

**Otomotiv Sektöründe Kullanılan
Küresel Grafitli Dökme Demir Üretimine
Etki Eden Parametrelerin Teorik İncelenmesi
Ultrasonik Ses Hızı Yöntemiyle Tahribatsız Kontrolü
Ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması**

Özer Özdemir

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2007

Theoretical Examination Of Parameters Effected
To Production Spheroidal Graphite Cast Iron Used In
Automotive Sector And Comparison Of Mechanical
Properties Nondestructive Evaluation With
Ultrasonic Velocity Methods

Özer Özdemir

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Metallurgy Engineering

May 2007

Otomotiv Sektöründe Kullanılan
Küresel Grafitli Dökme Demir Üretimine
Etki Eden Parametrelerin Teorik İncelenmesi
Ultrasonik Ses Hızı Yöntemiyle Tahribatsız Kontrolü
Ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması

Özer Özdemir

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Melih Cemal KUŞHAN

Mayıs 2007

Özer Özdemir in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Otomotiv Sektöründe Kullanılan Küresel Grafitli Dökme Demir Üretimine Etki Eden Parametrelerin Teorik İncelenmesi, Ultrasonik Ses Hızı Yöntemiyle Tahribatsız Kontrolü ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN

Üye : Prof. Dr. Orhan Şerif KOMAÇ

Üye : Prof. Dr. Remzi GÜRLER

Üye : Yrd. Doç. Dr. Necmi GÖNEN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmada otomotiv sektöründe kullanılan küresel grafitli dökme demir parçaların üretimine etki eden parametreler teorik olarak incelenmiş, ultrasonik ses hızı yöntemiyle tahribatsız kontrolü yapılmıştır. Mekanik ve metalografik incelemeler yapılarak ultrasonik çalışmalarda elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda ultrasonik ölçümlerin iç yapıdaki ve grafit yapısındaki değişimlere karşı hassas olduğu ve dolayısıyla mekanik özelliklerin bir göstergesi olduğu anlaşılmıştır.

Grafit kürelerinin yapısı ve yapıyı oluşturan fazlar küresel grafitli dökme demirin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde yardımcı olabilmektedir. Ultrasonik Ses hızı ölçüm teknikleriyle grafitlerin küreselliği, mikroyapıdaki fazlar ve mekanik özellikler arasındaki ilişki ile matris yapısının değişimi sonucu ultrasonik hızdaki değişim ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Parçaların kalitesi ve proses kontrollerinin belirlenmesi ile küresel grafitli dökme demirin mekanik özelliklerinin ayırımı için bu yöntem tercih edilebilmektedir.

SUMMARY

In this study, some parameters of effected to the production of ductile iron parts used in automotive sector in examined theoretically. As also studied those parts are nondestructive evaluation with ultrasonic velocity method. In the same time made by some mechanical and metallographical searches then matched to those obtained data. As a result of this comparison that susceptible to changing of internal and graphite structure of ultrasound measurement and consequently as a indicator of mechanical features are understood.

Structure of graphite spheres and it's phases are my be associated with mechanical features of ductile iron. Spheroidal of graphites, phases of microstructures, related with mechanical changing in matrix structure to consequences changing ultrasonic velocity had to deal with detailed.

This method is may be preferred for quality control of automotive parts, determination of it's processing control and differentiation to mechanical Properties of spheroidal graphite cast iron.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında değerli vakitlerini ayırarak, sabırla bana yol gösteren ve yardımları ile çalışmalarımı yönlendiren Sayın Yrd. Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN' a ve yardımlarından dolayı Toprak Demirdöküm A.Ş. Üretim ve Kalite Bölümü çalışanlarına ve mesai arkadaşlarıma saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Özer ÖZDEMİR

Mayıs 2007

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR ÜRETİMİNİN TEORİK İNCELENMESİ	3
2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri	3
2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması	7
2.3. Küresel Grafitli Dökme Demirler Bileşimindeki Ana Elementler ve Etkileri	9
2.4. İndüksiyon Ocaklarında Ergitme	11
2.5. Küreleştirme İşlemi	13
2.5.1. Küreleştirme etkisinin zamanla azalması	14
2.6. Kapaklı Pota (Tundish Cover) Yöntemiyle Magnezyum İlavesi	15
2.7. Aşılama	17
3. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN OTOMOTİV SEKTÖRÜNDEKİ UYGULAMALARI	19
4. ULTRASONİK KONTROL	21
4.1. Temel Ekipmanlar	22
4.2. Ultrasonik Muayenenin Avantaj ve Dezavantajları	22
4.3. Uygulanabilirlik	23
4.4. Ultrasonik Muayene ile Ölçümler	24

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	26
5.1. Deneylede Kullanılan Malzemeler	26
5.1.1. Kalıp malzemeleri	26
5.1.2. Pik, çelik, hurda ve döndü malzemeleri	27
5.1.3. Küreleştirci malzemeler	28
5.1.4. Aşılaiıcı örtü malzemeleri	28
5.2. Deneylede Kullanılan Makine, Ölçü Aleti ve Cihazlar	28
5.3. Deneylede Yapılışı	35
5.3.1. Kum karışımının hazırlanması ve kalıplanması	35
5.3.2. Metal şarjın hazırlanması ve ergitilmesi	36
5.3.3. Küreleştirme işleminin yapılması ve dökümün gerçekleştirilmesi	37
5.3.4. Ultrasonik hız ölçümü	39
5.3.5. Mekanik ölçümler	39
5.3.5.1. Brinell sertlik değeri ölçümü	39
5.3.5.2. Çekme deneyi	40
6. DENEY SONUÇLARI	41
6.1. Döküm ve Analiz Sonuçları	41
6.2. Mekanik Test Sonuçları.....	42
6.3. Görüntü Analiz Sistemi ve Mikroyapı Sonuçları	45
6.4. Ultrasonik Hız Ölçüm Sonuçları	49
7. GENEL SONUÇLAR	50
KAYNAKLAR	52

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1	Martenzitik kgdd'in mikroyapısı	4
Şekil 2.2	Perlitik kgdd'in mikroyapısı	5
Şekil 2.3	Ferritik-Perlitik kgdd'in mikroyapısı	5
Şekil 2.4	Ferritik kgdd'in mikroyapısı	6
Şekil 2.5	Ostemperlenmiş kgdd'in mikroyapısı	6
Şekil 2.6	İndüksiyon ocağının şematik görünümü	12
Şekil 2.7	Magnezyumun küreleşmeye etkisi	13
Şekil 2.8	Magnezyum etkisinin işlem süresi ile değişimi	15
Şekil 2.9	Kapaklı pota yönteminin şematik gösterimi	16
Şekil 2.10	Magnezyum ve aşılamanın mikroyapıdaki değişimi	18
Şekil 4.1	Şematik olarak ultrasonik kontrol yöntemi	22
Şekil 5.1	Kalıplama hattı ve kum hazırlama üniteleri	28
Şekil 5.2	Ocaklar ve potalar	29
Şekil 5.3	Çekme cihazı	30
Şekil 5.4	Sertlik cihazı	31
Şekil 5.5	Spektrometre cihazı	32
Şekil 5.6	Optik mikroskop, kesme, zımparalama ve parlatma cihazları	33
Şekil 5.7	Ultrasonik kontrol cihazı ve echometre	34
Şekil 5.8	Kalıplama hattı bölgeleri	36
Şekil 5.9	Magnezyum reaksiyonu	37
Şekil 5.10	Döküm işlemi	38
Şekil 6.1	Kgdd'de küreleşme-çekme mukavemeti ilişkisi	43
Şekil 6.2	Kgdd'de ultrasonik hız ile akma ve çekme day. arasındaki ilişki ..	44
Şekil 6.3	İndüksiyon ocağından ve potadan alınan numune mikroyapıları ..	46
Şekil 6.4	İri ve saçılmış grafit mikroyapıları	48
Şekil 6.5	Altı derecede mikroyapının değişimi.....	48
Şekil 6.6	Ultrasonik hızın küreleşme ile olan değişimi	49

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Kgdd'in mekanik özellikleri	3
Çizelge 2.2 TS 526/1977 kgdd'in sınıflandırılması	7
Çizelge 2.3 Alman standardı (DIN 1693)	8
Çizelge 2.4 Uluslararası ISO R 1083 standardı	8
Çizelge 2.5 ASTM A 536-70 standardı	9
Çizelge 2.6 Bazı aşılama alaşımlarının kimyasal bileşimleri	17
Çizelge 3.1 Bir otomobilde toplam ağırlığın son on yıldaki değişimi	19
Çizelge 3.2 Otomotiv sanayinde kullanılan malzemelerin son 10 yıl değişimi .	20
Çizelge 5.1 Deneylerde kullanılan silis kumunun elek analiz sonuçları	27
Çizelge 5.2 Deneylerde kullanılan pik, çelik ve döndü kimyasal analiz değerleri	27
Çizelge 6.1 Ocak şarjı ve aşılama miktarları	41
Çizelge 6.2 Şarj malzemelerinin kompozisyonları	42
Çizelge 6.3 Döküm analizleri	42
Çizelge 6.4 Mekanik test sonuçları	43
Çizelge 6.5 Grafit parametreleri ve küreleşme ile ilgili sonuçlar	45
Çizelge 6.6 Görüntü analiz sistemi sonuçları	47
Çizelge 6.7 Ultrasonik hız ölçüm sonuçları	49

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
T	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
t	Zaman (dk)
G	Serbest enerji (kcal/mol)
H	Entalpi (kcal/mol)
S	Entropi (kcal/mol.K)
γ	Küresel yüzeylerde her birim alan için serbest enerji değişimi
g	Yerçekimi ivmesi
c	Ultrasonik hız
d	Numune kalınlığı
FeSiMg	Ferro Silis Magnezyum

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AFS	American Foundry Society
ADI	Austempered Ductile Iron
ASTM	American Society for Testing and Materials Standarts
DDK	Dökme Demir Küresel
DIN	Deutche Industry Norman
GG	Gri Dökme Demir
GGG	Küresel Grafitli Dökme Demir
GF	George Fischer
HB	Hardness Brinell
INCO	International Nickel Company
KGDD	Küresel Grafitli Dökme Demir
KE	Karbon Eşdeğeri
OKGDD	Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
Psi	Basınç, gerilme (lb/in ²)
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
MPa	Megapascal
Hz	Hertz
cm	Santimetre
dk	Dakika
kg	Kilogram
µm	Mikro Metre
vb.	Ve benzeri

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Küresel grafitli dökme demir ilk defa 1948 yılında Amerikan Foundry Society'nin metal dünyasına üstün özelliklerde yeni bir demir esaslı döküm malzemesi olarak tanıtılmasıyla duyurulmuştur. 2. Dünya savaşı ABD'nin katılımıyla kritik bazı metallerin ikmalinde problemlerin doğması, krom elementinin etkisine sahip aşınmaya dayanıklı beyaz dökme demirin krom yerine kullanılabilecek diğer bir elementle üretiminin gerçekleştirilebilmesi büyük bir rekabet yaratmıştı.

International Nickel Company karbür yapıcı etkisi olan elementler üzerine çalışmalarına başlamış ve tüm akla gelen elementlerin etkileri araştırılmıştı. Nisan 1943'de %3,2 C, %1,75 Si ve %1 Ni içeren GG20 dökme demir ile %3,5 C, %2,25 Si, %2 Ni GG14 dökme demiri 80-20 Ni-Mg alaşımı kalıcı Mg miktarı %0,15 - %0,3 - %0,4 - %0,5 olacak şekilde verilmişti. Bu işlemten sonra potada %0,5 FeSi 85-15 alaşımı ile aşılama yapılarak deney çubukları dökülmüştü. Çekme dayanımı deney sonuçları gri dökme demirin özelliklerinin daha yüksek değerlere ulaştığını göstermekle kalmayıp yeni bir malzemenin üretilmiş olduğunu ortaya koydu (ASM Handbook 9th Edition, 1993).

Yapılan mikroskobik çalışmalar grafitin lamel şeklinde olmayıp küresel bir yapıda olduğunu ortaya koydu. Böylece yüksek karbon değerine sahip dokusunda küresel grafitlerin olduğu, mekanik özellikler yönünden çelik dökümüne özdeş, üretim yöntemi yönünden dökme demir karakteri taşıyan yeni bir malzeme endüstriye kazandırılmış oldu. Düşük ergime derecesi, iyi akışkanlık, dökülebilme, iyi işlenebilme özelliği, iyi kesme mukavemeti gibi gri dökme demirin özellikleri ile yüksek mukavemet, tokluk, süneklik, sıcak işlenebilme ve sertleştirme gibi çeliğin üstün özelliklerini bir arada bulunduran yeni bir grup ortaya çıkmış oldu.

Ülkemizde profesyonel anlamda özel sektör tarafından büyük döküm fabrikaları 70'li yıllarda kurulmaya başlamıştır. Öncelikle yaş kum kalıba döküm teknolojisinin öğrenilmesi, tamamiyle özgün ürün üreten yani döküm bilgisini kendileri oluşturan döküm fabrikalarının sayısı zamanla artış göstermiştir. 90'lı yıllardaki ekonomik krizler

döküm sektörünün dışarıya açılma yılları olmuş, bu da beraberinde yeni üretim teknolojilerinin yanında yeni kontrol teknolojilerine duyulan ihtiyaçları da beraberinde getirmiştir.

21. yüzyıla girildiğinde sınırların kalkması, dünya ticaretinin globalleşmesi, döküm sektörünü ileri teknoloji kontrol tekniklerini kullanarak yeni ürünlerin hızlı bir şekilde ve bir defada seri üretime sokmaya mecbur kılmıştır. Özellikle 2000'li yıllarda otomotiv sektöründe kıran kırana bir rekabet başlamıştır. Firmalar çelikten imal ettikleri parçaları küresel grafitli dökme demirden üretmek için çalışmalar yapmaya başlamışlardır. Döküm parçaların ağırlıklarını azaltma çalışmaları hızlanmıştır. Daha hafif, dolayısıyla daha az yakıt kullanan araçlar üretmek temel amaç olmuştur. Bu sebeple otomotiv, iş makineleri ve traktör endüstrilerinde çok hızlı bir şekilde daha ince et payına sahip döküm parça ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Çeliğin yaptığı işi yapabilen döküm parça tasarımları yapılmıştır. Ürünlerin devreye girme süreleri kısalmıştır.

Dünyanın önde gelen otomotiv üreticilerinden Daimler Chrysler, General Motor ve Ford Motor Company'nin 2000 yılında otomotiv yan sanayi üreticileri için bir zorunluluk haline gelen QS 9000 standardını kurlmaları ve 2002 yılında diğer otomotiv devlerinin de işin içine girmesiyle ISO 16949 standardını kurlmaları ürün kalitesi odaklı bir sistemin çalışmaya başlamasını sağlamıştır.

Tüm bunlar beraberinde; döküm parçalara uygulanan test sayısının artmasını getirecektir. Eskiden yalnızca sertlik ölçülen, mikroyapısı incelenen, döküm çekme çubuğundan çekme testleri yapılan parçalardan, eğer küresel grafitli dökme demir ise her partiden ultrasonik kontrol sonuçları istenmeye başlanmıştır. Ultrasonik muayene, laboratuvarlarda devamlı malzeme özelliklerinin tesbitinde ve içyapı hatalarının bulunmasında kullanılan bir yöntem olmaya başlamıştır. Bu amaçla otomotiv sektöründe kullanılan küresel grafitli dökme demir üretimine etki eden parametrelerin teorik incelemesi yapılmıştır. Ultrasonik ses hızı yöntemiyle tahribatsız kontrolleri gerçekleştirilen parçaların mekanik özellikler üzerine olan etkileri araştırılmıştır (Brown J.R., 2000).

2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN TEORİK İNCELENMESİ

2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri

Küresel grafitli dökme demirler genellikle döküm halleri ile kullanılırlar ve bunlar çoğunlukla perlitik-ferritik yapıdadırlar. Ferritik matris şarj malzemesi olarak pik dökme demir kullanıldığında döküm şartlarında elde edilir ancak genelde ferritik matris ısıtma işlemi ile üretilmektedir. Isıtma işlemleriyle yüksek mukavemetli matrisler elde edileceği gibi, sünekliğin ve dayanımının artırılmasında mümkündür.

Küresel grafitli dökme demirin işlenebilirliği, eşdeğer sertlikteki gri dökme demirden ve eşdeğer mukavemete sahip çelikten daha iyidir. Ayrıca korozif ortamlarda aşınma direnci gri dökme demire eş ve genellikle çelikten daha iyidir. Küresel grafitli dökme demir'de kesit boyutu, katılaşmada soğuma hızını etkilemesi sonucu bileşimde bağlı olarak, ferrit ve perlitin sertliği ve yapıdaki perlitin oranı ve tane büyüklüğü değişmektedir. Yüksek mukavemet, sertlik ve düşük süneklik ince perlitik veya beynitik matris ile elde edilir. Buna karşılık mukavemet ve sertlikteki azalma ile beraber yüksek süneklik, matrisin tamamen ferritik olması ile mümkündür. Çizelge 2.1. de ferritik ve perlitik mikroyapıya sahip küresel grafitli dökme demirlerin genel mekanik özellikleri verilmiştir.

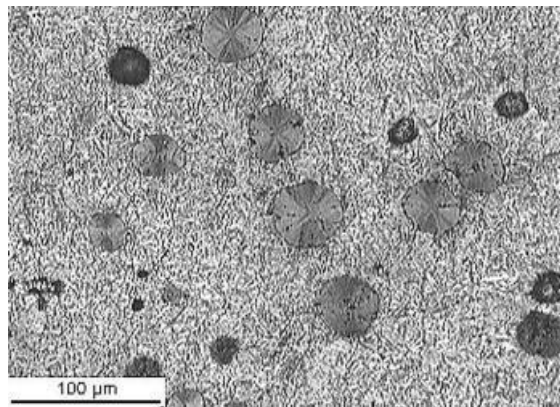
Çizelge 2.1. Küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri (Forrest R.D 2005)

Mikroyapı	Ferritik	Perlitik
Çekme Mukavemeti (Mpa)	370-550	650-750
Akma Mukavemeti (Mpa)	221-350	360-410
Sertlik (BSD)	120-170	240-255
Kopma Uzaması (%)	12-30	1-8

Ani sıcaklık değişimlerine karşı küresel grafitli dökme demirlerin gösterdiği direnç gri dökme demirden ve çoğu çelikten daha fazladır. Örneğin 760 °C den soğuk suya daldırılan ince bir çelik parça muhtemelen çarpılacak, gri dökme demir ise çatlayacaktır. Aynı şartlarda küresel grafitli dökme demir parçasının bu sıcaklık değişimine rağmen, şekli bozulmadan karşılayabildiği bilinmektedir. Çeliklerde olduğu gibi küresel grafitli dökme demirlerin darbe direnci de sıcaklığa bağlı olup, yapı ve bileşim tarafından önemli derecede etkilenmektedir. Matris yapısı tamamen ferritik olan küresel grafitli dökme demirler en yüksek tokluğa sahip olanlardır. Tokluk derecesi, matriste artan perlit yüzdesi ile azalmaktadır (Gilbert G.N.J. 2003).

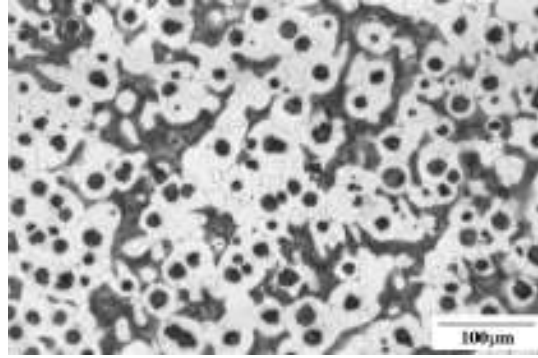
Ostenitik dökme demirler hariç küresel grafitli dökme demirler 5 grupta toplanırlar.

1.Grup Çok yüksek mukavemetli küresel grafitli dökme demirlerdir. Matris beynitik veya temperlenmiş martenzittir. Alaşım elementi ilavesi ile veya ısıl işleme üretilirler. Minimum akma mukavemetleri 64 kg/mm² dir. Şekil 2.1. de mikroyapısı görölmektedir.



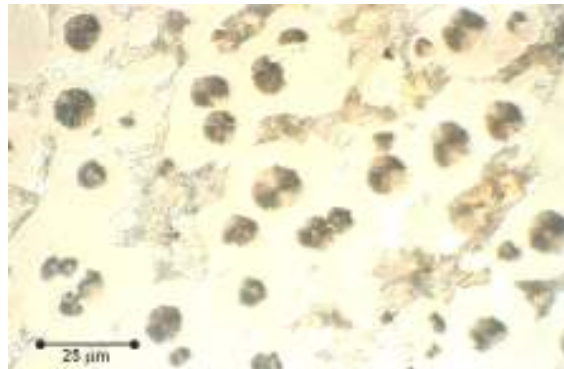
Şekil 2.1. Martenzitik küresel grafitli dökme demir mikroyapısı. Temperleme ısıl işleme görmüş ve % 3 Nital çözeltisi ile dağlanmıştıır (x100) (BCIRA, 2006)

2.Grup Yüksek mukavemetli küresel grafitli dökme demirlerdir. Matris yapısı perlittir. Alaşım elementi ilavesi ile üretilirler. Minimum akma mukavemetleri 50 kg/mm^2 dir. Şekil 2.2. de mikroyapısı görülmektedir.



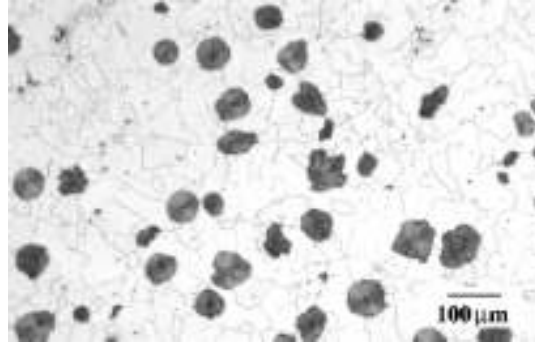
Şekil 2.2. Perlitik küresel grafitli dökme demir mikroyapısı. Döküm hali ile kullanılmaktadır. % 3 Nital çözeltilisi ile dağlanmıştır (x100) (Tdd, 2006)

3.Grup Hakim yapısı perlit olan ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demirlerdir. Genelde döküm halinde kullanılırlar. Minimum akma mukavemeti 42 kg/mm^2 dir. Şekil 2.3. de mikroyapısı görülmektedir.



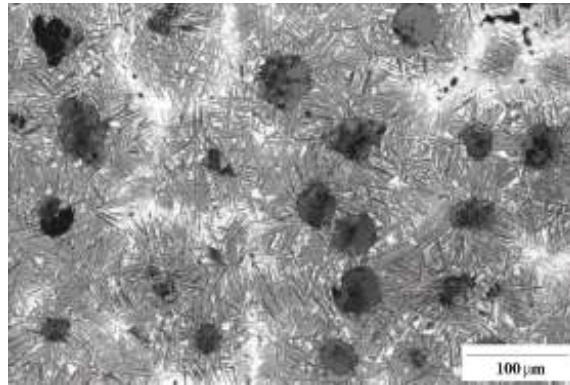
Şekil 2.3. Ferritik-Perlitik küresel grafitli dökme demir mikroyapısı. % 3 Nital çözeltilisi ile dağlanmıştır (x25) (Skaland T., 2005)

4.Grup Yumuşak küresel grafitli dökme demirlerdir. Matris tamamen ferrittir Tavlama ısıl işlemi ile üretilirler. Minimum akma mukavemetleri 25 kg/mm^2 dir ve min uzama % 15 dir. Şekil 2.4 de mikroyapısı görülmektedir.



Şekil 2.4. Ferritik küresel grafitli dökme demir mikroyapısı. % 3 Nital çözeltisi ile dağlanmış (x100) (Tdd, 2006)

5.Grup Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerdir. Ostemperleme ısıl işlemi ile üretilirler. 150 kg/mm^2 çekme mukavemeti, 100 kg/mm^2 akma mukavemeti, % 7 min uzama gösterirler. Şekil 2.5 de mikroyapısı görülmektedir.



Şekil 2.5. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir mikroyapısı. % 3 Nital çözeltisi ile dağlanmış (x100) (Tdd, 2006)

2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Küresel grafitli dökme demirlerin Türk Standartları Enstitüsüne (TSE) göre sınıflandırılması, Çizelge 2.2 'de verilmektedir. DDK işareti "Dökme Demir Küresel Grafitli" anlamına gelmektedir ve DDK işaretini izleyen sayılar minimum çekme mukavemetini göstermektedir.

Çizelge 2.2. TS 526/1977'e göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması (TMMOB Metalurji Müh. Odası, KOSGEB., 2006).

Sınıf	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (BSD)	Mikroyapı
DDK 40	400	280	12	140-201	daha çok ferrit
DDK 50	500	350	7	170-241	ferrit-perlit
DDK 60	600	400	3	192-269	perlit-ferrit
DDK 70	700	450	2	229-302	daha çok perlit
DDK 80	800	500	2	248-352	perlitik
DDK 35,3	350	220	22	---	ferritik
DDK 40,3	400	240	18	---	ferritik

Alman DIN standardında küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması TSE sınıflandırılmasına benzemekte ancak, işareti GGG olarak, Çizelge 2.3'de verilmektedir.

Çizelge 2.3. Alman standartları (DIN 1693) (TMMOB Metalurji Müh. Odası, KOSGEB., 2006)

Sınıf	Çekme Muk (MPa)	Akma Muk (MPa)	% Uzama
GGG-40	400	250	15
GGG-50	500	320	7
GGG-60	600	380	3
GGG-70	700	440	4
GGG-80	800	500	2

Uluslararası ISO R 1083 standardında ise minimum çekme mukavemeti ve minimum % uzamayı gösteren rakamlar sınıflandırma işareti olarak kullanılmaktadır, Çizelge 2.4’de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Uluslararası ISO R 1083 standardı (TMMOB Metalurji Müh. Odası, KOSGEB., 2006)

Sınıf	Çekme Muk. (MPa)	Akma Muk. (MPa)	Uzama (%)
70-2	700	450	2
60-2	600	400	2
50-7	500	350	7
42-12	420	280	12
38-17	380	240	17

ASTM, A-536-70 standardında ise minimum çekme mukavemeti, minimum akma gerilmesi, MPa olarak ve minimum % uzamayı gösteren rakamlar sınıflandırma işareti olarak kullanılır. Çizelge 2.5’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.5. ASTM, A 536-70 standardı (TMMOB Metalurji Müh. Odası, KOSGEB., 2006)

Sınıf	Çekme Muk. (MPa)	Akma Muk. (MPa)	Uzama (%)
60-40-18	600	400	18
65-45-12	650	450	12
80-55-06	800	550	6
100-70-03	1000	700	3
120-90-02	1200	900	2

2.3. Küresel Grafitli Dökme Demir Bileşimindeki Ana Elementler ve Etkileri

Küresel grafitli dökme demir'in doku ve özelliklerine periyodik sistemin bütün elementlerinin etkili olduğu söylenebilir. Pb, Bi, Sb, As, P, S gibi elementler zararlı etkilerinden dolayı bünyesinde bulunması istenmez. İyi mekanik özellikler kazandırabilmek için değişik alaşım elementleri ilave edilir. Bu alaşım elementlerinden bazıları tek başına bazıları ise başka elementlerle alaşımlandırılmış olarak sıvı dökme demire ilave edilir. Bu elementlerden en önemlileri; Ni, Mo, Cr, Mn, V, Cu olarak sıralanabilir. Bu elementler, karbürlerin dağılımı ve yüzdesini, grafit şeklini ve matris yapı özelliklerini etkilerler (Skaland T., 2004).

Bu sayılan özellikler diğer taraftan soğuma hızına, parça et kalınlığına da bağlıdır. Tüm üretim aşamalarında, yani ham malzeme seçiminden, parçanın dereceden bozulması ve dışarı alınmasına kadar bu özellikler değişime uğrayacaktır.

Karbon: Grafit küreleri sayısı karbon yüzdesine doğrudan bağlıdır. Karbon oranındaki artış ayrıca akışkanlık ve besleme özelliklerini de iyileştirerek dökülebilirlik kabiliyetini artırır. Karbon eşdeğerinin 4,3'den büyük değerleri grafit kürelerinin oluşumu ve büyümesini teşvik eder.

Silisyum: Silisyum miktarı karbon eşdeğerini etkilediği için grafitleşme ve karbon segregasyonu üzerinde önemli rol oynar. Silisyum, karbon aktivitesini yükseltmekte ve grafitin ayrışmasını kuvvetlendirmektedir. Silisyum, ötektoid dönüşümde oluşan ferritin oranını ve sertliğini arttırarak dökme demir mukavemetinde bir artış meydana getirmektedir. Silisyum daha çok ferrosilisyum olarak, işlem sonunda sıvı metale ilave edildiğinde grafit küreleri için çekirdekleştirici görevi görür ve grafit sayısının kontrolü açısından etkili olur (Brown J.R., 2000).

Bakır: Bakırın sıvı dökme demirdeki çözünürlüğü yaklaşık %3,5 dur. Bakırın çözünürlüğü magnezyum miktarı ile düşer. % 3 bakır değerine kadar grafit şekline hiçbir olumsuz etkisi yoktur. Bakırın varlığı, titanyum ve kalay gibi lamel grafit formu oluşturan ve mekanik özellikleri negatif yönde etkileyen elementlere karşı dökme demiri daha hassas duruma getirir. Bakır grafitleştirici bir elementtir. Bakır miktarı yükselirken yapıdaki perlit miktarı artar. Yapı tamamen perlitik olduğunda, bakır ilavesi ile mekanik özelliklerin artış oranı azalacaktır. Yüksek bakır miktarında yapı kırılma eğilimine girer, akma değeri artar ve çekme ile sertlik değeri düşer.

Kalay: Perlit oluşumunu hızlandırır, fakat sementit oluşumuna etki etmez. Ferritik küresel grafitli dökme demirlerde bulunmaması gerekir. Küresel grafitli dökme demirlerde perlitin miktarı mangan, bakır ve kalay konsantrasyonunun artışıyla artmaktadır. Sertlik, çekme dayanımı ve akma sınırı kalay miktarı ile artmaktadır. Uzama değeri bakır ve kalay miktarı ile azalmaktadır.

Magnezyum: Grafitin küresel formda olması için gerekli magnezyum miktarı %0,02'den fazla olabilir. Sıvı dökme demirdeki kükürt ve oksijeni gidermek için kullanılır. İhtiyaç duyulanın üzerinde magnezyum miktarı grafit şeklini bozucu ve küre sayısını azaltıcı etkiye sahiptir (BCIRA Broadsheet, 2006).

Nikel: Küresel grafitli dökme demirlerde dayanımı artırır. Malzemenin sertleşme özelliğini arttıracığından ısıtılacak dökümlerde ilave edilir. Bu tür alaşımlar Ni-Resist malzemelerin temelini oluştururlar.

Krom: En kuvvetli karbür dengeleyici elementlerden birisidir. Ferritik küresel grafitli dökme demir üretiminde %0,03'ün altında olmalıdır. Perlitik türlerin üretiminde ise diğer karbür dengeleyici elementlerin oranına bağlı olarak yaklaşık % 0,06'ya kadar bulunabilir.

Fosfor: Küresel grafitli dökme demirde fosfor “steadit” olarak bilinen çok kırılğan bileşiğin oluşumuna neden olur. Tokluğu, süneklığı, kaynak edilebilirliği ve plastik şekil değiştirmeyi kötü yönde etkiler. Çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve sertlik fosforun artmasıyla artış gözlenirken uzama değerinde düşüş gözlenir.

Kükürt: Kükürt miktarının artması küreleştirici amaçlı ilave edilen FeSiMg miktarını artırıcı etki yapar. Mn/S oranı ferritleşme eğilimini etkiler ve MnS grafit oluşumunda çekirdek görevi görür.

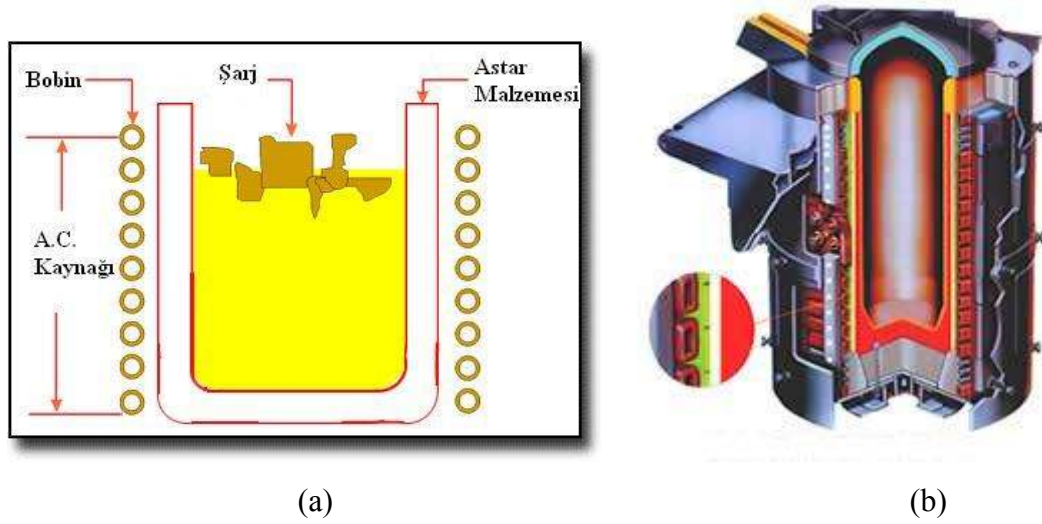
Mangan: Kuvvetli bir perlit oluşturan alaşım elementidir. Mangan, kükürtün kötü etkisini dengeleyebilmek için kullanılır. Eğer yapıda mangan bulunmaz ise tane sınırında istenmeyen demir-sülfür ötektiği oluşur ve bu ötektik yaklaşık 985 °C de ergir. Kükürt miktarı mangan ile dengelenirse mangan sülfür tane içerisinde dağılmış halde bulunur. Mangan segregasyonu soğuma hızı ne kadar yavaş ise o kadar çok olur.

2.4. İndüksiyon Ocaklarında Ergitme

Küresel grafitli dökme demir üretiminde kullanılan ergitme yöntemi ile kullanılan küreleştirici alaşımların cins ve miktarı arasındaki ilişki, dökümün kalitesi ve mekanik özellikleri açısından önem taşımaktadır. Dökme demir bileşiminin, şarjın ve ergitme yönteminin kontrolü, sağlam döküm oranında artış ve küreleştirici ilave oranında azalma sağlar. Şekil 2.6 da indüksiyon ocağının şematik ve kesit görüntüleri görülmektedir.

Küresel grafitli dökme demir üretiminin büyük kısmı indüksiyon ocaklarında üretilmektedir. Bunun nedeni, iyi çalışma koşulları, ekonomik üretim, hedeflenen analiz değerlerinden çok az sapma değerleriyle sağlanmasıdır. Küresel grafitli dökme demir

üretiminde genellikle asidik indüksiyon ocaklarında ergitme yapılır. Sıvı metaldeki karbon ve silisyum miktarı, çalışma sıcaklığı ocak astar ömrünü en fazla etkileyen parametrelerdir (Brown J.R., 2000).



Şekil 2.6. (a) İndüksiyon ocağının şematik görüntüsü.
(b) Kanallı indüksiyon ocağı ve kesit görüntüsü.
(Brown J.R., 2000)

Küresel grafitli dökme demir üretiminde orta frekanslı indüksiyon ocakları en fazla tercih edilen ocaklardır. Bu ocaklarda soğuk şarjla başlama, sık analiz değişimlerine izin verme, çevreyi daha az kirletme ve daha az işletme problemleri vardır. Küresel grafitli dökme demir seri üretiminde optimum kalite ve ekonomi, indüksiyon ocağı ile bekletme ocağı dubleks çalışmasıyla elde edilmektedir.

İndüksiyon ocaklarında, ocak hacmi ile saatlik ergitme gücü arasında aşağıdaki ilişki bulunmaktadır (Brown J.R., 2000).

$$G_{\min} = 2,5 \times D_{\max}$$

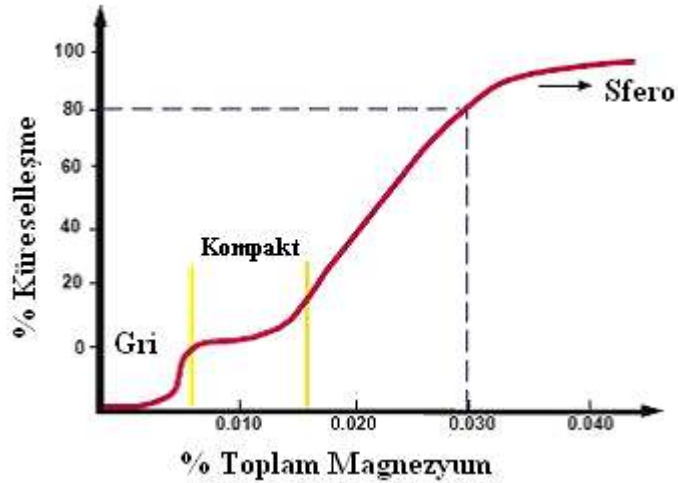
G_{\min} : Asgari ocak hacmi (ton)

D_{\max} : Azami ergitme gücü (ton / saat)

2.5. Küreleştirme İşlemi

Magnezyum, genellikle bir miktar Ca, Ce ve bazı diğer nadir toprak metalleriyle birlikte küreleştirme için en ideal ve ekonomik malzemedir. Küre şekilli grafitleri oluşturmak için gerekli olan magnezyum miktarı, dökme demirin ana bileşimindeki kükürt ve oksijen miktarlarına büyük ölçüde bağlıdır.

Magnezyumla işlem (treatment) sırasında, dökme demir sıcaklığı 1538-1560 °C civarında olup magnezyumun buharlaşma sıcaklığının oldukça üzerindedir. Dolayısıyla sıvı metal ile temas eden magnezyum aniden buharlaşır ve uygun şekilde yapılmadığı takdirde reaksiyon çok şiddetli olabilir. Magnezyum'un verimi, hava ile temas etmeden önce, magnezyum buharının içinden geçerek yükseldiği sıvı metal derinliğine bağlıdır. Dolayısıyla sıvı metalin magnezyum buharı ile yıkanan derinlik magnezyum verimi açısından önemli olmaktadır. Reaksiyon şiddetini azaltmak ve optimum metalurjik şartları sağlamak için, genellikle magnezyum başka elementlerle alaşımlandırılır. Şekil 2.7 de magnezyumun küreselleşmeye etkisi görülmektedir.



Şekil 2.7. Magnezyumun küreselleşmeye etkisi (Ecob. C.M. ve Hartung. C., 2004).

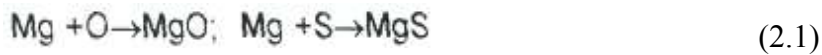
Sıvı metale ilave edilecek magnezyum miktarı ile ilgili bir çok formül geliştirilmiştir. Bunlar arasında en basit ve kullanımı en kolay olanı aşağıda verilmiştir.

$$\% \text{ Mg (ilave edilen)} = \frac{\text{İstenen Mg (\%)}}{\text{Mg verimi (\%)} * 0.01} + \text{Bileşimdeki S (\%)}$$

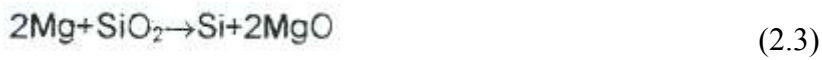
Bu bağıntıda şartlara bağlı oran, magnezyum verimine ait olmaktadır. Bu oran % 10 ile % 90 arasında değişebileceğinden her uygulayıcı kendi şartları ve önceki tecrübelerinin sonuçlarına göre bu oranı saptamak durumundadır. Aşırı magnezyum kullanımının ekonomik sakıncası yanında, çekinti boşluğu oluşumunu arttırmaktadır. Dolayısıyla bileşimde istenen kalıcı magnezyum oranı % 0,040 ile % 0,050 aralığında kontrol edilmelidir ki bu da bilinen küreleştirme yöntemleri ile mümkündür (Olsen S.O. ve Hartung C., 2003).

2.5.1. Küreleştirme etkisinin zamanla azalması

Küreleştirme etkisinin zamanla azalması ile ilgili yapılan çalışmalarda birçok faktörün geçerli olduğu ortaya konmuştur. Bu mekanizmanın açıklanmasında ilk sırayı oksidasyon ile magnezyum'un yanması teşkil etmektedir. Oluşan reaksiyonlar:



ve oksijen bir oksitten alınıyorsa, örneğin SiO_2 , bu durumda:



reaksiyonları geçerlidir (Sintercast, 2006).

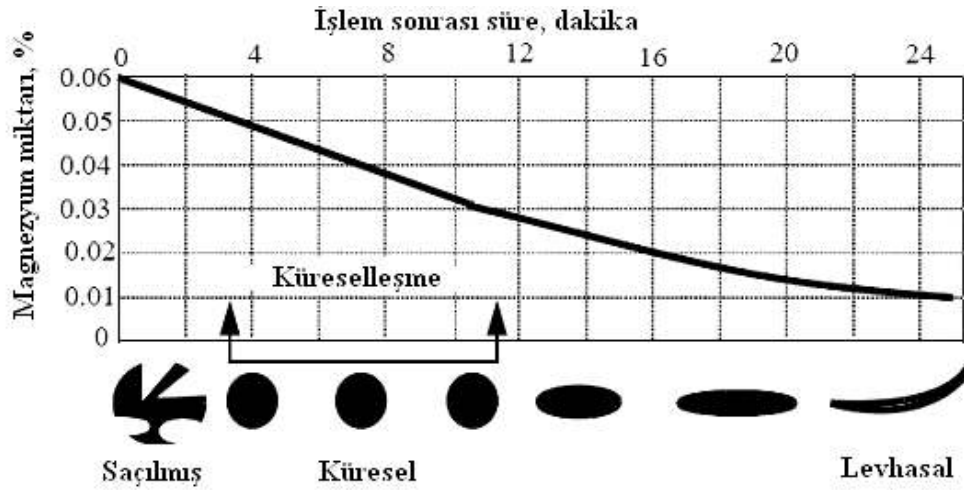
Küreselleştirme etkisinin azalması şu faktörlere bağlıdır;

- 1-) Ön magnezyum miktarı ne kadar fazla ise etki kaybı o kadar hızlıdır.
- 2-) Sıcaklığın artmasıyla birlikte etki kaybı artmaktadır.

3-) Curuf miktarı etki kaybını arttırmakta olup curufun hemen ve çok temiz olarak alınması gerekir.

4-) Ocak astar malzemesi etkisi; Silika astar malzemesi ile çalışmada, etki kaybı bazik astara göre daha fazladır.

Etki kaybının artması kendisini hücre sayısının azalması ve grafit şeklinin bozulması ile gösterir. Şekil 2.8 de magnezyum etkisinin işlem süresi ile değişim görülmektedir (Sintercast, 2006).



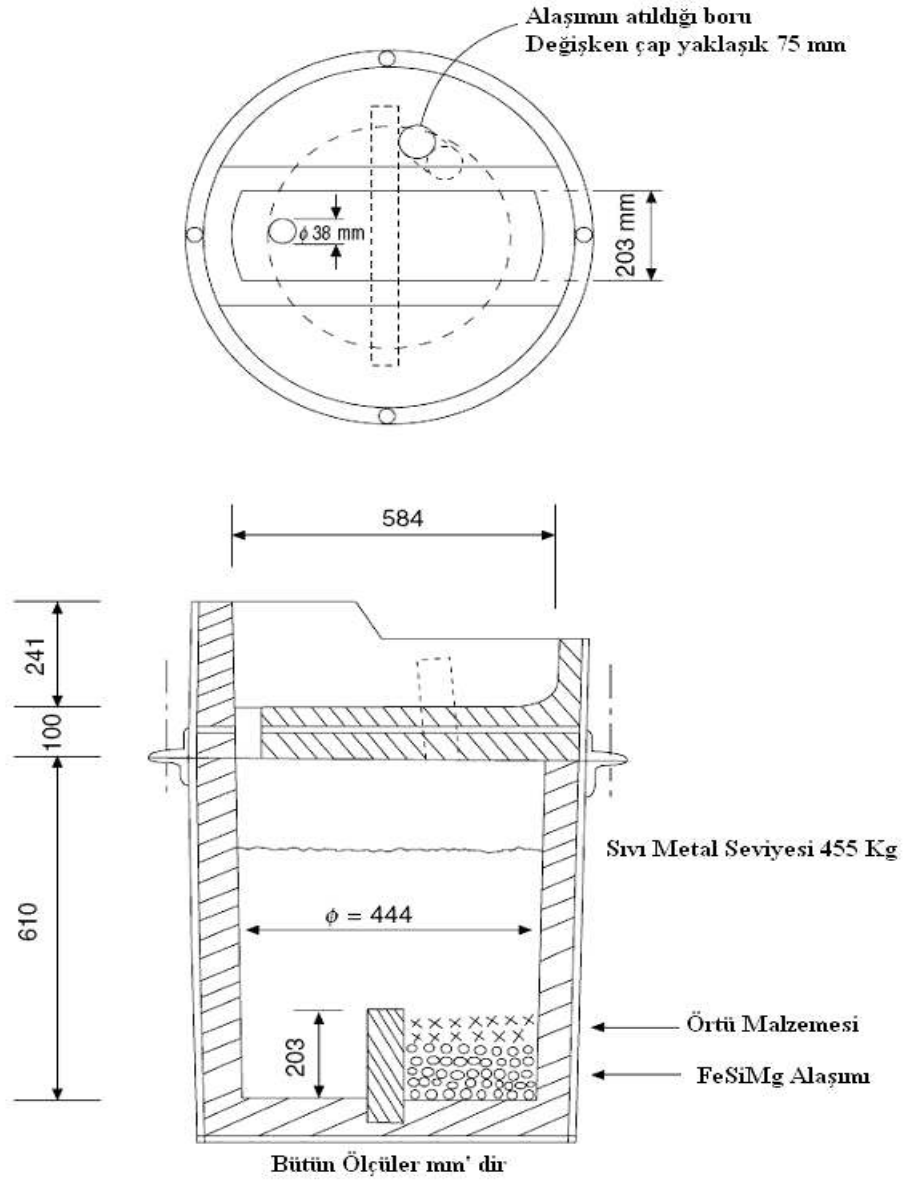
Şekil 2.8. Magnezyum etkisinin işlem süresi ile değişimi (Huerta. E. ve Popovsky. V., 2005).

2.6. Kapaklı Pota (Tundish Cover) Yöntemiyle Magnezyum İlavesi

Küreleştirici malzemelerin, sıvı demire ilavesi küresel grafitli dökme demir üretiminin en önemli adımlarından biridir. İstenilen kalitedeki dökümün mümkün olan en düşük maliyette üretimi hedeflenir. Katkı malzemelerinin verimi bazı etkenlere bağlıdır. Bu etkenler şunlardır; metal sıcaklığı, küreselleştirici malzemenin tip ve büyüklüğü, işlem görece malzemenin miktarı, sıvı metalin akım hızı ve ilave tekniğidir (Skaland T., 2004).

Kapaklı pota yöntemi pratik ve yaygın olarak kullanımı olan bir yöntemdir. MgO dumanının oluşmasını önlemek ve diğer tarafından magnezyum verimini arttırmak

için QIT Ferret TITANE firması tarafından geliştirilmiştir. Genellikle sıvı metal ocaktan alınıp bir diğer işlem istasyonunda küreselleştirme işlemi gerçekleştirildikten sonra döküm yapılır. Şekil 2.9 da kapaklı pota yönteminin şematik gösterimi bulunmaktadır (Brown J.R., 2000).



Şekil 2.9. Kapaklı pota yönteminin şematik gösterilişi (Brown J.R., 2000).

2.7. Aşılama

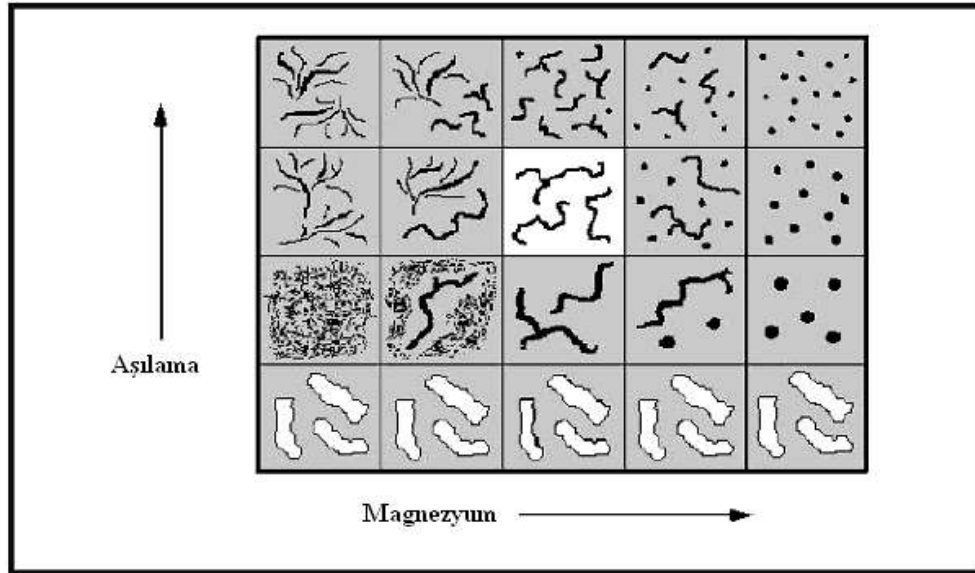
Aşılama sıvı metale, grafit yapısı ve gelişimini sağlamak, karbür oluşumunu azaltarak mekanik özellikleri arttırmak, ötektik yapıyı çoğaltmak, çekirdekleşmeyi sağlayarak grafitin kristalizasyonu ve büyümesini sağlamak, döküm parça kısımları arasında uyum sağlamak için ilave edilmektedir. Dökme demirlerde aşılamanın etkisi ile çekirdek merkezi sayısı artırılarak karbon atomlarının daha kısa mesafeye ulaşması için yeterli zaman bulma şansı çoğalacağından, ince taneli küçük grafit parçaları oluşur, böylelikle de dökme demirde kesit hassasiyeti azaltılarak grafitin oluşumu kontrol edilmektedir. Küresel grafitli dökme demirde en verimli aşılama ajanları ferro-silisyum alaşımlardır. Bu alaşımlar çeşitli sınıflar halinde üretilirler. En çok bilinenleri % 50 - % 80 silisyum içerenlerdir. Bazı aşılama alaşımlarının kimyasal içerikleri Çizelge 2.6 da verilmiştir (Skaland T., 2001).

Çizelge 2.6. Bazı aşılama alaşımlarının kimyasal bileşimleri (Skaland T., 2001).

No	Si	Ca	Al	Ba	Mn	Mg	NaNO ₃	Fe
1	75	1,5	1,0	-	-	-	-	kalan
2	63	2,0	1,0	5,0	10,0	-	-	kalan
3	63	1,0	0,75	10,0	-	-	-	kalan
4	50	0,75	1,0	-	-	1,25	-	kalan
5	61	0,50	-	-	-	2,5	10,0	kalan

Aşılama sıvısının hangi oranda ilave edileceği ise çok sayıda değişkene bağlıdır. Değişkenlerin başlıcaları: Sıvı metal bileşimi, döküm sıcaklığı, dökülen parça kalınlığı, kalıp malzemesi, ergitme ortamı ve döküm süresidir. Dolayısıyla çok sayıda değişken sabit bir aşılama oranının tespitini imkansızlaştırmaktadır. Küresel grafitli dökme demirle yapılan deneyler % 75 veya % 85'lik ferrosilisyum'un % 0,5-1,0 (döküm parça kesit kalınlığına göre) oranlarında ilavesinin en iyi sonuçları verdiğini göstermektedir. % 75 ferrosilisyum aşılama ajanlarının miktarlarının artırılması küresel grafit miktarını artırır. Aşılama ajanları kesit kalınlığı arttıkça zaman daha etkili olmaktadır.

Aşılama için değişik yöntemler uygulanabilir, bunların başlıcaları: potada aşılama, oluk aşılması ve kalıp aşılmasıdır. Aşılamanın yapılacağı zamanın kaba bir yaklaşımla tayini şöyle yapılabilir; aşılama ilavesi potanın dibinde 10-15 cm sıvı metal varken yapılır ve böylece hızlı ergitme ve sıvı metalle tamamen karışma gerçekleştirilir. Çoğu dökümhanede aşılama maddesi Mg ile beraber ilave edilir. Şekil 2.10 da magnezyum ve aşılamanın mikroyapıda yaptığı değişim gösterilmektedir (Campbell. J., 2003).



Şekil 2.10. Magnezyum ve aşılamanın mikroyapıda yaptığı değişim (BCIRA, 2006).

Aşılama maddesinin boyutu hızlı ergiyecek kadar küçük ve hemen okside olmayacak ve aniden patlama yapmayacak kadar büyük olmalıdır. Bir genelleme olarak iyi bir sonuç almak için mümkün olduğu kadar geç aşılama gerekir, aşılama sonrası geçen zamanla aşılamanın etkisi kaybolduğu gibi bu zaman ısı kaybına da yol açmakta ve azalan ısı grafit küre sayısını da azaltmaktadır. Ayrıca aşılama sıcaklığı ne kadar yüksek ise aşılama verimi de o kadar düşük olur. Dolayısıyla aşılamanın mümkün olan en düşük sıcaklıkta ve en son anda yapılması en uygun sonucu verir (BCIRA, 2006).

3. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN OTOMOTİV SEKTÖRÜNDEKİ UYGULAMALARI

Demir döküm sektörünün son on yılına baktığımızda, gelişen ve globalleşen otomotiv sektörüne paralel olarak, çok büyük bir gelişme gösterdiğini söyleyebiliriz. Avrupa kıtasında döküm fabrikalarının kapanması Türkiye, Çin, Hindistan ve Uzak Doğu ülkelerinin döküm sektöründeki ilerlemeleri Dünya döküm pazarında çok büyük bir rekabeti beraberinde getirmiştir.

Otomotiv ve iş makineleri sektöründeki rekabetin artması, iç piyasadaki krizlerin etkisiyle ihracata yönelen firmalarda tahribatsız muayene tekniklerine duyulan ihtiyaç daha da fazla olmaktadır. Firmaların bu konudaki özel istekleri çok fazla olmakta, hatta tek bir parçayı üretmek için çok pahalı özel cihazlar bile alınabilmektedir.

Motorlar üzerinde yakıt tüketimini azaltmak için yapılan çalışmaların başında parçaların ağırlığının azaltılması büyük öneme sahiptir. Bununla birlikte taşıt hızlarının ve güçlerinin artması sebebiyle de hafif ve dayanıklı malzeme kullanımı önem kazanmaktadır. Çizelge 3.1. de bir otomobilin toplam ağırlığının son 10 yıldaki değişimi görülmektedir.

Çizelge 3.1. Bir otomobildeki toplam ağırlığın son 10 yıldaki değişimi
(<http://www.advancedmanufacturing.com/July01/automotive.htm>, 6.03.2007)

	1997 (Kg)	2007 (Kg)	% Değişim
Gövde	712	396	44
Şasi	368	217	40
Motor Aksamı	360	258	28
Benzin	64	36	44
Toplam	1503	907	40

Bir otomobil motorunda dökme demir, dökme çelik, demir dışı alaşımlar kullanılmaktadır. Dökme demir ve çelikler kullanım yerlerine göre daha sonra çeşitli ıslah ve yüzey sertleştirme işlemleri görerek dayanımları artırılabilir. Çizelge 3.2 de otomotiv sanayinde kullanılan malzemelerin son 10 yıldaki değişimi görülmektedir.

Çizelge 3.2. Otomotiv sanayinde kullanılan malzemelerin son 10 yıldaki değişimi (<http://www.advancedmanufacturing.com/July01/automotive.htm> , 6.03.2007)

	1997 (%)	2007 (%)
Dökme Demir	55	24
Alüminyum	4	17
Magnezyum	0,21	4
Titanyum	0	0,06
Plastik	10	1
Diğer	7	11
Kauçuk	4	5
Cam	2	2
Lexan	0	2
Karbon Fiber	0	0,30

Bir otomobil motoru 4500 ayrı parçanın biraraya gelmesiyle oluşmaktadır. Bu 4500 parçanın yaklaşık 1500 adeti küresel grafitli dökme demirden üretilebilmektedir. Otomotiv sektöründe kullanılan küresel grafitli dökme demir parçalara birçok örnek sayılabilir. Bunlar; motor gövdesi, fren pistonu, silindir bloğu, aks gövdesi, distribütör, diferansiyel kutusu, diferansiyel gövdesi, ön ve arka poyra, valf gövdesi, fren baskı kolu, sağ ve sol yatak mesnetleri, çatallı flanş, diferansiyel hidrolik kilidi, manifold kapak ve benzerleri olabilir.

4. ULTRASONİK KONTROL

Bir tahribatsız muayene yöntemi olan ultrasonik kontrol ile yüksek frekanslı ses dalgaları kullanılarak malzemelerin yüzey ve iç kısımlarındaki kusurlar tespit edilir. Ses dalgaları malzeme içinden geçerken enerjileri azalır ve arayüzeylerden yansır. Yansıyan ışınlar ile hataların varlığı ve yerleri veya süreksizlikler analiz edilir.

Yansıma derecesi, malzemenin arayüzey formuna ve malzemenin fiziksel özelliklerine bağlıdır. Örneğin, ses dalgaları metal/gaz arayüzeyinden tamamen yansır. Kısmi yansıma metal/sıvı veya metal/katı arayüzeylerinde gözlenir.

Çatlaklar, düzensizlikler, çekme boşlukları, gözenek ve diğer süreksizlikler gibi arayüzeyleri yansıyan hatalar kolaylıkla detekte edilebilir. İnküzyonlar ve diğer homojensizliklerde kısmi yansıma veya ultrasonik dalgaların saçılması ile belirlenebilir.

Hataları analiz eden ultrasonik muayene cihazları, monitörler ile aşağıdakilerden bir yada daha fazlasını tespit edebilirler:

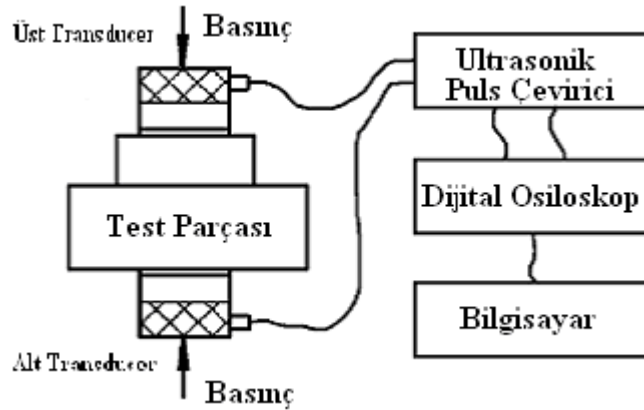
- Malzeme sınırlarındaki arayüzeyler veya metaldeki süreksizliklerden sesin yansıması,
- Güç vericinin giriş ve çıkış noktalarından, test numunesi boyunca geçen ses dalgasının geçiş süresi,
- Test numunesinden geçerken absorblanan ve saçılan ses dalgalarının zayıflaması.

Ultrasonik dalgalar ve mekanik titreşimler; malzemenin elastik limitinin altındadır ve parçalara bir zarar vermeden gerçekleştirilir. Ultrasonik muayene, tahribatsız muayene yöntemlerinden en yaygın kullanılanıdır. Bu çalışmada ultrasonik ses hızı yöntemiyle bulunan sonuçlar ile mekaniksel değerlerin sonuçları karşılaştırılmıştır (Lee S.C. ve Suen J.M., 1990).

4.1. Temel Ekipmanlar

Birçok ultrasonik muayene sistemleri aşağıdaki temel ekipmanları içerir:

- Elektronik sinyal jeneratörü,
- Güç kaynağı,
- Couplant,
- Elektronik devre,
- Test numunesinden alınan outputların kaydedildiği yada gösterildiği bir gösterge,
- Elektronik saat. Şekil 4.1 de şematik olarak ultrasonik kontrol yönteminde kullanılan ekipmanlar gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Şematik olarak ultrasonik kontrol yöntemi (Meyer, P.A., 1988).

4.2. Ultrasonik Muayenenin Avantaj ve Dezavantajları

- Ultrasonik muayene yöntemi ile rutin olarak 6 metreye kadar olan, örneğin uzun çelik şaftlar gibi parçaların kalınlıkları ölçülebilir.
- Yüksek hassaslıkla çok küçük hataların bile deteksiyonu mümkündür.
- İç kusurların, yerinin, büyüklük, şekil ve karakterizasyonunda diğer tahribatsız muayene yöntemlerine kıyasla daha yüksek güvenilirlikle tespit yapar.
- Yalnızca bir yüzeyin hazırlanması yeterlidir.

- Hataların hızlı bir şekilde gösterildiği elektronik operasyonlar mevcuttur. Bu şekilde metod, proses kontrol, otomasyon ve hızlı taramalar vb. için uygun olmaktadır.
- Volumetrik ölçümler sayesinde metalin ön kısmından arka bölümüne kadar hacim ölçümleri yapılabilir.
- Operasyonlar tehlikesizdir, çalışanlara zararı yoktur, ekipmanlar ve malzemelere bir etkisi mevcut değildir.
- Kolay taşınabilir.
- Bilgisayar ile çalışılabilir ve alınan veriler yardımı ile hataların karakterizasyonu ve malzemelerin özellikleri belirlenebilir (Meyer, P.A., 1988).

Ultrasonik muayenenin dezavantajları:

- Manuel operasyonlar büyük titizlik ve uzman eleman gerektirir.
- Muayene prosedürleri için konu hakkında geniş bilgiye ihtiyaç duyulur.
- Çok ince ve küçük, yüzeyi kaba parçaların muayenesi oldukça güçtür.
- Yüzeyin hemen altındaki süreksizlikler belirlenemeyebilir.
- Kalibrasyon için referans standartlara ihtiyaç duyulur (Meyer, P.A., 1988).

4.3. Uygulanabilirlik

Metallerin ultrasonik muayeneleri prensip olarak süreksizliklerin tespiti için geliştirilmiştir. Bu metod birçok metal ve alaşımlardaki hataların tespitinde kullanılabilir. Kaynak ve lehim gibi birleşimler ultrasonik metod ile incelenebilir. Endüstride, kalite kontrollerde ultrasonik muayene metodu kullanılmaktadır; hatta elektrik ve elektronik komponentlerinin üretiminde ve kompozitlerin üretiminde de kullanılmaktadır.

Aşağıda ultrasonik muayene ile yapılarındaki hataların incelendiği ekipmanlar verilmiştir:

- Fabrika komponentleri: şaftlar, pres kolonları, hareket tertibatları ve merdaneler,
- Güç ekipmanları: jeneratör rotorları, basınç tankları, basınç pompaları, nükleer yakıt tankları ve diğer reaktör komponentleri,

- Jet motoru parçaları: türbün ve kompresör parçaları,
- İşleme malzemeleri: kalıp blokları ve takım çelikleri,
- Demiryolu parçaları: akslar, tekerlekler ve kaynaklı raylar,
- Otomobil parçaları: dökme demirler, lehimli ve /veya kaynaklı komponentler.

Ultrasonik muayene ile aynı zamanda metal kesitlerin kalınlıkları ölçülebilir; örneğin, denizaltı gövdeleri, basınç tankerleri, çelik dökümler ve uzay araçlarının kesitleri vb. Kapalı sistemlerde korozyon nedenli kalınlık kayıpları bu yöntemle kolayca ölçülebilir (Lee S.C. ve Suen J.M., 1990).

4.4. Ultrasonik Muayene ile Ölçümler

Ultrasonik dalgalar, malzemelerin atomik yada moleküler titreşim ve vibrasyonlarını içeren mekanik dalgalardır. Bu dalgalar ses dalgaları gibi hareket ederler, sıvı, katı veya gaz içerisinde, vakumlu ortamlar hariç hareket edebilirler.

20.000 Hz. frekansının üzerinde ultrases dalgalar uygulanarak yapılır. Ultrasonik muayene metodu ile hatanın tespiti, kusur ile onu çevreleyen ana malzemenin ara yüzeyinde akustik empedansın ani değişmesine dayanır. Yüksek frekanslı ses dalgaları homojen malzeme içinde önemli bir kayba maruz kalmadan yayılırlar. Fakat malzeme yüzeyinden havaya pratik olarak geçemezler. İki katı ara yüzeyinden ise pek az geçebilirler. Dolayısıyla ultrasonik dalgalar dış yüzeylerden, döküm içindeki boşluklardan, porozitelerden, çatlaklardan kuvvetle yansır ve saçılırlar (Lin. H.N., Stoner R.J. ve Maris H.J., 1990).

Ultrasonik dalgalar mekanik titreşimle üretilirler. Piezoelektrik malzemeler (kuvarz ve baryum titanat kristalleri) üzerine düşen elektrik darbeleri (pulse) ile mekanik olarak titreşirler veya tersine üzerlerine düşen mekanik titreşimleri elektrik pulsları haline dönüştürürler. Yani bu malzemeler ultrasonik dalgaları hem üretebilir, hem de toplayabilirler.

Ultrasonik yöntemle döküm içindeki hataların niteliği, büyüklüğü, varlığı ve yerlerinin belirlenmesi için gerek pulse-echo (darbe-yankı, uyarı-yansıma) veya

thoughtransmission (bir baştan bir başa iletim) teknikleri ile uygulanabilir. Döküm içindeki kesintiler ses demetinin yönünü ve hızını değiştirirler. Dökümlerdeki salt çatlaklar, boşluklar ve kalıntı maddeleri gibi büyük yalıtılmış hatalar değil aynı zamanda curuf, sünger ve kaba damarlarında bu yolla kontrolü mümkündür.

Ultrasonik denetleme çoğunlukla göreceli bir küçüklükte ve tek biçimli kesitlerin ve bu denetleme tekniğinin ekonomik olduğu uzun üretim işlemlerinde kullanılır. Eğer herhangi bir dökümün biçimi ve girintili çıkıntılı ses dalgasının döküm içine iletimini engelliyorsa net bilgiler elde edilemez ve bu durumda alternatif denetim tekniklerinden olan radyografi yöntemi kullanılmalıdır.

Dökümün denetlenemeyecek bölümü yüzeye yakın olan bölümdür ve ölü bölge adını alır. Dökümler için “yüzey bölümü” genellikle 5 - 12,5 mm arası değişir. Yüzey kesintilerinin araştırılması için sıvı penetrasyon manyetik parçacık ve girdap akım teknikleri daha uygundur (Lin. H.N., Stoner R.J. ve Maris H.J., 1990).

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda öncelikle kullanılan malzemeler tanıtılıp, özellikleri, kullanım yerleri ve şekilleri anlatılmıştır. Deneylerde kullanılan makine, ölçü aleti ve cihazların teknik özellikleri anlatılmış daha sonra da deneylerin yapılış biçimleri ve işlem aşamaları açıklanmıştır.

5.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

5.1.1. Kalıp malzemeleri : Kalıp kumu olarak (0,05 - 2 mm) boyutlarındaki Zonguldak yöresinden gelen silis kumu kullanılmıştır. Bu kumun kalıp malzemesi olarak tercih edilmesinin nedenleri; kolay bulunuşu, ucuz oluşu, sıvı metalin etkilerine karşı koyabilecek yüksek refrakterlik özelliği ve ısı iletkenliğinin oluşudur.

Deneylerde kullanılan kum karışımının AFS tane iriliği numarası 80-90, kalıp kumu oranı % 97, kum içindeki kil oranı % 6-8, bentonit oranı %1, kömürtozu oranı %1 ve su oranı % 1 dir. Saf SiO₂ 'nin ergime sıcaklığı 1710 °C 'dir. Kumdaki Fe₂O₃, CaO, MgO gibi yabancı maddeler sinterleşme sıcaklığını düşürürler. Döküm kumlarının sinterleşme sıcaklığı 1500 °C 'den az olmaması istenir. Kullanılan silis kumunun kimyasal bileşimi aşağıdaki gibidir;

SiO ₂	→	min % 96
Fe ₂ O ₃	→	maks % 0,5
CaO + MgO	→	maks % 0,75
Na ₂ O + K ₂ O	→	maks % 100

Çizelge 5.1. Deneylerde kullanılan silis kumunun elek analiz sonuçları.

ELEK ANALİZ RAPORU

Elek Analizi (mm)	(A) Elek Üstü (G)	Elek Üstü (%)	Fakülür	(B) Sonuç	GRAFİKLE DEĞERLENDİRME
1,4 (12)		0,24	6	1,44	
1,0 (16)		1,01	9	9,09	
0,71 (22)		4,00	15	60,00	
0,50 (30)		7,15	25	178,75	
0,355 (44)		8,05	35	281,75	
0,25 (60)		8,05	45	362,25	
0,15 (85)		7,15	60	429,00	
0,125 (120)		4,00	81	324,00	
0,09 (170)		1,01	118	119,18	
0,063 (240)		0,54	164	88,56	
Kefe		0,24	275	66,00	
Toplam		41,44		1920,02	

5.1.2. Pik, çelik hurda ve döndü malzemeleri : Küresel grafitli dökme demir üretiminde kullanılan; pik, çelik hurdası, küresel grafitli dökme demir döndü hurdası ve ferro alyaj (alaşımlar) şarj malzemelerinin kimyasal kompozisyonları çizelge 5.2 de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Deneylerde kullanılan pik, çelik ve yolluk döndüsü kimyasal analiz değerleri.

S.No	Malzeme Adı	Kimyasal Kompozisyon (%)							
		C	Si	S	P	Mn	Cr	Cu	Sn
1.	Sfero	4,02	0,07	0,013	0,028	0,013	0,026	0,002	0,0016
2.	Sfero Y.Si	4,02	0,79	0,020	0,048	0,054	0,009	0,005	0,0015
3.	Sfero D.Si	4,23	0,41	0,021	0,053	0,038	0,009	0,007	0,0010
4.	Gri L6 Piki	3,83	1,45	0,024	0,051	0,277	0,017	0,010	0,0021
5.	L5 Piki	3,99	1,61	0,033	0,052	0,392	0,026	0,016	0,0026
6.	L3 Piki	3,63	2,50	0,017	0,037	0,480	0,015	0,021	0,0034
7.	Ç1 Piki	4,16	0,97	0,099	0,079	0,941	0,019	0,023	0,0026
8.	Y.K.Ç2 Piki	4,01	0,67	0,043	0,076	0,770	0,018	0,040	0,0027
9.	Y.K.Ç1 Piki	4,11	1,06	0,045	0,069	0,849	0,018	0,026	0,0020
10.	Ç2 Piki	4,17	0,78	0,036	0,078	0,840	0,013	0,019	0,0019
11.	Çelik Hurda	0,04	0,02	0,020	0,020	0,300	0,030	0,040	0,0006
12.	Sfero Döndüsü	3,55	2,20	0,015	0,020	0,200	0,020	0,400	0,0040

5.1.3. Küreleştirici malzemeler : Endüstriyel uygulamada büyük oranda kullanılan küreleştirici malzemeler ferrosilisyum alaşımlarıdır. Deneylerde kullanılan küreleştirici malzeme Hindistan menşeli (2 x 20 mm) tane boyutuna sahip Snam Mg8 marka ferrosilis-magnezyumdur. Kimyasal kompozisyonu; % 6,1 Mg, % 45,2 Si, % 0,55 Al, % 0,9 Ca, % 0,7 Ce, % 1,02 diğer nadir toprak elementleridir.

5.1.4. Aşılacağı örtü malzemeleri : Deneylerde GSA / A&S firmasının (0,2 x 0,7 mm) tane boyutuna sahip Barcast tipi aşılacağı kullanılmıştır. Kimyasal kompozisyonu; % 70 Si, % 1,0 Ba, % 1,0 Ca, % 1,50 Al ve diğer nadir toprak elementlerini içermektedir.

5.2. Deneylerde Kullanılan Makine, Ölçü Aleti ve Cihazlar

Dereceleri kalıplama işlemi, 1200x860x150/150 mm derece boyutlarına sahip iki istasyonlu, hidrolik pres sistemiyle çalışan ve yüksek basınçlı George Fischer yapımı kalıplama hattında gerçekleştirilmiştir. Kum hazırlama işlemi ise 100 ton/saat kapasiteli Breadsly yapımı speed mullor mikser ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1. kalıplama hattını ve kum hazırlama ünitelerini göstermektedir.



(a)



(b)



Şekil 5.1. (a) Kalıplama hattı sfero işlem ve otomatik döküm ocağı istasyonu.
 (b) Kalıplama hattı alt ve üst derecelerinin kapama istasyonu
 (c) Kalıplama hattı alt kalıp bölgesi
 (d) Kalıp kumunun alt ve üst pres bölgesinde kalıplanması.

Metel ergitme işlemi ABB yapımı Brown ITMK/5 tipi 3680 KW ve 250 Hz. ve 6225 ton/saat ergitme kapasiteli indüksiyon ocağında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ABB Brown Boveri yapımı, 12,5 ton kapasiteli, kanallı (çekirdekli) OCC bekletme ve otomatik döküm ocağı ile FOMET yapımı ve hava soğutmalı 8 ton kapasiteli bekletme ocağı küreselleştirme işlemi öncesinde metali bekletmek için kullanılmıştır. Şekil 5.2. de indüksiyon ocakları ile bekletme ocakları gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)



(d)

- Şekil 5.2. (a) İndüksiyon ocakları transfer potasına sıvı metali aktarmaktadır.
 (b) Şematik olarak indüksiyon ocağının kesiti.
 (c) FOMET bekletme ocağı.
 (d) OCC otomatik döküm ve bekletme ocağı.

Dökümü gerçekleştirilen parçalardan alınan numuneler, mekanik test laboratuvarında INSTRON 4206 marka üniversal çekme cihazı ile çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.3. de çekme cihazı ve kontrol ünitesi görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.3. (a) Instron 4206 marka universal çekme cihazı.
(b) Çekme cihazı kontrol ünitesi.

Döküm parçaların yüzeyleri flex kesme taşı ile düzleştirilerek BROOKS B 3 DW marka Brinell sertlik ölçme cihazı ve EMCO M2N 230 mikrosertlik dürbünü ile sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.4 de bu cihazlar gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.4. (a) Brooks marka Brinell sertlik ölçme cihazı.
 (b) Yüzeyi düzletilip sertliği ölçülen bir otomotiv parçası.
 (c) Emco sertlik okuma dürbünü ve kalibrasyon test bloğu.

Ayrı bir numune kabı ile spektral numuneleri alınan paçalar metal kompozisyon analizi için ARL 3460 Spektrometre cihazı ile kimyasal analizleri yapılmıştır. Şekil 5.5 de bu spektrometre cihazı gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.5. (a) Kimyasal analizlere bakılan numune haznesi.
 (b) ARL 3460 marka spektrometre cihazı ve pul numuneler.

Metalografik analiz için PME ve BHM 112 KL tipinde OLYMPUS mikroskop ve numune hazırlama için STRUERS marka kesme, zımparalama ve parlatma cihazları kullanılmıştır. Şekil 5.6. da bu cihazlar gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 5.6. (a) PME 112KL Olympus marka optik mikroskop.
(b) BHM Olympus marka optik mikroskop.
(c) Struers marka numune kesme cihazı.
(d) Struers marka numune zımparalama cihazı.
(e , f) Struers marka numune parlatma cihazı.

Döküm parçaların ultrasonik ses hızı testi için KRAUTKRAMER BRANSON USK 7 D ultrasonik kontrol cihazı, küreselleşmenin tespiti için dijital küreselleşme kontrol cihazı ve KARL DEUTSEN Echometre cihazı kullanılmıştır. Şekil 5.7 de bu cihazlar gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)



(d)



Şekil 5.7. (a) - (b) Branson marka ultrasonik kontrol cihazı ve osiloskop .
 (c) - (d) Karl Deutsen Echometre cihazı.
 (e) - (f) - (g) Ses hızı ve küreselleşme cihazı.

5.3. DeneYlerin Yapılışı

5.3.1. Kum karışımının hazırlanması ve kalıplanması

Kalıplanacak kum karışımının hazırlanması speed mullor kum hazırlama mikseriyle gerçekleştirilmiştir. Miksere yaklaşık 2000 kg silis kumu alınarak 80 sn süreyle karıştırarak homojen bir karışım gerçekleştirilmiştir. Bu karışım işlemi sırasında silis kumunun dışında kömürtozu, bentonit ve su ilaveleri otomatik olarak yapılmıştır. Bir mikserde bulunan kum ile yaklaşık 5 takım derece kalıplanabilmektedir.

Hazırlanan kum karışımı GF kalıplama hattı alt ve üst pres bölgelerine bant sistemiyle taşınarak 100 bar sıkıştırma basıncında kalıplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kalıplanan alt ve üst dereceler taşıyıcı arabalar sayesinde ilerleyerek kalıba maça yerleştirildikten sonra döküm hattına doğru gönderilirler. Şekil 5.8 de alt ve üst kalıplama hatları gösterilmektedir.



Şekil 5.8. (a) Kalıplama hattı üst kalıp bölgesi
(b) Kalıplama hattı alt kalıp bölgesi

5.3.2. Metal şarjın hazırlanması ve ergitilmesi

Metal şarjın hazırlanması, pik ve hurda sahasında bulunan külçelerin mıknatıslı vinç vasıtasıyla taşıyıcı kovalara aktarılması ve bu kovalarında indüksiyon ocağına şarjı boşaltması işlemi ile gerçekleşir. Metal şarjı, % 40 küresel grafitli dökme demir (sfero) piki, % 45 döndü (hurda edilmiş parçalar) ve % 15 çelik hurdasından oluşmaktadır. Ergitme işlemi sonucu alınan numune kimyasal analiz için spektrometreye gönderilmiştir. Gelen sonuca göre analiz ayarlaması için 5,5 kg C ile 3 kg FeSi şarjdan sonra ilave edilmiştir. Ocaktan alınan numuneden gelen dokuz farklı analiz değeri deney sonuçları kısmında Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

İndüksiyon ocağının % 90’ı doldurulduktan sonra analiz düzeltmesi 1400 °C civarında yapılip en yüksek kademe ile döküm sıcaklığına çıkılmıştır. 6 ton kapasiteli ocağın % 60’ı dökülmüş ve hemen şarj edilerek aynı şartlarda ergitme işlemine devam edilmiştir.

Küresel grafitli dökme demir üretiminde grafiti küresel hale getirmek için temel şart kükürt oranının % 0,02'nin altında olmasıdır. Sıvı dökme demire ocakta iken kükürt’ü gidermek için mangan ilavesi yapılmış ve düşük kükürtlü karbon verici

kullanılmıştır. Kükürt, grafit kürelerinin yüzey enerjisini düşürerek küresel yapının bozulmasına yol açmaktadır.

5.3.3. Küreleştirme işleminin yapılması ve dökümün gerçekleştirilmesi

İndüksiyon ocaklarında ergitilen ve analizi sağlanan sıvı metal transfer potalarına alınarak küreleştirme işlemi için döküm istasyonuna getirilir. Dökümü gerçekleştirilecek parçanın yaklaşık derece ağırlığı 50 kg'dır. Dolayısıyla 300 kg'lık sıvı metal alabilen döküm potası ile 6 derecelik döküm gerçekleştirilebilmektedir.

Transfer potasından kapaklı döküm potasına sıvı metal aktarılmadan önce potanın içinde bulunan cebe 4500gr (% 1,5) FeSiMg ve üzerine örtü malzemesi olarak 1500 gr (% 0,5) aşı konulmuştur. Sonraki dökümlerde 100 er gram düşülerek küresel olmayan grafit yapısı, FeSiMg ve aşılama malzemesinin azaltılması ile sağlanmıştır. Bu grafitler kompakt (vermicular) grafit formundadır. Matristeki perlit miktarı az miktarda katılan kalay miktarı ile elde edilmiştir. Pota kapağı kapatılıp sıvı metal yaklaşık 2 dk süresinde döküm potasına aktarılmıştır. Bu süre içinde pota çalkalanmış ve magnezyum parlaması gözlenmiştir. Şekil 5.9 da bu işlem gösterilmektedir.



Şekil 5.9. Magnezyum reaksiyonu gerçekleşmiş ve kapak açılmıştır.

Döküm potasının kapağı açıldıktan sonra potaya bir miktar perlit atılıp yüzeyinde toplanan curuf alınmıştır. Numune kabına kimyasal analiz için ikinci kez numune alınmıştır. Bu işlem potada katılan FeSiMg'un ve aşu malzemesinin kimyasal analizde yaptığı değişimi gözlemlemek içindir. Sıcaklık portatif electronite termokopul ile ölçülerek 1415°C geldiği gözlemlenmiş ve döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.10 da bu işlemler aşamalı bir şekilde gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.10. (a) Numune kabına alınan sıvı metal katılaşmaktadır.
(b) Döküm potasındaki sıvı metalden curuf temizlenmektedir.
(c) Döküm potasındaki sıvı metalin sıcaklığı ölçülmektedir.
(d) Döküm yapılmaktadır.

5.3.4. Ultrasonik hız ölçümü

Ultrasonik kalınlık ölçümlerindeki teknik spesifikasyonlar aşağıdaki gibidir:

- 1.) Ölçüm aralığı 1,2-200 mm,
- 2.) Ölçüm güvenilirliği 0,1 mm yada % 1,
- 3.) Malzeme hız aralığı 1000-7999 m/s,
- 4.) Prob frekansı 5 MHz' dir.

Kalınlığı bilinen çelik kalibrasyon bloğu kullanılarak (c) kalibre hız değeri belirlenen rezonans veya pulse-eko cihazı ile numunelerin hız değerleri belirlenir. Numunenin kalınlığı, cihazdan okunan kalınlık değerine oranı ile çelik kalibrasyon bloğundan elde edilen hız değeri çarpıldığında, numunenin ultrasonik hız değeri belirlenmiştir. Kalibrasyon bloğunun malzemesi St 52'dir.

$$c_x = c(d/d_s)$$

c_x ; numunenin ultrasonik hızı.

c ; çelik Kalibrasyon bloğunun hız değeri

d ; numunenin kalınlığı

d_s ; cihazdan okunan numunenin kalınlığı

1,25, 2,5, 5,0 ve 10 MHz' lik frekanslar ile ultrasonik hız ölçümleri, ultrasonik test bloklarından üç yönde ultrasonik dalgaların geçiş zamanlarının belirlenmesi ile yapılmıştır.

5.3.5. Mekanik Ölçümler

5.3.5.1. Brinell sertlik değeri ölçümü

Brinell sertlik değerinde kullanılan bilya 10 mm çapa sahiptir. Numune olarak seri üretimde üretilmiş rastgele bir parça seçilmiştir. Parça üzerine 3 tonluk basınç

uygulanarak 15 sn beklenmiştir. Meydana gelen izin çapı dürbünle ölçülerek Brinell sertlik değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$BSD = \frac{P}{y} = \frac{2P}{\pi.D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

P; Deney yükü

y; İzin alanı

D; Bilya Çapı

d; İzin Çapı

5.3.5.2. Çekme deneyi

Çekme testi için hazırlanan çubuklar dökülen parçalarla aynı derece içinde kalıplanarak dökümü gerçekleştirilmiştir. Her parça için ayrı bir çekme çubuğu dökülmüştür. Yuvarlak çekme çubukları frezede işlenerek baş kısımları çene tertibatına uygun olarak dış açılmış ve çekme testine hazır hale getirilmiştir.

Çekme deneyi standartlara göre hazırlanmış deney numunesinin tek ekseninde, belirli bir sabit hızla koparıncaya kadar uygulanmıştır. Çekme deneyi sonucunda numunenin temsil ettiği malzemenin çekme dayanımı, akma gerilmesi ve % uzama miktarları tespit edilmiştir. Bu değerler için aşağıdaki formüller kullanılmıştır.

$$\text{Çekme Dayanımı} = P_{\text{maks}} / A_0$$

P_{maks} : Maksimum uygulanan yük

P_{akma} : Akma yükü

$$\text{Akma Gerilmesi} = P_{\text{akma}} / A_0$$

A₀ : Orijinal kesit alanı

L_k : kopma uzaması

$$\% \text{ Uzama} = (L_k - L_0) / L_0$$

L₀ : ilk uzunluğu

6. DENEY SONUÇLARI

6.1. Döküm ve Analiz Sonuçları

Farklı kimyasal analizlere sahip kgdd numunelerinin dökümü yapılmıştır. İncelemeler döküm halleri için gerçekleştirilmiştir. Dökme demir serisinin dökümünde seçilen ortalama kimyasal kompozisyon; % 3,6 C, % 2,4 Si (magnezyum işlemi sonrası), % 0,4 Mn, % 0,02 S ve maksimum % 0,029 P. Her 1000 kg'lık sıvı metal için yapılan ocak şarjı ve aşılama miktarları çizelge 6.1 de gösterilmektedir. Analiz değerleri birbirine çok yakındır. Burada mikroyapıdaki küreselliğin farklılaşması, daha önceki bölümlerde de bahsedilen operasyonel işlemlerdeki uygulama farklılıklarından meydana gelmektedir.

Çizelge 6.1. Ocak Şarjı ve Aşılama Miktarları.

No	Pik Demir	Ocak Şarjı (kg)					Aşılama (kg)	
		Döndü	Fe-Si	Fe-Mn	Sn	Fe-Cr	FeSiMg	Fe-B
1	77	0,100	2,135	0,460	0,080	0,375	0,960	0,045
2	77	0,100	2,135	0,460	0,080	0,375	0,960	0,090
3	77	0,180	2,030	0,460	0,080	0,400	1,008	0,180
4	75	2,665	2,115	0,460	0,080	0,400	1,000	0,030
5	77	0,100	2,135	0,460	0,080	0,375	1,008	0,090
6	78	0,180	2,030	0,460	0,080	0,400	1,008	0,180
7	77	3,320	1,460	0,460	0,080	0,400	2,000	0,030
8	77	0,235	2,080	0,460	0,080	0,375	1,056	0,090
9	75	3,360	1,420	0,460	0,080	0,400	2,000	0,200

Şarj malzemelerinin kimyasal kompozisyonları ile dökümlerin kimyasal analiz değerleri çizelge 6.2 ve çizelge 6.3 de gösterilmektedir.

Çizelge 6.2. Şarj Malzemelerinin Kompozisyonları.

Malzeme	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Al	B	Ca	Mg
Pik	4,06	0,06	<0,005	0,01	0,02	0,01	<0,03	<0,005	0,001	---	---
Döndü	<0,02	0,01	<0,12	0,02	0,02	<0,01	0,02	<0,02	0,001	---	---
FeSi	---	76,82	---	---	---	---	---	1,31	---	1,04	---
FeMn	0,09	0,84	88,6	---	---	---	---	---	---	---	---
FeSiMg	---	41,6	---	---	---	---	---	0,99	---	0,96	6,5
FeCr	0,03	0,70	---	---	---	66,4	---	---	---	---	---
FeB	0,14	---	2,48	---	---	0,64	---	0,36	19,2	---	---

Çizelge 6.3. Döküm Analizleri

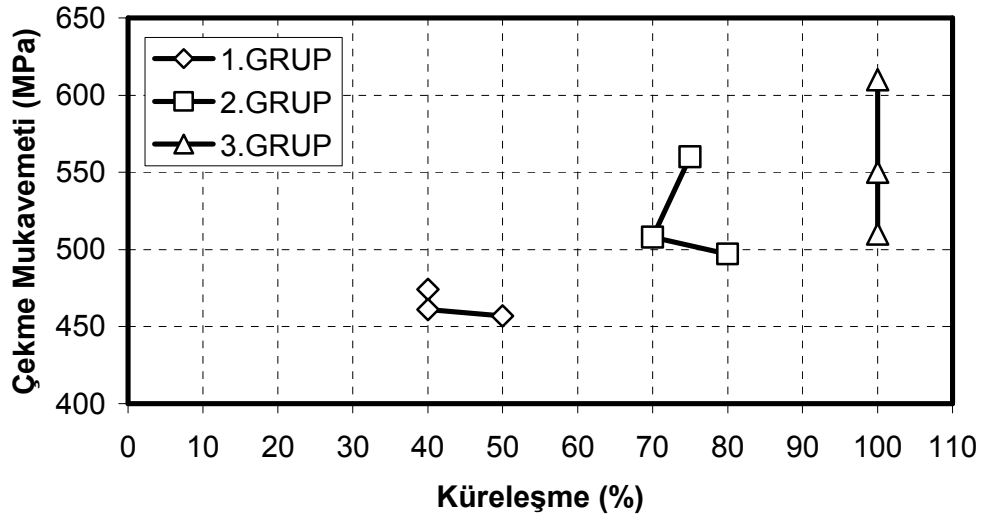
Numune No	C %	Si %	Mn %	S %	P %	Mg %	Sn %	Cr %	B %
1	3,45	2,47	0,44	0,016	0,010	0,027	0,091	0,27	0,008
2	3,60	2,59	0,45	0,018	0,010	0,025	0,082	0,25	0,013
3	3,70	2,89	0,44	0,008	0,007	0,026	0,081	0,29	0,005
4	3,66	2,62	0,48	0,014	0,010	0,027	0,080	0,29	0,005
5	3,65	2,53	0,47	0,016	0,009	0,025	0,078	0,26	0,012
6	3,59	2,51	0,48	0,013	0,008	0,025	0,082	0,28	0,026
7	3,56	2,46	0,45	0,012	0,010	0,044	0,082	0,29	0,007
8	3,52	2,56	0,45	0,013	0,008	0,029	0,079	0,26	0,013
9	3,67	2,30	0,37	0,012	0,010	0,028	0,082	0,28	0,031

6.2. Mekanik Test Sonuçları

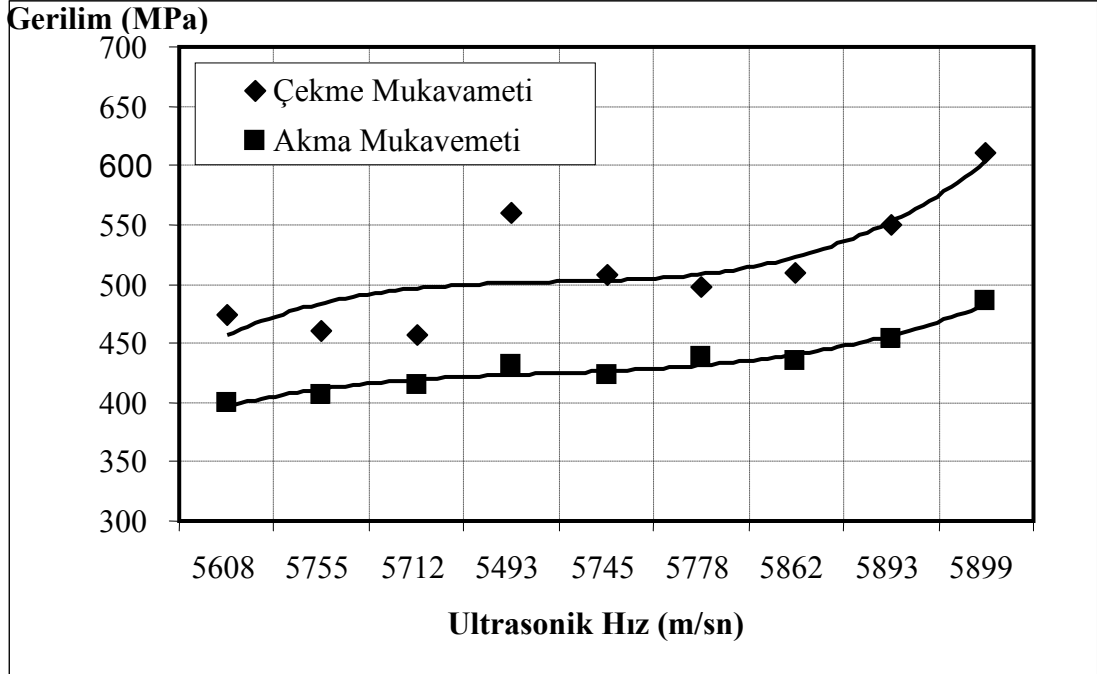
Mekaniksel test sonuçlarında çekme mukavemeti, akma mukavemeti, sertlik ve % uzama miktarları hesaplanmıştır. Çizelge 6.4 de mekanik test sonuçları, Şekil 6.1 de çekme mukavemetinin küreleşmenin değişimi ve Şekil 6.2 de de ultrasonik hızla mekanik özelliklerin değişim grafikleri görülmektedir.

Çizelge 6.4. Mekanik Test Sonuçları

Numune No	Akma Muk. (MPa)	Çekme Muk. (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (BSD)
1	400	474	1	248
2	407	461	1	257
3	414	457	2	256
4	432	560	1	256
5	423	508	1	255
6	438	497	2	257
7	435	510	2	255
8	454	550	1	257
9	485	610	1	265



Şekil 6.1. Küresel grafitli dökme demirlerde, küresleşme - çekme mukavemeti ilişkisi.



Şekil 6.2. Küresel grafitli dökme demirlerde ultrasonik hız ile akma ve çekme dayanımları arasındaki ilişki.

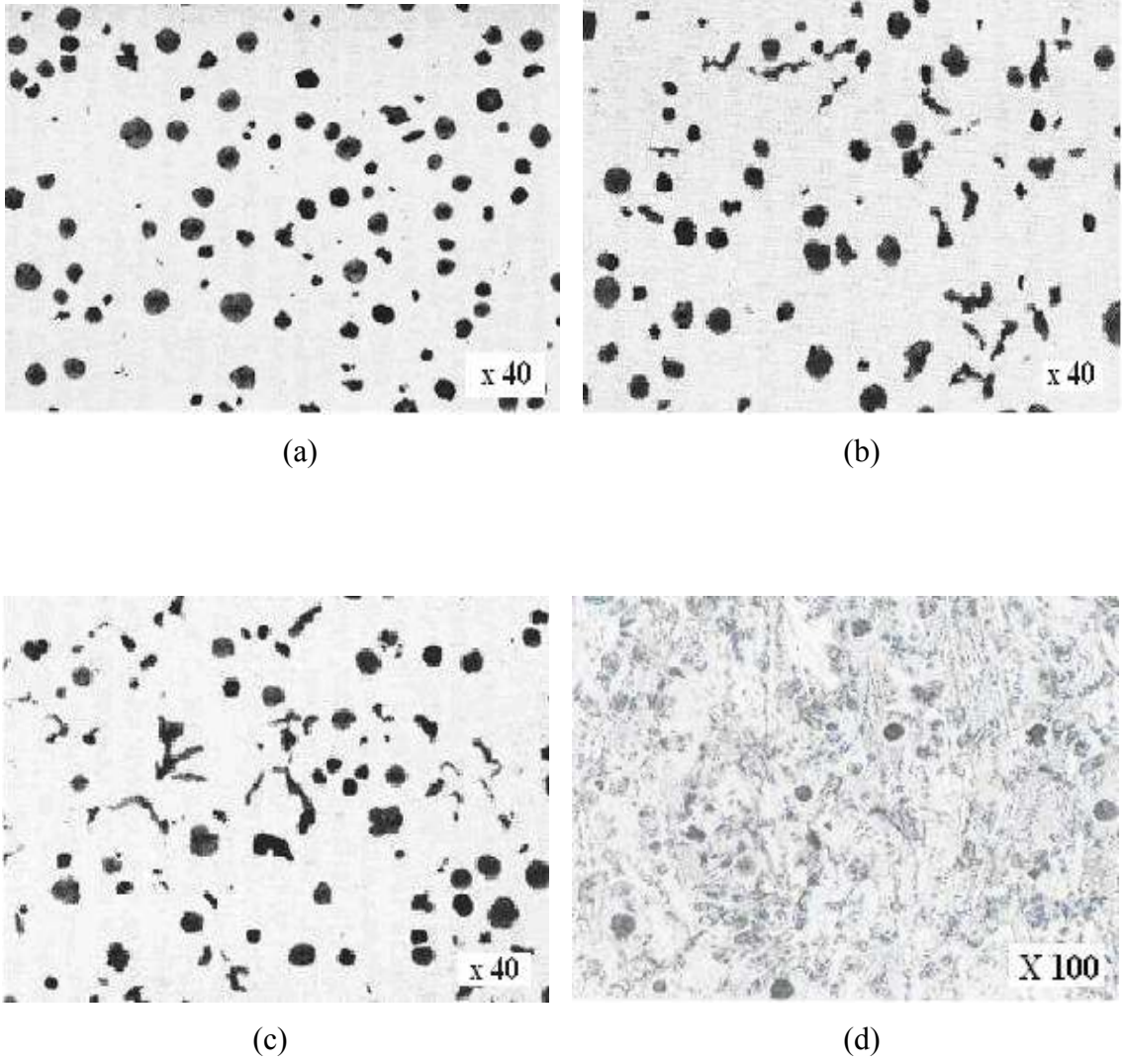
6.3. Görüntü Analiz Sistemi ve Mikroyapı Sonuçları

Numunelerdeki grafit yapısı görüntü analiz sistemi ile incelenmiştir. Toplam grafit alanı, grafit boyutu ve küre sayısı ölçülmüştür. Her numunede 40 alan yani yaklaşık 0,25 mm x 0,019 mm' lik alan taranmıştır. Ölçümde yalnızca 0,30, 0,40, 5,9 ve 12 μ genişliğe sahip grafit yapıları gözönünde bulundurulmuştur. Çizelge 6.5 de Grafit parametreleri ve küreselleşme ile ilgili sonuçlar gösterilmektedir. Çizelge 6.6 da görüntü analiz sistemi sonuçları gösterilmektedir.

1'den 9'a kadar numaralandırılan numuneler üç gruba ayrılmıştır, 1'den 3'e kadar olan numaralı numunelerde grafitlerin % 40-50'si küresel iken, 4-6 numaralarda % 70-80, 7-9 numaralılarda ise % 100 küresel grafitler mevcuttur. Dolayısıyla 1.grup yaklaşık % 50 küresellik, 2.grup % 80 küresellik ve 3. grupta % 95'in üzerinde küreselliğe sahip yapılar olarak gruplanmıştır. Şekil 6.3 de bu üç grup için mikroyapılar görülmektedir.

Çizelge 6.5. Grafit parametreleri ve küreleşme ile ilgili sonuçlar.

Grafit	Grafit Çapı (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Alan (%)	>0,31	9,6	8,7	9,6	9,5	9,2	9,2	8,9	10,6	9,5
	>1,55	8,5	7,6	8,8	9,0	8,5	8,6	8,5	10,0	9,0
	>3,10	7,2	6,5	8,0	8,4	7,7	8,0	7,9	9,5	8,5
	>6,20	5,4	4,8	6,4	7,4	6,4	6,9	7,0	8,4	7,6
	>12,40	2,6	2,8	4,2	5,5	4,4	5,1	5,3	6,6	6,1
Küre Sayısı (1/mm ²)	>0,31	283	252	260	199	354	189	215	277	213
	>1,55	271	224	235	176	285	165	164	167	190
	>3,10	252	189	224	136	203	136	136	131	133
	>6,20	184	125	150	74	111	69	77	65	58
	>12,40	111	96	113	60	86	55	57	52	46
Küreselleşme (%)		40	40	50	75	70	80	100	100	100

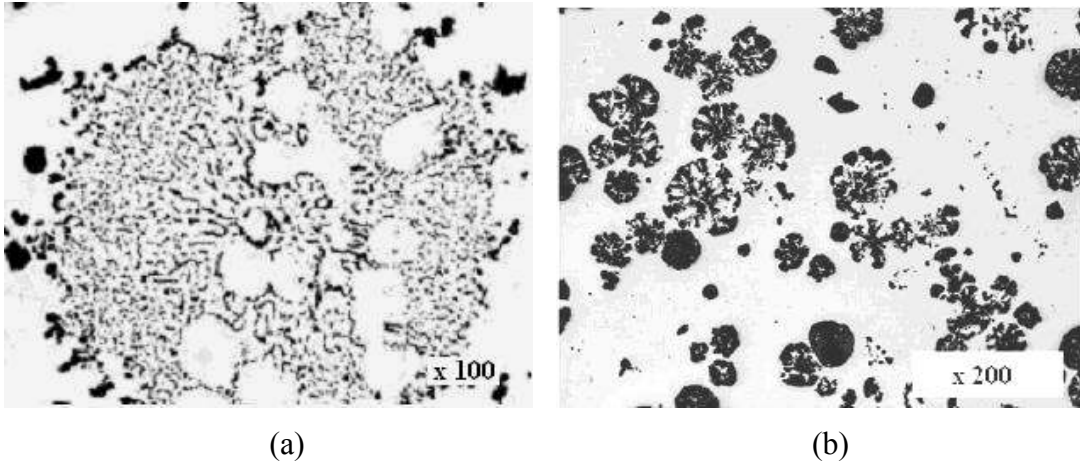


Şekil 6.3. (a) %100 küresel yapı. Dağlanmamıştır. (x 40)
(b) % 80 küresel yapı. Dağlanmamıştır. (x 40)
(c) % 50 küresel yapı. Dağlanmamıştır. (x 40)
(d) % 0-3 küresel yapı. % 3 Nital çözeltisi ile dağlanmıştır. Küreleştirme ve aşılama işlemine tabi tutulmamıştır. İndüksiyon ocağından alınan numune mikroyapısıdır. (x 100)

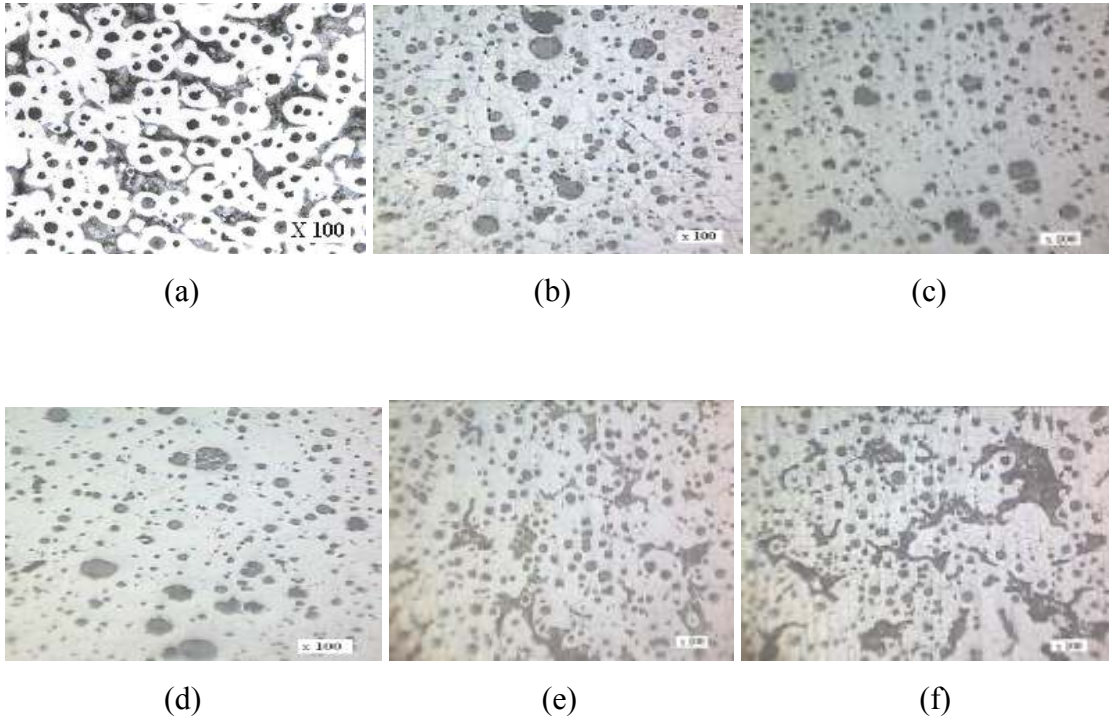
Çizelge 6.6. Görüntü analiz sistemi sonuçları

Grup	Özellik	Döküm Yapısı
1.Grup % 50 Küresel	Matris Fazı	% 65 F + % 35 P
	Grafit Boyutu (mm)	0,024
	Ortalama Sertlik (BSD)	246
	Ortalama Ses Hızı (m/sn)	5670
2.Grup % 80 Küresel	Matris Fazı	% 70 F + % 30 P
	Grafit Boyutu (mm)	0,025
	Ortalama Sertlik (BSD)	260
	Ortalama Ses Hızı (m/sn)	5720
3.Grup % 100 Küresel	Matris Fazı	% 80 F + % 20 P
	Grafit Boyutu (mm)	0,0266
	Ortalama Sertlik (BSD)	285
	Ortalama Ses Hızı (m/sn)	5800
% 0 Küresel	Matris Fazı	% 5 F + % 95 P
	Grafit Boyutu (mm)	---
	Ortalama Sertlik (BSD)	190
	Ortalama Ses Hızı (m/sn)	3960

1 pota ile 6 derecelik döküm gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.5 de her dereceden alınan mikroyapı değişimleri görülmektedir. Sıvı metalin potaya ilavesi ile (reaksiyonun başlaması) son derecenin dökümü arasında geçen operasyon süresi ortalama 5-6 dk arasında sürmüştür. Dökülen 1. derece ile 6. derece arasındaki döküm sıcaklığı farkı yaklaşık olarak 60 °C civarında tespit edilmiştir. Bu sürenin uzadığı dökümlerde döküm sıcaklığındaki düşüşten dolayı grafit yapısı farklılaşmış ve kompakt grafit yapısı elde edilmiştir. Şekil 6.3.c'de mikroyapısı görülmektedir. FeSiMg miktarının azaltıldığı ve hızlı dökümün gerçekleştiği durumda da (operasyon süresi 3,20 dk) ilk dereceden alınan numune grafit yapısında farklılık meydana gelmiş ve exploded grafit yapısı oluşmuştur. Aşılama miktarının azalması ve analizden gelen düşük kükürt miktarına sahip olan 3 numaralı numunenin bir bölgesinde de chunky grafit yapısına rastlanılmıştır. Bütün dökümlerde derece açma süresi 50 dk tutulmuştur. Aşılama % 0,5 ile % 1,5 arasında değişmiştir. Şekil 6.4 de exploded ve chunky mikroyapıları görülmektedir.



Şekil 6.4. (a) Chunky grafit mikroyapısı. Dağlanmamıştır. (x 100)
 (b) Exploded grafit mikroyapısı. Dağlanmamıştır. (x 200)



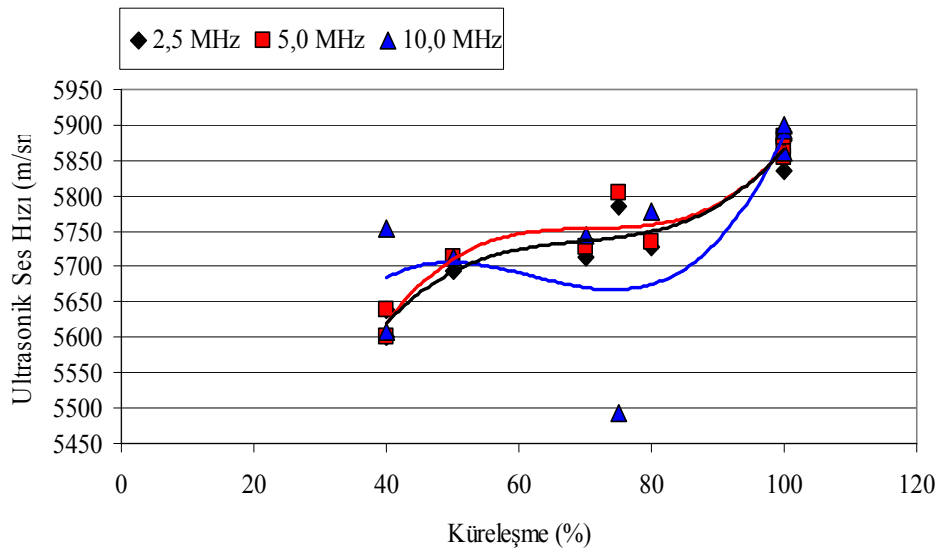
Şekil 6.5. (a) 1.derece (b) 2.derece (c) 3.derece (d) 4.derece (e) 5.derece (f) 6.derece
 Perlitik yapının görülmesi için 1.derece numunesi % 3 Nital çözeltisiyle dağlanmıştır, diğer yapılar dağlanmamıştır. Bütün yapılar x100 büyütme uygulanmıştır.

6.4. Ultrasonik Ses Hızı Ölçüm Sonuçları

Ultrasonik ses hızı ölçümleri değişik frekanslar ile döküm parçaların düz yüzeylerinden ses dalgalarının geçiş zamanlarının belirlenmesi ile yapılmıştır. Çizelge 6.7 de ultrasonik ses hızı ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Şekil 6.6 de ise ultrasonik ses hızının küreleşme ile olan değişim gösterilmektedir.

Çizelge 6.7. Ultrasonik ses hızı ölçüm sonuçları

Ultrasonik Ses Hızı (m/s)				
Numune No	1,25 MHz	2,5 MHz	5,0 MHz	10,0 MHz
1	5580	5600	5600	5608
2	5610	5638	5638	5755
3	5674	5694	5712	5712
4	5755	5786	5803	5493
5	5715	5712	5727	5745
6	5722	5727	5735	5778
7	5814	5836	5854	5862
8	5855	5878	5868	5893
9	5874	5889	5884	5899



Şekil 6.6. Ultrasonik ses hızının küreleşme ile olan değişimi

7. GENEL SONUÇLAR

Küresel grafitlerin yapısı ve içyapıyı oluşturan fazlar, dökme demirin mekanik özelliklerini doğrudan etkilediğinden ultrasonik ölçümler mekanik özelliklerin belirlenmesinde yardımcı olabilmektedir. Yapılan çalışmada, ilk önce küresel grafitli dökme demir üretimi teorik olarak incelenmiş ardından ultrasonik ölçüm teknikleriyle grafitlerin küreselliği, ses hızı özellikleri, mikroyapıdaki fazlar ve mekanik özellikler arasındaki ilişki incelenmiştir.

Farklı grafit küreselliğine sahip dökme demir numuneleri, sıvı metale uygulanan aşılama ve FeSiMg miktarları değiştirilerek elde edilmiştir. Ses hızının ölçülmesi, grafit yapısının ve ana yapıyı oluşturan fazların etkisi hakkında bilgi vermiştir. Ölçümler, farklı prob frekansları için tekrarlanmıştır. Mikroyapıdaki perlit miktarının artması, sertlik ve uzama ile çekme mukavemeti değerleri, ultrasonik hız değerinde önemli bir değişikliğe yol açmamıştır. Çekme mukavemetinde ve akma mukavemetindeki artış ile birlikte sertlik, küresellik yüzdesi, grafit boyutu ve ultrasonik hız artmıştır.

Grafit alanı, küre sayısı ve grafit boyutunun ölçümü görüntü analiz sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Küresel olamayan grafit yüzdesinin artışı, grafit boyutunu arttırmış ve mikroyapıda büyük grafitler gözlenmiştir. Grafit alanı artışı ile küreselleşme yüzdesi, akma dayanımı ve ultrasonik hız artmıştır. Grafitin küresellikten lamel forma doğru değişmesi ile ultrasonik hızın düştüğü tespit edilmiştir. Nitekim Sergeant ve Fuller 1990'da gerçekleştirdikleri araştırmada, küresel grafitli dökme demirin ultrasonik hızının 5600 m/sn, gri (lamel grafitli) dökme demirin 3500-4900 m/s aralığında olduğunu belirlemiştir. Ancak matris yapısı göz önünde bulundurulmadan yapılan ölçümlerde hız ve mekanik özellikler arasında bir ilişki kurulması sağlıklı değildir.

Dökme demir üreticileri, uygulaması basit ve hızlı olan ultrasonik hız yöntemi ile grafit formunun kontrolünü yapabilmektedirler. Böylelikle dökülen partiden hurda verilmeden sevke uygun olduğu kararı daha kolay verilebilmektedir. Bununla birlikte, küresel grafitli dökme demirlerin servis performansını belirleyen, mekanik özellikler doğrudan grafit şekline bağlı değildir.

Kimyasal analizin değişimi ile kısmende olsa, grafit dağılımını etkileyen elementin silisyum olduğu anlaşılmıştır. Silisyum miktarının artması ile, küre sayısı artmakta ve şekli iyileşmektedir, diğer taraftan kalın kesitli parçalarda yüksek silisyum ve düşük kükürt miktarlarında grafit şekli bozulması ve Chunk tipi grafitlerin oluşumu gözlenmiştir.

Hızlı döküm işleminin ve aşılamanın yetersiz yapıldığı durumda patlamış (exploded) grafit yapısı gözlenmiştir. Küresel grafitli dökme demirlerde lamel grafit yapısı % 5 kadar bile olsa mekanik özellikler açısından oldukça zararlıdır. İstenmeyen bir grafit şekli olan yarı lamel tipinin yanında patlamış (exploded) küre tipinin dökme demirin mekanik özelliklerine büyük oranda olumsuz etkisi olmadığı anlaşılmıştır. Grafit şekli üzerinde etkisi önemli olan kükürt'ün dökme demir içerisindeki oranı ne kadar az olursa, küreselleştirmek için yapılacak ilave miktarı da o kadar az olacaktır.

Katılma aşaması, sıvı metalin bileşimine, kalıp dizaynına, kalıplamanın yaş kumla yapılıp bu halde dökülmesine veya kalıplama yapıldıktan sonra kalıbın kurutulmasına, döküm sıcaklığına, derece bozma sıcaklığına ve süresine bağlıdır. Katılma aşamasındaki parametreler daima gözönünde tutulmalıdır.

Otomotiv sektörü küresel grafitli döküm parça üretici firmalarının çoğu indüksiyon fırını kullanmaktadır. Bunun nedeni daha kolay sıvı metal bileşim kontrolü ve sıvı metal sıcaklığı kontrolüdür. Kupol ocaklarında ergitme, kükürt oranını yükselttiği için küresel grafitli dökme demir üretimi için dezavantajlıdır. İndüksiyon ocaklarının dezavantajı sıvı metalin karbon oranının düşmesi ve ergitme maliyetinin yüksek olmasıdır. Sıvı metalin ergitme esnasında düşen karbon oranı, grafit ilavesi ile istenilen oranlara yükseltilebilmektedir.

KAYNAKLAR

“Ductile Iron” ASM Metals Handbook 9th Edition, Vol. 15. 1993

Brown J.R., “Foseco Ferrous Foundryman’s Handbook” , sf 70-84. Butterworth Heinemann Yayını, 2000.

Sergeant G.F., A.Fuller G., “The Effect Upon Mechanic Properties of Variation in Graphite Form in Irons Having Varying Amounts of Carbide in the Matrix Structure and the use of Nondestructive Tests in the Assesment of Mechanical Properties of Such Irons” BCIRA-Foundry Technology, Source Book, AFS, , sf 331-360, 21-50. 1990.

Emerson P.J. “Assessing Properties of Grafitic Irons by Ultrasonic Methods The European Experience. 1986.

Lee S.C., Suen J.M., Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Matrix Structures and Nodularity in Cast Irons, Metallurgical Transaction A., Volume 20. sf 2399-2407

Fuller A.G., Nondestructive Assessment of the Properties of Ductile Iron Casting, AFS Transaction, 80-162, 751-768.

Gilbert G.N.J. “An Introduction to the Mechanical Properties of Nodular Cast Iron” BCIRA, Report 1649., 2003

Hughes I.C.H., “The Importance and Practice of Inoculation in Iron Castings Production” , Solidification Technology in the Foundry and Casthouse 1983, Metal Society, Batholomev Pres London, sf 223.

Olsen S.O., Hartung C. “Recovery of Mg in a Ductile Iron Process” Elkem Foundry Products, Kristiansand, Norway 2003.

Skaland T. “Nucleation Mechanisms in Ductile Iron” Elkem Foundry Products, Kristiansand, Norway 2005.

Forrest R.D. “Some Factors Affecting the Mechanical Properties of Ductile Iron” , BCIRA, Report 1755. 2005.

KAYNAKLAR (devam)

Smith, W.F., "Foundations of Materials Science and Engineering", McGraw-Hill, Second Edition Singapore. 1993.

Cole, G.S., "Solidification of ductile iron", Source Book on Ductile Iron, ASM. 1977,

"Effects of Manganese in Nodular (SG) Iron", BCIRA Broadsheet. sf 211. 2006.

Lin. H.N., Stoner R.J., Maris H.J., "Nondestructive Testing by Microstructures by Picosecond Ultrasonics, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol 9. No 4, sf 239-245. 1990.

Skaland. T., "Inoculation Materials Improves Graphite Formation in Ductile Iron" Elkem Foundry Products, Kristiansand, Norway 2001.

Skaland. T., "Ductile iron shrinkage control through graphite nucleation and growth" Elkem Foundry Products, Kristiansand, Norway 2002.

Ecob. C.M., ve Hartung. C., "An Alternative Route for the Production of Compacted Graphite Irons" ASA, Eklem , Norway. 2004.

Skaland. T., "Chill and Shrinkage Control in Ladle Treated Ductile Iron" ASA, Eklem , Norway. 2004.

Huerta. E., Popovsky. V., "A Study of Hold Time, Fade Effects and Microstructure in Ductile Iron" AFS Cast Iron Inoculation Conference, September 29-30. Schaumburg, Illinois, 2005

Ecob. C.M., "An Examination of the Benefits Derived from Thermally Efficient Handling of Molten Cast Irons" Elkem ASA Bremanger Smelteverk, Norway. 2005.

Campbell. J., "Castings" Second Edition. University of Birmingham. UK. 2003.

Metals Handbook, "Nondestructive Evaluation and Quality Control" Sintercast yayını. sf 231-236. 2006.

KAYNAKLAR (devam)

Meyer, P.A., "Ultrasound as a Quality Control Tool, Quality Progress" February, sf 51-53. 1988.

"Ultrasonic Backscattering Formulation Applied to Cast Iron Characterisation", 7. European Conference on Non-Destructive Testing, Copenhagen, sf 1102-1109. 26-29 May 1998.

TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası ve KOSGEB ortak yayını "Küresel grafitli dökme demirin tipik özellikleri ve kullanım yerleri" tabloları. 2006.

<http://www.advancedmanufacturing.com/July01/automotive.htm> , 6.03.2007.