansımaktadır (Tablo 6.1).

İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısal incelemeleri sonucunda 1 numaralı malzeme Şekil 6.2’den de görüldüğü gibi döküm halinde hemen hemen tamamen ferritik olup çok az miktarda perlit içermekte iken, 2 ve 3 numaralı

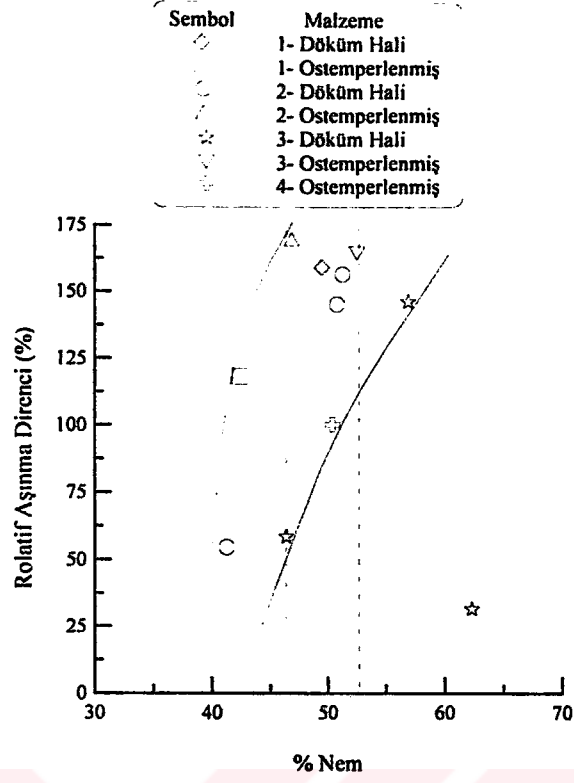
malzemeler (sırasıyla Şekil 6.3 ve Şekil 6.4) döküm halinde grafitlerin etrafının ferrit halkaları ile çevrili olduğu, geri kalan bölgede ise perlitin yer aldığı tipik “boğa gözü” yapısına sahiptirler. Ancak 3 numaralı malzeme 2 numaralı malzemeye göre yapısında daha fazla oranda perlit içermektedir. Ostemperleme ısı işlemi uygulanmış küresel grafitli dökme demirlerde ise izotermal dönüşümün bir sonucu beynitik mikroyapılar oluşmuştur. 1 ve 2 numaralı malzemeler, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’de görüldüğü gibi üst beynit yapısının oluştuğu 340 °C’de ostemperlenmişlerdir. Üst beynit yapısı, alt beynit mikroyapısına göre daha kaba olup, karbürsüz ferrit iğneleri ve kalıntı ostenitten oluşmaktadır. 340 °C’de ostemperlenen 1 ve 2 numaralı malzemelerde kalıntı ostenit ferrit iğneleri arasında yer almaktadır. Ostemperlenmiş olarak temin edilen 4 numaralı malzemede de aynı zamanda üst beynitik bir yapının oluştuğu görülmektedir (Şekil 6.5). Bu malzeme yapısında, kaba ferrit iğnelerinin yanı sıra üst beynitin genel karakteristiklerinden birisi olan küresel bir şekle sahip olan yüksek karbonlu ostenit de yer almaktadır. 3 numaralı malzemede ise daha ince ferrit iğnelerinin arasında ince görünümlü yüksek karbonlu ostenitin yer aldığı alt beynit yapısının oluştuğu görülmektedir (Şekil 6.4).

Döküm halinde en yüksek sertliğe sahip olan küresel grafitli dökme demir, bileşiminde diğerlerine oranla daha yüksek miktarlarda molibden, krom ve nikel bulunan (Tablo 5.1) ve mikroyapısında mukavemetli bir faz olan perlitli [8] % 75 oranında içeren (Tablo 6.1) 3 numaralı malzemedir. 1 numaralı malzemenin % 84 oranında ferritik bir yapıya sahip olması nedeniyle sertliği de en düşük seviyededir. Her bir malzeme için ostemperleme ısı işlemi ile sertlik döküm haline göre artmaktadır. Bu sonuç, literatürde yapılan çalışmalarla uyumludur [3,10,16,34-39]. Ostemperleme ısı işlemi ile sertliğin artması, izotermal işlem sırasında meydana gelen mikroyapısal dönüşümün bir sonucudur [4,27]. Nitekim ostemperleme ısı işlemi ile 1 numaralı malzemenin sertliği % 84, 2 numaralı malzemenin sertliği % 66 ve 3 numaralı malzemenin sertliği ise % 85 oranlarında artmıştır. Ostemperlenmiş durumda 4 numaralı malzemenin diğerlerinden daha sert olmasının nedeni, ostemperlenmiş yapıda sertliği en yüksek derecede arttıran element olan molibden’i yapısında daha fazla oranlarda içermesinden kaynaklanmaktadır [16,41]. Ayrıca molibden ostemperlenmiş yapıda nikel, manganez ve bakır’la birlikte bulunduğunda sertliğe etkisi daha belirgindir [16].

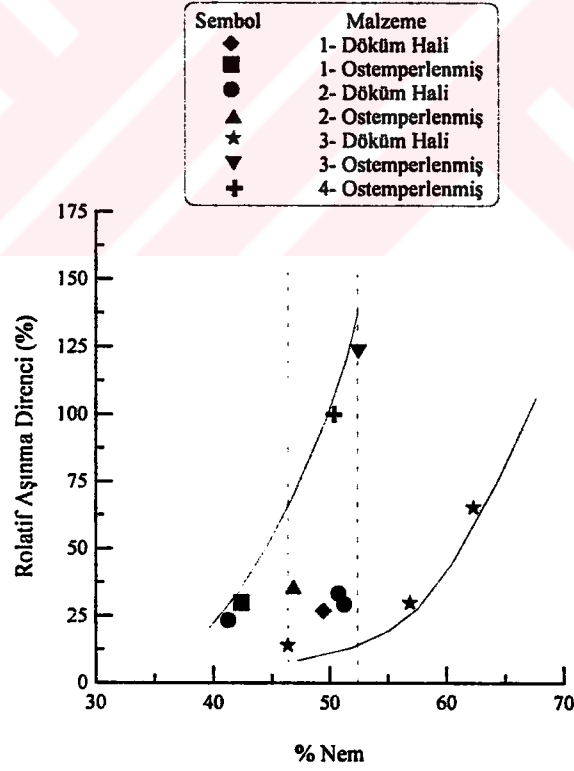
7.2. Aşınma Deneyleri

7.2.1. Metal-Metal Aşınma Deneyleri

Metal-metal aşınma deneylerinde çalışılan ortamın nem miktarı metallerin aşınma davranışı üzerinde önemli derecede etkilidir. Döküm halinde ve ostemperlenmiş durumda incelenen küresel grafitli dökme demirlerin aşınma direncine, deneyin yapıldığı ortamdaki nemin etkisi Şekil 7.1'de verilmiştir. Gerek ağırlık kaybı kriterine göre belirlenen rölatif aşınma direnci (Şekil 7.1.a), gerekse yükseklik kaybı kriterine göre belirlenen rölatif aşınma direnci (Şekil 7.1.b) genel olarak nem miktarındaki artışa bağlı olarak artmaktadır. Bu durum spesifik olarak, % 41.3 ile % 62.3 nem aralığında incelenen döküm halindeki malzeme 2 ve malzeme 3'de görülebilir. Döküm halinde incelenen malzeme 2'de ortamın neminin % 41.3'den % 51.3'e artmasıyla rolatif aşınma direnci, ağırlık kaybı kriter alındığında % 54.5'den % 156.1'e artarken (Şekil 7.1.a), yükseklik kaybı kriter olarak alındığında % 23.3'den % 29.3'e artmaktadır (Şekil 7.1.b). Döküm halinde incelenen malzeme 3'de ise ortamın neminin % 46.4'den % 62.3'e artması ile rolatif aşınma direnci, ağırlık kaybı kriter alındığında % 58.3'den % 31.4'e düşerken (Şekil 7.1.a), yükseklik kaybına göre % 14.0'dan % 65.3'e artmaktadır (Şekil 7.1.b). Malzeme 3'de ağırlık kaybına göre, artan nem miktarı ile aşınma direncinin artması beklenirken, bunun tersi bir olay gözlenmiştir. Ayrıca, en düşük sertliğe sahip olan ve düşük nem oranında (% 49.4) test edilen malzeme 1'de, ağırlık kaybına göre hesaplanan rölatif aşınma direnci, beklenenin aksine yüksek bir değerde bulunmuştur. Çelişki oluşturan bu iki durum yükseklik kaybı kriter olarak alındığında gözlenmemektedir. Bu da küresel grafitli dökme demirlerin metal-metal aşınması sırasında meydana gelen yanıl taşmalar (Şekil 6.6) nedeniyle ağırlık kayıplarının sonuçlara sağlıklı olarak yansımamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, metal-metal aşınma deney sonuçlarının irdelenmesinde daha çok yükseklik kaybı kriter olarak alınmıştır.



(a)



(b)

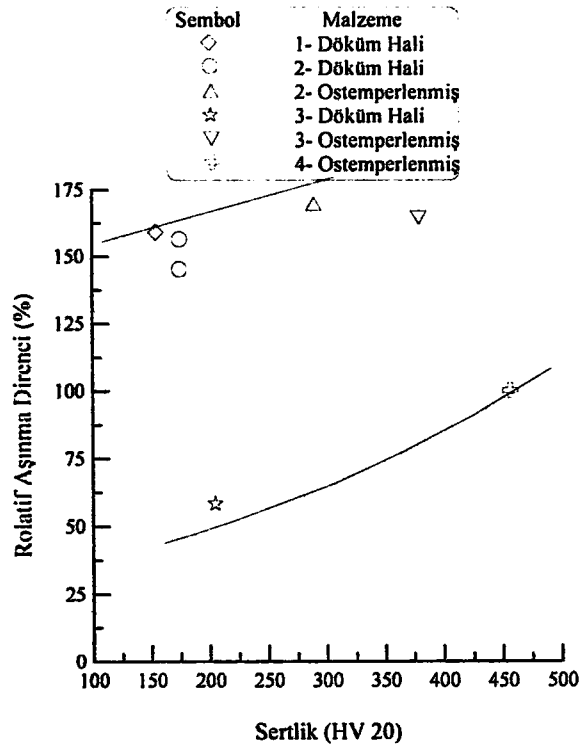
Şekil 7.1. İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin metal-metal aşınmasında (a) ağırlık kaybına ve (b) yükseklik kaybına göre belirlenen relatif aşınma dirençlerine nemin etkisi.

Küresel grafitli dökme demirlerin metal-metal aşınmasında yapıda bulunan küresel grafitin yağlayıcı olarak davrandığı bilinmektedir [7,11-13]. Bunun yanı sıra malzemenin sertliği de metal-metal aşınmasında önemli bir parametredir [12,13]. Bu nedenle % 47-52 nem aralığında (Şekil 7.1’de kesikli çizgi ile gösterilen aralıkta) yapılan aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlara göre sertliğin ve grafit hacim oranının aşınma direncinin üzerine etkisi irdelenmiştir.

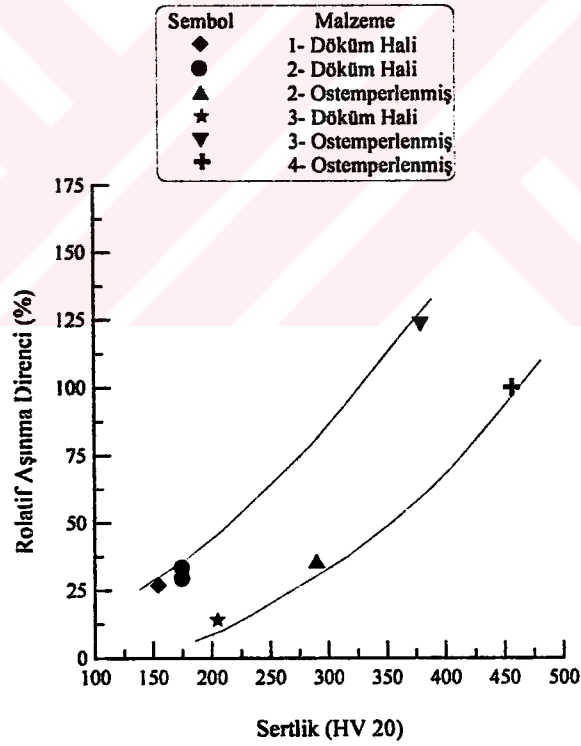
Ağırlık kaybı ve yükseklik kaybı kriterlerine göre belirlenen rolatif aşınma dirençlerine sertliğin etkisi, Şekil 7.2’de gösterilmiştir. Yükseklik kaybının kriter olarak alındığında genel eğilim, sertliğin artması ile birlikte rolatif aşınma direncinin de artması şeklindedir (Şekil 7.2.b). Ancak sertliği en yüksek küresel grafitli dökme demir olan (457 HV) ostemperlenmiş durumdaki malzeme 4’ün rolatif aşınma direnci, sertliği daha düşük olan (380 HV) malzeme 3’ün rolatif aşınma direncinden daha azdır.

Ağırlık kaybı ve yükseklik kaybı kriterlerine göre belirlenen rolatif aşınma dirençlerine grafit hacim oranının etkisi, Şekil 7.3’de gösterilmiştir. Yükseklik kaybı kriter olarak alındığında, grafit hacim oranının artması ile birlikte rolatif aşınma direnci de artmaktadır (Şekil 7.3.b). Yüksek sertlik (380-457 HV) aralığındaki malzemelerden, malzeme 4 en sert küresel grafitli dökme demir (457 HV) olmasına karşın malzeme 3’den (380 HV) daha düşük grafit hacim oranına sahip olduğu için daha düşük rolatif aşınma direnci göstermektedir. Daha düşük sertlik aralığındaki (155-290 HV) malzeme (döküm hali ve ostemperlenmiş durumdaki malzeme 1, döküm hali ve ostemperlenmiş durumdaki malzeme 2 ve döküm halindeki malzeme 3) gruplarında da grafit hacim oranının artması ile rolatif aşınma direnci artmaktadır.

Sonuç olarak küresel grafitli dökme demirlerin metal-metal aşınma davranışlarının incelenmesinde, dış parametre olan nemin etkisinin yanında iç parametre olan sertlik ve grafit hacim oranının da birlikte dikkate alınması gerekmektedir. En üstün aşınma direncini elde etmek için küresel grafitli dökme demirler optimum sertlik ve grafit hacim oranı değerlerine sahip olmalıdırlar.

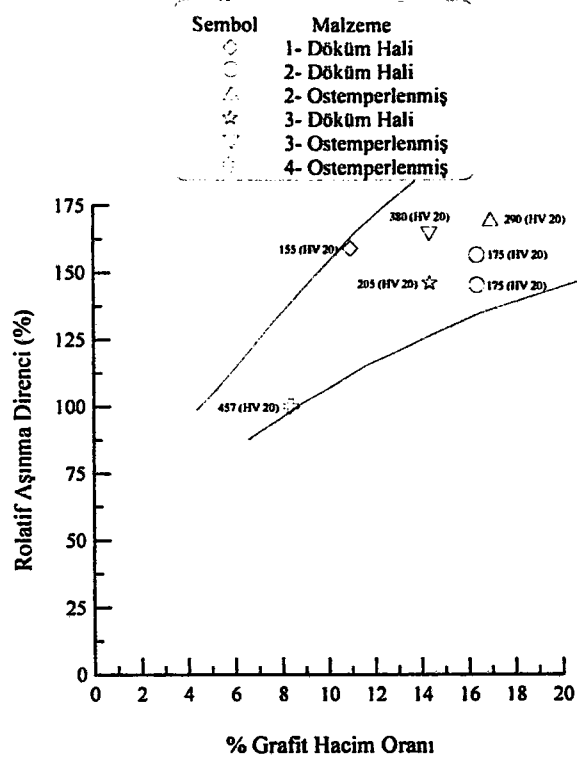


(a)

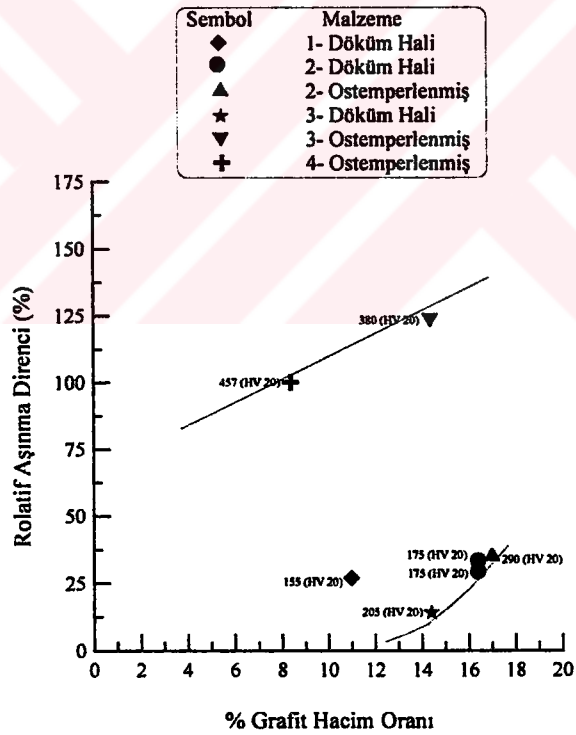


(b)

Şekil 7.2. İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin metal-metal aşınmasında (a) ağırlık kaybına ve (b) yükseklik kaybına göre belirlenen relatif aşınma dirençlerine sertliğin etkisi.



(a)



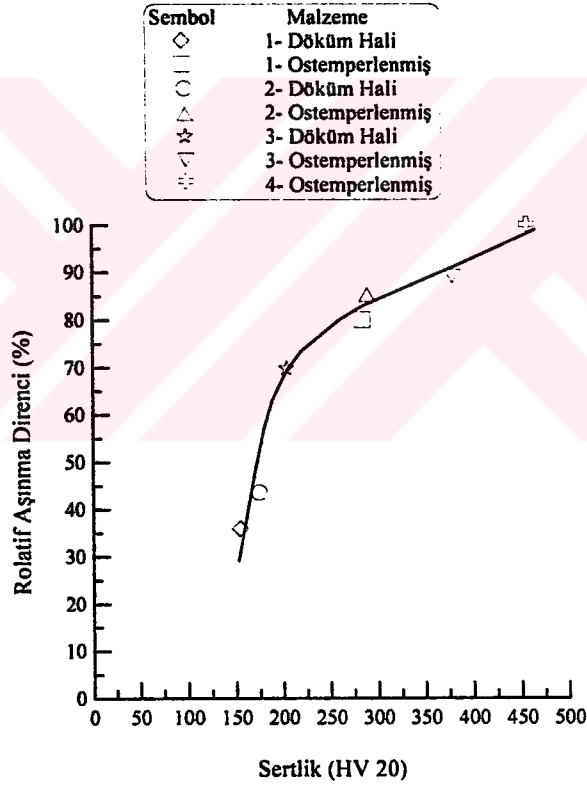
(b)

Şekil 7.3. İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin metal-metal aşınmasında (a) ağırlık kaybına ve (b) yükseklik kaybına göre belirlenen relatif aşınma dirençlerine grafit hacim oranının etkisi.

7.2.2. Metal-Abrasiv Aşınma Deneyleri

7.2.2.1. Oda Sıcaklığında Metal-Abrasiv Aşınma Deneyleri

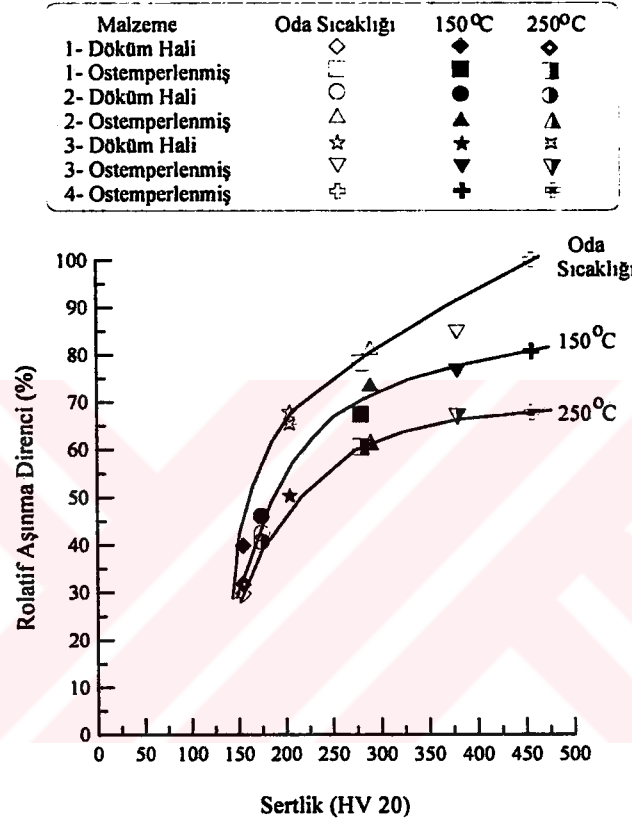
Ağırlık kaybı kriterine göre belirlenen relatif aşınma direncinin sertlik ile değişimi Şekil 7.4’de gösterilmiştir. Buna göre, incelenen küresel grafitli dökme demirlerin relatif aşınma dirençleri, sertlikteki artışla birlikte artmaktadır. Bu sonuç, metal-abrasiv aşınmasında malzemenin sertliğinin en etkili parametre olduğunu vurgulayan literatür çalışmaları [12,13,22,29] ile uyumludur. İncelenen küresel grafitli dökme demirler içerisinde, oda sıcaklığında en yüksek metal-abrasiv aşınma direnci, beynitik bir mikroyapıya sahip 457 HV sertliğindeki malzeme 4’de, en düşük metal-abrasiv aşınma direnci ise % 93 oranında ferritik bir matrikse sahip olan 155 HV sertliğindeki malzeme 1’de gözlenmiştir.



Şekil 7.4. Metal-abrasiv deneylerinde incelenen küresel grafitli dökme demirlerin ağırlık kaybına göre belirlenen relatif aşınma dirençlerine sertliğin etkisi.

7.2.2.2. Yüksek Sıcaklıklarda Metal-Abrasiv Aşınma Deneyleri

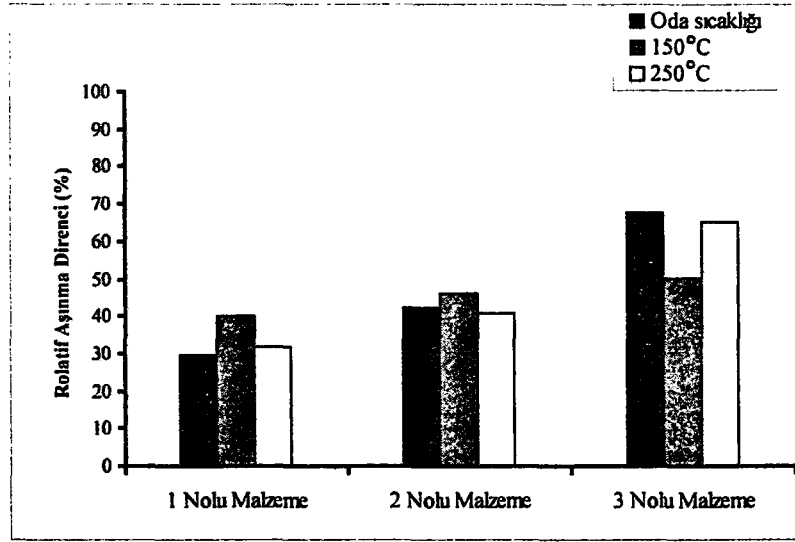
İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin 150 ve 250 °C sıcaklıklarında yapılan metal-abrasiv aşınma deneylerinden ağırlık kaybına göre elde edilen rölatif aşınma direnci değerlerinin oda sıcaklığında ölçülen sertliklere bağlı olarak değişimi Şekil 7.5’de verilmiştir. Genel olarak, metal-abrasiv aşınma direnci sertliğin artmasıyla artarken, deney sıcaklığının artmasıyla düşmektedir.



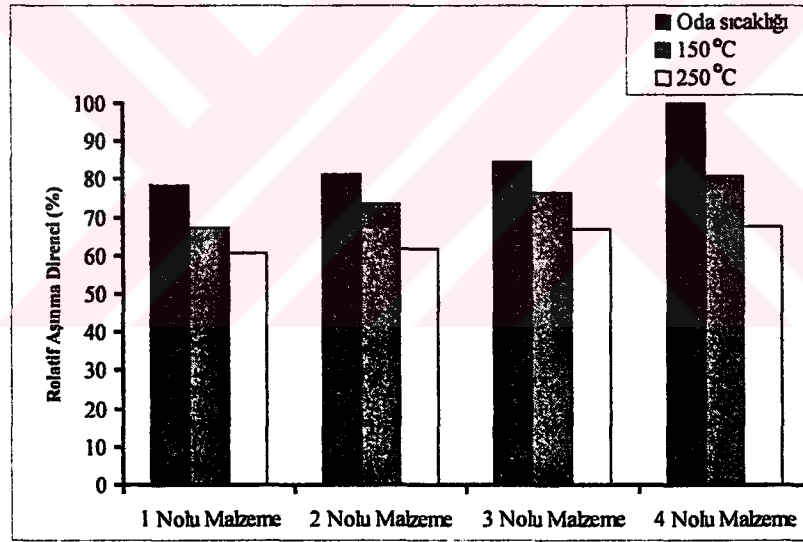
Şekil 7.5. 150 ve 250 °C sıcaklıklarında yapılan metal-abrasiv aşınma deneylerinde incelenen küresel grafitli dökme demirlerin ağırlık kaybına göre belirlenen rölatif aşınma dirençlerinin oda sıcaklığında ölçülen sertliklere bağlı olarak değişimi

İncelenen küresel grafitli dökme demirlerde deney sıcaklığının, mikroyapıya (döküm veya ostemperlenmiş) bağlı olarak metal-abrasiv aşınma direncine etkisi Şekil 7.6’da verilmiştir. Buna göre, döküm halinde incelenen küresel grafitli dökme demirlerin metal-abrasiv aşınma davranışlarına sıcaklığın etkisi çok belirgin değildir (Şekil 7.6.a). Buna karşın, ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin yüksek sıcaklıktaki metal-abrasiv davranışlarında sıcaklığın artması ile rölatif aşınma direnci

belirgin bir şekilde düşmüştür (Şekil 7.6.b). Bu düşüş yüksek sıcaklıkla ostemperlenmiş yapıların değişimine dayandırılabilir.



(a)



(b)

Şekil 7.6. Sıcaklığın, (a) döküm halinde ve (b) ostemperlenmiş durumda incelenen küresel grafitli dökme demirlerin metal-abrasiv aşınma direncine etkisi.

8. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada farklı kimyasal bileşimlerdeki ve farklı mikroyapılara sahip (döküm hali ve ostenperlenmiş) küresel grafitli dökme demirlerin metal-metal ve metal-abrasiv aşınma davranışları incelenmiş ve sonuçlar genel olarak aşağıda belirtilmiştir.

- 1- Metal-metal aşınmasında ortamın nem miktarı küresel grafitli dökme demirin aşınma davranışı üzerinde etkili bir parametredir. Nem miktarının artmasına bağlı olarak küresel grafitli dökme demirlerin rölatif aşınma dirençleri de artmıştır. En düşük sertliğe sahip (155 HV) % 84 oranında ferrit içeren küresel grafitli dökme demirde ortam neminin % 46.4'den % 62.3'e artması ile yükseklik kaybına göre belirlenen rölatif aşınma direnci % 14'den % 65.3'e artmıştır.
- 2- % 47-52 nem aralığında yapılan metal-metal aşınma deneylerinde aşınma direncinin, malzemenin sertliğindeki ve mikroyapıda bulunan grafit kürelerinin hacim oranındaki artışa bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Sertliği 290 HV ve grafit hacim oranı % 16.4 olan küresel grafitli dökme demir, sertliği 155 HV ve grafit hacim oranı % 11 olan küresel grafitli dökme demirden daha fazla rölatif aşınma direnci göstermiştir.
- 3- En üstün metal-metal aşınma direnci, sertlik ve grafit hacim oranlarının en yüksek değerleri sağlandığında elde edilmektedir. İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin rölatif aşınma direncine grafit hacim oranının etkisi iki farklı sertlik (155-290 HV ve 380-457 HV) aralığı için değerlendirilmiştir. Daha düşük sertlik aralığındaki (155-290 HV) küresel grafitli dökme demirlerden sertliği 175 HV grafit hacim oranı % 16,4 olan malzeme, sertliği 205 HV ve grafit hacim oranı % 14,4 olan küresel grafitli dökme demirden daha yüksek rölatif aşınma direnci göstermiştir. Yüksek sertlik aralığında (380-457 HV) da sertliği 457 HV olan ve hacimce % 8.4 grafit içeren ostenperlenmiş küresel grafitli dökme

demirin aşınma direnci, 380 HV sertliğindeki ve % 14.4 grafit hacim oranı içeren ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirden daha düşüktür.

- 4- Oda sıcaklığında 120 mesh Al_2O_3 zımpara üzerinde yapılan metal-abrasiv aşınma deneylerinde, küresel grafitli dökme demirlerin rölatif aşınma dirençlerinin sertlikle arttığı bulunmuştur. Ostemperlenmiş mikroyapıya sahip 457 HV sertliğindeki küresel grafitli dökme demir, incelenen malzemeler içerisinde en yüksek rölatif aşınma direncine sahiptir.
- 5- Metal-abrasiv aşınma deneylerinde, küresel grafitli dökme demirlerin aşınma direnci ortam sıcaklığının artması ile birlikte düşmektedir. Ortam sıcaklığının metal-abrasiv aşınma direnci üzerindeki etkisi, ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde döküm halindeki küresel grafitli dökme demirlere göre daha belirgindir. Her bir sıcaklık için incelenen küresel grafitli dökme demirlerin rölatif aşınma dirençleri, oda sıcaklığında sahip oldukları sertlik değerlerinin artması ile artmıştır. Oda sıcaklığındaki sertliği 457 HV olan küresel grafitli dökme demir, oda sıcaklığında yapılan metal-abrasiv aşınma deneylerinde olduğu gibi 150 ve 250 °C'de yapılan metal-abrasiv aşınma deneylerinde de en yüksek rölatif aşınma direncine sahiptir.

KAYNAKLAR

- [1] **ASM Specialty Handbook**, 1996, Cast Irons, ASM International.
- [2] **Metals Handbook**, 1990. 10th Ed., 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, ASM International.
- [3] **Kökden, M.U.**, 1998. GGG 50 ve GGG 80 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin abrasiv aşınma davranışına ostemperleme işleminin etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Baydoğan, M.**, 1996. GGG-60 sınıfı küresel grafitli dökme demirde ostemperleme ısı işleminin çekme, yorulma ve aşınma özelliklerine etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] **Dikeç, F.**, 1971. Magnezyum ile yapılan küresel grafitli dökme demir üretiminde bileşim ve bazı döküm şartlarının etkileri, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] **ASTM A 247**, 1990. Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings, Annual Book of ASTM Standards, 03.02.
- [7] **Çavuşoğlu, E.N.**, 1992. Döküm Teknolojisi I, İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [8] **Karsay, S.I.**, 1976., Ductile Iron I Production, Quebec Iron and Titanium Corporation, Canada.
- [9] **Labrecque, C. and Gagne, M.**, 1998. Review Ductile Iron: Fifty years of continuous development, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 37, 343-378.
- [10] **Ahmadabadi, M.N., Ghasemi, H.M. and Osia, M.**, 1999. Effects of successive austempering on the tribological behavior of ductile cast iron, *Wear*, 231, 293-300.
- [11] **Sugishita, J. and Fujiyoshi, S.**, 1981. The effect of cast iron graphites on friction and wear performance I: graphite film formation on gray cast iron surface, *Wear*, 68, 209-221.
- [12] **Hutchings, I.M.**, 1992. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, CRC Press, London.

- [13] **Rabinowicz, E.**, 1995. Friction and wear of materials, A Wiley-Interscience publication, New York.
- [14] **ASTM A 536**, 1993. Standard Specification for Ductile Cast Iron Castings, Annual Book of ASTM Standards, 03.02.
- [15] **Başman, G.**, 1998. GGG 40 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin yorulma davranışına TiN kaplamanın etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [16] **Trudel, A. and Gagne, M.**, 1997. Effect of composition and heat treatment parameters on the characteristics of austempered ductile irons, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 36, 289-298.
- [17] **Korichi, S. and Priestner, R.**, 1995. High temperature decomposition of austempered microstructures in spheroidal graphite cast iron, *Materials Science and Technology*, 11, 901-907.
- [18] **Aranzabal, J., Gutierrez, I., Rodriguez-Ibabe, J.M. and Urcola, J.J.**, 1997. Influence of the amount and morphology of retained austenite on the mechanical properties of an austempered ductile iron, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 28A, 1143-1156.
- [19] **Chang, L.C.**, 1998. Carbon content of austenite in austempered ductile iron, *Scripta Materialia*, 39, 35-38.
- [20] **Kutsov, A., Taran, Y., Uzlov K., Krimmel A. and Evsyukov M.**, 1999. Formation of bainite in ductile iron, *Materials Science and Engineering*, A273-275, 480-484.
- [21] **Darwish, N. and Elliot, R.**, 1993. Austempering of low manganese ductile irons, Part I: Processing window, *Materials Science and Technology*, 9, 572-585.
- [22] **Baydoğan, M., Kökden, M.U. ve Çimenoglu H.**, 1999. Özel ostenperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin abrasiv aşınma özellikleri, *Makina Mühendisleri Odası Denizli Şubesi Bilim Günleri*, Denizli, 5-6-7 Mayıs, s.80-85.
- [23] **Grech, M. and Young, J.M.**, 1990. Influence of austempering temperature on the characteristics of austempered ductile iron alloyed with Cu and Ni, *AFS Transactions*, 90.

- [24] **Yalçın, Y.**, 1997. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir dişli üretim teknolojisinin geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [25] **Darwish, N. and Elliot, R.**, 1993. Austempering of low manganese ductile irons, Part 3: Variation of mechanical properties with heat treatment conditions, *Materials Science and Technology*, **9**, 882-889.
- [26] **Hamid Ali, A.S. and Elliot, R.**, 1996. Austempering of an Mn-Mo-Cu alloyed ductile iron, Part 1: Austempering kinetics and processing window, *Materials Science and Technology*, **12**, 1021-1031.
- [27] **Darwish, N. and Elliot, R.**, 1993. Austempering of low manganese ductile irons, Part 2: Influence of austenitising temperature, *Materials Science and Technology*, **9**, 586-602.
- [28] **Wen, D.C. and Lei, T.S.**, 1999. The mechanical properties of a low alloyed austempered ductile iron in the upper ausferrite region, *ISIJ International*, **39**, 493-500.
- [29] **Luo, Q., Xie, J. and Song, Y.**, 1995. Effects of microstructures on the abrasive wear behaviour of spheroidal cast iron, *Wear*, **184**, 1-10.
- [30] **Jeng, M.C.**, 1993. Abrasive wear study of bainitic nodular cast iron, *Journal of Materials Science*, **28**, 6555-6561.
- [31] **Hamid Ali, A.S., Uzlov, K.I., Darwish, N., and Elliot, R.**, 1997. Influence of austenitising temperature on austempering of an Mn-Mo-Cu alloyed ductile iron, Part 2: Mechanical Properties, *Materials Science and Technology*, **13**, 24-30.
- [32] **Tan, Y.H., Yu, S.I., Doong, J.L. and Hwang J.R.**, 1990. Abrasive wear property of bainitic nodular cast iron in laser processing, *Journal of Materials Science*, **25**, 4133-4139.
- [33] **Boutorabi, S.M.A., Young, J.M., Kondic, V. and Salehi, M.**, 1993. The tribological behaviour of austempered spheroidal graphite aluminium cast iron, *Wear*, **165**.
- [34] **Fordyce, E.P. and Allen, C.**, 1990. The dry sliding wear behaviour of an austempered spheroidal cast iron, *Wear*, **135**, 265-278.

- [35] Prado, J.M., Pujol, J., Cullell, J. and Tartera, J., 1995. Dry sliding wear of austempered ductile iron, *Materials Science and Technology*, 11, 294-298.
- [36] Owhadi, A., Hedjazi, J. and Davami P., 1998. Wear behaviour of 1.5 Mn austempered ductile iron, *Materials Science and Technology*, 14, 245-250.
- [37] Hemanth, J., 2000. Wear characteristics of austempered chilled ductile iron, *Materials and Design*, 21, 139-148.
- [38] Haseeb, A.S.M.A., Islam, M.A. and Bepari, M.M.A., 2000. Tribological behaviour of quenched and tempered, and austempered ductile iron at the same hardness level, *Wear*, 244, 15-19.
- [39] Islam, M.A., Haseeb, A.S.M.A. and Kurny, A.S.W., 1995. Study of wear of as-cast and heat-treated spheroidal graphite cast iron under dry sliding conditions, *Wear*, 188, 61-65.
- [40] Johansson, M., Austenitic-bainitic ductile iron, *AFS Transactions*, 77-73, 117-122.
- [41] Krishnaraj, D., Narasimhan, H.N.L. and Seshan, S., Structure and properties of ADI as affected by low alloy additions, *AFS Transactions*, 92-100, 105-112.
- [42] ASTM A 897, 1990. Standard Specifications for Austempered Ductile Iron Castings, Annual Book of ASTM Standards, 03.02.
- [43] ASTM A 897 M, 1990. Standard Specifications for Austempered Ductile Iron Castings, Annual Book of ASTM Standards, 03.02.
- [44] Schmidt, I. and Schuchert, A., 1987. Unlubricated sliding wear of austempered ductile iron, *Werkstofftechn.*, 12, 871-875.
- [45] ASTM G 99, 1990. Standard Test Method for Wear Testing Pin on Disk Apparatus, Annual Book of ASTM Standards, 03.02.

EK-A: Metal-metal ve metal-abrasiv aşınma deney verileri ve grafikleri

Tablo A.1. İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin metal-metal aşınmasında uğradıkları ağırlık kayıpları.

Malzeme	Malzeme Koşulu	Deney Koşulları % Nem	Ağırlık Kaybı (gr)				
			Kayma Mesafesi (m)				
			2000	4000	6000	8000	10000
1	Döküm	49.4	0.0057	0.0097	0.0139	0.0178	0.0223
	Ostemperlenmiş	42.4	0.006	0.013	0.018	0.0242	0.0307
	Döküm	41.3	0.014	0.025	0.036	0.0531	0.0686
2	Döküm	50.8	0.005	0.0108	0.0158	0.0202	0.0237
	Döküm	51.3	0.004	0.009	0.0143	0.0188	0.0227
	Ostemperlenmiş	46.9	0.0027	0.0074	0.0123	0.0175	0.0219
3	Döküm	62.3	0.0195	0.045	0.0703	0.0905	0.1157
	Döküm	46.4	0.0102	0.0206	0.0361	0.0513	0.0630
	Döküm	56.9	0.004	0.0086	0.0145	0.0206	0.0249
4	Ostemperlenmiş	52.5	0.003	0.00675	0.014	0.017	0.023
	Ostemperlenmiş	50.4	0.0048	0.0134	0.021	0.0293	0.037

Tablo A.2. İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin metal-metal aşınmasında uğradıkları yükseklik kayıpları.

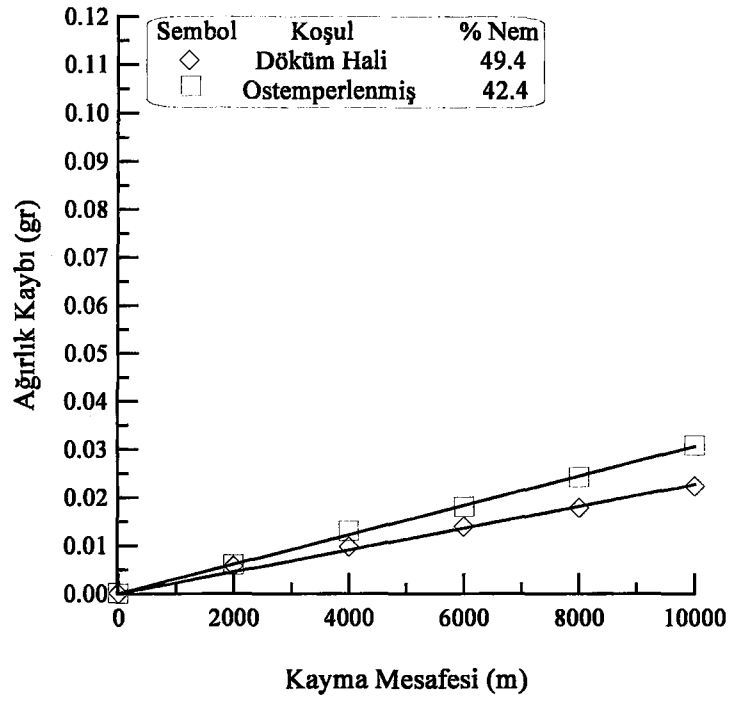
Malzeme	Malzeme Koşulu	Deney Koşulları % Nem	Yükseklik Kaybı (mm)				
			Kayma Mesafesi (m)				
			2000	4000	6000	8000	10000
1	Döküm	49.4	0.14	0.25	0.4	0.5	0.61
	Ostemperlenmiş	42.4	0.121	0.216	0.359	0.457	0.553
2	Döküm	41.3	0.177	0.3	0.449	0.575	0.709
	Döküm	50.8	0.09	0.198	0.309	0.4	0.514
	Döküm	51.3	0.107	0.23	0.36	0.46	0.57
3	Ostemperlenmiş	46.9	0.065	0.172	0.279	0.377	0.484
	Döküm	62.3	0.045	0.1	0.15	0.2	0.27
	Döküm	46.4	0.25	0.44	0.73	1.00	1.19
4	Döküm	56.9	0.11	0.223	0.34	0.45	0.57
	Ostemperlenmiş	52.5	0.028	0.053	0.078	0.109	0.141
	Ostemperlenmiş	50.4	0.034	0.065	0.103	0.138	0.167

Tablo A.3. İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin oda sıcaklığında metal-abrasiv aşınmasında uğradıkları ağırlık kayıpları.

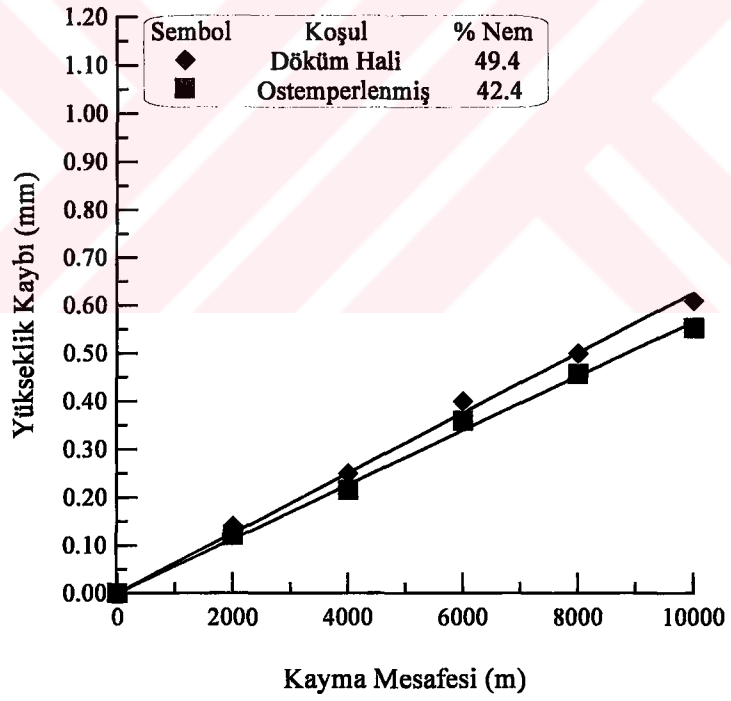
Malzeme	Malzeme Koşulu	Ağırlık Kaybı (gr)			
		Kayma mesafesi (m)			
		5.5	11	16.5	22
1	Döküm	0.055	0.1086	0.1573	0.2043
	Ostemperlenmiş	0.0210	0.0412	0.0620	0.0826
2	Döküm	0.0379	0.0761	0.1134	0.152
	Ostemperlenmiş	0.0194	0.0400	0.0589	0.0761
3	Döküm	0.0237	0.0478	0.0712	0.0943
	Ostemperlenmiş	0.0185	0.0385	0.0570	0.0723
4	Ostemperlenmiş	0.0158	0.0325	0.0498	0.0663

Tablo A.4. İncelenen küresel grafitli dökme demirlerin oda sıcaklığı, 150 °C ve 250 °C'lerdeki metal-abrasiv aşınmasında uğradıkları ağırlık kayıpları.

Malzeme	Malzeme koşulu	Ağırlık kaybı (gr)					
		Kayma Mesafesi					
		5.5 m	11 m	5.5 m	11 m	5.5 m	11 m
		Oda Sıcaklığı		150 °C		250 °C	
1	Döküm	0.055	0.1086	0.0421	0.0804	0.0488	0.1024
	Ostemperlenmiş	0.0210	0.0412	0.0256	0.0472	0.027	0.0534
2	Döküm	0.0379	0.0761	0.0398	0.0678	0.0418	0.0783
	Ostemperlenmiş	0.0194	0.0400	0.0241	0.0429	0.0264	0.0525
3	Döküm	0.0237	0.0478	0.0338	0.0635	0.0258	0.0492
	Ostemperlenmiş	0.0185	0.0385	0.0223	0.0417	0.0247	0.0482
4	Ostemperlenmiş	0.0158	0.0325	0.0209	0.0397	0.0235	0.048

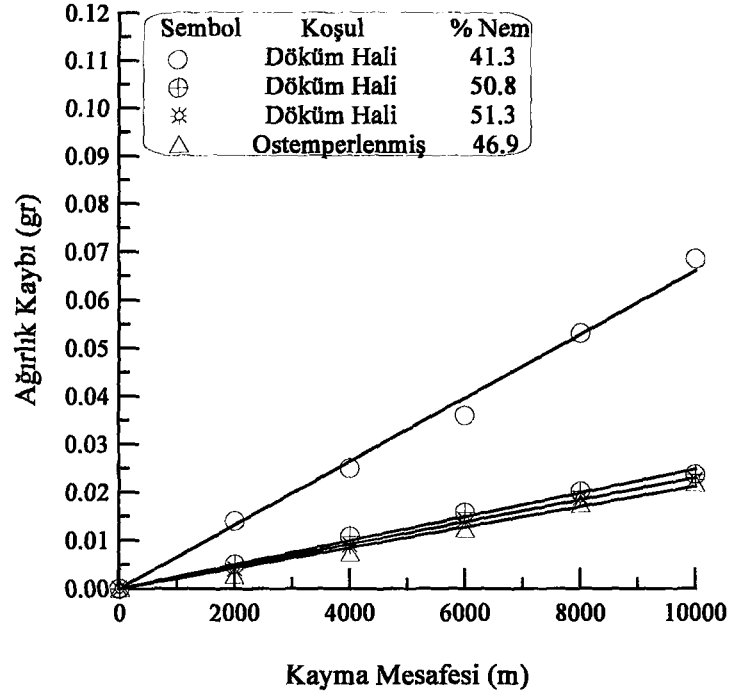


(a)

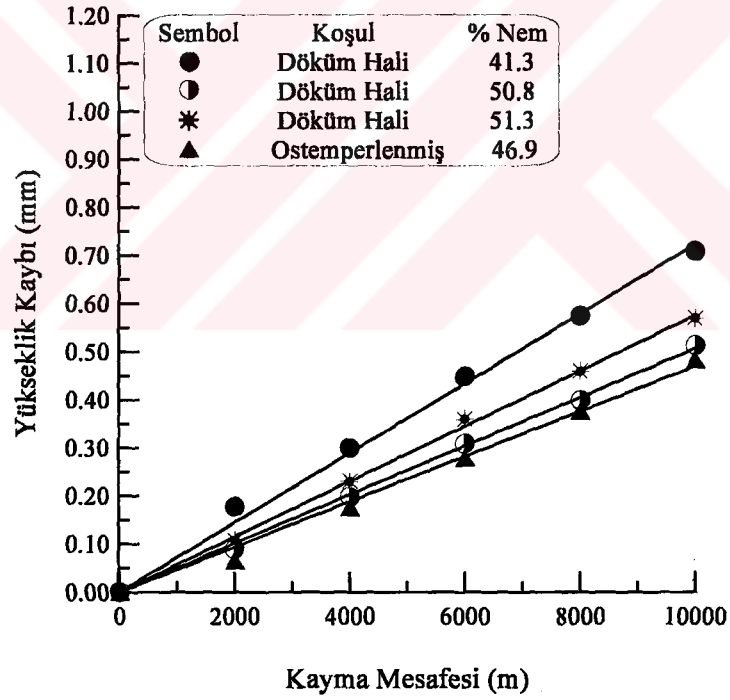


(b)

Şekil A.1. 1 numaralı malzemenin (a) ağırlık kaybı ve (b) yükseklik kaybı cinsinden metal-metal aşınma davranışı.

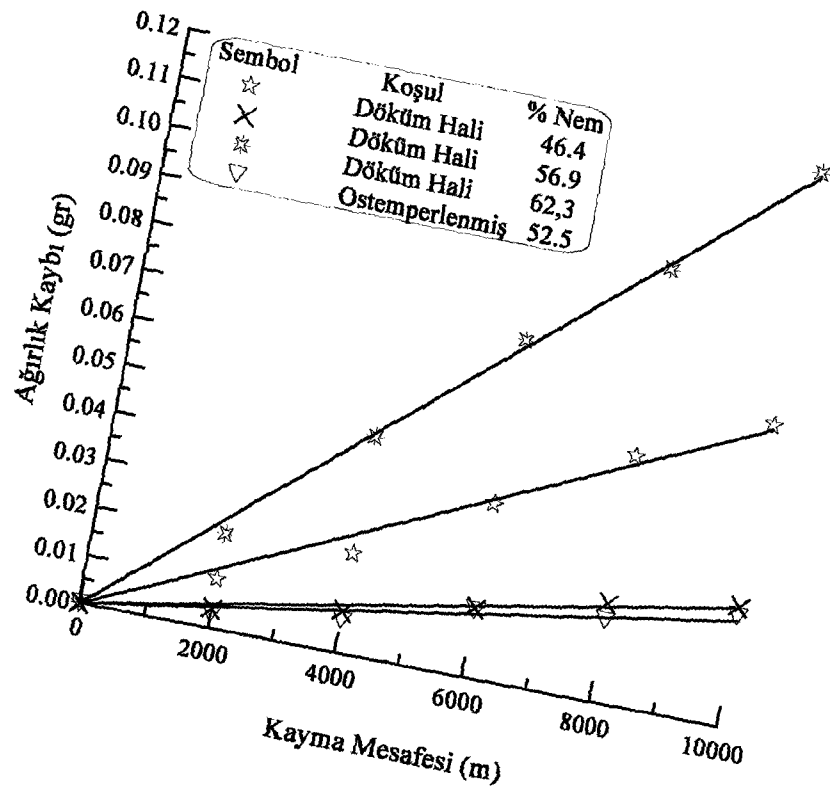


(a)

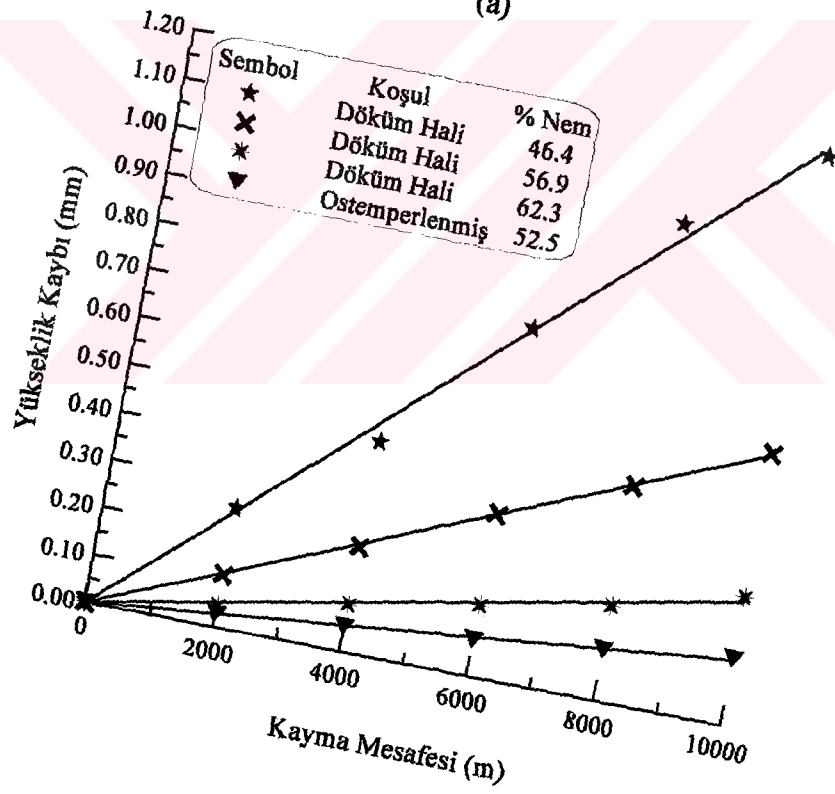


(b)

Şekil A.2. 2 numaralı malzemenin (a) ağırlık kaybı ve (b) yükseklik kaybı cinsinden metal-metal aşınma davranışı.

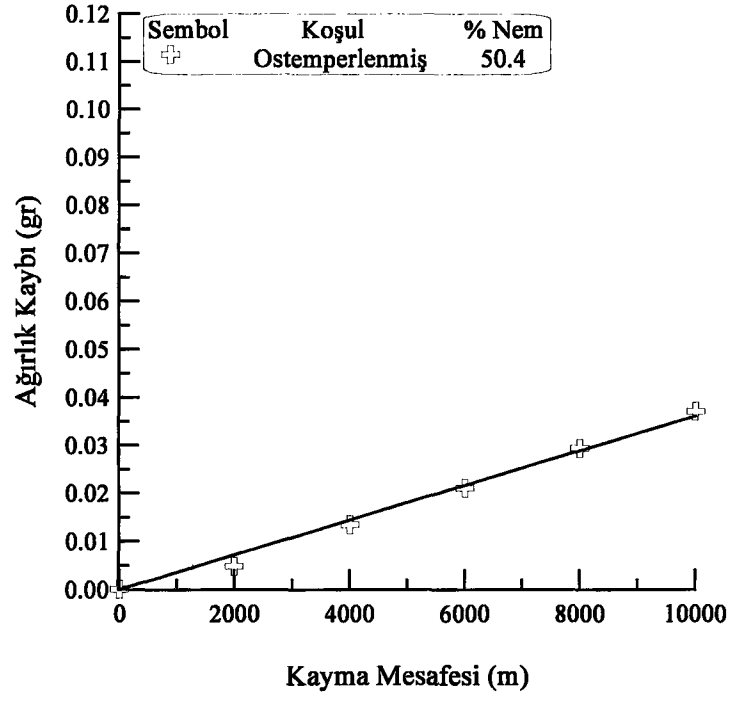


(a)

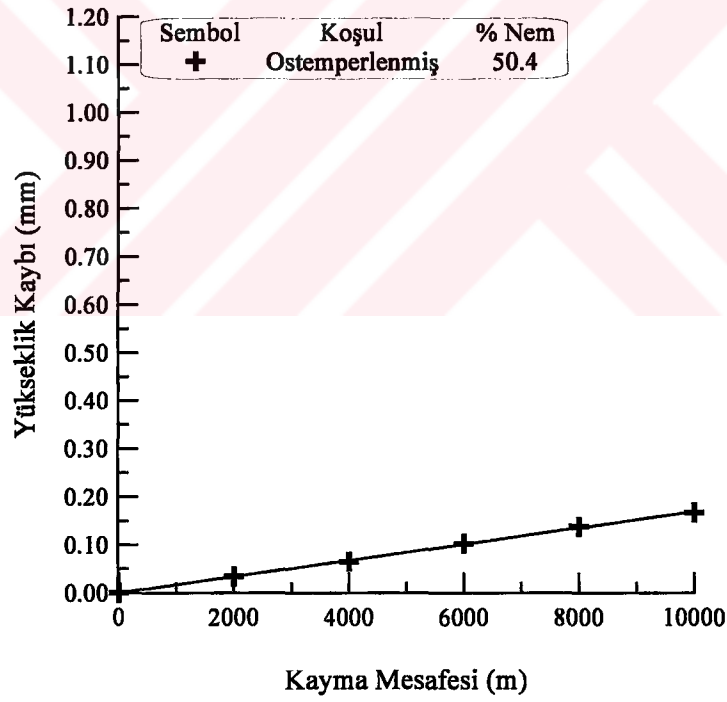


(b)

Şekil A.3. 3 numaralı malzemenin (a) ağırlık kaybı ve (b) yükseklik kaybı cinsinden metal-metal aşınma davranışı

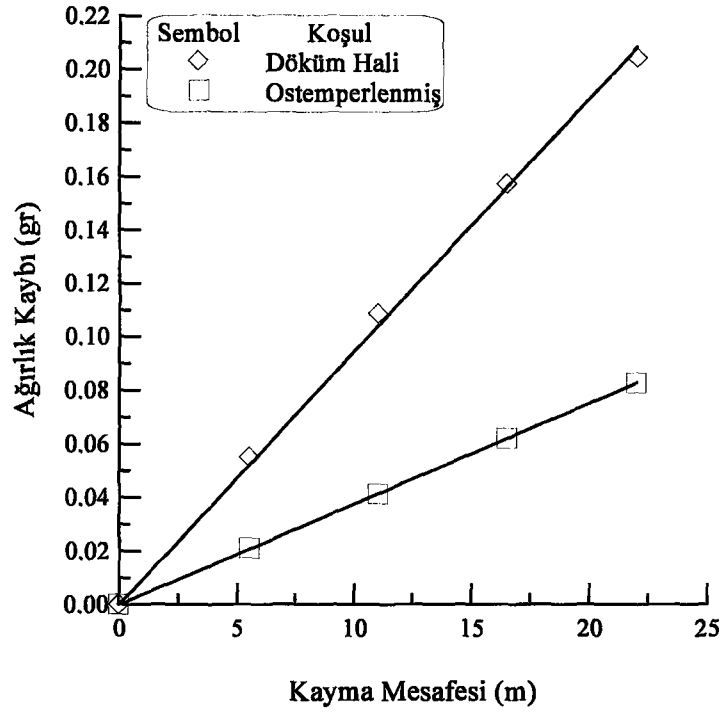


(a)

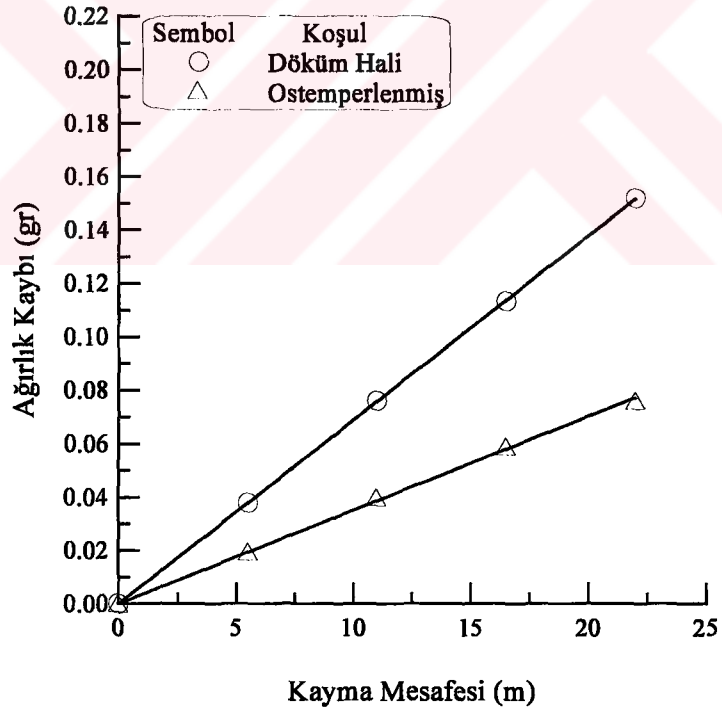


(b)

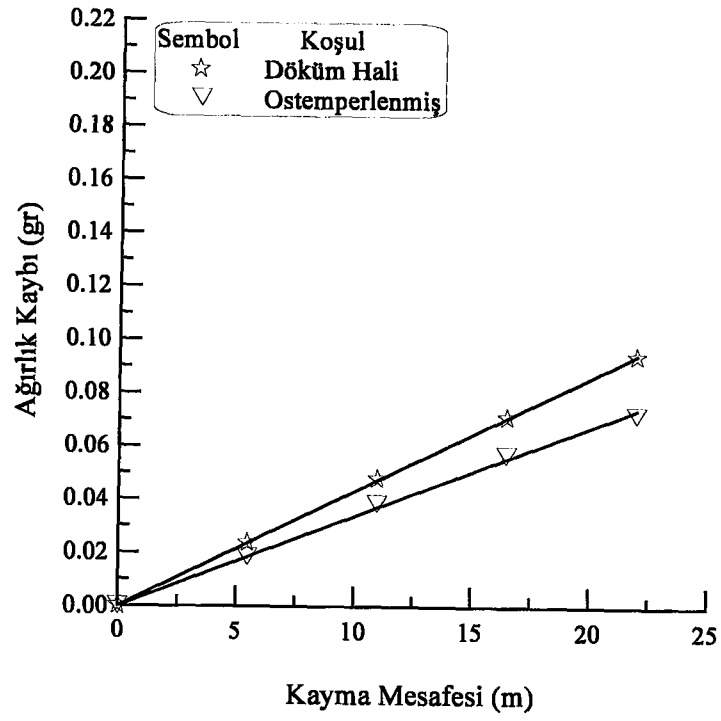
Şekil A.4. 4 numaralı malzemenin (a) ağırlık kaybı ve (b) yükseklik kaybı cinsinden metal-metal aşınma davranışı.



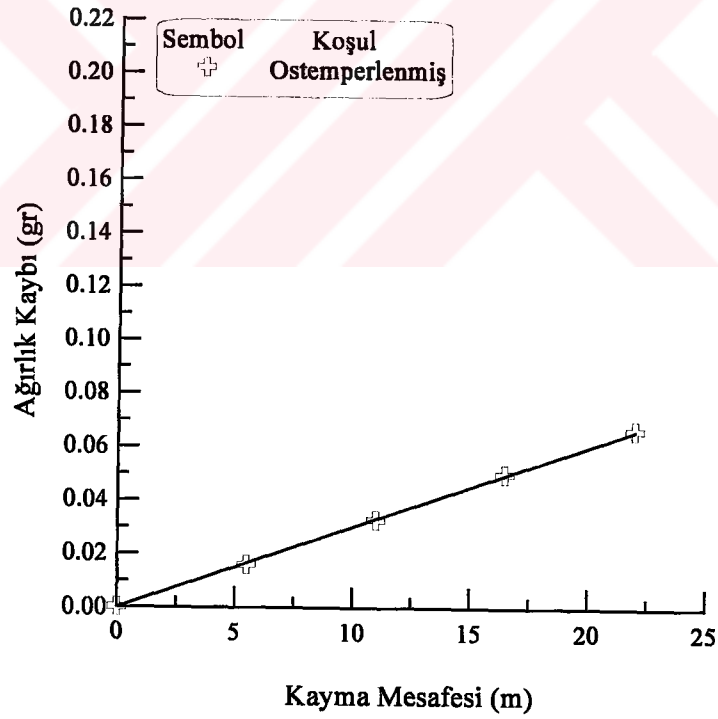
Şekil A.5. 1 numaralı malzemenin ağırlık kaybı cinsinden metal-abrasiv aşınma davranışı.



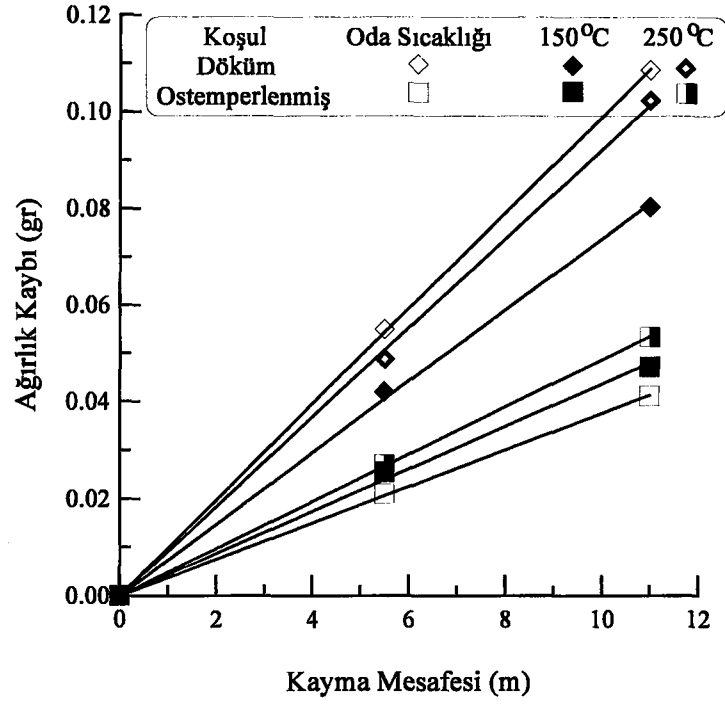
Şekil A.6. 2 numaralı malzemenin ağırlık kaybı cinsinden metal-abrasiv aşınma davranışı



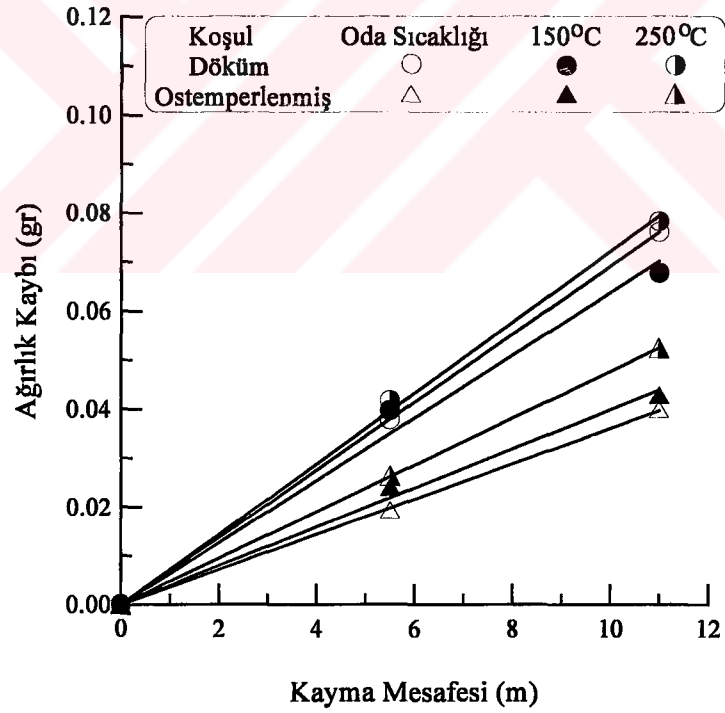
Şekil A.7. 3 numaralı malzemenin ağırlık kaybı cinsinden metal-abrasiv aşınma davranışı



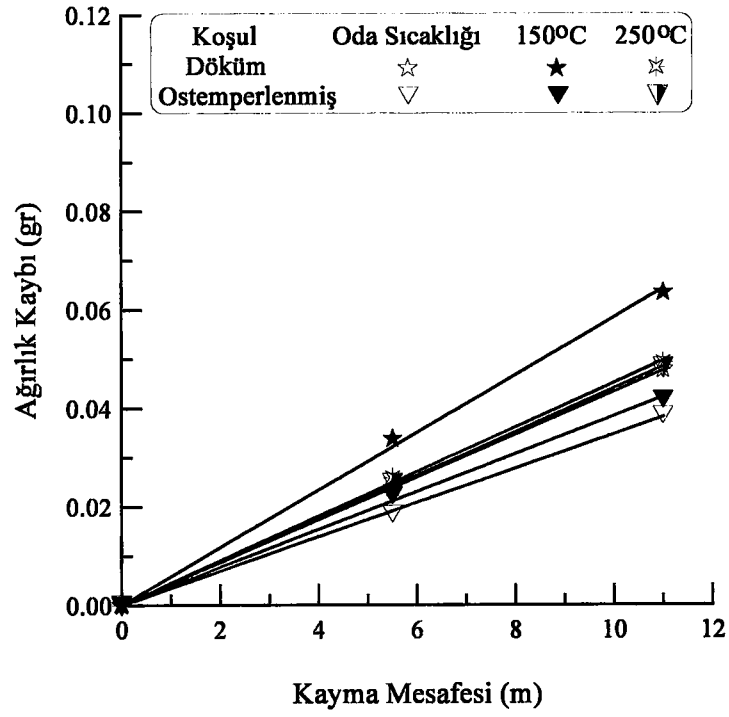
Şekil A.8. 4 numaralı malzemenin ağırlık kaybı cinsinden metal-abrasiv aşınma davranışı



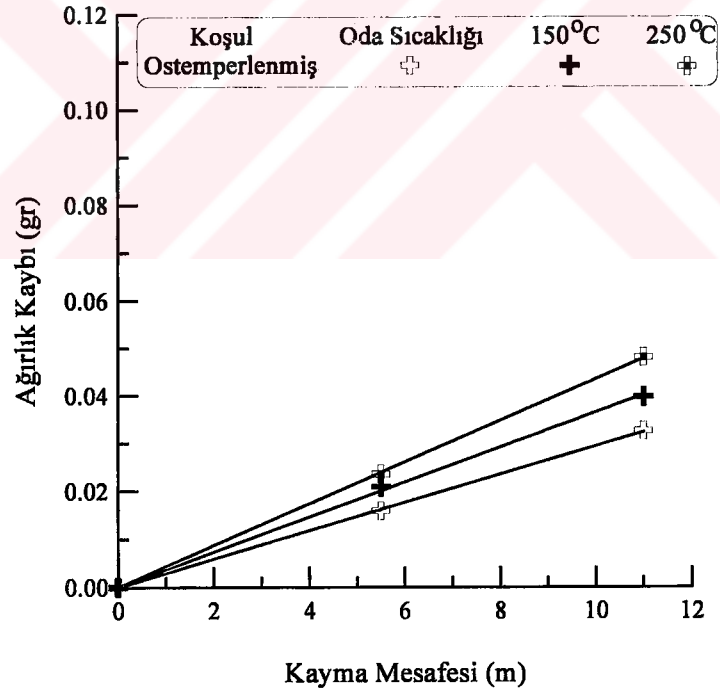
Şekil A.9. 1 numaralı malzemenin sıcaklığa bağlı olarak ağırlık kaybı cinsinden metal-abrasiv aşınma davranışı.



Şekil A.10. 2 numaralı malzemenin sıcaklığa bağlı olarak ağırlık kaybı cinsinden metal-abrasiv aşınma davranışı.



Şekil A.11. 3 numaralı malzemenin sıcaklığa bağlı olarak ağırlık kaybı cinsinden metal-abrasiv aşınma davranışı.



Şekil A.12. 4 numaralı malzemenin sıcaklığa bağlı olarak ağırlık kaybı cinsinden metal-abrasiv aşınma davranışı.

ÖZGEÇMİŞ

1976 yılında Ankara'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Ankara'da tamamladı. 1993 yılında Sincan İbn-i Sina Lisesi'nden mezun oldu. 1994 yılında İ.T.Ü. Kimya Metalurji Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümüne girdi. 1998 yılında Lisans öğrenimini tamamlayarak, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsüne girmeye hak kazandı. İ.T.Ü. Dil ve İnkılap Tarihi Bölümünde bir yıl süreli İngilizce öğreniminden sonra Enstitünün Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme programında yüksek lisans öğrenimine başladı.

