



NORMALİZE ISIL İŞLEMİNDE ARAKRİTİK ÖSTENİTLEME SICAKLIĞININ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

¹Kutay KAYAALP , ²Ömer ŞAHİN , ³Volkan KILIÇLI 

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, TÜRKİYE

^{2,3}Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE
¹kutay.kayaalp@gazi.edu.tr, ²osahin@gazi.edu.tr, ³vkilicli@gazi.edu.tr

Geliş/Received: 16.04.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 15.07.2022

ÖZ: Bu çalışmada, arakritik östenitleme sıcaklıklarında tavlama sonrası, normalize ısıl işlemlerinin alaşımsız küresel grafitli dökme demirin (KGDD) mikroyapısal değişimine ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Y blok olarak dökülen alaşımsız KGDD'den çekme numuneleri tornalamayla hazırlanmıştır. Çekme numuneleri farklı arakritik östenitleme sıcaklıklarında (770°C ila 820°C) 60 dk östenitleme sonrası havada soğutulmuştur. Optik mikroskop ve tarama elektron mikroskobuyla (SEM) mikroyapılar karakterize edilmiştir. Çekme ve sertlik testleriyle mekanik özellikler belirlenmiştir. Belirli bir kimyasal bileşimdeki KGDD'de arakritik östenitleme sıcaklıklarından normalize ısıl işlemiyle, % 8 ila % 75 perlit hacim oranlarında KGDD üretilebilmektedir. Arakritik östenitleme sıcaklığının artışıyla perlit hacim oranının belirgin bir şekilde arttığı belirlenmiştir. Ayrıca perlit hacim oranının artışıyla sertlik, akma ve çekme dayanımında belirgin artış tespit edilmiştir. Buna karşın toplam uzama ve kesit alanı daralmasının azalan ötektoid öncesi ferrit hacim oranıyla azaldığı belirlenmiştir. Perlit hacim oranının % 8'den % 75 artmasıyla; sertlik 181 BHN'den 259 BHN'ye; akma dayanımı 348 MPa'dan 470 MPa'ya; çekme dayanımı 569 MPa'dan 790 MPa'ya belirgin bir şekilde artarken toplam % uzama % 12,6'dan % 8,3'e azalmaktadır. Artan perlit hacim oranıyla kırık yüzeylerdeki çukurcukların azaldığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Normalize ısıl işlemi, Küresel grafitli dökme demir, Arakritik östenitleme, Mekanik özellikler, Perlit miktarı

Effect of Intercritical Austenitization Temperatures in Normalizing Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Ductile Iron

ABSTRACT: In this investigation, the effect of normalizing heat treatments from annealing at intercritical austenitization temperatures on the microstructural evolution and mechanical properties of ductile iron was examined. Tensile specimens were prepared by turning from Y block castings made from unalloyed ductile iron. The specimens were air-cooled from different intercritical austenitization temperatures at (770°C to 820°C) for 60 minutes. Microstructural characterization was performed by optical microscope and scanning electron microscope (SEM). Mechanical properties were determined by tensile and hardness tests. Ductile iron containing different pearlite volume fractions (8 % to 75 %) can be produced by normalizing heat treatment from intercritical austenitization temperatures in ductile iron with a certain chemical composition. The pearlite volume fraction is significantly increased with increasing intercritical austenitization temperatures. Moreover, the hardness, yield, and tensile strength are significantly increased with increasing pearlite volume fraction. However, total elongation and reduction in area decreased with decreasing volume fraction of proeutectoid ferrite. With increasing volume fraction of pearlite from 8 % to 75 %; the hardness increased from 181 BHN to 259 BHN; yield strength increased from 348 MPa to 470 MPa; and the tensile strength significantly increased from 569 MPa to 790 MPa, while the total % elongation decreased from 12.6 % to 8.3 %. The fractographic analysis showed that the number

of dimples zones decreased with increasing volume fraction of pearlite.

Keywords: Normalizing heat treatments, Ductile cast iron, Intercritical austenitization, Mechanical properties, Pearlite volume fraction

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Küresel grafitli dökme demirler (KGDD), diğer dökme demirlere kıyasla daha yüksek dayanım ve sünekliğe sahip olmalarından dolayı en çok kullanılan dökme demirler arasında yerini almıştır [Jenkins ve Forest, 1990]. KGDD'ler otomotiv/imalat sektörü ve makine endüstrisinde yoğun kullanım alanına sahiptirler. KGDD'ler çok iyi dökülebilirlik ve sade karbonlu sıcak dövülmüş çeliğin tokluğunu bir araya getirmenin yanı sıra, dökülmüş halde çok iyi çekme dayanımı ve toplam uzama değerlerine sahiptir. [Jenkins ve Forest, 1990; Elliot, 1988; Hughes, 1988; Karsay, 1979].

Arakritik östenitleme ısıl işlemleri, konvansiyonel östenitlemeye göre daha düşük sıcaklıkta yapılan kısmi östenitleme ısıl işlemleridir. KGDD'lerde arakritik östenitleme sıcaklıklardan su verme ile ferrit+martenzit veya östemperlemeyle ferrit+ösferritten oluşan matris mikroyapıları üretilebilmektedir [Erdogan ve diğ., 2009; Kilicli ve Erdogan, 2010]. Arakritik östenitleme sonrası, östemperleme veya yağda su verme ısıl işlemleriyle martenzit veya ösferrit gibi yapıların miktar ve morfolojisinin kolaylıkla değiştirilerek mekanik özelliklerin kontrol edilebildiği araştırmacılar tarafından bildirilmektedir [Erdogan ve diğ., 2008; Sahin ve diğ. 2007; Kilicli ve Erdogan, 2007; Panneerselvam ve diğ., 2007; Konca ve Tur, 2020,].

Araştırmacılar arakritik östenitleme sonrası östemperleme ısıl işlemiyle üretilen östemperlenmiş çift fazlı küresel grafitli dökme demirlerde östenitleme ve östemperleme sıcaklık/süresini değiştirmek suretiyle ösferrit hacim oranı ve morfolojisini değiştirerek mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisini oldukça geniş bir şekilde araştırmıştır [Rashidi, ve Moshrefi-Torbati, 2000; Putatunda ve Gadicherla, 2000; Aristizabal ve diğ. 2012]. Arakritik östenitleme sonrası yağda hızlı soğutma ısıl işlemiyle üretilen çift fazlı (α +martenzit) KGDD'de ısıl işlem parametrelerine bağlı olarak mikroyapı-mekanik özellikler ve aşınma direncine etkisi araştırmacılar tarafından incelenmiştir [Sahin ve diğ., 2007; Sogut ve diğ., 2019].

Arakritik östenitleme sıcaklıklarında östenitlemeyi müteakip su verme veya östemperlemeyle, sırasıyla ferrit+martenzit veya ferrit+ösferrit matris mikroyapısının mekanik özellikler üzerine etkisinin oldukça çok detaylı bir şekilde araştırılmıştır [Erdogan ve diğ., 2009; Kilicli ve Erdogan, 2010; Erdogan ve diğ., 2008; Sahin ve diğ. 2007; Kilicli ve Erdogan, 2007; Panneerselvam ve diğ., 2007; Konca ve Tur, 2020]. Buna karşın, KGDD'de arakritik östenitleme sıcaklıklarından normalize ısıl işleminin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisiyle ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur [Sogut ve diğ. 2019].

Bu çalışmada, arakritik östenitleme sıcaklığında östenitleme sonrası normalize ısıl işleminin KGDD'in mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın amacı; aynı kimyasal bileşimdeki alaşımsız bir küresel grafitli dökme demirde, arakritik östenitleme sıcaklıklarından östenitleme ve havada soğutma suretiyle farklı perlit ve ferrit miktarlarına sahip mikroyapılar elde ederek, bu mikroyapının mekanik özellikler üzerine etkisini belirlemektir.

MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Malzeme (Material)

Küresel grafitli dökme demirin üretiminde 1 ton kapasiteli orta frekanslı indüksiyon ocağı kullanılmıştır. Ticari bir dökümhaneden gerçekleştirilen döküm işlemlerinde, indüksiyon ocağındaki soresel piki ve hurda karışımının ergitilmesiyle elde edilen sıvı metal 1500 °C'ye ulaştığında, 250 kg'lık işlem potasına alınarak % 6-7 Mg içeren ferro silikon alaşımlar ilave edilmek suretiyle 1450 °C'de Mg ile küreselleştirme ve aşılama işlemleri ve uygulanmıştır. Döküme hazır sıvı metal 1400 °C - 1450 °C sıcaklık aralığında Y blok kum kalıplara dökülmüştür. Deneysel çalışmalarda kullanılan alaşımsız KGDD'in

kimyasal bileşimi Çizelge 1’de verilmiştir. Çalışmalarda kullanılan alaşımsız KGDD’in mekanik özellikler bakımından EN-GJS-700-2 standardına uygun KGDD olduğu belirlenmiştir. Kimyasal kompozisyon, Y blok kalıba döküm öncesi dökülen çil numunelerden OBLF marka optik emisyon spektrometresi ile analiz edilmiştir.

Çizelge 1. Isıl işlemlerde kullanılan alaşımsız KGDD’in kimyasal bileşimi (ağırlıkça-%)

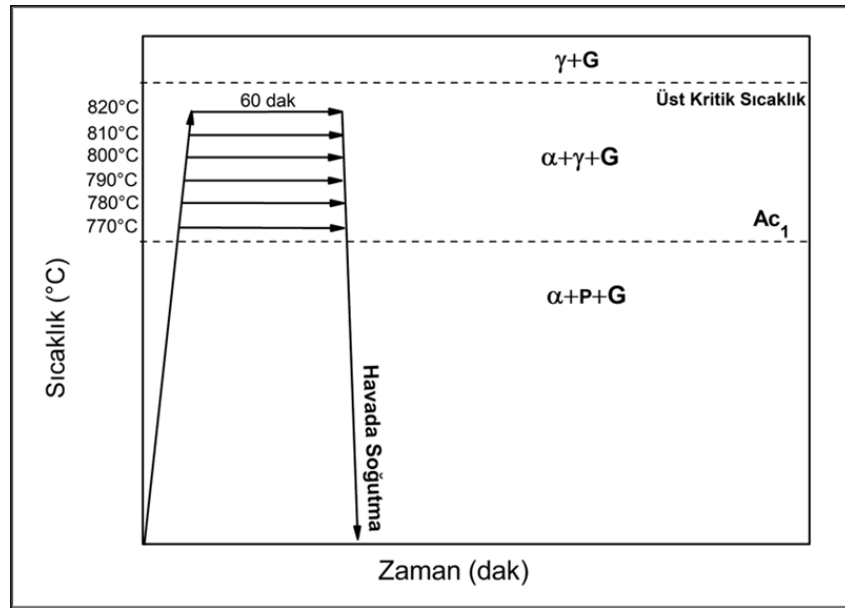
Table 1. The chemical composition of ductile cast iron used in the heat treatments (weight-%)

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Ni	Cu	Ti	Co	Fe
3,68	2,49	0,3	0,025	0,012	0,04	0,02	0,015	0,52	0,01	0,02	Kalan

Isıl işlemler (Heat Treatments)

Isıl işlemlerde Heraeus marka elektrik dirençli fırın kullanılmıştır. Ø12 x 100 mm boyutlarında Y bloktan tornalanmış çubuklardan 5 adet ısıl işlem için hazırlanmıştır.

Parçaların üzerine elektrik direnç kaynağıyla K tipi ısıl çift kaynatılarak arakritik östenitleme sıcaklığının kontrolü gerçekleştirilmiştir. Şekil 1’de gösterilen farklı arakritik östenitleme sıcaklıklarında 60 dk östenitlenen KGDD parçalar havada soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 1. Uygulanan ısıl işlemlerin şematik gösterimi

Figure 1. Schematically representation of applied heat treatments

Karakterizasyon Çalışmaları (Characterization Studies)

Isıl işlem sonrası KGDD çubuklardan Ø12x10mm boyutlarında parçalar kesilerek metalografik inceleme için hazırlanmıştır. Standart metalografik yöntemlerle numune hazırlığı yapılmış ve dağlayıcı olarak % 2 Nital çözeltisi kullanılmıştır. LAS (versiyon 4.6) görüntü analiz programı kullanılarak nodularite, nodül sayısı, ferrit ve perlit hacim oranlarının hesaplatılmıştır. 10 ayrı bölgeden yaklaşık 2,5 mm² alandan X100 büyütmede elde edilen optik mikroyapılar kullanılarak hacim oranı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Optik mikroyapılar Leica DMI 5000 M model optik mikroskop kullanılarak elde edilmiştir. Kırık yüzey karakterizasyonu için çekme testi sonrası yüzeyler Jeol JSM 6060 LV model tarama elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir.

Mekanik Testler (Mechanical Tests)

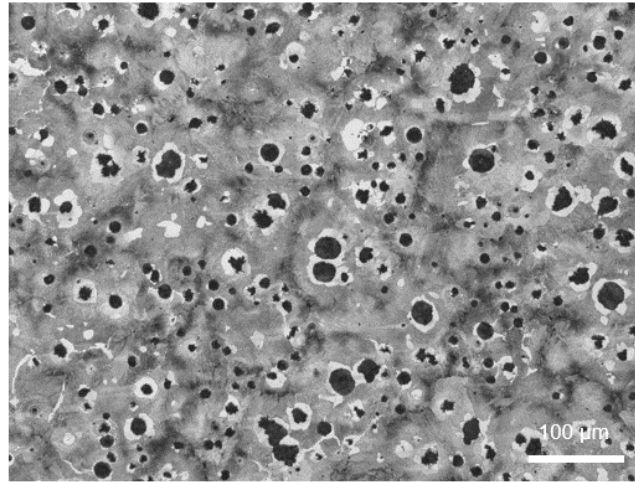
Çekme numuneleri ASTM E8M standardına [ASTM E8M/8M-21] uygun boyutlarda tornalanarak işletilmiştir. Çekme testlerinde Instron 3369 model çekme test cihazı kullanılmıştır. Çekme testleri 1,2 mm/dk hareketli çene hızında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Numunelerin statik tokluk değeri çekme eğrisinin altında kalan alanın toplamı BlueHill 2 yazılımı kullanılarak hesaplatılmıştır. Benzer ısı işlem grubundan 5 adet numune test edilmiş ve ortalama değerler verilmiştir.

Sertlik değerleri Emcotest DuraVision 200 model sertlik ölçme cihazı kullanılarak, Brinell (BHN) yöntemiyle 2,5 mm WC bilya ve 187,5 kgf yük altında gerçekleştirilmiştir. Parlatılmış numunelerde 10 değişik noktadan ölçüm alınmış ve bu değerlerin ortalaması verilmiştir.

BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Mikroyapısal İnceleme Sonuçları (Microstructural Examination Results)

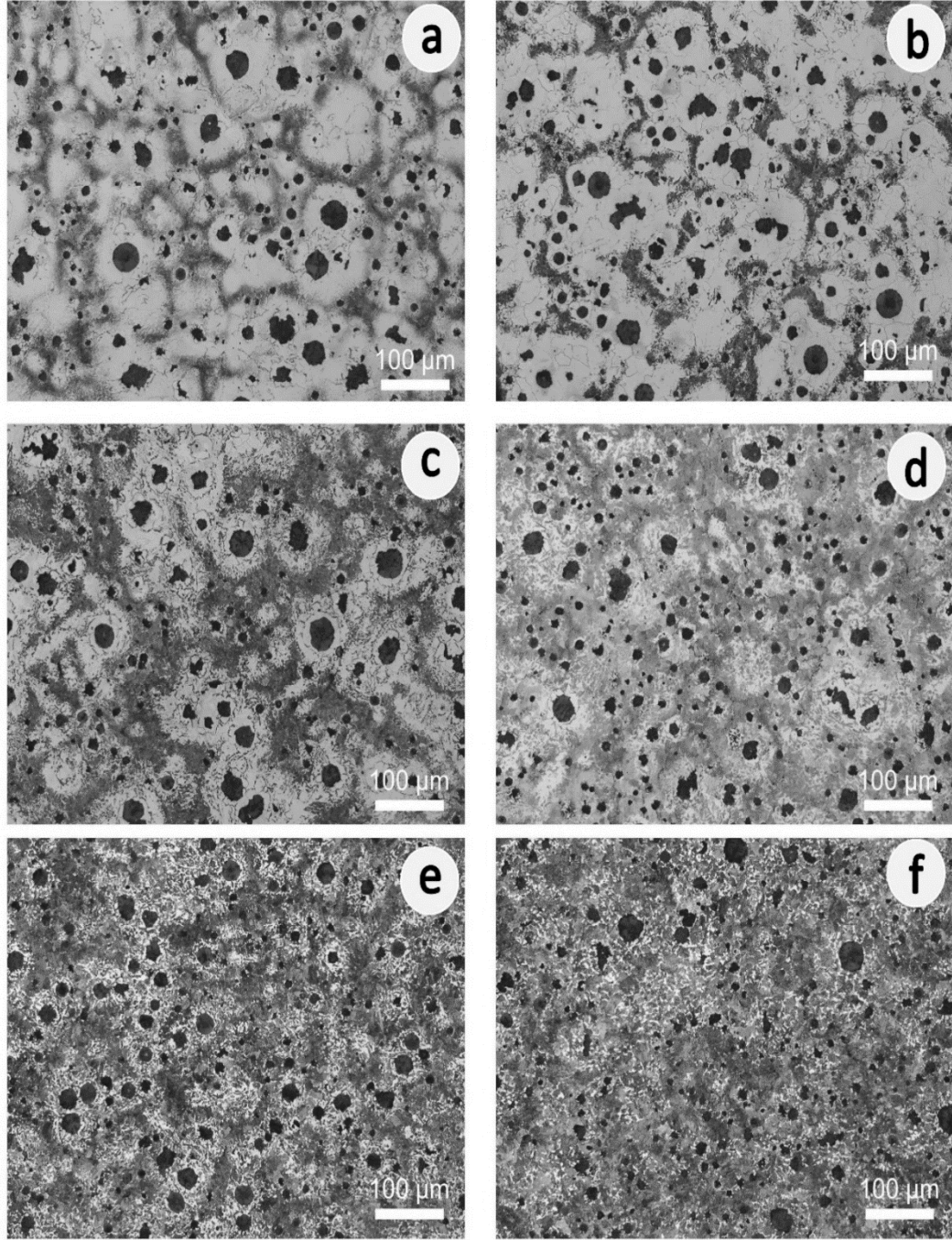
Dökülmüş koşullardaki KGDD'in optik mikroyapısı Şekil 2'de gösterilmektedir. Dökülmüş haldeki işlemsiz KGDD numunenin çoğunlukla perlitik yapıdan oluştuğu ve grafitlerin etrafının ferritik yapı ile çevrelediği gözlenmiştir. Bu yapı KGDD'lerde tipik olarak dana gözü yapı adlandırılmakta olup, perlitik KGDD mikroyapısı ile uyumlu bir mikroyapıdır. Dökülmüş haldeki KGDD'in 1 mm²'deki grafit nodül sayısı 216 adet ve nodularitesi % 93 olarak görüntü analiz yazılımıyla hesaplanmıştır.



Şekil 2. Dökülmüş haldeki alaşımsız küresel grafitli dökme demirin optik mikroyapısı

Figure 2. Optical microstructure of as-cast unalloyed ductile cast iron

Arakritik östenitleme sıcaklıklarında 60 dk tavlansın ve normalize edilmiş KGDD'in arakritik östenitleme sıcaklığıyla değişen optik mikroyapıları Şekil 3.a ila Şekil 3.f'de gösterilmektedir. Artan arakritik östenitleme sıcaklığıyla ferrit hacim oranı azalırken, perlit hacim oranının belirgin bir şekilde arttığı gözlenmektedir. Arakritik östenitleme sıcaklığında normalize edilmiş KGDD'lerde arakritik östenitleme sıcaklığının arttırılmasıyla tipik dana gözü yapı bozunmuş olup, grafit çevresindeki ferrit miktarı azalmıştır. Araştırmacılar artan östenitleme sıcaklığıyla perlit miktarının arttığı ve dana gözü yapının bozunduğunu rapor etmektedir [Kobayashi ve Yamamoto, 1988; Kobayashi ve Yamada, 1996;-20; Coskun ve diğ. 2008].

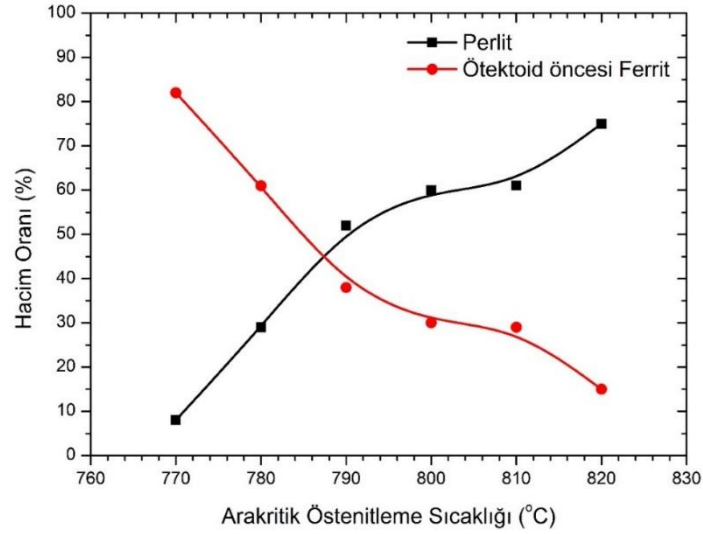


Şekil 3. Değişik arakritik östenitleme sıcaklıklarında 60 dk östenitlenmiş ve normalize edilmiş KGDD'in mikroyapıları; a) 770°C, b) 780°C, c) 790°C, d) 800°C, e) 810°C ve f) 820°C

Figure 3. Optical microstructures of ductile cast iron which austenitized at intercritical austenitization temperatures for 60 minutes and normalized from; a) 770°C, b) 780°C, c) 790°C, d) 800°C, e) 810°C, f) 820°C

Aarakritik östenitleme sıcaklığıyla perlit miktarındaki değişim Şekil 4'te verilmiştir. Artan arakritik östenitleme sıcaklığıyla perlit hacim oranı % 8'den % 75'e artarken, ötektoid öncesi ferrit hacim oranı % 81,7'den % 14,7'ye azalmaktadır (Çizelge 2). Bilindiği üzere, $\alpha+\gamma+G$ bölgesinde östenitleme esnasında arakritik östenitleme sıcaklığı arttıkça, manivela kuralına göre östenit miktarı artarken ferrit miktarı azalmaktadır. Arakritik östenitleme sıcaklıklarındaki östenit normalize edilerek havada soğuma sonrasında iyi bilindiği üzere ince perlite dönüşmektedir. Tüm numunelerde grafit miktarı ~% 10 oranında olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 2). Araştırmacılar [Coskun ve diğ. 2008; Sylvester ve Kenneth, 2020; Gonzaga, 2013], artan arakritik östenitleme sıcaklığıyla perlit hacim oranının arttığını

bildirmektedir.



Şekil 4. Arakritik östenitleme sıcaklığıyla ötektoid öncesi ferrit ve perlit hacim oranının değişimi
Figure 4. Variation of the pearlite and proeutectoid ferrite volume fractions with intercritical austenitization temperatures

Çizelge 2. Mikroyapısal bileşenlerin ölçüm sonuçları

Table 2. The measurement results of microstructural constituents

Numune	Perlit hacim oranı (%)	Ötektoid öncesi ferrit hacim oranı (%)	Grafit hacim oranı (%)	Nodül sayısı adet/mm ²	Nodülerite (%)
İşlemsiz KGDD	70 ± 3,1	19,9 ± 2,1	10,1 ± 1,2	216	93
770 °C	8 ± 2,4	81,7 ± 2,1	10,3 ± 1,1	211	94
780 °C	29 ± 2,8	60,5 ± 2,2	10,5 ± 1,3	205	95
790 °C	52,0 ± 3,0	37,8 ± 2,3	10,2 ± 1,2	210	93
800 °C	60 ± 3,1	29,6 ± 2,2	10,4 ± 1,4	215	94
810 °C	67 ± 3,4	22,8 ± 2,4	10,2 ± 1,4	213	95
820 °C	75 ± 3,5	14,7 ± 2,5	10,3 ± 1,5	212	93

Mekanik Test Sonuçları (Mechanical Test Results)

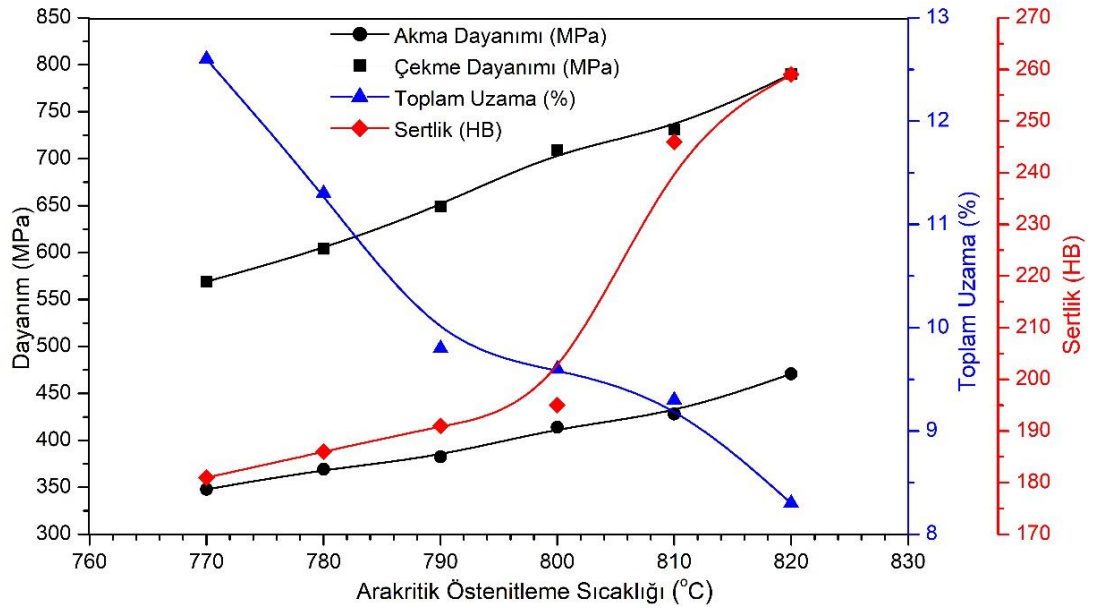
Arakritik östenitleme sıcaklıklardan normalize edilen KGDD numunelerin mekanik özellikleri Çizelge 3'te verilmektedir. Arakritik östenitleme sıcaklıklarından normalize edilmiş alaşımsız KGDD numunelerin akma dayanımı 347,9-470,9 MPa arasında ve çekme dayanımı 569,1-790,1 MPa arasında olduğu belirlenmiştir (Çizelge 3). 810°C'den yapılan normalize ısıl işlemiyle üretilen numunelerin akma ve çekme dayanımı değerlerinin dökülmüş haldeki numunenin akma ve çekme dayanımı değerlerine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Akma ve çekme dayanımı artan arakritik östenitleme sıcaklığıyla artarken toplam % uzama değeri önemli ölçüde azalmaktadır. Bununla birlikte, artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile kesit alan daralması ve statik tokluk azalmıştır (Çizelge 3).

Çizelge 3. Çekme ve sertlik testleri sonuçları

Table 3. Tensile and hardness test results

Numune	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Sertlik (BHN 2,5/187,5)	Kesit alan daralması (%)	Statik Tokluk (Joule)
İşlemsiz KGDD	418,3 ± 3,7	737,8 ± 3,4	7,65 ± 0,9	204 ± 1,5	6 ± 1,1	33,7 ± 5,4
770 °C	347,9 ± 9,7	569,1 ± 11,7	12,6 ± 1,1	181,0 ± 1,5	11,3 ± 2,2	46,1 ± 7,4
780 °C	369,3 ± 8,1	603,9 ± 2,2	11,3 ± 0,5	186,0 ± 2,2	10,3 ± 0,3	43,3 ± 4,1
790 °C	382,6 ± 4,3	649,3 ± 22,7	9,8 ± 0,9	191,0 ± 2,0	8,0 ± 0,9	42,1 ± 2,2
800 °C	414,1 ± 12,5	709,4 ± 21,5	9,6 ± 1,2	195,0 ± 3,5	7,2 ± 0,3	40,2 ± 3,9
810 °C	428,2 ± 9,6	731,1 ± 12,4	9,3 ± 0,9	246,0 ± 3,3	6,6 ± 0,8	40,1 ± 6,9
820 °C	470,9 ± 2,8	790,1 ± 6,8	8,3 ± 1,3	259,0 ± 4,0	5,8 ± 0,2	39,5 ± 3,4

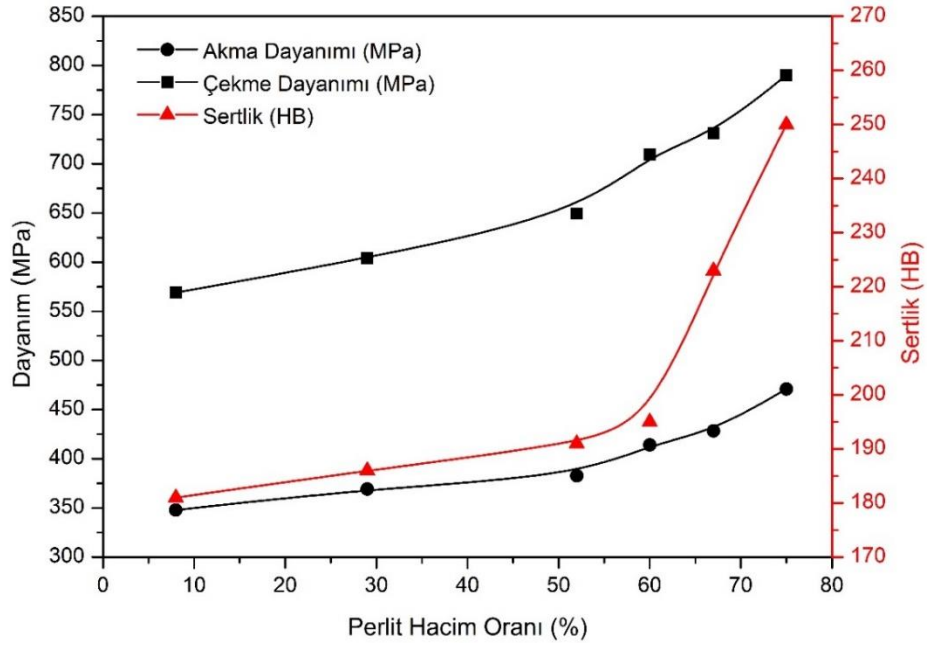
Aarakritik östenitleme sıcaklığıyla KGDD numuneleri mekanik özelliklerindeki değişim Şekil 5’de sunulmuştur. Aarakritik östenitleme sıcaklığının artışı sertlik, akma ve çekme dayanımında artışa neden olurken, uzama ve alan daralması değerlerinde belirgin bir azalmaya neden olmaktadır. Aarakritik östenitleme sıcaklıklardan normalize edilen numunelerin sertlik değerleri 181-259 BHN arasında değişmektedir (Çizelge 3). Aarakritik sıcaklığının artışı ile perlit miktarının artışı sertlik değerlerinde artışa neden olmuştur. Özellikle 810°C ve 820°C aarakritik östenitleme sıcaklıkların yapılan normalize ısıl işlemi sonucu sertlik değerlerin belirgin bir artış gözlenmiştir.



Şekil 5. Aarakritik östenitleme sıcaklığıyla mekanik özellikler arasındaki ilişki

Figure 5. The relationship between mechanical properties and intercritical austenitization temperatures

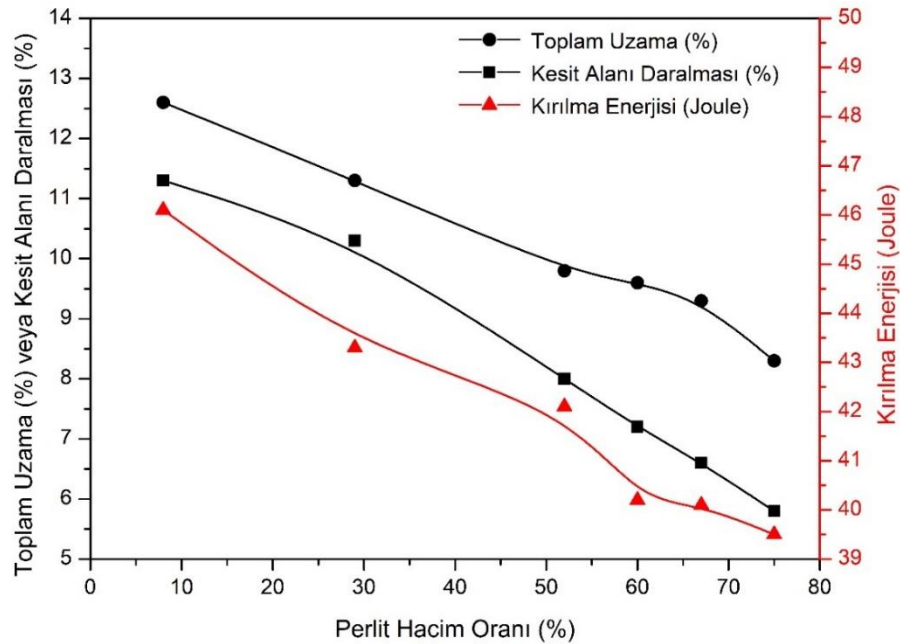
Aarakritik östenitleme sıcaklıklardan normalize edilen KGDD numunelerin perlit miktarıyla mekanik özelliklerinin değişimi Şekil 6’da gösterilmektedir. Sertlik, akma ve çekme dayanımı artan perlit hacim oranıyla birlikte belirgin bir şekilde artmaktadır. Perlit miktarının artması dağılım mukavemetlenmesine neden olduğundan numunelerin mekanik özelliklerinde belirgin bir iyileşmeye neden olmuştur. Perlit miktarının % 9’dan % 75’a artması, çekme dayanımında 569 MPa’dan 790 MPa’ya artışa neden olmuştur. Alaşımız KGDD numunelerde, % 60 perlit miktarından sonra mekanik özelliklerde belirgin artış tespit edilmiştir. Araştırmacılar perlit hacim oranının artışıyla mekanik özelliklerin geliştiği bildirmektedir [Sylvester ve Kenneth, 2020; Gonzaga, 2013].



Şekil 6. Perlit hacim oranının akma-çekme dayanımı ve sertliğe etkisi

Figure 6. Effect of volume fraction of pearlite on yield-tensile strength and hardness

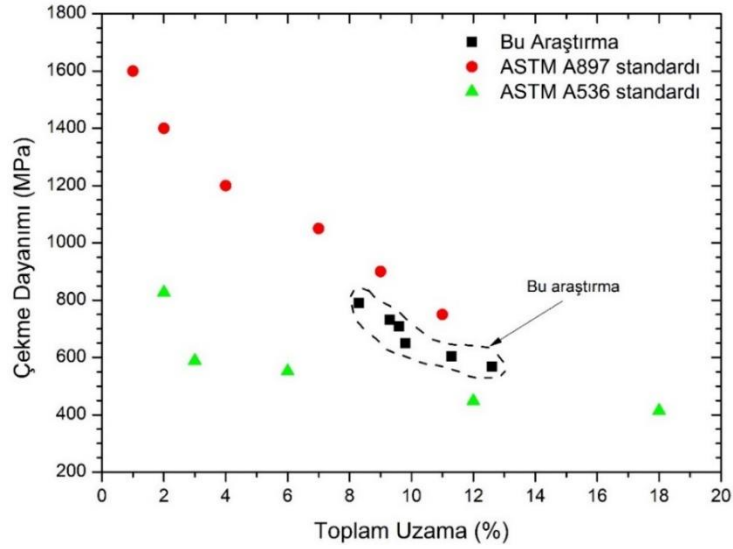
Aarakritik östenitleme sıcaklıklardan normalize edilen KGDD numunelerde perlit miktarıyla toplam % uzama, alan daralması ve statik tokluk değerlerinin değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Artan perlit miktarıyla toplam % uzama, alan daralması ve statik tokluk belirgin bir şekilde azalmaktadır. Perlit miktarının artması sünek ve yumuşak ferrit miktarında azalmaya neden olmasından dolayı mekanik özellik değerlerinde belirgin azalmaya neden olmuştur. Bu çalışmaya benzer olarak, perlit miktarının artması toplam uzama ve statik tokluk değerlerinde azalmaya neden olduğunu önceki yapılan bir araştırmada rapor edilmektedir [Gonzaga, 2013].



Şekil 7. Perlit hacim oranının statik tokluk, kesit alan daralması ve toplam % uzama üzerine etkisi

Figure 7. Effect of volume fraction of pearlite on fracture energy, reduction in area, and total elongation %

Arakritik östenitleme sıcaklıklardan normalize edilen KGDD numunelerin toplam uzama ve çekme dayanımı değerlerinin standartlarda verilen KGDD'ler ile karşılaştırılması Şekil 8'de gösterilmektedir. Ferrit + perlitik mikroyapıya sahip arakritik östenitleme sıcaklıklarından normalize edilmiş KGDD'lerin çekme dayanımı ve toplam % uzama değerleri ilgili ASTM A536 ve ASTM A897 standartlarıyla karşılaştırıldığında, dökülmüş koşullardaki ferritik/perlitik KGDD'ler ile östemperlenmiş KGDD'ler arasında çekme dayanımı ve toplam uzama değerine sahip oldukları gözlenmektedir. 820°C'den havada soğutulmuş KGDD'in (% 75 perlit miktarı) toplam % uzama değeri ve çekme dayanımı, ASTM A897'de verilen östemperlenmiş sınıf olarak bilinen ve çekme dayanımı 750 MPa ve toplam uzama değeri % 11 olan KGDD'den daha yüksek toplam uzama ve çekme dayanımı sergilemiştir.

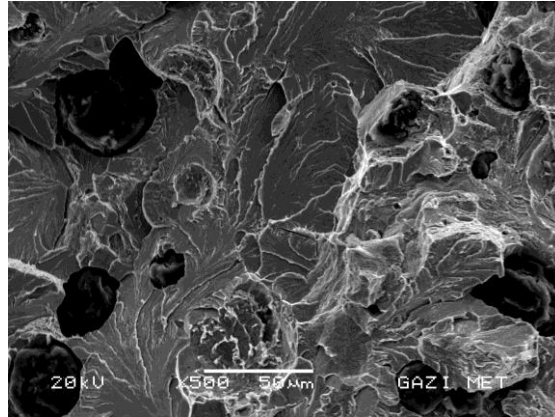


Şekil 8. ASTM standart dökme demir sınıflarıyla bu çalışmada üretilen numunelerin toplam uzama ve çekme dayanımlarının karşılaştırılması

Figure 8. Comparison of total elongation and tensile strength values of this study with ASTM standard cast iron grades

Kırık Yüzey İncelemesi (Examination of Fracture Surfaces)

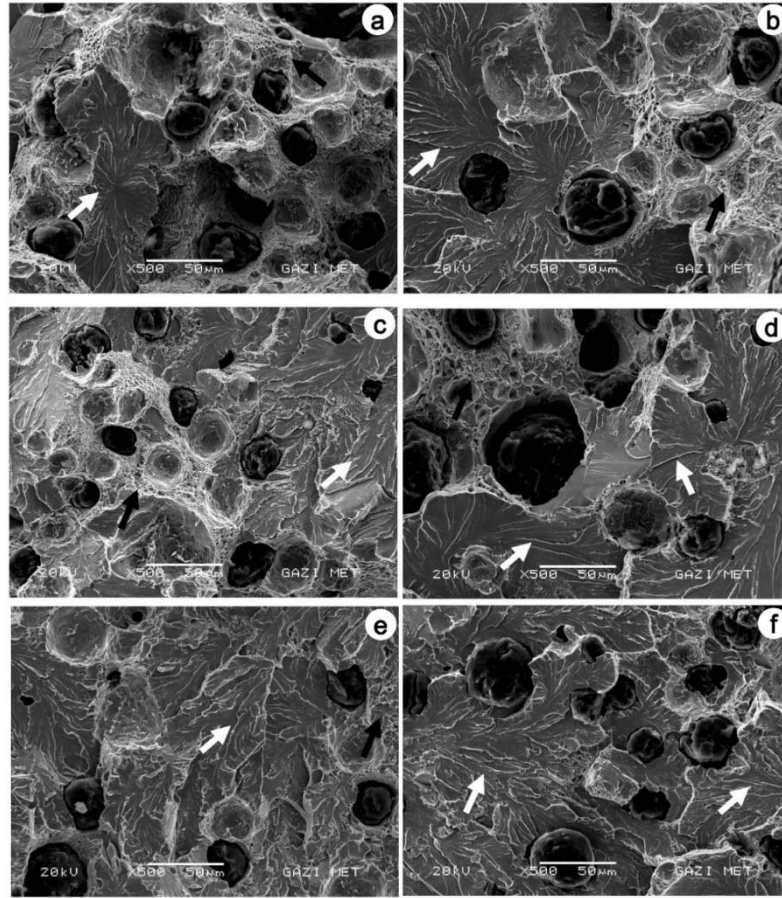
Tüm çekme numunelerin kırık yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. Dökülmüş haldeki KGDD numunenin kırık yüzey SEM mikroyapısı Şekil 9'da verilmiştir. Dökülmüş haldeki KGDD'de nispeten yüksek olan perlit miktarı (% 70) gevrek kırılmanın delili olan düzgün yüzey ayrılma (quasi-cleavage) oluşumuna neden olmuştur (Şekil 9).



Şekil 9. Dökülmüş koşuldaki KGDD numunenin kırık yüzey SEM mikroyapısı

Figure 9. SEM fractography of as-cast ductile iron specimen

Aarakritik östenitleme sıcaklıklarında normalize edilmiş numunelerin kırık yüzey SEM mikroyapıları Şekil 10.a ila Şekil 10.f'de verilmiştir. Sünek kırılmanın delili olan mikro çukurcuklar (dimples) en fazla 770°C'den normalize edilen KGDD numunede gözlenirken, 820°C'den normalize edilen KGDD numunede daha az olduğu belirlenmiştir. Arakritik östenitleme sıcaklığındaki arttırılmasıyla mikro çukurcuklar azalmıştır. Gevrek kırılmanın delili olan düzgün yüzey ayrılma (quasi-cleavage) bölgeleri ise en fazla 820°C'den normalize edilen KGDD numunede, en az ise 770°C'den normalize edilen KGDD numunede gözlenmiştir. Arakritik östenitleme sıcaklığındaki artış düzgün yüzey ayrılma bölgelerinde artışa neden olmuştur. Kırık yüzey incelemelerinde mikro çukurcuklu bölgelerin sünek kırılmanın ve düzgün yüzey ayrılma kırılmasının ise gevrek kırılmanın delili olduğu mevcut literatürden iyi bilinmektedir [Underwood ve Banerjee, 1988]. Arakritik östenitleme sıcaklığının artışıyla KGDD numunelerin kırılma modları sünekten gevrek kırılmaya doğru değişmektedir.



Şekil 10. Farklı arakritik östenitleme sıcaklıklarında 60 dk östenitlenmiş ve normalize edilmiş KGDD çekme numunelerinin kırık yüzey SEM mikroyapıları; a) 770°C, b) 780°C, c) 790°C, d) 800°C, e) 810°C ve f) 820°C. (gevrek klivaj kırılmayı beyaz oklar, sünek kırılma bölgelerini ise siyah oklar ise göstermektedir)

Figure 10. Fracture surface SEM fractography of the tensile specimens which austenitized at different intercritical austenitization temperatures for 60 min; a) 770°C, b) 780°C, c) 790°C, d) 800°C, e) 810°C, and f) 820°C. White arrows show brittle cleavage fracture and black arrows show ductile fracture regions

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu araştırmada, arakritik östenitleme sıcaklıklarının ve normalize ısıl işlemlerinin alaşımız KGDD'in mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- Alaşımız KGDD'de arakritik östenitleme sıcaklıklarından normalize ısıl işlemiyle, % 8 ila % 75 arasında perlit miktarına sahip KGDD'ler geliştirilebilmektedir.

- Arakritik östenitleme sıcaklıklarından normalize edilmiş KGDD'de artan arakritik östenitleme sıcaklığıyla birlikte ötektoid öncesi ferrit miktarı % 81,7'den % 14,7'ye azalmaktadır.
- Perlit miktarındaki artış, sertlik değerini 181 BHN'den 259 BHN'ye; akma dayanımını 348 MPa'dan 470 MPa'ya; çekme dayanımını 569 MPa'dan 790 MPa'ya belirgin bir şekilde arttırırken toplam % uzama değeri % 12,6'dan % 8,3'e azalmaktadır.
- Arakritik östenitleme sıcaklıklarından normalize edilmiş KGDD'ler ASTM A536 ve ASTM A897 standartlarıyla karşılaştırıldığında, dökülmüş koşullardaki ferritik/perlitik KGDD'ler ile östemperlenmiş KGDD'ler arasında toplam uzama ve çekme dayanımı sergiledikleri belirlenmiştir.
- Arakritik östenitleme sıcaklığının artışıyla perlit miktarındaki artış KGDD numunelerde sünekten gevreğe doğru kırılma modunda değişime neden olmaktadır.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

BHN: Brinell Sertlik Numarası
 KGDD: Küresel Grafitli Dökme Demir
 LAS: Leica Application Suite
 MPa: Mega Paskal
 α : Ferrit
 γ : Östenit
 G: Grafit

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, 07/2020-19 kodlu proje ile finansal destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aristizabal, R., Foley, R., and Druschitz, A., 2012, "Intercritically austenitized quenched and tempered ductile iron", International Journal of Metalcasting, Vol. 6, No.4, pp. 7-14.
- ASTM E8/E8M-21, 2021, "Standard test methods for tension testing of metallic materials", ASM International, USA.
- Coskun, S., Kilicli, V. and Erdogan, M., "Arakritik östenitleme sıcaklıklarından farklı hızlarda soğutmanın küresel grafitli dökme demirin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisi", 14. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi (IMMC2008), İstanbul, 96-104, 16-19 Ekim 2008.
- Elliot, R., 1988, Cast Iron Technology, Butterworths&Co, London, UK.
- Erdogan, M., Kilicli, V., and Demir, B., 2008, "The influence of the austenite dispersion on phase transformation during the austempering of ductile cast iron having a dual matrix structure", International Journal of Cast Metals Research, Vol. 99, No. 7, pp. 751-760.
- Erdogan, M., Kilicli, V., and Demir, B., 2009, "Transformation characteristics of ductile iron austempered from intercritical austenitizing temperature ranges", Journal of Materials Science, Vol. 44, No. 5, pp. 1394-1403.
- Gonzaga, R.A., 2013, "Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons", Materials Science and Engineering A, Vol. 567, No.1, pp. 1-8.
- Hughes, I. C. H., 1988, Ductile Iron in Casting, ASM International, Ohio, USA.
- Jenkins, L. R. and Forrest, R. D., 1990, Ductile iron, properties and selections: irons, steels and high performance alloys (First edition), ASM International, Ohio, USA.
- Karsay, S.I., 1979, Ductile Iron Production and Practices, American Foundrymen's Society, USA.
- Kilicli, V. and Erdogan, M., 2007, "Effect of ausferrite volume fraction and morphology on tensile

- properties of partially austenitised and austempered ductile irons with dual matrix structures”, *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 20, No. 4, pp. 202-214.
- Kilicli, V. and Erdogan, M., 2010, “The nature of the tensile fracture in austempered ductile iron with dual matrix microstructure”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 19, No. 1, pp. 142-149.
- Kobayashi, T. and Yamada, S., 1996, “Effect of holding time in the ($\alpha + \gamma$) temperature range on toughness of specially austempered ductile iron”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 27, No. 7, pp. 1961-1971.
- Kobayashi, T. and Yamamoto, H., 1988, “Development of high toughness in austempered type ductile cast iron and evaluation of its properties”, *Metallurgical Transactions A*, Vol. 19, No.2, pp. 319-327.
- Konca E., Tur K., 2020, “Östenitleme Sıcaklığın EN-GJS-600-3 Küresel Grafitli Dökme Demirin Östemperlenme Davranışına Etkisi”, *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Vol. 8, No. 3, pp. 706-722.
- Panneerselvam, S., Putatunda, S., Gundlach, R., 2017, “Influence of intercritical austempering on the microstructure and mechanical properties of austempered ductile cast iron (ADI)”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 694, No. 1, pp. 72-80.
- Putatunda, S. K. and Gadicherla, P. K., 2000, “Effect of austempering time on mechanical properties of a low manganese austempered ductile iron”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 9, No. 2, pp. 193-203.
- Rashidi, A. M. and Moshrefi-Torbati, M., 2000, “Effect of tempering conditions on the mechanical properties of ductile cast iron with dual matrix structure (DMS)”, *Materials Letters*, Vol. 45, No. 3-4, pp. 203-207.
- Sahin, Y., Erdogan, M., and Cerah, M., 2008, “Effect of martensite volume fraction and tempering time on abrasive wear of ferritic ductile iron with dual matrix”, *Wear*, Vol. 265, No. 1-2, pp. 196-202.
- Sahin, Y., Erdogan, M., and Kilicli, V., 2007, “Wear behavior of austempered ductile irons with dual matrix structures”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 444, No. 1-2, pp. 31-38.
- Sogut, M.U., Ugurlu S., Kilicli V., “Controlling of pearlite volume fraction by air cooling from intercritical austenitizing temperatures in GGG70 ductile cast iron”, 4th International Iron&Steel Symposium (UDCS'2019), Karabük, 340-342, 4-6 April 2019.
- Sylvester, O.O, Kenneth, K., 2020, “Structural characterization and mechanical properties of pearlite - enhanced micro-alloyed ductile irons”, *Journal of King Saud University*, Vol. 32, No.3, pp. 205-210.
- Underwood, E.E., Banerjee, K., 1987, *ASM Metals Handbook, Fractography*, vol. 12, ASM International Ohio, USA.