

## ÖSTEMPERLEME SICAKLIK VE SÜRESİNİN ÖSTEMPERLENMİŞ SÜNEK DÖKME DEMİRLERİN MİKRO YAPI VE SERTLİĞİNE ETKİSİ

<sup>1</sup>Emre ÖZTÜRK, <sup>2</sup>Mehmet YILDIRIM

<sup>1,2</sup> Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty,, Metallurgical and Materials Engineering Department, Konya, TURKEY

<sup>1</sup>emre\_\_gsozturk@hotmail.com, <sup>2</sup>myildirim@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 21.01.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 28.02.2019)

**ÖZ:** Bu çalışmada, östemperleme sıcaklık ve süresinin östemperlenmiş sünek dökme demirlerin mikro yapı ve sertliğine etkisi detaylı bir biçimde incelenmiştir. GGG-50 küresel grafitli dökme demirlere (KGGD) 950 °C' de 2 saat östenitleme ısıl işlemi uygulandıktan sonra 350 ve 320 °C sıcaklıklarda 90 ve 120 dakika süre ile östemperleme yapılmıştır. Östemperleme işleminden sonra numunelerin faz analizleri X-ışınları kırınım yöntemiyle, mikroyapıları ise optik mikroskop kullanılarak, mekanik özellikleri ise Brinell sertlik testi ile incelenmiştir. Her iki sıcaklık ve sürede östemperleme işleminden sonra karakteristik ösferrit ve yüksek karbonlu östenitten oluşan östemperlenmiş sünek dökme demir mikro yapısı elde edilmiştir. Östemperleme sıcaklığı azaldıkça ve süresi arttıkça numunelerin sertliği artmıştır. Ayrıca, östemperleme süresinin artmasıyla yüksek karbonlu östenitin karbon yüzdesi de artmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Küresel Grafitli Dökme Demir (KGGD), Mikroyapı, Östemperleme, Sertlik

### Effect of Austempering Temperature And Time on Microstructure and Hardness of Austempered Ductile Cast Irons (ADI)

**ABSTRACT:** In this study, the effect of austempering temperature and time on microstructures and hardness of austempered ductile iron (ADI) were investigated in detail. The GGG-50 nodular cast iron samples were austenized at 950 °C for 2h, and then austempered at 350 and 320 °C for 90 and 120 minutes in salt bath. Phase analysis of the samples were performed via X-ray diffraction analysis, microstructural examination were done by light optical microscope and mechanical properties were investigated by Brinell hardness test. After austempering heat-treatment the microstructure is characteristic austempered ductile iron microstructure composed of ausferrite and high carbon austenite. Hardness increases with decreasing austempering temperature and increasing austempering time. Moreover, the carbon content of high carbon austenite increased with increasing austempering time.

**Key Words:** Nodular Cast Iron, Microstructure, Austempering, Hardness

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Küresel grafitli dökme demirler (KGGD), dökümden önce eriyik metale az miktarda Mg ve Ce gibi elementlerin ilave edilmesi ile grafitin (karbonun) küresel şekilde oluştuğu dökme demir türüdür [Spengler, ve Briggs, 1972]. Sfero dökme demir olarak ta bilinen bu dökme demir türü diğer dökme demirlere kıyasla daha yüksek mukavemet, tokluk, süneklik ve işlenebilirliği sahiptir [İzgiç, 1986; Aşkun ve diğ.,2003]. Bu üstün özelliklerinden ötürü otomotiv sanayi, makina imalat sanayi, savunma sanayi, iş makineleri, demiryolları ve tarım makineleri gibi birçok farklı sektörde geniş uygulama alanına sahiptir [Ucun ve diğ., 2007]. KGGD'lerin sahip olduğu üstün mekanik özellikler östemperleme adı verilen ısıl işlem ile daha da iyileştirilmektedir [Hasırcı, 2000]. Östemperlenmiş sünek dökme demirler sahip oldukları yüksek dayanım, yüksek tokluk, yüksek aşınma ve sürünme direnci ve süneklik gibi mükemmel

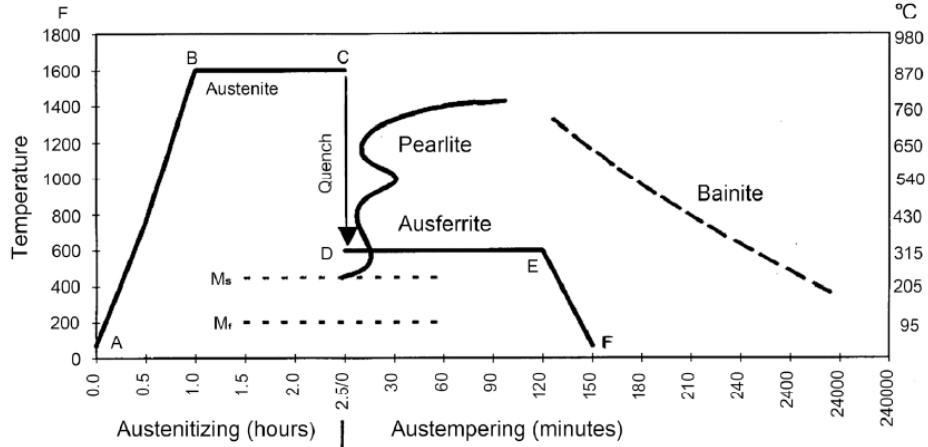
mekanik özelliklerin yanı sıra düşük yoğunluk ve yüksek dayanım/ağırlık oranlarından ötürü dövme çeliklerin yerini alabilecek yeni nesil malzemelerdir [Yalçın ve Özel, 1999]. Östemperlenmiş sünek dökme demirlerin eşsiz fiziksel ve mekanik özellikleri ısı işlem neticesinde ortaya çıkan ösferrit (beynitik iğnemi ferrit) ve yüksek karbonlu östenitten oluşan mikro yapılarından kaynaklanmaktadır [Konca ve diğ., 2017].

Bu tip mikro yapı küresel dökme demirlerin östempereleme adı verilen ısı işlemi neticesinde elde edilmektedir. Şekil 1’de de gösterilen östempereleme ısı işlemi çok dikkatli bir şekilde uygulanmalı ki perlit, beynit ve martenzit oluşumu gözlemlenmemelidir. Dökme demirlere uygulanan östempereleme ısı işlemi çeliklere uygulanan gibi üç basamaktan oluşmaktadır: (i) tam bir östenitik ( $\gamma$ ) matris elde etmek için 850-1050 °C ‘de yeterli sürede yapılan östenitleme, (ii) 250-400 °C arası bir sıcaklığa su verme ve (iii) su verilen sıcaklıkta 1-4 saat östempereleme işlemi. Fakat çeliklere uygulanan östempereleme işleminden farklı olarak tamamen beynitik dönüşüm istenmemektedir [Blackmore ve Harding, 1984; Keough ve Hayrynen, 2010; Tun ve Lwin, 2008; Yescas-Gonzales, 2001; Meier ve diğ., 2013,]. Östempereleme işleminde iki aşamalı faz dönüşümü meydana gelmektedir [Sadighzadeh, 2015; Gundlach ve Janowak, 1983; Voigt ve Loper, 1984; Kovacs, 1994; Sadighzadeh ve diğ., 2011; Bahmani ve diğ., 1997].

İlk aşama:  $\gamma \rightarrow \alpha + \gamma_{HC}$

İkinci aşama:  $\gamma_{HC} \rightarrow \alpha + \text{carbide}$

Birinci aşamada östenit beynitik ferrit (ösferrit) ve yüksek karbonlu östenite dönüşmektedir. Bu aşamada dayanım ve tokluk en yüksek değerlerine ulaşmaktadır. Eğer birinci aşama uzun sürerse yüksek karbonlu östenit ferrit ve karbüre dönüşmektedir (ikinci aşama). İkinci aşama dönüşüm oluşan karbürlerin mekanik özelliklere olumsuz etkisinden ötürü çok istenilmemektedir. Mikro yapıda karbürlerin bulunması süneklik ve tokluğun önemli ölçüde azalmasına sebep olmakla beraber işlenebilirliği de olumsuz etkilemektedir. Birinci aşamanın sonu ile ikinci aşamanın başlangıcı arasında geçen süreye işlem penceresi (processing window) adı verilir ve en uygun mekanik özellikler bu süreçte elde edilir [Sadighzadeh, 2015].



Şekil 1. Östempereleme ısı işlemi gösteren izotermal sıcaklık-zaman-dönüşüm diyagramı [Hayrynen ve diğ., 2002].

Figure 1. Temperature- time-transformation diagram showing austempering heat-treatment [Hayrynen ve diğ., 2002].

Ayrıca, östempereleme sıcaklık ve süresi östemperlenmiş sünek dökme demirlerin mikro yapılarını dolayısı ile de mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerdir. Östempereleme sıcaklığı nispeten yüksek (350-400 °C) seçilirse, mikro yapıdaki yüksek karbonlu östenit miktarı artar bu da yüksek süneklik ve kırılma tokluğuna, nispeten daha düşük sertlik ve dayanımın ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte daha düşük östempereleme sıcaklığı (<350 °C) seçilirse, yüksek dayanım, yüksek sertlik ve aşınma direnci fakat düşük kırılma tokluğu gözlemlenmektedir. Östempereleme süresi yüksek olursa, yukarıda bahsedilen ikinci aşama reaksiyon meydana gelir. Bu reaksiyon neticesinde oluşacak sert ve kırılğan

karbür parçacıkları sünekliği ve kırılma tokluğunu önemli ölçüde azaltmaktadır. Literatürde ösferrit oluşumu için 400 °C gibi çok yüksek östemperleme sıcaklığında 30 dakika ısıl işlemin yeterli olduğu, çok düşük östemperleme sıcaklıklarında (~230 °C) 4 saat ısıl işlemin en iyi mekanik özelliklerin elde edilmesinde yeterli olduğu belirtilmiştir [Rao ve Putatunda, 2003; Eric ve diğ., 2006; Sohi ve diğ., 2004; Hsu ve diğ., 2000; Kim ve diğ., 2008; Sellamuthu ve diğ., 2018]. Bu çalışma kapsamında, 350 ve 320 °C sıcaklıkta 90 ve 120 dakika östemperlenen ticari saflıktaki GGG-50 KGDD'in mikro yapısal değişiklikleri ve neticesinde malzeme sertliğine etkisi incelenmiştir.

## MALZEME VE METOT (MATERIALS and METHOD)

### Numunelerin Üretimi (Production of the Samples)

Çalışma kapsamında Tablo 1'de verilen kimyasal kompozisyona sahip GGG-50 KGDD malzemeler kullanılmıştır. Numunelerin döküm işlemi Konya Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan Kurtsan Porya Sanayi tesislerinde yapılmıştır. Ergitme işleminde 1500 kg kapasiteli Inductotherm marka orta frekanslı indüksiyon ocağı kullanılmıştır. Ocağa şarj olarak sfero piki, çelik hurdası ve sfero döndü hurdası yüklenmiştir. Ergime işleminden sonra sıvı metale döküm sıcaklığında (1450 °C) küreselleştirme ve aşılama işlemleri uygulanmıştır. Küreselleştirme işlemi tundish potasında FeSiMg7 küreselleştirici kullanılarak yapılmış olup, aşılama işlemi ise döküm potasında Fe-Si (75% Si) alaşımı kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra sıvı metal kum kalıplara dökülerek soğutulmaya bırakılmıştır. Numunelerin kimyasal analizi OBLF RS1000-162 model optik emisyon spektrometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karbon eşdeğeri aşağıdaki eşitlik kullanılarak % 4.59 olarak hesap edilmiştir.

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (1)$$

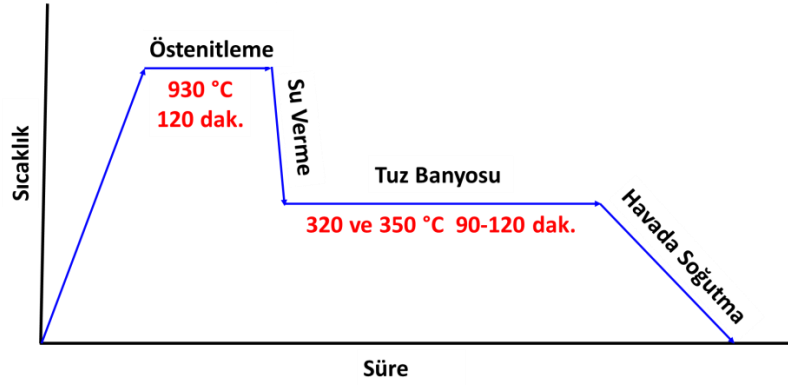
**Çizelge 1.** GGG-50 KGDD numuneye ait kimyasal analiz değerleri.

*Table 1. Chemical composition of GGG-50 nodular cast iron specimen*

Fe	C	Si	Mn	Cu	P	S	Mg	Cr	Ni	Mo
denge	3.78	2.40	0.221	0.609	0.029	0.011	0.046	0.025	0.019	<0.001

### Isıl İşlem (Heat-Treatment)

Östemperleme ısıl işlemi Ankara Sincan Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan Döksan Isıl İşlem tesislerinde gerçekleştirilmiştir. Numunelere 950 °C' de 2 saat östenitleme ısıl işlemi uygulandıktan sonra 320 ve 350 °C sıcaklıklarda 90 ve 120 dakika süre ile östemperleme yapılmıştır. Östemperleme koşullarını gösteren çizim Şekil.2'de verilmektedir. Östemperleme işlemi Petrofer AS135 ısıl işlem tuzu (50% NaNO<sub>3</sub>-50% KNO<sub>3</sub>) içeren sıcaklık kontrollü tuz banyosunda gerçekleştirilmiştir. Tuz banyosu östemperleme süresince motorlu bir mikser tarafından karıştırılmıştır. Östemperleme işlemi tamamlandıktan sonra numuneler oda sıcaklığına soğutulmaya bırakılmış ve sonrasında yüzeyindeki tuz tabakasının giderilmesi için yıkanmıştır.



Şekil 2. KGDD'lere uygulanan östempereleme ısıl işleminin grafiksel gösterimi.

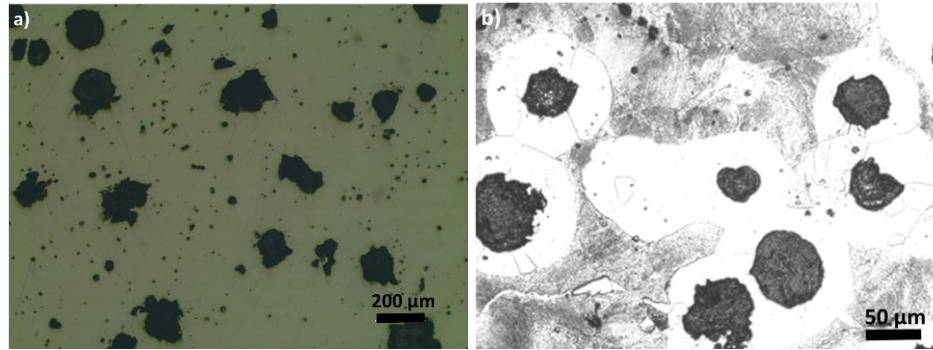
Figure 2. Graphical representation of austempering heat-treatment.

### Karakterizasyon (Characterization)

Numuneler mikro yapısal inceleme için standart metalografik numune hazırlama işlemleri kullanılarak hazırlanmıştır. Bu işlem kapsamında numuneler önce zımparalanmış, sonra 1  $\mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  ile parlatılmış ve sonunda da %2 Nital çözeltisi ile dağlanmış. Numunelerin ısıl işlem öncesi ve sonrası mikroyapı incelemesi Nikon Eclipse MA100 model optik mikroskop kullanılarak yapılmıştır. Alaşımın faz analizi Bruker D8 Advance model X-ışını kırınım cihazı (XRD) kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler, tarama hızı  $2^\circ/\text{dk}$  ile  $2\theta=40-100^\circ$  aralığında olacak şekilde ve dalga boyu  $1.5406 \text{ \AA}$  olan  $\text{Cu-K}\alpha$  ışınması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin Brinell sertlik değerleri EMCO Test DuraVision 300 model sertlik ölçme cihazı kullanılarak 182,5 kgf yük altında ve 2,5 mm bilya ile yapılmıştır. Numunelerden en az 5 farklı ölçüm alınarak ortalama sertlik değerleri hesap edilmiştir.

### BULGULAR (RESULTS)

Isıl işlem görmemiş dökülmüş haldeki GGG-50 KGDD'e ait mikroyapı fotoğrafları Şekil.3'te verilmektedir. Numune mikroyapısı küresel grafitler, ferrit (beyaz renkli bölgeler) ve perlitten (koyu renkli bölge) meydana gelmektedir. Mikro yapıda herhangi bir karbüre ve döküm hatasına rastlanılmamıştır. Dökülmüş haldeki sertlik değeri ise yaklaşık 175 HB olarak ölçülmüştür.



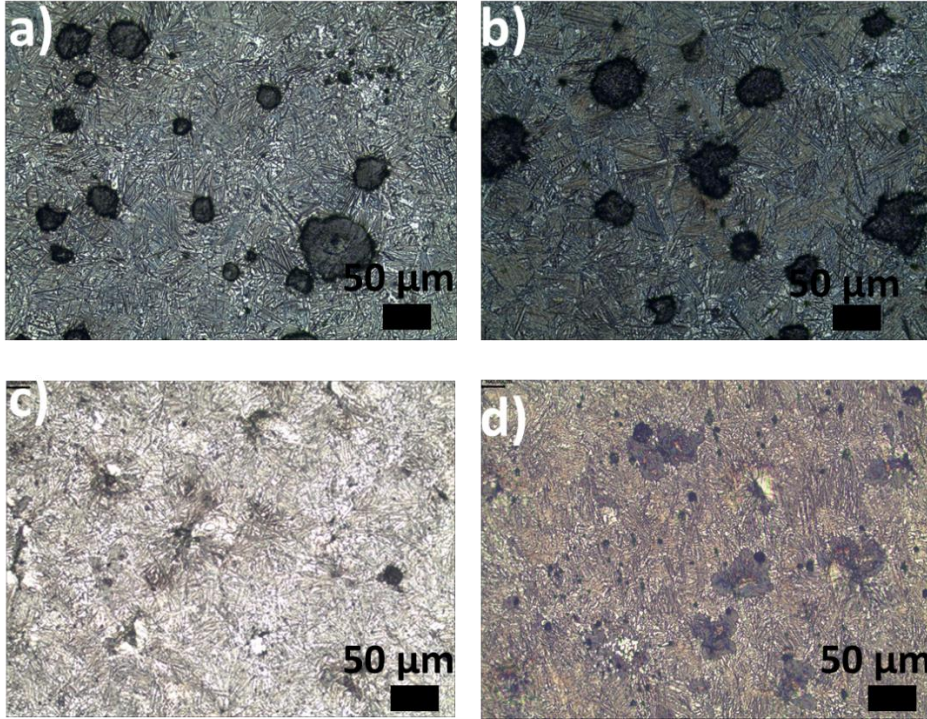
Şekil 3. Dökülmüş haldeki GGG-50 küresel grafitli dökme demir numuneye ait mikroyapı fotoğrafları: (a) parlatılmış ve (b) dağlanmış yüzey.

Figure 3. Microstructure of as-cast GGG-50 nodular cast iron sample: (a) polished and (b) etched surface.

350 ve 320  $^\circ\text{C}$ 'de 90 ve 120 dakika östempereleme işlemine maruz bırakılan numuneye ait mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.'te verilmektedir. Numunelerin tamamında östemperelemiş sünek dökme demir mikro yapısı gözlemlenmiştir. Bu tip mikro yapı ayrıntılı incelendiğinde (Şekil 5) küresel grafitler ile birlikte koyu renkli ösferrit (beynitik veya iğnemsî (asiküler) ferrit) ve açık renkli yüksek karbonlu (kalıntı) östenit

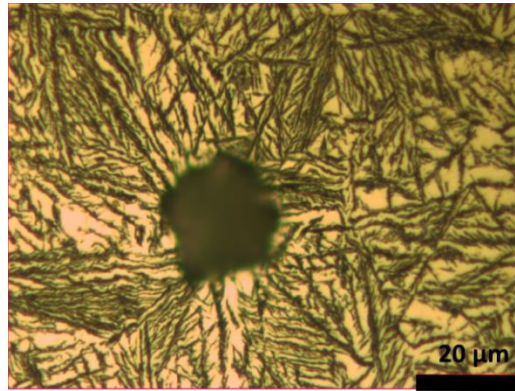
açıkça görülmektedir. Ayrıca, östemperleme ısıl işlemi sonrasında mikro yapılarda (Şekil 4) az miktarda da olsa karbürlerin oluştuğu (beyaz renkli) gözlemlenmiştir.

Mikro yapı fotoğrafları detaylı incelendiğinde östemperleme sıcaklık ve süresinin fazların büyüklüğü, miktarı ve dağılımı gibi mikro yapısal özelliklere çok fazla etki etmediği sadece mikro yapının sıcaklığın azalmasıyla birlikte bir miktar incelendiği gözlemlenmiştir. Yüksek östemperleme sıcaklıklarında karbonun difüzyon hızı yüksek olup daha kalın morfolojide ösferrit fazı oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum Şekil 1' de verilen izotermal soğuma eğrileri de açıklanabilmektedir. Çeliklerdeki duruma çok benzer KGDD metallerde de izotermal dönüşüm (östemperleme) sıcaklığına bağlı olarak üst ve alt beynit (beynitik ferrit, ösferrit) oluşmaktadır. Nispeten daha düşük sıcaklıklarda oluşan alt beynitin sertliği, dayanımı ve kırılabilirliği üst beynite göre daha yüksektir.



Şekil 4. Östemperleme ısıl işlemi uygulanmış numunelere ait mikroyapı fotoğrafları: (a) 350 °C 90 dakika, (b) 350 °C 120 dakika, (c) 320 °C 90 dakika ve (d) 320 °C 120 dakika.

Figure 4. Microstructures of austempered specimens: (a) 350 °C 90 min., (b) 350 °C 120 min., (c) 320 °C 90 min. and (d) 320 °C 120 min.



Şekil 5. 350 °C' de 90 dakika östemperleme uygulanmış numuneye ait ayrıntı mikroyapı (1000X büyütme) fotoğrafı.

Figure 5. High magnification (1000X) microstructure of austempered specimen (350 °C 90 min).

Çizelge 2’de verilen Brinell sertlik sonuçlarına göre östempereleme sıcaklık ve süresinin mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilediği ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlara göre östempereleme sıcaklığı azaldıkça ve östempereleme süresi arttıkça numunelerin sertliği artmıştır. Ayrıca östemperelemiş halde ölçülen tüm sertlik değerleri dökülmüş haldeki sertlik değerine önemli ölçüde fazladır.

**Çizelge 2.** Isıl işlem şartlarına göre elde edilen ortalama sertlik değerleri.

*Table 2. Mean hardness values of as-cast and austempered specimens.*

Numune	Brinell Sertlik Değeri
Dökülmüş	175
350 °C 90 dakika	268
350 °C 120 dakika	273
320 °C 90 dakika	302
320 °C 120 dakika	309

Östempereleme süresinin artmasıyla sertlikte meydana gelen artış yüksek karbonlu östenitin karbon içeriğinin östempereleme süresinin artmasıyla doğrudan ilişkilidir. Bu ilişkiyi doğrulamak için östempereleme ısıl işlemine maruz bırakılan numunelere X-ışınları kırınım analizi uygulanmış ve elde edilen kırınım desenlerinden (Şekil 6) yüksek karbonlu östenitin kafes parametresi ve kafes parametresinden de aşağıdaki ampirik eşitlik kullanılarak östenitin karbon konsantrasyonu hesap edilmiştir [Roberts, 1953].

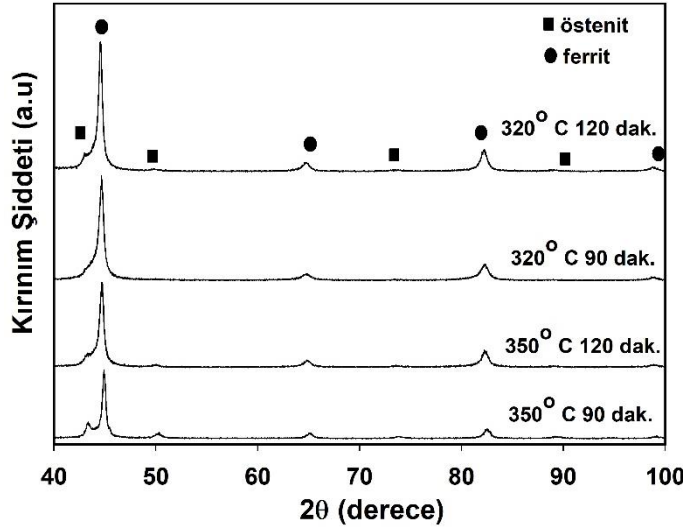
$$a_{\gamma} = 0.3548 + 0.0044C_{\gamma} \quad (2)$$

Bu eşitlikte  $a_{\gamma}$  östenitin kafes parametresi (nm) ve  $C_{\gamma}$  östenitin ağırlıkça karbon yüzdesidir. Hesaplama östenite ait (111), (220) ve (311) düzlemlerine ait Bragg açıları dikkate alınmıştır. Östenitin hesaplanan kafes parametresi ve karbon yüzdeleri Çizelge 2’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre östenitin kafes parametresi ve dolayısıyla karbon yüzdesinin östempereleme süresi ile doğru orantılı olduğu ortaya çıkmıştır. Östenitin karbon miktarındaki artış numunelerin sertliğinin artmasına sebep olmuştur.

**Çizelge 3.** Isıl işlem şartlarına göre hesap edilmiş yüksek karbonlu östenitin kafes parametresi ve karbon miktarı.

*Table 3. Calculated lattice parameter and carbon content of high carbon austenite phase of austempered specimens.*

Numune	Östenit Kafes Parametresi (Å)	Östenit Karbon İçeriği (% ağı.)
350 °C 90 dakika	3,6355	1,9877
350 °C 120 dakika	3,6418	2,1309
320 °C 90 dakika	3,6435	2,1706
320 °C 120 dakika	3,6457	2,2212



Şekil 6. Farklı sıcaklık ve sürelerde östemperlenmiş numunelere ait x-ışınları kırınım desenleri.

Figure 6. X-ray diffraction patterns of austempered specimens.

#### SONUÇLAR VE TARTIŞMA (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında iki farklı sıcaklıkta (350 ve 320 °C) ve iki farklı sürede (90 ve 120 dakika) östemperleme ısıl işlemine maruz bırakılan GGG-50 KGDD'in mikro yapısında meydana gelen değişiklikler ve bu değişikliklerin sertliğe etkisi incelenmiştir. Her iki sıcaklık ve sürede de ösferrit ve yüksek karbonlu östenitten oluşan östemperlenmiş küresel dökme demir mikro yapısı elde edilmiştir. Östemperleme ısıl işlemi neticesinde dökülmüş numunenin sertliği önemli ölçüde artmıştır. Östemperleme sıcaklığı azaldıkça ve östemperleme süresi arttıkça numunelerin sertliğinin de artış gözlemlenmiştir. Sertlikte meydana gelen artışın sebebi sıcaklığın azalmasıyla alt beyritik bölgeye yaklaşma ve sürenin artması ile de yüksek karbonlu östenitin içindeki karbon yüzdesindeki artışa bağlıdır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aşkun, Y., Hasırcı, H., Şeker, U., 2003, "Ni ve Cu ile Alaşımladılmış Küresel Grafitli Dökme Demirlerin İşlenebilirliğinin Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Kaliteleri Açısından Değerlendirilmesi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Vol. 9(2), pp. 191-199.
- Bahmani, M., Elliott, R., Varahram, N., 1997, "The Austempering Kinetics and Mechanical Properties of an Austempered Cu-Ni-Mo-Mn Alloyed Ductile Iron", *Journal of Materials Science*, Vol. 32(18), pp. 4783-4791.
- Blackmore, P.A., Harding, R.A., 1984, "The Effects of Metallurgical Process Variables on the Properties of Austempered Ductile Irons", *J. Heat Treat.*, Vol. 3, pp. 310-325.
- Eric, O., Jovanovic, M., Sidjanin, L., Rajnovic, D., Zec, S., 2006, "The Austempering Study of Alloyed Ductile Iron", *Mater. Des.* Vol. 27, pp. 617-622.
- Gundlach, R. B., Janowak, J. F., 1983, "Development of Ductile Iron for Commercial Austempering", *AFS Transactions*, Vol. 91, pp. 377-388.
- Hasırcı, H., 2000, *Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Alasım Elementleri (Cu ve Ni) ve Östemperleme Süresinin Mikro Yapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Hayrynen, K. L., Brandenburg, K. R., Keough, J. R., 2002, "Applications of Austempered Cast Irons", *AFS Transactions*, Vol., pp. 110, 1-10.
- Hsu, C.H., Shy, Y.H., Yu, Y.H., Lee, S.C., 2000, "Effect of Austempering Heat Treatment on Fracture Toughness of Copper Alloyed Gray Iron", *Mater. Chem. Phys.* Vol., 63, pp. 75-81.
- İzgiz, S., 1986, *Küresel Grafitli Dökme Demir*, Segem Yayını, Ankara

- Keough, J.R., Hayrynen, K.L., 2010, "Designing with Austempered Ductile Iron (ADI)", *AFS Proc.* 10–129.
- Kim, Y.J., Shin, H., Park, H., Lim, J.D., 2008, "Investigation into Mechanical Properties of Austempered Ductile Cast Iron (ADI) in Accordance with Austempering Temperature", *Mater. Lett.* Vol. 62, pp. 357–360.
- Konca, E., Tur, K., Koç, E., 2017, "Effects of Alloying Elements (Mo, Ni and Cu) on the Austemperability of GGG-60 Ductile Cast Iron", *Metals*, Vol. 7, 320, pp. 1-9.
- Kovacs, B. V., 1994, "On the Terminology and Structure of ADI", *AFS Transactions*, Vol. 102, pp. 417-420.
- Meier, L., Hofmann, M., Saal, P., Volk, W., Hoffman, H., 2013, "In-situ Measurement of Phase Transformation Kinetics in Austempered Ductile", *Mater. Charact.*, Vol. 85, pp. 124–133.
- Rao, P.P., Putatunda, S.K., 2003, "Investigations on the Fracture Toughness of Austempered Ductile Irons Austenitized at Different Temperatures", *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 349, pp. 136–149.
- Roberts, C.S., 1953, "Effect Of Carbon On The Volume Fractions And Lattice Parameters Of Retained Austenite And Martensite" *Trans AIME*, Vol.197, pp. 203-204.
- Sadighzadeh, B.A., Yazdani, S., Avishan, B., 2011, "Effect of Shot Peening Process on Fatigue Behavior of an Alloyed Austempered Ductile Iron", *China Foundry*, Vol. 8(3), pp. 325-330.
- Sadighzadeh, B.A., 2015, "Effect of Alloying Elements on Austempered Ductile Iron (ADI) Properties and its Process: Review", *China Foundry*, Vol. 12(1), pp. 54-70.
- Sellamuthu, P., Samuel, D. G. H., Dinakaran D., Premkumar V.P., Li, Z., Seetharaman, S., 2018, "Austempered Ductile Iron (ADI): Influence of Austempering Temperature on Microstructure, Mechanical and Wear Properties and Energy Consumption", *Metals*, Vol. 8 (53), pp. 1-12.
- Sohi, M.H., Ahmadabadi, M.N., Vahdat, A.B., 2004, "The Role of Austempering Parameters on the Structure and Mechanical Properties of Heavy Section ADI", *J. Mater. Process. Technol.* Vol.153–154, pp. 203–208.
- Spengler, A.F., Briggs, H.K., 1972, *The Ductile Iron Process*, Miller and Company Service Handbook, Compendium 4.
- Tun, T., Lwin, K.T., 2008, "Optimizing the Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron for Automobile Differential Gear", *J. Met. Mater. Miner.*, Vol. 18, pp. 199–205.
- Ucun, İ., Aslantaş, K., Taşgetiren, S., Gök, K., 2007, "Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Sinterlenmiş Karbür Kesici Takım ile Tornalama İşleminde Takım Performansının İncelenmesi", *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ*, Vol. 22(4), pp. 739-744.
- Voigt, R. C., Loper, C. R., 1984, "Austempered Ductile Iron — Process Control and Quality Assurance", *Journal of Heat Treating*, Vol. 3(4), pp. 291–309.
- Yalcın, Y., Özel, A., 1999, "Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir", *Metallürji Dergisi*, Vol. 23(119), pp. 15-19.
- Yescas-Gonzales, M.A., 2001, *Modelling the Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Irons*, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, Cambridge, UK, November.