



Küresel grafitli dökme demir malzemesinde östemperleme işleminin mekanik dayanım ve yorulma çatlak ilerleme davranışına etkisinin araştırılması

Nihal Yumak¹, Kubilay Aslantaş*²

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Afyon, Karahisar, 03000, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Östemperleme sıcaklığı çatlak ilerleme oranını etkilemektedir
- Östemperleme süresi ve östemperleme sıcaklığı malzemenin mekanik dayanımını etkilemektedir
- Üst beynit sıcaklığındaki östemperleme işlemi yorulma ömrünü artırmaktadır

Makale Bilgileri

Geliş: 05.10.2016

Kabul: 20.11.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.406792

Anahtar Kelimeler:

Östemperleme işlemi,
küresel grafitli dökme demir,
yorulma çatlak ilerlemesi

ÖZET

Bu çalışmada östemperleme işleminin küresel grafitli dökme demirin mekanik ve yorulma dayanımına etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla perlitik yapıdaki malzemeye farklı östemperleme sıcaklıklarında ve sürelerinde ısı işlem uygulanmıştır. Östemperleme işleminin, yorulma dayanımı üzerindeki etkisini tespit etmek adına yorulma çatlak ilerleme testleri yapılmıştır. Testlerde M(T) yorulma numuneleri kullanılmış olup, çatlak büyüme oranları deneysel olarak tespit edilmiştir. Ayrıca östemperleme işleminin, eşik gerilme şiddeti faktörü (K_{th}) ve yorulma ömrü üzerine etkisi araştırılmıştır. Uygulanan ısı işlemlerle birlikte malzemenin akma ve çekme dayanımının östemperleme sıcaklığının artmasıyla birlikte azaldığı, yüzde uzama miktarının ise malzeme içerisindeki kalıntı östenit miktarının artmasıyla birlikte arttığı görülmüştür. Bu durum nihai hasar oluşumu için gerekli olan kayma bantlarının oluşumu geciktirmiş ve K_{th} değerini artırmıştır. Artan östemperleme sıcaklığıyla birlikte, malzemenin tokluğu artmış ve çatlak ilerleme oranı düşmüştür. Östemperleme süresi, malzemenin yorulma dayanımını belli bir miktar değiştirirse de, östemperleme sıcaklığına oranla bu değişimin çok küçük olduğu görülmüştür.

Investigation of effect of austempering process on mechanical strength and fatigue crack growth behaviour of ductile iron material

H I G H L I G H T S

- Austempering process temperature effects crack propagation rate
- The austempering temperature and the austempering time affect the mechanical strength of the material
- Austempering process at upper bainite temperature increase fatigue life

Article Info

Received: 05.10.2016

Accepted: 20.11.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.406792

Keywords:

Austempering process,
spheroidal graphite cast iron,
fatigue crack propagation

ABSTRACT

In this study, the effect of austempering treatment on the mechanical and fatigue strength of spheroidal graphite cast iron was investigated. For this purpose, material in pearlitic structure were heat treated at different austempering temperatures and times. In order to determine the effect of the austempering process on fatigue strength, fatigue crack propagation tests were applied. M(T) fatigue samples were used in the tests and crack growth rates were determined experimentally. In addition, the effect of the austempering process on the threshold stress intensity factor (K_{th}) and fatigue life was investigated. With the applied heat treatment, the yield and tensile strength of the material decreased with increasing the austempering temperature and the elongation increased with the increase of the amount of residual austenite in the material. In addition, the formation of the shear bands required for ultimate damage formation delayed and increased the K_{th} value. Along with the increased austempering temperature, the toughness of the material has increased and the crack propagation rate has decreased. Although the time of the austempering changes the fatigue strength of the material by a certain amount, this change is found to be very small compared to the austempering temperature.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: aslantas@aku.edu.tr/ Tel: +90 272 228 1213 / 15227

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metal malzemelerin kullanıldığı ilk yıllardan günümüze kadar olan süreçte, üstün özelliklerin elde edilebileceği malzeme türleri sürekli araştırma konusu olmuştur. Bu süreç içerisinde, imalat sektöründe yaygın olarak kullanılan küresel grafitli dökme demirlere (KGDD) olan ilgi her geçen gün artmıştır [1]. Bu grup dökme demirler yapısal olarak renkleri ve grafit şekilleri itibarıyla diğer grup dökme demirlerden ayrılmaktadır. Küresel grafitli dökme demirler düşük ergime sıcaklığı ve kolay işlenebilirliklerinin yanı sıra düşük üretim maliyeti, yüksek aşınma direnci ve yüksek yorulma dayanımı gibi özellikleriyle de öne çıkmaktadır [2]. Östempereleme işlemi küresel grafitli dökme demirlere uygulanan bir takım ısıtma işlemi kapsamaktadır. Isıtma işlemi sıcaklıklarında ve sürelerinde yapılan küçük bir değişim malzemenin mekanik özelliklerini şaşırtıcı oranda etkilemektedir. Östempereleme prosesi, östenitleme denilen yüksek sıcaklıkta uygulanan ve östempereleme denilen düşük sıcaklıkta uygulanan iki basamaklı bir ısıtma işlemi sürecidir. Bu süreç sonrasında elde edilen malzeme östemperelenmiş küresel grafitli dökme demir (ÖKGDD) olarak isimlendirilir. Östempereleme işleminden sonra küresel grafitli dökme demirin mikro yapısı sünek ve gevrek yapı arasındaki ilişkiyi optimize eden yüksek karbonlu kalıntı östenit ile beynitik yapıdaki ferritin karışımı haline gelmektedir. Bu durumda, küresel grafitli dökme demirin mekanik özelliklerinde önemli iyileştirmeler elde edilebilmektedir [3]. ÖKGDD'ler otomotiv, demiryolu, madencilik ve tarım sektöründe birçok makine elemanının üretiminde kullanılmaktadır. Bunun nedeni aşınma, yorulma mukavemeti ve tokluk özelliklerinin, düşük maliyetlerine karşılık çelik bir malzeme kadar iyi olmasıdır.

ÖKGDD'de mikro yapı ve mekanik özellikler östempereleme sıcaklığı ve kimyasal kompozisyona bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Östempereleme işlemi sonrasında KGDD'de mukavemet artışının en büyük sebebi; yapı içerisindeki kalıntı östenit miktarıdır [4]. Çünkü malzeme içerisindeki kalıntı östenit hem kayma bantlarının oluşumunu geciktirmekte hem de malzemenin şekil değiştirme sertleşmesini arttırmaktadır. Bahmani vd. [5] yaptıkları çalışmalarında küresel grafitli dökme demirin yorulma mukavemeti ile mikro yapısı arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Çalışmada numuneler 870°C, 900°C ve 950°C'de östenitlendikten sonra 370°C ve 400°C'de farklı sürelerde östemperelenmiştir. Yapılan eğmeli yorulma testlerinde östenit yapı içerisindeki karbon miktarının artmasına bağlı olarak malzemenin yorulma dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. ÖKGDD'ler ile ilgili yapılan bir diğer çalışmada ise tek basamaklı ve iki basamaklı olmak üzere iki tip östempereleme işlemi uygulanarak malzemenin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. 927°C'de östenitlenen malzemelere farklı sıcaklıklarda östempereleme işlemi

uygulanmıştır. Her iki grup numunede de östenit oranının, matristeki karbon oranının ve ferrit oranının artması sonucu malzemenin mekanik özelliklerinde ve kırılma tokluğunda yüksek oranda artışlar görülmüştür [6]. Kalıntı östenit yanında malzemenin dayanımını etkileyen yapısal faktörler ise malzeme içerisinde yer alan grafit nodüllerinin şekli, boyutu, yapı içerisinde metal olmayan kalıntılar, matris sertliği ve yapısıdır [7]. Bu faktörler malzeme içerisinde gerilme konsantrasyonuna ve süreksizliklere sebep olabileceğinden malzemenin dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle küresel grafitli dökme demirin mekanik dayanımı incelenirken bu tür faktörlerinde hesaba katılması önemlidir. Otomotiv, ziraat, demiryolları ve savunma sanayi başta olmak üzere birçok alanda kullanılan ÖKGDD malzemesi gelişmiş mekanik özelliklerine rağmen, çalışma koşullarında maruz kaldığı tekrarlı dinamik yükler sebebiyle belli bir çalışma ömrüne sahiptir. Bu çalışma ömrü, malzemeye uygulanan ısıtma işlemi prosedürüne ve süresine bağlı olarak farklılıklar gösterebilmektedir. Literatür incelendiğinde, KGDD malzemesine uygulanan farklı ısıtma işlemi prosedürlerinin malzemenin mekanik özellikleri ve yorulma dayanımı üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmalara rastlanmıştır. Fakat östempereleme işleminin malzemenin yorulma çatlak ilerleme davranışlarına etkisini inceleyen çalışmalar sınırlıdır. Buradan yola çıkılarak östempereleme sıcaklığı ve süresinin, eşik gerilme şiddeti faktörü (K_{th}), çatlak ilerleme oranı ve yorulma ömrüne etkisi bu çalışmayla ortaya konulmak istenmiştir.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

KGDD malzemesinin dökümü gerçekleştirilmeden önce kimyasal bileşiminin belirlenebilmesi için ön çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda kimyasal bileşimde önemli rol oynayan elementlerden karbonun %3-3,5 arasında, silisyumun %2,5-3 arasında, magnezyumun %0,004-0,005 arasında, nikelin %0,7-0,8 arasında ve bakırın %0,7-0,85 arasında olması gerektiği belirlenmiştir. Döküm sonrasında yapılan spektrometre analizleri KGDD malzemesinin kimyasal bileşiminin planlanan şekilde, Tablo 1'de verildiği gibi olduğunu göstermiştir. Yorulma ve mekanik test numunelerinin üretilebilmesi için Y blok döküm yapılmıştır. Deney numuneleri bloğun 50 mm genişliğinde ve 65 mm yüksekliğinde olan alt kısmından çıkarılmıştır. Böylece döküm sırasında oluşabilecek her türlü hata ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Östempereleme ve östenitleme işlemleri farklı sıcaklık aralığında çalışan iki adet fırında gerçekleştirilmiştir. Parça yüzeyinde oluşabilecek dekarbürizasyon ve pullanmayı engellemek için tuz banyosu kullanılarak koruyucu bir atmosfer oluşturulmuştur. Östenitleme işlemi için HS 550 (beyaz renkte) ve östempereleme işlemi için %50 Sodyum Nitrat ve %50 Potasyum Nitrat çözeltileri kullanılmıştır. Östenitleme

Tablo 1. KGDD malzemesinin kimyasal kompozisyonu (The chemical composition of the ductile iron material)

%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%Al	%Sn	%P	%S	%Mg
3,40	2,69	0,19	0,04	0,73	0,23	0,87	0,015	0,007	0,02	0,01	0,044

işlemi kalınlığa bağlı olarak parçanın 850-950°C arasında belli bir süre ısıtılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Yüksek östenitleme sıcaklığı östenit içindeki karbon miktarının artmasına neden olarak malzemenin sertleştirilebilirliğini artırırken, yapının ausferrite dönüşüm süresini arttırdığından mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir [8]. 900 °C'de östenitleme işlemi uygulanmış malzemeye 350-400°C arasında östempereleme işlemi uygulandığında, düşük mukavemet ve sertliğin yanında daha yüksek yüzde uzama ve kırılma tokluğu elde edilirken [9], 350°C'nin altındaki sıcaklıklarda yüksek mukavemet elde edilebilmektedir [10]. Östenitleme süresi ise tüm parçanın ısınmasını ve östenitin karbona doymasını sağlayacak östenitleme sıcaklığında, malzemenin minimum süre tutulması şeklinde belirlenmektedir. Östenitleme sıcaklığı ve süresi daha önce yapılmış çalışmalar dikkate alınarak, östenitleme işleminin 900°C'de ve 90 dakika olarak uygulanmasına karar verilmiştir [10]. Ayrıca östempereleme işlem sıcaklığının ve süresinin değişmesiyle birlikte malzemenin özellikle çekme ve akma dayanımında belli sıcaklık aralıklarında önemli değişimler görülmektedir [4]. Bu nedenle değişen östempereleme sıcaklığının malzemenin yorulma çatlak ilerleme davranışına etki edeceği düşünülerek bu durumun araştırılabilmesi için çalışmada, 350°C'nin altında üç farklı sıcaklıkta ve üç farklı sürede östempereleme işlemi uygulanmıştır. Çalışmada seçilen ısı işlem süreleri ve sıcaklıkları Tablo 2'de verilmiştir. Döküm sonrasında mikro yapı incelemeleri yapılan numunelere metalografik numune hazırlama işlemleri (zımparalama, parlatma ve dağlama) uygulanmıştır. Dağlayıcı olarak %3 Nital dağlayıcı kullanılmıştır.

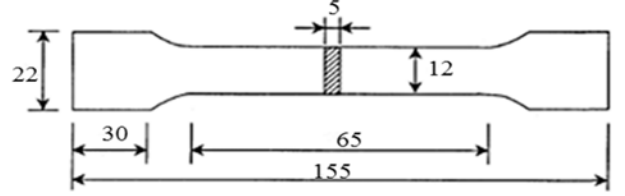
Tablo 2. Uygulanan ısı işlem sıcaklıkları ve süreleri (Heat treatment temperature and time)

Östenitleme Sıcaklığı (°C)	Östempereleme sıcaklığı (°C)	Östempereleme süresi (dak.)
900	250	30
		60
		90
	275	30
		60
		90
325	30	
	60	
	90	

2.1. Sertlik ve Çekme Deneyleri (Hardness and Tensile Tests)

Östempereleme işlemine tabi tutulan malzemelerin sertlikleri Rockwell cinsinden bulunmuştur. Rockwell sertlik testinde MetTest-HT bilgisayar destekli deney cihazı kullanılırken, ağırlık olarak 141,7 N'luk bir yük değeri seçilmiştir. Her bir numune için 10 farklı test yapılarak ortalaması alınmıştır. Çekme deneyleri 100kN kapasiteli Instron 8501 model çekme test cihazında yapılmıştır. Çekme testi için seçilen çekme hızı ise 0,02 mm/sn olarak seçilmiştir. Her bir numune için üç farklı test yapılarak ortalaması alınmıştır.

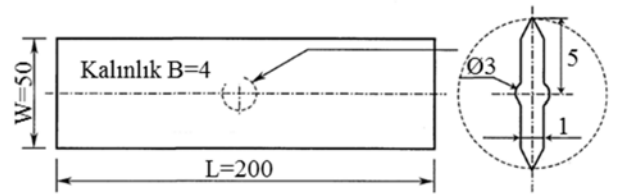
Akma mukavemeti ise bilgisayar tarafından otomatik olarak %0,2'lik uzamaya karşılık gelen gerilme değerinin alınmasıyla hesaplanmıştır. Çekme testleri için hazırlanan numunenin ölçüleri (Birimler mm cinsinden verilmiştir) Şekil 1'de verilmiştir. Uzama miktarı ise yine bilgisayara girilen numune boyuna bağlı olarak bulunmuş ve deney sonrasında ilk ve son boya göre tekrar hesaplanmıştır.



Şekil 1. Çekme testi numunesi (Tensile test specimen)

2.2. Yorulma Çatlak İlerleme Deneyi (Fatigue Crack Propagation Test)

Yorulma çatlak ilerleme testlerinde, kullanılacak test cihazı göz önünde bulundurularak, orta çekme M(T) numune şekli seçilmiştir. Numune boyutları ASTM E-647 yorulma çatlak ilerlemesi test standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır [11]. Deneylerde kullanılan M(T) numunesi şekli ve numuneye ait boyutlar (Birimler mm cinsinden verilmiştir) Şekil 2'de verilmiştir. Standartta uygun olarak hazırlanan numunelerde çentikler tel erezyonla açılmıştır. Tel erezyon tezgahında kullanılan tel çapı 0,25 mm olduğundan, çentik uçlarındaki çentik köşe kavis yarıçapları da 0,125 mm olarak elde edilmiştir. Çatlak ucunda meydana gelen, gerilme şiddeti faktörü ΔK , ASTM E-647 yorulma çatlak ilerlemesi test standartlarına uygun olarak Eş. 1'de verilen ifadeyle hesaplanmıştır [11]. Tekrarlı yükler ardından çatlak uçlarında meydana gelen gerilme şiddeti faktörünün hesaplanabilmesi için maksimum ve minimum yükler göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 2. Yorulma testlerinde kullanılan M(T) numunesi (M(T) specimen was used in the fatigue test)

Böylece ΔK ,

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B} \sqrt{\frac{\pi a}{2W} \sec \frac{\pi a}{2}} \quad (2a/W < 0,95 \text{ için}) \quad (1)$$

olarak hesaplanmıştır. Burada ΔP yükteki değişim, B numunenin kalınlığı, W numunenin genişliği, a ise çatlak boyudur. ΔP 'nin hesaplanması ise R yük oranına bağlı olarak, P_{\min} minimum yük ve P_{\max} maksimum yük olmak üzere Eş. 2 ve Eş. 3'de verilen ifadelerle hesaplanmıştır.

$$\Delta P = P_{\max} - P_{\min} \quad (R > 0 \text{ için}) \quad (2)$$

$$\Delta P = P_{\max} \quad (R \leq 0 \text{ için}) \quad (3)$$

Yorulma testleri, Instron marka 8801 model yorulma test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Deney cihazı servo-hidrolik bir sistemle desteklenmiş ve bilgisayar kontrollü olarak çalışmaktadır. Cihazda uygulanacak maksimum ve minimum yüklerin yanı sıra frekans değerleri de girilmek suretiyle deney başlatılmaktadır. Numuneler mekanik olarak sabitlenmiş olup çene içerisinde kalan numune boyu 25 mm olarak sabit alınmıştır. Deneyler sırasında çatlak büyümesini incelemek için 250 büyütme kadar çıkabilen USB optik mikroskoplar kullanılmıştır. Her çatlak boyuna karşılık gelen çevrim değeri kaydedilmeden önce çentik uçlarında yorulma ön çatlak oluşturulmuştur. Böylece deney öncesinde çentik uçlarında keskin çatlak uçları elde edilmiştir.

ASTM E-647 standardında yorulma ön çatlak boyunun minimum çentik genişliği kadar veya daha fazla olması önerilmektedir. Bu çalışmada yorulma ön çatlak boyu 1,25 mm olarak alınmıştır. Böylece ASTM E-647 standardında $2a_0$ olarak belirtilen çatlak boyu 12,5 mm olmuştur. Yorulma ön çatlak boyu aynı zamanda test sırasındaki ilk çatlak boyudur ve ΔK_{th} değerini verir. Numunenin çatlak ucu, test başlangıcından itibaren mikroskopla sürekli kontrol edilerek, çatlak boyuna karşılık gelen yük tekrar değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen çatlak ilerleme oranına karşılık, ΔK gerilme şiddeti faktörünün değişim grafiği çizdirilerek, Eş. 4'de verilen Paris-Erdoğan denklemiyle C ve m malzeme sabitleri elde edilmiştir. Testler oda sıcaklığında, $R=0,1$ gerilme oranında ve 10 Hz frekansta yapılmıştır. Yük ve gerilme oranları uygulanan minimum ve maksimum yük

(P_{\min} , P_{\max}) ve gerilme şiddeti faktörüne (K_{\min} , K_{\max}) bağlı olarak Eş. 5'de verilen ifadeyle hesaplanmıştır. Ayrıca yorulma testi sonrasında kopan numunelerin yüzeyleri LEO 1430 VP model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir.

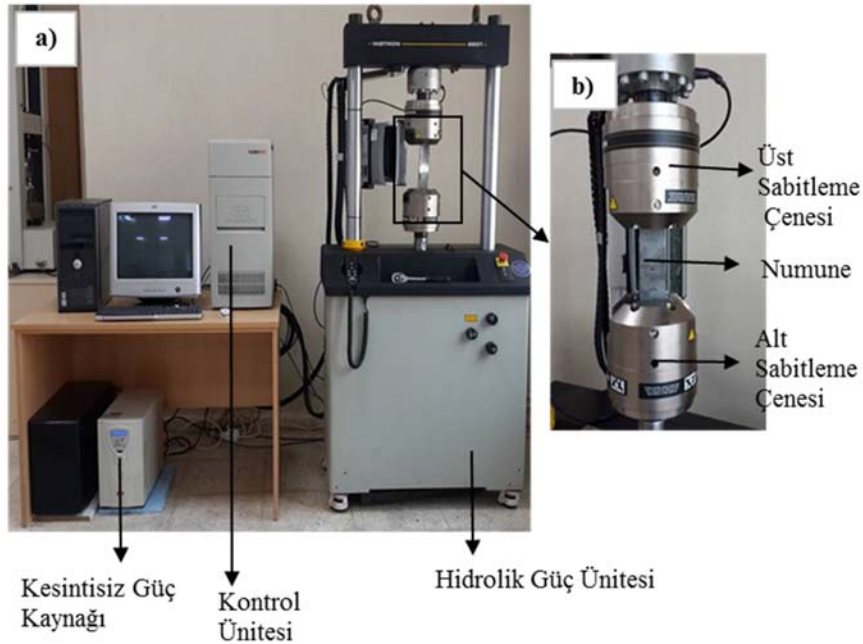
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

$$R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} \quad (5)$$

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi (Evaluation of Mechanical Properties)

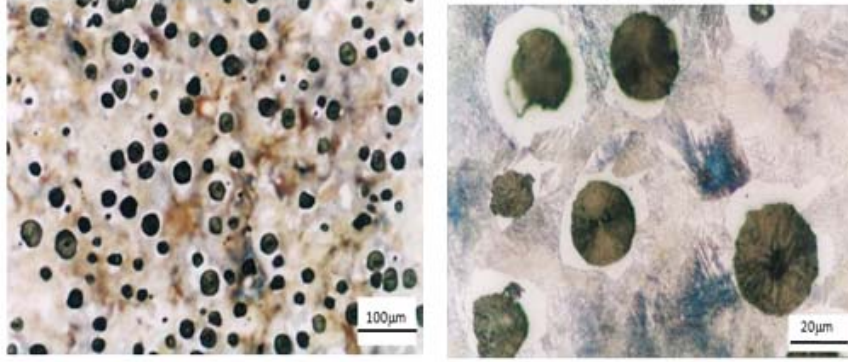
Döküm sonrası yapılan mikroskopik incelemelerde, matris yapısının %80 Perlit ve %20 Ferriten olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 4). Dolayısıyla üretilen KGDD malzemesinin GGG80 grubundan olduğunu söylemek mümkündür. Yapının büyük bir çoğunluğu perlit olduğundan, gerek kendi grubu ve gerekse diğer dökme demirler içerisinde en yüksek mukavemet değerlerine sahip olması beklenmektedir. Küre boyutu ortalama $20\mu\text{m}$ olarak ölçülmüş ve küresellik ise yaklaşık %90 ile 95'ler civarındadır. Yapılan optik incelemeler sonrasında yapı içerisindeki nodül sayısı da yaklaşık olarak 200 nodül/ mm^2 olarak tespit edilmiştir. Yapılan çekme ve sertlik deneyleriyle özellikle östemperleme sıcaklığının, malzemenin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur. Buna karşın östemperleme süresinin mekanik özellikler üzerinde östemperleme



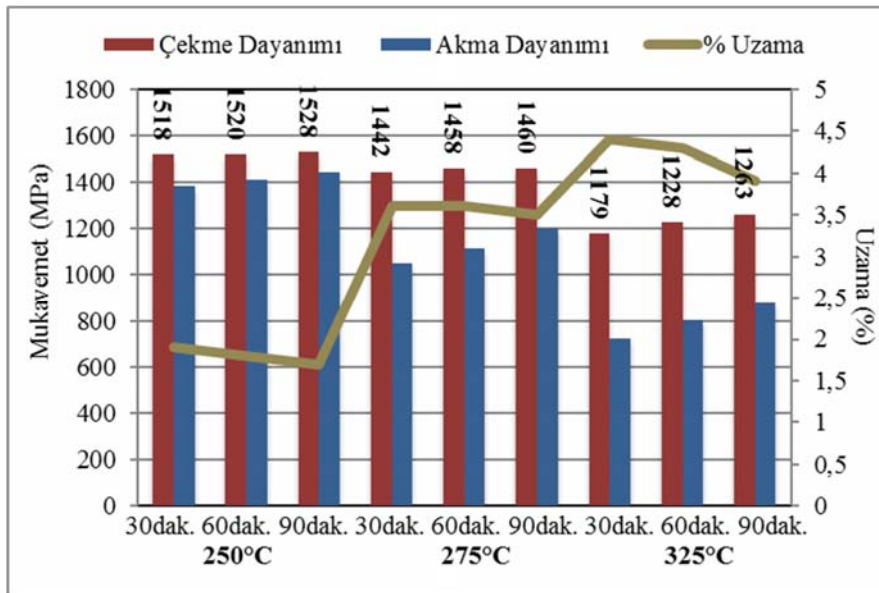
Şekil 3. Instron marka 8801 model yorulma test cihazı a) Yorulma test cihazı ana gövde b) Numune sabitleme çeneleri
(Instron 8801 model fatigue test machine a) Fatigue tester main body b) Sample fixing claws)

sıcaklığı kadar önemli bir etkiye sahip olmadığı gözlemlenmiştir. Farklı östemperleme sıcaklığı ve sürelerinde uygulanan ısıl işlem sonrasında elde edilen malzemelere ait akma ve çekme mukavemet değerleri ile yüzde uzama miktarları Şekil 5'te verilmiştir. Malzemenin akma ve çekme dayanımında, östemperleme sıcaklığının artmasıyla birlikte azalma görülmektedir. 250°C'de östemperlenen malzeme maksimum akma ve çekme mukavemeti gösterirken, östemperleme sıcaklığının artmasıyla birlikte, çekme ve akma dayanımı düşmüştür. Malzemenin mukavemetindeki bu azalmanın 425°C'ye kadar böyle devam ederek, 425°C'de minimum değere ulaştığı bilinmektedir [9]. Literatürde, östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin yorulma davranışlarını analiz etmek üzere yapılan çalışmada da östemperleme sıcaklığının artmasıyla malzemenin çekme ve akma dayanımında azalmalar görülmüştür [7]. Dolayısıyla elde edilen sonuçların bu noktada literatürle uyumlu olduğunu söylemek mümkündür. Yüzde uzama ise artan östemperleme sıcaklığıyla birlikte, malzeme içerisindeki kalıntı östenit

miktarının artmasına ve martenzit miktarının azalmasına bağlı olarak artmıştır. Östemperleme süresinin ise malzemenin mukavemeti üzerine düşük sıcaklıklarda, belirgin bir etkisinin olmadığı söylenebilir. 250°C ve 275°C östemperleme sıcaklıklarında malzemenin dayanımında östemperleme süresine bağlı bir değişim görülmez iken, 325°C'de östemperleme süresinin artmasıyla birlikte akma ve çekme dayanımlarında artış görülmüştür. Östemperleme süresinin yüzde uzama üzerine etkisi değerlendirildiğinde, düşük sıcaklıklarda (<300°C) belirgin bir etki görülemezken, yüksek sıcaklıklarda (>300 °C) östemperleme süresinin artmasıyla birlikte yüzde uzamanın azaldığı görülmüştür. Küresel grafitli dökme demir malzemeye uygulanan östemperleme işlemi malzemenin sertliğine de etki etmiştir. Isıl işlem uygulanmamış numunenin sertliği 23 HRC iken, 250 °C'de 30 dakika östemperleme işlemi uygulanan numunenin sertliğinin 60 HRC'ye çıktığı görülmüştür (Şekil 6). Fakat östemperleme sıcaklığının ve süresinin artmasıyla birlikte malzemenin sertliği azalmıştır. Malzemenin sertliğinde meydana gelen bu değişim östemperleme

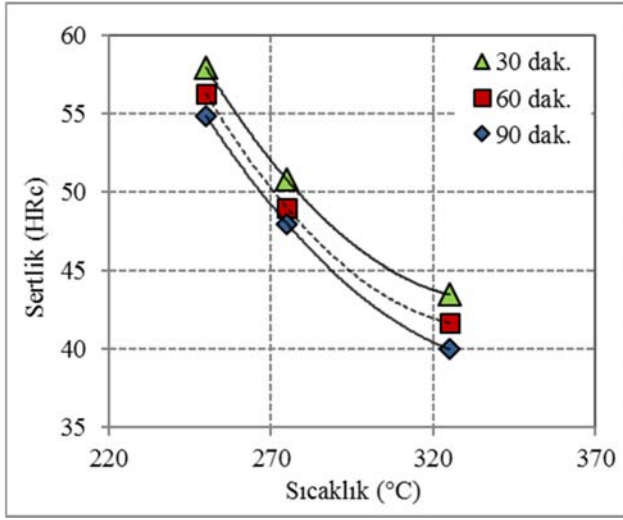


Şekil 4. Küresel grafitli dökme demir malzemesine ait mikro yapı görüntüleri
(The microstructure graph of spheroidal graphite cast iron)



Şekil 5. Östemperleme işlemi sonrasında elde edilen mukavemet değerleri ve yüzde uzama miktarları
(The strength and elongation values obtained after the austempering process)

işlemiyle birlikte malzeme içyapısında meydana gelen mikro yapısal reaksiyonlar ile açıklanabilir. Düşük östemperleme sıcaklıklarında, ısı işlem esnasında difüzyon hızı azalmaktadır [12]. Azalan difüzyon hızı malzeme içerisindeki ferrit ve östenit kalıntılarının oluşumunu engelleyerek, içyapıda martenzit oluşumunu arttırmaktadır [13]. Yüksek sertlikteki martenzit yapı ise malzemenin sertliğinin artmasına neden olmuştur. Daha düşük östemperleme sıcaklıklarındaysa malzeme içerisindeki daha düşük sertlikteki östenit miktarı artmış ve bunun sonucu olarak malzemenin sertliği azalmıştır. Östemperleme süresinin etkisi incelendiğinde ise ısı işlem süresinin artmasıyla birlikte sertlikte bir miktar azalma görülse de bu azalma kayda değer değildir.



Şekil 6. Östemperleme sıcaklığı ve süresinin malzemenin sertliği üzerindeki etkisi

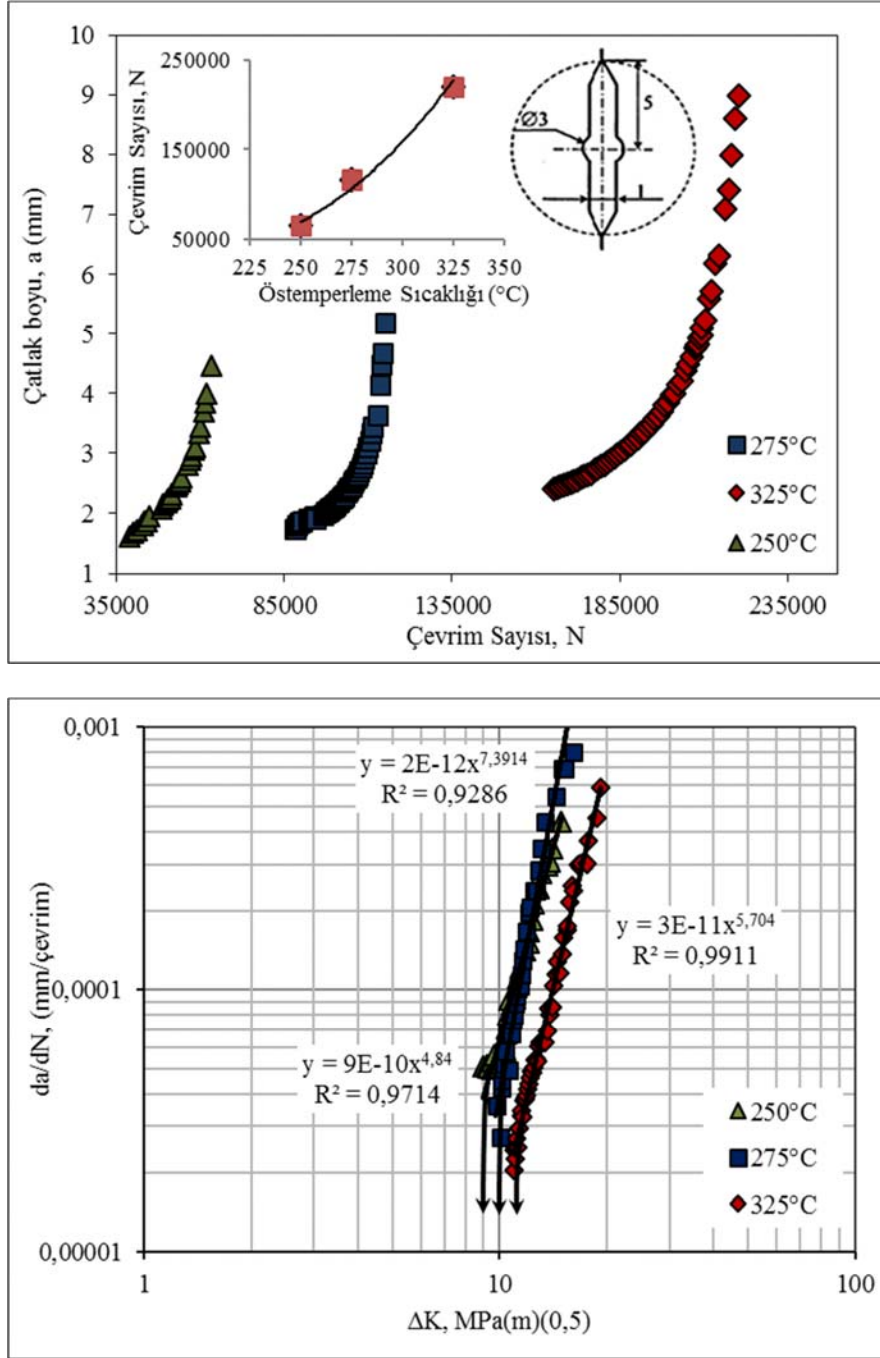
(Effect of austempering temperature and time on the hardness)

3.2. Yorulma Çatlak İlerleme Deney Sonuçları (Results of Fatigue Crack Propagation Test Results)

Yorulma çatlak ilerlemesi testleri oda sıcaklığında ve sabit yük altında sinüsoidal dalga formuyla gerçekleştirilmiştir. Yük oranı $R=0,1$ ve $P_{mak}=20kN$ ve $P_{min}=2kN$ yüklemeye altında gerçekleştirilen testler, uygulanan ısı işlem türüne bağlı olarak 6 ile 8 saat sürmüştür. Yapılan ön deneylerde, yük miktarının C ve m katsayıları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını göstermiştir. Numuneler için seçilen yük değeri; ASTM tarafından hız diyagramında ikinci bölgenin başlangıcı olarak kabul edilen $da/dN=10^{-5}$ mm/çevrim değerinin elde edildiği yük değeri olarak seçilmiştir. Yorulma test sonuçları östemperleme sıcaklığının ve süresinin etkisinin incelenmesi açısından, iki değişkenin etkisinin tam olarak görüldüğü iki farklı numune grubu etrafında toplanmış ve yorulma test sonuçları Şekil 7 ve 8'de verilmiştir. Şekil 7'de östemperleme sıcaklığının etkisinin verildiği grafikte çatlak boyu-çevrim sayısı incelendiğinde, östemperleme sıcaklığının çevrim sayısını önemli oranda etkilediği görülmektedir. Yapılan testler sonucunda östemperleme sıcaklığının artmasıyla birlikte, yorulma çatlak ilerleme hızının azaldığı ve numunenin yorulma

ömürünün arttığı görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda yapılan östemperleme işlemi ise malzemeyi daha gevrek yapmakta ve çatlak ilerlemesine karşı direncini düşürmektedir. Çatlak ilerleme oranındaki bu değişim malzeme içerisindeki östenit yapının karbon içeriğinin değişmesiyle alakalıdır. Düşük karbonlu östenit yapı termal olarak kararsızdır ve martenzite dönüşerek daha kırılabilir bir hale gelebilir ve böylelikle yorulma dayanımını ve çatlak ilerleme direncini düşürür [12]. Yapılan testlerde küresel grafitli dökme demirlerde östemperleme işleminin özellikle malzemenin mikro yapısal özelliklerini değiştirerek mekanik özelliklerini arttırdığı gözlemlenmiştir. Alt ve üst beyrit geçiş sıcaklığı olarak kabul edilen $325^{\circ}C$ 'de ve alt beyrit sıcaklıkları olan $250^{\circ}C$ ve $275^{\circ}C$ 'de östemperleme işlemi uygulanmış numunelerin yorulma test sonuçlarıyla kıyaslandığında üst beyrit sıcaklığında yorulma dayanımının yüksek oranda değiştiği görülmektedir. Şekil 7'de $da/dN-\Delta K$ grafiğinde, $250^{\circ}C$ ve $275^{\circ}C$ gibi geçiş sıcaklığının altında olan östemperleme sıcaklıklarında, aynı ΔK değeri için çatlak büyüme hızının daha yüksek olduğu görülmektedir. Östemperleme sıcaklığının $250^{\circ}C$ 'den $325^{\circ}C$ 'ye artışı yorulma ömrünü %70 arttırmıştır. $250^{\circ}C$ 'de östemperlenen numunelerle kıyaslandığında, $275^{\circ}C$ 'de östemperlenen numunelerde ise bu oran %60 olarak kaydedilmiştir. Aynı zamanda östemperleme sıcaklığının artmasıyla malzeme içerisindeki östenit miktarının artmasına bağlı olarak malzeme içerisindeki çatlak ilerlemesi ve nihai hasar oluşumu için gerekli olan kayma bantlarının oluşumu gecikmiş ve K_{th} değeri daha yüksek bir değer olarak bulunmuştur. Çelik gibi malzemelerin yorulma ömürleri malzemelerin çekme mukavemetlerinin artmasıyla artarken burada tamamen tersine bir durum söz konusudur. Östemperleme sıcaklığının artmasıyla birlikte malzemenin çekme ve akma dayanımı azalırken, yorulma ömrü artmıştır. Bu durum artan östemperleme sıcaklığıyla birlikte malzemenin içerisinde oluşan kalıntı östenit miktarının ve östenitin karbonca doygunlunun artmasıyla alakalıdır. Artan östenit miktarı malzemenin çekme mukavemetini düşürürken aynı zamanda deformasyon sertleşmesini arttırarak malzemenin yorulma ömrünü arttırmıştır.

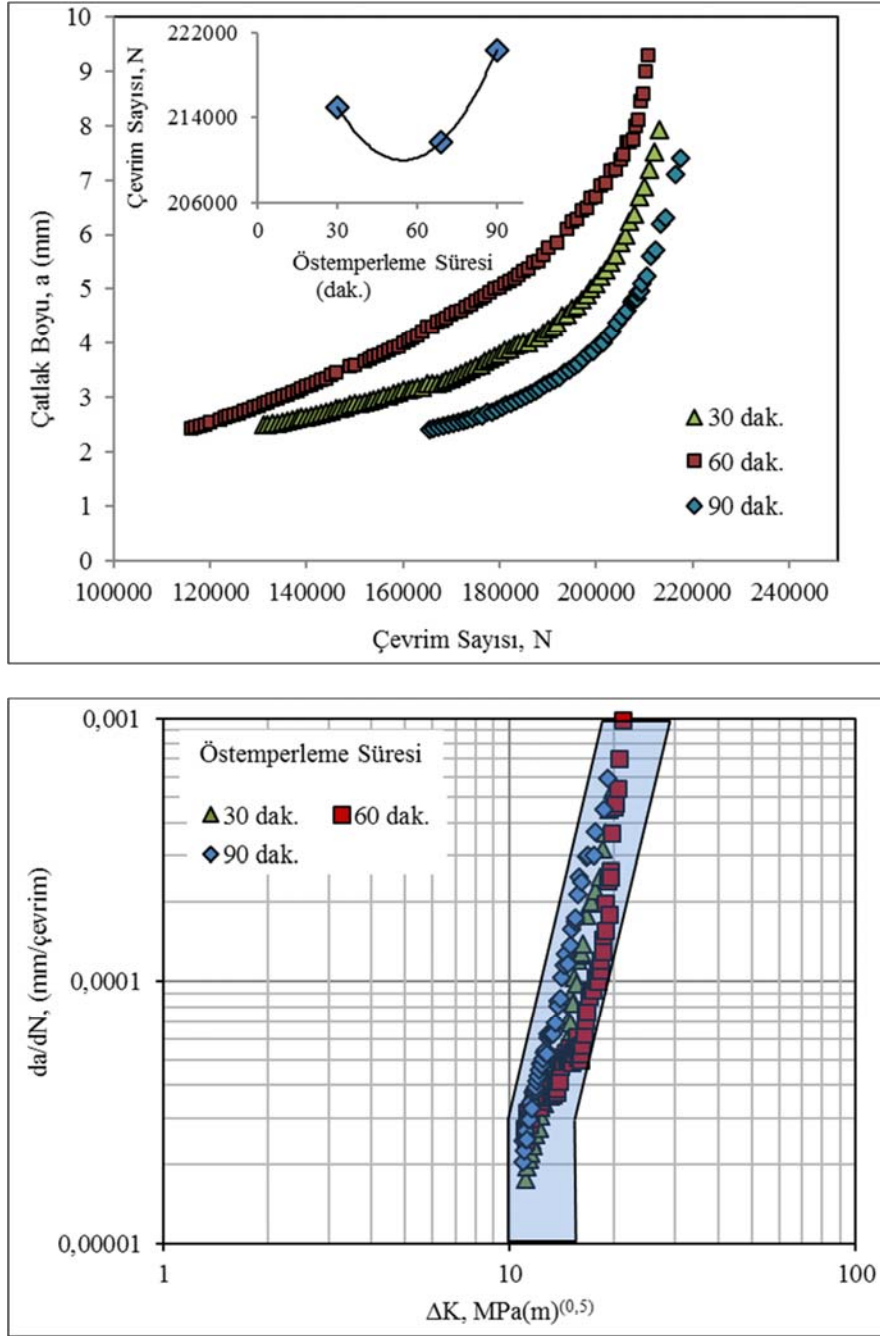
Şekil 8'de $325^{\circ}C$ 'de farklı sürelerde östemperleme işlemi uygulanmış numunelerin $da/dN-\Delta K$ ve a/N grafikleri verilmiştir. Östemperleme süresinin artması malzemenin toplam yorulma ömrünü belli bir miktar arttırmış olsa da, östemperleme sıcaklığıyla kıyaslandığında elde edilen oranlar düşüktür. Şekil 8'deki a/N grafiği incelendiğinde, östemperleme süresinin 30 dakikadan 90 dakikaya artmasıyla birlikte yorulma ömrü %15 oranında artmıştır. Ayrıca aynı çevrim sayısındaki çatlak boyları kıyaslandığında 90 dakika östemperlenen numunenin çatlak boyu, 30 dakika östemperlenen numuneden %40 daha küçük olarak bulunmuştur. Literatür incelendiğinde, Shanmugam vd. [14] $900^{\circ}C$ 'de 60 dakika östenitlendikten sonra $280^{\circ}C$ 'de 4 farklı sürede östemperleyerek yaptıkları çalışmada da östemperleme süresinin artmasıyla birlikte kalıntı östenit miktarı küçük bir miktar da olsa artış göstermiştir. Çekme ve akma dayanımının azalmasına karşılık kırılma tokluğu östemperleme süresinin artmasıyla artmıştır.



Şekil 7. Farklı sıcaklıklarda 90 dakika östemperleme işlemi uygulanmış numunelere ait test sonuçları
(Test results of samples austempered for different temperatures 90 minute)

Östemperleme süresinin etkisi incelenirken dikkat edilmesi gereken bir diğer konuda östemperleme işleminin uygulandığı sıcaklıktır. Yine aynı çalışmada 280°C’de yapılan deneylerde sürenin artmasının etkisi düşük orandayken, östemperleme sıcaklığının 400°C’ye çıkmasıyla birlikte kalıntı östenit miktarı ve bey nitelik ferrit miktarı artmış, buna bağlı olarak yorulma dayanımındaki artış daha net görülmeye başlanmıştır. Bu çalışmada da benzer olarak 325°C’de sürenin 30 dakikadan 90 dakikaya artmasıyla birlikte çevrim sayısındaki artış %15 iken, 275°C’de bu oran

%7’e düşerken 250°C’de bu oran %1 civarındadır. Burada çekme testinde elde edilen verilerde olduğu gibi östemperleme süresinin etkisi östemperleme sıcaklığına bağlı olduğu ve östemperleme sıcaklığının artmasıyla birlikte arttığı görülmüştür. Östemperleme süresinin yorulma çatlak ilerlemesine etkisi incelendiğinde, östemperleme süresinin malzemenin K_{th} üzerinde etkili olmadığı görülmüştür. Çatlak ilerleme davranışları yorulma hasarının oluştuğu ilk çevrim sayılarında tüm östemperleme sürelerinde benzer davranışlar göstermiştir (Şekil 8). Fakat ilerleyen çevrim sayılarında



Şekil 8. 325°C’de farklı sürelerde östempereleme işlemi uygulanmış numunelerin yorulma çatlak ilerleme test sonuçları
(Fatigue crack propagation test results of samples austempered at 325°C for different times)

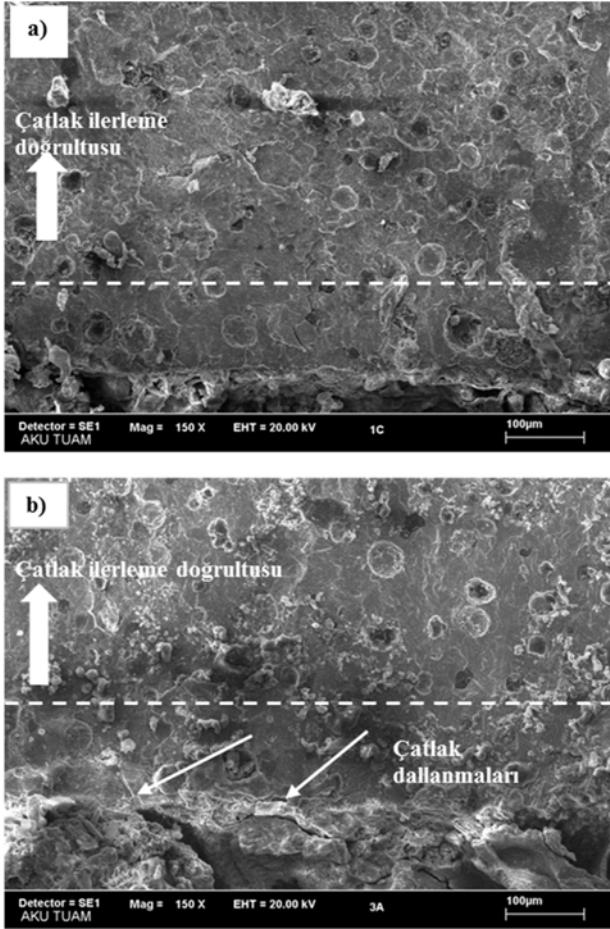
çatlak ilerleme oranları küçük miktarlarda değişim göstermiştir. Yorulma deneylerinde elde edilen sonuçlara göre C ve m katsayılarındaki değişim için kesin bir ifade kullanmanın doğru olmayacağı sonucuna varılmıştır. Çünkü artan östempereleme sıcaklığına bağlı olarak C ve m katsayılarının hem azaldığı hem de arttığı durumlar görülmüştür. Östempereleme sıcaklığına göre kıyaslayacak olursak K_{th} değeri, en yüksek 325°C’de en düşük değer ise 250°C’de ısıtılmış numunede ölçülmüştür (Tablo 3).

Tablo 3. Eksenel yorulma deneylerinde elde edilen C, m, K_{th} değerleri
(C, m, K_{th} values were obtained from axial loading fatigue tests)

Numune	C	m	K_{th} , MPa(m) ^(0,5)
250°C (90 dak.)	9E-10	4,8400	9,0
275°C (90 dak.)	2E-12	7,3914	10,0
325°C (90 dak.)	3E-11	5,7040	10,9
325°C (60 dak.)	7E-11	4,2177	11,0
325°C (30 dak.)	3E-11	5,5400	11,2

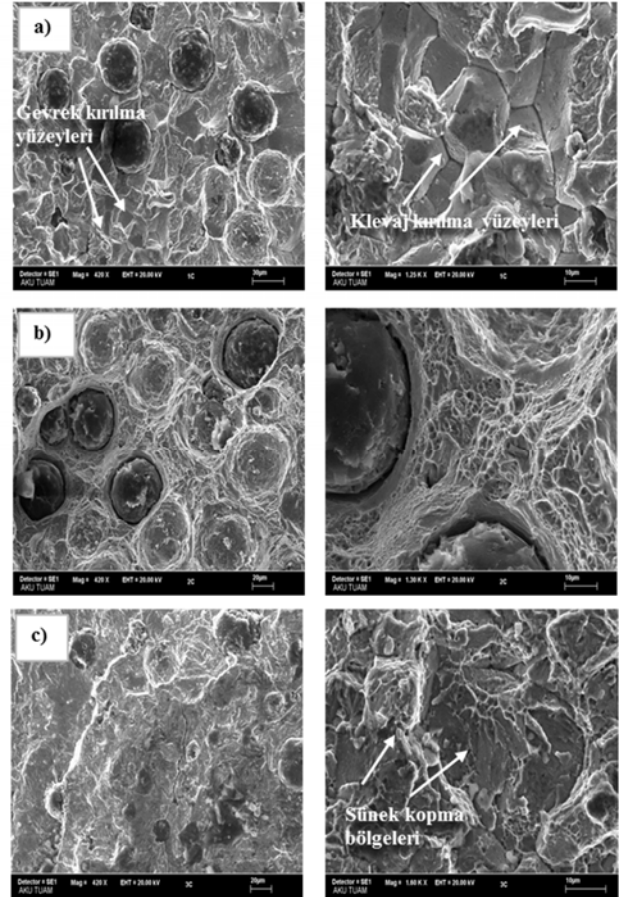
3.3. Yorulma Test Numunelerinin SEM Analizleri (SEM Analysis of Fatigue Test Samples)

Yorulma testlerinde kopan parça yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenerek östemperleme işleminin numunelerin hasar tiplerine etkisi değerlendirilmiştir. Kopan numunelerin çatlak ilerleme bölgelerinin SEM analizleri Şekil 9'da verilmiştir. Yapılan SEM analizlerinde çatlak ilerleme doğrultusu boyunca çatlak dallanmalarının yüksek sıcaklıklarda östemperlenen numunelerde daha çok olduğu görülmektedir. Çatlak oluşumu sırasında oluşan bu dallanma matris boyunca ilerleyen çatlakın grafit nodülü ile karşılaşması sonucu veya östemperleme işlemi sonrası malzemenin iç yapısında oluşan ferrit ve kalıntı östenitle karşılaşması sonucu oluşabilmektedir [15]. Çatlak ilerlerken ilerlemesini engelleyici bu şekilde bariyer görevi gören yapılarla karşılaştığında ilerlemek için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyar, fazla enerji çatlak ilerleme yolu üzerinde çatlakın dallanarak ilerlemesine neden olur. Burada da Şekil 9'da östemperleme sıcaklığının artmasıyla birlikte 325°C'de 30 dakika östemperlenen numunede 250°C'de 90 dakika östemperlenen numuneye kıyasla çatlak dallanması artmıştır.



Şekil 9. Çatlak ilerleme bölgesinin SEM analizi a) 250°C (90 dak.) b) 325°C (30 dak.) (SEM analysis of fatigue crack grow area a) 250°C (90 min.) b) 325°C (30 min.))

Yorulma testleri sonrasında kopan numunelerin hasar bölgeleri incelendiğinde, yorulma çatlakının ilerlediği doğru boyunca, östemperleme sıcaklığına bağlı olarak farklı hasar tiplerinin olduğu görülmektedir (Şekil 10). Şekil 10a'da 250°C'de östemperlenen numunede gevrek kırılmaya işaret eden klevaj yüzeylerinin daha belirgin olduğu ve hasar yüzeyinde daha geniş yer kapladığı görülmektedir. 250°C'de östemperleme işlemi uygulanan numunede düşük östemperleme sıcaklığına bağlı olarak ısıl işlem esnasında difüzyon hızı düşmüş östenit yapı yerine martenzit yapı oluşmuştur [16]. Martenzit yapının sert ve kırılgan olması sebebiyle malzeme daha kırılgan bir özellik kazanarak yorulma testlerinde daha düşük çevrimlerde kırılmıştır. Şekil 10b-c'de artan östemperleme sıcaklığıyla birlikte malzeme mekanik ve yorulma testlerinden de görüldüğü gibi malzeme içerisindeki östenit yapı artmış, malzemenin sertliği azalmış ve kırılma tokluğu artmıştır. Buna bağlı olarak malzeme sünek bir malzeme karakteri kazanmıştır. SEM analizlerinden de görüldüğü gibi hasar yüzeyinde eş eksensli çukur yapılar tüm yüzeye yayılmıştır. Klevaj yüzeyler malzemenin bir yük altındayken daha az enerji harcayarak hasarın ilerleyebildiği yüzeyler iken, eş eksensli çukur yapılar ise malzemenin hasar oluşumunun geciktiği ve çatlak ilerleme direncinin daha yüksek olduğu yüzeylerdir.



Şekil 10. Farklı sıcaklıklarda 90 dakika östemperleme işlemi yapılan numunelerin hasar yüzeylerinin SEM analizleri a) 250°C b) 275°C c) 325°C

(SEM images of samples austempered at different temperature a) 250°C b) 275°C c) 325°C)

Kırılma tipleri ise 250°C’de 90 dakika östemperlenen numunede taneler arası gevrek kırılma görülürken, artan östemperleme sıcaklığının etkisiyle 275°C’de 90 dakika ve 325°C’de 90 dakika östemperlenen numunelerin daha sünek bir yapıya sahip olması sebebiyle tane boyunca kırılma oluşmuştur. Şekil 10c’deki 325°C’de östemperleme işlemi uygulanan numune test sonuçlarından da görüldüğüne üzere en düşük yorulma çatlak ilerleme hızına sahip ve mikro yapısı tamamen sünek bir kırılma karakteristiği göstermiştir. SEM analizlerinden elde edilen hasar tipleri ve yorulma çatlak ilerleme karakteristiği hakkındaki veriler yorulma testlerinden elde edilen sonuçları ile uyumludur.

4. SİMGELER (SYMBOLS)

B	: Numunenin kalınlığı
C	: Malzeme katsayısı
K_{mak}	: Maksimum gerilme şiddet faktörü
K_{min}	: Minimum gerilme şiddet faktörü
K_{th}	: Eşik gerilme şiddeti faktörü
M	: Malzeme katsayısı
M(T)	: Orta çekme numunesi
P_{mak}	: Maksimum kuvvet
P_{min}	: Minimum kuvvet
R	: Yük oranı
W	: Numunenin genişliği
A	: Çatlak boyu
ΔK	: Gerilme şiddeti faktörü
ΔP	: Yükteki değişim
$2a_0$: Ön çatlak boyu

Kısaltmalar (Abbreviations)

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
KGDD	: Küresel Grafitli Dökme Demir
ÖKGDD	: Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan çalışma sonucunda küresel grafitli dökme demire uygulanan östemperleme işleminin malzemenin hem mekanik özelliklerine hem de yorulma dayanımına etki ettiği görülmüştür. Östemperleme sıcaklığının artmasıyla birlikte malzemenin mikro yapısında artan östenit miktarı malzemenin akma ve çekme dayanımını düşürürken, malzeme içerisinde azalan martenzit oranına bağlı olarak yüzde uzama artmıştır. Düşük sıcaklıklarda uygulanan östemperleme işlemiyle ise yüksek sertlikteki martenzit oluşumuna bağlı olarak malzemenin sertliği artmıştır.

Östemperleme süresinin artmasıyla birlikte malzemenin akma ve çekme mukavemetinde belli bir oranda artış gözlemlenmiş ve bu oranın yüksek östemperleme sıcaklıklarında daha belirgin olduğu görülmüştür. Yapılan yorulma çatlak ilerleme testlerinde östemperleme sıcaklığının artmasıyla yorulma çatlak ilerleme hızının azaldığı görülmüştür. Östemperleme süresinin artması malzemenin toplam çevrim sayısını belli bir miktar arttırmış

olsa da, östemperleme sıcaklığıyla kıyaslandığında elde edilen oranların düşük olduğu görülmüştür. Yorulma hasar yüzeylerinde, uygulanan östemperleme işlem sıcaklığına bağlı olarak farklı hasar karakteristikleri tespit edilmiştir. 250°C’de östemperlenen numunede klevaj yüzeylerle birlikte daha gevrek bir kırılma görülürken, sıcaklığın artmasıyla birlikte sünek hasar oluşumu gözlemlenmeye başlanmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Toktaş G., Toktaş A., Gülsün K., Effect of matrix structure and boring time on the wear behaviour of Cu-Ni-Mo alloyed ductile iron, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (2), 449-457, 2017.
2. Zhang J., Song Q., Zhang N., Lu L., Zhang M., Very high cycle fatigue property of high-strength austempered ductile iron at conventional and ultrasonic frequency loading, International Journal of Fatigue, 70, 235-240, 2015.
3. Wang B., He M., Barber G. C., Schall J. D., Tao C., Sun X., Rolling contact fatigue resistance of austempered ductile iron processed at various austempering holding times, Wear, 398, 41-46, 2018.
4. Kumar K., Hariharan P., Venkateshvaran P., Tamilarasan S., Examination of microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron (ADI) as per austempering temperature and time, Transactions of the Indian Institute of metals, 68, 67-71, 2015.
5. Bahmani M., Elliott R., Varahram N., The relationship between fatigue strength and microstructure in an austempered Cu-Ni-Mn-Mo alloyed ductile iron, Journal of Materials Science, 32 (20), 5383-5388, 1997.
6. Yang J., Patatunda S. K., Effect of microstructure on abrasion wear behavior of austempered ductile cast iron processed by a novel two-step austempering process, Materials Science and Engineering A, 406, 217-228, 2005.
7. Rebase N., Dommarco R., Sikora J., Wear resistance of high nodule count ductile iron, Wear, 253 (7), 855-861, 2002.
8. Darwish N., Elliott R., Austempering of low manganese ductile irons, Mater. Sci. Technol., 9 (7), 572-585, 1993.
9. Aslantaş K., Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirden imal edilen düz dişlilerde yüzey yorulma hasarlarının analizi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2003.
10. Aslantaş K., Taşgetiren S., Modelling of spall formation in a plate made of austempered ductile iron having a subsurface-edge crack, Computational Materials Science, 29 (1), 29-36, 2004.
11. ASTM Standarts, Standart test method for measurements of fatigue crack growth rates, Annual Book of ASTM Standarts, 2001.
12. Stokes B., Gao N., Reed P.A.S., Lee K.K., Effects of carbides on fatigue characteristics of austempered ductile iron, Metallurgical and Materials Transactions A, 36 (4), 977-988, 2005.

13. Wang B., Barber G., Sun X., Shaw M., Seaton P., Characteristics of the Transformation of Retained Austenite in Tempered Austempered Ductile Iron, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26 (5), 2095-2101, 2017.
14. Shanmugam P., Rao P.P., Udupa K. R., Effect of microstructure on the fatigue strength of an austempered ductile iron, *J. Mater. Sci.*, 29 (18), 4933-4940, 1994.
15. James M., Fatigue crack growth in austempered ductile and grey cast irons-stress ratio affects in air and mine water, *Material Science and Engineering A*, 265, 129-139, 1999.
16. Putatunda S. K., Influence of austempering temperature on fracture toughness of a low manganese Austempered Ductile Iron (ADI), *Mater. Manuf. Processes*, 16 (2), 245-263, 2001.

