

# Mekanik Titreşimin Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkileri

Hasan HASIRCI\*

Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Teknikokullar, Ankara/TURKİYE.

(Geliş/Received : 02.06.2016 ; Kabul/Accepted : 29.09.2016 )

## ÖZ

Bu çalışmada Küresel Grafitli Dökme Demirlerin (KGDD) mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerine mekanik titreşimin etkileri incelenmiştir. Dökümler geleneksel yaş kum kalıpta yapılmıştır. Bu çalışmada, ferritik KGDD (GGG 40) malzeme kullanılmıştır. Çalışma sonuçları, titreşim uygulamasıyla KGDD malzemesinin mikro yapısı ve mekanik özelliklerinde değişimlerin meydana geldiğini göstermiştir. Sonuçlara bakıldığında, tane ve grafit küre boyutlarındaki küçülmeye bağlı olarak KGDD'in mekanik özellikleri gelişmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** KGDD, Mikroyapı, Mekanik Özellikler, Mekanik Titreşim, Küre Sayısı, Tane Boyutu.

## Effects of Microstructure and Mechanical Properties of Ductile Cast Iron of Mechanical Vibration

### ABSTRACT

In this study, effects of mechanical vibration on the microstructure and mechanical properties of the Ductile Iron (DI) were investigated. Castings were made in a conventional green sand mold. In this study ferritic ductile iron (GGG 40) material is used. Results of the study showed that changes on microstructure and mechanical properties of the ductile iron materials occurred with vibration. Looking at the results, mechanical properties of ductile iron are developed depending on the reduction in grain and graphite nodule size.

**Keywords:** Ductile Iron (DI), Microstructure, Mechanical Properties, Mechanical Vibration, Nodule Count, Grain Size.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dökme demirlerin bir sınıfı olan Küresel Grafitli Dökme Demirler (KGDD), mekanik özellikler yönünden diğer dökme demir malzemelerle karşılaştırıldığında daha üstün mekanik özelliklere sahip bulunmaktadır. Bu üstün mekanik özelliklerin elde edilebilmesinde KGDD'e ilave edilen alaşım elementlerinin tür ve miktarları; sementit oluşumu, grafit küreselleşmesi ve dağılımı ile matris yapı türünü belirlediği için büyük önem taşımaktadır. KGDD'lerde küre sayısının iyi mekanik özelliklerin elde edilmesi açısından mümkün olduğu kadar yüksek sayıda (150-250 küre/mm<sup>2</sup>) olması istenmektedir [1-8].

Bu nedenle uygun sıcaklıkta, yeterli miktarda küreleştirici ( Mg, Ce ) ve küreleşmeyi destekleyecek malzeme (Na, Ca) kullanımı gerekmektedir [1,3,6,8]. Sıvı metalin kükürt oranı, karbon eşdeğerliği (KE), diğer malzeme ve proses değişkenleri küreleşme oranına etki etmektedir. Matris yapı içinde iyi küreleşmiş ve üniform dağılmış grafit küre yapısı istenmektedir [1-9]. Düşük küre sayısı, küresel olmayan grafit şekli, üniform olmayan küre dağılımı ve hacmi KGDD'in mekanik özellikleri üzerinde zararlı bir etkiye sahip olmaktadır [1-

7]. Mikro yapı ve mekanik özellikler ilave edilen alaşım elementlerinden (Cu, Ni, Ti, Mn, vb.) etkilendikleri gibi, aynı zamanda döküm işlemlerinin yapısındaki etkenlerden de etkilenmektedir. Bu etkenler; basınç, soğuma hızı, döküm sıcaklığı, vakum, titreşim vb. işlemler olarak sayılabilir. Bu etkenlerin tümü KGDD malzemelerin mikro yapısını etkilemekte ve dolayısıyla mekanik özellikler de etkilenmektedir. İfade edilen bu etkenler döküm yöntemlerinden bağımsız ya da bağımlı olarak değişim gösterebilir [1-19]. Titreşim düşük genliğe ve sık aralıklı bir sürekliliğe sahip olması gereken bir etkidir. Yüksek genlik ve geniş aralıkla uygulandığında olumsuz (çalkantı oluşumu, gaz (hava) boşluğu oluşumu, kalıpta bozulmalar, vb.) etkileri olmaktadır. Belirtilen uygun şartlarda titreşim uygulandığında tane inceltme ve modifikasyon etkilerine benzer sonuçların elde edilebileceği görülmektedir. Bu yöntem aynı zamanda tüm döküm yöntemlerinde uygulanabilen basit ve ekonomik bir işlemdir. Ancak etkileri bakımından büyük yararlar sağlanabilmektedir [19-34]. Titreşim uygulaması sonucunda özellikle tane ve faz boyutları küçülmekte, sıvı metal içerisindeki çözünmüş haldeki gazlar toparlanma etkisiyle atılabilmekte, sıvı metal akıcılığı iyileşmekte, kalıp-metal ara yüzeyinde meydana gelen ayrışma nedeniyle ısı

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: hasirci@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 275-282

transferindeki yavaşlama nispeten azaltılabilmektedir. Görüleceği üzere tüm bunlar döküm parçaların katılaşma hızları ve kaliteleri üzerine olumlu etkileri olan durumlardır [1-23]. Literatür incelemelerinden özellikle KGDD'lerin yapı ve özelliklerine mekanik titreşimin etkilerinin incelenmesi konusunda çalışma bulunmadığı görülmektedir. Kum kalıba döküm yöntemi KGDD malzemelerinin üretiminde en çok kullanılan yöntemdir. Bu nedenle bu konuda araştırma yapılması ve elde edilecek sonuçların olabildiğince yaygınlaştırılması daha gelişmiş KGDD malzeme üretilmesi açısından önemli görülmektedir.

Tüm bunlardan hareketle bu çalışma; KGDD malzemelerin yaş kum kalıba dökülmesi sırasında uygulanan mekanik titreşimin geleneksel yerçekimi etkisiyle elde edilen yapı ve mekanik özelliklere göre sağlanacak avantajların incelenmesi amacıyla yapılmıştır.

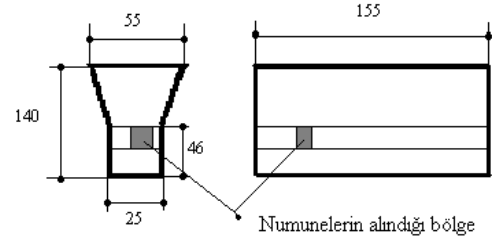
## 2. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

Dökümün yapıldığı kalıp tasarımı TS EN 1563'de belirtilen Y-bloklardan Y2 [8] tipine göre hazırlanmıştır (Şekil 1). Ergitme işlemi 500 Kg kapasiteli ergitme tipi indüksiyon ocağı kullanılarak yapılmıştır. İndüksiyon ocağına şarj girdisi olarak; sfero piki (külçe şeklinde), KGDD hurdası ve bir miktar çelik hurdası kullanılmıştır. Ergitilmiş metal, döküm sıcaklığına ulaştıktan sonra (1450 °C) aşılama ve küreleştirme işlemleri yapılmıştır. Küreleştirme işlemi Tundish tipi işlem potasında gerçekleştirilmiştir. Küreleştirme işleminde FeSiMg malzemesi kullanılmıştır. Aşılama işlemi ise standart FeSi malzemesi ile yapılmıştır. İşlem potasından alınan ergimiş metal; yaş kum kalıplara küreleştirici etkinliğinin geçmeyeceği bir süre içerisinde (1-3 dakika) Şekil 2'de verilen yaş kum kalıplara yerçekimi etkisi ve 2 farklı mekanik titreşim (50 ve 100 Hz) değerinde dökülerek oda sıcaklığına soğumaya bırakılmıştır. Titreşim uygulaması dökümden önce başlatılmış ve katılaşmanın ardından malzeme tamamen soğuyana kadar devam edilmiştir. Titreşim uygulaması döküm yapılacak kalıbın üzerine bağlandığı her bağlantı noktası yayla desteklenmiş plakanın altına bağlı olan pinömatik bir motor ile gerçekleştirilmiştir.

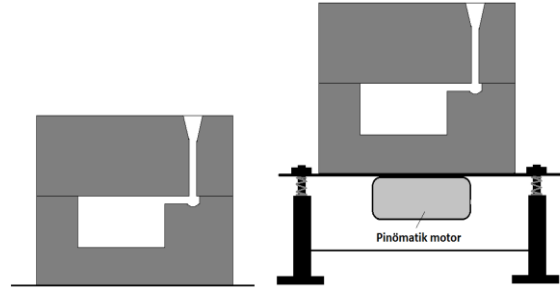
Numunelerin dökümü sırasında kimyasal bileşimin tespiti için ayrıca spektral analiz numuneleri dökülmüş ve numunelerin kimyasal bileşimleri Çizelge 1'de verilmiştir. Grafit kürelerinin miktarı, küreleşme derecesi ve dağılımı ile ilgili metalografik ölçümler ve testler Şekil 1'de gösterilen bölgeden alınan numuneler üzerinde yapılmıştır. Metalografik incelemeler standart polisaj işleminin tamamlanmasından sonra yapılmıştır. Birim alandaki grafit küre sayımı, dağlanmamış numune yüzeyinde x100 büyütmede görülen grafit küreleri 15 ayrı bölgeden yapılan Image-J yazılımı kullanılarak % 2 nital ile dağlanmış numune yüzeyinden yine mikroskop monitörü üzerinde 15 ayrı bölgeden alınan ölçümlerle belirlenmiştir. Metalografik inceleme için hazırlanan

numunelerin yüzeylerinden HV5 türünden sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için 6 tekrar yapılmış ve bunların ortalaması sonuç olarak verilmiştir.

Y-bloklardan üretilen çubuklar daha sonra TS 138 EN 10002-1 standardına uygun olarak hazırlanan ve Şekil 3'te verilen çekme deney çubukları Dartec 1200 bilgisayar kontrollü numune test cihazında çekme deneyine tabi tutularak bunların çekme dayanımı ve % uzama değerleri belirlenmiştir. Her bir numune için 3 tekrar yapılmış ve bunların ortalaması sonuç olarak verilmiştir.



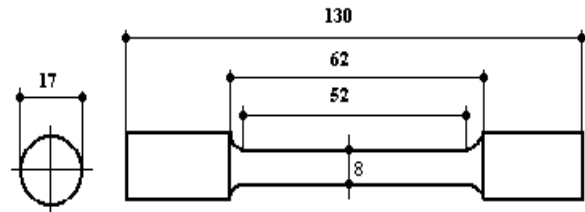
Şekil 1. Döküm numunelerin üretiminde kullanılan standart Y-blok ( Standard Y-block used in the production of casting samples)



Şekil 2. Geleneksel ve mekanik titreşim döküm sistemlerinin şematik gösterimi (Schematic representation of the traditional and mechanical vibration casting systems)

Çizelge 1. Bu çalışma için üretilen KGDD numunelerinin kimyasal bileşimleri (The chemical composition of the produced ductile iron samples for this study)

% C	% Si	% Mn	% P	% S
3.5	2.86	0.46	0.033	0.02



Şekil 3. Standart çekme deneyi numunesi (Standard tensile test specimen)

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1. Makro ve Mikro Yapısal Değişimler (Changes of Macro and Micro Structural)

Uygulanan mekanik titreşimin KGDD malzemelerin yapısal özelliklerine etkilerinin değerlendirilebilmesi amacıyla dağlama yapılmadan ve dağlama yapılarak mikroskop altında görüntüleri alınmıştır. Dağlanmamış haldeki görüntüler Şekil 4’de ve dağlanmış haldeki görüntüler ise Şekil 5’te verilmiştir. Ayrıca makro ve mikro yapısal sayısal veriler de Çizelge 3 ve Şekil 6’da verilmektedir.

Şekil 4’de verilen küre sayısının ve boyutlarının kolaylıkla ayırt edilebildiği görüntüler incelendiğinde; titreşim uygulaması sonucunda küre sayısının arttığı, küre boyutlarının ise küçüldüğü görülmektedir. Yapılan ölçümler neticesinde titreşimsiz döküm numunedeki küre sayısının 207 küre/mm<sup>2</sup> olduğu, 50 Hz titreşim uygulanmasıyla birlikte % 7,8 oranında arttığı ve titreşim miktarının 100 Hz çıkmasıyla birlikte ise % 18,4 oranında artmıştır. Bunun tersine küre boyutunun ise titreşimsiz döküm numunedeki 15 µm olan küre boyutunun 50 Hz titreşim uygulanmasıyla birlikte yaklaşık % 15,7 oranında azaldığı ve titreşim miktarının 100 Hz çıkmasıyla birlikte ise yaklaşık olarak % 24,7 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Kısacası titreşim uygulaması küre sayısını artırırken, boyutunu ise azaltmaktadır.

Ayrıca tane boyutu ve sayısı incelendiğinde de benzer karakterli durumların meydana geldiği görülmektedir. Titreşim uygulaması sonucunda tane sayısı artmış ve buna bağlı olarak tane boyutu ise küçülmüştür. Titreşimsiz döküm sonucunda mm<sup>2</sup>’de ortalama 35 adet tane meydana gelirken, 50 Hz titreşim sonucunda yaklaşık % 8.6 ve 100 Hz titreşim sonucunda ise yaklaşık % 20 oranında tane sayısı artmıştır. Diğer yandan titreşimsiz dökümde ortalama 65 µm olan tane boyutu 50 Hz titreşim sonucunda yaklaşık % 10 ve 100 Hz titreşim sonucunda ise yaklaşık % 22.6 oranında azalmıştır.

Bu sonuçların meydana gelmesinin çeşitli sebepleri bulunmaktadır. Bunlar; aşılama ve heterojen çekirdeklenme etkinliğinin artması, dentritik katılaşmanın engellenerek eşeksenel katılaşmanın teşvik edilmesi, katılaşma hızının artması, katılaşma başlangıç sıcaklığının düşmesi gibi etkenler olarak sayılabilir. Bu çalışmada da yapılan incelemelerden benzer etkenlerin varlığı görülmektedir. Küre sayısının artması ve boyutunun küçülmesi (Şekil 4, Çizelge 3 ve Şekil 6) çekirdeklenmenin artması ve dolayısıyla katılaşmanın hızlanmasının bir sonucu olduğu bir gerçektir. Aynı şekilde bu katılaşma hızı tane sayısında artışa ve boyutlarında ise küçülmeye neden olmuştur (Şekil 5, Çizelge 3 ve Şekil 6). Çünkü katılaşma süresinin kestiriminin yapıldığı Chvorinov bağıntısına [1] bakıldığında katılaşma hızının artması yada hızlı katılaşma sonucunda daha çok sayıda ve küçük boyutlu küre ve tanelerin meydana geldiği bilinmektedir. Bu çalışma sonuçlarından da titreşim uygulamasına bağlı

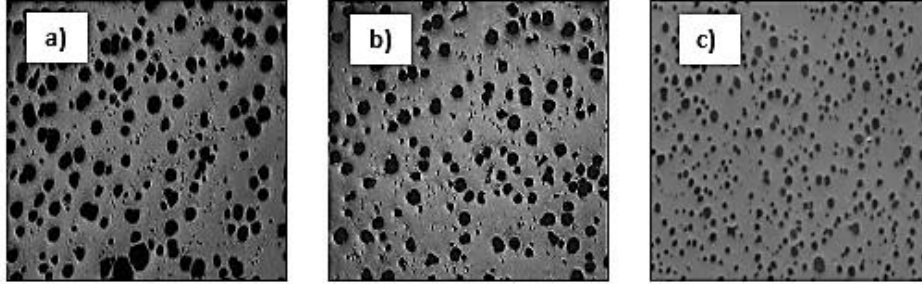
olarak küçük tane ve kürelerin meydana gelmiş olması bunu doğrulamaktadır. Titreşim uygulaması heterojen katılaşma şartlarını güçlendirmekte, neo ötektik katılaşmayı teşvik ederek grafit ve tane sayısının artmasına yol açmakta, kalıp-metal arayüzey temasını artırarak kısmen ısı transferini hızlandırmakta ve böylece ifade edilen yapısal değişimler meydana gelmektedir. KGDD malzemelerde katılaşma şöyle gelişmektedir. KGDD’in katılaşması ve/veya soğumasının denge şartları altında gerçekleştiği kabul edilir. KGDD’ler ötektik altı ve ötektik üstü bileşime sahip olmasına göre katılaşma mekanizmalarında farklılık meydana gelmektedir. Ötektik altı bileşime sahip KGDD’de katılaşma, primer östenit dentritlerinin oluşumuyla başlarken, ötektik üstü bileşime sahip olanda ise küre şekilli grafit fazının oluşuyla başlamaktadır. Ötektik üstü demirde (% C veya KE = % 4.5 ) ilk kristalleşen katı, grafit fazıdır. Bu grafit partikülleri sıcaklık ötektik noktasına ulaşıncaya kadar sıvı demirin karbon atomlarının tükenmesiyle büyürler. Karbonu azalan bölgelerde östenit çekirdeklenir ve sonuç olarak östenit kabukları grafit kürelerinin etrafını çevirir. Ötektik katılaşma sırasında yalnızca östenit sıvıyla temas halindedir ve kürenin büyümesi için kontrol mekanizması katı östenitin kabuğu boyunca karbon atomlarının difüzyonudur. Bu tür katılaşma “neoötektik katılaşma” olarak isimlendirilir ve her bir grafit küresi ve östenit kabuğu bir ötektik hücre olarak kabul edilir. Neoötektik büyümesi başladıktan sonra, başka küresel grafit çekirdeklenmesi olmaz, dolayısıyla grafit kürelerinin sayısı katılaşmanın başlangıcında belirlenmiş olur. Ötektoid sıcaklığa kadar mevcut grafit çökmesi meydana gelir [1, 15-23].

Östenit, katı hal dönüşümü ile birlikte metalin kompozisyonuna ve sıcaklığa bağlı olarak ferrit+grafit veya ferrit+perlit+grafite dönüşebilir. Aynı zamanda sementit grafit ve ferrite ayrışabilir. Dengeli soğuma şartlarında ferrit, grafit partiküllerinin etrafında karbonca fakirleşmiş bir bölgenin meydana gelmesinden dolayı östenit/grafit arayüzeyinde çekirdeklenir; küreler östenitteki karbon çözünürlüğünün düşen sıcaklıkla birlikte düşmesiyle karbon çöktürücü rol oynarlar. Bu aşamada ferrit/östenit arayüzeyi, östenitin yüksek karbon içeriği nedeniyle perlit için tercih edilen çekirdeklenme bölgeleri haline gelir. Perlit teşvik edici elementler dönüşüm sıcaklığını düşürür ve ferrit oluşum hızını azaltır. Perlit, östenit/östenit sınırlarında veya östenit/grafit arayüzeyinde çekirdeklenir. İşte tüm bunlar katılaşma başlangıcında titreşimin etkisiyle bölgesel alt soğumanın azalması (katılaşmanın kısmen geciktirilmesi ya da neo ötektik katılaşmanın teşvik edilmesi) ve C segregasyonunun teşvik edilmesi neticesinde ortaya çok sayıda grafit fazının çekirdeklenmesi veya başka bir ifadeyle grafit çekirdeklenmesinin teşvik edilmesi sonucu küre sayısı artmaktadır gelir [1, 15-23]. Çekirdeklenmenin teşvik edilmesi KGDD yapısında tane sayısının da artmasına yol açmaktadır. Böylece sayı artarken hem tane hem de küre boyutu ise küçülmektedir. Aynı zamanda katılaşmanın hızlanması neticesinde grafit

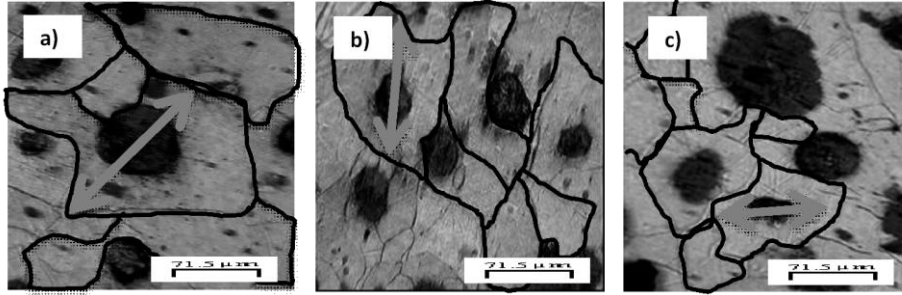
küresine uzak tane sınırlarında C yoğunlaşmasına bağlı olarak difüzyona zaman kalmadığından kısmen perlit oluşumu (Çizelge 3) da teşvik edilmekte ve bu fazın miktarının artmasına neden olmaktadır. Bu oluşumlar az da olsa KGDD malzemelerin özelliklerini etkilemektedir.

çekme dayanımı, % uzama ve sertlik özelliklerinin geliştiği tespit edilmiştir.

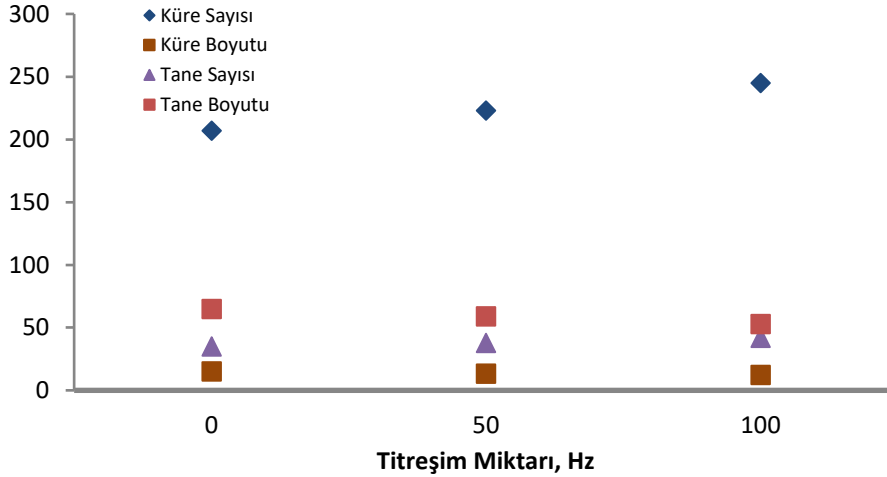
KGDD'lerde döküm kesit kalınlığı ve alaşım kompozisyonuna bağlı olarak dayanım, sertlik ve süneklik gibi mekanik özellikleri döküm durumu matris yapısındaki perlit ve ferrit oranlarına göre değişir.



Şekil 4. Titreşim miktarına bağlı olarak grafit küre yapısının değişimi, a) 0, b) 50 ve c) 100 Hz (Dağlamasız, X 100) (Change of structure of graphite nodule depending on vibration amount; a) 0, b) 50 and c) 100 Hz, non-etching, X 100)



Şekil 5. Titreşim miktarına bağlı olarak tane boyutlarındaki değişimler, a) 0, b) 50 ve c) 100 Hz (Dağlama % 2 Nital) (Changes of grain sizes depending on vibration amount; a) 0, b) 50 and c) 100 Hz, Etching: Nital 2%)



Şekil 6. Titreşim miktarına bağlı olarak makro ve mikro yapısal özelliklerin değişimi (Change of macro and micro structural properties depending on vibration amount)

### 3.2. Mekanik Özelliklerdeki Değişimler (Changes of Mechanical Properties)

KGDD malzemenin katılaşması sırasında titreşim uygulanmasının mekanik özelliklere etkileri incelenmiş ve sonuçlar Çizelge 4 ile Şekil 7 ve 8'de verilmiştir. Sonuçlar genel olarak incelendiğinde; küre ve tane sayısının artmasına bağlı olarak KGDD malzemenin

Alaşımız KGDD türlerinde östenit oda sıcaklığında kararlı değildir ve demirin diğer kristalografik şekli olan ferrite dönüşür. Ferrit hacim merkezli kübik (HMK) demirin çok düşük miktarda karbon ile oluşturduğu katı çözelti halidir ve yapıda serbest halde veya perlit bileşeni olarak bulunabilir. Ferrit oldukça yumuşak sünek ve kısmen dayanıklı bir yapı bileşenidir. Si gibi bazı alaşım elementleri ferritin sertliğini artırır. KGDD'ler de

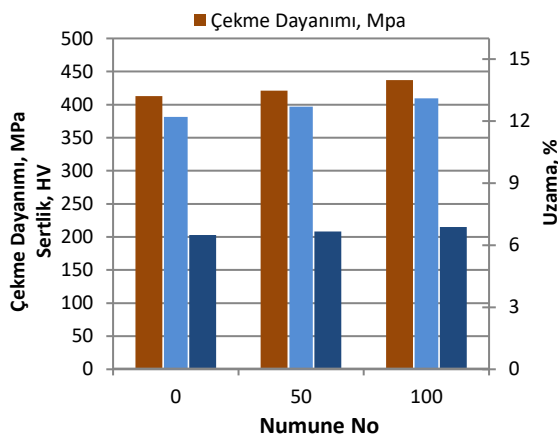
östenitin ferrite dönüşümü matrisin karbon içeriğini de değişikliğe uğratar. Çekirdeklenme sırasında östenitin karbon içeriği yüksek olmakta, ancak soğuma ile birlikte bu oran düşmektedir. Östenit-ferrit dönüşüm sıcaklığında östenitteki karbon çözünürlüğü, yaklaşık olarak % 0.55'dir. Ferrit çok az karbon çözer, dönüşüm esnasında karbon çevreye itilir/kusulur. Ferritin yapıda oluşumu bileşime, soğuma hızına ve grafit dağılımına bağlıdır. Matris yapısını oluşturan ferrit ve perlit hacim oranları soğuma hızına, alaşım elementleri içeriğine ve grafit miktarına göre değişmektedir. Segregasyonlar ve karbürleri en düşük düzeyde tutmak için şarj girdileri optimum düzeyde kontrol edilmelidir. Böylece nihai ürünün istenilen mekanik özelliklere sahip olması ve arzu edilmeyen bileşenlerin en düşük düzeyde kalması sağlanır gelir [1, 15-23].

KGDD'de grafitin gri dökme demirlerdeki keskin köşeli tabakalar (lamel grafit) yerine küreler şeklinde oluşması, gri dökme demire göre dayanımın 5-7 kat daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Grafit kürelerinin şekli mekanik özellikleri etkilemekte, bu nedenle de tam küresellikten uzaklaştıkça KGDD'nin mekanik özelliklerinde düşme meydana gelmektedir. Aynı zamanda grafit kürelerinin boyut ve dağılımının homojenliği de özellikleri etkilemektedir. Aşılama prosesi küre sayısını artırıcı etkiye sahiptir. Böylece karbür oluşumu önlenmesiyle yapıdaki ferrit oranı artırılarak sert ve kırılğan dökümlerin üretilmesi engellenmektedir [20-23].

**Çizelge 4.** Titreşim miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerindeki değişimler (Changes of mechanical properties depending on vibration amount)

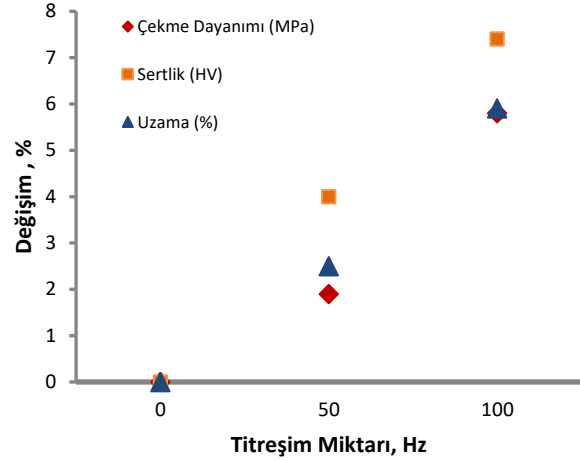
Titreşim Miktarı	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV5)
0 Hz	413 (B. D.)	12.2 (B. D.)	203 (B. D.)
50 Hz	421 (↑% 1.9)	12.7 (↑% 4)	208 (↑% 2.5)
100 Hz	437 (↑% 5.8)	13.1 (↑% 7.4)	215 (↑% 5.9)

(B.D.): Başlangıç değeri



**Şekil 7.** Titreşim miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerdeki değişimler (Changes of mechanical properties depending on vibration amount)

Genellikle optimum mekanik özelliklerin elde edilmesi için % 90'dan fazla küreselleşme istenir. Bu oran malzemenin kullanılacağı çalışma şartlarına göre değişebilir. Küresel olmayan grafit oranı yükseldikçe dayanım ve süneklik ile ilişkili bütün özellikler azalmaktadır.



**Şekil 8.** Titreşim miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerdeki istatistiksel değişimler (Statistical changes of mechanical properties depending on vibration amount)

Yukarıdaki bilgilerden hareketle elde edilen sonuçlar incelendiğinde; mekanik titreşim uygulanması sonucunda tane ve küre sayısının artması, küreselleşmenin iyileşmesi gibi nedenlerle mekanik özellikler gelişmiştir. Çünkü çekirdeklenmenin artmasına bağlı olarak küre ve tane sayısı artarken boyutları küçülmektedir. Hall-Petch yasasına göre [1] tane boyutu azaldıkça dayanım ve sertliğin artması beklenen bir sonuçtur. Titreşim miktarı arttıkça tane ve grafit küre boyutu küçülmekte, sayıları ise artmaktadır. Elde edilen sonuçlar da bu durumu teyit etmektedir. Titreşim miktarı arttıkça tane ve küre boyutu küçülmekte ve mekanik özellikler gelişmektedir. Titreşim uygulanmasına bağlı olarak çekme dayanımı önce % 1.9 ve titreşim miktarı daha da arttıkça % 5.8 oranlarında, uzama miktarı önce % 4 ve titreşim miktarı daha da arttıkça % 7.4 oranlarında ve sertlik miktarı ise önce % 2.5 ve titreşim miktarı daha da arttıkça % 5.9 oranlarında artmıştır. Kısacası katılma sırasında mekanik titreşim uygulanması KGDD malzemelerin mekanik özelliklerinin artmasına neden olmaktadır.

Mekanik özelliklerdeki bu artışların nedenleri olarak tane ve küre sayısının artması, boyutlarının ise küçülmesi olduğu daha önce ifade edilmiştir. Bunun en önemli kanıtları olarak kırılma yüzeyi yada çekme test numunesi kopma yüzey morfolojisinin incelenmesiyle daha da iyi anlaşılacaktır. Bu amaçlarla numunelerin kopma yüzey görüntüleri Şekil 9 ve 10'da verilmiştir.

Yüzeylere bakıldığında titreşimsiz dökümde (Şekil 10.a-c) çatlak oluşumu ve gevrek kırılma (klivaj ya da keskin köşeli) görüntüleri bulunmaktadır. Kırık yüzeylerde bir kademe oluşumu (alçak ve yüksek alanlar)



bulunmaktadır. Bu görüntüler sünekliğin ve deformasyonun az olduğu gevrek malzemelerde görülmektedir.



**Şekil 9.** Titreşim uygulamasına bağlı olarak kopma yüzey karakteristiğinin değişimi, a) 0, b) 50 ve c) 100 Hz (The change of crack surface characteristics depending on vibration applications; a) 0, b) 50 and c) 100 Hz)

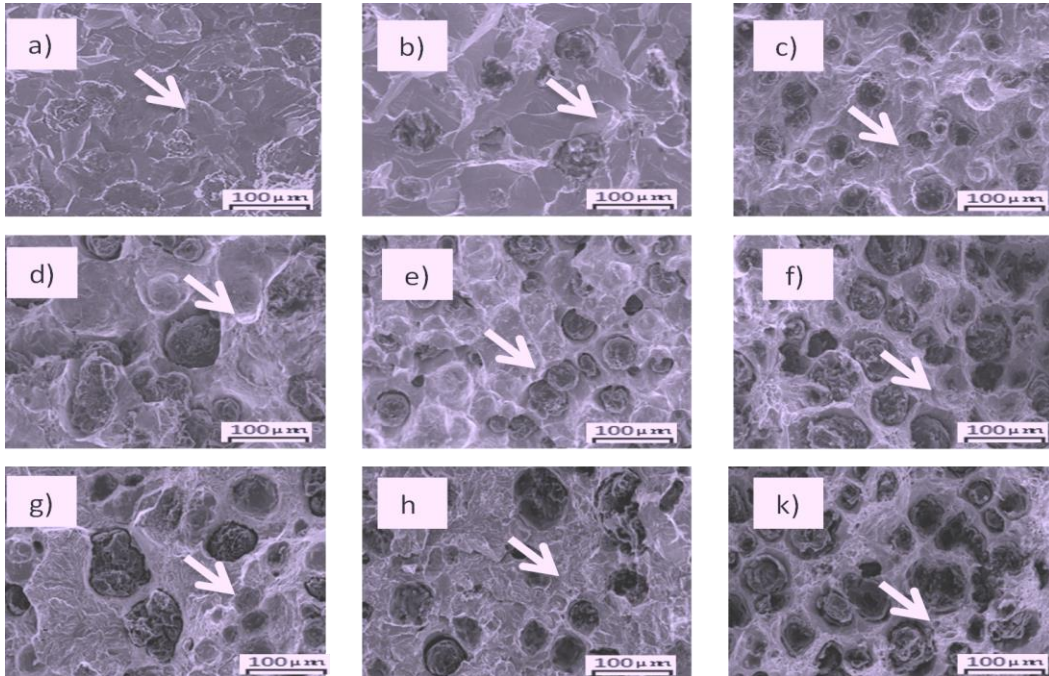
Deformasyon malzemeler yük uygulandığında en zayıf veya kusurlu noktadan başlar. Kısa sürede gerçekleştiği için özellikle dökme demir gibi gevrek malzemelerde bölgesel olarak gerçekleşir. Tane boyutunun büyük olması deformasyonun homojenliğini azaltır. Çünkü bu tür malzemelerde kısmi deformasyon meydana gelebilmekte ve homojen olmayan bölgesel kopmalar (parçalı kopuklar) şeklinde bir kopma yüzeyi oluşmaktadır [18, 22,23]. Aynı zamanda grafit küre dağılımındaki homojensizlikler de kırılma tokluğu ve yüzey özelliklerine olumsuz etkiler yapmaktadır. Çünkü homojen olmayan küre dağılımı kırılmada da homojensizlikler ya da bölgesel kopmalar meydana getirebilmektedir.

Diğer yandan titreşim uygulaması neticesinde (Şekil 10.d-f ve g-k) daha fazla tane ve küre sayısı, daha

(oyuklu ya da sünek kopma) meydana gelmektedir. Dökme demirlerin genel olarak kırılma gösterdiği ifade edilmiştir. Ancak titreşime bağlı olarak gevrek kırılmanın yanında sünek malzemelerde görülen oyuklu (çatlak değil geniş yüzler) kopmaların meydana geldiği görülmekte (Şekil 10.d-f) ve titreşim miktarının artmasıyla bu kopma şeklinin arttığı görülmektedir (Şekil 10.g-k). Titreşim uygulanması sonucunda gevrek kırılma şeklinin yanında sünek kopma devreye girmektedir. Diğer bir ifadeyle titreşim sonucu hem gevrek hem de sünek kopma davranışı birlikte görülmektedir. Titreşim miktarı arttıkça sünek kopma daha fazla görülmektedir.

Titreşimsiz dökümde pekleşme nedeniyle gevrek kırılma meydana gelmektedir. KGDD üzerine kuvvet uygulandığında başka kusurlu noktalar bulunmuyorsa çatlaklar küreselleşmenin yetersiz olduğu grafit kürelerinin uç (sivri ya da keskin köşeler) üzerinden olacaktır.

Çünkü küreler matris malzemeden farklı oluşumlardır ve mekanik davranışları da farklı olacaktır. Mekanik açıdan kusur sayılabilirler. Bu nedenle kuvvet uygulanmaya devam edilirse çatlak büyümeye ve küreleri takip ederek ilerlemeye devam edecektir. Çatlaklar yüksek enerjili ve kaymanın süresiz olduğu tane sınırları yerine tane içerisinden ilerleyerek en yakın küreye ulaşacaktır. Bu tür kırılma sünek (kaymalı) kırılma olarak ifade edilir. Titreşim uygulaması sonucunda oluşan çok sayıda tane nedeniyle kopmalar sünek kırılmalar şeklinde meydana gelmektedir. Gevrek kırılmada yüzeyler keskin köşeler biçiminde olurken, sünek kırılmada daha fazla



**Şekil 10.** Titreşim uygulamasına bağlı olarak kopma yüzey makro yapılarındaki değişimler; a-c) 0, d-f) 50 ve g-k) 100 Hz (Changes of macrostructures in crack surface depending on vibration applications; a-c) 0, d-f) 50 and g-k) 100 Hz)

homojen matris yapısı ve özellikle süneklik gibi mekanik özelliklerin artmasına bağlı olarak çok noktada deformasyon nedeniyle daha düz bir kopma yüzeyi

deformasyon nedeniyle oyuklanmalar şeklinde yüzeyler meydana gelmektedir.

Bu bilgiler doğrultusunda Şekil 10'daki yüzey görüntüleri değerlendirildiğinde Şekil 10.a-c'deki görüntüler gevrek, Şekil 10.d-f yüzeyleri çoğunlukla gevrek +sünek ve Şekil 10.g-k'da ise daha çok sünek kırılma olduğu söylenebilir. Başka bir işaret de kırılma yüzeylerinin mikroskop altında farklı parlaklık tonlarında görülmesi gösterilebilir. Gevrek kırılmalarda ışık direk yansıtıldığından yüzey daha parlak, sünek kırılmalarda ise oyuklarda ışığın kırınımı nedeniyle daha mat şekildedir.

Ayrıca bazı çalışmalarda [23-30] düşük orandaki ya da kısmı (%3-10) perlit miktarının yorulma ve kırılma direncini artırdığı ifade edilmektedir. Grafit/ferrit ara yüzeyinde başlayan çatlak daha yüksek sertlik ve dayanıma sahip perlit fazına geldiğinde bir dirençle karşılaşacak, buna bağlı olarak çatlağın ilerleyebilmesi için daha fazla gerilim uygulanması gerekecektir. Bu şu anlama gelmektedir; kısmi perlit bulunan KGDD'lerde kırılma direnci ferritik olanlara kıyasla daha fazladır. Mevcut çalışmamızda titreşim uygulamasına bağlı olarak % 2.5 ve 3.4 oranlarında perlit oluşmaktadır. Bu mikroyapısal sonuçlar kırılma direncinin artması ve dolayısıyla dayanımın artmasının nedenlerinden biridir.

#### 4. SONUÇLAR (RESULTS)

KGDD malzemelerin döküm yoluyla üretimi sırasında mekanik titreşim uygulanması neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Titreşim uygulaması grafit küre ve tane sayısında artışa neden olmakta, boyutları ise küçülmektedir. Titreşim miktarı arttıkça daha fazla küre ve tane elde edilmekte, boyutları da küçülmektedir.
- Titreşim uygulamasına bağlı olarak mekanik özellikler gelişmektedir. Başlangıçta 413 MPa olan çekme dayanımı titreşim miktarına bağlı olarak 421 ve 437 MPa olmaktadır. Sertlik 203 HV'den titreşim miktarına bağlı olarak 208 ve 215 HV'ye ulaşmaktadır. Uzama miktarı da 12.2'den düşük titreşimde 12.7'ye, daha yüksek titreşimde ise 13.1'e artmaktadır.
- Mekanik özelliklerdeki bu gelişmeler yapısal değişim neticesinde titreşimin deformasyon ve kırılma davranışındaki değişime bağlı olarak meydana gelmektedir. Çünkü genellikle gevrek kırılma davranışı görülen KGDD malzemede titreşime bağlı olarak oyuklu veya sünek kopma davranışı görülmektedir. Bu kırılma farklılığı da mekanik özelliklerdeki değişimin en önemli kanıtını oluşturmaktadır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- 1) Elliott, R., "Cast Iron Technology", Butterworth, LONDON, (1990).
- 2) Mills, K., (Edt.), "Cast Irons," ASM, in Metals Handbook, vol. 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, 9th ed. Metals Park, OH, (2002).

- 3) "Ductile Iron; Molten Metal Processing", 2nd ed. Des Plaines, IL: American Foundrymen's Society, (1986).
- 4) "Sorelmetal Book of Ductile Iron", 1st ed. Montréal, Canada: Rio Tinto Iron & Titanium Inc., (2004).
- 5) Angus, H. T., "Cast Iron: Physical and Engineering Properties", 2nd ed. Boston, MA: Butterworths Inc., (1976).
- 6) "Introduction to Gray Cast Iron Processing", 1st ed. Des Plaines, IL: American Foundrymen's Society, (2000).
- 7) "Ductile Iron Handbook", 2nd ed. Des Plaines, IL: American Foundrymen's Society, (1993).
- 8) Hasirci, H., "Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Alaşım Elementleri ( Cu ve Ni ) Ve Östemperleme Süresinin Mikroyapı Ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkileri", *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2001).
- 9) Xiao, B., Fan, Z., Jiang, W., Liu, X., Long, W. and Hu, Q., "Microstructure and Mechanical Properties of Ductile CastIron in Lost Foam Casting with Vibration ", *Journal Of Iron And Steel Research*, 21:(11), 1049-1054, (2014).
- 10) Campbell, J., "Effects Of Vibration During Solidification,"*International Metals Reviews*, 26: 71-108, (1981).
- 11) Abramov, V., Abramov, O., Bulgakov, V. and Sommer, F., "Solidification of aluminum alloys under ultrasonic irradiation using water-cooled resonator,"*Materials Letters*, 37: 27-34, (1998).
- 12) Gruzleski, J. E., "Microstructure Development During Metalcasting", 1st ed. DesPlaines, IL: American Foundrymen's Society, (2000).
- 13) Mills, K., (Edt.), "Casting," ASM, in Metals Handbook, vol. 15, Principles of Solidification, 9th ed. Metals Park, OH: ASM, (2002).
- 14) Stefanescu, D. M., "Science and Engineering of Casting Solidification", New York: Plenum Publishers, (2002).
- 15) Mills, K., (Edt.), "Cast Iron," ASM, in Metals Handbook, vol. 9, Metallography and Microstructures, 9th ed. Metals Park, OH: ASM, (2004).
- 16) Higgins, R. A., "The Effects of Composition on the Structure of Cast Iron," "Engineering Metallurgy – Applied Physical Metallurgy, 6th Ed., 353-373, (1993).
- 17) Double, D. D. and Hellawell, A., "The Nucleation and Growth of Graphite – The Modification of Cast Iron," *Acta Materialia*, 43(6): 2435-2442, (1995).
- 18) Walton, C. F., (Edt.), "Gray and Ductile Iron Castings Handbook", 1st ed. Cleveland, OH: R. R.Donnelley & Sons Co., (1971).
- 19) Minkoff, I., "The Physical Metallurgy of Cast Iron", New York, NY: Wiley, (1983).
- 20) Çetin, M., "Östemperlenmiş KGDD'lerin Aşınma Davranışının Geliştirilmesi", *Doktora Tezi*, Gazi üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2005).
- 21) Karsay, S.I., "Ductile Iron, Production Practices", American Foundrymen's Society, Inc., USA, 24-77, (1985).
- 22) Walton, C.F., "Metallurgy of Cast Iron", Iron Casting Handbook, Iron Casting Society Inc., (1981).
- 23) Walton, C.F., "Mechanical properties of Ductile Iron", Iron Casting Handbook, Iron Casting Society Inc., (1981).

- 24) Hemond, C. J. Jr, "Engineering Acoustics and Noise Control", Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, (1983).
- 25) Rossing, T.D., Fletcher, N.H., "Principles of Vibration and Sound", New York, Springer, (2004).
- 26) Abramov, O.V., "Ultrasound in Liquid and Solid Metals", Boca Raton, FL: CRC Press Inc., (1994).
- 27) Lide, D. R. (Edt), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84th Edition, Section 14, Geophysics, Astronomy, and Acoustics; Speed of Sound in Various Media, CRC Press, Boca Raton, Florida, (2003).
- 28) Abramov, O.V., "Action of high intensity ultrasound on solidifying metal", *Ultrasonics*, 25, 73-82, (1987).
- 29) Ohsawa, Y., "Effect of ultrasonic vibration on solidification structures of cast irons," *NRIM Research Activities*, 67: 5-6, (1995).
- 30) Chernyshova, N. V., Etelfes, L. S., Zolotereva, R. S. and Yanovskaya, E.I., "Influence of Vibration Treatment of Cast Iron on Glass Mold Performance," *Soviet Casting Technology*, 6: 14-15, (1989).
- 31) Gittus, J. H., "Inoculation of solidifying iron and steel casting by means of vibration," *Journal of the Iron and Steel Institute*, 192: 118-131, (1959).
- 32) Grenko, T.M., "The Effects of Non-Contact Acoustic Vibrations on the Solidification and Microstructure of Aluminum Casting Alloy A356" *MS thesis*, Pennsylvania State University, December (2008).
- 33) Lin, S.C., Lui, T.S., Chen L.H. and Song, J. M., "Role of Matrix Structure on Resonant Vibration Fatigue Fracture of Spheroidal Graphite Cast Iron", *International Journal Cast Metals Resource*, 15: 75-84, (2002).
- 34) Lin, S.C., Lui, T.S. and Chen, L.H., "Effect of nodularity on resonant vibration fracture behavior in upper bainitic and ferritic cast irons", *Metallurgical and Materials Transaction A*, 31A: 2193-2203, (2000).