

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ORANLARDA SİLİSYUM İÇEREN KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME
DEMİRLERİN MİKRO YAPILARINA ÇİFT KADEMELİ
ÖSTEMPERLEMENİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gizem GİDER

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN

EKİM 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ORANLARDA SİLİSYUM İÇEREN KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME
DEMİRLERİN MİKRO YAPILARINA ÇİFT KADEMELİ
ÖSTEMPERLEMENİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Gizem GİDER
(506121410)**

Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat Baydoğan

EKİM 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506121410 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Gizem GİDER ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “FARKLI ORANLARDA SİLİSYUM İÇEREN KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN MİKRO YAPILARINA ÇİFT KADEMELİ ÖSTEMPERLEMENİN ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erdem ATAR
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 24 Ağustos 2015
Savunma Tarihi : 18 Eylül 2015

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım boyunca bana yol gösteren ve destek olan başta Araş Gör. Yakup YÜREKTÜRK'e, tez çalışmamda bana her konuda yardımcı olan Araş Gör. Faiz MUHAFFEL ve tüm deneysel çalışmalarımda desteğini esirgemeyen Yük. Lisans öğrencileri Ulaş MALCIOĞLU'na ve Sinem Fidan'a çok teşekkür ederim.

Her zaman desteklerini esirgemeyen aileme yüksek lisans eğitimim boyunca da aynı özveriye sağladıkları için sonsuz teşekkür sunarım.

Ekim 2015

Gizem GİDER
Metelurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER	3
2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mikroyapıları	3
2.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kimyasal Bileşimleri	5
2.2.1 Esas bileşimi etkileyen elementler.....	5
2.2.2 Küreleştirici elementler	5
2.2.3 Alaşım elementleri.....	6
2.3 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri	7
2.4 Yükek Silisyumlu Küresel Grafitli Dökme Demirler.....	8
2.4.1 Kimyasal bileşim	9
2.4.2 Sınıflandırma ve mekanik özellikler.....	9
2.5 Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Isıl İşlemler	11
2.5.1 Gerilim giderme ısı işlemi	11
2.5.2 Tavlama	11
2.5.3 Normalizasyon.....	12
2.5.4 Östemperleme	12
3. ÖSTEMPERLEME ISIL İŞLEMİ	13
3.1 Östenitleme.....	13
3.2 Östemperleme.....	14
3.3 Östemperleme Sürecini Etkileyen Faktörler	15
3.3.1 Östenitleme sıcaklığı ve süresinin etkileri	15
3.3.2 Östemperleme sıcaklığı ve süresinin etkileri	16
3.3.3 Küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal kompozisyonu	20
3.4 Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Çift Kademeli Östemperleme.....	22
4. ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER	25
4.1 Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mikro Yapıları	25
4.1.1 Üst ösferrit	25
4.1.2 Alt ösferrit.....	26
4.1.3 Östenit.....	26
4.1.4 Martensit	27
4.1.5 Karbürler.....	27
4.2 Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri	27
4.3.Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları	28
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	29

5.1 Deneysel Numuneler	29
5.2 Östemperleme Isıl İşlemi.....	29
5.3 Mikroyapısal Karakterizasyon.....	30
5.4 XRD Analizleri.....	30
5.5 Sertlik Deneyleri.....	31
5.6 Aşınma Deneyi	31
6. DENEY SONUÇLARI.....	33
6.1 Kimyasal Analiz ve Mikroyapı İncelemeleri.....	33
6.2 XRD Analizi Sonuçları.....	39
6.3 Sertlik Sonuçları	42
6.4 Aşınma Sonuçları	45
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	51
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ	56

KISALTMALAR

KGDD	: Küresel Grafitli Dökme Demir
ÖKGDD	: Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir
YD	: Yüksek Düşük ift stemperleme
DY	: Düşük Yüksek ift stemperleme
Y	: Yüksek stemperleme
D	: Düşük stemperleme

SEMBOLLER

πm :	Mikrometre
HV :	Vickers sertlik
HB :	Brinell sertlik
γ :	Östenit
α :	Ferrit
Ceş :	Karbon eşdeğeri
γ_k :	Yüksek karbonlu östenit
C γ_0 :	Teorik matris fazındaki toplam karbon oranı
C γ :	Östemperleme sonrası östenitin karbon oranı
X γ :	Kalıntı östenit hacim oranı
X γ C γ :	Matris fazındaki toplam karbon oranı
T γ :	Östenitleme sıcaklığı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : TS(526/1977) standardı KGDD malzemeler [15].	7
Çizelge 2.2 : EN 1563:2011 standardına göre katı çözelti sertleştirilmesi uygulanmış küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması [16].	9
Çizelge 2.3 : EN-GJS-600-3 ile EN-GJS-600-10 kalite küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [16].	11
Çizelge 3.1: Östenitleme sıcaklığına bağlı olarak östenitlenmiş ($C\gamma^0$) ve östemperlenmiş ($C\gamma^{maks}$) matriksteki dengesel karbon oranı [22].	17
Çizelge 6.1: EN-GJS-500-7, EN-GJS-500-14, EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerinin kimyasal analiz sonuçları.	33

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: Döküm durumu mikroyapıları, (a) Ferritik KGDD, (b) Perlitik KGDD (Dağlama : % 2 Nital, X350).....	4
Şekil 2.3 : Yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirlerde silisyum içeriğinin malzemenin kopma uzamasına etkisi [16].	10
Şekil 3.1 : KGDD'lere uygulanan izotermal dönüşüm diyagramının şematik gösterimi [21].	13
Şekil 3.2 : Fe-C-Si (%2) faz diyagramında östemperleme sırasında serbest enerji değişiminin şematik gösterimi [22].	15
Şekil 3.3 : Östenitleme sıcaklığı ve süresinin kalıntı östenit miktarına etkisi [22]. ..	16
Şekil 3.4 : Östemperleme süresine bağlı olarak γ_{yk} içeriğindeki değişim [23].	16
Şekil 3.5 : 927°C'de östenitlenmiş bir küresel grafitli dökme demirde çeşitli östemperleme sıcaklıkları ve sürelerinde $X_{\gamma}.C_{\gamma}$ ilişkisi [23].	18
Şekil 3.6 : Östemperleme süresinin mekanik özellikler üzerine etkisi [23].	19
Şekil 3.8: Çift kademeli (a ve b) ve tek kademeli östemperleme işlemlerinin örnek şematik gösterimi.	23
Şekil 4.1: Alt ve üst ösferritin oluşum mekanizması [24].	26
Şekil 6.1: Döküm halindeki KGDD nuunemerinin mikroyapıları fotoğrafları (500µm) (a- EN GJS- 500-7, b- EN- GJS-500-14, c- EN- GJS- 600-3, d- EN- GJS- 600-10).	33
Şekil 6.2 : 250°C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları (500µm) (a) EN-GJS-500-7, (b) EN-GJS-500-14, (c) EN-GJS-600-3, (d) EN-GJS-60-10.	34
Şekil 6.3 : 400°C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları (500µm) (a) EN-GJS-500-7, (b) EN-GJS-500-14, (c) EN-GJS-600-3, (d) EN-GJS-600-10.	35
Şekil 6.4 : Kademeli 250°C- 400°C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları (500µm) (a) EN-GJS-500-7, (b) EN-GJS-500-14, (c) EN-GJS-600-3, (d) EN-GJS-60-10.	37
Şekil 6.5 : Kademeli 400°C- 250°C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları (500µm) (a) EN-GJS-500-7, (b) EN-GJS-500-14, (c) EN-GJS-600-3, (d) EN-GJS-600-10.	38
Şekil 6.6: 250°C, 400°C, 250°C- 400°C, 400°C- 250 °C'de östemperlenmiş ferritik-perlitik numunelerin XRD sonuçları.	39
Şekil 6.7: 250°C, 400°C, 250°C- 400°C, 400°C- 250 °C'de östemperlenmiş ferritik numunelerin XRD sonuçları.	39
Şekil 6.8: Kalıntı östenit hacim oranının östemperleme sıcaklığı ve numune türlerine göre değişimi.	40
Şekil 6.9: Matristeki toplam karbon oranının östemperleme sıcaklığı ve numune türlerine göre % değişimi.	41
Şekil 6.10: Kalıntı östenitteki karbon oranının östemperleme sıcaklığı ve numune türlerine göre değişimi.	41
Şekil 6.11: Östemperleme türüne göre makro serlik değişimi.	42

Şekil 6.12: Ferritik- perlitik numunelerde östemperleme sıcaklığına bağlı olarak sertlik ile kalıntı östenit değişimi.	43
Şekil 6.13: Ferritik numunelerde östemperleme sıcaklığına bağlı olarak sertlik ile kalıntı östenit değişimi.	44
Şekil 6.14: Östemperleme türüne göre mikro sertlik değişimi.	44
Şekil 6.15: Numunelerin oda sıcaklığında aşınma sonucu, aşınma hızının numune grubu ve östemperleme türüne göre değişimi.	45
Şekil 6.16: İncelenen numunelerin oda sıcaklığında aşınma sonucunda relatif aşınma direncinin numune grubuna ve östemperleme süresine göre değişimi....	46
Şekil 6.17: Ferritik numunelerin oda sıcaklığında aşınma deneyi sonucunda sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimi.	47
Şekil 6.18: Ferritik- perlitik numunelerin oda sıcaklığında aşınma deneyi sonucunda sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimi.	47
Şekil 6.19: Oda sıcaklığında en yüksek ve düşük aşınma izine sahip ferritik numunelerin mikroskop görüntüsü (a- EN GJS- 500-14 döküm hali, b- EN- GJS-600-10 döküm hali, c- EN- GJS- 500-14 250°C östemperleme , d- EN- GJS- 600-10 250°C östemperleme).	48
Şekil 6.20: Oda sıcaklığında en yüksek ve düşük aşınma izine sahip ferritik- perlitik numunelerin mikroskop görüntüsü (a- EN GJS- 500-7 döküm hali, b- EN- GJS-600-3 döküm hali, c- EN- GJS- 500-7 250°C östemperleme , d- EN- GJS- 600-3 250°C östemperleme).	49

FARKLI ORANLARDA SİLİSYUM İÇEREN KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN MİKRO YAPILARINA ÇİFT KADEMELİ ÖSTEMPERLEMENİN ETKİSİ

ÖZET

Küresel grafitli dökme demir, adından da anlaşılacağı gibi yapısında grafitleri küresel şekilde bulunduran bir dökme demir türüdür. Demirler, magnezyum, seryum ve diğer özel elementler ile alaşımlandırıldığında, demir içindeki grafitler küresel biçimde katılaşıp yüksek dayanım özellikleri kazanan bir malzemeye dönüşür. Küresel grafitli dökme demir olarak bilinen bu malzeme, dökme demir türleri içerisinde en dayanıklı ve tok olanıdır.

Küresel grafitli dökme demirlerin yüksek çekme mukavemeti, yüksek süneklik, yüksek aşınma direnci, düşük ergime sıcaklığı ve düşük maliyetle kolay üretilebilme gibi nitelikleri, otomotiv sanayinde krank milleri, vites dişlileri, kam mili, ön aks taşıyıcısı, diferansiyel taşıyıcısı ve süspansiyon kolları gibi parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılan bir malzeme türü olmasını sağlamıştır.

Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri malzemenin mikroyapısı ile doğrudan ilişkilidir ve bu malzemenin mikroyapısı tamamen perlitik, ferritik/perlitik ya da tamamen ferritik olabilmektedir. Bu yapıyı belirleyen etkenlerin başında malzemenin kimyasal bileşimi gelmektedir.

Küresel grafitli dökme demir malzemenin her bölgesinde sertlik dağılımının homojen olması ve malzemenin sertlik değerinin en yüksek değere ulaşabilmesi için, bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, en çok kullanılan yöntem katı çözelti sertleştirme işlemi olmuştur. Bu işlemde küresel grafitli dökme demire belirli miktarda alaşım elementi eklenir ve en iyi özellikler alaşım elementi olarak silisyumun kullanılmasıyla elde edilmiştir. Küresel grafitli dökme demirin bileşimine yüksek oranda silisyum ilavesi, mikroyapının tamamen ferritik olmasını sağlarken, aynı zamanda silisyum atomları yapı içerisinde demir atomlarının yerini alarak katı çözelti oluşturmaktadır. Böylece tek fazlı yapı elde etmenin yanı sıra, katı çözelti sertleşmesi mukavemet artırıcı etki sağlayarak malzemenin sertlik, akma dayanımı, çekme dayanımı, süneklik ve tokluk gibi özelliklerini olumlu yönde etkiler.

Küresel grafitli dökme demir malzemelerin mekanik özelliklerini arttırmak için yapılan bir diğer işlem östemperlemedir. Bu işlem ile küresel grafitli dökme demirler, çelik malzemelerde oluşan beyritik yapıdan farklı olarak ösferritik (östenit+ferrit) matris yapı oluşturmaktadır. ÖKGDD malzemeler çeliklerle karşılaştırıldığında; düşük malzeme ve üretim maliyetine, düşük yoğunluğa, iyi işlenebilirliğe ve yüksek titreşim sönümleme kabiliyetine sahiptir. Bu üstün özelliklerin sonucu olarak da pek çok alanda kullanılmaya başlanmış ve pek çok araştırmanın da konusu olmuştur.

KGDD'lerde fazla miktarda Si içeriği östemperlenmiş KGDD mikroyapısının geliştirilmesinde anahtar role sahiptir. Silisyum, izotermal dönüşüm sırasında karbür çökmesini engeller. Östemperleme süresi, ferrit ve karbonca zenginleşmiş kalıcı östenitin oluşumu için yeterli olmalı ve ayrıca oda sıcaklığında yüksek karbonlu östenitin kararlılığını koruması sağlanmalıdır.

Bu çalışmada, farklı silisyum oranlarına sahip ferritik-perlitik (EN GJS- 500-7, EN-GJS- 600-3) ve ferritik (EN- GJS-500-14, EN- GJS- 600-10) mikroyapılı küresel grafitli dökme demirlere uygulanan tek ve iki kademeli östemperleme işlemlerinin, malzemelerin mikroyapıları, sertlik ve aşınma dirençleri gibi mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Ferritik- perlitik numuneler (EN GJS-500-7 ve EN- GJS- 600-3), 900°C'de bir saat, ferritik numuneler 975°C'de 90 dakika östenitleme işlemine tabi tutulmuştur. Tek kademeli östemperleme işlemi, tüm numunelerin 250°C ve 400°C'de 20 dakika bekletilmesiyle yapılmıştır. İki kademeli östemperleme işlemi düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklığa (250°C'den 400°C'ye) ve yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa (400°C'den 250°C'ye) geçilerek yapılmış, numuneler her iki sıcaklıkta 20'şer dakika bekletilmiştir. Numuneler tüm östemperleme işlemlerinden sonra havada soğumaya bırakılmıştır.

Östemperleme işlemi sonucunda, numunelerin mikroyapılarında östemperleme türüne bağlı olarak olarak değişen oranlarda ferrit ve kalıntı östenit oluştuğu belirlenmiştir. Östemperlenmiş numunelerinin ve döküm halindeki numunelerin mekanik özelliklerini incelemek amacıyla, sertlik ve aşınma deneyleri yapılmıştır. İncelemeler sonucunda östemperleme işlemi ile tüm numunelerin makro ve mikro sertliklerin, döküm durumundaki yapılarına göre arttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte ferritik numunelerin sertliği, yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa geçilerek yapılan kademeli östemperlemede artış gösterirken, ferritik- perlitik numunelerde bu durumun tersi gözlemlenmiştir.

Östemperlenmiş ve döküm halindeki tüm numuneler, ball-on test metoduyla oda sıcaklığında aşınma testine tabi tutulmuş ve oda sıcaklığında yapılan aşınma testi sonucunda numunelerin aşınma dirençlerinin, döküm durumundaki yapılarına göre 2 ile 3 kat arasında artış gösterdiği bulunmuştur. En yüksek aşınma direnci tüm numuneler için 250°C'de yapılan östemperleme işleminde sağlanırken, ferritik numunelerin aşınma direnci, 400°C- 250°C'de yapılan kademeli östemperlemede artış gösterirken, ferritik numune gruplarında bu durumun tersi gözlemlenmiştir.

TWO STEPPED AUSTEMPERING'S EFFECTS ON MICRO STRUCTURES OF SPHEROIDAL GRAPHITE CAST IRONS CONSISTING OF SILICIUM IN DIFFERENT RATES

SUMMARY

As it is understood from the name, spheroidal graphite cast iron belongs to cast iron family which includes the graphites as spheroidal shape. If the cast iron is alloyed with magnesium, cerium or any different special elements, the graphites in the cast iron solidify as spheroidal and the iron turns to a high strength material. This spheroidal graphite cast is the most hard-wearing and tough material in the cast iron family.

A remarkable compound of characteristics is achieved in ductile iron because the graphite shape as spheroids rather than as specific flakes as in gray iron. This mode of solidification is achieved by adding a very small, but unique, amount of Mg to molten iron. The base iron is strictly limited in the acceptable contents of certain secondary elements that can obstruct with the graphite spheroid formation. The added Mg reacts with the sulfur and oxygen in the molten iron and make difference of the graphite's forms. The variable grades are formed by controlling the matrix structure around the graphite either as-cast or by sequential heat treatments. Alloy annexing might be helpful for controlling the matrix structure as-cast or to provide response to heat treatment.

Due to spheroidal graphite cast irons have higher tensile strength, higher ductility, higher wear resistance, lower melting temperature and lower production cost features, they are used in automotive industry commonly as crankshafts, gearbox gears, camshaft, front axle carrier, differential support member, wheel suspension levers.

Mechanical properties of spheroidal graphite cast iron are related directly with materials microstructures and these microstructures can be completely perlitic, ferritic- perlitic or completely ferritic. Also material's chemical composition has the main effect on microstructures.

Several researchs have been made until today in order to make homogeneous strength dispersion on the spheroidal graphite cast iron's every surface and raise the strength to the optimum level. In consequence of these researchs, solid solution hardening was chosen as the most effective way. In this process, a specific amount alloying elements are added into spheroidal graphite cast iron material and the best features are acquired with using silicium. Adding higher amount silicium into spheroidal graphite cast iron transforms the microstructure to completely ferritic. At the same time silicium atoms substitute for iron atoms to create solid solution. In this way, besides the single phase formation also solid solution hardening increase the material's strength and it provides positive effect for yield strength, tensile strength, ductility and toughness features.

The another strengthening method is austempering process in order to increase the spheroidal graphite cast iron's mechanical properties. With this process, spheroidal graphite cast irons form ausferrite (austenite+ ferrite) matrix differently from steel's bainitic matrix. While the austempered spheroidal graphite cast irons compare with steels, they have lower material and production cost, lower density, good machinability and higher vibration damping than steels. As a result of these outstanding performances, they have been used in different industrial areas and they have been a subject for several researchs.

Nowadays, there has been an important attention in the improvement of austempered ductile cast irons because heat treated austempered ductile irons have superior mechanical features and these materials can be used in major engineering elements with a numerous of properties. ADI is a heat-treated alloyed nodular cast iron have a microstructure including of high carbon austenite and acicular bainitic ferrite with graphite nodules dispersed in the matrix. According to lots of experimental studies, the residual austenite can exists at the isothermal transformation temperature from the retained austenite that remains untransformed at chosen temperature. During the isothermal transformation, carbon segregates between ferrite laths and austenite and this cause insufficient phases, such as martensite and iron carbides, may also stay in smaller quantities, but this should be pointed that a maximum retained austenite volume fraction is important for good mechanical properties.

The base iron chemistry and alloy additions to ductile iron are acting main roles in ADI technology. The adding of alloying elements during the production of ADI is noticeably higher than the levels used in the production of conventional grades of ductile irons. For austempering process, the alloy is holded at a temperature in the range 820–950°C long enough for dissolving the austenite and then it is cooled for isothermal transformation at temperatures between 250 and 450°C before final cooling to the temperature. The variation of alloying elements, temperature and the austempering time are main control parameters for the ADI microstructure. The isothermal heat treatment should be finished at the point that allows an optimum balance between bainitic ferrite and retained austenite, without carbide precipitation. The formation of carbides might increase the structure more embrittled and this decrease the mechanical properties of ADI.

The higher amount of silicium in the the spheroidal graphite cast irons has the key role for improving to microstructures of austempered spheroidal graphite cast irons. Silicium prevents the carbide precipitation during isothermal transformation. Also austempering time should be enough for the formations of ferrite and permanent austenite having higher carbon amount, in addition to this high carbon austenite should be conserved as stable in the room temperature.

In this study, two types spheroidal graphite cast irons which have different silicium amount were used. One of the types (EN GJS- 500-7, EN- GJS- 600-3) has ferritic-perlitic microstructure and the other type (EN- GJS-500-14, EN- GJS- 600-10) has ferritic microstructure. These spheroidal graphite cast irons were austempered in single stepped and two stepped stage. And then the effects of the austempering methods on the spheroidal graphite cast irons' microstructures, strengths and wear resistance features were analysed.

Ferritic- perlitic samples (EN GJS- 500-7, EN- GJS- 600-3) were austenitized at 900°C in 1 hour and ferritic samples (EN- GJS-500-14, EN- GJS- 600-10) were austenitized at 975°C in 90 minutes. In single stepped austempering process, all samples were waited at 250°C and 400°C in 20 minutes. Two stepped austempering process were carried out as two type. One of them is started from the lower temperature and finished at higher temperature (250°C- 400°C) and the other one is started from the higher temperature and finished at lower temperature (400°C- 250°C) and the samples were waited in both temperatures in 20 minutes. After the all austempering process, the samples were cooled in air cooling condition.

After the austempering process, different amount of ferrite and retained austenite were found in the samples microstructures with regards to different austempering types. In order to observe the mechanical features of austempered samples and the non- austempered samples (in cast state), strength and wear resistance tests were applied to the samples. As a result of the tests, austempered samples showed higher macro and micro strength than the non- austempered samples. Also the strength of ferritic samples showed an increasing trend in two stepped austempering which started from the higher temperature and finished at lower temperature (400°C- 250°C) and the ferritic- perlitic samples showed decreasing trend in this two stepped type.

The room temperature wear test were applied to all austempered and non-austempered samples with ball on test method. And after the test, the wear resistance of austempered samples showed increasing trend as two and three times than non-austempered samples. Also the highest wear resistance is found in single austempering process in 250°C for all samples. And ferritic samples wear resistance showed an increasing trend in two stepped austempering which started from the higher temperature and finished at lower temperature (400°C- 250°C) and the ferritic- perlitic samples showed decreasing trend in this two stepped type.

1. GİRİŞ

Küresel grafitli dökme demirler, çeliğin mekanik özelliklerine ve dökme demirin üretim özelliklerine sahip bir malzeme grubu olarak tanımlanmıştır. Küresel grafitli dökme demirler, gri dökme demirlerden yaklaşık iki kat daha fazla mukavemete sahip olup, çeliğe göre çok daha kolayca dökülebilmektedir. Üstelik üretimindeki büyük maliyet avantajı, kullanım alanını hem çelik hem de diğer dökme demirlere göre her geçen gün biraz daha genişletmiştir.

Demir malzeme üretim teknolojinin gelişmesine bağlı olarak, küresel grafitli dökme demirin mekanik özelliklerini daha da geliştirmenin yolları aranmıştır. Ancak, yapılan çalışmalarda, grafitte küreselden başka bir morfoloji kazandırmanın imkansız olduğunun anlaşılması, araştırmacıları, kimyasal özelliklerini değiştirme yoluna itmiştir [1].

Yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirler yaklaşık 20 yıl önce Almanya’da otomobil üreticileri tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Küresel grafitli dökme demirler %1,8-2,8 oranında silisyum içermektedir. Yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirler ise %2,8-4,5 arasında silisyum içeriğine sahiptir. Yapılan çalışmalar sonucunda %4,5’ten fazla silisyum içeriği, küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini kötüleştirmektedir. Özellikle malzemenin kopma uzaması önemli miktarda azalmaktadır [2]. Yüksek silisyum içeriği, küresel grafitli dökme demirin mikroyapısını tamamen ferritik yapmakta ve mukavemet artışı silisyum atomlarının α -demir içerisinde çözünerek katı çözelti sertleşmesi meydana getirmesi ile gerçekleşmektedir. Bu sayede ferritik- perlitik küresel grafitli dökme demirlerin işlenmesinde bir takım problemlere yol açan, yüzey ile iç bölge arasındaki ferrit-perlit oranlarının farklılığı, mikroyapının tamamen ferritik olması ile ortadan kalkmaktadır. Perlit yapısının kaybolması ile malzemede mukavemet düşüşü, yüksek oranda silisyum atomlarının matris içerisinde katı çözelti yapması ile telafi edilmektedir. Ayrıca kırılgan bir yapıya sahip olan perlitin ortadan kalkması ile malzemede önemli miktarlarda süneklik ve tokluk artışı meydana gelmektedir [3].

Küresel grafitli dökme demir malzemelerin mukavemet özelliklerini iyileştirmede en sık kullanılan yöntemlerden biri östemperleme işlemidir. Östemperleme işlemine bağlı olarak, küresel grafitli dökme demirlerin mukavemet, süneklik, tokluk ve aşınma direnci gibi mekanik özelliklerinde önemli artışların elde edilebileceği belirtilebilir.

Geleneksel tek kademeli östemperleme prosesinde, malzeme 850-950°C sıcaklık aralığında tamamen östenit (γ) matris 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 [4].

Bu işlemde, östenit matris katılaşma sırasında bazı elementlerin segregasyonundan dolayı homojen değildir. Genel olarak, grafit kürelerinin (ötektik hücreler) etrafındaki östenit içerisinde Si ve Ni gibi alaşım elementlerinin konsantrasyonu oldukça yüksektir. Homojensizliğin kalması östemperleme reaksiyonu kinetiği üzerinde önemli etkiye sahiptir. Hücrelerarası bölge içerisinde Mn ve Mo yüksek konsantrasyonu östeniti güçlü kararlaştırıcı yapar ve karbonun çözünübilirlik derecesini yükseltir. Bunun sonucu ferritte çekirdeklenme ve büyüme sergilenemez, östenitin, ferrit (α) ve yüksek karbonlu östenit(γ_{yk})'e ayrışma süresi uzar ve ötektik hücreler içinde yüksek karbonlu östenit (γ_{yk}), ferrit ve karbüre ayrışır. Bu problemi çözmek için iki kademeli östenitleme prosesi uygulanır. Birinci kademede östemperleme işlemi 400° C gibi yüksek sıcaklıklarda başlatılır, böylece ötektik hücre içerisinde birinci aşama reaksiyonu tamamlanmıştır. Bunu takiben malzeme 250- 300°C sıcaklıkta tuz banyosuna alınır. Böylece hücrelerarası bölge içerisinde birinci aşama reaksiyonu için itici kuvveti artar ve ötektik hücre içerisinde karbürlerin çökmesi geciktirilir. İki kademeli östemperleme ile ötektik hücreler içerisinde üst ösferrit ve hücreler arası bölge içerisinde alt ösferrit yapı elde edilir [5].

Bu çalışmada farklı oranlarda silisyum içeren küresel grafitli dökme demirlere, tek ve çift kademeli olarak uygulanan östemperleme işleminin, numunelerin mikroyapılarına, sertliklerine ve oda sıcaklığındaki aşınma dirençlerine olan etkisinin analiz edilmesi amaçlanmaktadır.

2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

Küresel grafitli dökme demir, adını bünyesinde bulunan grafitlerin küresel biçimde oluşundan alır. Bu durum sıvı kır dökme demire genellikle az miktarda magnezyum (veya seryum, kalsiyum, lityum) ilavesiyle elde edilir. Günümüzde birçok yerde; gri dökme demir, dökme çelik ve demir olmayan birçok alaşımların yerine yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu işlevselliği çeliğin mekanik özelliklerine, dökme demirin fiziksel ve üretim özelliklerine sahip olmasıyla kazanmıştır [5]. Dökme demir kırılmalıdır. Küresel grafitli dökme demir (KGDD) ise diğer dökme demirlerden farklı olarak sünekler. Dökme demirin iyi bilinen dökülebilirlik, işlenebilirlik, yüklenme kapasitesi ve üretim özellikleri gibi özelliklerine ilave olarak KGDD’ lerde geniş mukavemet aralıkları, aşınma direnci, yorulma direnci, tokluk ve süneklik özellikleri vardır [6].

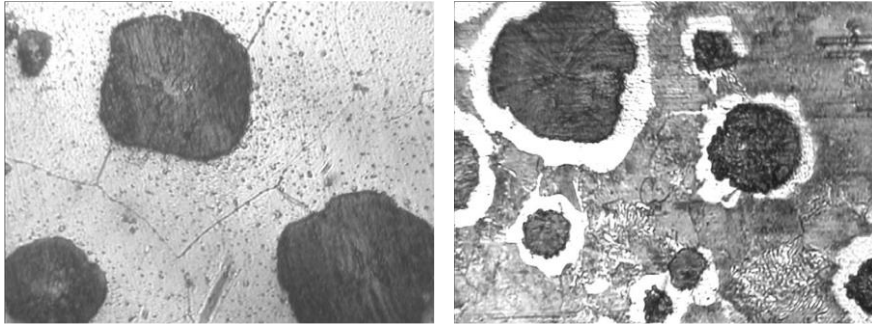
2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mikroyapıları

Küresel grafitli dökme demirin katılaşması sırasında görülen ilk yapı olan östenitte, çözünebilen maksimum karbon miktarını aşan karbon grafit olarak ayrışır. Östenit içindeki karbon çözünürlüğünün, sıcaklık düşüşü ile azalması sonucunda, karbon östenitik yapıdan ayrılarak, grafit halinde toplanır ve ayrıldığı bölgede karbon azalmasından dolayı ferritik yapı oluşur. Ferrit hacim merkezli kübik (HMK) demirin çok düşük miktarda karbon ile oluşturduğu katı çözelti halidir [7]. KGDD’lerde ferrit dönüşümü sırasında matrisin karbon içeriği de değişir. Çekirdeklenme sırasında karbon içeriği yaklaşık % 1 olan östenitin, soğuma ile birlikte karbon içeriği düşer ve östenit-ferrit dönüşüm sıcaklığında östenitteki karbon çözünürlüğü yaklaşık olarak % 0.55’e ulaşır. Tamamen ferritik yapılar ancak tavlama ısı işlemi ile elde edilir [8].

Ferritik yapıda, östenit içinde çözülen karbonun tamamı küresel grafitli dökme demire dönüşebilmek için gerekli zamanı bulmuştur. Farklı soğuma hızlarında östenitten ayrılan karbon, grafitlerin bulunduğu bölgelere kadar hareket edemez ve o bölgede katılaşmaya zaman bulamaz. Bu durumda grafitler ince karbür tabakaları şeklinde oluşur ve bu karbürli tabakalar ile ferrit devamlı olarak birbirine bitişirler.

Oluşan bu yapıya perlit adı verilir. Perlitik yapıda soğuma hızının artışıyla difüzyona fazla zaman kalmaz ve tane sınırı, alaşım elementleri, inklüzyonlar gibi nedenlerle difüze olamayan sementit (Fe_3C) ferrit yapı ile birlikte bulunur.

Perlit yapısını oluşturan ferrit ve sementiti oluşturan bu yapıda alaşım serttir ve mekanik özellikleri iyidir. Aşağıdaki Şekil 2.1(a)'da ferritik matris içerisindeki küresel grafitler, Şekil 2.1.(b)'de perlitik matris içerisinde, grafit kürelerinin etrafında halka şeklinde yer almış ferritlerin oluşturduğu küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapıları görülmektedir [8,9].



(a) (b)
Şekil 2.1: Döküm durumu mikroyapıları, (a) Ferritik KGDD, (b) Perlitik KGDD (Dağlama : % 2 Nital, X350).

Küresel grafitli dökme demirler, soğuma hızına ve kimyasal bileşime bağlı olarak ferrit, perlit veya her iki fazın karışımından oluşmaktadırlar. Ferrit ve perlit miktarlarının birbirine göre oranları, malzemenin çekme, akma, uzama ve sertlik gibi mekanik özelliklerini doğrudan etkilerler [9].

KGDD malzemelerde, grafitler küresellikten uzaklaştıkça meydana gelen düzensiz partiküller gerilimi arttırıcı etkiye bulunmaktadır. Gerilimin önlenmesi veya yüksek küre sayısının oluşturulması için dökümlerde en düşük % 80 küreselleşme sağlanmalıdır. Grafitin, KGDD'de keskin köşeli tabakalar yerine küreler şeklinde oluşması, gri dökme demire göre dayanımın 5-7 kat daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Grafit kürelerinin şekli, boyutu, dağılımının homojenliği mekanik özellikleri etkilemektedir. Bu nedenle tam küresellikten uzaklaşıldıkça KGDD'nin mekanik özelliklerinde düşme meydana gelmektedir. Aşılama prosesi ile karbür oluşumu önlenerek küre sayısı ve yapıdaki ferrit oranı arttırılır, böylece sert ve kırılgan dökümlerin üretilmesi engellenir [10].

2.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kimyasal Bileşimleri

KGDD’lerde istenilen mikroyapı ve mekanik özelliklerin sağlanabilmesi için, kimyasal bileşimin kontrolü önem arz etmektedir. KGDD’lerin bu özelliklerini etkileyen element grupları, dökme demirin esas bileşimini oluşturan elementler, küreleştirci ve alaşım elementleri olmak üzere üç temel gruba ayrılır [10].

2.2.1 Esas bileşimi etkileyen elementler

KGDD malzemelerde esas bileşim elementi karbondur, bununla birlikte silisyum ve kükürdün de mekanik özelliklere etkisi bulunmaktadır. Karbon miktarı %2,5’tan %4,0’a kadar arttığında, kopma, akma mukavemeti ve sertlik değerlerinde azalmalar meydana gelmektedir [11].

Silisyum miktarı %1 den %4e kadar değişebilirken, en iyi mekanik özellikler %2 civarında gözlenmektedir. Grafit oluşumunu kolaylaştırmak için, küresel grafitli dökme demir üretiminde yapılan aşılamanın en önemli elementi silisyumdur ve ferro silis yolu ile ilave edilmektedir. İlave edilen Si miktarının artmasıyla malzemenin abrasiv aşınma direnci de iyileşir. Küresel grafitli dökme demirlerin özelliklerini etkileyen bir diğer element olan kükürt, küreleştirci elementler ile reaksiyona girerek küreleşme oranını düşürmektedir. Ayrıca kükürt, sıvı dökme demirde çok kuvvetli bir yüzey enerji düşürücü element olmasıyla grafitlerin lamel şeklinde büyümesine yardım etmektedir [12].

2.2.2 Küreleştirci elementler

KGDD’lerin üretiminde, grafitlerin küresel şeklinde oluşabilmesi için, demire sıvı halde ilave edilen maddelere küreleştirciler adı verilir ve çoğunlukla Mg, Ce, Li, Na elementleri kullanılır. Mg ve Ce ticari alanda kullanıma en uygun olan küreselleştircilerdir. Bu metallerin saf olarak değil, uygun alaşımları ile sıvı demire ilave edilmeleri dahi iyi sonuçlar vermektedir çünkü Ce ve Mg sıvı döküm içerisindeki oksijenle çok seri reaksiyona girerek oksitler oluşturarak büyük kayıplar vermektedir. Ayrıca saf Ce veya Mg metalleri yerine bu elementlerin Fe, Si, Ni, Cu metalleri ile meydana getirdikleri alaşımlar kullanılarak, bu metallerin buhar basınçları düşürülür ve sıvı dökme demire ilave edildikleri zaman buharlaşarak verimlerin düşmesi önlenir [12].

Ce metali ile yapılan küresel grafitli dökme demir imalatında hiper ötektik (karbon miktarı %4.3'ün üzerinde) dökme demirler kullanılmaktadır. Mg metali ile kullanıldığında ise hipo ötektik (karbon miktarı %4.3'ün altında) dökme demir bileşimleri tercih edilir. Bunun nedeni, Ce metalinin kuvvetli karbürleştirici olarak, karbürleri stabil yapmasıdır. Bu bakımdan, malzemenin çok sert ve çok gevrek yapıya sahip olmasını önlemek için hipoötektik bileşim kullanılmaz. Mg metali, Ce kadar kuvvetli olmadığı için, hipoötektik bileşimlerde Mg metali ile küreselleştirme tercih edilir [12,13].

2.2.3 Alaşım elementleri

Sıvı haldeki demirde grafit çekirdeklerinin oluşumunu kolaylaştırmak için, küreleştirici ilavesinin ardından grafitleştirici özelliği bulunan elementler veya alaşımlar aşılama işlemi ile demire ilave edilir. Bu elementler küreselleştirmenin yanı sıra, talep edilen döküm matris yapısının oluşumuna yardımcı olur ve mekanik özelliklerin iyileşmesinde rol alır. KGDD'lerde en çok kullanılan alaşım elementleri aşağıda verilmiştir [13].

Silisyum: Östempereleme işlemi sırasında karbür oluşumunun önüne geçmek ve grafit oluşumunu desteklemek için, toz haldeki ferrosilisyum, sıvı metal içerisine veya döküm yapılacak kalp boşluğuna eklenir. Böylece ötektoid dönüşüm sırasında oluşan ferritin miktarı artarak, KGDD'in sertliği ve dayanımı yükselir, aşınma direnci iyileşir [12,13].

Manganez: KGDD'in sertliğini arttırabilmek için mangan ilavesi yapılır. Fakat Mn'nin katılma sırasında en son katılan taneler arası alanlara segregasyon eğiliminin olması ve karbür oluşumunu arttırmasından dolayı ilave edilecek miktarı % 0.3'e kadar olmalıdır. Bunun yanı sıra, % 1.5 miktarına kadar Mn ilave edilmiş KGDD malzemeler üretilmekte, kademeli ısı işlemi ile bu malzemelerdeki Mn segregasyonu düzeltilmektedir. [13].

Molibden: Yüksek sıcaklıklarda KGDD'in dayanımını ve sertliğini arttırmak için ilave edilir. Ni ve Cu ile birlikte ilave edildiğinde, sertliği arttırma konusunda tek başına ilave edilmesinden daha etkili olmaktadır. Molibden de Mangan gibi, katılma sırasında tane sınırlarına segregare olduğu için, ilave edilecek Mo miktarı % 0.2-0.3 aralığında olmalıdır [12,13].

Nikel: Temperleme, östemperleme veya sertleştirme uygulanacak dökme demirlerin üretiminde çokça kullanılmaktadır. En önemli özelliği östenit-ferrit dönüşüm sıcaklığını düşürerek bir östenit kararlaştırıcı olarak rol oynamasıdır [14].

Bakır: Maaliyetinin düşük olmasından dolayı, KGDD malzemenin sertliğini yükseltmek ve mikroyapıda perlitik matris elde etmek için en sık kullanılan alaşım elementlerindendir. Bakır perlit oluşumunu olumlu yönde etkilediği için, KGDD'in çekme, yorulma dayanımı ile sertliğini arttırırken, sünekliğini ve darbe dayanımını azaltır. Bakırın sertliği arttırıcı etkisi molibdenden düşük fakat nikelden yüksektir [13,14].

2.3 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri

KGDD malzemenin özellikleri çelik ile dökme demirler arasında yer alır. Mekanik özellikler yönünden çeliğe benzerken, kimyasal ve fiziksel özellikler dökme demirlere yakındır. Çekme mukavemeti, uygulanan ısı işlem ve alaşımlandırmaya göre 40 kg/mm² ile 80 kg/mm² arasında değişiklik gösterir. Akma noktası temper dökme demirlere göre çok fazladır. Bu sebeple küresel dökme demirler çok ağır yükleri şekil deformasyonu olmadan taşıyabilirler. Çizelge 2.1'de TS(526/1977) standardına göre KGDD sınıfı malzemeler verilmiştir [15].

Çizelge 2.1 : TS(526/1977) standardı KGDD malzemeler [15].

Sınıfı	Çekme day. Kg/mm ²	Akma day. Kg/mm ²	Uzama %	Sertlik BSN	Mikroyapı
DDAK 40	42	28	12	140-201	Daha çok Ferritik
DDAK 50	50	35	7	170-241	Ferrit+Perlit
DDAK 60	60	40	3	192-269	Perlit+Ferrit
DDAK 70	70	45	2	229-302	Daha çok Ferritik
DDAK 80	80	50	2	248-352	Perlitik
DDAK 35.3	35	22	22	-	Ferlitik
DDAK 40.3	40	25	18	-	Ferlitik

Mekanik özelliklerin istenilen değerleri sağlaması adına, KGDD'lerdeki küre sayısının yüksek olması (150-250küre/mm²) gerekir. Uygun sıcaklıklarda yeterli miktarda küreleştirici (Mg, Ce) ve küreleşmeyi destekleyecek elementlerin (Na, Ca) kullanımıyla, küre sayısı arttırılabilir [14].

KGDD'lerin aşınma direnci de oldukça yüksektir. Dinamik ve statik yükler altında gelişmiş güzel dağılmış gerilimlere karşı küresel dökme çok iyi mukavemet gösterir. Bu özelliklerinden dolayı, çoğunlukla dişli çark imalinde çeliğin yerine geçmeye başlamışlardır. Korozyon direnci açısından da küresel grafitli dökme demirler olumlu özellikler gösterirler. Deniz suyuna, alkollere ve zayıf asitlere karşı mukavimdirler. Çelikten beş defa daha iyi korozyon direnci ve yüksek mekanik mukavemete sahip olması dolayısıyla bilhassa, petrol ve kimya endüstrisinde, denizcilikte kullanılırlar [12,13,15].

2.4 Yükek Silisyumlu Küresel Grafitli Dökme Demirler

KGDD malzemelerin ferrit/perlit oranı, kimyasal bileşim ve soğuma hızına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Yüksek soğuma hızı perlit oluşumunu olumlu yönde etkilerken, büyük hacimli malzemelerin yüzey bölgelerinde soğuma hızı yüksek, iç bölgelerde ise soğuma hızı yavaştır. Bu sebeple malzemenin yüzeye yakın bölgelerinde perlit miktarı, iç bölgelerinde ise ferrit miktarı fazladır. Malzemenin mekanik özellikleri yüzey bölgesinden iç bölgelere doğru gidildikçe, ferrit ve perlit yapılarının farklı özellikte olmalarından dolayı sabit bir değeri göstermez. Perlit yapısının ferrit fazına göre daha sert olması, malzemenin sertlik dağılımının 170-230 HB aralığında farklı değerler göstermesine neden olabilir. Bu durum malzemenin işlenmesi sırasında kesici uç takım ömrünün kısılmasına ve zaman kaybına yol açar [16].

Geleneksel KGDD malzemenin, yetersiz kalan mekanik özelliklerini geliştirmek için yapılan çalışmalarda en çok öne çıkan, katı çözelti sertleştirme uygulamasıdır. Bu uygulamada küresel grafitli dökme demire belirli miktarda alaşım elementi ilave edilir ve en uygun alaşım elementi olarak silisyum kullanılır [17]. Silisyum ilavesiyle, KGDD malzemenin yapısı tamamen ferritik olurken, silisyum atomları yapı içerisinde demir atomlarının yerini alarak katı çözelti oluşturmaktadır. Bu sayede tek fazlı yapı elde edilirken, katı çözelti ile perlitin mukavemet artırıcı özelliği ortadan kaldırılır ve malzemenin sertlik dağılım aralığı 60 HB'den 30 HB'e düşer. Bu durum malzemeye işleme kolaylığı sağlarken, işlem zamanından ve maliyetinden kazanç getirir [17,18].

Ayrıca ferritik matrisin mukavemetinde, ferritik/perlitik yapıdaki ferritin mukavemetine göre %70 oranlarında bir artış sağlanmıştır. Böylece yüksek

silisyumlu ferritik küresel grafitli dökme demirler, geleneksel küresel grafitli dökme demirlerin yerine kullanılabilir hale gelmiştir [18].

2.4.1 Kimyasal bileşim

Geleneksel KGDD (birinci jenerasyon) olarak adlandırılan ferritik, perlitik ve ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demirler %1,8-2,8 aralığında silisyum içeriğine sahip iken, geliştirilmiş (ikinci jenerasyon) küresel grafitli dökme demirler ise %2,8-4,5 aralığında silisyum içeriğine sahiptir. Karbon miktarı, karbon eş değerini sabit tutabilmek için birinci jenerasyon küresel grafitli dökme demirlere göre daha düşüktür. Diğer elementlerin bileşimi birbirine yakın değerlerdedir [18,19].

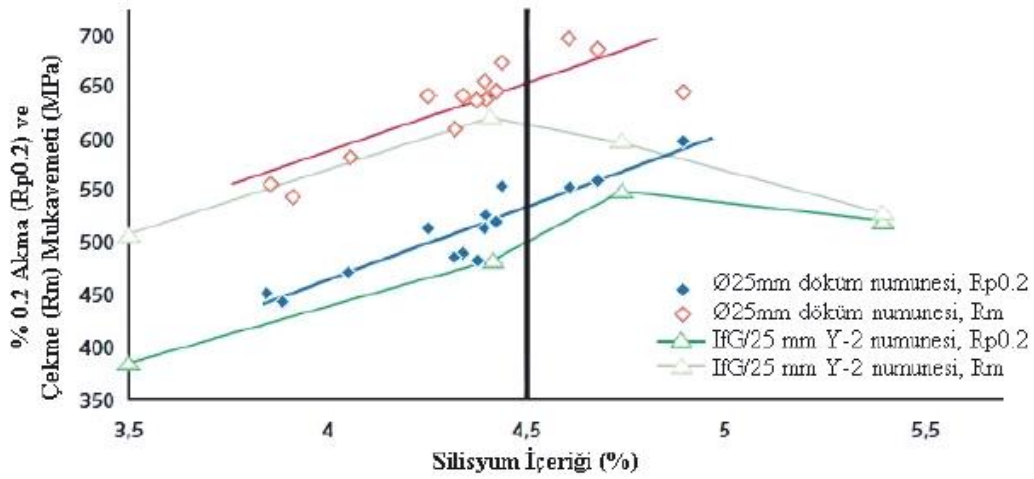
2.4.2 Sınıflandırma ve mekanik özellikler

İkinci jenerasyon KGDD malzemelerin mekanik özellikleri çizelge 2.2’de görüldüğü üzere, EN 1563:2011 standardına göre sınıflandırılmıştır.

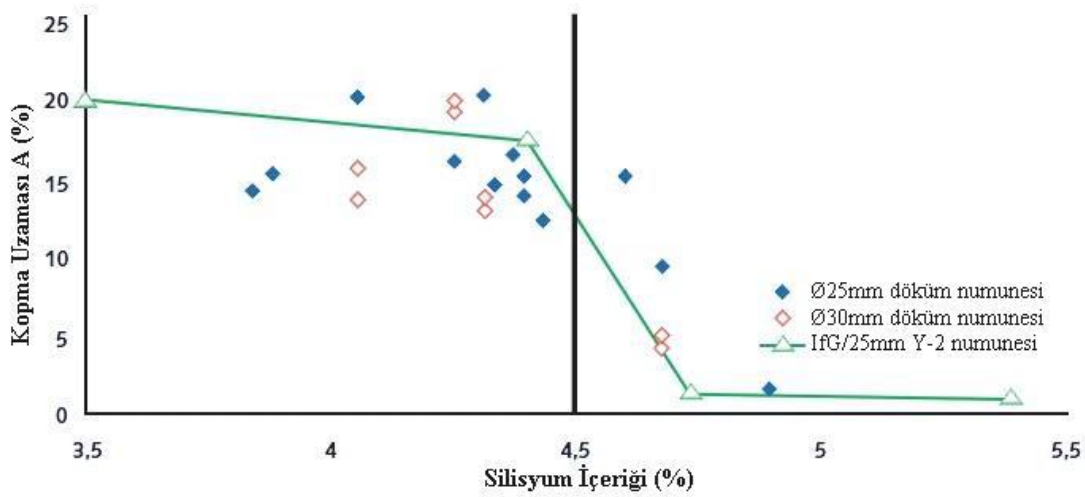
Çizelge 2.2 : EN 1563:2011 standardına göre katı çözelti sertleştirilmesi uygulanmış küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması [16].

Sembol	%0.2 Akma Muk. (Rp 0.2 MPa min.)	Çekme Muk. (Rm MPa min.)	Kopma Uzaması % min	Sertlik HB
EN GJS-450-18	350	450	18	130-175
EN GJS-500-14	400	500	14	185-215

Bileşimde silisyum miktarı arttıkça malzemenin mukavemeti, kırılgenliği ve sünek-gevrek geçiş sıcaklığı artar. Şekil 2.2’de silisyum içeriğinin malzemenin mekanik özelliklerine etkisi görülmektedir. Şekil 2.3’de görüldüğü üzere, malzemenin kopma uzaması, %4,5 silisyum içeriğinden sonra keskin bir düşüş göstermesi, silisyum miktarının üst sınırını belirlemektedir [18].



Şekil 2.2 : Yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirlerde silisyum içeriğinin malzemenin akma ve çekme mukavemetine etkisi [16].



Şekil 2.3 : Yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirlerde silisyum içeriğinin malzemenin kopma uzamasına etkisi [16].

İkinci jenerasyon yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirler, birinci jenerasyon küresel grafitli dökme demirlere göre mekanik özellikleri bakımından bazı üstünlüklere sahiptir. Bu üstünlüklerden en önemlisi, katı çözelti sertleştirmesi ile ferritik yapının mukavemeti artarken malzemenin sünekliğinin ve tokluğunun da artmasıdır. Çizelge 2.3’de EN-GJS-600-3 ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demir ile EN-GJS-600-10 yüksek silisyumlu ferritik küresel grafitli dökme demirin bazı mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.3 : EN-GJS-600-3 ile EN-GJS-600-10 kalite küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [16].

Sembol	%0.2 Akma Muk. (Rp 0.2 MPa min.)	Çekme Muk. (Rm MPa min.)	Kopma Uzaması % min	Sertlik HB
EN GJS-600-3	370	600	3	190-270
EN GJS 600-10	470	600	10	200-230

2.5 Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Isıl İşlemler

Küresel grafitli dökme demirler ısıtılma işlemlere uygun oldukları için, özellikleri çok geniş bir aralıkta değişecek şekilde üretilebilirler. Genel olarak, ısıtılma işlemler gerilim gidermek, döküm halindeki karbürleri parçalamak, matris yapısını değiştirmek, yüzey sertliğini arttırmak, temper gevrekliğini minimuma indirmek amacıyla, belli bir sıcaklık aralığında metalografik yapının değişim esasına göre uygulanır. Mühendislikte birçok alan için istenilen özelliklerin sağlanmasında, KGDD uygulanan başlıca ısıtılma işlemler aşağıdaki gibidir [18, 19].

2.5.1 Gerilim giderme ısıtılma işlemi

Bu işlem genellikle yüksek sıcaklıklarda boyut hassasiyeti gerektiren parçaların kullanımında, dökümden sonra kalan iç gerilmeleri azaltmak için tercih edilir. İç gerilmeleri en yüksek oranda gidermek için, parça (538°C- 677°C) sıcaklıklarda, 2 ile 6 saat arasında tutulur, sonrasında 340 °C'ye kadar düşük bir soğuma hızı ile soğutulur. Parçalar en son fırından çıkarılarak havada soğumaya bırakılır [19].

2.5.2 Tavlama

Bu islemin başlıca amacı mevcut karbürleri parçalamak ve ferritik bir matriks oluşturmaktır. Döküm parçalar 1–4 saat arasında 850–900 °C'de tutulur. Bundan sonra fırında çok yavaş olarak 650 °C ye kadar soğutulur. Sonra fırından çıkarılır ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Böylece döküm parçaya ferritik bir yapı kazandırılır [19].

2.5.3 Normalizasyon

Ötektoid altı çeliklerde A_{c3} sıcaklığının 30-50°C üzerinde ferrit- perlit yapısı elde etmek ve ötektoid üstü çeliklerde A_{c1} sıcaklığının 30-50 °C üzerinde perlit- karbür yapısı elde etmek için 1 il 4 saat arasında yapılan ısıtıl işlemidir, sonrasında havada soğutma ile uygulama tamamlanır [20].

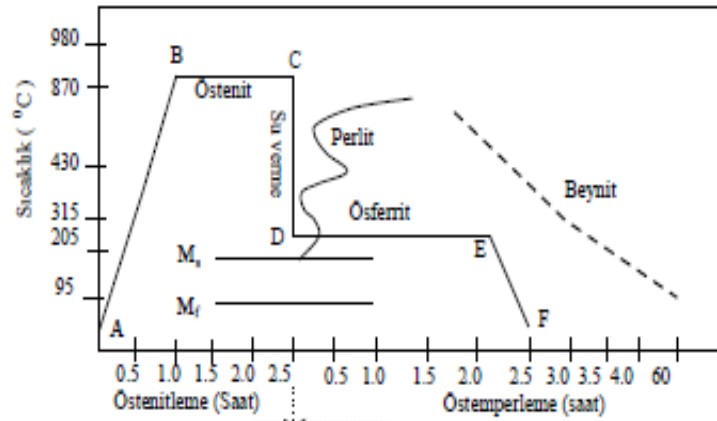
2.5.4 Östempereleme

Çeliğin 850-950°C sıcaklık aralığında 1-2 saat süreyle östenitlenmesinden sonra, 250- 450°C'lik sıcaklık aralığındaki tuz banyosunda hızla su verme işlemine tabi tutulduğu ve seçilen sıcaklık aralığında 1-4 saat bekletildikten sonra, oda sıcaklığına soğutulması adımlarını kapsayan izotermal bir ısıtıl işlemidir. Küresel grafitli dökme demirlerde gerçekleştirilen östempereleme ısıtıl işleminin amacı, yüksek karbonlu östenitin, beynitik ferrite dönüştürülmesidir [20].

3. ÖSTEMPERLEME ISIL İŞLEMİ

KGDD malzemelere uygulanan östemperleme ısıl işleminin amacı, mikroyapıyı küresel grafit ve ösferritik (yüksek karbonlu östenit ile birlikte karbür içermeyen ferrit) matris yapısına dönüştürmektir. Östemperleme ısıl işlemi genel olarak ikili veya kademeli olarak üç aşama ile tamamlanır [20].

İlk aşamada, KGDD malzeme 850- 950°C aralığındaki bir sıcaklığa ısıtılır ve bu sıcaklıkta 15-120 dakika bekletilir. Sonuçta matris yapısı tamamen östenite dönüşür. Östenitteki karbon içeriği, seçilen östenitleme sıcaklığına ve KGDD malzemenin kimyasal bileşimine bağlıdır. İkinci aşamada ise, östenitlemeden sonra malzemeye ve 250-450°C sıcaklık aralığındaki bir tuz banyosu içerisinde su verilir ve bu sıcaklıklarda 0.5- 4 saat aralığında bekledikten sonra malzeme oda sıcaklığına soğutulur. Östemperleme ısıl işlem döngüsü şematik olarak Şekil 3.1’de gösterilmiştir [21].



Şekil 3.1 : KGDD'lere uygulanan izotermal dönüşüm diyagramının şematik gösterimi [21].

3.1 Östenitleme

Östenitleme işlemi, dökme demirin mikro yapısının tamamen östenit fazına dönüşebilmesi için 850-900°C sıcaklıklarında 1-2 saat bekletilmesiyle yapılmaktadır. Malzeme içerisindeki alaşım elementleri, östenitleme sıcaklığı ve süresi seçiminde dikkate alınır ve bu parametreler östenitleme sırasında malzemenin mikroyapısındaki

değişimi doğrudan etkiler. Östenitleme süresi, yapı içerisindeki perlit miktarının artmasıyla büyük oranda azalmakta, Si içeriğinin artmasıyla artmakta ve küre sayısının artmasıyla az oranda azalmaktadır. Östenitleme sıcaklığı yüksek ve uzun süreli olursa östenitin içerdiği karbon oranı artmakta tersi durumda ise martenzit oranını artmaktadır [21].

3.2 Östempereleme

Östenit fazına geçmiş numuneler, 250-450°C aralığındaki tuz banyolarına perlit dönüşümünü önleyecek hızda soğutulur ve ardından seçilen sıcaklıkta yüksek karbonlu östenit ile karbürsüz ferritten meydana gelmiş beynitik bir matriks yapının oluşumu için 1-4 saat bekletilir. Son olarak havada soğutma işlemi gerçekleştirilir [20]. Alaşımsız küresel grafitli dökme demir, perlit dönüşümünü önlemek için yaklaşık 20 saniyede, %0.5 Mo'li KGDD 2 dakikada, %5 Mo ve %2,37 Ni ilaveli KGDD ise 10 dakika içerisinde östenitleme sıcaklığından östempereleme banyosuna aktarılmalıdır. Östempereleme sonrası oluşan mikroyapıda östempereleme süresi ve sıcaklığı önemli rol almaktadır. Yapılan araştırmalarda ~350°C'nin altındaki sıcaklıklarda oluşan yapının ince ösferritik (alt beynit) yapı, üzerindeki sıcaklıklarda ise kaba ösferritik (üst beynit) yapının oluştuğu bulunmuştur [21].

Östempereleme iki kademededen oluşan bir işlemdir. Birinci kademedeki östenitik yapı beynitik ferrite ve karbonca yüksek östenite dönüşmektedir. İkinci kademedeki ise yüksek karbonlu östenit, ferrit ve karbüre dönüşmektedir.

I.Kademe: γ (Östenit) $\rightarrow \alpha_b$ (Beynitik ferrit) + $\gamma_{y,k}$ (Yüksek karbonlu östenit)

Bu aşamada dökme demirlerde yüksek Si içeriğinden dolayı izotermal bekleme sırasında, östenit çeliklerin tersine doğrudan beynitik ferrit + karbüre dönüşmez, bunun yerine beynitik ferrit + yüksek karbonlu östenite (kararlı östenite) dönüşür [22]. Eğer I. Kademedeki östempereleme süresi azaltılarak oda sıcaklığına soğutma başlatılırsa, östenit karbonca doyamaz ve ösferrite dönüşümü tamamlanmadan martenzite dönüşür, oluşan martenzit mekanik özellikleri olumsuz etkiler.

II. Kademe: $\gamma_{y,k}$ (Yüksek karbonlu östenit) $\rightarrow \alpha$ (ferrit) + Karbür [22].

İkinci kademedeki yüksek karbonlu östenit, ferrit ve karbüre dönüşür. Uzun östempereleme süresinin difüzyonu kolaylaştırmasıyla, yüksek karbonlu östenitteki karbon atomları karbüre dönüşür ve östenit ferrite bozunur. Böylece östempereleme süresi uzamasıyla, yüksek karbonlu östenit miktarı azalırken ferrit ve karbür

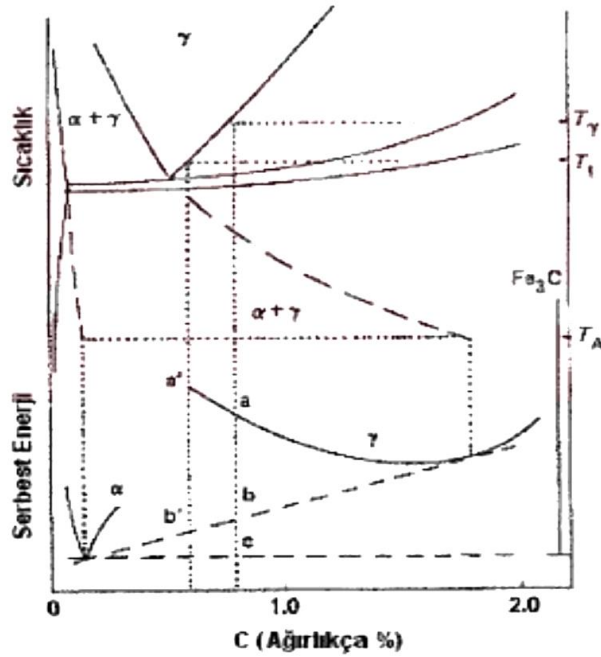
miktarında artış olmaktadır. Karbürler malzemenin sünekliğini ve tokluğunu önemli ölçüde düşürür. Buna bağlı olarak da malzemenin sertliği ve dayanımı artar [22].

3.3 Östempereleme Sürecini Etkileyen Faktörler

Östenitleme süresi ve sıcaklığı, östempereleme süre ve sıcaklığı, KGDD malzemenin kimyasal kompozisyonu östemperelemeyi etkileyen en önemli faktörlerdir.

3.3.1 Östenitleme sıcaklığı ve süresinin etkileri

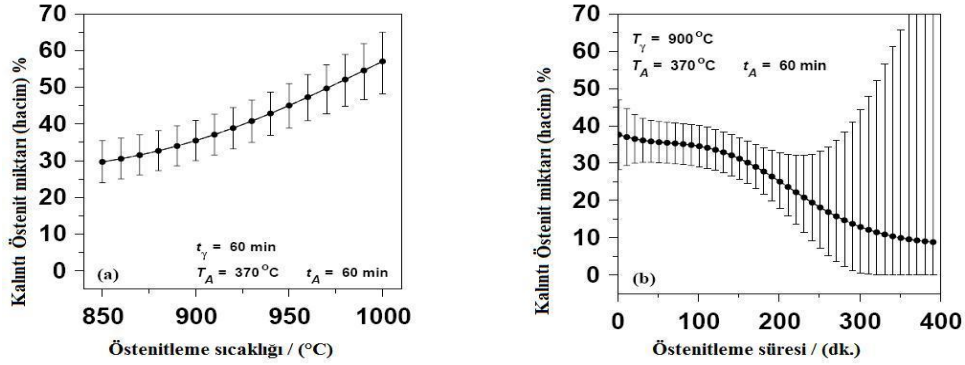
Östenitleme sıcaklığı, östempereleme sırasında faz dönüşümlerinin itici gücü üzerine etki ederek mekanik özelliklerin değişmesinde büyük rol oynar. Östenitleme sıcaklığı düşürüldüğünde, I. kademe reaksiyonu için itici güç artar ve itici gücün artırılması, daha hızlı dönüşüme yol açan daha fazla çekirdeğin oluşmasını sağlar. Bu etki aşağıdaki şekil 3.2'deki serbest enerji- kompozisyon grafiğinden çıkarılabilir [22].



Şekil 3.2 : Fe-C-Si (%2) faz diyagramında östempereleme sırasında serbest enerji değişiminin şematik gösterimi [22].

Yüksek östenitleme sıcaklığı T_γ 'nın, düşük östenitleme sıcaklığı T_1 'e getirilmesiyle birlikte, östenit karbon içeriği azalır, ferritin çekirdeklenmesi artar. Bunun sonucunda beynit oluşumu artar ve büyüyen ferrit tabakçıklarından östenite daha fazla karbon atılır [21, 22]. Üstelik östenitleme sıcaklığının düşürülmesi ile işlem aralığına daha kısa östempereleme süreleri sonucunda ulaşılır ve östemperelemeden sonra oluşan

mikroyapı daha kararlı olur, daha az martenzit içerir. Östenitleme sıcaklığı ve süresi arttırılması, östenit oluşumunun hızlanmasına, östenit tanelerinin büyümesine ve östemperleme sürecinde daha uzun beynitik ferrit ve kaba bir mikroyapının oluşmasına neden olur. [22]. Aşağıdaki şekil 3.1’de görüldüğü gibi, optimum mekanik özelliklerin 900-925°C arasında 1-3 saat östenitleme şartlarında gerçekleşmiştir [21].

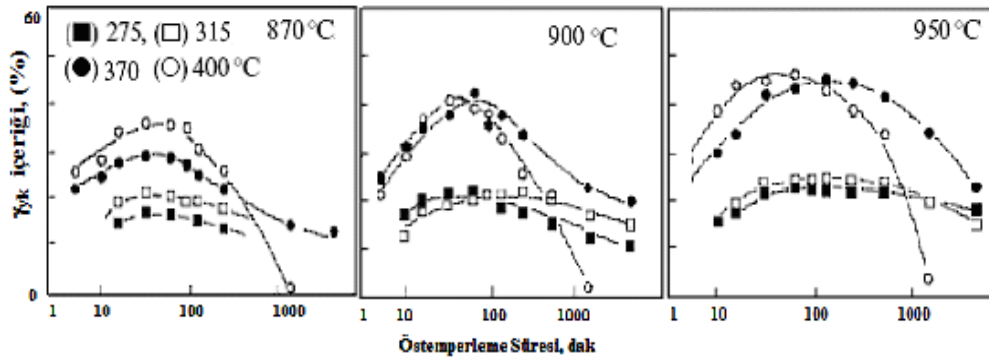


Şekil 3.3 : Östenitleme sıcaklığı ve süresinin kalıntı östenit miktarına etkisi [22].

Östenitleme işlemi için düşük sıcaklıklar tercih edildiğinde, kararlı östenit oluşur, karbon ve kalıntı östenit miktarında azalma görülür ve malzemenin sünekliği artar. Östenitleme işlemi için yüksek sıcaklıklar tercih edildiğinde, yüksek karbonlu östenit oluşur, karbon ve kalıntı östenit hacmi artar, östemperlenmiş yapı kabalaşır [22].

3.3.2 Östemperleme sıcaklığı ve süresinin etkileri

KGDD malzemelerde istenilen mekanik özelliklerin ve aşınma direncinin elde edilebilmesi için östemperleme sıcaklığı ve süresinin seçimi önemli bir parametredir.58 Östenitleme ve östemperleme sıcaklığı ile ilişkili olarak östemperleme süresinin γ_{yk} içeriğine etkisi aşağıdaki şekil 3.4’te gösterilmiştir [23].



Şekil 3.4 : Östemperleme süresine bağlı olarak γ_{yk} içeriğindeki değişim [23].

Şekil 3.4'te görüldüğü gibi östenitleme süresine bağlı olarak farklı östemperleme sıcaklıklarında maksimum yüksek karbonlu östenit içeriği sırasıyla yaklaşık, 80, 60 ve 40 dakika östemperleme sürelerinde oluşmaktadır. Östemperleme süresinin uzamasıyla tüm östenitleme sıcaklıklarında yüksek karbonlu östenit içeriğinin azaldığı görülmektedir.

Östemperleme sıcaklığı oluşacak mikro yapının belirlenmesinde ve buna bağlı mekanik özelliklerin değişiminde öncelikli olarak rol almaktadır. Östemperleme ısı işlemi için 250-450°C sıcaklık aralığı seçildiğinde, 235- 330°C sıcaklıkları arasında alt ösferrit (daha fazla ferrit ve daha az kalıntı östenit) oluşur, bu yapı yüksek dayanımlı, sert ve aşınmaya karşı dirençlidir. 370 – 450°C sıcaklıkları arasında olursa üst ösferrit (daha az ferrit ve daha fazla kalıntı östenit) yapı oluşur, bu yapının dayanımı daha düşüktür çünkü alt ösferrite göre daha az martenzit içerir; fakat sünekliği ve tokluğu daha yüksektir [22,23].

Seçilen östemperleme sıcaklığı I. ve II. Kademe reaksiyonlarının oluşum hızını etkiler ve alt ve üst beynit yapıları bu kademelere bağlı olarak oluşur. I.Kademede östenit, ferritten difüzyon yoluyla gelen karbonu alarak zenginleşir ve bu durum optimum özelliklerin elde edildiği bir yapıyı ortaya çıkartır. Optimum özellikleri elde edebilmek I. Kademe reaksiyonunun hızını kontrol etmek gerekir. Reaksiyonun hızını belirlemede östenitlenmiş karbon oranı (C_{γ^0}) ile östemperlenmiş matriksin karbon oranı ($C_{\gamma^{maks}}$) arasındaki fark önemli bir faktördür. Buna göre ($C_{\gamma^{maks}} - C_{\gamma^0}$) arasındaki oran artarken, reaksiyon hızı da artmaktadır, oran azaldığında ise yapıdaki dönüşmemiş östenit miktarı artmaktadır. Östenitleme sıcaklığı arttıkça östenitlenmiş matriksin karbon oranı C_{γ^0} artarken, östemperlenmiş matriksin karbon oranı($C_{\gamma^{maks}}$) azalmaktadır. Çizelge 3.1'de östenitleme sıcaklığına göre değişen, östenitlenmiş ve östemperlenmiş matriksin karbon oranları gösterilmiştir [22,23].

Çizelge 3.1: Östenitleme sıcaklığına bağlı olarak östenitlenmiş (C_{γ^0}) ve östemperlenmiş ($C_{\gamma^{maks}}$) matriksteki dengesel karbon oranı [22].

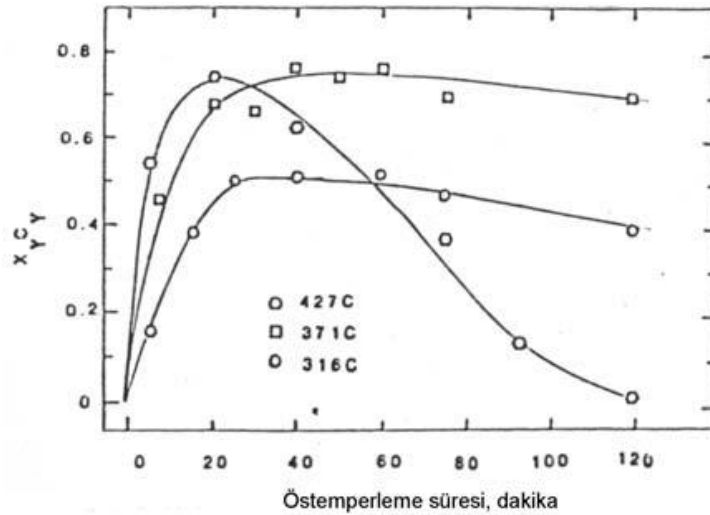
Östenitleme Sıcaklığı, C°	C_{γ^0}	$C_{\gamma^{maks}}$
850	0.73	2.29
900	0.87	2.26
950	1.05	2.11

II. kademe reaksiyonun hızı, östemperleme sıcaklığına olduğu kadar küresel grafitli dökme demirlerin bileşimine de doğrudan bağlıdır. II. Kademe sırasında, yüksek

karbonlu östenit, beynitik ferrit ve karbüre ayrıştığı için, östemperleme sıcaklığı azaldıkça karbür oluşumu daha uzun bir östemperleme süresi gerektirir [22].

Yüksek östemperleme sıcaklıklarında $C\gamma^{\text{maks}}$ (östemperlenmiş matriksin karbon oranı) değerinin küçülmesine bağlı olarak $X\gamma$ (östenitin hacim oranı) değeri artar, düşük östemperleme sıcaklıklarında ise östenitin hacim oranı azalır. $C\gamma \cdot X\gamma$ çarpımı östenit fazındaki toplam karbon oranını verir. Östemperleme işlemi sırasında karbonun bir kısmı yapıda karbür olarak veya ferritfazında aşırı doymuş durumda ise, $C\gamma \cdot X\gamma < C\gamma^0$ olacaktır [22,23].

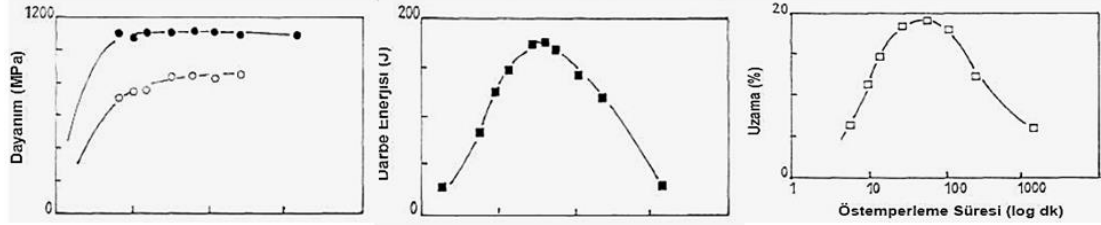
Şekil 3.5te'da az alaşımlı bir dökme demirin 371°C ve 427°C'de östemperlenmesinde $C\gamma \cdot X\gamma$ çarpımının yaklaşık 0.8 değerine ulaştığı görülmektedir. 316°C'de ise bu çarpım yaklaşık 0.5 değerine ulaşmıştır. Böylece 371°C ve 427°C'de çok az veya hiç karbür oluşmadığı anlaşılmaktadır. 427°C'de $X\gamma \cdot C\gamma$ (östenit fazındaki toplam karbon miktarı) ifadesinin yaklaşık 0.8değerinde maksimuma ulaşması ve II. kademe reaksiyonunun tamamlanması çok kısa bir sürede, 371°C' de ise daha uzun bir sürede gerçekleşmektedir. Sonuç olarak östemperleme sıcaklığının artmasıyla II. Reaksiyonun hızı artar ve reaksiyon daha kısa sürede tamamlanır [21, 23].



Şekil 3.5 : 927°C'de östenitlenmiş bir küresel grafitli dökme demirde çeşitli östemperleme sıcaklıkları ve sürelerinde $X\gamma \cdot C\gamma$ ilişkisi [23].

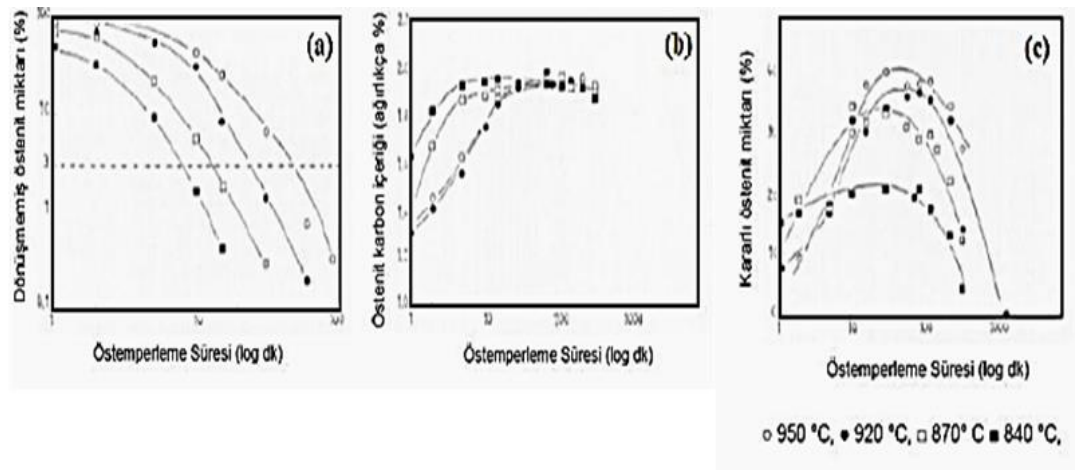
Östemperleme işleminde, sıcaklığın yanı sıra süre seçimi de önemli bir parametredir. Malzemenin dayanımı, sünekliği ve darbe direnci, östemperleme süresinin artmasıyla birlikte artarken sertlik azalır. Süre çok az seçildiğinde, matriste büyük oranda martensit oluşur ve bu durum mekanik özellikleri düşürür. Östemperleme süresi arttıkça martensit içeriği azalır, bunun yanında α ve γ_{yk} miktarları artar. Çok uzun

östemperleme sürelerinde dayanım yaklaşık olarak sabit kalırken, süneklik ve darbe enerjisi II. kademe reaksiyonunun oluşması ile hızlı bir şekilde azalır, reaksiyon ilerledikçe yapıdaki γ_{yk} miktarı azalır . Östemperleme süresine bağlı olarak değişen mekanik özellikler Şekil 3.6’da gösterilmiştir [23].



Şekil 3.6 : Östemperleme süresinin mekanik özellikler üzerine etkisi [23].

Östemperleme süresinin artmasıyla süneklik, dayanım ve darbe direnci artmaktadır. Östemperleme süresinin daha da artırılmasıyla süneklik ve tokluk düşerken dayanım bir miktar artmaktadır. Bunun nedeni aşağıdaki şekil 3.7’de görüleceği gibi, östemperleme süresinin artması ile birlikte beyritik ferrit + yüksek karbonlu östenit (kararlı östenit) miktarının da artmasıdır [23].



Şekil 3.7 : Östenitleme sıcaklığı ve östemperleme süresine bağlı olarak;
a) dönüşmemiş östenit, b) östenit karbon içeriği, c) kararlı östenit miktarlarının değişimi [23].

Östemperleme süresinin artarken karbür çökmesinin de artması, süneklik ve tokluğu düşürür; östemperleme süresinin azalmasıyla karbonun difüze olması için yeterli zamanın kalmamaması yapıda martenzit oluşturur ve martenzit malzemede sertliği artarken süneklik ve darbe direnci düşürmektedir.

3.3.3 Küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal kompozisyonu

ÖKGDD’lerde en elverişli mikroyapı ve mekanik özellikleri elde etmek için malzemenin kimyasal kompozisyonu önemli bir faktördür. Östemperleme işleminin başarısı, KGDD malzemenin ısıtılma sırasında yapı içerisinde perlit oluşmadan dönüşebilmesiyle ölçülür. Başarılı bir östemperleme için, küresel grafitli dökme demir parçaların kritik çap (D_c) değerlerinin hesaplanması bir diğer dikkat edilmesi gereken parametredir. Kritik çap, ilave edilen alaşım elementleri ile değişmektedir ve alaşım ilavesi arttıkça numune kritik çapı da artmaktadır. Sertleştirilebilirlik için kritik çap (D_c) aşağıdaki şekilde hesaplanır [24].

$$D_c = 124C_\gamma + 27(\%Si) + 22(\%Mn) + 16(\%Ni) + 25(\%Mo) - 1.68 \times 10^{-4} T_A^2 + 12(\%Cu)(\%Ni) + 62(\%Cu)(\%Mn) + 88(Ni)(\%Mo) + 11(Mn)(\%Cu) + 127(\%Mn)(\%Mo) - 20(\%Mn)(\%Ni) - 137 \quad (3.1)$$

Burada;

T_A , östemperleme sıcaklığı, C_γ östenitlemeden sonraki östenitin karbon içeriğidir.

Yukarıdaki denklemde görüldüğü gibi, alaşım elementi ilavesi kritik çapı dolayısıyla küresel grafitli dökme demirin östemperlenebilirliğini artırma yönündedir. Bu etkinin sebebi, TTT diyagramının sağa doğru kayması, dolayısıyla östenitleme sıcaklığından östemperleme sıcaklığına soğuma sırasında perlit oluşumuna izin vermeyecek kritik soğuma hızının artmasıyla açıklanabilir [23, 24].

Yüksek oranda alaşım ilavesi östemperleme süresini uzatır böylece γ_{yk} hacmi azalır ve yapı karbürize eder. Bu nedenle ilave edilecek alaşım elementlerinin miktarları sertleştirilebilirliği sağlayacak minimum seviyede seçilmelidir. ÖKGDD içerisinde Si ve Mn gibi alaşım elementleri kendiliğinden vardır. Bu alaşım elementleri ÖKGDD malzemenin mekanik özelliklerini etkileyecek derecede önemli bir role sahiptir. Mn ve Mo elementlerinin tane sınırlarına segregasyonu yüksek olduğu için, ÖKDD’deki içeriği arttırıldığında bu bölgelerde kırılgan faz oluşur ve östemperleme reaksiyonunun bu bölgelerde tamamlanması gecikir. Dolayısıyla akma dayanımı, uzama ve çekme dayanımı gibi mekanik özellikler azalır. Bu nedenle ÖKGDD malzemeye mükemmel mekanik özellikler kazandırmak ve kırılma tokluğunu yükseltmek için Mo ilavesinden kaçınılmalı, Mn içeriği ise oldukça minimum seviyede tutulmalıdır [25].

Küresel grafitli dökme demirlerlere en çok ilave edilen alaşımlama elementlerinin ısıtılmasına etkileri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Karbon: KGDD'lerde karbon oranı % 3.6-3.8 arasında tutulmalıdır. Bu aralıktaki karbon içeriği malzemenin çekme dayanımını yükseltirken uzama ve sertliğini düşürür(1 k4). Karbon miktarı aşırı yükseldiğinde, grafitler küresellikten sapar ve mekanik özellikler olumsuz etkilenir [25,21].

Silisyum: ÖKGDD'lerde Si ötektoid sıcaklığını yükseltir ve ösferritik yapı içerisinde karbür oluşumunun önüne geçer. Bu nedenle, ÖKGDD'lerdeki en önemli alaşım elementlerinden birisidir. Si artmasıyla birlikte ÖKGDD'in darbe dayanımı artarken, sünek-gevrek geçiş sıcaklığı düşer. Si, KGDD'lerde % 1,8 – 2,8 arasında değişmektedir ve mikroyapıda küresel grafitlere yakın bölgelerde yüksek oranda bulunur [25, 26].

Silisyum miktarı arttıkça, küresel grafitli dökme demirin östemperlenebilirliğinde önemli olan kritik çapın (D_c) değeri de artar. Silisyum miktarındaki %0.3'lük bir artış D_c 'yi 7.6 mm arttırır. Ni ile beraber kullanıldığında grafitin şeklinin bozulmasına yol açar, ferrit oluşumunu teşvik edip küreselleşmeyi engeller. [26]

Manganez: Mn, hücreler arası bölgelerde yoğun şekilde segrege olarak bu bölgelerde karbür oluşumunu teşvik eder ve östemperleme reaksiyonunu geciktirir (19). Küresel grafitli dökme demir bileşiminde manganez arttıkça, östenitteki karbon çözünürlüğü ve östenitin kararlılığı artar. Östenit dönüşümü esnasında, karbon difüzyonunu azaltır; bu, östeniti zenginleştirmek için gereklidir[26]. Manganez, yapıda önemli miktarda kalıntı östenit kalmasına sebep olur. ÖKGDD malzemelerde %0.3 ile sınırlandırılır, çünkü daha fazlası süneklik ve tokluğu düşürür sertleşebilirliği arttırır [27].

Molibden: Mo, ÖKGDD'lerde sertliği arttırmak adına yaygın olarak kullanılan bir elementtir. Manganez ile benzer olarak, hücreler arası bölgelerde segregasyon eğilimine sahiptir; fakat Mg'den farklı olarak östemperleme süresini kısaltarak östeniti değil ferriti kararlı yapar. Mo'nin sertleşebilirliğe etkisi Cu veya Ni ile birlikte kullanıldığında daha yüksektir, ayrıca sertleşebilirliğe etkisi bakırdan on kat fazladır [26]. Güçlü segregasyon eğiliminden dolayı, alaşımlama seviyesi %0.3 ile sınırlandırılmalıdır çünkü bu değer üzerindeki içeriklerde, Mo tane sınırlarında ayrışır ve bu bölgelerde karbür oluşumunu tetikler, bu durum küre sayısının

arttırılması ile azaltılabilir [27].

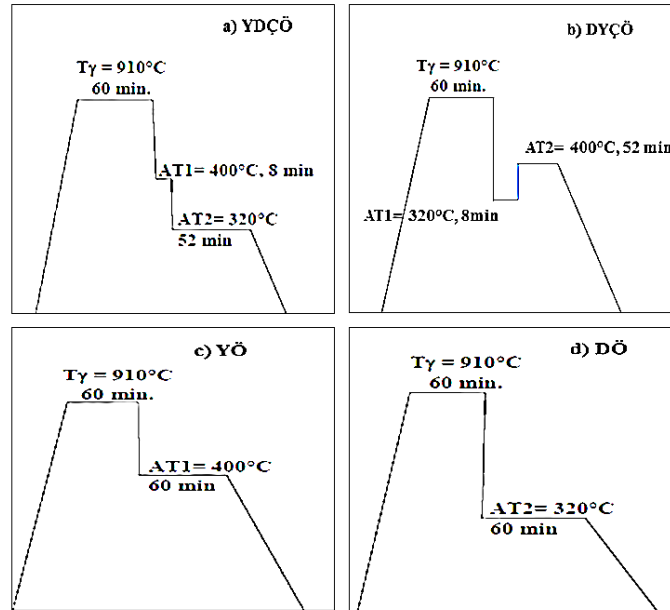
Bakır: Cu, ÖKGDD malzemelerin sertliğini artırma kullanılan en sık elementlerden biridir. Genellikle %1 dolayında kullanılır. ÖKGDD'lere bakır ilave edilmesinin en önemli faydası, Mn veya Mo elementlerinin minimum miktarda ilave edilmesini sağlamaktır. Molibden ile birlikte kullanıldığında, sertleşebilirliğe olan etkisi ikisinin ayrı ayrı kullanılması durumundan daha yüksektir [26]. Bakır, yüksek kalitede perlitik yapı sağlamakta, küre sayısını ve küreselliği arttırmaktadır. Artan bakır miktarı ile kalıntı östenitin hacim oranı artar, dolayısıyla alt beynit yapısında karbür oluşumunu engellenir. Ni ve Mo kombinasyonları ile istenilen matris yapısına sahip (perlitik, martensitik) malzeme elde edilebilmektedir [27].

Nikel: Östemperleme sırasında ötektik karbürlerin önlenmesi için kullanılan alaşım elementidir. Malzemeyi östemperleme sıcaklığında daha uzun sürede tutma imkanı sağlayarak, yüksek karbonlu östeniti kararlı kılar. 300-400°C sıcaklıkları arasında östemperlenmiş KGDD malzeme, %1'in altında nikel içeriyorsa çekme dayanımı, sertlik ve sünekliğinde belirgin bir değişim oluşmaz; fakat östemperleme sıcaklığının 350°C'nin altında, Ni içeriğinin %1-4 aralığında yapıldığı östemperleme işlemlerinde, çekme dayanımı düşer, süneklik ve kırılma tokluk ise yükselir. Yüksek Ni içeriği segragasyona neden olur ve yapıda farklı beynitik dönüşüm hızları oluşturur. Segregasyon etkisinin önlenmesi ve homojen beynitik bir dönüşümün sağlanabilmesi için Mn ile birlikte ilave edilmelidir. 400°C'nin altındaki östemperleme sıcaklıklarında nikel ve molibdenin birlikte ilave edildiğinde, molibden karbür çökmesinin önüne geçer ve malzemenin sünekliği artırır [28].

3.4 Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Çift Kademeli Östemperleme

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler, süneklik ve kopma mukavemetlerinin başarılı uyumu, yüksek yorulma dayanımı ve düşük üretim maliyeti özellikleri ile endüstrideki farklı kullanım alanlarında (krank milleri, vites takımları, yapı parçaları gibi) dövme çeliklerin yerini almıştır. Bu üstün özellikler ÖKGDD malzemelerin mikroyapılarında ösferrit olarak adlandırılan, ferrit iğneleri ve kararlı yüksek karbonlu östenitten oluşan karışımın bulunmasından kaynaklanmaktadır. Ösferrit oluşumu için yapılan geleneksel östemperleme ısı işlemi iki kademedен oluşur. İlk olarak, östenit ferrit ve yüksek karbonlu östenite ayrışır. İkinci aşamada, yüksek karbonlu östenit ferrit ve karbürlere ayrışır. Karbürler

malzemeyi gevrekleştirirken, ikinci aşamada mikroyapıda dönüşmeyen kalıntı östenit oluşursa bu östenit oda sıcaklığına soğutulurken martenizite dönüşebilir. Bu iki işlem arasındaki süre farkına işlem aralığı denir ve en iyi mekanik özellikler bu işlem aralığında oluşur. Bu işlem aralığının kademeli östempereleme işlemi ile genişleyeceği ve böylece mekanik özelliklerin iyileşeceği yapılan çalışmalarda ortaya çıkarılmıştır [28]. Putatunda ve arkadaşları %2.42 silisyum içeren KGDD numunesine 2 farklı şekilde, kademeli östempereleme ısı işlemi uygulamıştır. Şekil 3.8’de görülebileceği gibi, yüksek-düşük çift östempereleme adını verdikleri ilk işlemde, numune östenitleme ısı işleminden sonra 400C°’de östemperelemeye alınmış, bir süre bu sıcaklıkta bekletildikten sonra numune 320C°’de tekrar östemperelemiştir. Bu işlem ile numunenin kırılma tokluğunun ve sertliğinin geleneksel östempereleme işlemine göre arttığını belirtmişlerdir. Düşük- yüksek çift östempereleme olarak adlandırdıkları diğer östempereleme işleminde, numuneyi östenitleme işleminden sonra aşırı soğutma ile 320C°’ye getirerek bir süre bu sıcaklıkta östemperelemişler, sonrasında numuneyi 400C°’de tekrar östempereleyerek oda sıcaklığına soğutmuşlardır. Bu işlemde, yüksek östenitleme sıcaklığından düşük östenitleme sıcaklığına geçiş ile ferrit çekirdeklenmesi artmış, yüksek sıcaklıkta östemperelemeye geçiş ile difüzyon oranı ve östenitteki karbon oranında artış sağlanmış ve kırılma tokluğu ile sertlikte geleneksel östempereleme işlemine göre artış gözlemlenmiştir [29].



Şekil 3.8: Çift kademeli (a ve b) ve tek kademeli östempereleme işlemlerinin örnek şematik gösterimi [29].

4. ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

ÖKGDD'lerin mikro yapısında küresel grafitler ve ösferritik olarak isimlendirilmiş ferrit ve yüksek karbonlu östenit (γ_{yk}) karışımı bulunmaktadır. Yüksek karbonlu östenit ve ferritin uygun oranlardaki seçimi, ÖKGDD malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirir. Olumsuz bir özellik olarak, östenit fazının yanında düşük miktarda martensit veya karbür bulunur [24].

Matris içerisindeki ösferritin kimyasal kompozisyon ve ısıtım işlem şartlarıyla değişikliğe uğramasıyla malzemenin mekanik özellikleri değişir. KGDD malzemeler, 350-800 MPa aralığında çekme dayanımına, % 2-18 uzama değerlerine sahipken, ÖKGDD malzemeler 800-1600 MPa aralığında çekme dayanımına ve % 1-10 aralığında uzama değerlerine sahiptirler [28].

Ayrıca ÖKGDD'ler çelik malzemelere göre; düşük malzeme ve üretim maliyeti, %10 daha düşük yoğunluk, iyi işlenebilirlik ve yüksek titreşim söndürme kabiliyetine sahiptir [26].

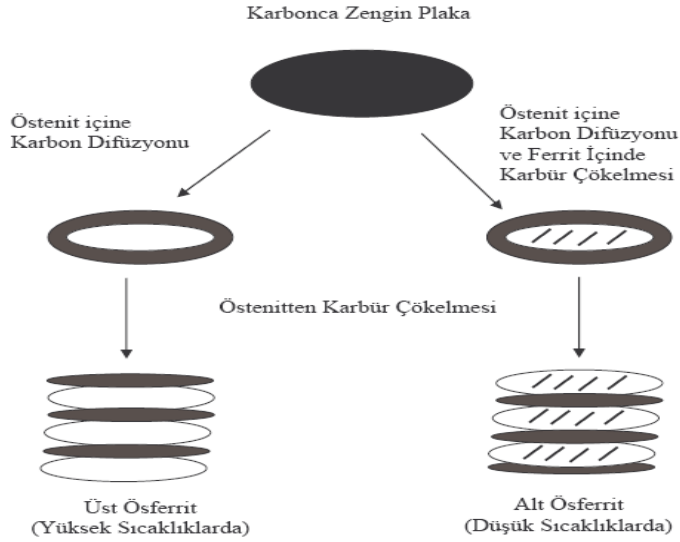
4.1 Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mikro Yapıları

ÖKGDD mikro yapısının asiküler ferrit (α) ve ve yüksek karbonlu östenit (γ_{yk}) bileşiminden meydana gelmektedir. Oluşan bu yapı sünekliği artırır. Diğer bileşenler ise martenzit, karbürler ve az da olsa perlittir, bu bileşenler malzemenin sünekliğinin azaltma eğilimi gösterir. Östemperleme ısıtım işleminde meydana gelen mikro yapısal değişimler sırasıyla aşağıda belirtilmiştir [23].

4.1.1 Üst ösferrit

Küresel grafitli dökme demirlerin 340-400°C aralığındaki sıcaklıklarda östemperlemesiyle oluşan morfolojidir. Aşağıdaki şekil 3.5'te görüleceği gibi, üst ösferrit kaba ferrit plakaları içerir ve her bir plakanın kalınlığı yaklaşık 0.06 μm , östenit plakalarının ise 0.18 μm 'dir [23]. Her bir plaka birbirine paraleldir ve kristalografik oriyantasyonla birbirinden ayırma yapılmasına imkan sağlar. Bu

malzemenin sertliği 200 ile 350 BS arasında değişmektedir. Bu malzeme yüksek süneklik ve tokluk ile birlikte yüksek yorulma dayanımı ve aşınma direnci özelliklerine sahiptir. Bu malzemelerin işlenebilirliği iyidir ve yaygın olarak yapısal uygulamalarda kullanılır [24].



Şekil 4.1: Alt ve üst ösferritin oluşum mekanizması [24].

4.1.2 Alt ösferrit

Küresel grafitli dökme demirlerin 250-330°C aralığındaki sıcaklıklarda östemperlemesiyle oluşan morfolojidir. Alt ösferrit üst ösferrite benzer mikroyapısal ve kristalografik özellikler gösterir. Bu iki yapıyı birbirinden ayıran en önemli özellik, alt ösferrit dönüşümün düşük sıcaklıklarda oluşması, buna bağlı olarak da ferrit plaklarının içinde karbürlerin çökeltilerinin meydana gelmesidir. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, alt ösferritte iki tür karbür oluşmaktadır; γ_{yk} 'den büyüeyen ve karbona aşırı doymuş ferritin iç kısmında çökelenlerdir. Bu malzeme yüksek sertliğe (≥ 400 BS) sahiptir. Özellikle dişli çark üretiminde ve diğer yüksek temas gerilimine ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılmaktadır [25,26].

4.1.3 Östenit

Östenit yüksek sıcaklıkta ÖKGDD ısıtma işlem aşamasında oluşur. Östenitin karbon içeriği östemperleme sıcaklığına bağlı olarak değişir. Östenit, ösferrite dönüşümü ve karbonca zenginleşmesi nedeniyle oda sıcaklığında kendini muhafaza edebilmektedir [26].

4.1.4 Martensit

Seçilen östemperleme süresi, dönüşümün tamamlanması için yeterli olmadığında; karbonca zenginleşmemiş bir miktar östenitin oda sıcaklığına soğutma aşamasında martensit oluşabilir. Östemperleme süresi yeterince seçilmezse, fazla miktarda alaşım ilavesi de segregasyona neden olduğu için, segregasyon bölgeleri içerisinde reaksiyon tamamlanamaz. Bu nedenle karbonca yeterince zenginleşemeyen östenit, soğutma sırasında martensite dönüşür. Ayrıca, yüksek sıcaklıkta östenitleme işleminden sonra, yine yüksek sıcaklıklarda östemperleme işlemi uygulandığında, başlangıç östenitin karbon içeriğinin yüksek olmasından dolayı, östenitin tamam reaksiyona giremez, dolayısıyla reaksiyona giremeyen östenitler oda sıcaklığına soğutma sırasında martensite dönüşür [26].

4.1.5 Karbürler

ÖKGDD bulunan yüksek silisyum içeriği sementitin çökmesini engeller ve silisyum çok düşük çözünebilirliğe sahiptir. Bu nedenle, karbür çökeltilerinin östenit içerisinde veya asiküler ferrit içerisinde vuku bulması kimyasal kompozisyona ve ısı işlem sıcaklığına bağlıdır. Östemperleme süresinin çok uzun olması durumunda γ_{yk} , karbür ve ferrit karışımına ayrışır [24].

4.2 Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri

KGDD'lere uygulanan östemperleme ısı işlemiyle, mikroyapıda meydana gelen değişiklik sonucunda oluşan ÖKDD'lerin mekanik özellikleri çeliklere yakın olacak şekilde artar. ÖKGDD'in mikroyapısı, çeliğin mikroyapısından farklıdır, çünkü östemperleme prosesi ile çelikte ferrit ve karbür karışımı mikroyapı elde edilirken, ÖKGDD'de ise ferrit ve yüksek karbonlu östenit karışımı mikroyapı elde edilir. Bunun yanı sıra östemperleme reaksiyonu ile ÖKGDD de elde edilen östenit yüksek kararlılığa sahiptir [12,25]. Bu benzersiz ferrit ve yüksek karbonlu ve kararlı östenit kombinasyonu ÖKGDD'de istenilen mikroyapıdır ve buna bağlı olarak da ÖKGDD mükemmel özellikler sergilemektedir. ÖKGDD'lerin mekanik özellikleri, ısı işlem sonucu oluşan mikroyapıya bağlı olarak değişir. Üst ösferritik yapıya sahip malzeme, yüksek süneklik ve tokluk gösterirken, alt ösferritik yapıya sahip malzeme ve düşük süneklik gösterir. Düşük sertliğe sahip ÖKGDD'ler yapısal uygulama alanlarında

kullanılırken daha yüksek sertliğe sahip türleri ise aşınma direnci gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır [24,28]. Östemperleme ısı işlem döngüsüne bağlı olarak, ferrit ve yüksek karbonlu östenit miktarı değişim göstermektedir bu nedenle ÖKGDD mekanik özellikleri geniş bir aralıkta değişkenlik sergilemektedir. ÖKGDD'in çekme dayanımı 850-1600 MPa, uzaması % 1-10 arasında değişiri 900 ile 1200 MPa arasında çekme dayanımı ve % 16 üzerinde uzama elde edildiğinde malzemenin sertliği düşer. ÖKKD'lerin mekanik özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda; Sünekliğin östemperleme sıcaklığının artmasıyla birlikte arttığı, Mn ve Mo gibi alaşım elementlerinin ilavesiyle dayanım ve sünekliğin azalırken sertleşebilirliğin arttığı sonuçlarına varılmıştır [29,30].

4.3 Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları

ÖKGDD malzemeler talaslı imalata uygun olmaları, ısı işlem sürelerinin kimyasal bileşim ve mikro yapısından dolayı daha kısa olmaları, dövme çeliklere göre % 10 daha hafif olmaları, döküm yolu ile son şekle getirilebilme ve döküm kabiliyetinin yüksek olmaları, montaj kolaylıkları gibi nedenlerle önemli avantajlara sahiptirler. Özellikle büyük dişli çarklarda yüzeyi serlestirilmiş çelik malzemeler yerine ÖKGDD malzemelerin başlıca kullanım alanları aşağıdaki gibidir:

- i- Otomotiv: krank milleri, kam milleri, dizel motorlar için tevzi dişlisi, aks (tekerlek) pimi, motor süspansiyonu ve dişlileri,
- ii- Demiryolu: Uzun yatak koruyucu kapağı, ray plakları, motor gürültüsü destekleri, hat ayırma kolu, ray yatağı ve süspansiyon elemanları,
- iii- Madencilik: Dişli çarklar, zincirler, zincirli taşıyıcılar, raylı taşıma plakları, aşınma plakaları,
- iv- Pompalar ve Kompresörler: Pervaneler, valf gövdesi, kompresör muhafazası, dişliler ve delme kafaları,
- vi- Konstruksiyon /yapı elemanları: Ray makarası, hidrolik silindiri, ray ayakları, ayar mili, kaya muhafazası, pim muhafazası, dairesel sürücü dişlisi, yatak kapağı ve destek kolları [30].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, EN-GJS-600-3, EN-GJS-500-7 kalite ferritik- perlitik küresel grafitli dökme demirlere ve EN-GJS-600-10, EN-GJS-500-14 kalite yüksek silisyumlu ferritik küresel grafitli dökme demirlere uygulanan tek (250C° ve 400C°) ve çift kademeli (250C°- 400C° ile 400C°- 250C°) östemperleme ısı işlemlerinin, mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkileri araştırılmıştır.

5.1 Deneysel Numuneler

EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-500-7 kalite ferritik/perlitik küresel grafitli dökme demir ile EN-GJS-600-10 ve EN-GJS-500-14 kalite yüksek silisyumlu ferritik küresel grafitli dökme demir numuneleri EN 1563:2011 standartlarına uygun olacak şekilde Componenta Dökümcülük Tic. ve San. A.Ş. Orhangazi / Bursa fabrikasında üretilmiştir. Östemperleme ve sonrasında mekanik deneyleri için için hazırlanmış olan KGDD numuneleri 15 milimetre çapında olmakla beraber 6 milimetre kalınlığındadır.

5.2 Östemperleme Isıl İşlemi

Bu çalışmada, KGDD numunelerine tek kademeli ve çift kademeli olmak üzere iki tür östemperleme ısı işlemi uygulanmıştır. Östenitleme fırını olarak KERR marka elektrikli fırını kullanılmıştır. Deney numunelerinin, oksidasyonu ve dekarbürizasyonunu engellemek amacıyla numuneler, östenitleme işlemine başlamadan önce dökme demir talaşına gömüldükten sonra östenitleme fırınına konulmuştur.

EN-GJS-600-10 ve EN-GJS- 500-14 numunelerinde bulunan yüksek silisyum östenitleme sıcaklığını yükselttiği için, bu numuneler için östenitleme sıcaklığı 975°C, östenitleme süresi 90 dakika olarak seçilmiştir. EN-GJS-600-3 ve EN-GJS 500-7 ferritik/perlitik numunelerde östenitleme sıcaklığı 900C, östenitleme süresi 60 dakika olarak seçilmiştir.

Östenitleme işleminin ardından numuneler; östemperleme için tuz banyosuna aktarılmıştır. Tuz banyosu, Nabertherm marka bir fırın içerisine paslanmaz çelik bir pota konulmuş ve pota içerisine AS135 olarak bilinmekte olan ısıtma tuzu ilave edilmiştir. Tek kademeli östemperleme işlemi için 250°C, 400°C sıcaklıkları ve seçilmiş ve her sıcaklıkta numuneler 20 dakika olmak üzere östemperlenmiştir.

İki kademeli östemperleme ısıtma işlemi için numuneler, 250°C ve 400°C sıcaklığa sahip ayrı tuz banyolarına aynı zamanda daldırılıp 20 dakika bekletildikten sonra, hızlıca bulundukları tuz banyolarından çıkartılıp, karşılıklı olarak diğer tuz banyosuna aktarılmış ve bu tuz banyolarında 20 dakika daha östenitlenmiştir. Sonuç olarak tüm numuneler kademeli olarak 250°C-400°C’de ve 400°C-250°C’de östemperlenmiştir. Tüm östemperleme türleri havada soğutma işlemiyle tamamlanmıştır.

5.3 Mikroyapısal Karakterizasyon

Mikroyapısal karakterizasyon çalışmaları, Leica marka optik mikroskop kullanılarak yapılmıştır. Bu amaçla, numuneler, sırasıyla 400-600-800-1000-1200-2500 meş boyutundaki zımparalar ile zımparalanmış, % 99.98’lik Al₂O₃ ve 0,3 µm boyutundaki elmas pasta ile parlatılmış ve % 2 Nital ile dağlanarak optik mikroskop incelemelerine hazır hale getirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri, Leica marka optik mikroskopla yapılmıştır.

5.4 XRD Analizleri

X-Ray difraksiyon analizleri; kalıntı östenit hacim oranı ve kalıntı östenitteki C oranının tayini amacıyla GBC MMA X-ray difraktometresinde MoK α radyasyonunda 25°-45° arası 0.05° adım boyunda ve 0.5°/dk tarama hızında yapılmıştır. Östenit piklerinin doğru ölçülmesi için açıl konum, östenit latis parametresinin ölçümüne aşağıda verilen kalıntı östenitteki C içeriği (ağ-%) ile izin vermektedir.

$$C_{\gamma}=(a_{\gamma}-3.548)/0.044 \quad (5.1)$$

Kalıntı östenit hacim oranı ise; aşağıda gösterilmiş olan doğrudan karşılaştırma metoduyla belirlenmiştir.

$$V_{\gamma}=\frac{I_{\gamma} / R_{\gamma}}{\left(\frac{I_{\gamma}}{R_{\gamma}}\right)+\left(\frac{I_{\alpha}}{R_{\alpha}}\right)} \quad (5.2)$$

5.5 Sertlik Deneyleri

Makro Sertlik ölçümleri için ASTM E10-12 standardına uygun olarak, Zwick Derinlik Duyarlı Universal Sertlik Cihazı kullanılarak 187.5 kg yük altında 2.5 mm (D) tungsten bilya ile yapılmıştır (F/D2) .Değerler numunelerin düzlemsel yüzeylerinden alınmış her numuneden beşer adet Brinell sertlik değerleri alınarak, elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması hesaplanmıştır

Mikro sertlik ölçümleri için, Tukon 1102 marka sertlik cihazında 200 gr yük altında matris yapıların sertlik ölçümleri yapılmıştır. Her numuneden 5 veri alınmış ve bunların aritmetik ortalaması rapor edilmiştir.

5.6 Aşınma Deneyi

Aşınma deneyleri Triboteknik marka test cihazında, oda sıcaklığında yapılmıştır. Deney sırasında numunenin üzerinde karşılıklı aşınma tekniği ile doğrusal yönde aşınma izleri meydana getirilmiştir. Deneyler deneyler; 4 N yük altında, 0,004 m/sn aşınma hızında ve 100 metre kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında sürtünme kuvveti kaydedilmiş ve bunun neticesinde kararlı hal sürtünme katsayısı hesap edilmiştir. Numunelerin aşınma direncini hesaplamak için, deney esnasında oluşmuş olan aşınma izinin derinliği ve genişliği, Dektak model yüzey profilometresi aracılığıyla belirlenmiş ve aşınma hızı hesaplanmıştır.

6. DENEY SONUÇLARI

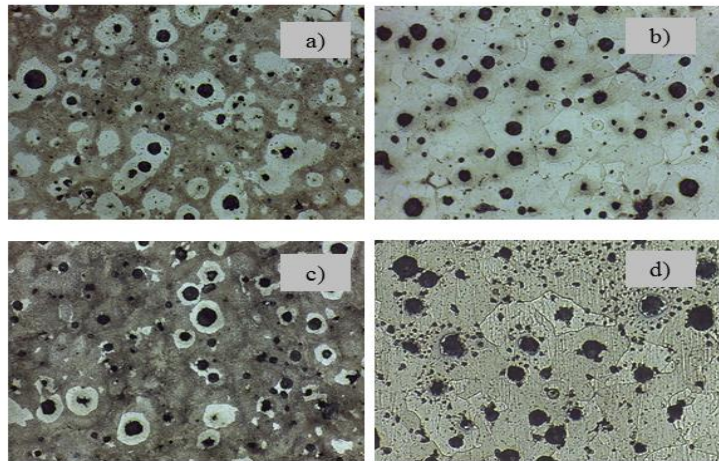
6.1 Kimyasal Analiz ve Mikroyapı İncelemeleri

EN-GJS-500-7, EN-GJS-500-14, EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerinin Çizelge 6.1’de verilen kimyasal analiz sonuçlarına göre, EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-600-3 kalite ferritik- perlitik küresel grafitli dökme demirde karbon ve manganez miktarı, EN-GJS-500-14ve N-GJS-600-10 kalite yüksek silisyumlu ferritik küresel grafitli dökme demire göre daha yüksektir ancak; silisyum miktarı daha düşüktür.

Çizelge 6.1: EN-GJS-500-7, EN-GJS-500-14, EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-600-10 numunelerinin kimyasal analiz sonuçları.

Numune	C	Si	Mn	P	S	Mg	Others
EN-GJS-500-7	3,75	2,44	0,39	0,03	0,01	0,05	<0,30
EN-GJS-500-14	3,26	3,60	0,30	0,03	0,01	0,05	<0,30
EN-GJS-600-3	3,85	2,22	0,45	0,02	0,01	0,04	<0,30
EN-GJS-600-10	3,03	4,10	0,28	0,03	0,01	0,06	<0,30

Çalışmada kullanılan döküm halindeki küresel grafitli dökme demirlerin (EN GJS-500-7, EN- GJS-500-14, EN- GJS- 600-3, EN- GJS- 600-10) mikroyapıları sırasıyla a,b,c,d olarak aşağıdaki Şekil 6.1’de belirtilmiştir.



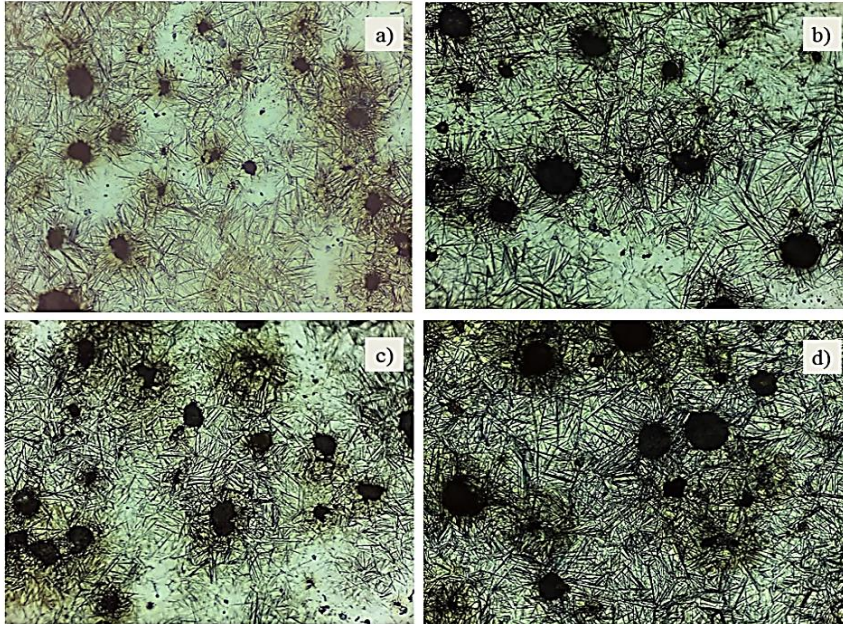
Şekil 6.1: Döküm halindeki KGDD nuunemerinin optik mikroyapı fotoğrafları (500µm) (a) EN-GJS-500-7, (b) EN-GJS-500-14, (c) EN-GJS-600-3, (d) EN-GJS-60-10.

Şekil 6.1a ve 6.1.c’de EN- GJS-500-7 ve EN- GJS- 600-3 numunelerinin, küresel grafit, ferrit ve perlitten oluştuğu görülmektedir. EN-GJS-600-3 numunesinin mikroyapısı incelendiğinde, grafit küreleri ferrit fazı tarafından çevrilmiş olup, ferrit halkaları arasındaki kısımda perlit yer almaktadır. Bu mikroyapı boğa gözü (bulls eye) olarak adlandırılmaktadır.

Şekil 6.1.b ve 6.1.d’de ise EN-GJS-500-14 ve EN-GJS-600-10 numunelerinin mikroyapısı mikroyapısı ise küresel grafit ve ferritten oluşmaktadır. Yüksek silisyum içeriği, mikroyapıyı tamamen ferritik yapmıştır.

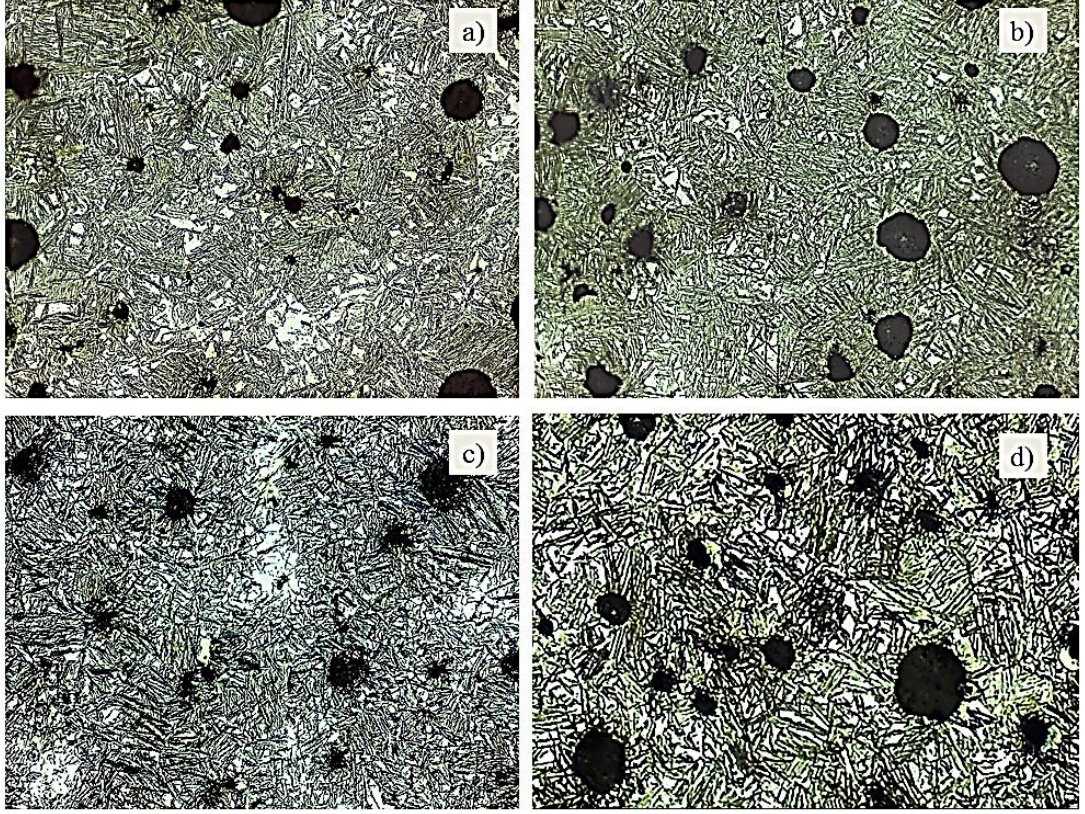
İlk olarak 250°C sıcaklıkta tek kademeli östemperleme işlemine tabi tutulan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları, östemperleme sıcaklıklarında ayrı ayrı olarak Şekil 6.2’de görülmektedir. 250°C’de östemperlenmiş numunelerin çok ince ignedel ferrit içeren alt ösferritik mikro yapıya sahip oldukları gözlemlenmiştir.

Alt ösferritik sıcaklık aralığında daha fazla ferrit ve daha az kalıntı östenit vardır, birinci aşama reaksiyonu sırasında karbonca zenginleşmiş östenit ve ferritle birlikte karbür çökmesi meydana gelir. KGDD içerisinde yüksek Si içeriği östemperleme reaksiyonu sırasında karbür çökmesini engeller ve kararlı yüksek karbonlu östenitin γ_{yk} içeriğini korur.



Şekil 6.2 : 250°C’de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları (500µm) (a) EN-GJS-500-7, (b) EN-GJS-500-14, (c) EN-GJS-600-3, (d) EN-GJS-60-10.

Östemperleme 400C° sıcaklıkta yapıldığında, ösferrit morfolojisinde değişim oluşmakta ve alt ösferrit üst ösferrite dönüşmektedir. Alt ösferrit ince ve iğnesel görünümlü iken üst ösferrit kaba ve tüylü görünümündedir. Şekil 6.3'te 400C°'de östemperlenmiş numunelerin optik mikro yapıları görülebilir.



Şekil 6.3 : 400°C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları (500µm) (a) EN-GJS-500- 7, (b) EN-GJS-500-14, (c) EN-GJS-600-3, (d) EN-GJS-600-10.

400°C'de uygulanan östemperleme işlemi ile matrikste üst ösferritik yapı oluştuğu ve ferrit iğnelerinin kaba olduğu incelenmiştir. Yüksek östemperleme sıcaklıklarında karbonun difüzyon hızı oldukça yüksektir ve bununla birlikte ferrit iğnelerinin büyüme hızı da yüksektir.

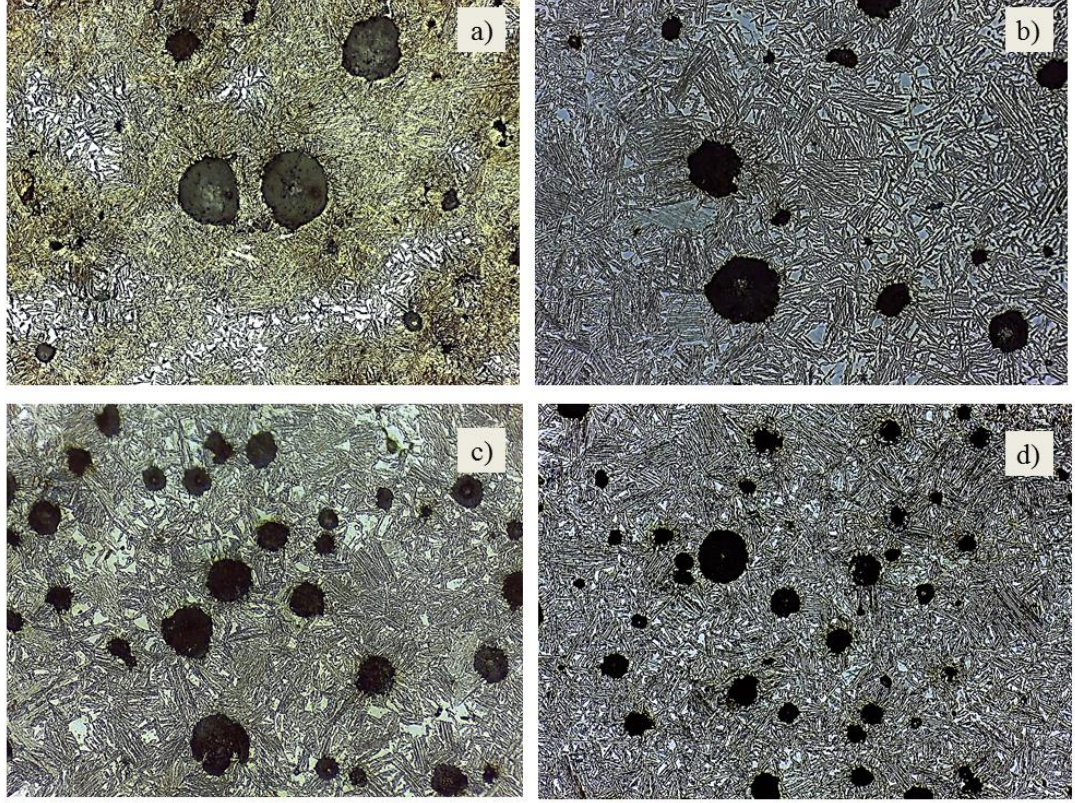
Yapılan çalışmalarda, östemperlenmiş mikroyapının açık renkli kısımlarının kalıntı östenitten meydana geldiğini koyu renklerin iğnesel ferrit ve grafit lamellerinin östenit içerisinde dağılmış olduğunu görülmüştür. Östemperleme sıcaklığı artmasıyla birlikte ferritin hacim yüzdesi düşmekte ve buna bağlı olarak kalıntı östenitin hacim yüzdesi artmaktadır.

Çetin ve Gül [31] yaptıkları çalışmada, 250–400°C aralığına 1.88°C/dak. hızda soğutulan döküm halindeki ferritik ve perlitik küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısı iğnesel ferrit morfolojisine sahipken, 400°C’de östemperlenen numunelerde iğnesel ferrit kabalaşmakta ve kenar kalınlığı arttığını gözlemlemişlerdir.

Ayrıca hücrelerarası bölgede reaksiyona girmeyen bölgeler görülmüş olup, bu bölgeler, blok halindeki kalıntı östenit bölgeleri olarak tanımlanmıştır.

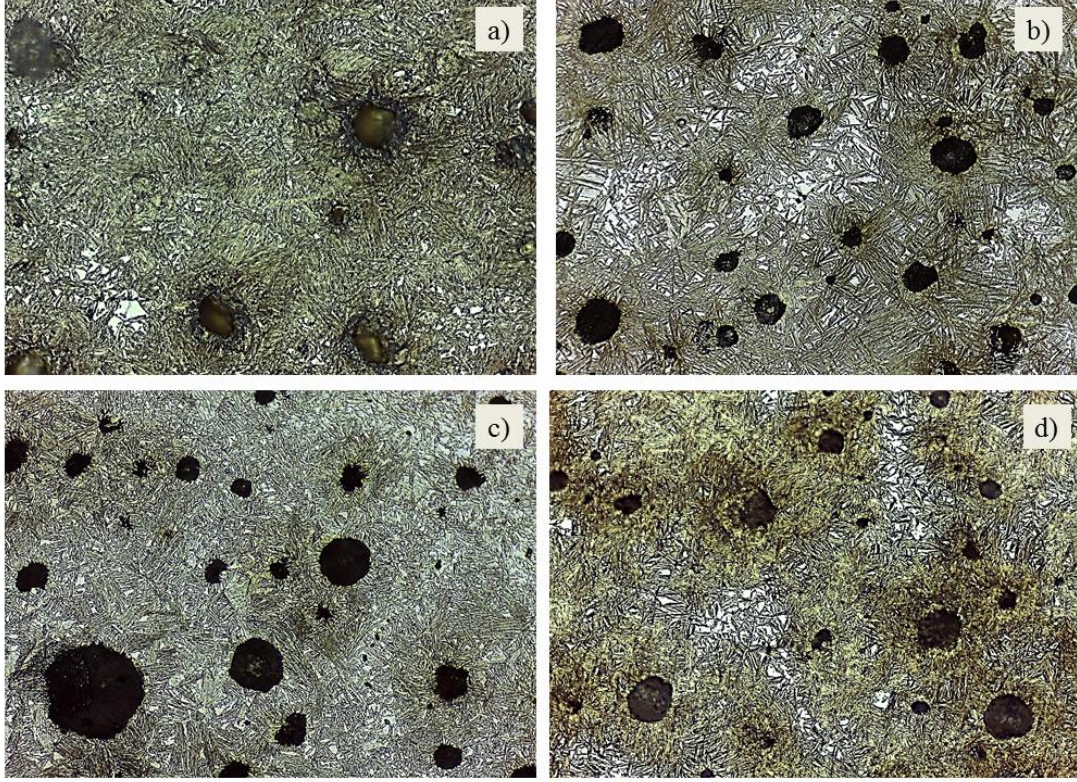
Yüksek östemperleme sıcaklığında (400°C) östenit daha az aşırı soğumaya uğrar ve bunun sonucunda, ferrit iğnelerinin çekirdeklenme hızı düşer, ferrit hacim oranı azalır ve matriks içerisinde kalıntı östenit hacim oranı artar. Yüksek sıcaklıklarda östemperleme prosesi sonucu kalıntı östenit hacim oranı maksimum ~% 40’a kadar çıkabilmektedir. Üst östemperleme sıcaklığında karbonun difüzyon hızı çok yüksektir ve buna bağlı olarak da ferrit iğnelerinin büyüme hızı oldukça yüksektir. 250 ve 300°C sıcaklıklarda uygulanan östemperleme işlemi ile matriksin alt beynitik yapı kazandığı ve ferrit iğnelerinin grafit küreleri etrafında çekirdeklemeye başladıkları ve sonuçta, ötektik hücre sınırlarında bir miktar dönüşmemiş östenitin kaldığı anlaşılmaktadır [27]. Bu sıcaklıklarda yapılan östemperleme işlemiyle birlikte beynit iğnesel görünümündedir. Sürenin artmasıyla birlikte yapıdaki beynit fazı artmakta ve kalıntı östenit miktarı düşmektedir.

İlk olarak 250C°’de sonrasında 400C°’de östemperlenen numunelerde, alt ve üst ösferritik yapılar birarda görülürken, 250C°’de yüksek soğuma hızının etkisiyle grafit küreleri etrafında çekirdeklenmeye başlayan ferrit iğneleri, sıcaklığın 400C°’ye yükselmesiyle büyüme başlar. Böylece 250C°’de tek kademeli östemperleme işleminde çekirdeklenmiş ama kalınlaşamamış ferritler, bu iki kademeli östemperleme prosesinde kalınlaşabilme imkanı bulabilmiştir.



Şekil 6.4 : Kademeli 250C°- 400C°'de östemperlenenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları (500µm) (a) EN-GJS-500-7, (b) EN- GJS-500-14, (c) EN-GJS-600-3, (d) EN-GJS-60-10.

Kademeli olarak 400C°- 250C°'de östemperlenenen numunelerde, yine alt ve üst ösferrit yapıları birlikte görülürken, ilk olarak yüksek sıcaklıkta östemperleme yapıldığı için, ferritin çekirdeklenme hızı düşmüş, dolayısıyla ferrit hacim oranında azalma ve kalıntı östenit miktarında artma olmuştur. Fakat yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa geçilerek yapılan bu kademeli östemperleme ısı işlemiyle elde edilen mikro yapılardaki ferritler, 400C°'de tek kademedeki yapılan östemperlemeye göre daha fazla ve daha ince yapıdadır.

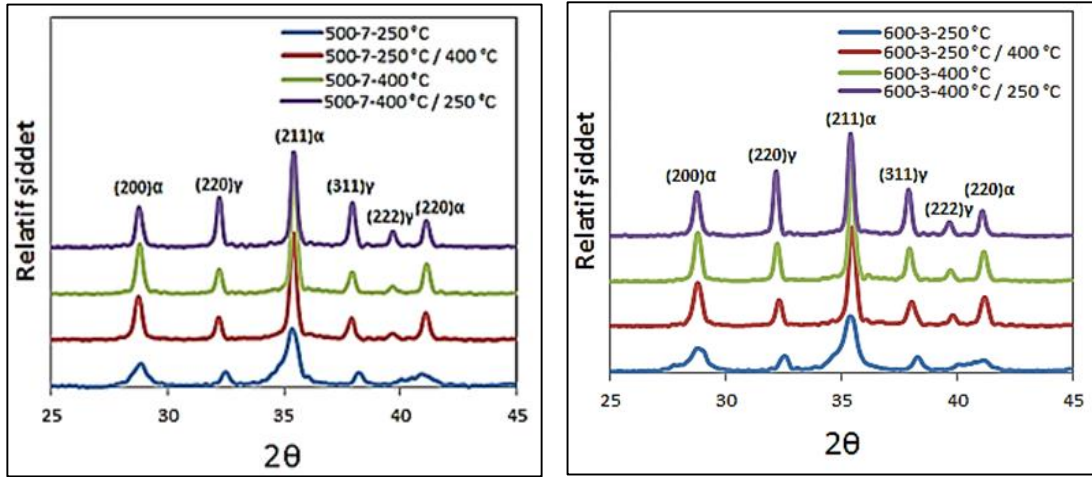


Şekil 6.5 : Kademeli 400C° 250C°-'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları (500µm) (a) EN-GJS-500-7, (b) EN-GJS-500-14, (c) EN-GJS-600-3, (d) EN-GJS-600-10.

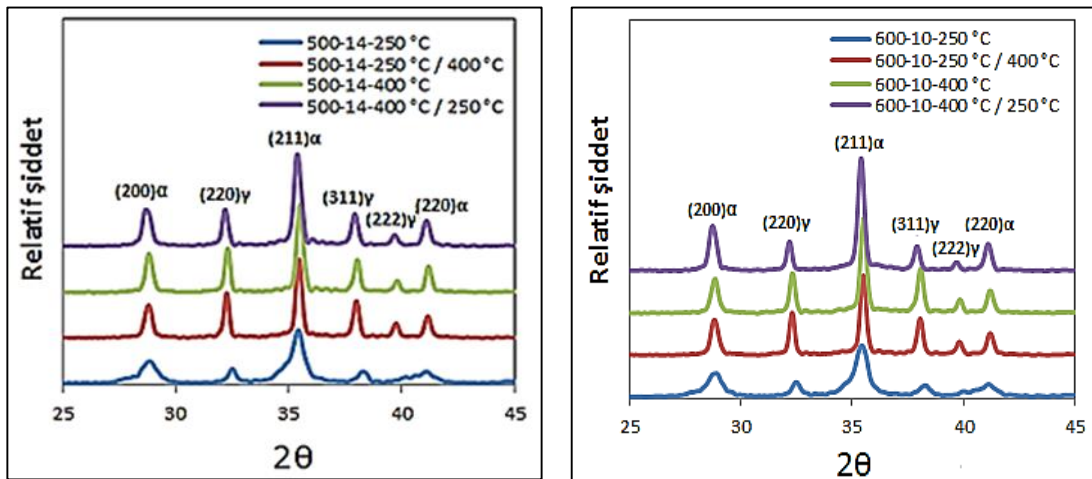
Yüksek östemperleme sıcaklıklarında tek kademeli östemperleme işlemi uygulandığında, hücrelerarası bölgeler içerisinde I. kademe reaksiyonu uzun sürede tamamlandığı için, bu kısımlarda I. kademe reaksiyonu devam ederken ötektik hücre içerisinde II. kademe reaksiyonu başlar. II. kademe reaksiyonunun başlamasıyla yüksek karbonlu östenit, ferrit ve karbüre ayrışır. Kademeli östemperleme ısı işlemi ile ötektik hücre içerisinde II. aşama reaksiyonu başlamadan önce hücrelerarası bölgede I. aşama reaksiyonunun tamamlanmasına olanak sağlanır ve buna bağlı olarak da malzemenin gevrekleşmesi ve için mekanik özelliklerinin kötüleşmesi önlenir.

6.2 XRD Analizi Sonuçları

Östempereleme işlemine tabi tutulmuş ferritik- perlitik (EN-GJS-500-7, EN-GJS-600-3) numunelerin XRD analizleri Şekil 6.6’te ve ferritik numunelerin (EN-GJS-500-14 ve EN-GJS-600-10) XRD analizleri Şekil 6.7’de verilmektedir. Analiz sonuçlarında numunelerin kalıntı östenit hacim oranları ölçülmüş ve oluşan bu piklerin olduğu açı, tek ve çift kademeli östempereleme türlerinde farklılık göstermiştir. Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’den anlaşıldığı üzere, 250°C’de yapılan östempereleme işleminde tüm numunelerin pik şiddetleri en düşük seviyede çıkarken, çift kademeli östempereleme işleminde ferritik- perlitik ve ferritik numunelerin pik şiddetleri farklılık göstermektedir.

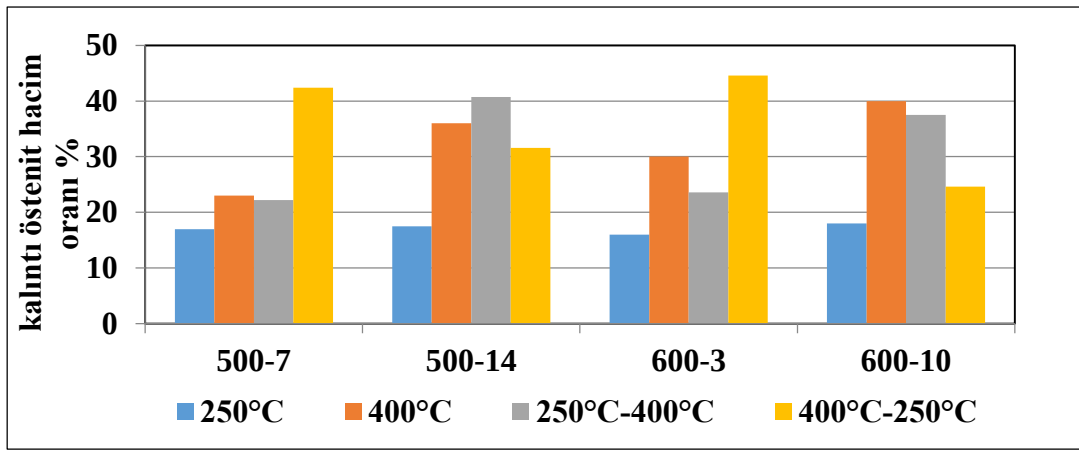


Şekil 6.6: 250°C, 400°C, 250°C- 400°C, 400°C- 250 °C’de östemperelemiş ferritik- perlitik numunelerin XRD sonuçları.



Şekil 6.7: 250°C, 400°C, 250°C- 400°C, 400°C- 250 °C’de östemperelemiş ferritik numunelerin XRD sonuçları.

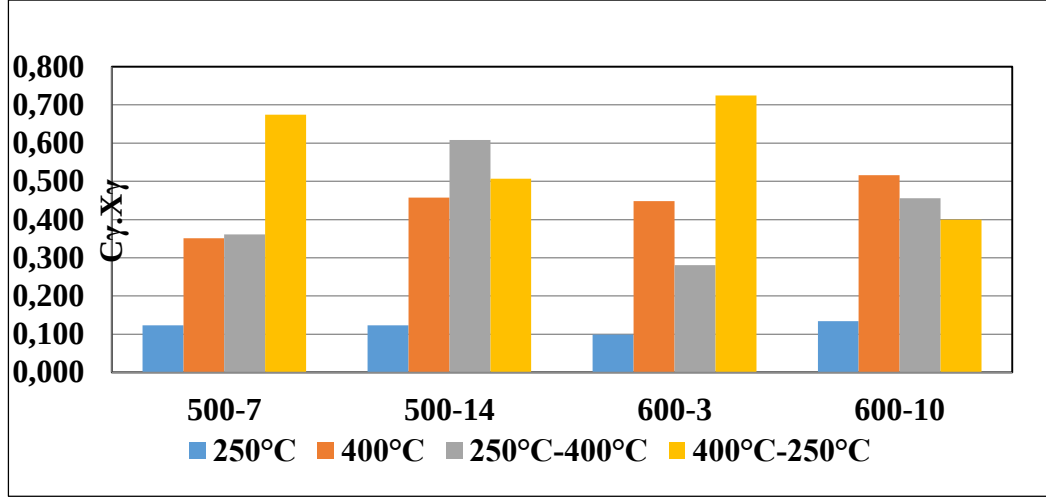
XRD sonuçları ile direkt kıyaslama metodu ile kalıntı östenit hacim oranları bulunmuş ve Şekil 6.8’de tüm numunelerdeki kalıntı östenit hacim oranının östemperleme sıcaklıklarına göre değişimi verilmiştir. Tüm numune türlerinde en düşük kalıntı östenit hacim oranı 250°C’de yapılan östemperlemede bulunmuştur. Yüksek östemperleme sıcaklıklarında C_{γ}^{maks} (östemperlenmiş matriksin karbon oranı) değerinin küçülmesine bağlı olarak X_{γ} (östenitin hacim oranı) değeri artar, düşük östemperleme sıcaklıklarında ise östenitin hacim oranı azalır. 250°C- 400°C sıcaklıkları arasında yapılan çift kademeli östemperlemede, tüm numunelerdeki kalıntı östenit hacim oranı, 250°C’de yapılan östemperlemeye göre artış göstermiştir.



Şekil 6.8: Kalıntı östenit hacim oranının östemperleme sıcaklığı ve numune türlerine göre değişimi.

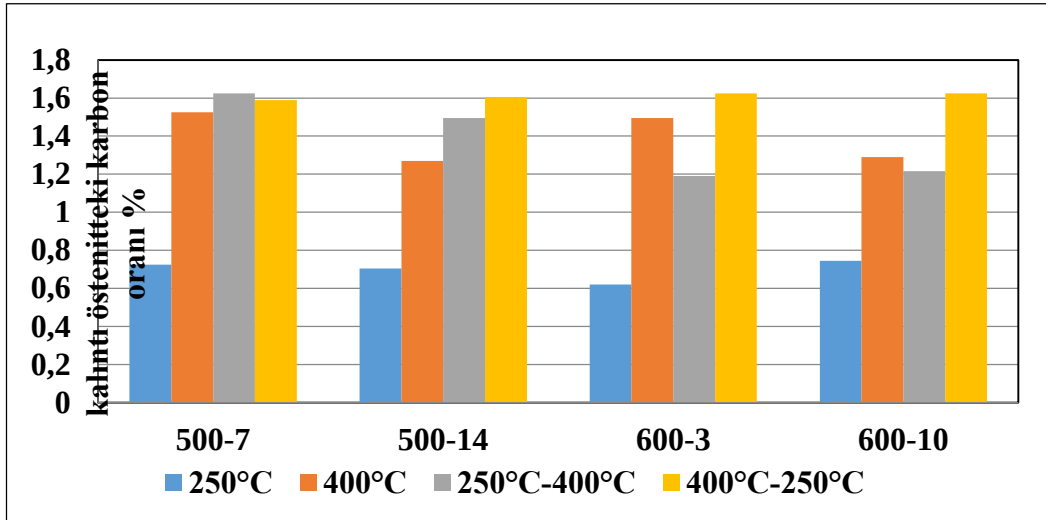
Numunelerin kalıntı östenit hacim oranları, yapılarına ve östemperleme türüne göre değerlendirildiğinde, ferritik/perlitik yapıdaki EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-600-3, ferritik yapıdaki EN-GJS-500-14 ve EN-GJS-600-10’dan farklı davranışlar göstermektedir. Düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklığa geçilerek yapılan östemperlemede ferritik numuneler, ferritik/perlitik numunelere göre daha fazla kalıntı östenit hacim oranına sahip iken, yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa geçilerek yapılan östemperlemede daha az kalıntı östenit hacmi içermişlerdir. İki numune grubunda kalıntı östenit değerlerinin, östenitleme türlerine göre farklılık göstermesinin nedeni, silisyum içeriklerindeki farklılıktır. Silisyum miktarı yaklaşık %2.7 değerini aştığında, östenit hacim oranı (X_{γ}) değeri azalır. Silisyum, belirli bir östenitleme sıcaklığında östenitteki karbonun çözünürlüğünü düşürür, östenitleme sırasında dönüşüm hızını azaltır [28].

$X_{\gamma}.C_{\gamma}$ çarpımı matristeki toplam karbon oranını vermekle beraber Şekil 6.9'te gösterilmektedir ve bu değer, $C_{\gamma 0}$ değerine eşit olmalıdır. Östempereleme işlemi sonucunda karbonun bir kısmı yapıda karbür ve ferrit fazına ayrılmış ise bu durumda $X_{\gamma}.C_{\gamma}$, $C_{\gamma 0}$ değerinden küçük olacaktır.



Şekil 6.9: Matristeki toplam karbon oranının östempereleme sıcaklığı ve numune türlerine göre % değişimi.

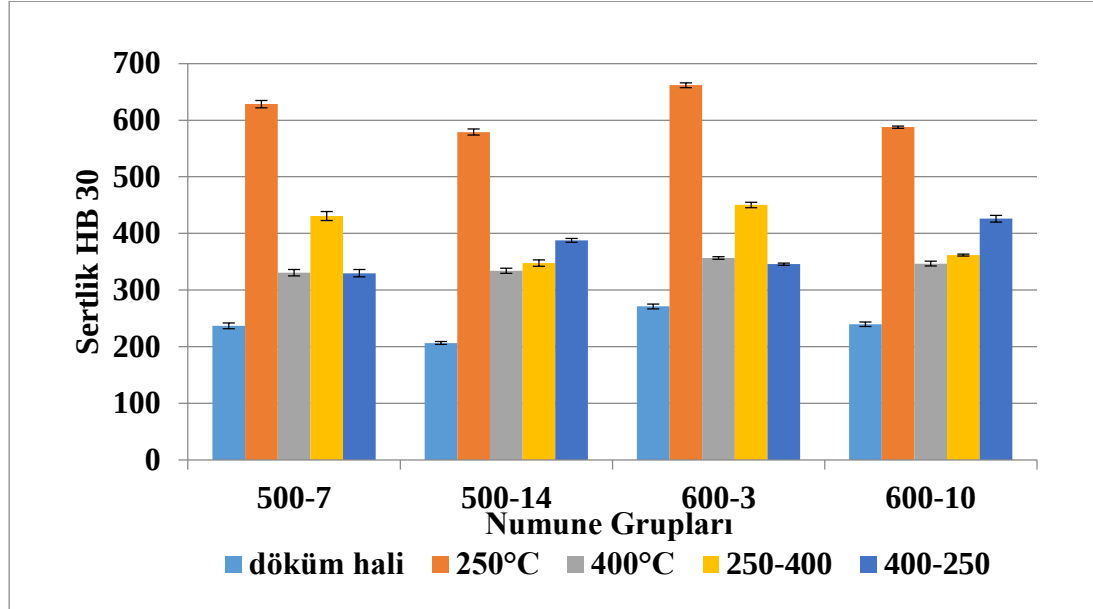
Şekil 6.10'a göre ferritik- perlitik numunelerin, 250°C- 400°C'de yapılan östemperelemelerindeki karbon oranı, perlitik matrislere göre daha yüksektir.



Şekil 6.10: Kalıntı östenitteki karbon oranının östempereleme sıcaklığı ve numune türlerine göre değişimi.

6.3 Sertlik Sonuçları

Döküm halindeki ve östemperleme uygulanmış ferritik- perlitik ve ferritik küresel grafitli dökme demirlerin Brinell sertlik sonuçları Şekil 6.11'de görülmektedir.



Şekil 6.11: Östemperleme türüne göre makro sertlik değişimi.

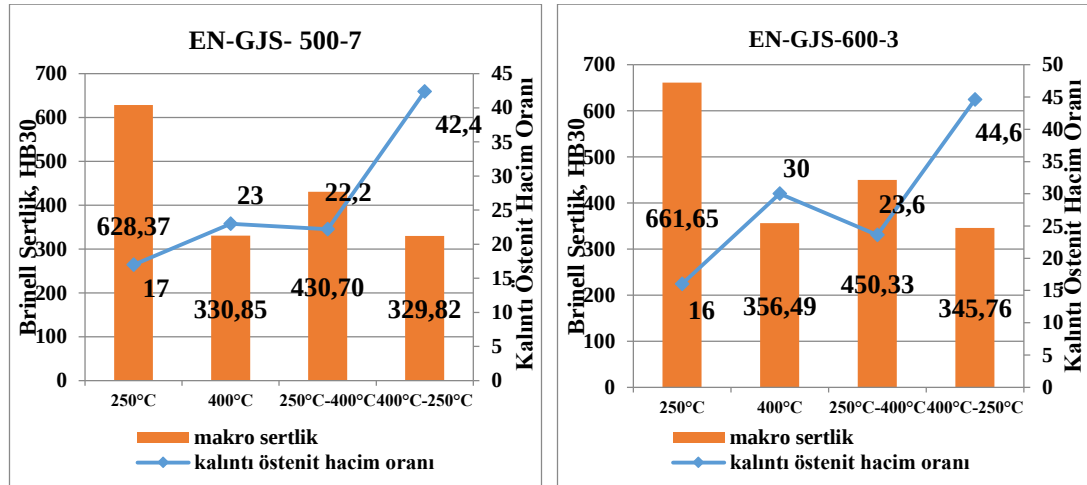
Döküm halindeki tüm numunelerin Brinell sertliği, KGDD için bulunmuş olan sertlik standart değerlerle uyum halindedir. Şekil 6.11’de görüldüğü gibi östemperleme işlemi ile birlikte izrotermal işlem esnasında meydana gelen mikroyapısal dönüşüm sonucunda sertlikte yükseliş söz konusudur. Tüm numuneler için en yüksek sertlik 250°C’de yakalanmış iken, çift kademeli östemperlemede numunelerin sertlik değerleri farklılık göstermiştir.

250°C’de yapılan tek kademeli östemperlemede ferritik- perlitik numunelerin sertliği ferritik numunelere göre daha yüksek çıkarken, 400°C’de yapılan östemperlemede numunelerin sertlik değerleri birbirine yakın çıkmıştır. 250°C- 400°C’deki çift kademeli östemperlemede, ferritik- perlitik numunelerin sertliği, ferritik numunelere göre fazladır. 400°C- 250°C’deki çift kademeli östemperlemede ise, ferritik- perlitik numunelerin sertliği, ferritik numunelere göre düşüktür.

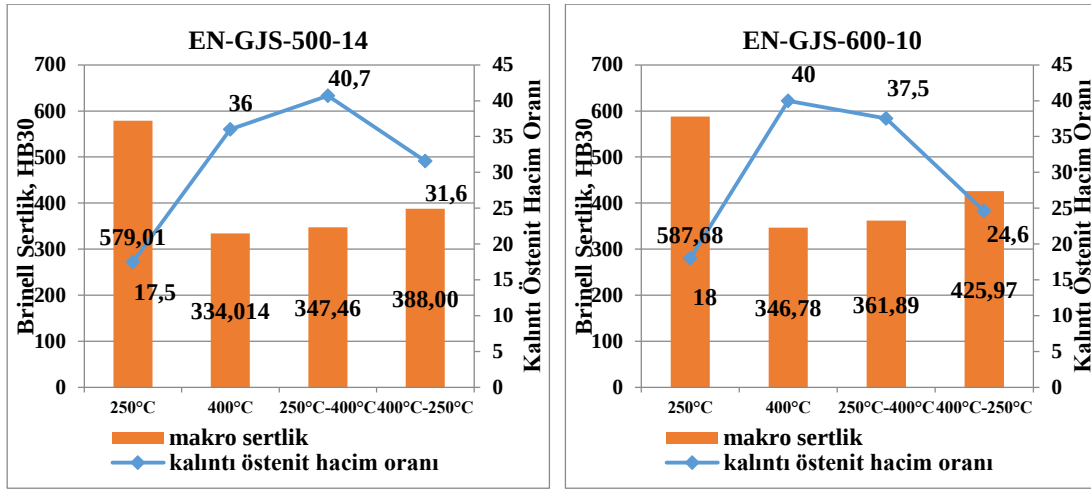
Owhadi ve arkadaşları [32] yaptıkları çalışmada, ferritik- perlitik numunelere üst ösferritik bölge içerisinde östemperleme prosesi uygulandığında, sıcaklığın yüksek olması ile alt soğumanın düşük olduğunu, bu sebeple ferrit miktarının azaldığını, buna karşılık γ_{yk} hacim oranının arttığını, alt ösferritik bölgeye geçişte ise tam tersi

durum ile karşılaştığını yani, alt soğumanın yüksek olmasından dolayı daha fazla ferrit çekirdeklendiğini ve bunun sonucunda ferrit miktarı artarak, γ_{yk} hacim oranının azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde kalıntı östenit hacim oranının azalmasıyla, sertlik değerinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Jianghuai ve arkadaşları [33], yüksek silisyum içeren KGDD kullanarak yaptıkları östemperleme çalışmasında, numuneleri öncelikle 400°C’de östemperlemiş, ötektik hücre içerisinde birinci aşama reaksiyonunun tamamlanmasından sonra numuneleri 300°C’de tekrar östemperlemişlerdir. Numune içerisindeki yüksek Si içeriği ile 400°C’deki östemperleme sırasında I. aşama reaksiyonu daha kısa sürede tamamlandığı için, I. aşama reaksiyonu devam ederken ötektik hücre içerisinde II. aşama reaksiyonu başlamaya fırsat bulamamış ve yüksek karbonlu östenit, ferrit ve karbüre ayrışmamıştır. Böylece yüksek Si içeriği ile östemperleme reaksiyonları sırasında karbür çökmesini engellemiş ve kararlı yüksek karbonlu östenitin γ_{yk} içeriğini korumuştur.

Yukarıdaki çalışmaların ışığında, şekil 6.12 ve 6.13’den de görüleceği üzere yapılan deneylerde mikroyapısal değişimler sonucu sertlik arttıkça kalıntı östenit hacim oranı azalmaktadır.

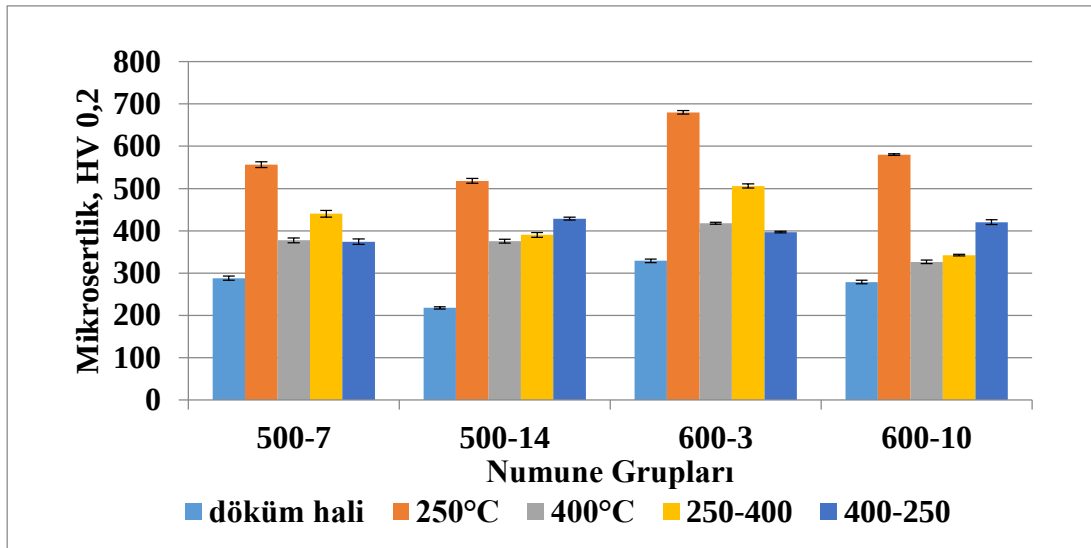


Şekil 6.12: Ferritik- perlitik numunelerde östemperleme sıcaklığına bağlı olarak sertlik ile kalıntı östenit değişimi.



Şekil 6.13: Ferritik numunelerde östempereleme sıcaklığına bağlı olarak sertlik ile kalıntı östenit değişimi.

Östempereleme uygulanmış numunelerden mikrosertlik ölçümleri de alınmıştır ve değerler Şekil 6.14’te gösterilmiştir.

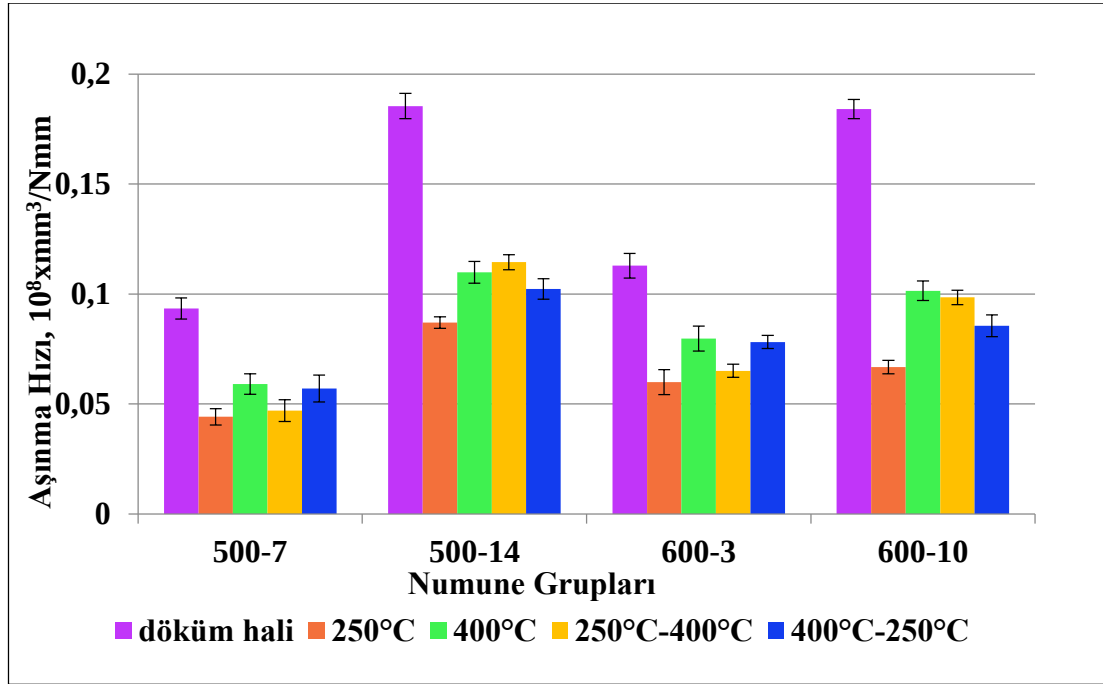


Şekil 6.14: Östempereleme türüne göre mikro sertlik değişimi.

Ölçümler matris üzerinden, makrosertlik sertlik değerleri ile karşılaştırma yapmak ve ösferritik fazın haricinde öteki mikroyapısal oluşumların etkisinin incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Mikrosertlik değerleri, makrosertlik değerleri ile aynı karakteristik özellikleri göstermiştir. Tüm numunelerde döküm hali en düşük mirosertliğe sahip iken, en yüksek sertlik yine tüm numunelerde 250°C’de yapılan östemperelemede bulunmuştur.

6.4 Aşınma Sonuçları

Döküm hali ile tek ve çift kademeli östemperleme uygulanmış numunelerin, oda sıcaklığındaki aşınma hızlarının, numune grubuna ve östemperleme türüne bağlı değişimi Şekil 6.15'te gösterilmiştir.

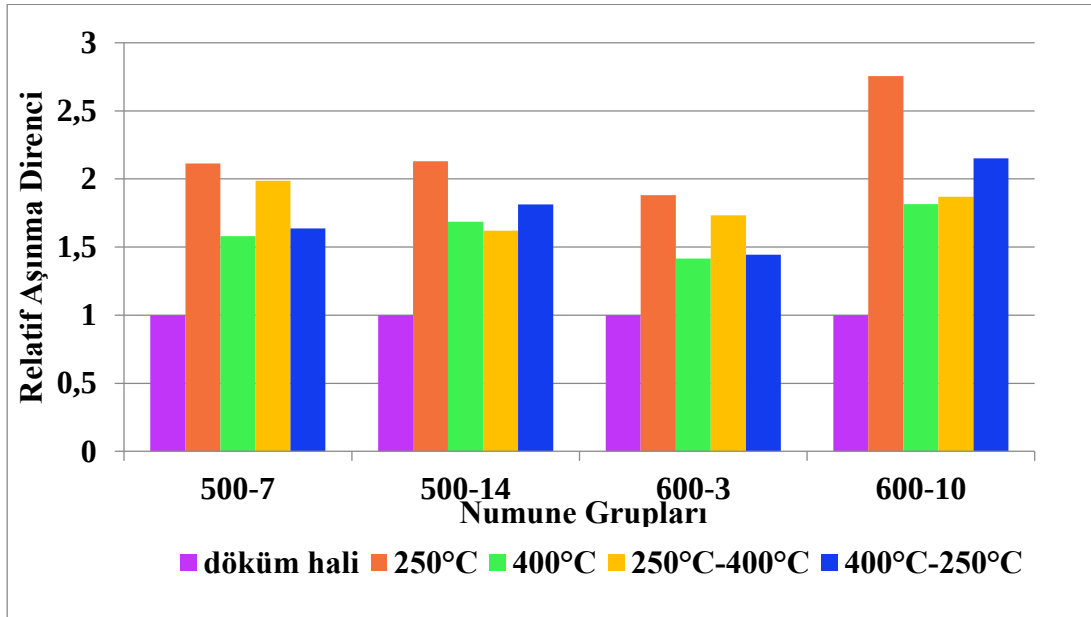


Şekil 6.15: Numunelerin oda sıcaklığında aşınma sonucu, aşınma hızının numune grubu ve östemperleme türüne göre değişimi.

Şekil 6.15'te, tüm numunelerin döküm halindeki aşınma hızlarının, östemperlenmiş haldeki aşınma hızlarına göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma direncinin, döküm halindeki küresel grafitli dökme demirlerden daha iyi olduğunu açıklar. Bununla birlikte 250°C'de östemperlenmiş tüm numunelerin aşınma direnci, 400 °C'de ve çift kademede östemperlenmiş numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi mikroyapısal dönüşüm ile ilişkilidir. Zimba ve diğerleri [34], yaptıkları çalışmada düşük sıcaklıklardaki östemperleme işlemi ile oluşan alt ösferritik yapının, üst ösferritik yapıya göre daha yüksek aşınma direncine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Ferritik numune grubu (EN-GJS-500-14 ve EN-GJS-600-10) ile perlitik numune grubunun (EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-600-3) aşınma hızlarını karşılaştırdığımızda, tüm östemperleme türlerinde ferritik numuneler, ferritik/perlitik numunelere göre daha yüksek aşınma hızı göstermiştir.

Ferritik numune gruplarının aşınma hızlarını kendi içinde değerlendirdiğimizde, 400°C’de ve 250°C- 400°C’de yapılan çift kademeli östemperlemelerde aşınma hızlarının birbirine yakın olduğunu, fakat yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa geçilerek yapılan östemperlemede aşınma hızının düşüşe geçtiği gözlemlenmiştir.

Kumari ve Rao [35], yüksek silisyumlu KGDD numuneleri kullanarak yaptıkları östemperleme çalışmasında, östemperleme sıcaklığının 315°C’den 375°C’ye yükselmesi ile, aşınma hızının arttığını gözlemlemiş ve östemperleme sıcaklığının artması ile yüksek karbonlu östenit miktarının arttığını, bu durumun matris yapısının sertliğini düşürerek, azalan sertlik değerinin aşınmayı olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca döküm halindeki numuneler ile östemperlenmiş numuneler arasındaki aşınma direncini kıyaslamalı olarak göstermek için numunelerin relatif aşınma dirençleri hesaplanmıştır. Şekil 6.16’da görüleceği gibi döküm halindeki numunelerin relatif aşınma direnci 1 olarak kabul edilmiş ve farklı sıcaklıklarda östemperleme uygulanmış diğer numunelerin aşınma direnci döküm halindeki numuneler ile kıyaslanmıştır.

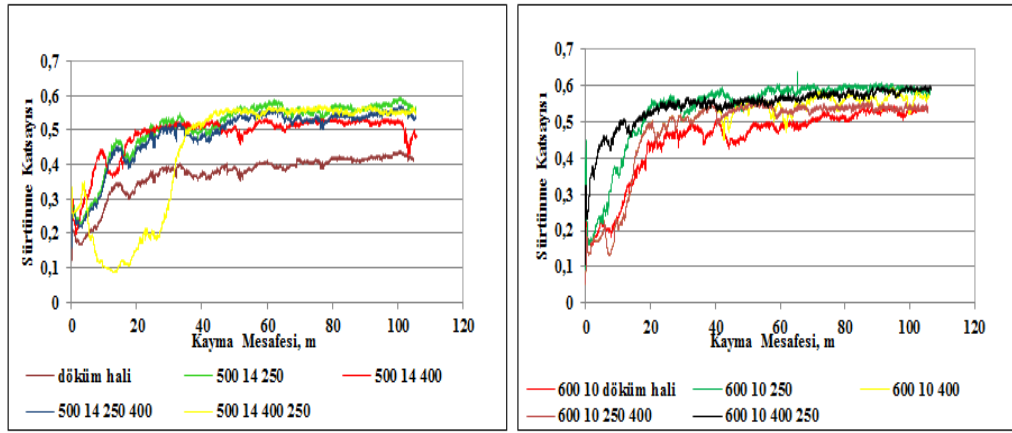


Şekil 6.16: İncelenen numunelerin oda sıcaklığında aşınma sonucunda relatif aşınma direncinin numune grubuna ve östemperleme süresine göre değişimi.

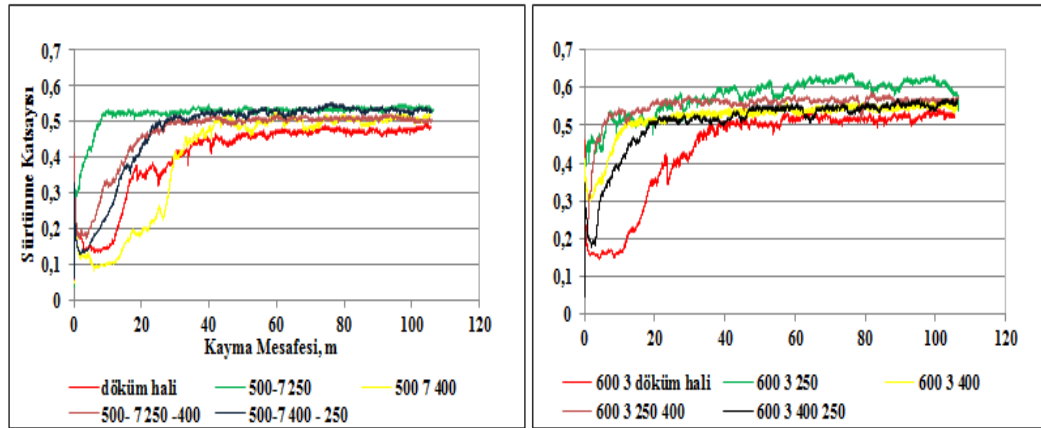
Tüm numune gruplarında en yüksek aşınma direnci 250°C’de yapılan östemperleme işleminde görülürken, ferritik numunelerde en yüksek ikinci aşınma direnci, yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa geçilerek yapılan östemperlemede (400°C- 250°C), ferritik- perlitik numunelerde en yüksek ikinci aşınma direnci, düşük sıcaklıktan

yüksek sıcaklığa geçilerek yapılan östemperleme işleminde elde edilmiştir. Bu durum numunelerin makro sertlik değerlerinin değişimi ile benzerlik, kalıntı östenit hacim oranları ile zıtlık göstermektedir. Nitekim, Rao ve Putatunda [36], yaptıkları çalışmada östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma direncinin iyi özellik göstermesini, düşük hacimsel oranda bulunan kalıntı östenit ile ilişkilendirmişlerdir.

Oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olan aşınma testinin sonucunda elde edilmiş olan sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimi ferritik numuneler için şekil 6.17’de, perlitik/ferritik numuneler için ise şekil 6.18’de gösterilmiştir.



Şekil 6.17: Ferritik numunelerin oda sıcaklığında aşınma deneyi sonucunda sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimi.

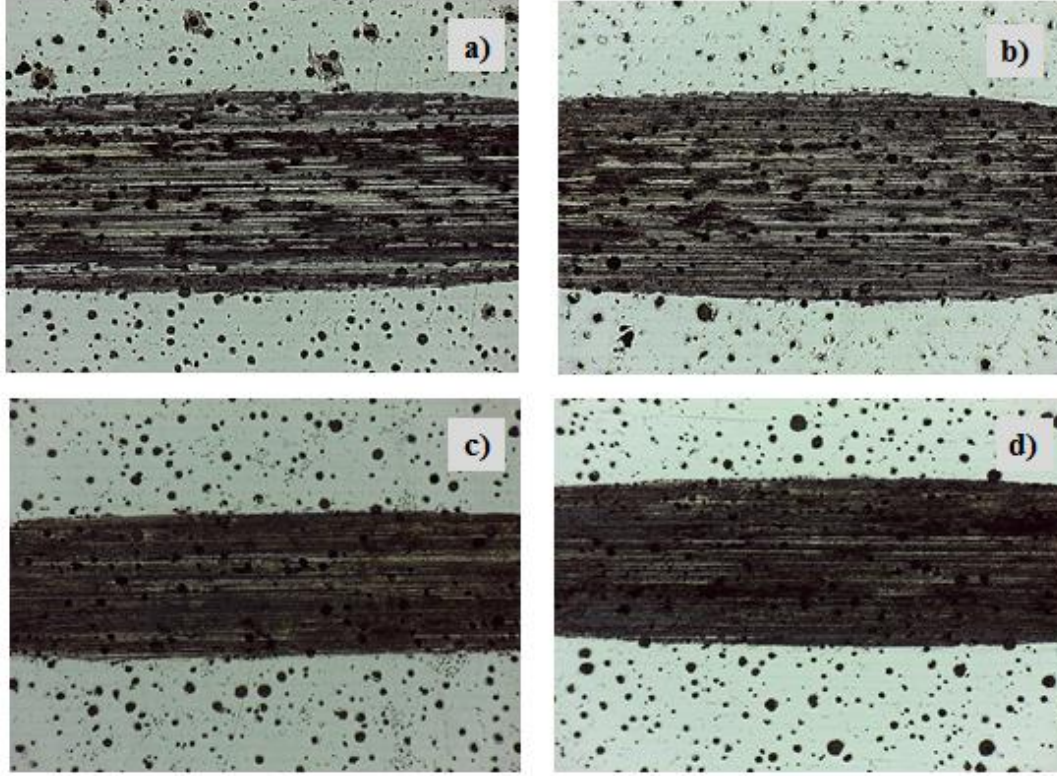


Şekil 6.18: Ferritik- perlitik numunelerin oda sıcaklığında aşınma deneyi sonucunda sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimi.

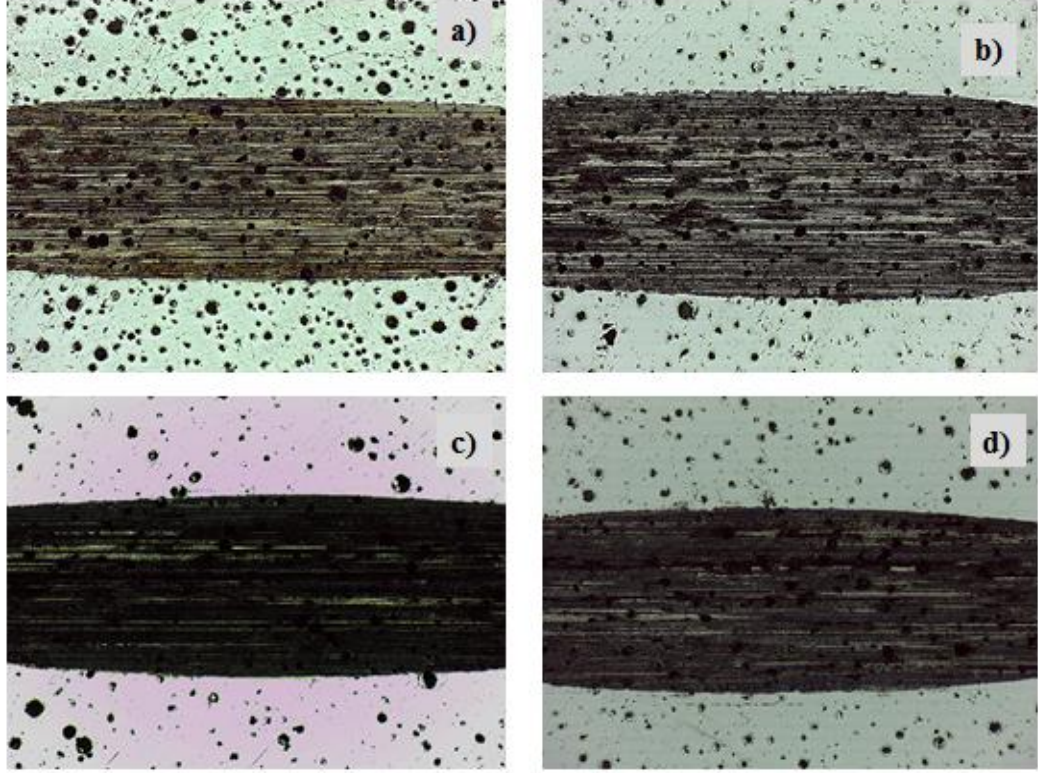
Döküm halindeki tüm numunelerin sürtünme katsayısı zamana bağlı olarak düşerken, yine tüm numunelerin sürtünme katsayıları 250°C’de yapılan östemperlemede en

yüksek değere ulaşmıştır.Sonuçlar incelendiğinde sürtünme katsayısının sertlikle doğru orantılı olduğu görülmektedir.

Numunelerin, oda sıcaklığında yapılan aşınma testi sonucunda en yüksek aşınma izi döküm halinde ve en düşük aşınma izi 250°C’de yapılan östemperlemede oluşmutur. Ferritik numunelerin aşınma izlerinin mikroskopta çekilmiş görüntüleri Şekil 6.19 ve ferritik- perlitik numunelerin aşınma izleri Şekil 6.20’de verilmiştir.



Şekil 6.19: Oda sıcaklığında en yüksek ve düşük aşınma izine sahip ferritik numunelerin mikroskop görüntüsü (a-EN GJS- 500-14 döküm hali, b-EN- GJS-600-10 döküm hali, c-EN- GJS- 500-14 250°C östemperleme, d-EN-GJS- 600-10 250°C östemperleme).



Şekil 6.20: Oda sıcaklığında en yüksek ve düşük aşınma izine sahip ferritik perlitik numunelerin mikroskop görüntüsü (a-EN GJS-500-7 döküm hali, b-EN-GJS-600-3 döküm hali, c-EN- GJS- 500-7 250°C östemperleme, d-EN- GJS- 600-3 250°C östemperleme).

Oda sıcaklığında döküm halindeki ferritik ve ferritik perlitik numune gruplarında, düşük sertlik sebebiyle yüksek aşınma performansı sergilenmiş ve yüzeyde derin çizgiler oluşturmuştur. 250°C’de östemperlenmiş numunelerin aşınma yüzeylerinde ise, kayma yönünde oluşan çizgilerin daha az olduğu ve dolayısıyla deformasyonun miktarının da az olduğunu göstermiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ferritik- perlitik ve ferritik yapıdaki yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirlerin, tek kademeli olarak 250°C ve 400°C’de, çift kademeli olarak 250°C- 400°C ve 400°C- 250°’de yapılan östemperleme işlemleri ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1 Tek kademeli östemperleme işlemi ile birlikte tüm numunelerde ösferritik bir yapı elde edilmiştir. 250°C östemperlemelerde ince ve iğnesel görünümlü alt ösferrit yapı görülürken, 400°C’de ise kaba ve tüylü görünümlü üst ösferrit yapısı görülmektedir.

2. Çift kademeli östemperlemelerde, tüm numunelerin mikro yapıları hem 250°C’de hem de 400°C’de yapılan östemperlemenin karakteristiğini (alt ve üst karışık ösferritik yapı) taşımaktadır. Düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklığa geçilerek (250°C- 400°C) yapılan östemperlemelerde, numunelerdeki çok sayıdaki ferrit çekirdeği yüksek sıcaklıktaki ikinci östemperleme ile büyümüştür. 400°C -250°C numuneleri ise 400°C’deki numunelere göre daha ince yapıya sahip olmuştur.

3. Östemperleme işlemi ile birlikte makrosertlik ve mikrosertlik ölçümleri yapılmış ve tüm numunelerin makro ve mikro sertlikleri döküm hallerindeki sertlik değerlerine göre önemli bir oranda artmıştır. Tüm numuneler için en yüksek sertlik değeri 250°C’de elde edilmiştir. 400°C’deki östemperlemelerde, tüm numunelerin sertlikleri birbirine yakın çıkmıştır.

4. Düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklığa geçilerek (250°C- 400°C) yapılan çift kademeli östemperleme işleminde, ferritik- perlitik numunelerin sertliği, ferritik numunelere göre daha yüksek değere ulaşmıştır. Yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa geçilerek (400°C- 250°C) yapılan östemperleme işleminde ise, ferritik numunelerin sertliği ferritik- perlitik numunelere göre daha yüksek değere ulaşmıştır.

5. Östemperleme işlemlerinin sonucunda, tüm numune mikroyapılarının ösferrit olmasıyla birlikte mikroyapılarda kalıntı östenit oluşumları da gözlemlenmiştir. Tüm numuneler için en düşük kalıntı östenit hacim oranı 250°C’de yapılan tek kademeli östemperleme işleminde bulunmuştur.

6. Çift kademeli östemperleme işleminde ferritik- perlitik ve ferritik numune gruplarının kalıntı östenit hacim oranları farklılık göstermiştir. 250°C- 400°C’de yapılan çift kademeli östemperleme işleminde ferritik-perlitik numunelerin kalıntı östenit hacim oranları, ferritik numunelere göre daha düşük çıkarken, 400°C- 250°C’de yapılan çift kademeli östemperleme işleminde ferritik numunelerin kalıntı östenit hacim oranları, ferritik- perilitik numunelere göre daha düşük çıkmıştır.

7. Tüm numunelerin oda sıcaklığındaki aşınma direnci döküm hallerine göre 2 ile 3 kat arasında artmıştır. Tüm numunelerde en iyi aşınma direnci 250°C’de yapılan tek kademeli östemperleme işlemi ile elde edilmiştir.

8. Numune gruplarının oda sıcaklığındaki aşınma dirençleri, çift kademeli östemperleme işlemlerinde farklılık göstermiştir. 250°C- 400°C’de yapılan çift kademeli östemperleme işleminde, ferritik- perlitik numunelerin aşınma direnci, ferritik numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. 400°C- 250°C’de yapılan çift kademeli östemperleme işleminde ise ferritik numunelerin aşınma direnci ferritik-perilitik numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durum numune gruplarının sertlik değerlerinin değişimleri ile paralellik göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Özel, A.** (1994). *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.
- [2] **Larker, R.** (2008). Solution strength ferritic ductile iron ISO 1083/JS/500-10 offer superior and consistent properties in hydraulic rotators, *Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron*, İsveç.
- [3] **Ghang, C., Shih H.** (1994). Study on Isothermal Transformation of Austempered Ductile Iron, *AFS Transactions*.
- [4] **Düzcüoğlu, H., Demirci, M.T.** (2008). Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin aşınma davranışına incelenmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 21-31.
- [5] **Forrest, R.** (1987). The Challenge an oppurtunity presented to the SG iron industry by the development of austempered ductile iron, *BCIRA Report 1700*, July.
- [6] **Kuş, H.** (2007). *Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışı* (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [7] **Baydoğan, M.** (1996). *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.
- [8] **Ovalı, İ.** (2006). *Kritik tavlama sıcaklıklarından östemperlenmiş çift matrisli alaşımsız küresel grafitli dökme demirlerin yorulma özellikleri* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [9] **Metals Handbook**, (1990). Properties and selection: Irons, steels and high performance Alloys, Vol 1, Tenth Edition, *ASM International*.
- [10] **Darwish, N., Eliot, R.** (1993). Austempering of low manganese ductile irons, Part 1 processing window, Vol.9., *Materials Science and Technology*.
- [11] **Korichi, S., Priestner, R.** (1995). High temperature decomposition of austempered microstructures in spheroidal graphite cast iron, Vol. 11., 901-907., *Materials Science and Technology*.
- [12] **Björkegren, L. E. ve Hamberg, K.** (2003). Silicon alloyed ductile iron with excellent ductility and machinability, *Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron*, İsveç.
- [13] **Prihti, T.** (2011). *Wear behaviour of ductile irons in continuous sliding motion* (Yüksek Lisans Tezi). Tampere University of Technology, Finlandiya.
- [14] **Kovacs, B. V.** (1984). Method of making high strength ferritic ductile iron parts, United States Patent, No: 4,475,956 tarih: 09.10.1984.
- [15] **Ersümer, A. ve Uzunova, T.** (1967). Demir dökümü, *İstanbul Teknik Üniversite Matbaası*, 250-262, Gümüşsuyu.

- [16] **Trudel, A. and Gagne, M.** (1997). Effect of composition and heat treatment parameters on the characteristics of austempered ductile iron, *Canadian metallurgical Quarterly*, 901-907, Kanada.
- [17] **Darwish, N., Elliott, R.** (1993). Austempering of low manganese ductile irons, part 2 influence of austenitizing temperature, Vol.9., 54-68, *Materials Science and Technology*.
- [18] **Bayati, H., Elliott, R., Lorimer, G.** (1995). Influence of austenitizing temperature on austempering kinetics of high manganese alloyed ductile cast iron, Vol.11., *Materials Science and Technology*.
- [19] **Erić, O., Rajnović, D., Zec, S., Sidjanin, L., Jovanović, T., M.** (2006). Microstructure and fracture of alloyed austempered ductile iron, *Materials Characterization*, 57, 211-217.
- [20] **Putatunda, S.K.** (2001). Development of austempered ductile cast iron(ADI) with simultaneous high yield strength and fracture toughness by a novel two-step austempering process, A, 315,70-80, *Materials Science and Engineering*.
- [21] **Çelik, Ö.** (2001). *Küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışları* (Yüksek Lisans Tezi). İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [22] **Bahmani, M., Elliott, R.** (1994). Effect of pearlite formation on mechanical properties of austempered ductile iron, *Materials Science and Technology*.
- [23] **Hamid, A.S., Uzlov, K.I., Darwish, N., Elliott, R.** (1994). Austempering of low manganese ductile Irons, Part 4 relationships between mechanical properties and microstructure, *Materials Science and Technology*.
- [24] **Yalçın, Y.**, (1991). *Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde bakır miktarı mikroyapı ilişkisi* (Yüksek Lisans Tezi). İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [25] **Hamid A.S., Uzlov, K.I., Darwish, N., Elliott, R.** (1997). Influence of austenitising temperature on austempering of an Mn-Mo-Cu alloyed ductile iron, Part 2 mechanical properties, *Materials Science and Technology*.
- [26] **Bubenko, L. Konecna, R. ve Nicoletto, G.** (2009). Observation of fatigue crack paths in nodular cast iron and ADI microstructures, *Materials Engineering*, 16, 13-18, Slovakia.
- [27] **Martinez, R. A.** (2010). Fracture surfaces and the associated failure mechanism in ductile iron with different matrices and load bearing, *Engineering Fracture Mechanics*, 77, 2749-2762, Arjantin.
- [28] **Pereloma EV, Anderson CS.** (2006). Microstructure and properties of austempered ductile iron subjected to single and two step processing. 22:1112–8, *Mater Sci Technol*.
- [29] **Putatunda, S.K., Gadicherla, P.K.** (1999). Influence of austenitizing temperature on fracture toughness of a low manganese austempered ductile iron (ADI) with ferritic as-cast structure, *Materials Science and Engineering A*, 268, 15–31.

- [30] Kılıçlı, V. (2004). *Küresel grafitli dökme demirlerde kısmi östenitleme ve östemperleme ısı İşleminin mikro yapı ve mekanik özelliklere etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [31] Çetin, M., Gül, F. (2009). Küresel grafitli dökme demirin kuru kayma aşınma davranışına östenitleme süresinin etkisi, *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Türkiye.
- [32] Owhadi, A., Hedjazi, J., Davami, P. (1998). Wear behavior of 1.5Mn austempered ductile Iron, 14, 245-250, *Journal of Materials Science*.
- [33] Jianghuai Yang, J., Putatunda, S.K. (2004). Improvement in strength and toughness of austempered ductile cast iron by a novel two-step austempering process, 25, 219–230, *Materials and Design*.
- [34] Zimba, J., Simbi, D.J., Navara, E. (2003). Austempered ductile iron: An alternative material for earth moving component, 25, 643-649, *Cement & Concrete Composites*.
- [35] Kumari, U.R., Rao, P.P. (2009). Study of wear behaviour of austempered ductile iron, 44:1082- 1093, *Journal of Materials Science*.
- [36] Rao, P., Putatunda, S.K., (2003). Investigations on the fracture toughness of austempered ductile irons austenitized at different temperatures, A 349, 136-149, *Materials Science and Engineering*.

ÖZGEÇMİŞ

Ad- Soyad : Gizem Gider
Doğum Tarihi ve Yeri : 23.07.1989 Edirne
E-posta : gzm.gider@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2012, İstanbul Teknik Üniversitesi,
Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yüksek Lisans:** 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı,
Malzeme Mühendisliği Lisansüstü Programı