

**DEMİRYOLLARI DEMİR ESASLI VAGON TAMPONU
MALZEMELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Aydın ESENKAR

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metal Eğitimi Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

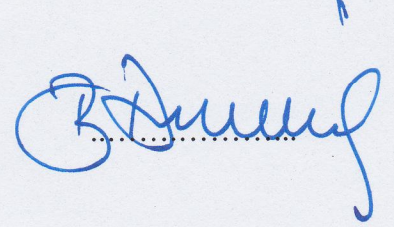
KARABÜK

Haziran 2012

Aydın ESENKAR tarafından hazırlanan “DEMİRYOLLARI DEMİR ESASLI VAGON TAMPONU MALZEMELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Bilge DEMİR

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 22/ 06/ 2012

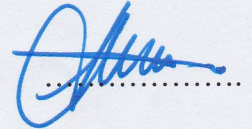
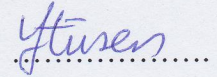
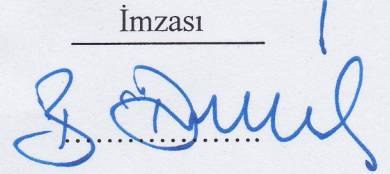
Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Doç . Dr. Bilge DEMİR (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yunus TÜREN (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yavuz SUN (KBÜ)

İmzası

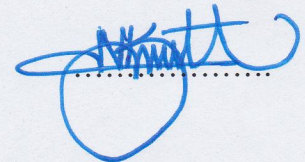


22/ 06/ 2012

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Aydın ESENKAR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DEMİRYOLLARI DEMİR ESASLI VAGON TAMPONU MALZEMELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Aydın ESENKAR

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metal Eğitimi Anabilim Dalı**

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Bilge DEMİR

Haziran 2012, 91 sayfa

Bu çalışmada, orjinal vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demir malzemesinin dayanım-süneklik değerlerinin ısıtma işlemleri ile geliştirilebilirliği incelenmiştir. Bu amaçla numunelere yağda su verme, farklı sıcaklıklarda östenitleme ve farklı sürelerde östemperleme ısıtma işlemleri uygulanmıştır. Isıtma işlemleri ile üretilen numune serileri bir dizi mekanik-metalografik testten geçirilmiştir.

Sonuçlarda, orjinal vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demirin mikroyapısı Ferrit+Perlit+Grafit kürelerden meydana gelmiştir. Yağda su verme ısıtma işlemi sonucunda büyük oranda martensit, östemperleme ısıtma işlemi sonucunda mikroyapının genel olarak ösferrit adı verilen $\alpha + \gamma$.k. (yüksek karbon östenit) ile östemperleme süresine bağlı olarak dönüşmüş östenitten meydana geldiği tespit edilmiştir.

Genel olarak bütün östemperlenmiş numunelerde östenitleme sıcaklığının artmasıyla birlikte, toplam % uzama ve % kesit alanı daralması ile darbe dayanımında azalma olurken, çekme dayanımı ile sertlikte artış meydana gelmiştir. Östemperleme süresinin artmasıyla birlikte ise; çekme dayanımı ile sertlikte azalma meydana gelirken toplam % uzama ve % kesit alanı daralması ile darbe dayanımında artış olmuştur. Yağda su verme ısıl işleminde sertlikte martenzit fazı nedeniyle önemli ölçüde artış meydana gelmiştir. Aşınma testi sonuçları östenitleme sıcaklığı arttıkça ve de östemperleme süresi azaldıkça artan numune sertliğine bağlı olarak aşınma kaybının azaldığını göstermektedir. Yağda su verme ısıl işleminde ise martensit fazından dolayı artan numune sertliği ile aşınma kaybı azalmıştır.

Anahtar Sözcükler : Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir, östenitleme sıcaklığı, östemperleme süresi, aşınma.

Bilim Kodu : 710.3.022

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

AN EXAMINATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE FERROUS MATERIALS OF RAILROAD VAGON BUMPERS

Aydın ESENKAR

**Karabük University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Metallurgy Education**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Bilge DEMİR

June 2012, 91 pages

In this study, the improvement of the resistance-ductility values of the original material of the ductile cast iron of GGG 70 quality wagon bumper through heat treatment has been examined. To this end, heat treatment processes of oil quenching, austenitization at different temperatures and austempering for different periods have been applied to the samples. A series of mechanical-metallographic tests have been made on the sample series produced through heat treatment.

In the results, the microstructure of the ductile cast iron of GGG 70 quality wagon bumper is made up of Ferrite + Pearlite + Graphite nodule. After oil quenching and austempering heat treatment process, it has been detected to be made up mainly of martensite, and of retained austenite along with of $\alpha + \gamma.k$. (high carbone austenite), generally referred to as ausferrite, depending on the process period.

Mainly in all austempered samples, the austenization temperature increases and whereas there has been a decrease in the total % of extension and % of the reduction of the area and in the impact resistance, there has been an increase in the tensile strength and in stiffness. During oil, there has been a significant increase due to martensite phase. As to the results of the wearing tests, we can see that as long as the austenitization temperature increases and austempering period decreases, the wearing loss declines depending on the increasing stiffness of the sample. Oil quenched samples showed highest wear resist values which in this study.

Key Word : Austempered ductile cast iron, austenization temperature, austempering period, wear.

Science Code : 710.3.022

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle alıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın danıőman hocam Doç. Dr. Bilge DEMİR'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalıőmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen ve beni her konuda destekleyen değerli hocalarım, Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ, Doç. Dr. Mustafa ACARER, Doç. Dr. Mustafa BOZ, Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK, Yrd. Doç. Dr. Yavuz SUN, Yrd. Doç. Dr. Melik ÇETİN'e ve ismini sayamadığım değerli hocalarıma ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Sevgili aileme maddi ve manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
BÖLÜM 1.	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	4
KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER	4
2.1. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN SINIFLANDIRILMASI	6
2.2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN KULLANIM ALANLARI	7
2.3. KGDD'LERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	8
2.3.1. Çekme Mukavemeti	9
2.3.2. Darbe ve Şok Mukavemeti	10
2.3.3. Aşınma Direnci	10
2.3.4. Korozyona Direnç	10
2.4. KGDD'İN ISIL İŞLEMLERİ	11
2.4.1. Östenitleme	12
2.4.2. Sertleşebilirlik	12
2.4.3. Normalizasyon	12
2.4.4. Su Verme ve Islah Etme	13
2.4.5. Temperleme	14

	<u>Sayfa</u>
2.4.6. Gerilim giderme	15
2.4.7. Östemperleme.....	15
2.4.8. Yüzey Sertleştirme	16
BÖLÜM 3.	17
ÖSTEMPERLEME ISIL İŞLEMİ.....	17
3.1. ÖSTEMPERLEME ISIL İŞLEM SÜRECİ	17
3.2. ÖSTEMPERLEME SÜRECİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELER.....	23
3.2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Döküm Kalitesi ve Döküm Şarj Malzemesi	23
3.2.2. Segragasyonun Etkisi.....	24
3.2.3. Parça Kesit Kalınlığı Ve Soğuma Hızının Etkisi	24
3.2.4. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Küresellik.....	25
3.2.5. Alaşım Elementlerinin Etkisi	26
3.3. ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	29
3.3.1. Östenitleme Sıcaklığı ve Süresinin Etkileri	29
3.3.2. Östemperleme Sıcaklığı ve Süresinin Etkisi.....	30
3.4. ÖKGGD'LERİN AVANTAJ VE SINIRLAMALARI	33
BÖLÜM 4.	36
TRİBOLOJİ.....	36
4.1. TRİBOLOJİNİN ESASLARI	36
4.2. AŞINMA.....	37
4.2.1. Aşınmayı Etkileyen Faktörler	38
4.2.2. Aşınma-Zaman İlişkisi.....	39
4.2.3. Aşınmanın Temel Unsurları.....	39
4.2.4. Aşınma Çeşitleri	40
4.2.4.1. Adhesiv Aşınma.....	40
4.2.4.2. Abrasiv Aşınma	42
4.2.4.3. Yorulma aşınması	42
4.2.4.4. Difüzyon Aşınması	43
4.2.4.5. Yenme aşınması.....	43

	<u>Sayfa</u>
4.2.5. Dökme Demirlerin Aşınması	43
4.3. SÜRTÜNME.....	44
4.3.1. Kuru Sürtünme	44
4.3.2. Sınır sürtünmesi.....	46
BÖLÜM 5.	47
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	47
5.1. MALZEME.....	47
5.2. NUMUNE KODLARI VE TANIMLANMASI.....	47
5.3. MALZEMEYE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER VE YÜZEY İŞLEMLERİ.....	49
5.3.1. Östenitleme	49
5.3.2. Östemperleme.....	50
5.3.3. Yağda Su Verme	50
5.4. METALOGRAFİK ÇALIŞMALAR.....	51
5.5. MEKANİK TESTLER.....	52
5.5.1. Sertlik Deneyi.....	52
5.5.2. Çekme Deneyi.....	52
5.5.3. Darbe Deneyi.....	53
5.5.4. Aşınma Deneyi	53
BÖLÜM 6.	55
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	55
6.1. METALOGRAFİK ÇALIŞMA SONUÇLARI	55
6.1.1. Orjinal Vagon Tamponu GGG 70 Kalite Küresel Grafitli Dökme Demirin Mikroyapısı	55
6.1.2. ÖKGDD' in Östemperleme Süresinin ve Östenitleme Sıcaklığının Mikroyapıya Etkisi	56
6.1.3. Yağda Su Verilmiş Numunelerin Mikroyapısı	61
6.1.4. KGDD ve ÖKGDD'de Östenitme Sıcaklığının ve Östemperleme Süresinin Grafit Küre Sayısı, Dağılımı ve Küreselleşmeye Etkileri.....	61

	<u>Sayfa</u>
6.2. ÖSTENİTLEME SICAKLIĞININ, ÖSTEMPERLEME SÜRESİNİN VE YAĞDA SU VERMENİN MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİLERİ	64
6.2.1. Çekme Dayanımına Etkileri.....	64
6.2.2. Toplam % Uzama ve % Kesit Alanı Daralmasına Etkileri.....	66
6.2.3. Darbe Dayanımına Etkileri	69
6.2.4. Sertliğe Etkileri	71
6.2.4.1. Mikrosertlik üzerine etkileri.....	71
6.3. ÖSTENİTLEME SICAKLIĞININ, ÖSTEMPERLEME SÜRESİNİN VE YAĞDA SU VERMENİN AŞINMA ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ	74
6.3.1. Aşınma Deney Sonuçları	74
BÖLÜM 7.	84
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	84
KAYNAKLAR.....	86
ÖZGEÇMİŞ.....	91

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Demiryolu yük vagonu tamponu.....	1
Şekil 2.1. Farklı derecelerde küreselleşmiş küresel grafitli dökme demirlerin parlatılmış haldeki optik mikroskop fotoğrafları a) %99 Küreselleşmiş, b) %80 Küreselleşmiş, c) %50 Küreselleşmiş	4
Şekil 2.2. Temperlenmiş küresel grafitli dökme demir yapıları: a) Tam temperlenmiş Ferritik yapı (X100), b) Kısmen temperlenmiş perlitik ve ferritik yapı (X100), c) Normalize perlitik yapı (X500).....	6
Şekil 2.3. KGDD EN-GJS serisinin mekanik özellikleri ve mikroyapıları.....	8
Şekil 2.4. Uygulanan ısı işlemlere bağlı olarak sonuçlanan çekme dayanımı-uzama değerleri.....	11
Şekil 2.5. KGDD in çeşitli ısı işlemleri için Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm diyagramı; 1) su verme, 2) Perlitlenme, 3) Östemperleme	14
Şekil 2.6. KGDD'lerin çekme dayanımına karşılık sertlik değişimleri	16
Şekil 3.1. Küresel grafitli bir dökme demirin izotermal dönüşüm (IT) diyagramı	20
Şekil 3.2. Alt beyrit (250-330°C) ve Üst beyrit (330-400 °C) oluşum mekanizması.....	21
Şekil 3.3. Östemperleme sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi.....	32
Şekil 4.1. Sürtünme ve aşınmayı etkileyen faktörler	37
Şekil 4.2. Aşınma zaman ilişkisi	39
Şekil 4.3. Adhesiv aşınma deneyinde kullanılan düzenekler a) Slindir-Slindir, b) Dönen Disk c) Pim-Disk, d) Pim-Slindir, e) Blok-Slindir, f) Pim-Düzlem.....	41
Şekil 4.4. Kayma hızının ve temas yüzeyinin sürtünme katsayısına etkisi.....	46
Şekil 5.1. Numunelere uygulanan ısı işlemlerin şematik olarak gösterimi.....	48
Şekil 5.2. Ö-KGDD 900 kodu ile kodlanmış numunesinin açıklaması	48
Şekil 5.3. Y-KGDD 900 kodu ile kodlanmış numunesinin açıklaması	48
Şekil 5.4. Isıl işlem uygulamalarında kullanılan Protherm marka ısı işlem fırını.	49
Şekil 5.5. Östemperleme işleminin yapıldığı tuz banyosunun resmi.....	50
Şekil 5.6. Çekme numunesi ve boyutları (mm)	53
Şekil 5.7. Standart çentikli darbe deneyi numunesi.....	53

Şekil 6.1. Orjinal vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demirin (KGDD) mikroyapısı.....	55
Şekil 6.2. Ö-KGDD 900 °C numunesinin mikroyapı fotoğrafları a) 30 dakika, b) 60 dakika, c) 120 dakika süre ile östemperlenmiş (Dağlama: % 2 Nital DÖ = Dönüşmemiş östenit, α_b = Beynitik Ferrit, G = Grafit, Öy.k.= Yüksek karbonlu östenit).....	58
Şekil 6.3. Ö-KGDD 820 °C numunesinin mikroyapı fotoğrafları a) 30 dakika, b) 60 dakika, c) 120 dakika süre ile östemperlenmiş (Dağlama: % 2 Nital DÖ = Dönüşmemiş östenit, α = Ferrit, G = Grafit, Öy.k.= Yüksek karbonlu östenit).....	59
Şekil 6.4. Ö-KGDD 805 °C numunesinin mikroyapı fotoğrafları a) 30 dakika, b) 60 dakika, c) 120 dakika süre ile östemperlenmiş (Dağlama: % 2 Nital DÖ = Dönüşmemiş östenit, α = Ferrit, G = Grafit, Öy.k.= Yüksek karbonlu östenit).....	60
Şekil 6.5. 900 °C'de 90 dakika östenitlenmiş ve ılık yağda su verilmiş Y-KGDD numunesine ait mikroyapılar (Dağlama:% 2 Nital G= Grafit, M=Martenzit, ÖF= Ötektoid Ferrit).....	61
Şekil 6.6. Östemperleme sürelerine bağlı olarak numunelerin grafit hacim oranlarının değişimi.....	63
Şekil 6.7. Östemperleme sürelerine bağlı olarak numunelerin grafit küre sayılarının değişimi.....	63
Şekil 6.8. Östemperleme süresine bağlı olarak numunelerin çekme dayanımlarının değişimleri	65
Şekil 6.9. Östemperleme süresine bağlı olarak bütün numunelerdeki % kesit alanı daralmasının değişimi.....	67
Şekil 6.10. Östemperleme süresine bağlı olarak bütün numunelerdeki toplam % uzama değişimi.....	67
Şekil 6.11. Oda sıcaklığında östemperleme süresine bağlı olarak tüm Numunelerdeki darbe dayanımı değişimi	70
Şekil 6.12. Östemperleme sürelerine bağlı olarak numunelerin mikrosertliğindeki değişim	72
Şekil 6.13. Östemperleme sürelerine bağlı olarak numunelerin HRc sertlik değişimleri.....	72
Şekil 6.14. Östemperleme sürelerine bağlı olarak numunelerin 20 N yük altında 1200 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı değişimleri.....	75
Şekil 6.15. Östemperleme sürelerine bağlı olarak numunelerin 20 N yük altında 2400 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı değişimleri.....	76
Şekil 6.16. Östemperleme sürelerine bağlı olarak numunelerin 40 N yük altında 1200 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı değişimleri.....	76

Şekil 6.17. Östemperleme sürelerine bağlı olarak numunelerin 40 N yük altında 2400 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı değişimleri.	77
Şekil 6.18. Değişik yük ve kayma mesafelerinde aşınan yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri a) KGDD, b) KGDD, c) Ö-KGDD 805-30, d) Ö-KGDD 805-120, e) Ö-KGDD 805 - 30, f) Ö-KGDD 805- 120.....	80
Şekil 6.19. Değişik yük ve kayma mesafelerinde aşınan yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri a) Ö-KGDD 820-30, b) Ö-KGDD 820-120, c) Ö- KGDD 820-30, d) Ö-KGDD 820-120.....	81
Şekil 6.20. Değişik yük ve kayma mesafelerinde aşınan yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri a) Ö-KGDD 900-30, b) Ö-KGDD 900-120, c) Ö-KGDD 900-30, d) Ö-KGDD 900-120 , e) Y-KGDD, f) Y-KGDD.....	82

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. İkincil elementlerin grafit yapısına etkileri.....	5
Çizelge 2.2. Sfero dökme demirlerin ana yapılarına göre sertlik değerleri.....	5
Çizelge 2.3. TSE standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	7
Çizelge 2.4. DIN standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	7
Çizelge 2.5. TSE standardına göre KGDD kaliteleri ve mekanik özellikleri olarak sınıflandırılması.....	9
Çizelge 5.1. Bu tez çalışmasında kullanılan vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimi.	47
Çizelge 6.1. Östemperleme öncesi ve östemperleme sonrası faz hacim oranları ve birim alana düşen küre sayısı.....	57
Çizelge 6.2. Östemperleme süresi ile çekme dayanımının değişimi.	65
Çizelge 6.3. Östemperleme süresi ile % uzamanın değişimi.	68
Çizelge 6.4. Östemperleme süresi ile % kesit alanı daralmasının değişimi.....	68
Çizelge 6.5. Östemperleme süresi ile çentikli darbe dayanımının değişimi.	70
Çizelge 6.6. Östemperleme sürelerine bağlı olarak numunelerin mikrosertlik değişimleri.....	73
Çizelge 6.7. Östemperleme sürelerine bağlı olarak numunelerin HRc sertlik değişimleri.....	73
Çizelge 6.8. Östemperleme sürelerine bağlı olarak numunelerin 20 N yük altında 1200 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı değişimleri.....	77
Çizelge 6.9. Östemperleme sürelerine bağlı olarak numunelerin 20 N yük altında 2400 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı değişimleri.....	78
Çizelge 6.10. Östemperleme sürelerine bağlı olarak numunelerin 40 N yük altında 1200 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı değişimleri.....	78
Çizelge 6.11. Östemperleme sürelerine bağlı olarak numunelerin 40 N yük altında 2400 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı değişimleri.....	79

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

A1	: A1 sıcaklığı (Alt kritik sıcaklığı)
Al	: alüminyum
C	: karbon
°C	: santigrat derece
Cr	: krom
Cu	: bakır
dk	: dakika
Fe	: demir
Fe ₃ C	: sementit
m	: metre
mm	: milimetre
mg	: magnezyum
Mn	: mangan
Mo	: molibden
Ni	: nikel
Si	: silisyum
α	: ferrit
γ	: östenit
γ_{yk}	: yüksek karbonlu östenit (kararlı östenit)

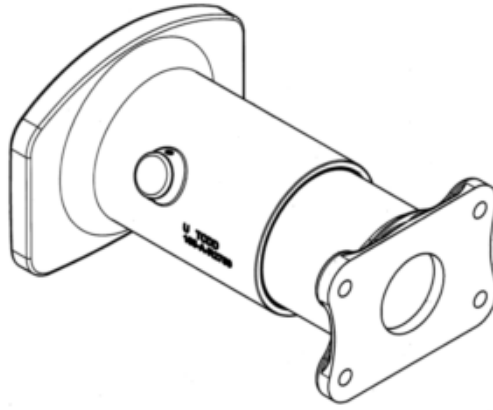
KISALTMALAR

DIN	: Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
DÖ	: dönüşmemiş östenit
EN	: Avrupa Normu
G	: grafit
HB	: brinell sertlik değeri
Hv	: vickers sertlik değeri
KGDD	: küresel grafitli dökme demir
L_{Faz}	: fazı kesen toplam çizgi uzunluğu
L_T	: çizilen toplam çizgi uzunluğu
ÖF	: ötektoid ferrit
Ö-KGDD	: östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir
V_{Faz}	: faz hacim oranı
Y-KGDD	: yağda su verilmiş küresel grafitli dökme demir

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Vagon tamponu ön ve arkada ikişer adet olmak üzere her vagona ve diğer demiryolu araçlarında dört adet kullanılan bir parçadır (Şekil 1.1). Tampon çalışma şartları oldukça ağır bir parçadır. Demiryolu araçları, vagonları demir esaslı malzemelerden üretilirler ve taşıdıkları yük ve kendi ağırlıkları oldukça ciddi bir yük ve ağırlık oluşturmaktadır. Vagonların çalışma şartlarında kendi aralarında sürekli bir çarpışma söz konusudur ve bunu karşılayan, söndüren ve sübvans eden parça tampondur. Bu malzeme dış ve iç kovana ilave olarak çarpışmaya karşılayabilmek için iç kısımdaki susta sisteminden oluşmaktadır. Tampon malzemesinin ağır çalışma şartları, ekonomik ve teknolojik uyumu sağlayacak şekilde üretilebilmesi ve geliştirilmesi demiryolları ve araçlarının malum önemi değerlendirildiğinde ülke ekonomisi için ciddi katkı sağlayacak bir konudur.



Şekil 1.1. Demiryolu yük vagonu tamponu.

Bugün itibari ile tampon ekonomik ve teknolojik açıdan küresel grafitli dökme demir olarak üretilmekte ve kullanılmaktadır. Bu kapsamda geçerli standart TS EN 1563/nisan 2000'dür Tamponun dış gövdesi dış kovana (EN-GJS-700-2U) ve iç kovana (EN-GJS-600-3U) olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır [1].

Teknolojik gelişmelerle birlikte; teknolojinin gereksinimi olan araç ve gereç malzemelerinin üretiminde de buna bağlantılı olarak gelişmeler olmaktadır. Küresel grafitli dökme demirler (KGDD) diğer dökme demir türlerine göre daha yüksek dayanım, süneklik, tokluk ve işlenebilirlik özelliklerine sahiptir. Küresel grafitli dökme demirlerin bu üstün özellikleri uygulanan ısıt işlemlerle daha da iyileştirilebilmektedir [2].

KGDD'lere uygulanan ısıt işlemler çok çeşitli olmakla beraber kazançlar bakımından ön plana çıkan ısıt işlem ise östemperleme ısıt işlemi olmuştur. 1970'lerin başlarında uygulanmaya başlanan östemperleme çalışmaları günümüze kadar çok fazla ilgi görmüş ve halen de görmektedir. Ülkemizde ise yakın dönemde başlamış olan bu çalışmalar çok yoğun bir şekilde devam etmektedir [2].

KGDD'lerde östemperleme işleminin amacı; aynı işlemle çelik malzemelerde oluşan beynitik yapıdan farklı olarak ösferritik (östenit+ferrit) matris yapı oluşturmaktadır. Bu yapı dayanım ve tokluk özelliklerini daha da iyileştirmektedir [2].

Bu üstün özelliklerin yanı sıra bu malzemelerin talaşlı imalat yöntemine uygunluğu, kısa süreli ısıt işlemleri, çeliklere göre % 10 daha hafif olmaları, döküm yoluyla son şekle getirilebilme yetenekleri, montaj kolaylıkları bu malzemeleri cazip hale getirmiştir ve bu üstün özelliklerin bir sonucu olarak da pek çok alanda kullanılmaya başlanmış ve pek çok araştırmanın konusu olmuştur [2].

Bu çalışmada, orjinal vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demirin farklı östenitleme sıcaklıklarının, farklı östemperleme sürelerinin ve yağda su verme ısıt işleminin malzemenin mikroyapısı ile sertlik, çekme özellikleri, darbe özelliği ve aşınma direnci gibi mekanik özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi ve optimum mekanik özellikleri sağlayan yapının belirlenmesi hedeflenmiştir.

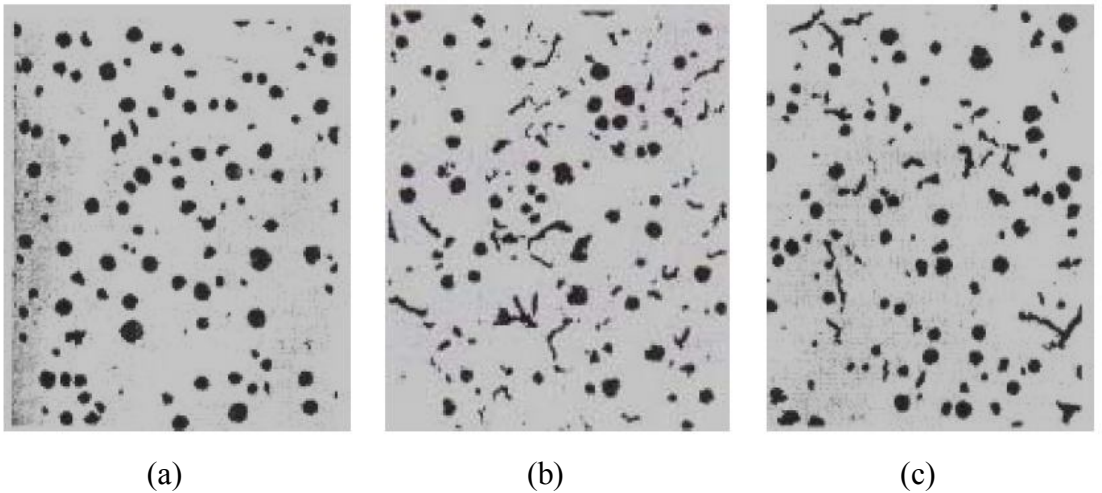
Hedeflenen bu sonuçların gerçekleştirilmesi amacıyla, vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demir numuneleri, 805 °C, 820 °C ve 900 °C sıcaklıklarda 90 dk. östenitlendikten sonra 370 °C sıcaklıktaki östemperleme banyosuna aktarılmış ve 30, 60 ve 120 dk. sürelerle östemperlendikten sonra havada

soğutulmuştur. Ayrıca bu parametrelerle karşılaştırmak amacıyla aynı kimyasal bileşime sahip bir grup numuneye ise 900 °C sıcaklığında 90 dk. tavlamanın ardından yağda su verilmiştir.

BÖLÜM 2

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

Küresel grafitli dökme demirler, nodüler, sfero, ya da sünek dökme demir olarak da bilinirler. Gri dökme demirlerden tek farkı içerdikleri grafitin küresel biçimde olmasıdır. Grafitlerin küresel biçimde olması, sfero dökme demirlere, daha fazla tokluk ve daha iyi mekanik özellikler sağlar. Toplam karbon miktarı gri dökme demirlerle aynıdır. Dökümden önce potaya ilave edilen Mg ya da Ce gibi elementler katılma sırasında grafitlerin küresel biçimde oluşmasını sağlar. Bu elementlerin kükürde karşı hassasiyetleri çok fazla olduğundan, küreleştirme işleminin iyi bir şekilde yapılabilmesi için eriyik metalin kükürt oranının %0.015'in altında olması gerekir. Alaşım elementlerinden çil oluşumu ve matris yapısında etki edenler birincil alaşım elementi olarak, grafit yapısı ve küreleşmeye etki eden elementler ise ikincil alaşım elementleri olarak adlandırılırlar. Çizelge 2.1'de ikincil elementler ve grafit şekline olan etkileri verilmiştir. Şekil 2.1'de farklı derecelerde küreselleşme gösteren dökme demir yapıları gösterilmiştir [3].



Şekil 2.1. Farklı derecelerde küreselleşmiş küresel grafitli dökme demirlerin haldeki optik mikroskop fotoğrafları a) %99 Küreselleşmiş, b) %80 Küreselleşmiş, c) %50 Küreselleşmiş [4].

Döküm malzemelerin yapılarındaki ferrit ve perlit miktarları, malzemelerin kimyasal bileşimi ile soğuma hızına bağlıdır. Küresel grafitli dökme demirler uygulanan ısı işlemlere göre yapıları ferritik, perlitik veya martensitik olabilir. En fazla %10 perlit içerenler, ferritik küresel grafitli dökme demir olarak adlandırılır. [3].

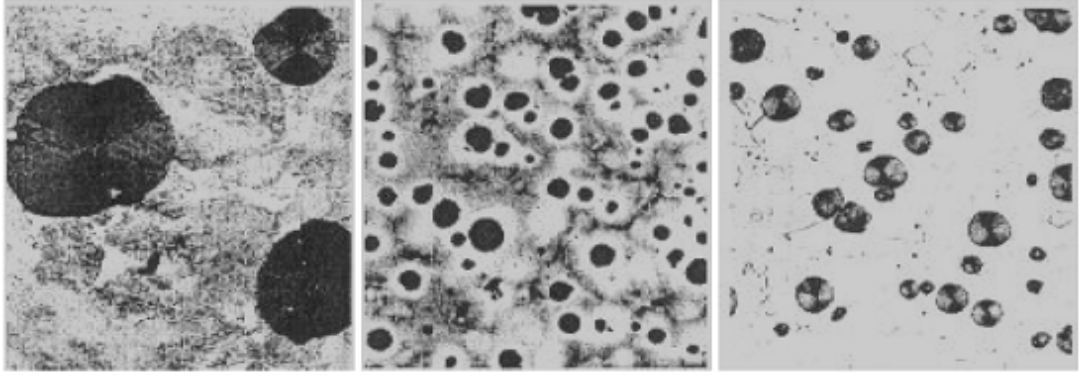
Çizelge 2.1. İkincil elementlerin grafit yapısına etkileri [4].

Element Sınıfı	Element
Küreselleştirici	Magnezyum, kalsiyum, nadir toprak metalleri (seryum, lantanyum, v.b.), yitriyum
Küreselleşmeye Etkisiz	Demir, karbon, alaşım elementleri
Küreselleşmeye Azaltıcı	Alüminyum, titanyum, arsenik, bizmut, telür, kurşun, kükürt, antimon

Küresel grafitli dökme demirler ana yapılarına göre Çizelge 2.2’de verilen sertlik değerlerine erişebilirler. Oluşan yapılara ait mikroyapı fotoğrafları Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Sfero dökme demirlerin ana yapılarına göre sertlik değerleri [5].

Ana yapı	Sertlik, HB
Ferritik	130
Ferritik (alaşımli)	210
Perlitik	200
Perlitik (alaşımli)	275
Östenitik	130-160
Martenzitik	320



(a)

(b)

(c)

Şekil 2.2. Temperlenmiş küresel grafitli dökme demir yapıları: a) Tam temperlenmiş Ferritik yapı (X100), b) Kısmen temperlenmiş perlitik ve ferritik yapı (X100), c) Normalize perlitik yapı (X500) [4].

2.1. KÜRESEL GRAFITLİ DÖKME DEMİRLERİN SINIFLANDIRILMASI

Küresel grafitli dökme demirlerin elde edilmesinde iki ana yöntem vardır:

1. INCO (International Nickel Company) yöntemi
2. BCIRA (British Cast Iron Research Association) yöntemi

Küresel grafitli dökme demirlerin yapısındaki grafitler çeliğe benzer bir matris içerisinde dağılmış küresel partiküller halindedir. Grafitlerin küreler halinde oluşmasını sağlamak için, BCIRA yönteminde sıvı demire seryum (Ce) ilave edilmektedir. INCO yönteminde ise sıvı demire magnezyum (Mg) ilavesi yapılarak, grafitlerin küre şeklinin alması sağlanmaktadır. Küresel grafitli dökme demirler çeşitli normlara göre sınıflandırılmaktadır [6].

TSE (Türk Standartları Enstitüsü) ve Alman (DIN) standardına göre dökme demirlerin sınıflandırılması Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4’de verilmektedir.

Çizelge 2.3. TSE standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması [7].

Kısa Gösterilişi	Çekme Dayanımı kg/mm ²	Akma Dayanımı g/mm ²	Kopma uzaması %	Sertlik HB	Mikroyapı
DDK 40	42	28	12	140-201	Daha çok ferritik
DDK 50	50	35	7	170-241	Ferrit+ Perlit
DDK 60	60	40	3	192-269	Perlit+ Ferrit
DDK 70	70	45	2	229-302	Daha çok perlitik
DDK 80	80	50	2	248-352	Perlitik
DDK 35.3	35	22	22	-	Ferritik
DDK 40.3	40	25	18	-	Ferritik

(-) Darbeli çalışması öngörülen tiplerdir.

Çizelge 2.4. DIN standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması [8].

Kısa Gösterilişi	Çekme Dayanımı, kg/mm ²	Akma Dayanımı, kg/mm ²	Kopma uzaması,%
GGG-40	40	25	15
GGG-50	50	32	7
GGG-60	60	38	3
GGG-70	70	44	4
GGG-80	80	50	2

2.2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN KULLANIM ALANLARI

KGDD Amerika, Japonya ve birçok Avrupa ülkesi başta olmak üzere, üretiminde kuvvetli bir artış bulunmaktadır. KGDD piki, küreselleştirici ve aşılacağı özelliklerinin devamlı yükselmesi, KGDD dökümünde yolluk, besleyici tasarımı ile ilgili matematiksel kuralların uygulanması, dökümhanelerde çalışanlar tarafından

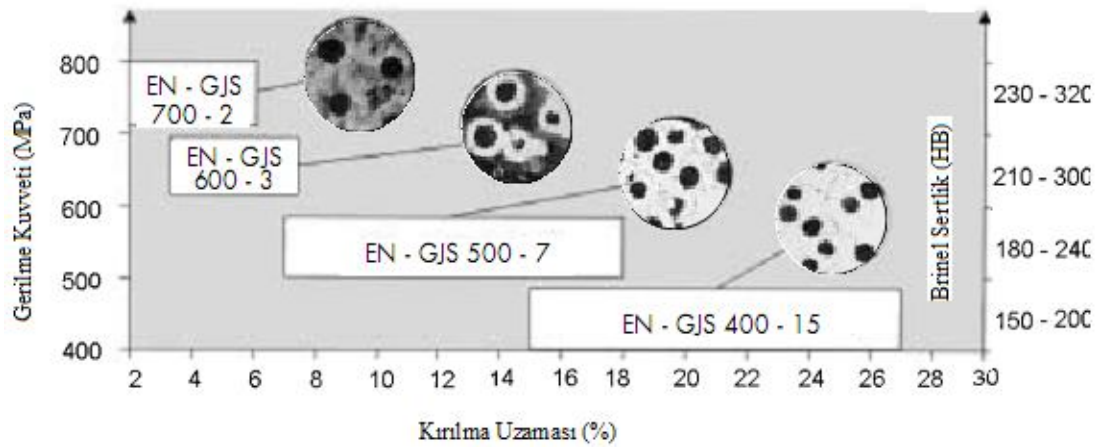
benimsenmesi, diğer taraftan KGDD'in fiziksel ve mekanik özelliklerinin, binlerce kullanım yerinin şartlarını yerine getirebilmesidir [9]. Bugün KGDD' ler;

1. Otomotiv endüstrisi,
2. Tarım makineleri,
3. Makine yapımı,
4. Harfiyat makineleri,
5. Karayolu, köprü konstrüksiyon elemanları,
6. Su boru hatları, pompa, armatür parçaları,
7. Sanayinin gerektirdiği çok çeşitli özellikteki merdaneler,
8. Kimya, petrokimya ve deniz suyu tuzsuzlaştırma tesislerinde,
9. Çelik dökümünde ingotlar (kokil),
10. Demiryolları vagon tamponlarında,

kullanılmaktadır [10].

2.3. KGDD'LERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Diğer bütün metallerde olduğu gibi KGDD'lerin de mekanik özellikleri üzerinde mikroyapının önemli bir etkisi vardır. Şekil 2.3'de dört farklı KGDD serisinin uzama-dayanım değerleri ve mikroyapıları verilmiştir. KGDD'lerin genel standart ve mekanik özellikleri TSE standardı olarak Çizelge 2.5'de verilmiştir.



Şekil 2.3. KGDD EN-GJS serisinin mekanik özellikleri ve mikroyapıları [11].

Çizelge 2.5. TSE standardına göre KGDD kaliteleri ve mekanik özellikleri olarak sınıflandırılması [1].

Kısa Gösterilişi	Malzeme No	Çekme Dayanımı R _m N/mm ² min.	% 0,2 Akma Sınırı R _{p0,2} N/mm ² min.	Kopma Uzaması % A min.
EN-GJS-350-22 LT ¹⁾	EN-JS 1015	350	220	22
EN-GJS-350-22 RT ²⁾	EN-JS 1014	350	220	22
EN-GJS-350-22	EN-JS 1010	350	220	22
EN-GJS-400-18 LT ¹⁾	EN-JS 1025	400	240	18
EN-GJS-400-18 RT ²⁾	EN-JS 1024	400	250	18
EN-GJS-400-18	EN-JS 1020	400	250	18
EN-GJS-400-15	EN-JS 1030	400	250	15
EN-GJS-450-10	EN-JS 1040	450	310	10
EN-GJS-500-7	EN-JS 1050	500	320	7
EN-GJS-600-3	EN-JS 1060	600	370	3
EN-GJS-700-2	EN-JS 1070	700	420	2
EN-GJS-800-2	EN-JS 1080	800	480	2
EN-GJS-900-2	EN-JS 1090	900	600	2

1. LT düşük sıcaklıkta
2. RT oda sıcaklığında

NOT 1. Bu malzeme değerleri kum döküm için verilmiştir. Önceden belirtildiğinde değiştirilebilir. İstendiğinde değişik metotlarla dökülen malzemelere de uygulanabilir.

NOT 2. Döküm metoduna bakılmaksızın malzeme değerlerinin karşılaştırılmasında ayrı dökülmüş deney parçaları mekanik özelliklerinin değerleri esas alınmıştır.

NOT 3.1. N/ mm² = 1 MPa

NOT 4. Malzeme kısa gösterilişi TS EN 1560'a uygundur.

2.3.1. Çekme Mukavemeti

Küresel grafitli dökme demirlerde çekme mukavemeti, yapı ve uygulanan ısıl işleme göre farklılık gösterir. Küresel grafitli dökme demirlerin çekme mukavemeti ve akma noktası gibi özellikleri çeliklere yakın olup, diğer dökme demirlerden daha iyidir. Ferritik yapılu küresel grafitli dökme demirlerde akma sınırı düşük, uzama oranı yüksektir [11].

Küresel grafitli dökme demirlerde çekme mukavemeti ve uzama, cidar kalınlığına da bağılıdır. Cidar kalınlığı arttıkça uzama oranı ve çekme mukavemeti düşer. Bu azalma miktarı ısıl işlemle de değişmektedir. Yumuşak tavllanmış küresel grafitli dökme demirlerde, cidar kalınlığına bağılı olarak uzama miktarı, ısıl işlem görmemiş döküme göre daha çok azalma göstermektedir. Çekme mukavemetindeki azalma ise döküm halinde daha fazladır [12].

2.3.2. Darbe ve Şok Mukavemeti

Küresel grafitli dökme demirler ani sıcaklık değişimlerinde iyi mukavemet gösterse de çatlamlar olabilir. Bu çatlamlar küresel grafitler tarafından malzeme içine ulaşmadan önlenir. Bu açıdan ısıl değişimlere maruz kalan yerlerde başarılıdırlar. Küresel grafitli dökme demirlere uygulanan ısıl işlem sıcaklığı arttıkça darbe dayanımı da artar. Ancak bileşimdeki C ve Si oranı arttıkça, aynı sıcaklıklarda darbe enerjileri azalma gösterir [12].

2.3.3. Aşınma Direnci

Aşınmaya direnç dökme demirlerin genel karakteristiğidir. KGDD gri dökme demirlerle eşit bir aşınma direncine sahiptir. KGDD yağ tutabilir. Bu nedenle özellikle hareketin başladığı anlarda hareketli parçaların sürtünme ve kavranmasını önleyebilir. Dinamik ve statik yükler altında gelişigüzel dağılmış gerilimlere karşı küresel grafitli dökme demir çok iyi mukavemet gösterir. Bu sebepten dolayı birçok yerlerde çeliğin yerini tutmaya başlamıştır [12].

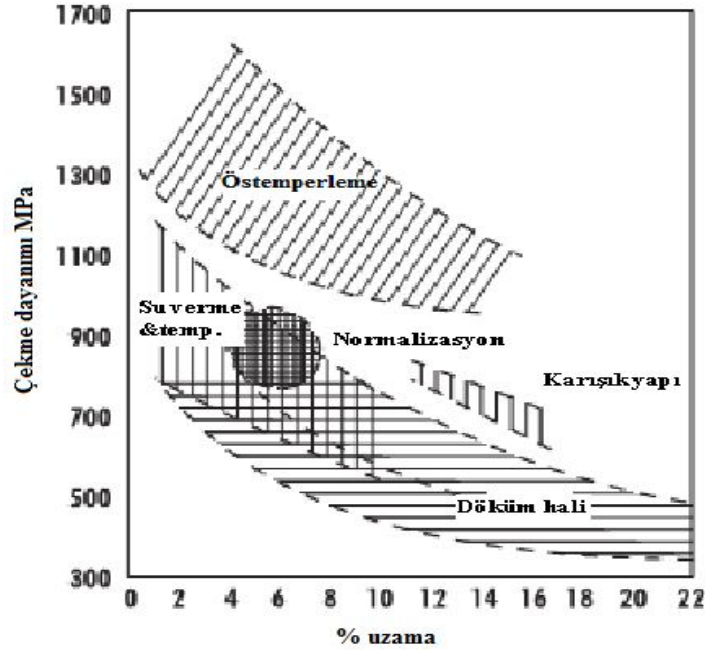
2.3.4. Korozyona Direnç

Küresel grafitli dökme demir, kır dökmenin gösterdiği korozyon direncine sahiptir. Deniz suyuna, alkalilere ve zayıf asitlere karşı mukavemetlidir. Çelikten daha iyi korozyon direnci ve yüksek mekanik mukavemete sahip olması nedeniyle genellikle, petrol ve kimya endüstrisinde ve denizcilikte kullanır.

2.4. KGDD'İN ISIL İŞLEMLERİ

Genel olarak çeliklere uygulanabilen ısı işlemler dökme demirlere de uygulanabilmektedir. Bunun neticesinde çok geniş bir aralıkta mekanik özellikleri ve mikroyapıları değişebilmektedir. Ticari olarak özel işlemlerle değil de klasik olarak döküm halleri ile değerlendirilmelidir. Bu çalışmada KGDD için mevcut uygulanabilecek bütün ısı işlemler uygulanarak mekanik özelliklerin geliştirilmesi ve amacına göre optimizasyonu amaçlandığı için en yaygın ısı işlem ve genel uygulama sıcaklıkları ifade edilecektir. Günümüzde KGDD için östemperleme işlemi oldukça önem kazanmaktadır. Bu işlem ile mevcut mekanik özellikler oldukça geliştirilebilmektedir. Bu çalışma konularından en önemlilerinden bir tanesi KGDD'in östemperlenmesidir. Bu şekilde KGDD, çelik ve dövülmüş çelikle rekabet edebilmektedir ki takdir edilmelidir ki bu durum ekonomik ve teknolojik açıdan çok önemlidir.

Uygulanan ısı işlemlere bağlı olarak sonuçlanan çekme dayanımı-uzama değerleri Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4. Uygulanan ısı işlemlere bağlı olarak sonuçlanan çekme dayanımı-uzama değerleri [13].

2.4.1. Östenitleme

Östenitlemenin genel amacı, daha sonra yapılacak termal bir işlemde önce östenit matris içerisinde mümkün olduğu kadar üniform karbon içeriğine sahip olmasını sağlamaktır. Tipik ötektik üstü sünük dökme demirlerde östenit sıcaklığı iki fazlı alanda (östenit-grafit) olması için kritik sıcaklığın aşılması gerekmektedir. Bu sıcaklık alaşım içeriğine göre değişiklik gösterir. Dengeli östenitin karbon içeriği östenit sıcaklığının artırılmasıyla artar. Bu özellik östenit matris içerisindeki karbon miktarını ayarlamak için östenitleme sıcaklığının kontrolünün önemli olduğunu gösterir. Bu ifade, özellikle sertleşebilirliğin önemli derecede matrisin karbon içeriğine bağlı olduğu östemperleme işlemi için doğrudur [11].

2.4.2. Sertleşebilirlik

KGDD'in sertleşebilirliği malzemenin normalizasyon, su verme, temperleme ve östemperleme için önemli bir parametredir. Sertleşebilirlik normalde Jominy testi ile ölçülür. Bu testte, soğuma hızının değişimi farklı sertlikleri veren farklı mikroyapılarla sonuçlanır. Daha yüksek karbon içeren matris daha yüksek östenitleme sıcaklığını gerektirir ve bu sertleşebilirliği artırır. Alaşım elementlerinin sünük dökme demire ilave edilmesinin nedeni sertleşebilirliği artırmaktır. Mangane ve molibden sertleşebilirliği artıran en etkili elementtir. Bununla birlikte, çelikte, nikel-molibden, bakır-molibden veya bakı-nikel-mangane kombinasyonları ayrı elementlerden daha fazla etkilidir. Bu nedenle, bu elementlerin kombinasyonunu içeren kalın kesitli dökümler tamamen sertleştirmeyi ya da östemperlemeyi gerektirirler [11].

2.4.3. Normalizasyon

Normalizasyon (havada soğutma ile) çekme dayanımında fark edilebilir bir iyileşmeye neden olabilir ve KGDD'nin (ASTM 100-70-03) üretiminde kullanılabilir. 1-4 saat 850 – 900 °C'de tutulur. Sonra 800 °C'ye kadar yavaş soğutulur, arkasından açık havaya bırakılır. Bu işlem ile maksimum akma ve çekme mukavemetlerinin kombinasyonu sağlanabilir.

Normalizasyonla elde edilen mikroyapı dökümün kompozisyonuna ve soğuma hızına bağlıdır. Dökümün kompozisyonu sertleşebilirliği zorlar. Soğuma hızı dökümün kütlesine bağlıdır. Fakat ayrıca sıcaklık ve hava sirkülasyonundan da etkilenebilir.

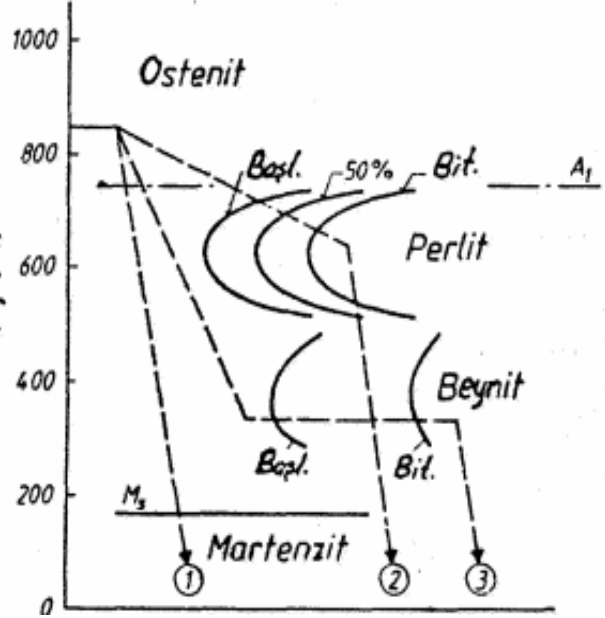
Eğer demir çok yüksek silisyum içermiyorsa ve en az ortalama 0.3 to 0.5% mangana sahipse, normalizasyon genel olarak ince perlitik bir yapı üretir. Normalizasyon gerektiren kalın kesitli dökümler normalizasyondan sonra daha yüksek sertleşebilirlik sağlayan ful perlitik yapının gelişimi için nikel, molibden ve mangan gibi alaşım elementleri içerirler. Daha ince kesitli dökümler martensitik olabilir ya da normalizasyon sonrası asiküler yapı içerebilir [11].

Normalizasyon sıcaklığı genellikle 870 -940 °C arasındadır. Standart bekleme süresi her 1 inç (25 mm) için 1 saattir. Daha uzun süreler östenitteki karbon difüzyonunu geciktiren elementler içerdiğinde gerekebilir. Normalizasyondan sonra arzu edilen sertliği elde etmek ya da kalıntı gerilimi gidermek için temperleme gerekebilir. Yüksek tokluk ve darbe direncinin istendiği yerlerde temperleme kullanılır. Sertlikte ve çekme özelliklerinde Temperlemenin etkisi kompozisyona ve normalizasyonda elde edilen sertlik seviyesine bağlıdır. Temperleme genel olarak 425 den -650 °C'ye yeniden ısıtma sıcaklığını içerir. Ve bu sıcaklıkta tutma süresi her bir inç için (25mm) 1 saattir [11].

2.4.4. Su Verme ve Islah Etme

Dökme demirlerin mekanik özellikleri ve aşınmaya karşı dayanıklılıkları su verme ve ıslah etme ile önemli ölçüde iyileştirilebilir. Suverme sırasında östenit bölgesinden (1 - 4 saat 850-900 °C'de tutulur) sonra ılık yağda su verilir. Yağda hızla soğutulan malzemedeki normal östenit ferrit dönüşümü gerçekleşemez. İçinde daha yüksek oranda karbon çözüdüren östenit, içinde hemen hemen hiç karbon çözüdüremeyen ferrite değil, östenitle aynı kimyasal bileşime sahip iğneli yapıya sahip sert martensite dönüşür. Çok gevrek olan martensite kritik sıcaklığın altında temperlenerek (menevişlenerek) bir miktar süneklik kazandırılır. Bilindiği gibi demir esaslı malzemelerin dönüşüm davranışları ZSD-diyagramlarında gösterilebilir. Şekil 2.5' deki gibi martensitik bir içyapı elde etmek için perlit burnunu kesmeden geçecek

bir hızda soğutmak gereklidir, 1 çizgisi, martenzit oluşumu için gerekli minimum soğuma hızı kritik soğuma hızı olarak adlandırılır [11].



Şekil 2.5. KGDD in çeşitli ısıl işlemleri için Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm diyagramı; 1) suverme, 2) Perlitleme, 3) Östemperleme [11].

2.4.5. Temperleme

Çeliklerde olduğu gibi döküm parçalarda suvermeden sonra genellikle temperlenirler. Su verildikten sonra arzu edilen özelliklere göre 200 ile 600 °C (dönüşüm Sıcaklığının altında 150 ile 650 °C) arasında bir süre tutulmak suretiyle yapılır. Temperleme sıcaklığı parçanın kullanım sıcaklığından yüksek seçilmelidir. KGDD 250 °C sıcaklığa kadar tetragonal martenzit kübik bir yapıya dönüşür ve bu sırada dislokasyonların bulunduğu bölgelere e-karbürler çöker, sertlik çok fazla değişmemesine rağmen kırılmalık bir miktar giderilmiş olur. 250-400 °C sıcaklıkları arasında epsilon karbürlerin ve/veya tane sınırındaki çökeltilerin sementite dönüşümü gerçekleşir. Bu durumda sertlik ve gevreklik giderek kaybolur. 400 °C sıcaklığın üzerindeki temperleme sıcaklıklarında sementit taneciklerinin büyüklüğü artar, sertlik daha da azalarak süneklik yükselir. Tutma süresi olarak her 25 mm kalınlık için 1 saat yeterlidir. Temperleme işlemiyle gerilmeler giderilir, kırılmalık azalır ve birçok mekanik özellik iyileşmiş olur [11].

2.4.6. Gerilim giderme

Bir kaç saat 500-550 °C da tutularak sağlanır. Genellikle karmaşık kesitli iş parçalarına uygulanır.

2.4.7. Östemperleme

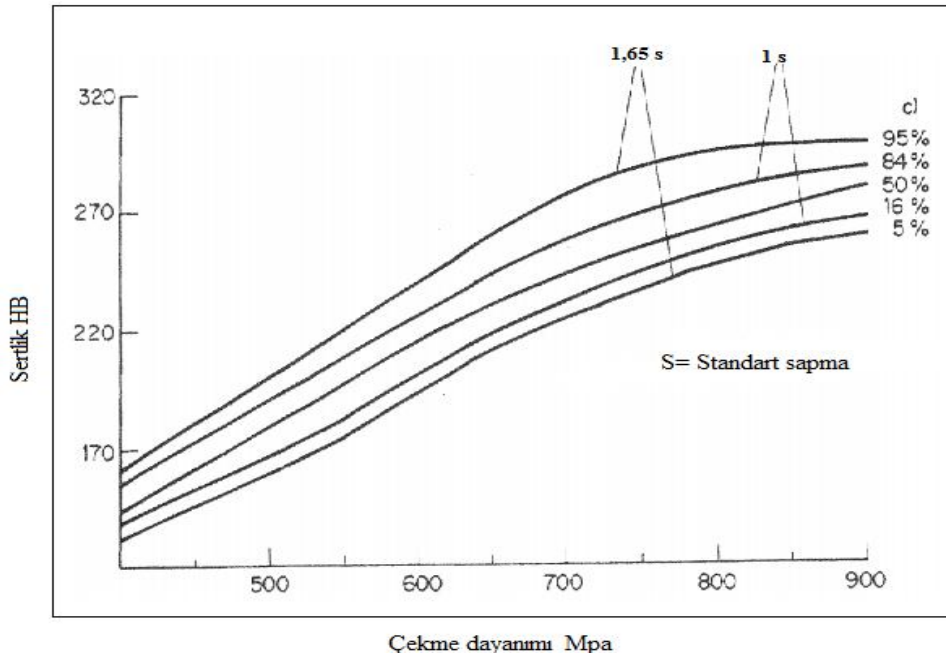
Östenitlemeden sonra, beynit kademesindeki bir sıcaklığa suverilen malzeme, bu sıcaklıkta tutularak östenitin beynite izotermik dönüşümü sağlanır. Yukarıda sıralanan ısıt işlemlerle sağlanan içyapı oluşturmanın esasları demir-karbon diyagramı yardımıyla anlaşılabilir. Her ne kadar ikili faz diyagramında silisyum ve benzeri alaşım elementlerinin etkisi görülüyor ve verilen sıcaklık ve derişiklikler alaşımlama ile değişiyorsa da, aşığıda açıklanan ısıt işlem prensiplerinde önemli bir fark olmaz. Şekil 2.5'de yukarıda sıralanan ısıt işlemlerde geçerli olan sıcaklık-zaman değişimleri verilmiştir. Görüldüğü gibi ısıt işlemler çeliklerin ısıt işlemlerine oldukça benzemektedir. Dökme demir içinde bulunan bazı elementler dönüşümlerin kararlı veya yarı kararlı olmasını etkilediğinden bu malzemelerin ısıt işlemi, çeliklerin ısıt işleminden bazı farklılıklar gösterir. Çelikteki imkânlarla ek olarak dökme demirlerde bağı karbon uygun bir sıcaklık kontrolü ile grafit olarak da ayrıştırılması mümkündür. Dökme demirde alaşım elementlerinin bulunması genellikle ısıt işlemlerin etkisini artırır. Alaşımlama işlem sıcaklıklarını biraz yükseltse de ısıt işlem uygulamalarının daha kolaylaştığı söylenebilir. Bunun yanında alaşımlama ile malzemenin sertleşme kabiliyeti de artar. En önemli alaşım elementlerinden biri olan silisyum derişikliğinin artması ile ötektoid sıcaklığı değişir. Östenitin perlit veya grafit/ferrite dönüştüğü bu sıcaklık kritik sıcaklık (A_{c1}) olarak da adlandırılır. Artan silisyum miktarı ile kritik sıcaklık artmakta ve dönüşüm genişliği giderek artan bir sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir. Östemperlemenin avantajları:

1. Östenit içindeki karbonun beynite dönüşmesi sırasında oluşan hacim değişimleri çok küçüktür, bu sayede çatlak oluşma tehlikesi ve çarpılma olasılığı azalır.

2. Genellikle 250-450 °C arasında sabit sıcaklıkta yapılan ve su verme sonrası uygulanan temperlemeden daha düşük olan sıcaklıklarda gerçekleştirilen bu işlem sırasında ikincil grafit ayrışması ve ferrit oluşumu tehlikesi yoktur [11].

2.4.8. Yüzey Sertleştirme

Küresel grafitli dökme demir kolayca alev ve endüksiyon sertleştirilmesine tabi tutulabilir. Parçanın maksimum sertliğe ve bu sertliğin de yüksek olması için yapının sertleştirme işleminden önce perlitik ve bileşiminin % 1,5-2 Ni ihtiva etmesi gerekir. Yapı perlitik olduğu takdirde yüzey sertliği 600-750 HB ve derinlik 1-2 mm. olabilir. Eğer yapı ferritik ise su vermeden önce parçayı yüksek sıcaklıkta uzun müddet tutup su vermek lâzımdır. KGDD için çekme dayanımı-sertlik değişimi grafiği Şekil 2.6'da verilmiştir [11].



Şekil 2.6. KGDD'lerin çekme dayanımına karşılık sertlik değişimleri [1].

BÖLÜM 3

ÖSTEMPERLEME ISIL İŞLEMİ

3.1. ÖSTEMPERLEME ISIL İŞLEM SÜRECİ

1950’li yıllardaki yüksek çekme ve darbe dayanımlı malzeme geliştirme çabaları sonucu öncelikle KGDD’lere alaşım elementi ilavesi yapılmak suretiyle hedeflere ulaşılmaya çalışılmış, diğer yandan beynitik yapı oluşturmak amacıyla KGDD’lere östemperleme ısıl işlemi 1970’li yılların ortalarında ilk kez Finlandiya’daki Kymi Kymmene mühendislik şirketinde ve daha sonra da başta ABD, Finlandiya, Norveç, İngiltere ve Belçika gibi ülkelerde uygulanmıştır [14].

Geleneksel östemperleme prosesinde döküm malzeme 850-950 °C sıcaklık aralığında tamamen östenit (γ) matris yapı elde edilene kadar yeterli süre (genellikle 1–2 saat) bekletilir. Bunun ardından 250-400 °C sıcaklık aralığına hızla soğutulur ve seçilen sıcaklıkta 1–4 saat süreyle bekletilir. Daha sonra oda sıcaklığına havada soğutulur [3].

Östemperleme ısıl işlemi ile KGDD mikroyapısında orjinalde var olan ferrit, perlit ve grafit yapıları yerine işlem parametrelerine bağlı olarak yüksek karbonlu östenit, ösferrit, beynit ve grafit yapıları elde edilmektedir. Genel olarak bu ısıl işlem çeliklerde olduğu gibi KGDD’ ler de dayanımı oldukça arttırırken süneklik ve aşınmayı azaltmaktadır.

Östemperleme ısıl işleminin asıl amacı, yüksek karbonlu östenit ile birlikte, karbürsüz ferritten meydana gelmiş asiküler (beynitik) bir matriks yapısı oluşturmaktır [15].

Östemperleme yaygın olarak bilindiği gibi iki basamaklı bir ısıl işlemdir. İlk aşaması östenitleme tavlama ve tutma aşamasıdır. Östenitleme işlemi 20 dakika ile 4 saat arasında değişen bir sürede gerçekleştirilmektedir [16]. Bu aşamada, 850–950 °C'lik bir sıcaklık aralığında döküm matriks tamamen östenite dönüştürülür. Östenitin karbon miktarı östenitleme sıcaklığı ve küresel grafitli dökme demirin bileşimine bağlıdır [3].

Östemperleme işleminin ikinci aşaması, 250–400 °C arasında değişen bir sıcaklık aralığındaki östemperleme sıcaklığına çabuk soğutma ve bu sıcaklıkta 1 ile 4 saat arasında değişen bir sürede tutmaktır [17]. Hızlı soğutma izotermal bir tuz banyosuna hızlı bir şekilde daldırılarak gerçekleştirilir. Çalışılan sıcaklığa bağlı olarak östemperleme ısıl işlemi, yüksek karbonlu bir östenit içinde beynitik ferrit ya da beynitik ferrit karbür matriks yapısı meydana getirir. Karbon seviyesi, östeniti termal olarak kararlı hale getirmeye yetecek kadar yüksektir [17].

Östenitleme sıcaklığından östemperleme sıcaklığındaki izotermal tuz banyosuna geçiş, perlitik ve ferritik dönüşüme meydan vermeyecek kadar hızlı olmalıdır [15]. Alaşımız küresel grafitli dökme demir, perlit dönüşümünü önlemek için yaklaşık 20 saniye içinde östenitleme sıcaklığından östemperleme banyosuna aktarılmalıdır [3].

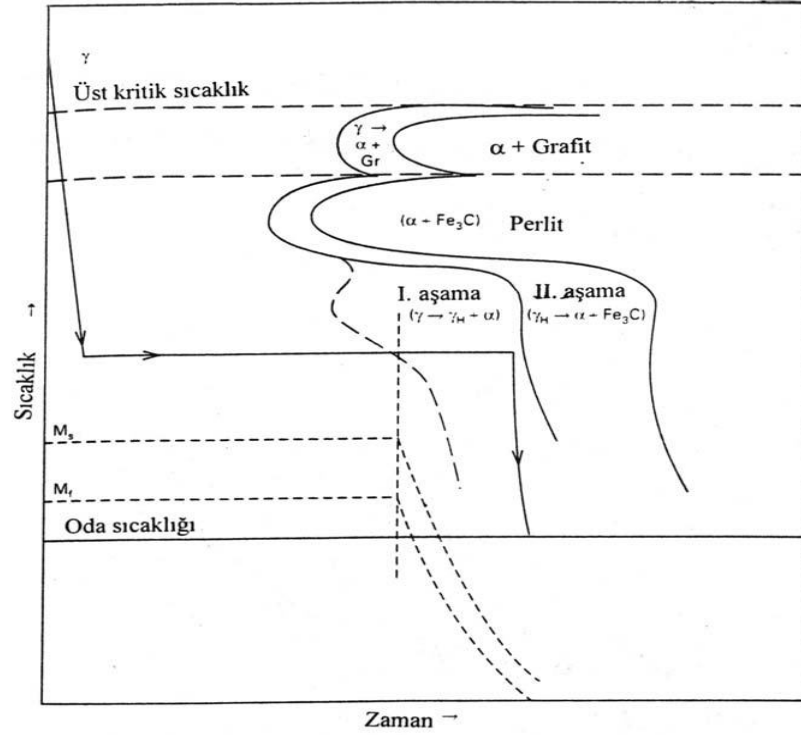
Küresel grafitli dökme demirin östemperlenmesi sonucu elde edilen beynit yapısı ile çeliklerdeki izotermal tavlama ya da sürekli soğuma ile elde edilen beynit yapısı farklı dönüşüm süreçlerinin sonucunda meydana gelirler [3]. Çeliklerden elde edilen beynit yapısı, martenzit ve perlit oluşum sıcaklıkları arasında meydana gelmektedir. Buna göre çeliklerde alt beynit ve üst beynit olarak iki ayrı beynit yapısı tanımlanmıştır [3]. Alt ve üst beynit yapıları arasındaki gerçek farklılık, her iki yapının oluşum sıcaklıkları ile ferrit ve karbür fazının konumundan ileri gelir. Alt beynit, martenzit dönüşüm sıcaklığına yakın sıcaklıklarda oluşmaktadır ve sementit, ferrit tabakçıklarının içinde bulunmaktadır. Ayrıca alt beynit yapısında ϵ -karbür gibi karbürlerde bulunur [3]. Üst beynit yapısı ise perlit oluşum bölgesine yakın sıcaklıklarda meydana gelir ve sementit, ferrit tabakçıklarının arasında bulunmaktadır. Ferrit ve sementit fazlarının beynit içinde bulunma şekline bağlı olarak alt beynit tok, üst beynit ise gevrek karakterdedir [18].

Küresel grafitli dökme demirin östemperlenmesi sonucu oluşan beynit yapısı ise iki aşamalı bir dönüşüm sürecinin ürünüdür. Küresel grafitli dökme demirin izotermal banyoda tutulması esnasında oluşan beynitik yapı, çelikte oluşan beynit yapısından farklı olması açısından (çeliklerdeki beynitik yapı sementit içeren ferrit tabakalarından oluşur) “ausferrit” olarak isimlendirilir ve iki aşamalı bir dönüşüm sürecinin ürünü olarak östemperleme sıcaklık aralığında meydana gelir [3]. Bu aşamalar şunlardır:

1. Çoğu zaman beynitik ferritin, ferrit-küre (matriks-nodül) ara yüzeyinde çekirdeklenmesi ve daha sonra,
2. Küçüklüğü büyük ölçüde östemperleme sıcaklığının bir fonksiyonu olan beynitik ferritin östenit içinde büyümesidir [3].

Beynitik ferritin büyümesi esnasında ferrit tabakçıklarının bünyesindeki karbonun bir kısmı östenite doğru yayılır. Sonuçta artan östemperleme süresine bağlı olarak, östenit karbonca zenginleşir ve böylece kararlılığı yükselir. Karbonca zenginleşmiş östenit, “yüksek karbonlu östenit” olarak bilinir [15,18].

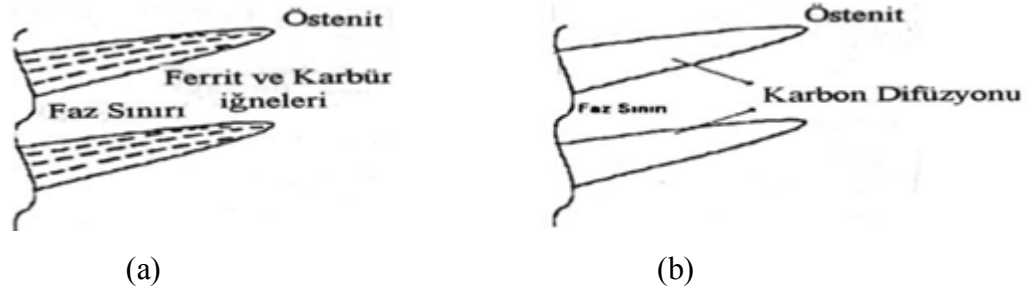
Şekil 3.1’de östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin üretimini belirten bir işlem dizisi ile birlikte, küresel grafitli bir dökme demir için IT (İzotermal Dönüşüm) diyagramını göstermektedir. Şekilde, Ms sıcaklığının hemen üzerindeki bir izotermal işlem sonrası oluşan beynit yapısı alt beynit, perlitik dönüşüm sıcaklığının hemen altında ve alt beynit oluşum sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta oluşan yapı ise üst beynit olarak adlandırılır [18,19].



Şekil 3.1. Küresel grafitli bir dökme demirin izotermal dönüşüm (IT) diyagramı [19].

İzotermal dönüşümü takip eden mikroyapı büyük ölçüde östemperleme sıcaklığına T_A 'ya bağlıdır [20]. Yaklaşık 330 °C'nin altındaki (240–330 °C sıcaklık aralığı) düşük bir östemperleme sıcaklığı T_A , östenitin çok fazla soğumasına ve karbonun difüzyon hızının düşük olmasına sebep olur. Bu nedenle, beynitik ferritten östenite doğru yayınan karbon miktarı çok azdır ve karbonun geri kalanı ferrit tabakçıklarında sementit (Fe_3C) olarak çökelir (Şekil 3.2a) [15]. Sonuçta, ferrit tabakçıklarının çekirdekleşme hızı, ferrit tabakçıklarının 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 C’lu östenitten ibaret olarak kabul edilse de, çok düşük oranda martenzit içermektedir [20]. Maksimum tokluğun elde edildiği şartlarda %10 ile %20 oranında yüksek karbonlu östenit oluşur [8]. Benzer şekilde, komşu ferrit tabakçıklarının arasında oluşan iğne şeklindeki yüksek karbonlu östenit bölgesi de ince bir görünümde [18,20]. 330–400 °C sıcaklık aralığında değişen daha yüksek östemperleme sıcaklıklarında karbonun difüzyon hızı bir önceki duruma göre (östemperleme sıcaklığı T_A 'nın 240–330 °C arasında değiştiği durum) oldukça yüksektir ve böylece karbon büyüyen ferrit

tabakçıklarından östenite doğru hızla yayınabilir. Bu durum, özellikle büyüyen ferrit tabakçıkları arasındaki östenitin karbonca zenginleşmesine sebep olur [3]. Östempereleme sıcaklığının yükselmiş olması, martenzit oranını düşürürken kalıntı östenit miktarını artırır [21]. Bütün bu değişiklikler hep birlikte “üst beynit” yapısının oluşmasına sebep olur (Şekil 3.2b) [15,21]. Dönüşüm süresi ilerledikçe, östenitin karbon miktarı artar ve beynit reaksiyonunun itici gücü azalır. Bu esnada yapıda bulunan yüksek silisyum miktarı (%2–3 Si), karbür oluşumunu engeller [19]. Ayrıca, yüksek karbon oranı M_s (martenzit başlangıç sıcaklığı) sıcaklığını düşürür ve bu nedenle ortam sıcaklığına soğuma esnasında östenit kararlı bir durumdur. Üst beynit yapısında, östempereleme sıcaklığı TA 330–440 °C aralığında bir değer aldığı için genel mikroyapı, alt beynit yapısına göre daha kaba ve karbürsüz ferrit tabakçıkları ve kalıntı östenit yapısından oluşur [20]. Yüksek karbonlu östenit, kütsel bir şekle sahiptir, yapı rasgele dağılmış durumdur ve maksimum tokluğu elde edildiği şartlarda %45 oranında bulunduğu bildirilmiştir [18,20].



Şekil 3.2. a) Alt beynit (250 - 330°C) ve b) Üst beynit (330 - 400°C) oluşum mekanizması [15].

330–400 °C arasında östemperelenen ve üst beynit yapısı gösteren bir kütsel grafitli dökme demir parça ise, yüksek süneklik ve toklukla ilişkili olarak nispeten yüksek mukavemet, orta derecede bir sertlik değeri gösterir. Maksimum aşınma direnci ve deformasyon sertleşmesi, ortamda yüksek miktarda kalıntı östenit olduğunda, yani üst beynit yapısı gösteren bir malzemede görülür [16].

Östenit karbon bileşimi Fe-C denge diyagramındaki maksimum karbon çözünürlüğü oranına (%1.7–2) ulaştığında yüksek karbonlu östenit, ferrit ve karbüre ayrışır. Sonuç olarak kütsel grafitli dökme demirlerde izotermal işlem sırasında meydana gelen dönüşümler östempereleme zamanına bağlı olarak iki aşamalı bir reaksiyon ile meydana gelmektedir [8].

Östempereleme işleminde esnasında mikroyapıda meydana gelen değişimler, bir alt beyrit yapısının (Şekil 3.2a) ve bir üst beyrit yapısının (Şekil 3.2b) değişen östempereleme sıcaklığına bağlı olarak ortaya çıkmasını sağlar [21].

Birinci aşamada (numunen izotermal işlem banyosuna daldırılması ile başlamıştır), düşük karbonlu östenit, yüksek östempereleme sıcaklıklarında beyritik ferrit (α) ve yüksek karbonlu östenite (γ_k) düşük östempereleme sıcaklıklarında ise beyritik ferrit/karbür ve yüksek karbonlu östenite dönüşür. Östempereleme işleminin birinci aşaması,



eşitliği ile ifade etmek mümkündür [15]. Bu işlem süresinin artması ile daha sonra I. aşamada oluşan yüksek karbonlu östenit, östempereleme prosesinin II. aşamasında,



reaksiyonu gereğince termodinamik olarak daha kararlı olan ferrit ve karbüre (Fe_3C) ayrışır [22].

I. aşamanın sonunda ferrit oluşumundan dolayı, östenit karbonca doyar ve oda sıcaklığına soğuma sırasında martenzite dönüşemeyecek kadar kararlı bir hal alarak “tam östemperelemiş” küresel grafitli dökme demir yapısını oluşturur. Oysa I. aşamanın herhangi bir yerinde östempereleme işlemine son verildiğinde (yani östempereleme süresi azaltıldığında) yapıdaki östenit henüz karbonca doygunluğa erişmediği için oda sıcaklığına soğuma sırasında martenzite dönüşecektir [3].

I. aşama sonunda ortaya çıkan mikroyapı, karbürsüz ferrit ve yüksek karbonlu östenitten ibarettir [18,19].

I. aşamada martenzitin mevcudiyeti ve II. aşamada ise ürün olarak karbürün oluşması mekanik özelliklere zararlıdır [21,22]. Maksimum mekanik özelliklere, yapıda %60–80 oranında beyritik ferrit ve %20–40 oranında kalıntı östenit olduğunda

ulaşmaktadır. Başlangıçta oluşan ferrit tabakçıklarının sayısı, şekli ve boyutu I. aşama ile belirlenir. Dolayısıyla, faydalı nihai mikroyapıyı kontrol edebilmek ve arzulanan özellikleri elde edebilmek için I. kademeyi kontrol etmek gerekir. Bu kademenin kontrolü, seçilen östemperleme sıcaklığında östemperleme süresinin kontrolüyle gerçekleşir [21].

3.2. ÖSTEMPERLEME SÜRECİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELER

Östemperleme ısısal işlemin küresel grafitli dökme demirler üzerindeki başarılı uygulamaları, bu malzemelerin pek çok alanda kullanımını yaygınlaştırmıştır. Östemperleme ısısal işlemin boyunca meydana gelen oluşumlar konu olmuş, bu araştırmalar sonunda daha mükemmel yapıya östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir üretmek mümkün olmuştur [3].

Östemperleme, dökümden sonra ısısal işleme çok iyi kalite ve işlem kontrolü gerektiren bir süreçtir. Dökümün kalitesi, alaşım elementlerinin segregasyonu, östenitleme süresi ve sıcaklığı, östemperleme süre ve sıcaklığı işleme tabi tutulan malzemenin boyutları östemperleme sürecini etkileyen parametrelerdendir [3].

3.2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Döküm Kalitesi ve Döküm Şarj Malzemesi

Östemperleme ısısal işlemine tabi tutulacak olan küresel grafitli dökme demir malzeme, ne kadar temiz ve homojen olursa, ısısal işlem şartlarının etkisini kontrol etmek ve sonuçta elde edilecek olan mekanik özellikleri iyileştirmek o kadar kolay olur [23].

İstenilen mekanik özelliklere ulaşmada önemli şartlardan birisi olan döküm şarj malzemesi; östemperleme şartlarının ve işlemlerin hedeflere uygun olarak gerçekleştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Döküm şarj malzemesinin özellikle çelik hurda ve diğer kimyasal bileşimi bilinmeyen malzemelerden oluşması işlemin kontrolünü güçleştirmektedir. Çelik malzeme hurdasında V, Cr, Ti gibi elementlerin miktarlarının tespiti daha sonradan bu elementlerin sebep olabileceği

zararlı etkilerin önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır [5]. Ocak şarj malzemesinin mikro gözenek oluşturma eğilimli olması, dayanım bakımından azalmalara neden olmaktadır. Ayrıca şarj malzemesi elde edilmek istenen kimyasal bileşim açısından önem arz etmektedir. Çünkü ilave miktarların büyük önem taşıdığı ve segragasyon eğilimli elementlerin (Mo, Mn, Cr, Ti gibi) belirtilen nedenlerden dolayı bilinmesi yararlı olacaktır. Şarj malzemesi bileşimi öncelikle döküm matrisini belirlemektedir. Oluşan bu matris; dönüşüm karakteristiğinin temelini oluşturmaktadır. Döküm matris yapısı ile hedeflerin gerçekleştirilmesi arasında tam bir ilişki söz konusudur [2].

3.2.2. Segragasyonun Etkisi

KGDD'in katılaşması sırasında Si, Cu, Ni gibi elementlerin grafit kürelerine yakın yerlerde segrage oldukları belirlenmiştir. Buna ilaveten Mn, Mo, Cr, Ti, V gibi elementler ise tane sınırlarında birikme eğilimi gösterir. Bu nedene uygun ve homojen bir döküm matrisin elde edilmesinde küre sayısının önemi artmaktadır. Katılaşma hızının artması, homojen yapısal dağılımı arttırmakta ve özellikle zararlı etkiye sahip taneler arası karbürlerin oluşumunu önlemede etkili olmaktadır. Eğer uygun döküm tasarımı yapılmamış ise kesit kalınlığı artarken katılaşma hızı azalır ve segragasyon oluşumu artış gösterir [2].

3.2.3. Parça Kesit Kalınlığı ve Soğuma Hızının Etkisi

Alaşımız KGDD için parça çapları 15 – 30 mm arasında değişmektedir. Daha büyük çapa sahip parçalarda önceden belirtilen nedenlerden dolayı alaşımlama yapılması kaçınılmaz olmaktadır. Östenitleme işleminden sonra östemperleme sıcaklığına kadar soğutmada, perlitin oluşmaması için soğutma hızının yaklaşık olarak 10 °C/sn kadar olması belirtilmektedir. Bu soğutma hızından sapılması durumunda ise perlitin oluşma ihtimali artmaktadır [23].

3.2.4. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Küresellik

Birim alana düşen küre sayısı, şekli ve dağılımı; homojen bir yapısal dağılım ve segregasyonu önlemede çok büyük bir önlem taşımaktadır. Küre sayısı ve şeklinin mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve ASTM A 395-70'na göre birim alana düşen küre sayısının 150–250 küre/mm² olması gerektiği belirtilmektedir. Küre sayısının artması, döküm parçada döküm durumunda ferrit oluşumunu arttırdığı bilinmektedir. Buna paralel olarak izotermal işlemlerde dönüşümün kürelere yakın yerlerde ve tane sınırlarında olması nedeniyle, küre sayısının dönüşüm süresinde bir kısalmaya neden olacağı düşünülmektedir [24].

Küresel grafitli dökme demirin kalitesi ve başlangıç yapısının, östemperleme işlemi sonrasında elde edilecek mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir. Östemperleme sonunda küre sayısı azalması, aynı döküm kalitesinde olan malzemeler için, darbe enerjisinin artmasına yol açar. Çünkü, küre sayısının artması ile birlikte, çatlak başlangıcı olarak davranabilecek milyonlarca atomik boyutlu hatalar da artmaktadır [23].

Ayrıca östemperleme işlemi sonunda küre boyutlarında meydana gelen artış, darbe enerjisini olumsuz yönde etkiler. Bununla birlikte, bazı malzemelerin östemperleme sonrasındaki küreselliğinin başlangıca göre arttığı gözlenmiştir. Küreselliğinin artmasının mekanik özellikleri arttırdığı bilinen bir olaydır. Çünkü küresellik arttıkça boşluk diye tabir edilen grafik modülleri etrafındaki gerilme konsantrasyonu, modül çevresine homojen olarak dağılmaktadır [23].

Östemperleme ısı işlemi ile meydana gelen küre sayısının azalması ve küreselliğin artışı, küre boyutunun yapmış olduğu olumsuz etkiyi, beyitlik matris ile birlikte gidermekte ve darbe enerjilerinde artış meydana getirmektedir [23].

Partikül boyut dağılımı analiz yöntemlerinin birçoğu partiküllerin bir şekle sahip olduğu varsayımına dayanır. Doğal olarak bir numune yüzeyinde partikül boyut dağılımı için yapılan düzlemsel ölçümde her bir partikülün kesilmiş bir küre parçasını simgeleyecek şekilde dairesel bir şekle sahip olması beklenmeyecektir. Bu

durumda partiküllerin boyutsal ölçümünde kullanılan boyut dağılımı tekniğinin gerektiği tarzda yapılmalıdır [23].

3.2.5. Alaşım Elementlerinin Etkisi

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin mikroyapısı ve mekanik özellikleri, kimyasal bileşimi ile yakından ilişkilidir [25]. Alaşım elementleri ile dökme demirin basit kalınlığı arasında basit bir ilişki vardır. Çünkü alaşımsız küresel grafitli dökme demirlerin östemperlenebilirliği (sertleşebilirliği) zayıf olduğu için kullanımları ince kesitler için sınırlandırılmıştır [21]. Alaşım elementleri hem sertleşebilirliği arttırmak hem de östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir malzemeleri ekonomik açıdan daha etkili kılabilmek için düşük oranda küresel grafitli dökme demir yapısına katılır. Alaşım elementlerinin düşük oranda küresel grafitli dökme demir yapısına katılmasının sebebi, sadece “yeterli sertleşebilirlik (östemperlenebilirlik)” hedeflenmesidir. Çünkü alaşımlamanın aşırı oranda yapılması daha yüksek östemperleme sürelerini gerektirir. Kalın kesitli bir döküm söz konusu olduğunda alaşım elementlerinin ilavesi, ısıl işlem esnasında östenitleme sıcaklığından östemperleme sıcaklığına soğutulurken, küresel grafitli dökme demirin perlit oluşumundan sakınılabilecek şekilde yeterli sertleşebilirliğe ulaşabileceği seviyede olmalıdır. İlave alaşım elementlerinin beyniti dönüşüm üzerinde hiçbir ters etkisi olmamalıdır [26,27].

Küresel grafitli dökme demirlerin dönüşüm sırasında yapıda perlit oluşmaksızın östemperlenebilmeleri “östemperlenebilirlik” olarak adlandırılmıştır. Voigt ve Loper isimli bilim adamları tarafından yapılan çalışmalar sonucunda, başarılı bir östemperleme için, küresel grafitli dökme demir parçaların kritik çap (D_c) değerlerinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitliğin kullanılacağı sonucu ortaya çıkmıştır [28].

$$D_c = 124C_y^0 + 27(\%Si) + 22(\%Ni) + 16(\%Ni) + 25(\%Mo) - 1.68 \times 10^{-4} T_A^2 + 2(\%2Cu)(\%Ni) + 62(\%2Cu)(\%Mn) + 88(\%Ni)(\%Mo) + 11(\%Mn)(\%Cu) + 127(\%Mn)(\%Mo) - 20(\%Mn)(\%Ni) - 137 \quad (3.3)$$

Burada,

D_C , Kritik çap veya kesit kalınlığı (mm),

C_y^o , Östenitleme sıcaklığında matriksin karbon bileşimi (%),

T_A , Östemperleme sıcaklığı ($^{\circ}C$) olarak verilmiştir.

Östenitlenmiş matriksin karbon içeriği (C_y^o) değeri, östenitleme sıcaklığı (T_{γ}) ve küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimine bağlıdır [28].

Eşitlik 3.3'den de görüldüğü gibi, alaşım elementi ilavesi genel olarak kritik çapı dolayısıyla küresel grafitli dökme demirin östemperlenebilirliğini arttırma eğilimindedir. Bu etki, TTT diyagramının sağa doğru kayması, dolayısıyla östenitleme sıcaklığından östemperleme sıcaklığına soğuma sırasında perlit oluşumuna izin vermeyecek kritik soğuma hızının artmasıyla açıklanabilir [18].

Alaşım elementlerinin ilavesi (nikel, bakır ya da molibden), beynit içinde önemli morfolojik değişikliklere sebep olmaz. Herhangi bir östemperleme sıcaklığı için mukayese yapıldığında, alaşımsız küresel grafitli dökme demirlerde oluşmuş beynitin morfolojisi ile alaşımsız küresel grafitli dökme demirlerde oluşmuş beynitin morfolojisi arasında büyük bir fark vardır. Alaşım elementlerinin ilavesi, hiç şüphesiz beynit morfolojisini değiştirir. Ancak, alaşımlamaya devam edilirse (aşırı alaşımlama) martenzit (kısa östemperleme süreleri için) ya da dönüşmemiş (reaksiyona girmemiş) östenit hacmi (UAV) gibi heterojenliğe sebep olur [26].

Küresel grafitli dökme demir bileşiminde genelde bulunan elementlerden bazılarının östemperleme ısıl işlemine etkileri aşağıda detaylı şekilde incelenmiştir.

Karbon: İstenen katılma şartlarının sağlanabilmesi için küresel grafitli dökme demirlerde bileşimi genellikle % 3.6'dan daha az oranda bulunur. Karbon oranının artması küresel grafitlerin hacim oranının artmasına neden olurken mekanik özellikleri olumsuz yönde etkiler [18].

Silisyum: Si miktarı arttıkça bir küresel grafitli dökme demirin östemperlenebilirliği açısından önemli olan kritik çap (D_c) değeri artar. Silisyum miktarındaki %0.3'lük

bir artış D_c 'yi 7.6 mm arttırır. Silisyum miktarı yaklaşık %2.7 değerini aştığında, östenit hacim oranı (X_v) değeri azalır. Silisyum, belirli bir östenitleme sıcaklığında östenitteki karbonun çözünürlüğünü düşürür [28]. Östenitleme sırasında dönüşüm hızını azaltır [25]. Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir içinde, yüksek kaliteli küresel grafitli bir dökme demirde bulunduğu kadar bulunur (%1.8 ile %2.8 arasında). Karbonu östenitte çözüdüren anahtar elementtir. Yani östenit %2 kadar yüksek karbona sahiptir. Böylece gerçek eşsiz mikroyapı oluşur [8]. Küresel grafitli dökme demir bileşimindeki silisyum, demir karbür oluşum hızını azaltır, artan silisyum miktarına bağlı olarak, östenitten beynitik ferrit oluşum hızı azalır [28]. Küresel grafitli dökme demir mikroyapısında küresel grafitlere yakın bölgelerde yüksek oranda bulunur [18].

Fosfor: Bütün küresel grafitli dökme demirlerin sünekliğini düşürmesinden dolayı istenmez [8].

Molibden: Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler yaygın olarak kullanılan bir alaşım elementidir [26]. Sertleşebilirliği arttıran en etkili elementtir. Özellikle bakır ile bu etkisi güçlüdür. Fakat sertleşebilirliğe katkısı bakırdan on kat daha fazladır. Östemperleme süresini kısaltır [3].

Bakır: Alaşım elementi olarak bakır kullanımının en önemli sertleşebilirliği arttırmasıdır. Beynitik dönüşümün II. aşamasını yavaşlatır. Dolayısıyla işlem aralığının daha genişlemesine neden olur. Molibden ile birlikte kullanıldığında, sertleşebilirliğe etkisi ikisinin ayrı ayrı kullanılması durumundaki etkiden daha fazladır [26]. Alt beynit yapısında karbür oluşumunu engellediği bildirilmiştir. Bu yüzden artan bakır miktarı ile kalıntı östenitin hacim oranı artar. Genellikle %1 dolayında kullanılır. Ferritte çözünürlüğün az olmasından dolayı, nadiren %1.5 oranında kullanılır [18,25].

Nikel: Özellikle I. kademede olmak üzere beynitik dönüşüm hızını yavaşlatır. Yüksek nikel oranının, segregasyon etkisine bağlı olarak yapının farklı yerlerinde farklı beynitik dönüşüm hızına sebep olacağı bildirilmiştir. Bu nedenle, nikelin manganez gibi bir elementle birlikte kullanımının segregasyon eğilimini

dengeleyeceği ve sonuç olarak homojen bir beynitik dönüşüm elde edilebileceği belirtilmiştir [26].

3.3. ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

3.3.1. Östenitleme Sıcaklığı ve Süresinin Etkileri

Östenitleme sıcaklığının mekanik özelliklere olan etkisi, östemperleme sıcaklığına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Darwish ve Elliott [21] tarafından yapılan çalışmalarda, düşük östemperleme sıcaklıklarında alt beynit meydana geldiği esnada, östenitleme sıcaklığının mukavemet ve süneklik üzerine etkisinin yeterince önemli olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuca benzer şekilde, üst beynit bölgesinde östenitleme sıcaklığının mukavemet özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Ancak, artan östenitleme sıcaklığı ile uzama ve darbe direnci değerleri sürekli azalma göstermiştir [3].

Hamid ve diğerleri [29] tarafından yapılmış bir diğer çalışmada ise, östenitleme sıcaklığının süneklik üzerindeki etkisi yeterince önemli bulunmamakla beraber, yine de östenitleme sıcaklığında 920 °C'den 870 °C'ye meydana gelen bir azalmanın, sünekliği arttıracacağı ve standartta (ASTM A897M) belirtilmiş olan yüksek sünekliğe sahip östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin üretiminde dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir [3].

Östenitleme sıcaklığı östenitin karbon miktarını, östenit tane boyutunu ve matriksin kimyasal homojenliğini etkiler. Bu faktörlerin östemperleme hızı üzerindeki etkisi, östemperlenmiş mikroyapıyı kontrol eder. Örneğin, östenitleme sıcaklığının arttırılması;

1. Östemperlenmiş yapıyı iyileştirir. Dolayısıyla beynitik ferrit tabakçıklarının uzunluğu artar, sayıları ve dağılımlarındaki düzensizlik azalır,
2. Kalıntı östenitin hacim oranını arttırır,
3. İki tip kalıntı östenit yapısının oluşmasına sebep olur. Komşu ferrit tabakçıkları

arasında meydana gelen ve düşük östenitleme sıcaklıklarında baskın durumda olan ince bir film şeklindeki östenit yapısı ve farklı yönlerde büyüyen ferrit tarafından çevrelenmiş östenitle birlikte bulunur ve artan östenitleme sıcaklığı ile artan kütsel şekilli bir östenit yapısı oluşur,

4. Hücreler arası bölgelerde ve kütsel şekilli bölgelerin merkezinde martenzit oluşumunu artırır. Östenitleme sıcaklığının bir ısı işlem parametresi olarak önemi; özellikle yüksek östemperleme sıcaklıkları için; düşük bir östemperleme sıcaklığı seçilmesinin mekanik özellikleri, özellikle süneklik ve darbe enerjisi değerlerinin arttırmasından kaynaklanmaktadır [21].

Östenitleme sıcaklığının artması östenitin karbon bileşimin artmasına ve östemperleme sürecinde reaksiyon hızının yavaşlamasına neden olmaktadır. Ayrıca kütsel grafitli dökme demirler yapısındaki ferrit, perlit ve grafit gibi bileşenlerin miktarı da östenitleme süresini etkiler. Perlitik matrikse sahip yarı kararlı bir sistemde (Fe-Fe₃C) östenitleme süresi daha kısadır. Grafit kürelerinin sayısının fazla olması da östenitleme sürecini kısaltmasına rağmen, etkisi perlitik matriks kadar fazla değildir [18].

3.3.2. Östemperleme Sıcaklığı ve Süresinin Etkisi

Hem östenitleme sıcaklığı, hem östemperleme sıcaklığı hem de östemperleme süresinin östemperlenmiş kütsel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri üzerinde etkisi vardır. Ancak östenitleme sıcaklığının mekanik özellikler üzerindeki etkisi östemperleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Dolayısı ile, östemperleme sıcaklığı ve süresinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi, östenitleme sıcaklığına göre daha önemli olmaktadır. Önceden seçilmiş östemperleme ve östenitleme sıcaklıkları için mekanik özelliklerin optimum seviyeye getirilebilmesi için östemperleme süresinin doğru seçilmesi gerekir. Benzer şekilde, östemperleme sıcaklığının doğru seçimi de üretilen östemperlenmiş kütsel grafitli dökme demirlerin sınıfını belirtmesi açısından önemlidir [21]. Önceden bilindiği gibi, östemperleme ısı işlemi 250–400 °C arasındaki bir sıcaklıkta yapılır. Yaklaşık 330 °C'nin altındaki sıcaklıklarda elde edilen yapı alt beynit, 330 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda elde edilen yapı ise üst beynittir. Alt beynit yapısı yüksek mukavemetli

sert bir yapı iken, üst beynit yapısı nispeten daha az mukavemetli fakat daha sünek ve daha tok bir yapıdır. Düşük östemperleme sıcaklıklarında oluşan alt beynit yapısı yüksek mukavemet göstermektedir [18,21]. Pek çok faktör, bu yüksek mukavemet dislokasyon hareketlerinin engelleyerek yardımcı olmaktadır. Bu faktörler şunlardır:

1. İnce yapılı ferrit iğnecikleri,
2. Ferrit içerisinde çökelen karbürler ve düşük seviyelerde kalıntı östenit,
3. Yüksek dislokasyon yoğunluğu ve
4. Karbonca aşırı doymuş ferritin kafes distorsiyonudur.

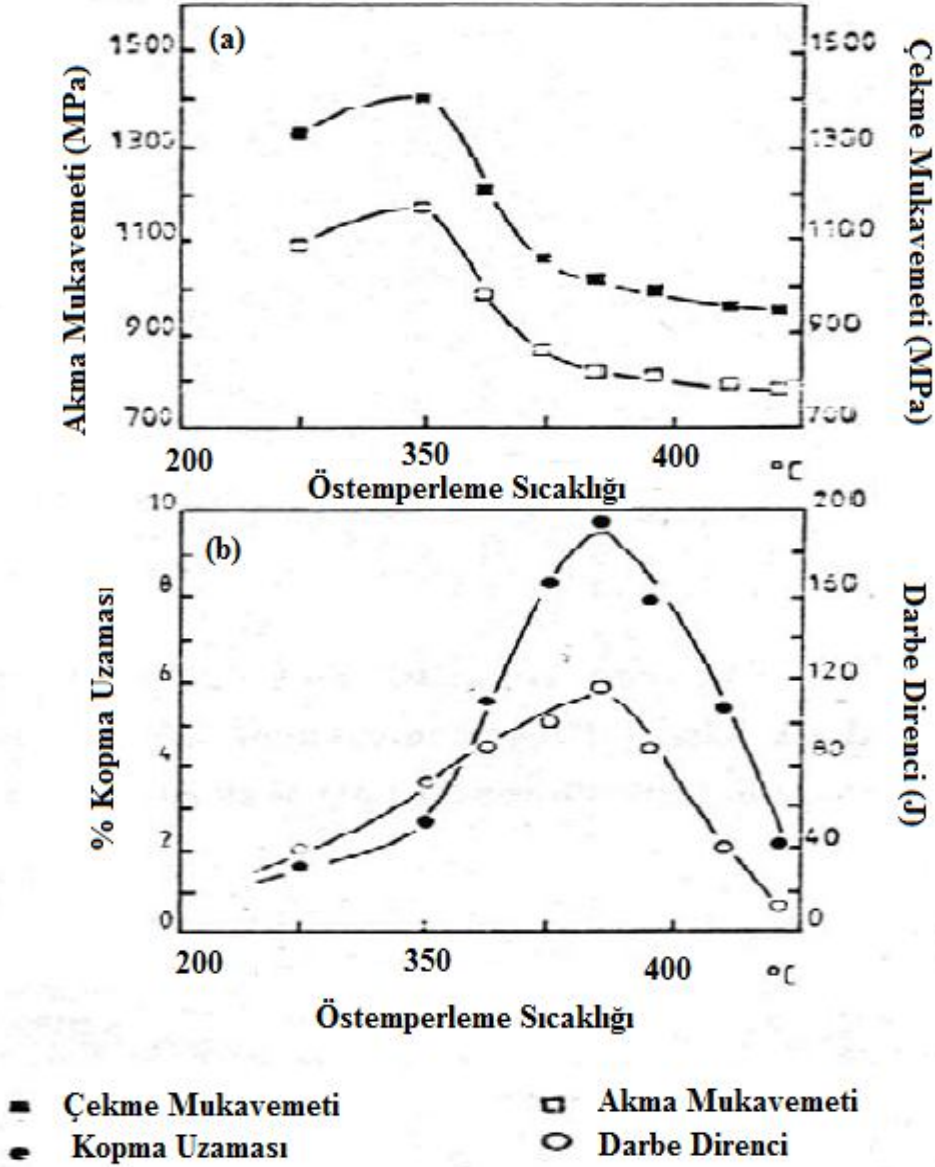
İğne benzeri alt beynit morfolojisi, karbürler, düşük seviyelerdeki kalıntı östenit ve dönüşmemiş östenitten kaynaklanan az miktardaki martenzit, düşük östemperleme sıcaklıklarında görülen düşük süneklığe sahip olurlar [3].

Ghaderi ve diğerleri [30], yaptıkları çalışmada, aynı östemperleme ve östenitleme sıcaklığında artan östemperleme süresi ile sertliğin düştüğünü tespit etmişlerdir.

Östemperleme sıcaklığı yükseldikçe (sıcaklık 330–450 °C aralığında bir değer ulaştığında), martenzit miktarı azalır ve kalıntı östenit miktarı artar ve alt beynit morfolojisi üst beynit morfolojisine dönüşür. Üst beynit yapısı, kaba, pürüzsüz ve ferritik-östenitik bir yapı olup, alt beynit yapısına göre daha büyük hacim içinde kalıntı östenit ihtiva eder ve azalmış bir mukavemete karşılık artmış bir süneklığe ve tokluğa sahiptir [3]. Yüksek östemperleme sıcaklıklarında işlem aralığı kapalıyken, süneklik ve tokluk hızlı bir şekilde düşerken mukavemet neredeyse sabit kalır. Yine yüksek östemperleme sıcaklıklarında, I.aşama reaksiyonu için itici güç azalırken II. aşama reaksiyonu için itici güç artar ve sonuçta mukavemette biraz düşme olur [21,29].

Şekil 3.3’de östemperleme sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi görülmektedir. Östemperleme süresinin seçimi çok önemli bir parametredir. Östemperleme süresi, belirli östenitleme ve östemperleme sıcaklıkları için mekanik özellikleri optimize etmek amacıyla seçilir. Mekanik özelliklerin östemperleme süresi ile değişimi, östemperlenmiş yapı geliştikçe mevcut fazların miktarı ve doğasındaki gelişmelere bağlıdır.

Östempereleme süresinin artmasıyla birlikte mukavemet, süneklik ve darbe direnci artarken sertlik azalır. Kısa östempereleme sürelerinde mekanik özelliklerde görülen düşük değerler, büyük oranda martenzitten kaynaklanır. Bu martenzit östempereleme sıcaklığından oda sıcaklığına soğuma esnasında dönüşmemiş karbonlu östenitten ileri gelir [3].



Şekil 3.3. Östempereleme sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi [21].

Östempereleme süresi arttıkça martenzit miktarı azalır, ancak bey nitik ferrit ve yüksek karbonlu östenit miktarları artar. Bu duruma paralel olarak, mekanik özelliklerde bir artış olmasına rağmen bu artış sürekli olmaz. Uzun östempereleme sürelerinde

mukavemet neredeyse sabit kalırken süneklik ve darbe direnci değerleri II. Aşama reaksiyonunun oluşmasına paralel keskin bir şekilde azalır. II. aşama reaksiyonu ilerledikçe, yapıdaki yüksek karbonlu kalıntı östenit miktarı azalır [3].

Üst beynit aralığında östemperleme sıcaklığı azaldıkça, ikinci aşama reaksiyonu daha uzun bir östemperleme süresi gerektirir ve genelde östemperleme süresine bağlı olarak mekanik özellikleri değişimi daha yavaş gerçekleşir. Genel olarak kırılma tokluğu artan östemperleme sıcaklıklarıyla birlikte darbe direncine benzer şekilde artmaktadır [3].

Luo ve diğerleri [31], yaptıkları çalışmalarda, küresel grafitli dökme demirlerin yüksek karbonlu çeliğin aşınma dirençlerinin östemperleme sıcaklığındaki bir artış ile artabileceğini bulmuşlardır. 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. Üstelik su verilmiş yapıların östemperlenmiş yapıya göre daha yüksek abrazyon direncine sahip olduğu yine araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [3].

Şahin ve diğerleri [32], yaptıkları çalışmada aynı östemperleme ve östenitleme sıcaklığında fakat farklı zaman sürelerinde yapılan östemperleme işlemi sonucunda daha uzun sürede östemperlenen numunenin daha fazla aşındığını fakat sertliğinin ise östemperleme süresinin artmasıyla birlikte düştüğünü belirtmişlerdir [3].

Hemanthu [33], yaptığı çalışmada, aynı numune üzerinde ve aynı östenitleme sıcaklığında östemperleme süresinin ve östemperleme sıcaklığının artışıyla beraber aşınma hacminin de arttığını tespit etmiştir [3].

3.4. ÖKGDD'LERİN AVANTAJ VE SINIRLAMALARI

ÖKGDD'ler daha iyi mekanik özellikler göstermelerinden dolayı birçok alanda kullanılmakta ve kullanılmaları da düşünülmektedir. Tabii ki bazı sınırlamaları da yok değildir. Ancak, teknik ve ticari olmak üzere iki grup altında toplanabilecek olan avantajları diğer malzemelerle rekabet edebilme imkanı sağlamaktadır [34,35].

Teknik Avantajları

1. Aşınma ve çizilmeye karşı direnci yüksektir. Sürtünme katsayısı düşüktür. Yetersiz yağlamalı (hatta yağlamasız) bir ortamda hasara uğramadan 10 dakika çalışabilir.
2. Çelikten %40 daha hızlı titreşim sönümlenme kapasitesine sahiptir. Dolayısıyla, ÖKGDD parçalar çelikten daha az gürültüyle çalışır.
3. Aynı boyutlardaki çelik parçaya göre %10 daha hafiftir.
4. Elastik modülü çeliğinkinden daha düşüktür. Örneğin dişlinin dişleri karşılaştığında temas alanı genişler. Dolayısıyla, temas gerilmeleri düşüktür ve bu, dişlilerin oyuklanma yorulma problemini azaltır.
5. Yapıda bulunan kalıntı östenitin deformasyonla (dişliler çalışırken de olabilir) martenzite dönüşmesiyle sert ve aşınmaya dirençli bir yüzey elde edilebilir.
6. Östemperlemeden önce iyi işlenebilirlik özelliği gösterir.
7. Çentik hassasiyeti çelikten daha azdır. Bu yüzden yüzey işlemlerinin çelikteki kadar hassas olmasına gerek yoktur.
8. Isıl işlem esnasında deformasyon daha azdır [34].

Ticari Avantajları

1. Ham malzeme maliyeti düşüktür.
2. Dökümün yatırım maliyeti dövme çeliğe göre daha düşüktür.
3. Östemperleme ısıl işlemi daha basit ve kısadır.
4. Östemperlemeden önce (hatta bazı durumlarda sonra) işlenebilirliği iyidir. Bu hem üretimi hızlandırır hem de kesici takım ömrünü artırır.
5. Kompleks parçalar bile nihai-sekle uygun şekillendirilebilir. Bu işlemeyi azaltacağından maliyeti düşürür.
6. Karbürleşmiş dövme çeliğe göre ÖKGDD dişli için enerji tüketimi %50 daha azdır.
7. Hatalı östemperlenen parçalar tekrar östemperlenebilir.

ÖKGDD'lerin yukarıda sayılan teknik ve ticari avantajlarının yanında bazı sınırlamalar söz konusudur. Bunları aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür;

1. En büyük problem östemperlemeden sonra işlenebilirliğin oldukça kötüleşmesidir. En sert sınıfı ancak taşlama tezgahında işlenebilir.
2. Çelikten daha düşük elastik modüle sahiptir. Bunun için daha fazla elastik deformasyona maruz kalır. Ancak bu özellik dişlilerde oyuklanma yorulma riskini azalttığından bazen faydalı da olabilmektedir.
3. Östemperleme nispeten küçük parçalar için çok uygundur. Kalın kesitli parçalar alaşımlama gerektirdiğinden fazla ekonomik değildir.
4. Diğer KGDD'ler gibi kaynak yapılabilir. Fakat eriyen ve ısının tesiri altındaki bölgeler, karbürler ve martenzit içerir. Her ikisi de sert ve kırılgan olduğundan malzemenin mekanik özelliklerini bozar [34].

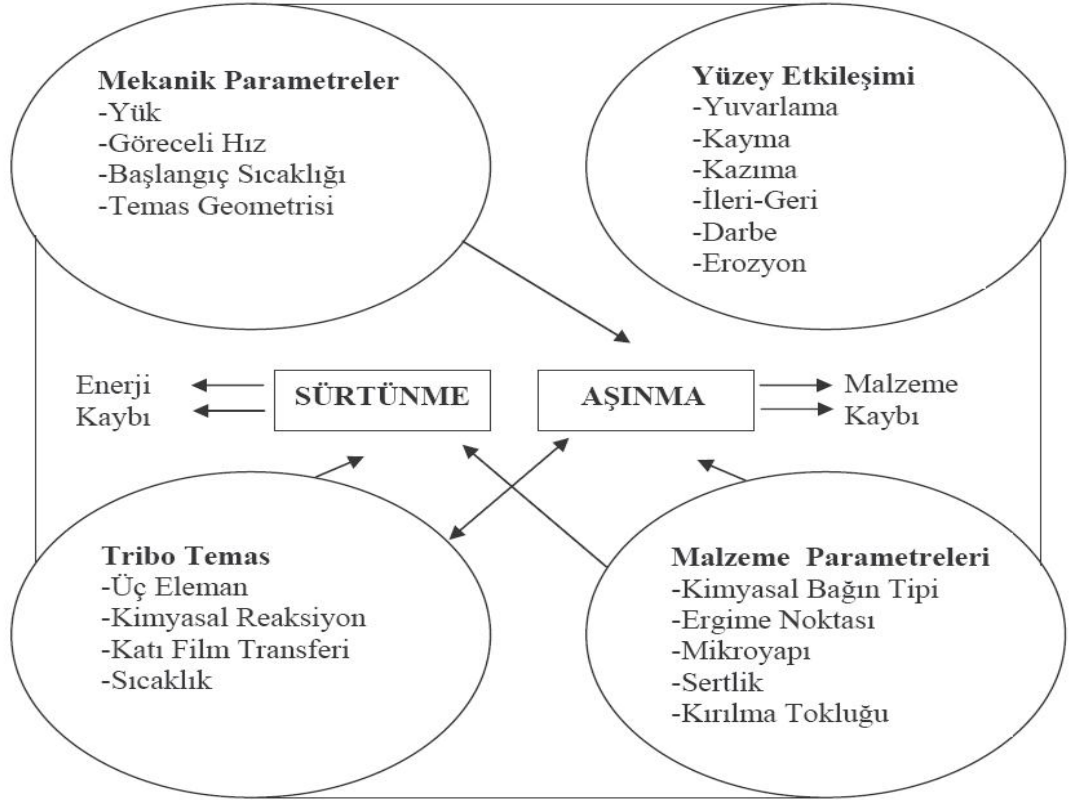
BÖLÜM 4

TRİBOLOJİ

4.1. TRİBOLOJİNİN ESASLARI

Birbirine temas eden hareketli malzemeler arasında sürtünme ve bunun sonucunda da aşınma meydana gelmektedir. Aşınmayı azaltmak için yağlama gerekmektedir. Bu nedenle sürtünme, aşınma, yağlama birbirine bağlı ve birbirini tamamlayıcı niteliktedir. Sürtünme, aşınma, yağlama konularını ve bunlara bağlı olan olayları inceleyen bilim dalına 'triboloji' denir [23].

İstenmeden meydana gelen aşınma, özellikle makine ve teçhizatın kullanımı sırasında çok büyük kayıplara sebep olmaktadır. Bu konu, makine tasarımında çok önemlidir. Çünkü temas eden yüzeylerde, sürtünme kuvvetleri güç kaybına, aşınma ise işleme toleranslarının kötüleşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle aşınma göz önüne alınması gereken parametrelerden biridir. Aşınmanın ve tribolojinin sınıflandırılması ve etkili olan faktörlerin şematik gösterimi Şekil 4.1'de verilmiştir [36].



Şekil 4.1. Sürtünme ve aşınmayı etkileyen faktörler [10,36].

4.2. AŞINMA

Teorik olarak aşınmayı tarif etmek oldukça zordur. Tam açıklayıcı bir tanım yapmak çok güç olmakla beraber, kabul edilen birkaç tanım şöyledir: aşınma; mekanik etkenlerle cisimlerin yüzeylerinde zamanla meydana gelen malzeme kaybıdır [26]. DIN 50320 (1976) ye göre; aşınma, katı cisim yüzey bölgesinden tribolojik zorlanmalar sonucu sürekli ilerleyen malzeme kaybıdır. Diğer bir aşınma tanımı ise; sürtünme halinde bulunan yüzeylerde malzemenin, mekanik etkiler etkisiyle kopup ayrılmasıdır. Bu şekilde yüzeyler ilk şekillerini kaybederler; parçalar arasındaki boşluklar büyür ve amaçlanan fonksiyon normal şekilde yerine getirilemez [23].

Aşınma, hareketli makine parçalarının ömürlerini, performanslarını azaltan ve bu parçaların bozulmasına sebep olan çok önemli bir faktördür. Bu sebeple ekonomik açıdan aşınmanın neden olduğu kayıplar ve hasarlar oldukça fazladır [23].

Sanayide tribolojik sistemlerin korozyon ve yorulma problemleri kadar önemli olan aşınma, makine elamanlarında kaçınılmaz bir durumdur ve karmaşık bir özellik gösterir. Mühendislik malzemelerinin ömürlerini kısaltan ve giderilmesi mümkün olmayan aşınma, birbiri üzerinde sürtünerek çalışan makine elamanlarının temas yüzeylerini değişikliğe uğratmaktadır [23].

Mühendislik malzemelerinde görülen yıpranmanın aşınma sayılabilmesi için şu şartların mevcut olması gerekir. Bunlar;

1. Mekanik bir etken,
2. Sürtünme (bağıl hareket),
3. Yavaş ve devamlı olması,
4. Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi

4.2.1. Aşınmayı Etkileyen Faktörler

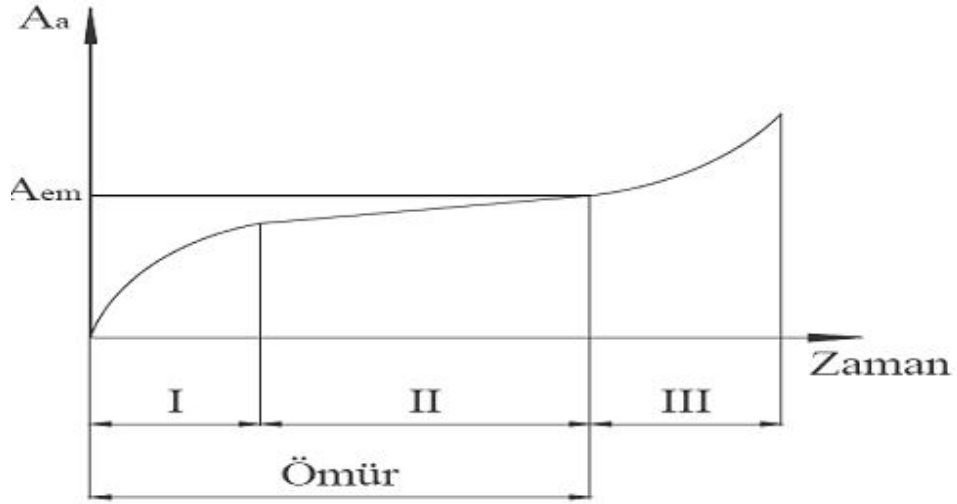
Aşınmayı etkileyen çeşitli faktörler farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu faktörler aşağıda dört grup halinde verilmiştir [36,37].

1. Ana malzemeye bağlı faktörler,
 - 1.1. Malzemenin kristal yapısı
 - 1.2. Malzemenin sertliği
 - 1.3. Elastikiyet modülü
 - 1.4. Deformasyon davranışı
 - 1.5. Yüzey pürüzlülüğü
2. Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi,
3. Ortamın etkisi,
 - 3.1. Sıcaklık
 - 3.2. Nem
 - 3.3. Atmosfer
4. Servis koşulları,
 - 4.1. Basınç
 - 4.2. Hız
 - 4.3. Kayma yolu

4.2.2. Aşınma-Zaman İlişkisi

Aşınma zaman bağlantısı Şekil 4.2' de görüldüğü gibi üç safhadan ibarettir [23];

1. Safhada makinelerin ilk çalıştırılmaları esnasında parçaların birbiri üzerinde hareketiyle şiddetli bir aşınma meydana gelir. Rodaj adı verilen bu safhada parçalar birbirine alıştırılır. Burada meydana gelen aşınma parçaların sonraki aşınma safhalarını da etkilemesi nedeniyle rodaj işleminin iyi yapılması ve kısa sürede gerçekleşmesi önemli bir unsurdur.
2. Safhada çalışma devam etmektedir ve temas bölgelerinde aşınma oluşmaktadır. Bu aşınma makine elamanlarının ömürlerinin tespitinde önemli bir etkidir. Rodajdan başlayarak III. safhaya kadar aşınma doğal olarak devam eder.
3. Safha ise aşınma hızının oldukça arttığı ve parçaların kullanılmaz hale geldiği safhadır. Bu safhaya şiddetli aşınma bölgesi denilmektedir.



Şekil 4.2. Aşınma zaman ilişkisi [36].

4.2.3. Aşınmanın Temel Unsurları

Aşınmanın başlaması ve devam edebilmesi için sürtünme olmalıdır. Sürtünen iki cisim temas yüzeyi, aşınma açısından oldukça önemlidir. Gerçek temas alanı, görünen temas alanından çok küçüktür. En hassas işlemlerde bile katı malzemelerin

yüzeyi hiçbir zaman düz değildir. Yüzeyde birkaç mikron yüksekliğinde mikroskopik pürüzler mevcuttur. Temas durumunda, bu pürüzler etkinleşir. İlk temas, birkaç pürüz tepeleri arasında olur. Pürüz tepeleri arasındaki girintiler temas etmezler. Gerçek temas alanı, temasta olan pürüzlerin toplam alanıdır [23].

Yük ve yükleme şekli, temas alanının büyüklüğünü etkiler. Yük artıkça pürüzlerin şekil değiştirmesi artar ve yeni pürüzler birbiri ile temas eder. Yüklenenin devam etmesi durumunda, gerçek temas alanı artar ve pürüz sayısı da azalır. İki cisim birbiri üzerinde kayacağı gibi yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma gibi bağlı hareket yapabilir. Temasta olan cisimlere bağlı hareket yaptırabilmek için sisteme enerji girer. Bu enerji yük ve hareket ile orantılıdır. Giriş ile çıkış enerjisi arasındaki fark, sürtünme enerjisine, aşınmaya, mekanik titreşimlere, ısı ve ses enerjisine dönüşür [38].

4.2.4. Aşınma Çeşitleri

Aşınmanın meydana gelmesi ve sürekliliği için gerekli faktörlerin tribolojik sistem içerisinde yaptığı fiziksel ve kimyasal etkilerin iletilmesine göre beş çeşit aşınma mekanizması vardır [23]. Bunlar;

1. Adhesiv aşınma,
2. Abrasiv aşınma,
3. Yorulma aşınması,
4. Difüzyon aşınması,
5. Yenme aşınması,

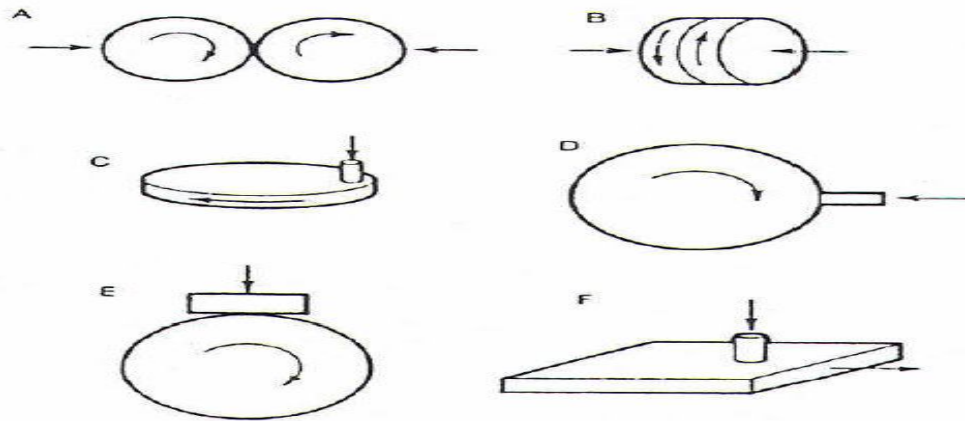
4.2.4.1. Adhesiv Aşınma

Adhesiv aşınma en çok meydana gelen aşınma türüdür. Bu aşınma türünde birbiriyle temas halinde bulunan iki metalin yüzeylerinin yüksek basınç ve meydana gelen sıcaklığın yükselmesi ile birlikte, metallerin yüzey kısımlarında bir kaynama meydana gelir. Bu şekilde meydana gelen aşınma adhesiv aşınma olarak adlandırılır [23].

Aşınmanın en yaygın türü olan adhesiv aşınma, bir katı malzemenin diğeri üzerinde kaydığında ya da ona karşı baskı yaptığında meydana gelir. Her ne kadar malzeme kaybı diğeri yüzeye transfer olmuş partiküller şeklinde olursa da, bu partiküller şekillerini kaybedebilirler. Bazen adhesiv aşınma terimi yerine kayma aşınması terimi kullanılmaktadır. Yanlış bir uygulama olmakla beraber kayma aşınması terimi daha genel bir terimdir. Yapıca farklı aşınma türleri arasında ayırt edici kesin bir çizgi de yoktur [23].

Adhesiv aşınma en çok, benzer kristal kafes yapıli malzemelerde görülür. Benzer kristal kafes yapısına sahip metallerin hareket ve sürtünme nedeniyle sıcaklığın artmasıyla birlikte yüzeylerinde kaynama daha kolaydır. Buradaki kaynamadan maksat malzemelerin yüksek sıcaklıktan dolayı birbirleriyle bağ oluşturmalarıdır. Metallerin birinin diğeri göre yumuşak olması durumunda meydana gelen kaynak bağı vasıtasıyla kırılma yumuşak malzemede olur ve malzeme transferi sert olan malzemeye doğru oluşur. Fakat yüzeyde bulunan nitür ve oksit tabakaları koparak yumuşak malzemeye gömülerek sert olan malzemeyi aşındırır [39].

Adhesiv aşınma deneylerin de birleşik kullanılan en yaygın deney düzenekleri bir disk üzerine bastırılan pimdir. Şekil 4.3c’de bu pim, basık disk yüzeyinin üzerine bastırılmıştır. Disk üzerinde pim yönteminin başka şekilleri de vardır. Ancak ana fikir hep aynıdır [23].



Şekil 4.3. Adhesiv aşınma deneyinde kullanılan düzenekler a) Silindir - Silindir, b) Dönen Disk c) Pim-Disk, d) Pim - Silindir, e) Blok - Silindir, f) Pim-Düzlem [23].

4.2.4.2. Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınma iki cisimli ve üç cisimli olmak üzere iki şekilde meydana gelir. İki cisimli abrasiv aşınma sert ve pürüzlü bir yüzeyin kendinden daha yumuşak bir malzeme ile temas ettiği durumda, kuvvet ve basıncın etkisiyle yumuşak malzeme yüzeyinde oluşan çizilme ve küçük parçacıkların kaldırılması suretiyle meydana gelen deformasyondur. İki cisimli abrasiv aşınmaya kazı makineleri, toprak işleme aletleri, eğeleme ve zımpara işlemini örnek verebiliriz. Abrasiv aşınma, sert ve pürüzlü bir yüzey daha yumuşak bir yüzey üzerinde kaydığında yumuşak yüzeyi oyduğunda ve bir grup oluk açtığında ortaya çıkar [23].

Abrasiv aşınma, ayrıca biraz farklı bir durumda da sert abrasiv partiküller kayma yüzeyleri arasına girdiğinde ve malzemeyi aşındırdığın da meydana gelmektedir. Abrasiv aşınma, iki ve üç boyutlu abrasiv aşınma olarak iki türdür. “İki boyutlu abrasiv aşınma” denen aşınma mekanizmasında aşınma dış yüzey üzerindeki sert tümseklerden kaynaklanır. Üç boyutlu abrasiv aşınmada ise sert abrasiv partiküller vardır ve muhtemelen iki farklı kayma yüzeyi arasında yuvarlanıp aşınırlar. İki boyutlu aşınmada aşınma hızları üç boyutlu aşınmaya göre daha hızlıdır [23].

Abrasiv olarak kullanılacak malzemelerde sertlik çok önemlidir. Abrasiv malzeme, oldukça sert olmalıdır. Yumuşak malzemenin sertliği sert malzemenin sertliğinin en az 1/3 olmalıdır [23].

4.2.4.3. Yorulma Aşınması

Makine parçalarının tekrarlanan yüklere maruz kalmaları veya titreşimden dolayı zamanla yorulma meydana gelir. Özellikle yüzeylerin sürekli ve değişken yüklere maruz kalmaları yüzeyin hemen altında yorulma çatlakları oluşmasına neden olur. Bu mikro çatlaklar zamanla ilerleyerek malzemenin yüzeyinden mikro parçaların kopmasına sebep olur. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya yorulma aşınması denir [23].

4.2.4.4. Difüzyon Aşınması

Birbiriyle temas halinde bulunan yüzeyler arasında sürtünmeden dolayı bir sıcaklık yükselmesiyle birlikte temas yüzeyinde bulunan ortamların kristal kafesi içinde atom yoğunluğu yüksek olan bölgelerden düşük olan bölgelere doğru hareket ederek difüzyon meydana gelir. Sıcaklığın yükselmesi ve yeterli zaman sonunda sürtünme yüzey bölgesinde atom ve moleküllerin çevreye transfer olması ya da karşı sürtünme elamanına girmesi difüzyon esasına dayanır. Sürtünme esnasında, uygulanan kuvvetle yüzeylerin teması sağlanarak malzeme yüzeylerinde gerilme yığılmaları ve sıcaklık artışı ile birlikte, temas noktalarında akma ve sürünme başlar. Bunun sonucunda temas noktaları plastik şekil değiştirmeye maruz kalarak temas alanları artar. Böylece yüzeyler arasında atom alışverişi meydana gelerek, mukavemeti düşük olan bir yüzey tabakası meydana gelir. Bu tabaka sürtünmeden ve izafi hareketin devam etmesiyle birlikte esas malzeme yüzeyinden koparak malzeme kaybına neden olur. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya difüzyon aşınması denir [23].

4.2.4.5. Yenme Aşınması

Yenme aşınma mekanizması adhesiv aşınma mekanizmasına benzemektedir. Birbirine kuvvetle bastırılan iki metalin yüzeyinde düşük çaplı titreşim hareketinden dolayı, yüzeylerde bulunan pürüzler, yüzeyden koparak aşınmayı meydana getirirler. Yüzeyden kopan bu parçacıklar oksitlenerek aşındırıcı tane haline gelerek abrasiv aşınma miktarını artırır. Kuvvetli etkileşimden dolayı temas noktalarında gerilme yığılmaları meydana gelerek titreşim artar. Bu nedenle yüzeyde yorulma çatlakları artar ve bu durum aşınmanın artmasına neden olur [23].

4.2.5. Dökme Demirlerin Aşınması

Dökme demirler, özellikle aşınma direncinin önemli olduğu pek çok uygulamalarda kullanılabilir en yaygın tribolojik malzemelerdir. Bu malzemelerin matrisi, katı bir yağlayıcı olan grafiti destekleyebilmek için perlitten martensite kadar değişiklik gösterebilir. Sert fazlar, abrasiv aşınmaya direnç gösterecek şekilde çeşitlilik gösterebilir [37].

Tüm kritik aşınma uygulamaları için, hem mikroyapının hem de yüzeyin yakınındaki sertlik değerlerinin kontrol edilmesi gerekir. Çünkü mikroyapı, mühendislik özelliklerinin kontrolü açısından önemlidir [37].

Dökme demirlerin matris yapısını oluşturan bileşenlerin aşınma davranışı ile olan ilişkileri aşağıda belirtilmiştir [36].

Ferritten bütün aşınma parçalarında sakınılmalıdır. Perlit adhesiv aşınma direnci açısından çok istenen bir matristir. Sementit için, ötektit karbürlerin sertliği yükselterek aşınma direncine olumlu etki ettiği belirtilebilir. Adhesiv aşınma direnci gerektiren parçalarda, martensit maksimum sertliğe ulaşır. Asiküler ya da beynitik dönüşüm yapıları da aşınma direncini yükseltir [37].

4.3. SÜRTÜNME

Genel anlamda sürtünme, temasta olan ve izafi hareket yapan iki cismin yüzeylerinin harekete veya hareket ihtimaline karşı göstermiş oldukları dirençtir. Birbirlerine temas eden hareketli parçalar arasında kayma, yuvarlanma veya kayma - yuvarlanma mevcut olabilir. Böylece sürtünme kinematik bakımdan kayma, yuvarlanma veya kayma - yuvarlanma sürtünmesi şeklinde olur [23].

Bağıl hareket yapan yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde konulması veya konulmaması bakımından sürtünme olayı kuru, sınır ve sıvı olmak üzere üç halde incelenir.

4.3.1. Kuru Sürtünme

Aralarında hiçbir yağlayıcı madde bulunmayan ve doğrudan birbirine temas eden iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir. Bu sürtünmenin gerçekleşmesi için cisim yüzeylerinin yabancı maddeden uzaklaştırılması gerekir. Normal şartlarda yüzeyler kir, yağ ve oksit tabakası ile kaplıdır. Diğer yandan sürtünmeyle birlikte parçalardan kopan talaş parçacıkları olacaktır. Bu tabakalar ve talaş parçacıkları yağlayıcı rol oynayabileceğinden böyle bir durumda kuru sürtünmeden bahsedilemez.

Cisimlerin temas yüzeylerinin temiz olması ve sürtünmenin vakum altında gerçekleştirildiği durumlarda ideal kuru sürtünme oluşur. Birbiri üzerinde kayan ve normal bir kuvvetin etkisi altında olan iki cismin temas yüzeyleri arasında hareket yönüne karşı (Denklem 4.1) değerinde sürtünme kuvveti oluşur [23].

$$F_s = \mu \cdot F_n \quad (4.1)$$

Burada;

F_s : Sürtünme kuvveti (N)

F_n : Normal kuvvet (N)

μ : Sürtünme katsayısı

F : Teğetsel kuvvet (N)

Genel bir ifadeye göre sürtünme, izafi hareket yapan veya hareket yapabilme olanağına sahip olan yüzeylerde oluşur. Cisimlerden herhangi birine teğetsel bir F kuvveti tatbik edilirse, iki durum ortaya çıkabilir. Birinci durumda F kuvvetine rağmen cisimler birbiri üzerinde kaymazlar, yani durgun halde bulunurlar. Bu halde hareket olanağı olduğundan yüzeyler arasında statik sürtünme denilen bir direnç oluşmaktadır. Bu durumda Newton kanununa göre F_s sürtünme kuvveti, F kuvvetine tam olarak eşit ve ters yöndedir [23]. Böylece;

$$F_s = F \quad (4.2)$$

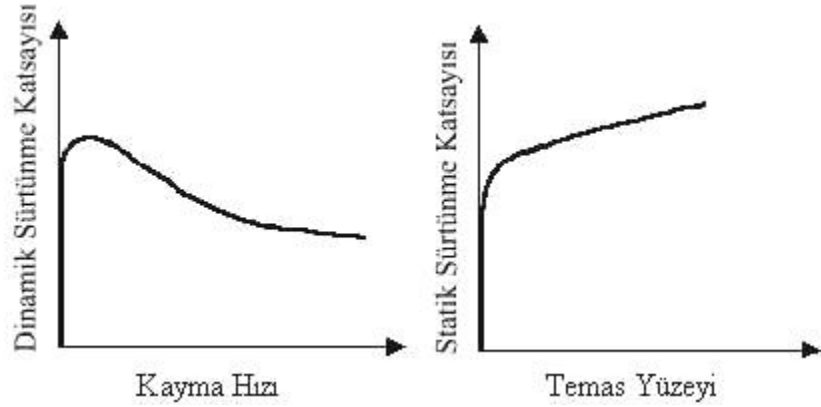
eşitliği yazılır. İkinci durumda F kuvvetinin etkisi altında yüzeyler birbiri üzerinde kayarlar. Kinematik veya doğrudan doğruya sürtünme denilen bu halde F_s sürtünme kuvveti, F kuvvetinden küçük ve harekete ters yöndedir ve

$$F_s < F \quad (4.3)$$

eşitliği ile ifade edilir.

Statik ve dinamik sürtünme katsayılarının kayma hızı ve temas süreleri ile olan ilişkisi grafiksel olarak Şekil 4.4'de verilmiştir. Bu grafiklerden de anlaşılacağı üzere

kayma hızı artıkça dinamik sürtünme katsayısı az da olsa azalır (Şekil 4.4.a). Buna karşılık normal kayma hızlarında sürtünme katsayısının değişimi çok az olduğundan sabit olarak kabul edilebilir. Sürtünme katsayısının en büyük değeri hareketin başladığı anda mevcuttur. Sonuç olarak; dinamik sürtünme katsayısı kayma hızının bir fonksiyonu iken statik sürtünme katsayısı temas yüzeyinin bir fonksiyonudur (Şekil 4.4.b) [23].



Şekil 4.4 Kayma hızının ve temas yüzeyinin sürtünme katsayısına etkisi [23].

4.3.2. Sınır Sürtünmesi

Birbirlerine göre izafi hareket yapan iki cisim arasında bir yağlayıcı madde olduğu halde sıvı sürtünme oluşmadığı durumlarda sınır sürtünme meydana gelir. Yüzeyler arasına konulan yağlayıcı maddenin molekülleri madensel yüzeylere düzgün bir şekilde yapışırlar. Bu nedenle madeni yüzeyler birkaç kat molekül tabakası ile kaplanırlar buna adsorpsiyon tabakası denir. Yağın bu özelliğine ıslatma kabiliyeti denir. Burada önemli olan yağ tabakasının kopma ve kayma mukavemetleridir. Adi yağların oluşturduğu yağ tabakasının kopma mukavemetlerini büyütme veya kayma mukavemetlerini azaltmak için yağlara katık (aditif) maddeler katılır. İki parça arasındaki yağ filmi öyle ince bir dokunma noktası meydana getirir ki buna sınır yağlama denir [23].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. MALZEME

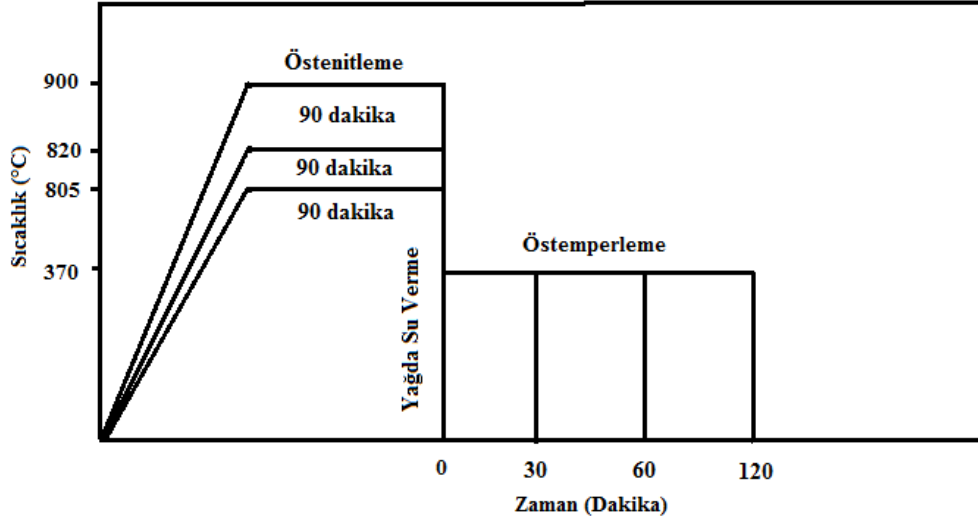
Deneysel çalışmalarda, kimyasal bileşim aralığı Çizelge 5.1’de verilen orjinal vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demir kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarının mevcut uygulamaya direkt uyması için gerçek vagon tamponu üretici firmadan temin edilmiştir. Temin edilen bu vagon tamponu deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere kesilerek 30x20x5 mm ebatlarında numuneler haline getirilmiştir.

Çizelge 5.1. Bu çalışmada kullanılan orjinal vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimi.

Kimyasal Bileşim (Ağırlıkça %)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mg	Ni
3.32	2.50	0.50	0.023	0.012	0.50	0.055	0.054	0.007
Mo	Al	Ti	V	Nb	W	Co	Sn	Fe
<0.01	0.0145	0.009	<0.001	<0.002	<0.005	<0.001	0.0002	Kalan

5.2. NUMUNE KODLARI VE TANIMLANMASI

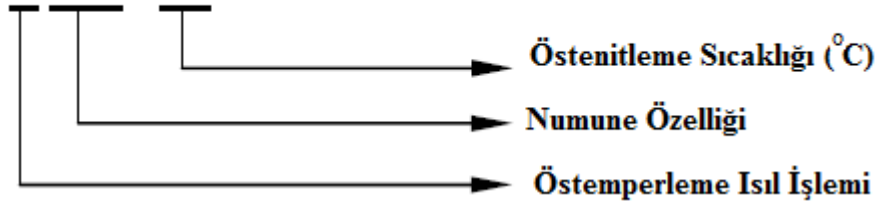
Deneysel çalışmalarda orijinal malzeme literatürde de belirtildiği gibi KGDD (Küresel grafitli dökme demir) olarak tanımlanmıştır. Diğer numune kodları ise uygulanan ısı işlem parametrelerine göre tanımlanmıştır.



Şekil 5.1. Numunelere uygulanan ısıl işlemlerin şematik olarak gösterimi.

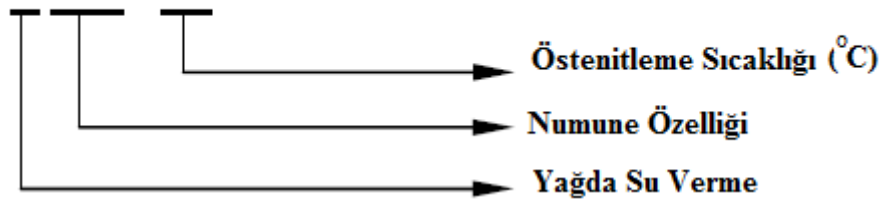
Örneğin; Ö-KGDD 900 ve Y-KGDD 900 kodu ile kodlanmış numunelerin açıklaması aşağıdaki gibidir.

Ö-KGDD 900



Şekil 5.2. Ö-KGDD 900 kodu ile kodlanmış numunesinin açıklaması.

Y-KGDD 900



Şekil 5.3. Y-KGDD 900 kodu ile kodlanmış numunesinin açıklaması.

5.3. MALZEMEYE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER VE YÜZEY İŞLEMLERİ

Bu çalışmada, Şekil 5.1’de gösterildiği gibi numunelere östenitleme, östemperleme ve yağda su verme olmak üzere üç farklı ısıl işlem uygulanmıştır. Tavlama işleminde kullanılan tav fırını; KBÜ Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi laboratuvarında bulunan Protherm marka elektrik direnci ile çalışan ± 1 °C duyarlıkta ve max. 1600 °C’de tavlamanın yapılabildiği atmosfer kontrolü olmayan bir fırındır. Numunelere gerekli işleme payları verilerek ısıl işlemler sırasında dekarbürize olan bölgeler talaş kaldırılarak yok edilmiştir. Tavlama işlemleri boyunca fırın içerisinde aynı bölge kullanılmış ve numune sıcaklığı sıcaklık göstergesi üzerinden sürekli kontrol edilmiştir.



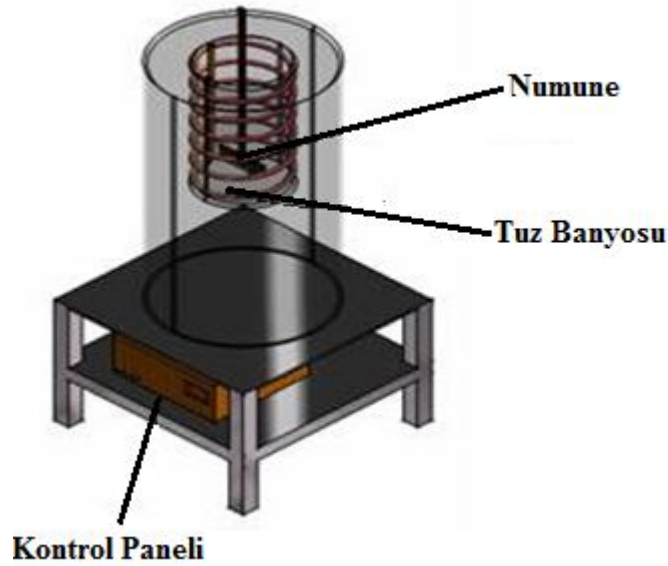
Şekil 5.4. Isıl işlem uygulamalarında kullanılan Protherm marka ısıl işlem fırını.

5.3.1. Östenitleme

Östemperleme ısıl işleminin I. Aşaması olan östenitleme ısıl işlemi Şekil 5.4’ de gösterilen ısıl işlem fırınında 900 °C, 820 °C ve 805 °C sıcaklıklarda 90 dk. bekletilerek gerçekleştirilmiştir.

5.3.2. Östemperleme

Östemperleme ısıl işlemleri 2.5 kw gücünde ve 200 V ve 13 A, PID kontrol sistemli ± 2 °C hassasiyetle çalışan tuz banyosunda yapılmıştır. Östemperleme ısıl işlemleri öncesi tuz banyosunun ısıl profili çıkarılmış ve numuneler bütün ısıl işlemler boyunca aynı bölgede tutulmuştur. Protherm marka ısıl işlem fırınında (Şekil 5.4) 900 °C, 820 °C ve 805 °C sıcaklıklarda 90 dk. östenitleme ısıl işleminin ardından numune sabitleme çubuğu aracılığıyla hızlı bir şekilde 370 °C sıcaklıktaki ve izotermal beklemeyi sağlamak için % 50 KNO₃ + % 50 NaNO₃ karışımı içeren tuzlardan hazırlanan tuz banyosuna daldırılan numuneler farklı sürelerde (30, 60 ve 120 dakika) bekletildikten sonra oda sıcaklığına havada soğutulmuştur.



Şekil 5.5. Östemperleme işleminin yapıldığı tuz banyosunun resmi [23].

5.3.3. Yağda Su Verme

Yağda su verme ısıl işlemi KBÜ Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi laboratuvarında bulunan Protherm marka elektrik direnci ile çalışan ± 1 °C duyarlılıkta ve max. 1600 °C' de tavlamanın yapılabildiği atmosfer kontrolü olmayan bir fırında (Şekil 5.4) 900 °C sıcaklıkta 90 dakika tavlanan numunelere numune tutma çubuğu aracılığıyla ılık yağda su verilmiştir.

5.4. METALOGRAFİK ÇALIŞMALAR

Isıl işlem öncesi ve ısıl işlem sonrası numuneler, belirli boyutlara getirilerek mikroyapı incelemesi için hazır hale getirilmiştir. Numuneler sırası ile 180-240-320-400-800-1000-1200 kalınlıklarındaki grid zımparalarla zımparalanıp yüzeyindeki pürüzler ortadan kaldırılmıştır. Zıpara işleminden sonra KBÜ Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi laboratuvarında bulunan METKON marka FORCIPOL 2V Grinder-Polisher model polisaj cihazı kullanılarak zımparalama ve polisaj işlemleri yapılmıştır. Isıl işlem sırasında numune yüzeyinde oluşabilecek dekarbürize bölgesinin en az 0,5 mm'lik kalınlıktaki bir kısmı metalografik inceleme sonuçlarını etkilememesi için yüzeyden taşlanarak uzaklaştırılmıştır.

Mikroyapı incelemelerinde, KBÜ Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi laboratuvarında bulunan NİKON EPIHOT 200 marka optik mikroskop kullanılmıştır. Dağlayıcı olarak % 2 nital (%2 HNO₃ + %98 CH₃OH) kullanılmıştır.

% 2 Nital ile dağlama sonrası optik mikroskop incelemelerinde; ferrit-ferrit tane sınırları belirginleşmiştir. Faz hacim oranlarının ölçümü % 2 Nital ile dağlanmış numune yüzeyinden aşağıda verilen çizgisel kesişme metodu kullanılarak yine mikroskop monitörü üzerinde 10 ayrı bölgeden alınan ölçümlerle belirlenmiştir. Birim alana (mm²)'ye düşen grafit küre sayısı dağlanmamış numune yüzeyinde 50x büyütmede numunenin 10 ayrı bölgesinden resim alınarak hesaplanmıştır.

$$V_{\text{Faz}} = \frac{L_{\text{Faz}}}{L_{\text{T}}} \quad (5.1)$$

- V_{Faz} = Faz hacim oranı,
 L_{Faz} = Fazı kesen toplam çizgi uzunluğu (mm),
 L_{T} = Çizilen toplam çizgi uzunluğu (mm) [40,41].

5.5. MEKANİK TESTLER

Her mekanik test için ısıtılma işlem parametrelerine göre 11 farklı grup numune üretilmiştir. Tüm mekanik testlerde aynı seriden en az 3 numune deneye tabi tutulmuş ve deney sonuçlarının ortalama değerleri alınmıştır. Bu numuneler üzerinde ısıtılma işlem sırasındaki dekarbürasyon düşünülerek yeterli işleme payı bırakılmıştır.

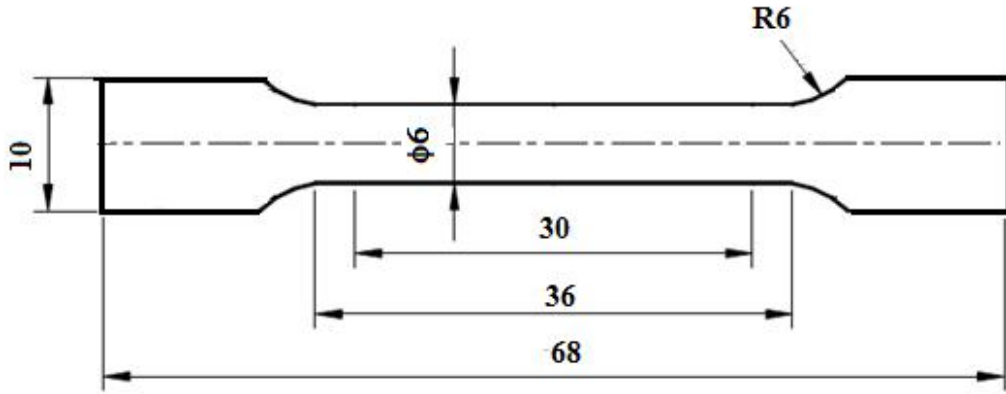
5.5.1. Sertlik Deneyi

Numunelerin sertlik ölçümleri ısıtılma işlem öncesi ve ısıtılma işlem sonrası olmak üzere iki aşamada mikrosertlik olarak gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri KBÜ Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi laboratuvarında bulunan Shimadzu marka HMV Micro Hardness Tester tipi cihazda Vickers yöntemi kullanılarak 500 grf (0,5 kgf) yükte 20 sn bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Aynı numune için 5 değişik noktadan ölçülen sertlik değerlerinin ortalaması alınmıştır.

5.5.2. Çekme Deneyi

Orjinal vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demirden alınan numuneler talaşlı imalatla ASTM E 8M standardı baz alınarak Şekil 5.6'de belirtilen çekme deneyi boyutlarına getirilmiştir. Çekme deneyi SHİMADZU (5KN) marka çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Bütün deneylerde hareketli başlık hızı 1 mm/dk olarak seçilmiştir. % Uzama ve gerilim değerleri deney sırasında grafik olarak kaydedilmiştir.

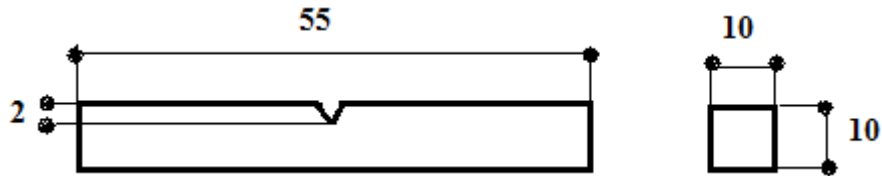
Mikroyapı incelemelerinde çekme numuneleri üzerinde incelenen mikroyapıların, kesit kalınlığı ince numunelerde incelenen mikroyapılarla aynı olduğunu göstermiştir.



Şekil 5.6. Çekme numunesi ve boyutları (mm).

5.5.3. Darbe Deneyi

Orjinal vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demirden alınan numuneler talaşlı imalatla Şekil 5.7’de belirtilen boyutlara getirilmiştir. Talaşlı imalat sonrasında Şekil 5.7’de belirtilen boyutların orta noktasından 2 mm’lik çentik izi açılmıştır. Darbe deneyleri KBÜ Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi laboratuvarında üzerinde 48 joule’lük çekiç bulunan Devotrans marka Charpy tipi cihazda oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.7. Standart çentikli darbe deneyi numunesi.

5.5.4. Aşınma Deneyi

Orjinal vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demirden alınan numuneler talaşlı imalatla 10 x 10 mm ebatlarında silindir şekline getirilmiştir. Çapı ve yüksekliği 10 mm ebatlarında olan numuneler aşınma testine tabi tutulmadan önce, temizlenerek kurutulmuş ve ardından 0.1 mg hassasiyetindeki elektronik terazide tartılmıştır.

Numunelerin aşınma testleri, Pin-on-disk tipi deney cihazında, kuru ortamda, oda sıcaklığında (20-24°C), 1 m/s sabit kayma hızında, 20 ve 40 N yükler altında, 1200 ve 2400 m kayma mesafelerinde gerçekleştirilmiştir.

Aşınma deneyinde kullanılan disk 62 HRc sertliğinde AISI 4140 çeliğinden imal edilmiştir. Diskin yüzeyi deney öncesi 0,154 µm hassasiyetinde taşlanmış ve her deney için farklı diskler kullanılmıştır.

Deney süresi sonunda aşınan numune tekrar temizlenerek kurutma işleminden sonra hassas terazide tartılmış ve aşınma sonucunda oluşan kütle kaybı bulunmuştur.

BÖLÜM 6

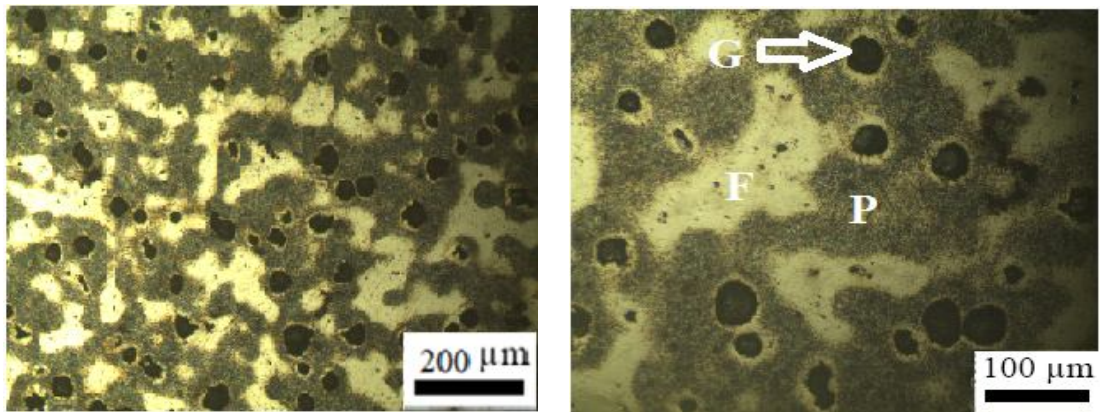
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, deneysel çalışma bölümünde ifade edilen ısıt işlemler, metalografi ve mekanik testler deneysel çalışmalarının sonuçları verilmiş ve tartışılması yapılmıştır.

6.1. METALOGRAFİK ÇALIŞMA SONUÇLARI

6.1.1. Orjinal Vagon Tamponu GGG 70 Kalite Küresel Grafitli Dökme Demirin Mikroyapısı

Orjinal vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demirin (KGDD) mikroyapısı Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Herhangi bir ısıt işleme tabi tutulmamış orjinal vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demirin mikroyapısı Ferrit + Perlit + Grafit kürelerinden meydana gelmiştir. Numuneler % 2 Nital ile dağlama sonucunda ferrit açık beyaz renkte, perlit koyu renkte ve grafit ise küre şeklinde görülmektedir.



Şekil 6.1. Orjinal vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demirin (KGDD) mikroyapısı (Dağlama: %2 Nital P= Perlit, F= Ferrit, G= Grafit)

6.1.2. ÖKGDD' in Östemperleme Süresinin ve Östenitleme Sıcaklığının Mikyoyapıya Etkisi

Östemperleme süresine ve de östenitleme sıcaklığına bağlı olarak orjinal vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demir numunelerinin ısı işlem öncesi ve ısı işlem sonrası faz hacim oranlarındaki değişimler Çizelge 6.1'de verilmiştir ve mikroyapıdaki değişimler şekiller halinde gösterilmiştir.

Östemperleme ısı işlemine tabi tutulmamış orjinal vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demirin mikroyapısı Ferrit + Perlit + Grafit Kürelerinden meydana gelmiştir (Şekil 6.1). Östemperlenmiş numunelerde ise mikroyapının ösferrit ($\alpha + \gamma$.k.) ve östemperleme süresine bağlı olarak dönüşmemiş östenitten meydana geldiği tespit edilmiştir. Östemperlenmiş numunelerde % 2 Nital ile dağlama sonucunda ferrit (α) koyu renkli, yüksek karbonlu östenit (γ .k.) açık renkli, dönüşmemiş östenit ise açık renkli geniş alanlar olarak görülmektedir (Şekil 6.2 a, 6.3 c, 6.4 c).

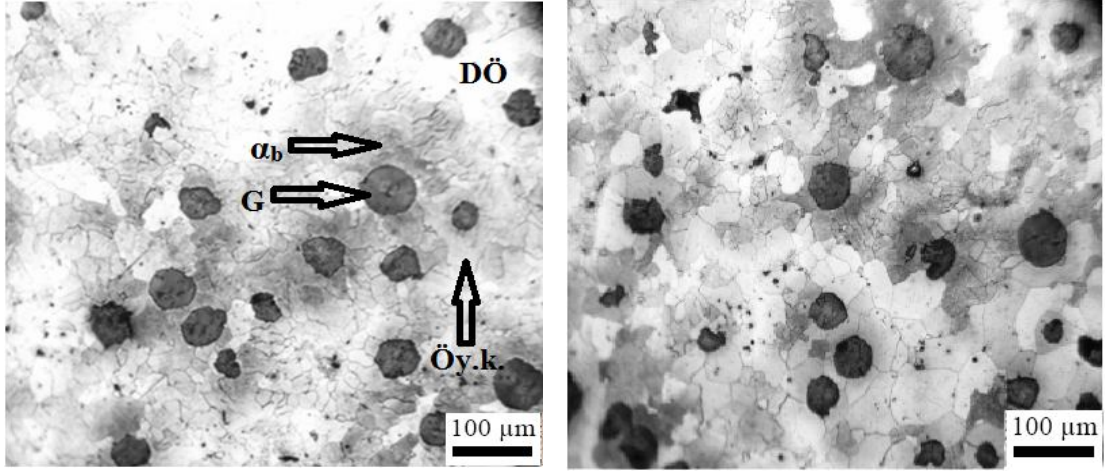
Bu çalışmada 370 °C'de yapılan östemperleme ısı işleminde tüm numunelerde başlangıçta ferritin östenitten çökeldiği (I. Aşama) daha sonra ise difüzyon için gerekli olan süreye bağlı olarak ferrit ve dönüşmüş östenit (karbonca zenginleşen) miktarı artarken dönüşmemiş östenit miktarının azaldığı görülmüştür (Çizelge 6.1). II. aşama adı verilen bu süreç östenitleme sıcaklığı düşükçe ve de östemperleme süresi uzadıkça daha hızlı gerçekleşmektedir.

Dönüşmemiş östenit varlığı % 4,10 ile en az olan numune 120 dakika östemperleme ısı işlemi uygulanan Ö-KGDD 805 °C numunesidir. Bu sonuç II. aşama süresinin henüz tamamlanmamış olduğunun bir göstergesidir. Genel olarak alaşım elementleri II. aşamada meydana gelen dönüşüm hızını yavaşlatmakta ve östemperleme süresinin artmasına rağmen dönüşmemiş östenit varlığını sürdürebilmektedir [42,43]. Difüzyona yeterli süre tanınmaması sonucu (kısa östemperleme sürelerinde) östenit yeterince karbonca zenginleşemediği için oda sıcaklığına soğutulduğunda martensite dönüşmektedir [44]. İlerleyen östemperleme sürelerinde ise yapıda dönüşmemiş östenit miktarı azalmakta ve ösferritin morfolojisi kabalaşmaktadır (Şekil 6.2 b,c).

Östemperlenmiş Ö-KGDD 900 °C numunesinde görüldüğü gibi bütün östemperleme sürelerinde dahi, yeni ferritin (epitaksiyel ferritin) varlığı gözlenmemiştir (Şekil 6.2. a,b,c). Bunun nedeni yüksek östenitleme sıcaklığında ve de süresinde östenitin karbonca yeterince zenginleşmesine bağlanabilir. Karbon yeni ferritin büyüme hızını oldukça düşürmektedir [44,45,46].

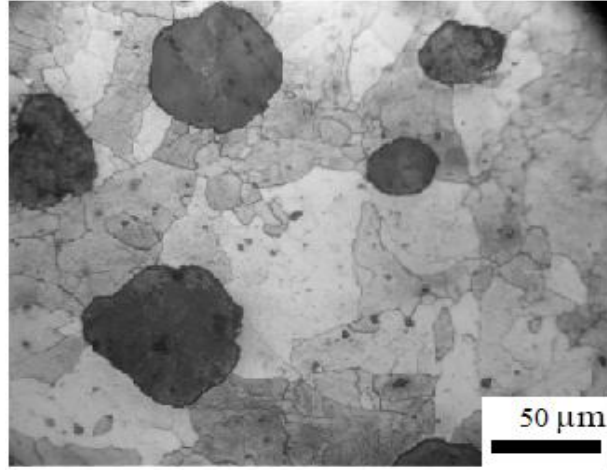
Çizelge 6.1. Östemperleme öncesi ve östemperleme sonrası faz hacim oranları ve birim alana düşen küre sayısı.

İşlem Durumu Östemperleme Süresi (dakika)	Grafit %	Ferrit %	Perlit %	Yüksek karbon östenit Oranı (γ .k.) %	Dönüşmemiş Östenit %	Küre Sayısı (Küre/ mm^2)
KGDD	12,15	14,98	72,87	-	-	255
Ö-KGDD 900 °C (30)	10,60	24,85	-	22,20	42,35	238
Ö-KGDD 900 °C (60)	10,55	29,34	-	28,28	31,83	235
Ö-KGDD 900 °C (120)	10,48	43,23	-	37,52	8,86	233
Ö-KGDD 820 °C (30)	10,34	30,17	-	25,86	33,63	232
Ö-KGDD 820 °C (60)	10,23	34,79	-	34,84	20,14	230
Ö-KGDD 820 °C (120)	9,87	45,14	-	39,88	5,11	230
Ö-KGDD 805 °C (30)	9,86	36,65	-	32,17	21,32	227
Ö-KGDD 805 °C (60)	9,05	38,23	-	38,52	14,20	226
Ö-KGDD 805 °C (120)	8,24	48,29	-	39,37	4,10	224



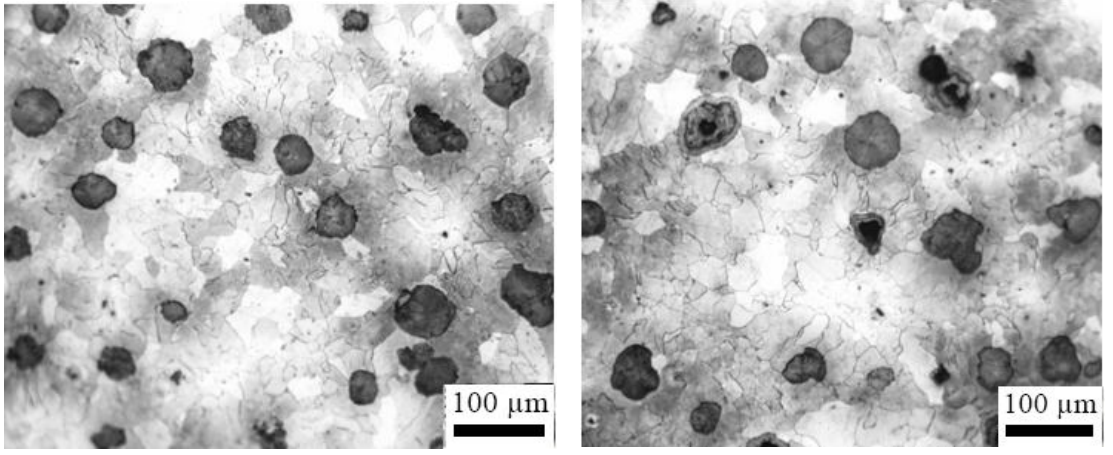
(a)

(b)



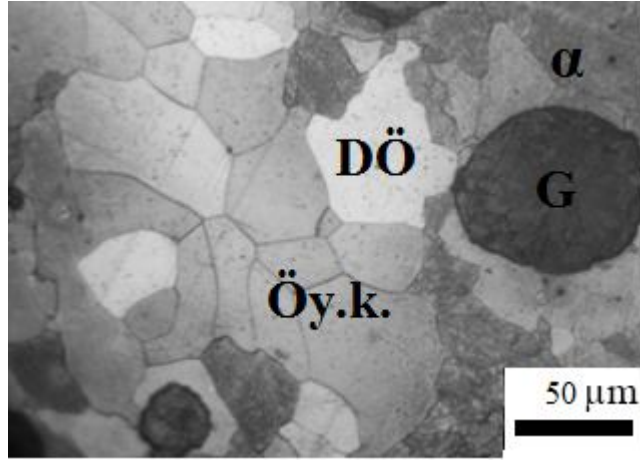
(c)

Şekil 6.2. Ö-KGDD 900 °C numunesinin mikroyapı fotoğrafları a) 30 dakika, b) 60 dakika, c) 120 dakika süre ile östemperlenmiş (Dağlama: %2 Nital DÖ = Dönüşmemiş östenit, α_b = Beynitik Ferrit, G = Grafit, Öy.k. = Yüksek karbonlu östenit).



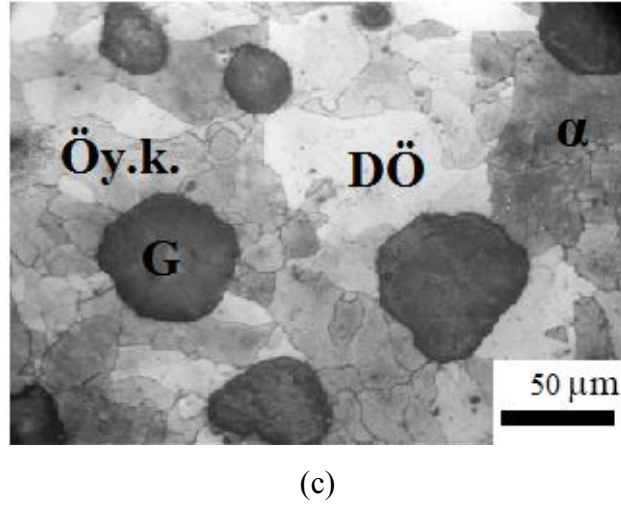
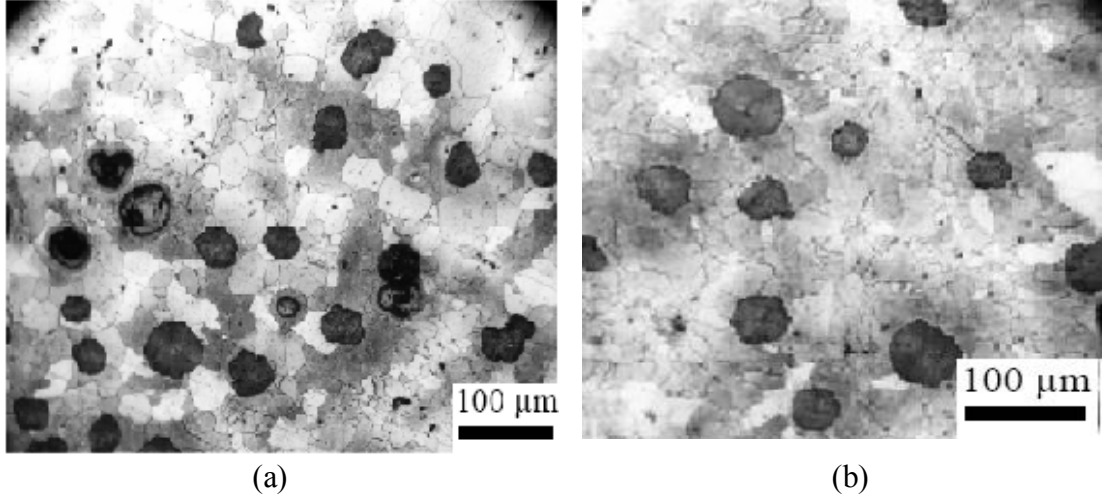
(a)

(b)



(c)

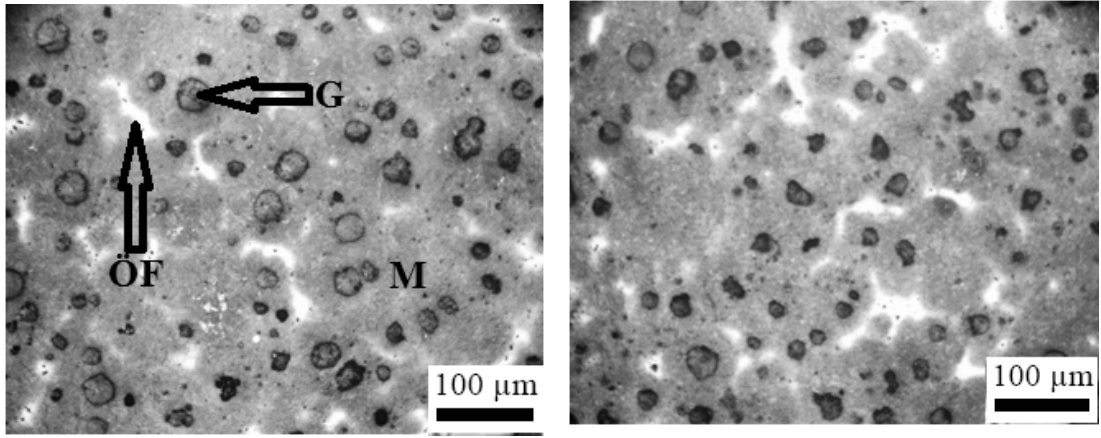
Şekil 6.3. Ö-KGDD 820 °C numunesinin mikroyapı fotoğrafları a) 30 dakika, b) 60 dakika, c) 120 dakika süre ile östemperlenmiş (Dağlama: % 2 Nital DÖ = Dönüşmemiş östenit, α = Ferrit, G = Grafit, Öy.k.= Yüksek karbonlu östenit).



Şekil 6.4. Ö-KGDD 805 °C numunesinin mikroyapı fotoğrafları a) 30 dakika, b) 60 dakika, c) 120 dakika süre ile östemperlenmiş (Dağlama: % 2 Nital DÖ = Dönüşmemiş östenit, α = Ferrit, G = Grafit, Öy.k.= Yüksek karbonlu östenit).

6.1.3. Yağda Su Verilmiş Numunelerin Mikroyapısı

Şekil 6.5’de görüldüğü gibi yağda su verilmiş numunelerin mikroyapısı hızlı soğuma nedeni ile büyük oranda martensitten oluşmaktadır. Küresel grafitli dökme demirde 900 °C’de yapılan östenitleme sıcaklığında tane sınırlarındaki yüksek difüzyon hızından dolayı östenit ilk olarak α/α tane sınırlarında ve ötektik hücre sınırlarında sürekli bir ağ şeklinde oluşmuştur. 900 °C’de yapılan östenitleme ısıl işlemi esnasında oluşan östenitin tamamının martensite dönüştüğü kabul edilmiştir.



Şekil 6.5. 900 °C’de 90 dakika östenitlenmiş ve ılık yağda su verilmiş Y-KGDD 900 numunesine ait mikroyapılar (Dağlama:% 2 Nital G= Grafit, M=Martenzit, ÖF= Ötektoid Ferrit).

6.1.4. KGDD ve ÖKGDD’de Östenitme Sıcaklığının ve Östemperleme Süresinin Grafit Küre Sayısı, Dağılımı ve Küreselleşmeye Etkileri

Tüm numunelerdeki grafit küre sayılarındaki değişim Şekil 6.6’da verilmektedir. Grafit küre sayısı, dağılımı ve hacim oranı; parça kesit kalınlığı ve geometrisi, soğuma hızı, döküm sıcaklığı ve zamanı, küreselleştirici malzeme cinsi ve miktarı, kalıp tasarımı ve yöntemi, uygulanan ısıl işlemler, küreselleştirme işlemi, aşılama işlemi, karbon eşdeğerliği ve alaşım elementleri cins ve miktarlarına bağlı olarak değişim göstermektedir [47,48].

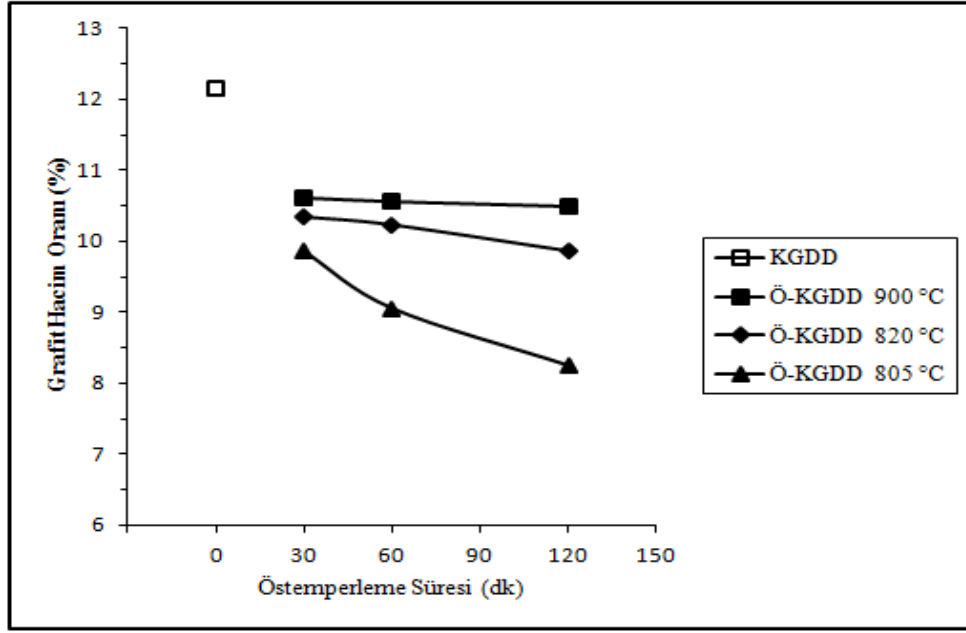
Bu çalışmada elde edilen birim alandaki küre sayısının $\approx 224-255$ küre / mm^2 . Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'den de görüleceği gibi küre sayıları ve hacim oranlarında numuneler arasında farklılıklar görülmektedir.

Grafit küre hacim oranları ile ilgili sonuçlara bakıldığında (Şekil 6.6) bütün numunelerde en fazla küre sayısına ($255 \text{ küre}/\text{mm}^2$) sahip KGDD numunesinde grafit hacim oranının % 12,15 olduğu görülmektedir. Östemperleme ısı işlemine tabi tutulan numunelerde ise östenitleme sıcaklığına ve östemperleme süresine bağlı olarak en düşük küre sayısına ($224 \text{ küre}/\text{mm}^2$) sahip 120 dakika östemperleme ısı işlemine tabi tutulmuş Ö-KGDD $805 \text{ }^\circ\text{C}$ numunesinde grafit hacim oranı % 8.24'dir. En fazla küre sayısına ($238 \text{ küre}/\text{mm}^2$) sahip 30 dakika östemperleme ısı işlemine tabi tutulmuş Ö-KGDD $900 \text{ }^\circ\text{C}$ numunesinde ise grafit hacim oranının % 10,60 olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan östemperleme süresinin ve östenitleme sıcaklığının grafit küre hacim oranı ve küre sayısı üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir

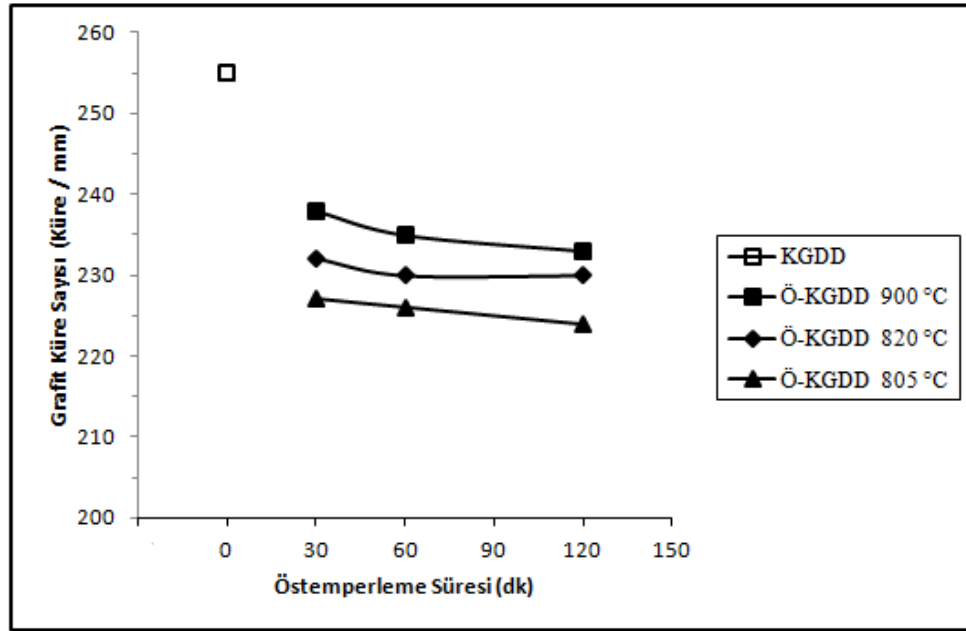
Genel olarak östemperleme süresi yükseldikçe küre sayısında azalma meydana gelmiştir. Östenitleme sıcaklığına ve süresine bağlı olarak difüzyon olayında artış meydana gelmekte ve buna bağlı olarak küre sayısında azalma meydana gelmektedir [49,50].

Çekme dayanımı küre sayısındaki artışa paralel olarak artmakta ancak darbe dayanımı azalmaktadır [50,51].

Küre sayısının yüksek olması dönüşümün hızını arttırarak segragasyon oluşumunu azaltmaktadır [2,50,51]. Küreselliğin bozulması ise mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir [2,51].



Şekil 6.6. Östempereleme sürelerine bağlı olarak numunelerin grafit hacim oranlarının değişimi.



Şekil 6.7. Östempereleme sürelerine bağlı olarak numunelerin grafit küre sayılarının değişimi.

6.2. ÖSTENİTLEME SICAKLIĞININ, ÖSTEMPERLEME SÜRESİNİN VE YAĞDA SU VERMENİN MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİLERİ

6.2.1. Çekme Dayanımına Etkileri

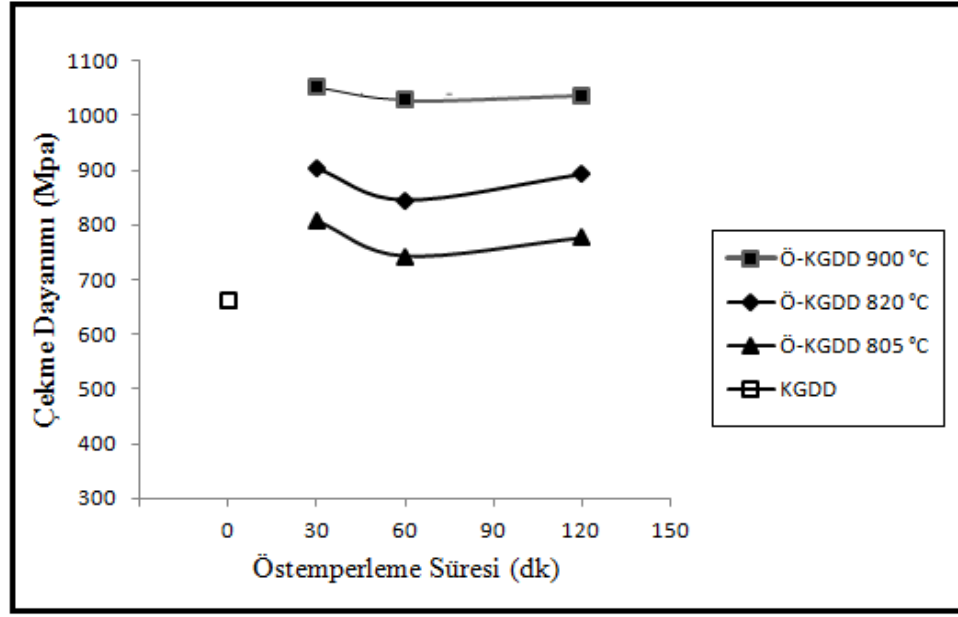
Östemperleme ısı işlemi sonucunda bütün numunelerin çekme dayanımlarında büyük oranda artış görülmüştür (Çizelge 6.2, Şekil 6.8). Bu sonuç östemperleme süresine bağlı olarak değişen mikroyapı ya da diğer bir deyişle fazların miktarlarının ve türlerinin değişmesinden kaynaklanmaktadır [44].

Östemperleme süresindeki artışa bağlı olarak bütün numunelerde çekme dayanımı değerlerinde 60 dk.'ya kadar belirgin bir düşme görülürken daha sonra ise artış görülmüştür (Çizelge 6.2, Şekil 6.8). Bu artışın nedeni ösferrit hacim oranının artmasıdır [44].

Aynı zamanda östenitleme sıcaklığına bağlı olarak ise çekme dayanımı değerleri östenitleme sıcaklığı arttıkça paralel olarak artış göstermiştir.

Çekme dayanımının en düşük olduğu numune olarak ise KGDD malzemesinin olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise; mikroyapı karakterizasyonundan ileri gelmektedir.

Ö-KGDD 900 °C numunesinde östemperlemenin ilk aşamasında (30 dk'da) dayanım oldukça yüksek çıkarken ilerleyen östemperleme sürelerinde yapının büyük oranda ösferrite dönüşmesi ile dayanım bir miktar düşmüş ve uzun östemperleme sürelerinde (120 dk'da) dayanım karbür çökmesi sonucu tekrar artış göstermiştir. Genel olarak araştırmacılara göre [44,52,53] östemperlemenin ilk aşamasında meydana gelen dayanımındaki yükseklik yapıda var olan dönüşmemiş östenitin (martensitin) varlığından kaynaklanmaktadır. Östemperlemenin ilk aşamasında dayanımdaki bu yükseklik malzeme için istenen bir durum iken dönüşmemiş östenitin (martensitin) varlığı sünekliği (toplam % uzamayı) düşürmesi nedeniyle istenilmez [44,54,55].



Şekil 6.8. Östempirleme süresine bağlı olarak numunelerin çekme dayanımlarının değişimleri.

Çizelge 6.2. Östempirleme süresi ile çekme dayanımının değişimi.

Numune No	Östempirleme Öncesi Çekme Dayanımı (MPa)	Östempirleme Süreleri (Dakika)		
		(A)30	(B)60	(C)120
		ÇEKME DAYANIMI (MPa)		
1) Ö-KGDD 900 °C	-	1051,31	1028,93	1037,16
2) Ö-KGDD 820 °C	-	905,36	845,7	894,12
3) Ö-KGDD 805 °C	-	808,53	741,89	776,38
4) Y-KGDD	-	-	-	-
5) KGDD	662,45	-	-	-

6.2.2. Toplam % Uzama ve % Kesit Alanı Daralmasına Etkileri

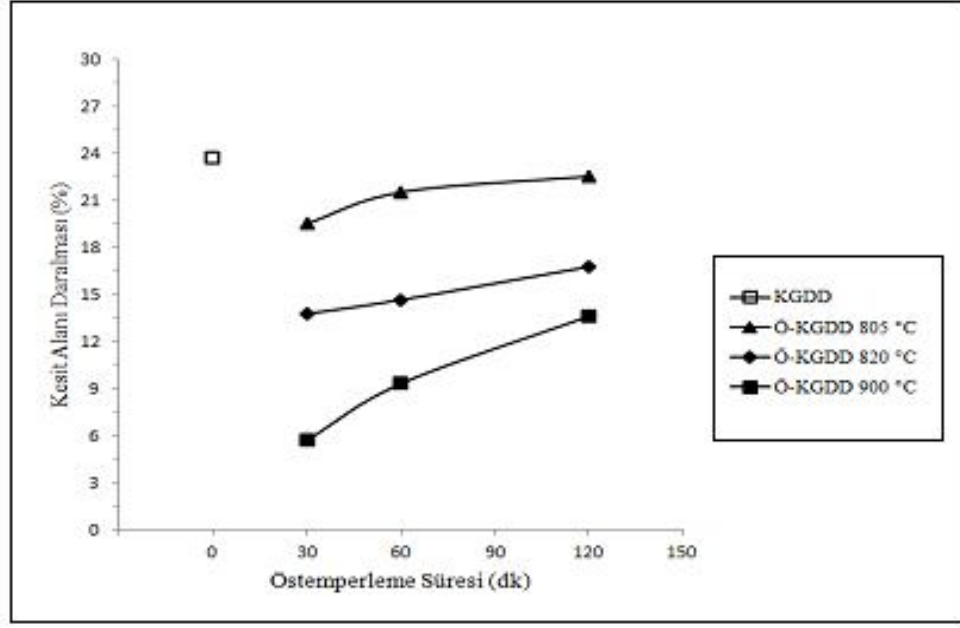
Değişen östemperleme süresi ile numunelerin toplam % uzama ve % kesit alanı daralmalarında da değişiklikler meydana gelmiştir. Bütün numunelerde artan östemperleme süresi ile toplam % uzama ve kesit alanı daralmasında artış meydana gelmiştir (Şekil 6.9, Şekil 6.10). Toplam % uzama ve kesit alanı daralmasında meydana gelen bu artış düşük östemperleme sıcaklıklarında (350 °C'nin altı) yapılmış olan diğer çalışmalarla [56,57,58] kıyaslandığında 370 °C' de kaba ösferritik matrisin oluşması nedeniyle daha yüksek olmaktadır [2].

Östemperlemenin ilk aşamalarındaki (30 dk.'da) düşük toplam % uzama ve % kesit alanı daralması ise östemperlemenin I. Aşamasında (30 dk.'da) dönüşmemiş östenitin (martensitin) varlığına bağlanmaktadır [52,53,59].

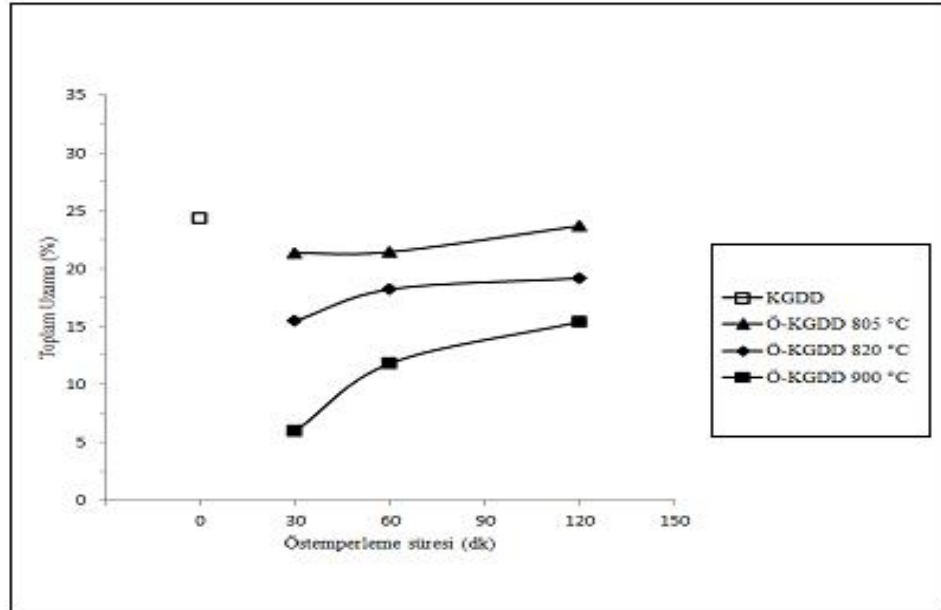
Bütün östemperleme sürelerinde Ö-KGDD 805 °C numunesi daha fazla toplam % uzama ve % kesit alan daralması sergilemiştir (Şekil 6.9, Şekil 6.10, Çizelge 6.3, Çizelge 6.4). Bunun nedeni kritik östenitleme sıcaklığında tavllanmış numunelerde yapıda var olan ötektoid ferrit fazının varlığıdır [44]. Bilindiği gibi ferrit fazının dayanımı düşük iken sünekliği oldukça iyidir. Bu da Ö-KGDD 805 °C numunesinin % uzama ve % kesit alanı daralmasını iyileştirmektedir. Literatürle eşdeğer olarak östenitleme sıcaklığı düşüldükçe % uzama ve kesit alan daralmasında artış meydana gelmektedir.

Sonuçlarda görüldüğü gibi Ö-KGDD 900 °C numunesinde 30 dakika östemperleme sonrası çekme dayanımı oldukça yüksek iken (Şekil 6.8) % uzama ve % kesit alanı daralması oldukça düşüktür (Şekil 6.9, Şekil 6.10).

Diğer taraftan aynı serinin 120 dakika östemperleme süresinde ise çekme dayanımında çok az bir düşüş ile % uzama ve % kesit alanı daralmasında 30 dakika östemperleme süresine göre çok fazla düşmemiştir (Şekil 6.9, Şekil 6.10).



Şekil 6.9. Östempirleme süresine bağlı olarak bütün numunelerdeki % kesit alanı daralmasının değişimi.



Şekil 6.10. Östempirleme süresine bağlı olarak bütün numunelerdeki toplam % uzama değişimi.

Çizelge 6.3. Östemperleme süresi ile % uzamanın değişimi.

Numune No	Östemperleme Öncesi Uzama (%)	Östemperleme Süreleri (Dakika)		
		(A) 30	(B) 60	(C) 120
		UZAMA (%)		
1) Ö-KGDD 900 °C	-	6,01321	11,8618	15,4545
2) Ö-KGDD 820 °C	-	15,5291	18,2018	19,1541
3) Ö-KGDD 805 °C	-	21,3421	21,4567	23,6654
4) Y-KGDD 900 °C	-	-	-	-
5) KGDD	24,3456	-	-	-

Çizelge 6.4. Östemperleme süresi ile % kesit alanı daralmasının değişimi.

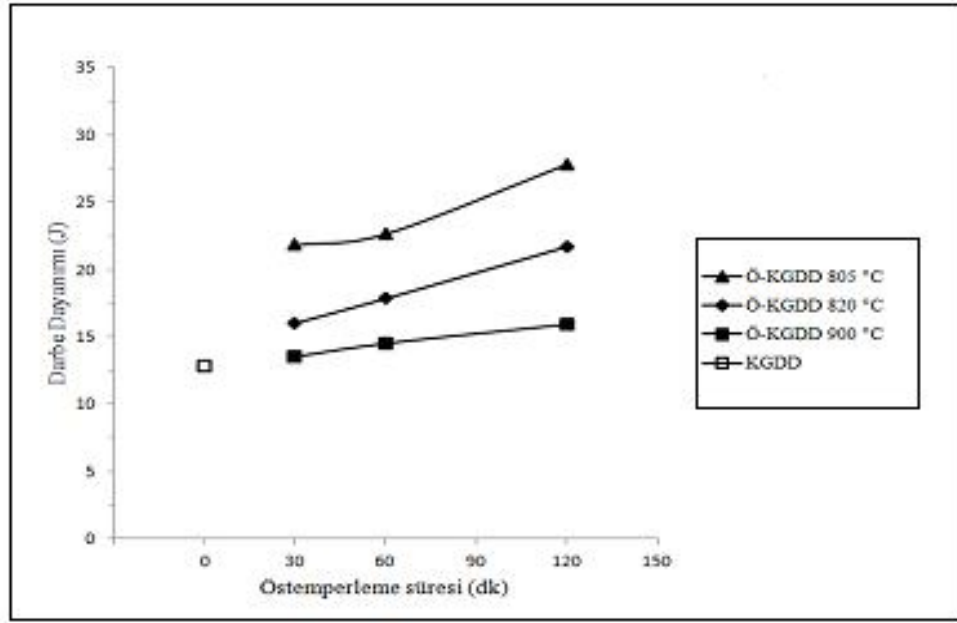
Numune No	Östemperleme Öncesi Kesit Alanı Daralması (%)	Östemperleme Süreleri (Dakika)		
		(A) 30	(B) 60	(C) 120
		KESİT ALANI DARALMASI (%)		
1) Ö-KGDD 900 °C	-	5,72656	9,34522	13,6545
2) Ö-KGDD 820 °C	-	13,7897	14,6756	16,7654
3) Ö-KGDD 805 °C	-	19,5411	21,5432	22,5432
4) Y-KGDD 900 °C	-	-	-	-
5) KGDD	23,7654	-	-	-

6.2.3. Darbe Dayanımına Etkileri

Numunelerin östemperleme süresine bağlı olarak çentikli darbe dayanımının değişimi (Şekil 6.11, Çizelge 6.5) verilmiştir. Östemperleme ısıl işlemi orjinal vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demirin darbe dayanımını büyük ölçüde arttırmıştır. Östemperleme ısıl işlemine tabi tutulmuş bütün numunelerde maksimum darbe dayanımına 120 dk. östemperleme sonucunda ulaşılmıştır. Literatürle eşdeğer olarak östenitleme sıcaklığının düşmesiyle de darbe dayanımında artış meydana gelmiştir.

Östemperleme ısıl işlemine tabi tutulmuş numunelerde darbe dayanımının en az olduğu numune ise Ö-KGDD 900 °C'dir (Şekil 6.11, Çizelge 6.5). Darbe dayanımının Ö-KGDD 900 °C numunesinde bu kadar az olmasının nedeni ise bu numunede küre sayısının fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü küre sayısı attıkça çekme ve yorulma dayanımı artmakta, darbe dayanımı ise azalmaktadır. Bilindiği gibi karbür oluşumu da darbe dayanımına azaltmaktadır. Darbe dayanımının az olduğu numunelerde karbür oluşumunun da meydana geldiği düşünülmektedir.

Östemperleme süreleri sonucu darbe dayanımının en az arttığı numune yine Ö-KGDD 900 °C numunesidir. Bu sonucun iki nedeni olabilir. Birincisi; bu numune en yüksek küre sayısına sahip numunelerden birisi olmasıdır. İkinci ve daha önemli neden ise alaşım elementlerinin dönüşüm kinetiği üzerine etkisinden kaynaklanabilir [2].



Şekil 6.11. Oda sıcaklığında östempirleme süresine bağlı olarak tüm numunelerdeki darbe dayanımı değişimi.

Çizelge 6.5. Östempirleme süresi ile çentikli darbe dayanımının değişimi.

Numune No	Östempirleme Öncesi Darbe Dayanımı (Joule)	Östempirleme Süreleri (Dakika)		
		(A) 30	(B) 60	(C) 120
1) Ö-KGDD 900 °C	-	13,5	14,5	15,9
2) Ö-KGDD 820 °C	-	16	17,8	21,6
3) Ö-KGDD 805 °C	-	21,8	22,6	27,8
4) Y-KGDD 900 °C	-	-	-	-
5) KGDD	12,8	-	-	-

*Çentikli Charpy Darbe Deneyi

6.2.4. Sertliğe Etkileri

6.2.4.1. Mikrosertlik üzerine etkileri

Östemperleme süresine bağlı olarak numunelerin mikrosertliklerindeki değişim Çizelge 6.6 ve Şekil 6.12’de verilmiştir. Numunelerin sertlik değerleri arasında çok büyük farklılıkların oluşmadığı görülmektedir.

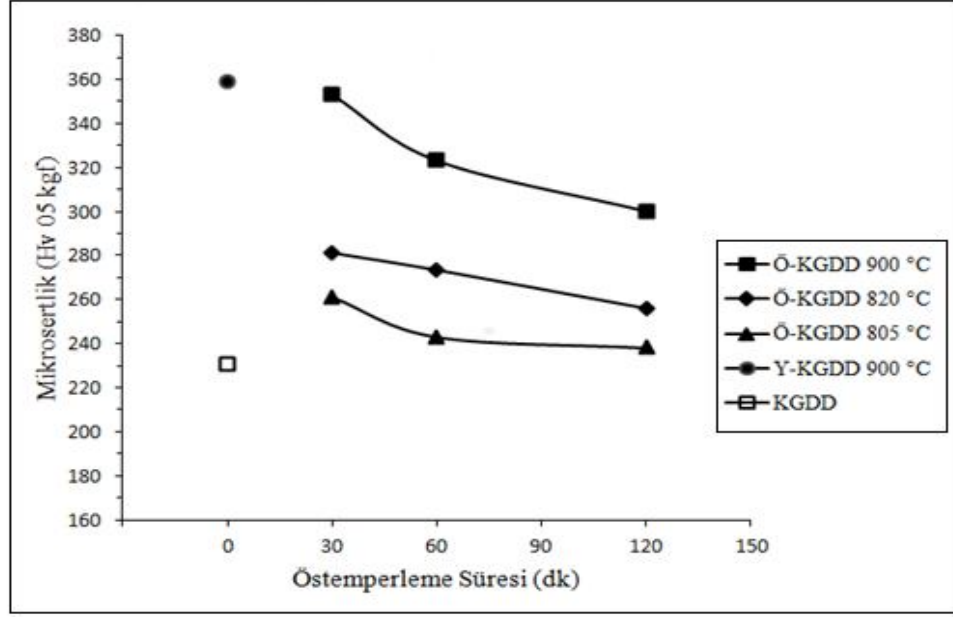
Darbe dayanımının (Çizelge 6.5, Şekil 6.11) en yüksek değere ulaştığı östemperleme sürelerinde sertliğin en düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Östemperleme süresindeki artışa paralel olarak bütün numunelerde sertlik değerlerinde azalma olmuştur (Çizelge 6.6, Şekil 6.12).

Aynı zamanda östenitleme sıcaklığına bağlı olarak ise sertlik değerleri östenitleme sıcaklığı arttıkça paralel olarak artış göstermiştir.

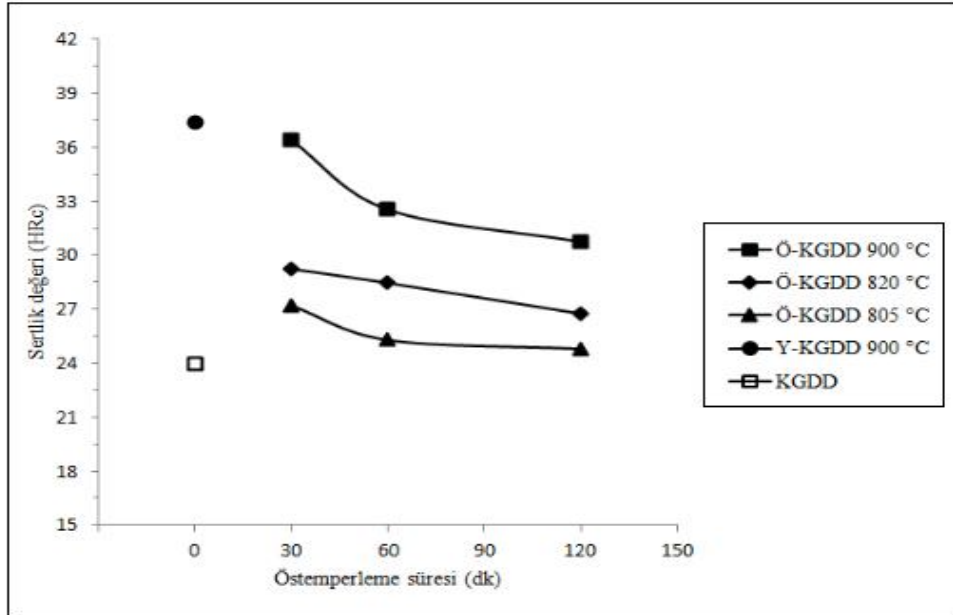
En yumuşak numune olarak ise (24 HRC) KGDD malzemesinin olduğu görülmektedir. Östemperleme ısı işlemi ve yağda su verme ısı işleminin etkisi ile diğer numunelerde sertliğin arttığı görülmektedir (Çizelge 6.7, Şekil 6.13).

Östemperleme ısı işlemi sonucunda darbe dayanımında olduğu gibi sertlik değerinde de artış olmuştur fakat en yüksek sertlik hızlı soğuma nedeni ile (37,42 HRC) Y-KGDD 900 °C numunesinde meydana gelmiştir (Çizelge 6.7, Şekil 6.13). Bunun nedeni matrisi oluşturan y'nin çözüldüğü karbon miktarındaki artışa paralel olarak sertliğin yükselmesine dayandırılabilir [2]. Östemperleme ısı işleminin uygulandığı numunelerde ise en yüksek sertlik (36,42 HRC) 370 °C sıcaklıkta 30 dakika süreyle östemperlenen Ö-KGDD 900 °C numunesinde, en düşük sertlik ise (24,8 HRC) 370 °C’de 120 dakika östemperlenen Ö-KGDD 805 °C numunesinden elde edilmiştir. Görüldüğü gibi östemperleme ısı işlemine tabi tutulan numunelerdeki en düşük sertlik değeri dahi KGDD numunesinden daha fazladır (Çizelge 6.7, Şekil 6.13).

Östempereleme ısııl işlemeyle sertliğin artması, izotermal işleme sırasında meydana gelen mikroyapısal dönüşümün bir sonucudur. 370 °C östempereleme sıcaklığı için kısa östempereleme sürelerinde yüksek mikrosertlik değeri elde edilmektedir (Çizelge 6.6, Şekil 6.12).



Şekil 6.12. Östempereleme sürelerine bağlı olarak numunelerin mikrosertliğindeki değişim.



Şekil 6.13. Östempereleme sürelerine bağlı olarak numunelerin HRC sertlik değişimleri.

Çizelge 6.6. Östempereleme sürelerine bağı olarak numunelerin mikrosertlik değışimleri.

Numune No	Östempereleme Öncesi Sertlik (HV)	Östempereleme Süreleri (Dakika)		
		(A) 30	(B) 60	(C) 120
		SERTLİK (Hv 05 kgf)		
1) Ö-KGDD 900 °C	-	353,2	323,2	300,2
2) Ö-KGDD 820 °C	-	281,2	273,4	256
3) Ö-KGDD 805 °C	-	261,4	243,2	238,2
4) Y-KGDD 900 °C	359,2	-	-	-
5) KGDD	230,5	-	-	-

Çizelge 6.7. Östempereleme sürelerine bağı olarak numunelerin HRc sertlik değışimleri.

Numune No	Östempereleme Öncesi Sertlik (HRc)	Östempereleme Süreleri (Dakika)		
		(A) 30	(B) 60	(C) 120
		SERTLİK (HRc)		
1) Ö-KGDD 900 °C	-	36,42	32,54	30,74
2) Ö-KGDD 820 °C	-	29,26	28,46	26,72
3) Ö-KGDD 805 °C	-	27,22	25,3	24,8
4) Y-KGDD 900 °C	37,42	-	-	-
5) KGDD	24	-	-	-

6.3. ÖSTENİTLEME SICAKLIĞININ, ÖSTEMPERLEME SÜRESİNİN VE YAĞDA SU VERMENİN AŞINMA ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

6.3.1. Aşınma Deney Sonuçları

Deneyleerde elde edilen ham veriler şekiller ve çizelgeler halinde verilmiştir. Deneyleer oda sıcaklığında (20-24 °C), 1 m/s sabit kayma hızında, 20 ve 40 N'lük yükler altında her defasında ayrı bir aşınma yüzeyi kullanarak 1200 ve 2400 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Deney verilerinin elde edilmesinde metal-metal aşındırma tipi kullanılmış olup numuneler deney öncesi 0,1 mg hassasiyetindeki terazide tartılmıştır. Daha sonra deney bitiminde numuneler tekrar tartılarak iki ölçüm arasındaki fark tespit edilmiştir. Elde edilen değerler aşınma kaybı olarak verilmiştir.

Tüm şekillerdeki aşınma kayıpları incelendiğinde, tüm numunelerde artan yüklerle beraber aşınma kaybının arttığı ve de tüm numunelerde kayma mesafesinin artması ile aşınma kaybının arttığı görülmektedir.

En fazla aşınma miktarı 40 N yük altında 2400 m kayma mesafesinde GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demirde (KGDD) 26,2 mg olarak bulunmuştur. Yine bu yük ve bu kayma mesafesi altında en az aşınma kaybı 12,3 mg ile Y-KGDD 900 °C numunesi olarak ölçülmüştür (Şekil 6.17, Çizelge 6.11).

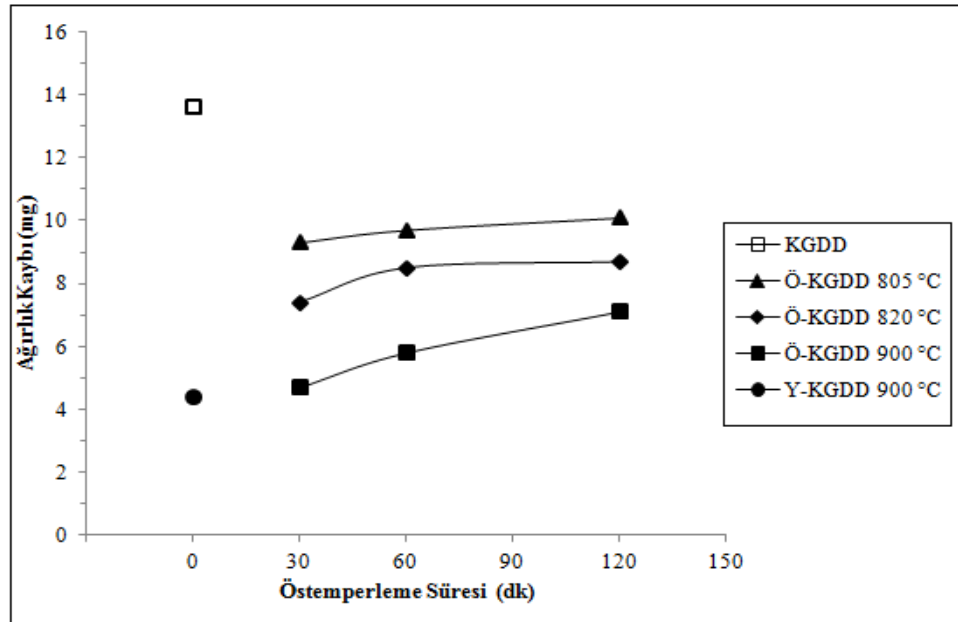
Bütün numunelerde uygulanan kuvvetin 20 N'dan 40 N'a çıkmasıyla aşınma kaybının ~% 100 arttığı tespit edilmiştir.

Tüm numunelerde sertliğin artışıyla aşınma kaybının azaldığı görülmektedir. Aşınma kaybı sonuçları incelendiğinde, Y-KGDD 900 °C ve Ö-KGDD 900 °C numunelerinin aşınma direncinin KGDD, Ö-KGDD 820 °C ve Ö-KGDD 805 °C numunelerinden daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuçlardan dolayı östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma direnci östenitleme sıcaklığına ters orantılı olarak bağlı olduğu yani östenitleme sıcaklığı düştükçe aşınma direncinin yükseldiği

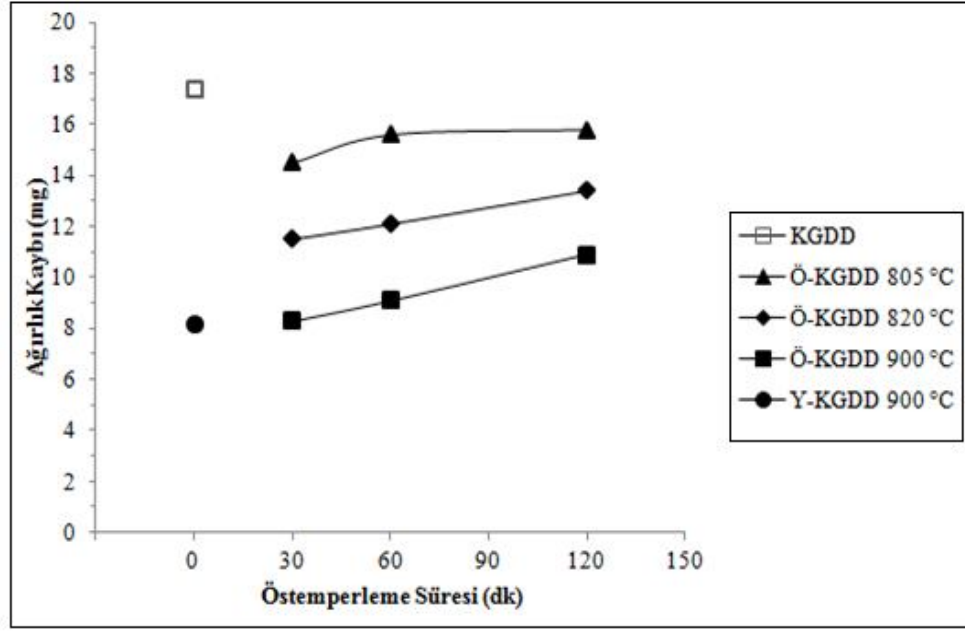
görülmektedir. Aynı zamanda östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma direnci döküm haldeki küresel grafitli dökme demirden daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.

Östemperleme ısıl işlemiyle mikro yapı ösferrite dönüşerek daha kararlı ve daha yüksek dayanım sergilemektedir [60]. Mikro yapının bu etkisi östemperlenmiş numunelerde aşınma direncinin daha iyi olmasının en önemli göstergesidir. Östemperleme süresi 30 dakika olan numunelerin yapısında bulundurduğu yüksek dönüşmemiş östenit miktarıyla 120 dakika östemperlenen numuneye göre daha kararsız bir haldedir. Bu durum karşısında östemperleme ısıl işleminin uygulandığı numunelerde meydana gelen yüksek karbonlu östenitin ve dönüşmemiş östenitin deney sırasında oluşan termo-mekanik etkilerle martenzite dönüşmesi ve aşınan yüzeylerde sertliğin artması ile aşınma kaybı azalmıştır [60].

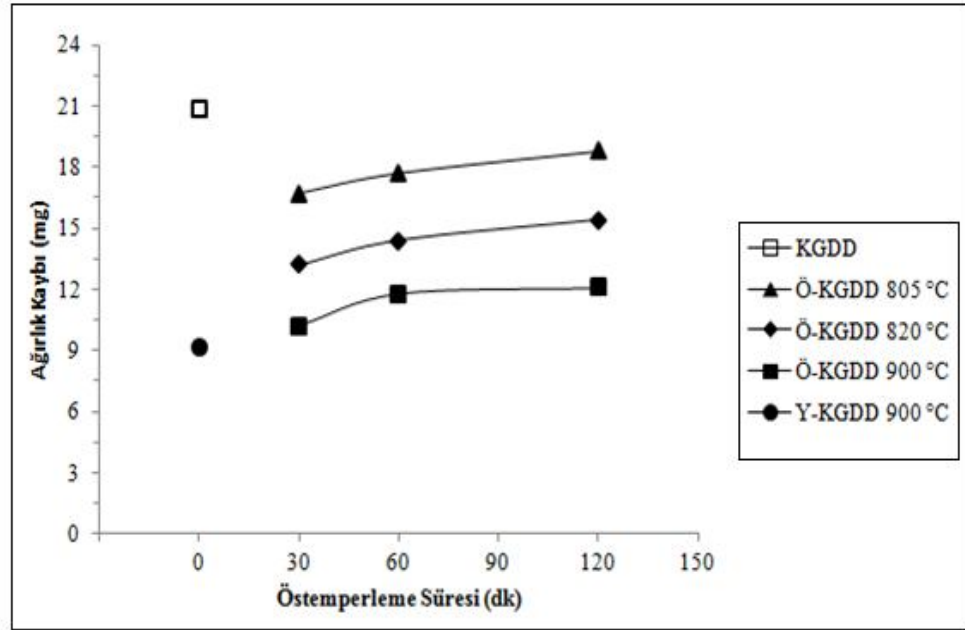
Aynı zamanda Y-KGDD 900 °C numunesinde meydana gelen aşınma kaybının diğer numunelerden daha az olmasının nedeni ise hızlı soğuma ile yapıda martenzit fazının varlığının ve doğal olarak da sertliğinin fazla olması ile açıklayabiliriz.



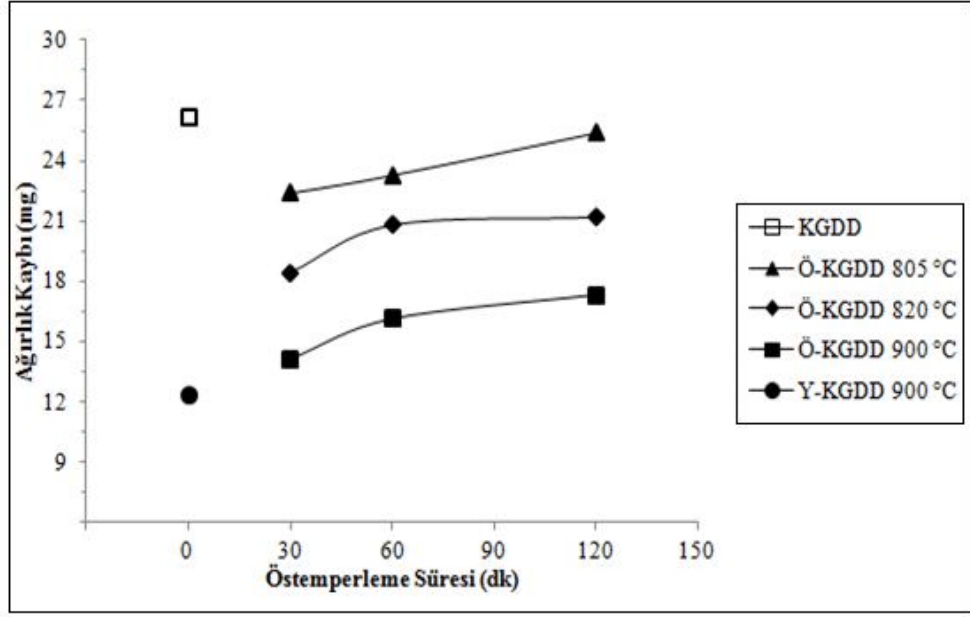
Şekil 6.14. Östemperleme sürelerine bağlı olarak numunelerin 20 N yük altında 1200 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı değişimleri.



Şekil 6.15. Östeme sürelerine bağlı olarak numunelerin 20 N yük altında 2400 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı değişimleri.



Şekil 6.16. Östeme sürelerine bağlı olarak numunelerin 40 N yük altında 1200 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı değişimleri.



Şekil 6.17. Östempirleme sürelerine bağı olarak numunelerin 40 N yük altında 2400 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı değişimleri.

Çizelge 6.8. Östempirleme sürelerine bağı olarak numunelerin 20 N yük altında 1200 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı değişimleri.

Numune No	Östempirleme Öncesi Ağırlık Kaybı (Mg)	Östempirleme Süreleri (Dakika)		
		(A) 30	(B) 60	(C) 120
		AĞIRLIK KAYBI (MG)		
1) Ö-KGDD 900 °C	-	4,7	5,8	7,1
2) Ö-KGDD 820 °C	-	7,4	8,5	8,7
3) Ö-KGDD 805 °C	-	9,3	9,7	10,1
4) Y-KGDD 900 °C	4,4	-	-	-
5) KGDD	13,6	-	-	-

Çizelge 6.9. Östempereleme sürelerine bağlı olarak numunelerin 20 N yük altında 2400 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı değişimleri.

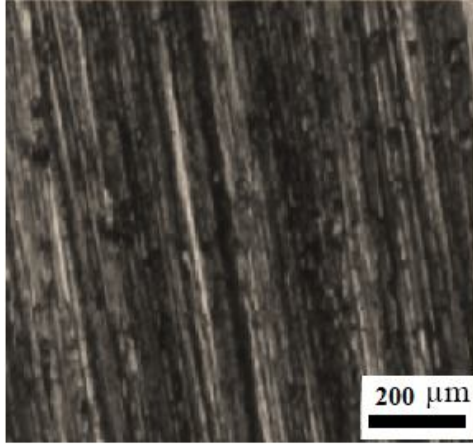
Numune No	Östempereleme Öncesi Ağırlık Kaybı (Mg)	Östempereleme Süreleri (Dakika)		
		(A) 30	(B) 60	(C) 120
		AğIRLIK KAYBI (MG)		
1) Ö-KGDD 900 °C	-	8,3	9,1	10,9
2) Ö-KGDD 820 °C	-	11,5	12,1	13,4
3) Ö-KGDD 805 °C	-	14,5	15,6	15,8
4) Y-KGDD 900 °C	8,2	-	-	-
5) KGDD	17,4	-	-	-

Çizelge 6.10. Östempereleme sürelerine bağlı olarak numunelerin 40 N yük altında 1200 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı değişimleri.

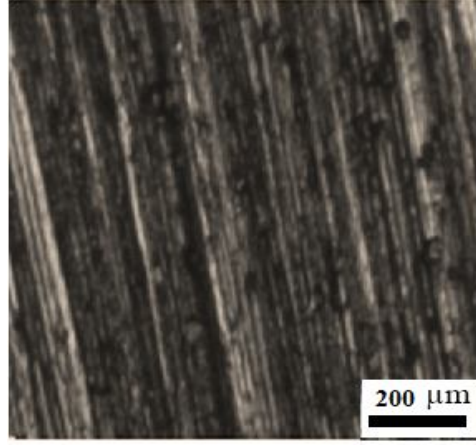
Numune No	Östempereleme Öncesi Ağırlık Kaybı (Mg)	Östempereleme Süreleri (Dakika)		
		(A) 30	(B) 60	(C) 120
		AğIRLIK KAYBI (MG)		
1) Ö-KGDD 900 °C	-	10,2	11,8	12,1
2) Ö-KGDD 820 °C	-	13,2	14,4	15,4
3) Ö-KGDD 805 °C	-	16,7	17,7	18,8
4) Y-KGDD 900 °C	9,2	-	-	-
5) KGDD	20,9	-	-	-

Çizelge 6.11. Östemperleme sürelerine bağlı olarak numunelerin 40 N yük altında 2400 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı değişimleri.

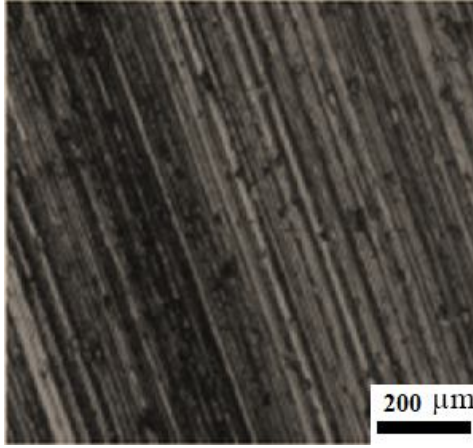
Numune No	Östemperleme Öncesi Ağırlık Kaybı (Mg)	Östemperleme Süreleri (Dakika)		
		(A) 30	(B) 60	(C) 120
		AĞIRLIK KAYBI (MG)		
1) Ö-KGDD 900 °C	-	14,1	16,1	17,3
2) Ö-KGDD 820 °C	-	18,4	20,8	21,2
3) Ö-KGDD 805 °C	-	22,4	23,3	25,4
4) Y-KGDD 900 °C	12,3	-	-	-
5) KGDD	26,2	-	-	-



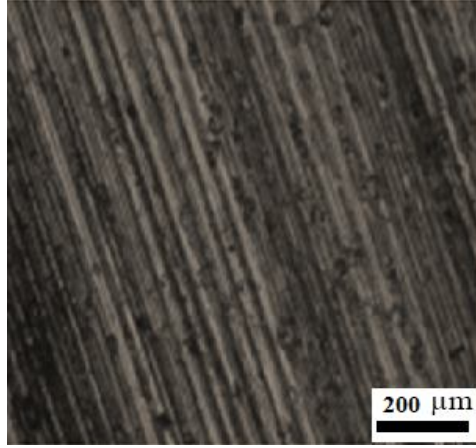
a) 20N 1200 m



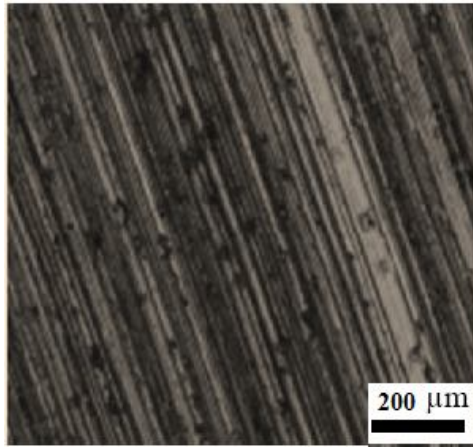
b) 40N 2400 m



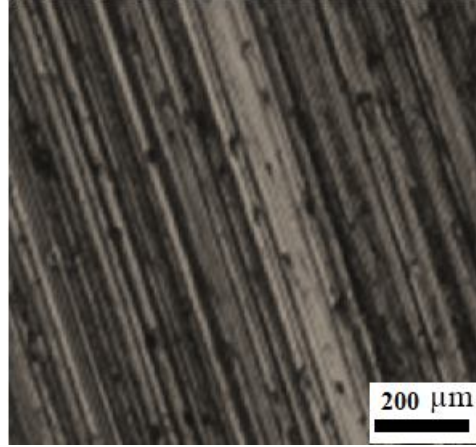
c) 20N 1200 m



d) 20N 2400 m

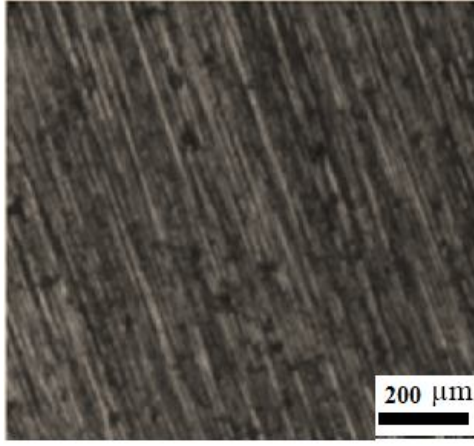


e) 40N 1200 m

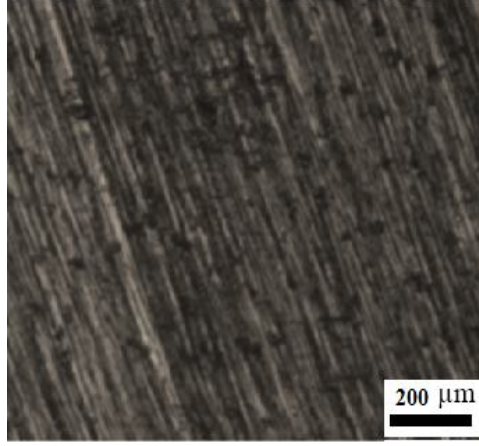


f) 40N 2400 m

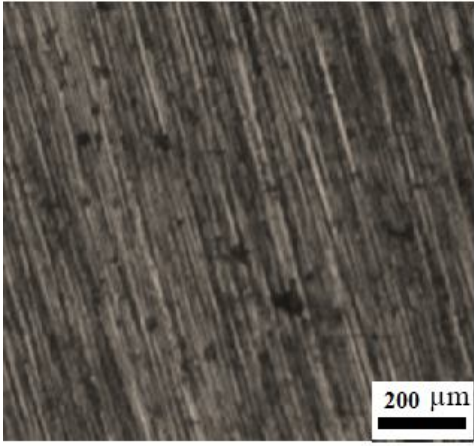
Şekil 6.18. Değişik yük ve kayma mesafelerinde aşınan yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri a) KGDD, b) KGDD, c) Ö-KGDD 805 - 30, d) Ö-KGDD 805 - 120, e) Ö-KGDD 805 - 30, f) Ö-KGDD 805 - 120



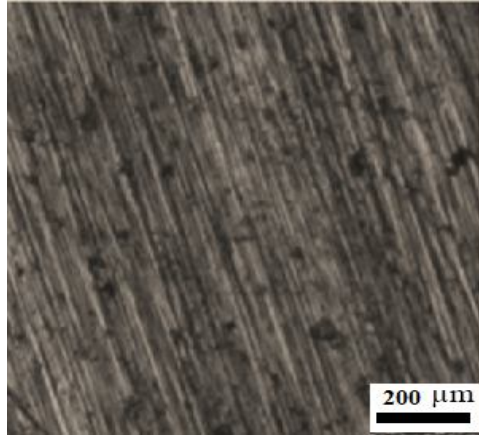
a) 20N 1200 m



b) 20 N 2400 m

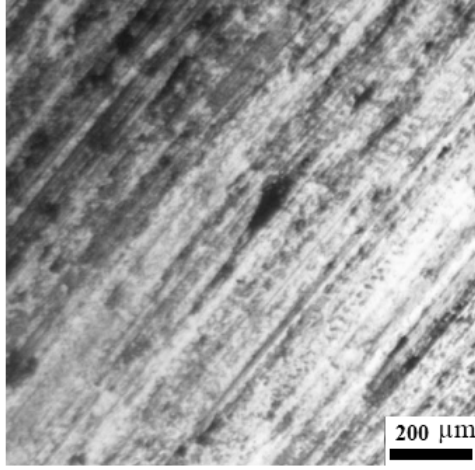


c) 40 N 1200 m

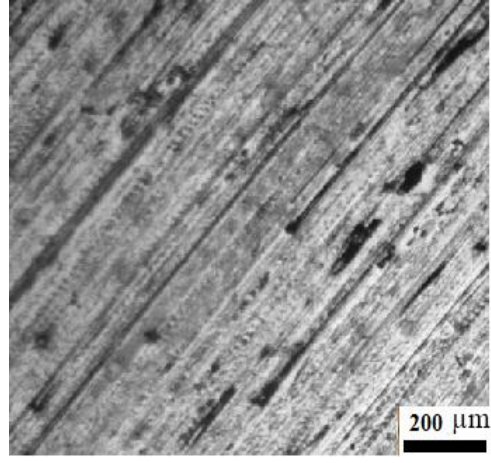


d) 40 N 2400 m

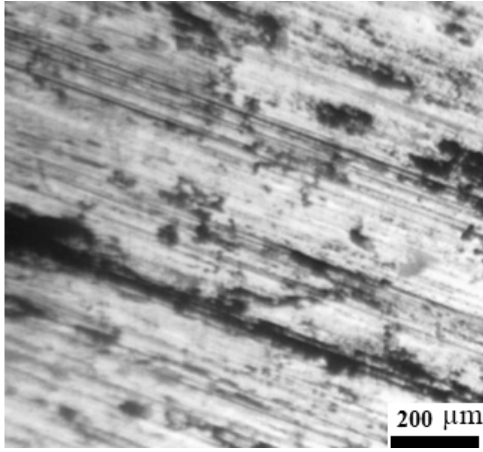
Şekil 6.19. Değişik yük ve kayma mesafelerinde aşınan yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri a) Ö-KGDD 820 - 30, b) Ö-KGDD 820 - 120, c) Ö-KGDD 820 - 30, d) Ö-KGDD 820 - 120



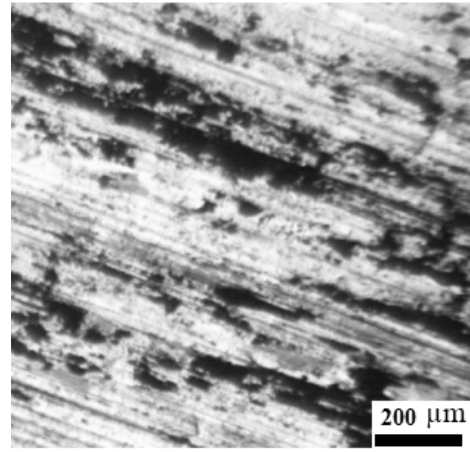
a) 20 N 1200 m



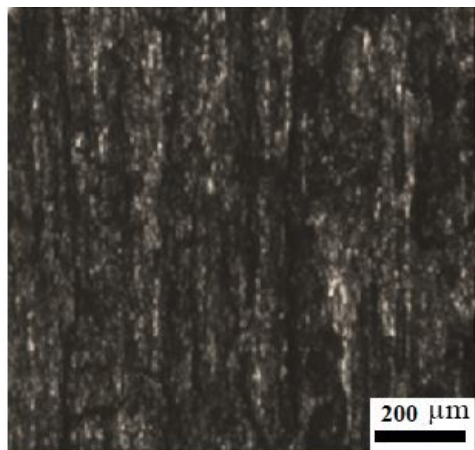
b) 20 N 2400 m



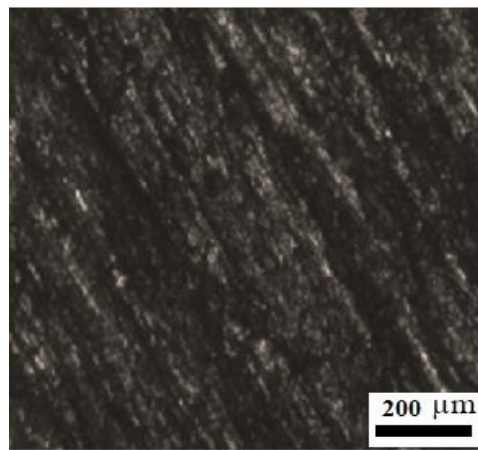
c) 40 N 1200 m



d) 40 N 2400 m



e) 20 N 1200 m



f) 40 N 2400 m

Şekil 6.20. Değişik yük ve kayma mesafelerinde aşınan yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri a) Ö-KGDD 900 - 30, b) Ö-KGDD 900 - 120, c) Ö-KGDD 900 - 30, d) Ö-KGDD 900 - 120, e) Y-KGDD, f) Y-KGDD

Deney şartlarında KGDD'in düşük malzeme sertliği nedeniyle aşınma direnci oldukça kötüdür. Bu numunelerin aşınma yüzeyi incelendiğinde şiddetli bir aşınma ve bunun sonucunda da malzeme kaybı görülmüştür (Şekil 6.18. a,b). Aşınma izleri ısıt işlem yapılmamış bu numunede derin kanallar şeklinde görünmektedir. Temas yüzeyleri arasına giren aşınma partikülleri derin kanallara sebep olmaktadır. Aşınma yüzeyler incelendiğinde östemperlenmiş ve yağda su verilmiş küresel grafitli dökme demir numunelerinde kayma yönü çiziklerin daha az olduğu bu nedenle de deformasyon miktarının daha az olacağı tespit edilmiştir.

Isıl işlem uygulanmış numuneler içerisinde Ö-KGDD 900 °C ve Y-KGDD numunesinde oldukça düşük dereceli bir hasar ve plastik deformasyon göze çarpmaktadır (Şekil 6.20. a,b,c,d,e,f). Aşınma yüzeyinin oksitlenmiş görüntüsü ile toz halindeki oksit atıklar östemperlenmiş numunelerde şiddetli olmayan bir aşınmanın meydana geldiğini göstermektedir. Östemperlenmiş numunelerde en düşük aşınma direncine ise Ö-KGDD 805 °C ve Ö-KGDD 820 °C numunelerinde görmekteyiz (Şekil 6.18. c,d,e,f, Şekil 6.20.) En düşük ve en yüksek aşınma performansının gösterildiği numuneler için uygulanan yük ve kayma mesafelerinde şekiller verilmiştir. Bu nedenle 60 dk. östemperleme ısıt işlemine tabi tutulmuş numuneler şekillerde verilmemiştir.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Orjinal vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demir numunelerine uygulanan östenitleme, östemperleme ve yağda su verme ısıl işlemleri sonucunda yapılan metalografik çalışmalar ile sertlik, çekme, darbe, ve aşınma deneylerinden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Mikroyapı incelemelerinde vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demirin mikroyapısı Ferrit + Perlit + Grafit kürelerden meydana gelmiştir. Yağda su verme ısıl işlemi sonucunda büyük oranda martensit, Östemperleme ısıl işlemi sonucunda mikroyapının genel olarak ösferrit adı verilen $\alpha + \gamma$.k. (yüksek karbon östenit) ile işlem süresine bağlı olarak dönüşmemiş östenitten meydana geldiği tespit edilmiştir.
2. Nicel metalografik sonuçlardan elde edilen birim alandaki küre sayısının $\approx 224-255$ küre/mm² aralığında olduğu tespit edilmiştir.
3. Numunelerden elde edilen sertlik değerleri incelendiğinde, sertlik değerlerinin östemperleme ısıl işlemi sonucunda büyük oranda arttığı görülmüştür. En yüksek sertlik değerine ise yağda su verme ısıl işleminde elde edilmiştir.
4. Genel olarak bütün östemperlenmiş numunelerde östenitleme sıcaklığının artmasıyla birlikte, toplam % uzama ve % kesit alanı daralması ile darbe dayanımında azalma olurken çekme dayanımı ile sertlikte artış meydana gelmiştir.
5. Östemperleme süresinin artmasıyla birlikte, çekme dayanımı ile sertlikte azalma meydana gelirken toplam % uzama ve % kesit alanı daralması ile darbe dayanımında artış olmuştur.

6. Aşınma deneylerinde aşınma direncinin numunenin sertliği ile doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir.
7. Orjinal vagon tamponu GGG 70 kalite küresel grafitli dökme demirde meydana gelen aşırı aşınma kaybı, östemperleme ısıl işlemi ve yağda su verme ısıl işlemi sonucunda azaltılmıştır.
8. Aşınma deneylerinde östenitleme sıcaklığı arttıkça ve de östemperleme süresi azaldıkça artan numune sertliğine bağlı olarak aşınma kaybının azaldığını görebiliriz.
9. Aşınma deneylerinde uygulanan yük ve uygulanan kayma mesafesiyle beraber bütün numunelerde aşınma miktarının arttığı belirlenmiştir.

ÖNERİLER

1. Östemperlemenin ikinci aşamasında optik mikroskopta gözlenemeyen mikroyapıda meydana gelen değişimlerin (segregasyon, karbür oluşumu) incelenebilmesi açısından SEM, TEM, X-Işını kırınımı çalışmaları yapılabilir.
2. Orijinal vagon tamponu GGG 70 kalite KGDD' in yorulma özellikleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. TS 526 EN 1563 (ICS 77.080.10) “Dökümler- Küresel grafitli dökme demirler” **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 4-16 (2000).
2. Hasırcı, H., “Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde alaşım elementlerinin (Cu ve Ni) ve östemperleme süresinin mikroyapıya ve mekanik özellikler üzerine etkisi” Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 15-81 (2000).
3. Akray İ. S., “Küresel grafitli dökme demirlere uygulanan yüzey işlemlerinin aşınma direncine etkisinin incelenmesi”, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 1-55 (2007).
4. Stefanescu, D. M., “Chairman., casting, asm handbook formerly 9. edition, metals handbook., ferrous casting alloys, ductile iron”, **ASM International**, United States, 15 (167): 95-126 (1992).
5. Erinç, N., “Cam kalıp malzemeleri (dökme demirler)”, **Araştırma Genel Müdürlüğü Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş.**, İstanbul, (1986).
6. Forrest, R. D., “The challenge an opportunity presented to the SG iron industry by the development of austempered ductile iron”, **BCIRA Report 1700**, 6 (3): 3-45 (1987).
7. Cast Iron v.s. Steel, “The difference in austempering”, **Heat Treatment**, 6 (4): 76-85 (1985).
8. Özel, A., “GGG 40-80 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerde östemperleme ısı işleminin darbe direnci ve geçiş sıcaklığına darbe etkisinin incelenmesi”, Doktora Tezi, **İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 42-81 (1994).
9. İzgiz, S., “Küresel Grafitli Dökme Demir” **SEGEM Yayınları**, Ankara, 1-85 (1986).
10. Çetin, M., “Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışının geliştirilmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-246 (2005).
11. Aran, A., “Lamelli ve Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Isıl İşlemleri” **İ.T.Ü. Makina Fakültesi Yayınları**, İstanbul, 1-126 (1991)
12. Uzunova, T., “Küresel grafitli dökme demir”, **Madencilik**, 6 (4): 240-245 (2000)

13. William, F., S., “Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri”, Çeviren Mehmet Erdoğan, *Nobel yayınları*, Ankara, 1-103 (2000),
14. Chang, L., C., “Carbon content of austenite in austempered ductile iron” *Department of Mechanical Engineering*, 39 (1): 35-38 (1998)
15. Ghang, C. H., and Shih, T.S., “Study on isothermal transformation of austempered ductile iron”, *AFS Transactions*, 119 (1): 1-29 (1994).
16. ASM Handbook, “Casting, Formerly Tenth Edition”, *ASM international*, 15: 54-64 (1991).
17. Darwish, N., and Elliott, R., “Austempering of low manganese ductile irons, part 1 processing window”, *Materials Science and Technology*, 9 (1): 23-67 (1993).
18. Baydoğan, M., “GGG 60 sınıfı küresel grafitli dökme demirde östemperleme ısı işleminin çekme, yorulma ve aşınma özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-54 (1996).
19. ASM Handbook, “Heat Treating, Tenth Edition”, *ASM international*, 4: 75-85 (1991).
20. Grech, M., and Young, J.M., “Influence of austempering temperature on the characteristics of austempered ductile iron alloyed with Cu and Ni”, *AFS Transactions*, 90 (1): 5-48 (1990).
21. Darwish, N., and Elliott, R., “Austempering of low manganese ductile irons, part 3 variation of mechanical properties with heat treatment conditions”, *Materials Science and Technology*, 9 (7): 586-602 (1993).
22. Hamid A., and Elliott, R., “Austempering of an an Mn-Mo-Cu alloyed ductile iron, Part 1 Austempering Kinetics and Process Window”, *Materials Science and Technology*, 12 (8): 679-690 (1996).
23. Kuş, H.. “Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 1-57 (2007).
24. Mallia, J., Grech, M., and Smallman, R.E., “Effect of silicon content on transformation kinetics of austempered ductile iron”, *Materials Science and Technology*, 15 (5): 452-460 (1998).
25. MI, Y., “Effect of Cu, Mo, Si on the content of retained austenite of austempered ductile iron”, *Scripta Metallurgica et Materilia*, 32 (2): 17-54 (1994).
26. Krishnaraj, D., Narasimhan, H.N.L., and Seshan, S., “Structure and properties of ADI as affected by low alloy editions”, *AFS Transactions*, 100 (1): 18-75 (1992).

27. Bahmani, M., and Elliott, R., "Effect of pearlite formation on mechanical properties of austempered ductile iron", *Materials Science and Technology*, 10 (12): 1068-1072 (1994).
28. Hamid A., Uzlov, K.I., Darwish, N., and Elliott, R., "Austempering of low manganese ductile irons, part 4 relationships between mechanical properties and microstructure", *Metarials Science and Technology*, 10 (1): 35-40 (1994).
29. Hamid A., Uzlov, K.I., Darwish, N., and Elliott, R., "Influence of austenitising temperature on austempering of an Mn-Mo-Cu alloyed ductile iron", *Materials Science and Technology*, 2 (13): 1-65 (1997).
30. Ghaderi, A. R., Nili A. M., and Ghasemi H. M., "Effect of graphite morphologies on the tribological behavior of austempered cast iron", *Wear*, 255 (6): 410-416 (2003).
31. Luo, Q., Xie, J., and Song, Y., "Effects of microstructures on the abrasive wear behaviour of spheroidal cast iron", *Wear*, 184 (2): 12-43 (1995).
32. Şahin, Y., Erdoğan, M., and Kılıçlı V., "Wear behavior of austempered ductile irons with dual matrix structures", *Materials Science and Engineering*, 444 (2): 31-38 (2007)
33. Hemanthu, J., "Wear characteristics of austempered chilled ductile iron", *Materials Desing*, 11 (3): 139-148 (2000)
34. Toptaş, M., "Farklı ısı işlemlerin küresel grafitli dökme demirin yorulma davranışına etkisi" Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyonkarahisar, 6-67 (2009).
35. Özel, A., "GGG 40-80 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerde östemperleme ısı işleminin darbe direnci ve darbe geçiş sıcaklığına etkisinin incelenmesi", Doktora Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 8-65 (1994).
36. Okay F., "PVD yöntemi ile tin kaplı östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin adhesiv aşınma davranışlarının incelenmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 11-62 (2006).
37. Kökden, M.U., "GGG 50 ve GGG 80 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin abrasiv aşınma davranışına östemperleme işleminin etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 92-121 (1998).
38. İpek, R., Selçuk, B., Karamış M.B., Kuzucu, V., and Yücel, A., "An evaluation of the possibilities of using borided GG 25 cast iron instead of chilled GG 25 cast iron", *Materials Processing Technology*, 105 (1): 73-79 (1999).
39. Aslan, A., "Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 23-54 (2002).

40. Vander Voort, G.F., "Metallography Principle and Practice", *McGraw-Hill*, New York, 410-508 (1984).
41. Pickering, F.B., "The Basis Of Quantitative Metallography", *The Chameleon Press*, London, 3-8 (1975).
42. Dorazili, E., Podrabsky, T., and Svejcar, J., "Micro-Inhomogeneity of Low-Alloy austempered ductile cast iron matrix", *AFS Transactions*, 90 (13): 765-774 (1990)
43. Mallia, J., Grech, M., and Smallman, R. E., "Effect of silicon content on transformation kinetics of austempered ductile iron", *Materials Science and Technology*, 14 (5): 452-460 (1998).
44. Kılıçlı, V., "Küresel grafitli dökme demirlerde kısmi östenitleme ve östemperleme ısıl işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 12-95 (2004).
45. Erdogan, M., and Priestner, R., "Effect of epitaxial ferrite on yielding and plastic flow in dual phase steel in tension and compression", *Materials Science and Technology*, 15 (11): 1273-1284 (1999).
46. Sarwar, M., and Priestner, R., "Influence of ferrite-martensite microstructural morphology on tensile properties of dual-phase steel", *Journal of Materials Science*, 31 (2): 2091-2095 (1996).
47. Stefanescu, D.M., "Transformation of austempered ductile iron", *AFS Transactions*, 85 (5): 835-848 (1985).
48. Crews, D.L., Carlon, R., and Goudzward, J., "Carbon content of austenite in austempered ductile iron" *AFS Molten Metal Processing*, 39 (1): 35-38 (1974).
49. Sidjanin, L., and Smalman, R. E., "Metallography of bainitic transformation in austempered ductile iron", *Materials Science and Technology* 8 (12): 1095-1103 (1992).
50. Hayrynen, K. L., Loftus, S.M., May, R. L., Moore, D.J., and Rudman, K.B., "Microstructural study of ausformed-austempered ductile iron", *AFS Transactions* 103 (95-51): 157-163 (1996)
51. Nadkarni, G., Behraves, A. H., Warda, R. D., Davis, K.G., and Sahoo, M., "Low - Carbon equivalent austempered ductile irons" *AFS Transactions*, 103 (95): 93-101 (1996)
52. Janowak, J.F., and Gundlach, R.B., "Development of a ductile iron for commercial austempering", *AFS Transactions*, 91 (83): 377-388 (1983).
53. Moore, D.J., Rouns, T.N., and Rundman, K.B., "The relationship between microstructure and tensile properties in austempered ductile irons", *AFS Transactions*, 112 (1): 765-774 (1987).

54. Blackmore, P.A., and Harding, R.A., “The effects of metallurgical process variables on the properties of austempered ductile irons”, *Journal of Heat Treating*, 3 (4): 310-325 (1984).
55. Prasad Rao, P.,and Putatunda, S.K., “Investigations on the fracture toughness of austempered ductile irons austenitized at different austenitizing temperatures”, *Materials Science and Engineering A*, 349 (A): 136-149 (2003).
56. Katy L. H., “Another avenue for ductile iron foundries, austempered ductile iron presents a horizon of opportunities for foundries”, *Modern Casting*, 41 (98): 28-30 (1999)
57. M. Bahmani and R. Elliott., “Effects of pearlite formation on mechanical properties of austempered ductile iron”, *Materials Science And Technology*, 10 (12): 1068-1072 (1994).
58. T. Kobayashi and H. Yamamoto, “Development of high thughness in austempered type ductile cast iron and evaluation of its properties”, *Metalurgical Transactions A*, 19 (A): 319-327 (1988).
59. Grech, M., and Young, J.M., “Effect of austenitizing temperature on tensile properties of Cu-Ni austempered ductile iron”, *Materials Science and Technology*, 6 (5): 415-421 (1990).
60. Düzcükoğlu, H., ve Demirci M.T., “Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışlarının incelenmesi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6 (4): 21-31 (2008).

ÖZGEÇMİŞ

Aydın ESENKAR 1987 yılında Ankara'nın Nallıhan ilçesinde doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı ilçede tamamladı. 2004 yılında Eskişehir Atatürk Lisesi Türkçe - Matematik Bölümünden mezun oldu. 2005 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Metal Öğretmenliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2009 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2009 yılı bahar döneminde Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Bölümü'nde yüksek lisansına başladı. Halen Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Bölümünde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Fevzi Çakmak Mah. Balcı Sok. No/8
Tepebaşı / ESKİŞEHİR

Tel : (553) 392 27 85

E-posta : oven.esen@hotmail.com