

67728

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ULTRASONİK YÖNTEMLERLE
KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERDE
MİKROYAPI KONTROLÜ

Met. Müh. A. Kamelya DÖĞÜŞCÜ

F.B.E. Metalurji Mühendisliği Ana Bilim Dalı Malzeme Programında

Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet TOPUZ

İstanbul, 1997

Prof. Dr. A. U. Sıvay
A. U. Sıvay

Prof. Dr. M. G. Yılmaz
M. G. Yılmaz

Prof. Dr. Ahmet Topuz
A. Topuz

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
İÇİNDEKİLER	II
ŞEKİL LİSTESİ	V
TABLO LİSTESİ	VIII
ÖZET	IX
İNGİLİZCE ÖZET	XI
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK BİLGİLER	3
2.1. Küresel Grafitli Dökme Demir	3
2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Katılaşma	3
2.3. Grafit Oluşumu	6
2.4. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Matris Kontrolü	8
2.4.1. Matrisi Etkileyen Kimyasal Kompozisyon Faktörleri	9
2.4.2. Grafit Kürelerinin Şekil ve Dağılımlarının Önemi	11
2.5. Magnezyum İşlemi	13
2.6. Aşılama ve Etkileri	13
2.7. Kimyasal Analizin Seçimi	14
2.7.1. Karbon ve Silisyum	14
2.7.2. Mangan	17
2.7.3. Magnezyum	17
2.7.4. Kükürt	19
2.7.5. Fosfor	19
2.7.6. Bakır	20
2.7.7. Nikel	22

	<u>Sayfa</u>
2.7.8. Krom	22
2.8. Küresel Grafitli Dökme Demirin Mekanik Özellikleri	23
3. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir	25
3.1. Giriş	25
3.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Östemperlenmesi	27
3.2.1. Östenitleme Sıcaklığı ve Süresi	28
3.3. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri	30
3.4. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması	35
3.5. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları	36
4. Mikroyapı Parametrelerinin Görüntü Analiz Sistemi ile Belirlenmesi	39
5. Ultrasonik Muayene	42
5.1. Temel Ekipmanlar	43
5.2. Avantaj ve Dezavantajları	43
5.3. Uygulanabilirlik	44
5.4. Ultrasonik Muayene ile Ölçümler	45
5.5. Ultrasonik Hız Ölçümü	48
6. Ultrasonik Muayene ile Mikroyapı Kontrolü	50
6.1. Yapılan Çalışmalar	53
7. DENEYSEL ARAŞTIRMA	64
7.1. Döküm Hali ile Numunelerin İncelenmesi	64
7.2. Östemperleme	71

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Demir-Karbon Denge Diyagramı.	4
Şekil 2.2. Dallenma Frekansı Teorisine Göre Bir Grafit Küresinin Büyümesindeki Kademeler.	7
Şekil 2.3. Yüzey Enerjisi Teorisine Göre Grafitin Küresel Formda Büyümesi Olayı.	7
Şekil 2.4. Bakır Miktarının Çekme Dayanımı ve Sertlik Üzerine Etkisi.	10
Şekil 2.5. Hiperötektik Grafit Nodüllerinin Döküm Yüzeyinde Yüzmesi.	12
Şekil 2.6. Maurer' e Göre Dökme Demir Diyagramı.	15
Şekil 2.7. Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Silisyumun Etkisi.	16
Şekil 2.8. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Bakır İlavesinin Perlit Miktarına Etkisi.	20
Şekil 2.9. Nikel Miktarının Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Mekanik Özelliklere Etkisi.	21
Şekil 2.10. Kromun Ötektik Katılma Sıcaklığına Etkisi.	22
Şekil 3.1. Çeşitli Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mukavemet ve Uzama Yüzdeleri.	26
Şekil 3.2. Alaşimsız Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Şematik İzotermal Dönüşüm Diyagramı.	27
Şekil 3.3. Çeşitli Sürelerde 300, 350, 400°C' de Östemperlemeden Sonra Kalıntı Östenit Miktarındaki Değişim.	29
Şekil 3.4. Östemperleme Sıcaklık ve Süresinin Fonksiyonu Olarak Proses Aralığının Değişimi.	30
Şekil 3.5. 375°C' de 1 Saat Östemperlenmiş KGDD' in Mekanik Özellikleri Üzerine Östemperleme Sıcaklık ve Süresinin Etkisi.	31
Şekil 3.6. Östenitleme ve Östemperleme Sıcaklığının Mekanik Özelliklere Etkisi	33
Şekil 3.7. Östenitleme ve Östemperleme Sıcaklığının Değişimi ile Mekanik Özelliklerin Değişimi	33

SONUÇLAR	75
KAYNAKÇA	76
ÖZGEÇMİŞ	80



Şekil 3.8. Östemperleme Sıcaklığı ve Süresinin Mekanik Özelliklere Etkisi	34
Şekil 3.9. Östemperleme Sıcaklığı ve Süresinin Yüzde Uzama ve Sertliğe Etkisi	34
Şekil 4.1. Görüntü Analiz Sistemi.	41
Şekil 6.1. Grafit Şeklinin Ultrasonik Hıza Etkisi	50
Şekil 6.2. Perlitik Dökme Demirlerde Ultrasonik Hızla Akma ve Çekme Dayanımları Arasındaki İlişki	51
Şekil 6.3. Ferritik Dökme Demirlerde Ultrasonik Hızla Akma Dayanımı Arasındaki İlişki	52
Şekil 6.4. Östemperlenmiş Dökme Demirlerde Ultrasonik Hız Değişimi	52
Şekil 6.5. Farklı Miktarlarda Karbür İçeren Dökme Demirlerde, Küreleşme-Çekme Mukavemeti İlişkisi	61
Şekil 6.6. Farklı Küreleşme Yüzdesine Sahip Dökme Demirlerde, Karbür Miktarı-Çekme Mukavemeti İlişkisi	61
Şekil 6.7. Farklı Karbür Miktarlarına Sahip Dökme Demirlerde, Ultrasonik Hız-Akma Mukavemeti İlişkisi	62
Şekil 6.8. Farklı Karbür Miktarlarına Sahip Dökme Demirlerde, Ultrasonik Hız-Çekme Mukavemeti İlişkisi	62
Şekil 6.9. Farklı Karbür Miktarlarına Sahip Dökme Demirlerde, Ultrasonik Hız-Küreleşme İlişkisi	63
Şekil 7.1. DDK 40 Mikroyapı Fotografi, % 3 HNO ₃ ile Dağlanmış, X100.	65
Şekil 7.2. DDK 60 Mikroyapı Fotografi, % 3 HNO ₃ ile Dağlanmış, X100.	65
Şekil 7.3. Sertlik Değeri- Ultrasonik Hız İlişkisi.	68
Şekil 7.4. Çekme Mukavemeti-Ultrasonik Hız.	68
Şekil 7.5. Uzama Yüzdesi-Ultrasonik Hız.	69
Şekil 7.6. Perlit Miktarı-Ultrasonik Hız.	69
Şekil 7.7. Grafit Çapı-Ultrasonik Hız.	70

	Sayfa
Şekil 7.8. Küreselleşme-Ultrasonik Hız.	70
Şekil 7.9. Küre Sayısı-Ultrasonik Hız.	71
Şekil 7.10. Östemperleme Sıcaklığı ile Ultrasonik Hız İlişkisi.	73
Şekil 7.11. 900°C’de 1 Saat Östenitlenip, 370°C’ de 2 Saat Östemperlenen Numune Yapısının Tarama Elektron Mikroskobu Fotoğrafi.	73
Şekil 7.12. 900°C’de 1 Saat Östenitlenip, 235°C’ de 2 Saat Östemperlenen Numune Yapısının Tarama Elektron Mikroskobu Fotoğrafi.	74
Şekil 7.13. Döküm Halinde ve Isıl İşlem Yapılmış Halde Farklı Ferrit/Perlit Oranlarına Sahip Dökme Demirlerde Küreselleşme-Ultrasonik Hız İlişkisi.	74

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri ve Yapıları.	8
Tablo 2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Kesitlere Bağlı Olarak Tavsiye Edilen C-Si-Mn Miktarları.	9
Tablo 2.3. Alaşımız ve Alaşımızlı Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Karbon ve Silisyum Oranları İçin Genel Öneriler.	18
Tablo 2.4. Kalın Kesitli Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Fosfor Miktarının Mekanik Özelliklere Etkisi	19
Tablo 2.5. Ferritik ve Perlitik Mikroyapıların Mekanik Özelliklere Etkisi	23
Tablo 3.1. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması.	38
Tablo 6.1. Ocak Şarjı ve Aşılama Miktarları	55
Tablo 6.2. Şarj Malzemelerinin Kompozisyonları	55
Tablo 6.3. Döküm Analizleri	56
Tablo 6.4. Mekanik Test Sonuçları	57
Tablo 6.5. Ultrasonik Hız Ölçüm Sonuçları	58
Tablo 6.6. Grafit ve Matris Yapısının Gözle ve Görüntü Analiz Sistemi ile Tetkikleri	59
Tablo 6.7. Görüntü Analiz Sistemi ile Belirlenen Grafit Parametreleri	59
Tablo 7.1.DDK 40 ve DDK 60' ın Kimyasal Kompozisyonu.	64
Tablo 7.2. Görüntü Analiz Sonuçları.	66
Tablo 7.3. Numunelerin Mekanik Özellikleri.	67
Tablo 7.4. Ultrasonik Test Sonuçları.	67
Tablo 7.5. Isıl İşlem Şartları.	72
Tablo 7.6. Ultrasonik Test Sonuçları.	72

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanmasında YTÜ Kimya Metalurji Fakóltesi Metalurji Mühendisliği laboratuvarından yararlanılmıştır. Sağlanmış olan tüm olanaklar için Fakólte Dekanı Prof. Dr. Ahmet Topuz' a, Bölüm Başkanı Prof. Dr. Müzeyyen Marşoğlu' na teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın planlanması, programlanmasında ve sonuca ulaştırılmasında geçen emeğinden ötürü hocam Prof. Ahmet Topuz' tekrar teşekkür etmeyi borç bilirim

ÖZET

Küresel grafitli dökme demirlerin günümüzde çok önemli bir malzeme grubunu teşkil ettiği herkesçe kabul edilmektedir. Küresel grafitli dökme demirlere bu ayrıcalığı sağlayan mekanik özellikleri korozyon direncidir, bilhassa östemperleme ısı işlemi ile mekanik özelliklerde bir artış sağlanmaktadır.

Mekanik özelliklerini, matris yapısı yanında etkileyen en önemli etken yapıda küresel formda bulunan grafitlerin; küreselleşme yüzdesi, hacimsel miktarı ve boyutudur. Bunlara döküm işlemleri ve aşılama ile en optimum değerlere ulaşılması amaçlanmaktadır. Kaliteli bir üretim için mikroyapıdaki matris ve küresel grafit durumunun incelenmesi zorunludur.

Bu inceleme ülkemizde genellikle metalografik yöntemle ve görüntü analiz sistemi ile yapılabilmektedir. Bu durum uygun olması ile birlikte zaman alması ve bölgesel inceleme yapma sağladığından daha hızlı ve kolay muayene yöntemleri araştırılmış olup bu konuda ultrasonik hız ölçme tekniği ile küresel grafitli dökme demirlerin matris yapısı, küreselleşme yüzdeleri ile küresel grafit miktarı bulunabilmektedir.

Bu çalışmada DDK 40 (ferritik) ve DDK 60 (perlitik) rumuzlu ferritik ve perlitik matrisli küresel grafitli dökme demirlerde döküldükleri konumda görüntü analiz sistemi yardımı ile (Buehler-Omnimet Advantage), ferrit-perlit miktarları, grafit miktarı, grafit boyutu, küre sayısı ve küreselleşme yüzdeleri ölçülmüştür. Çekme testi ve sertlik ölçümleri ile çekme mukavemeti, uzama yüzdesi ve sertlik değerleri belirlenmiştir. Daha sonra aynı numuneler üzerinde ultrasonik hız ölçümleri yapılarak ultrasonik hız ölçümleri ile matris yapısındaki değişimi, küreselleşme, küre sayısı, perlit miktarı, grafit boyutu arasındaki bağlantıyı veren diyagramlar elde edilmiştir.

Bu dökümlerde östemperleme ısıt işleminin önemli bir yeri olup diğer bir çalışma 900°C' de östenitleştirmeyi takiben 370, 275 ve 235°C' lerde östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerdeki ultrasonik hız ölçümleri ile beynitik mikroyapının etkisi araştırılmıştır.



SUMMARY

Nowadays, it is accepted that the ductile cast iron constitutes very important part of material group. The corrosion resistance and the mechanical properties give this privilege to ductile cast iron. Especially, there is an increase in the mechanical properties by austempering heat treatment.

Besides matrix structure, the most important factors that affect the mechanical properties are the nodularity percentage, volume fraction and the graphite size that exists in the spherical form in the structure. It is aimed to achieve the most optimum values of these parameters by casting processes and the inoculation method.

In order to obtain the quality in production, it is necessary to examine the matrix and the nodular graphite situation of the microstructure.

In our country, this examination is usually performed by metallographic method and the image analysis system. Although these methods are appropriate, it takes too much time and only the regional examination is possible. So, more fast and easy inspection techniques have been searched and it is found that by ultrasonic velocity measuring technique, the matrix structure, the percentage of nodularity and the nodular graphite amount of ductile cast iron can be detected.

In this study, two kinds of the ductile cast iron symbolized as DDK 40 (ferritic) and DDK 60 (pearlitic) are evaluated as cast condition by image analysis system (Buehler- Omnimet Advantage). By this method the volume fraction of pearlite, ferrite and graphite, percentage of nodularity, number of nodules, graphite sizes of these samples are measured. Also, the tensile strength, elongation and hardness values of these specimens are obtained by tensile

and hardness tests. Then, by measuring ultrasonic velocity on the same samples, the diagrams that show the relationship between the change in matrix structure, nodularity, number of nodules, pearlite amount and graphite size are obtained. In these castings, the austempering heat treatment has an important role. So, for the other part of project, the effect of the bainitic microstructure has been searched by measuring the ultrasonic velocity on the ductile iron austempered at 370°C, 275°C and 235°C after austenizing at 900°C.



1. GİRİŞ

Küresel grafitli dökme demirin dünya pazarına 1950' li yıllarda yoğun olarak girmesi ile, bir çok üretici sahip olunan üretim problemlerini çözüp, bu piyasaya avantajlı olarak girmeye çalışmışlardır. Dökme demir özellikle küresel grafitli dökme demir üretiminde, hammadde, ergiyik işlemleri (aşılama ve küreselleştirme) ve döküm sıcaklığının kontrolü oldukça önemlidir.

Döküm sonucunda grafitlerin yapıda küresel formda bulunup bulunmadığını kontrol edebilmek için fabrikalarda, işlem sırasında dökülen metalografik numune yada parçalardan kesilen numuneler üzerinden kontrol yapılır. Bu basit metod günümüzde bütün fabrikalarda uygulanmaktadır, ancak karşılaşılan problem örnek numunelerin parça yapısının özelliklerini belirlemede yetersiz kalmasıdır.

1952 yılında Seeman, gri dökme demirin ultrasonik hız değerinin çeliğe göre düşük olduğunu ve hız değerinin dökme demir sınıfına bağlı olarak değiştiğini fark etmiştir. 1957 yılında Ziegler, Gestner, Patterson ve Bodmer bu ilişkiyi geliştirmişler ve küresel grafitli dökme demirin ultrasonik hızının çelik ve gri dökme demir arasında olduğunu bulmuşlardır. Aynı zamanda belirledikleri diğer bir konuda, benzer matris yapısına sahip dökme demirlerin çekme mukavemeti ile ultrasonik hızları arasında bir bağlantı olduğudur. Böylece yapıda uygun grafit şartlarının oluşup oluşmadığının kontrolünün tahribatsız muayene yöntemleri ile yapılabileceği fikri oluşmuştur.

60' lı yıllarda ultrasonik hız ölçümü daha iyi anlaşılmaya başlanılmıştır, ancak bu ölçüm yöntemi dökümhanelerde kalite kontrol aşamasında, ölçüm sırasında karşılaşılan problemler nedeni ile yaygın şekilde kullanılmamıştır. Kipka ve Pursion, ultrasonik hız ölçümü ile yapılan ölçümlerin, ancak ölçülen numunede, boşluk, segregasyon ve artık gerilim olmadığında başarılı olabileceğini belirtmişlerdir.

Böylece çok hızlı bir şekilde ve geniş bir alanda metalografik muayene yerine ultrasonik muayene yöntemi ile mikroyapı kontrolünü yapmak hem kolaylık hemde zaman açısından yararlı olmaktadır. Ülkemizde bu konuda ciddi bir çalışma olduğu söylenemez bu nedenle bu çalışmada küresel grafitli dökme demirlerde ultrasonik hız ölçme yöntemi ile kalite kontrol amaçlı mikroyapı kontrol çalışması yapılmıştır.



2.TEORİK BİLGİLER

2.1. Küresel Grafitli Dökme Demir

Dökme demir ailesinin bir üyesi olan küresel grafitli dökme demir, sfero veya nodular dökme demir olarak da adlandırılır. Gri dökme demir ile aynı kompozisyona sahip olmasına rağmen, daha yüksek dayanım ve süneklilik sergiler. Mekanik özelliklerdeki bu farklılığın nedeni tamamen grafit şeklinden doğmaktadır. Lamel tipi grafitte sahip gri dökme demirde grafitlerin uçları, yüksek gerilime sahiptir ve çentik etkisi gösterirler, küresel grafitli dökme demirde ise grafitlerin formundan dolayı çentik etkisi söz konusu değildir. Aynı nedenle gri dökme demirin tersine, küresel grafitli dökme demirin, mekanik özellikleri temel olarak matris yapısına bağlıdır.

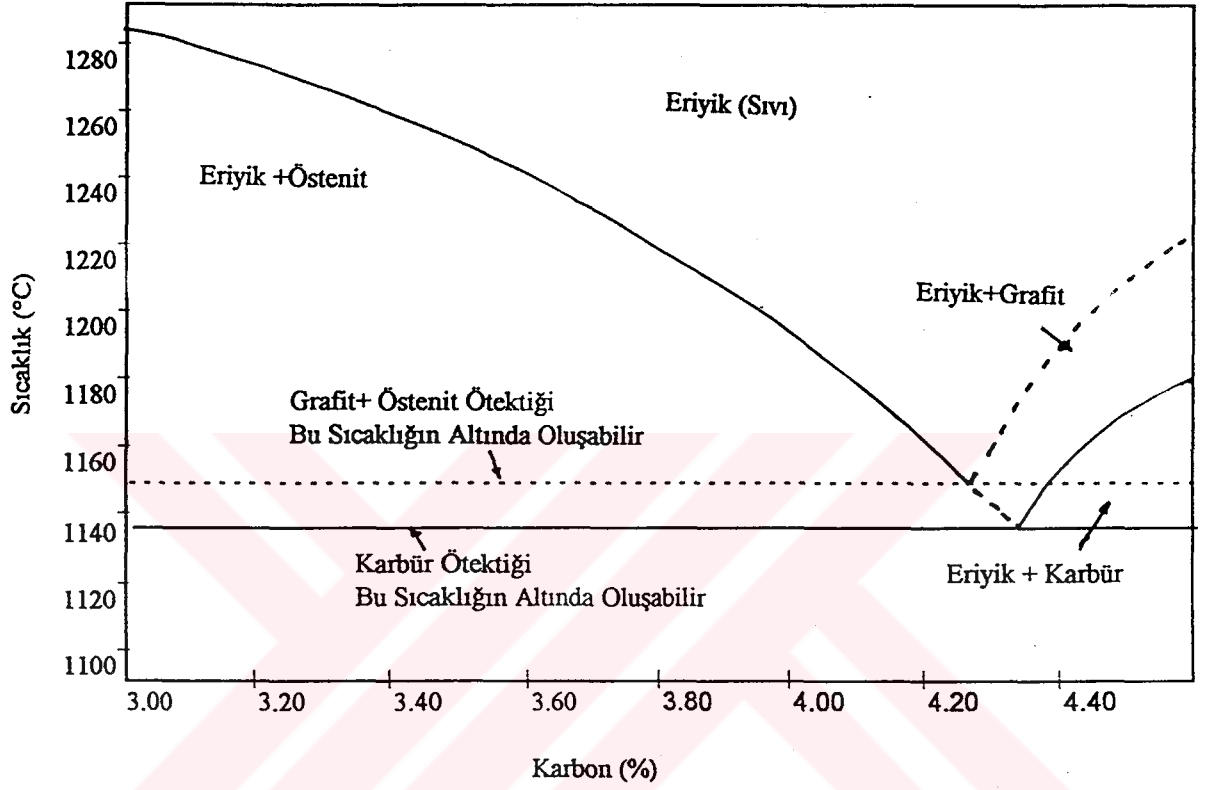
Küresel grafitli dökme demir hem gri dökme demirin, hem de çeliğin mühendislik avantajlarını bir araya getiren bir malzemedir. Şöyle ki: gri dökme demirin düşük ergime sıcaklığı, yüksek akışkanlığı ve işlenebilme kabiliyeti yanısıra, çeliğin yüksek mukavemet, süneklilik ve tokluk özelliğini birarada bulmak mümkündür.

2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Katılma /2,4,7/

Gri ve küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimleri, S ve Mn hariç, temel olarak birbirinin aynı olmasına rağmen, farklı şekilde katılırlar. Bu farklılık özellikle ötektik katılma da daha belirginleşmekte ve her iki dökme demir üretiminde uygulanan işlemlerde değişikliklere neden olmaktadır.

Kimyasal kompozisyon, soğuma hızı ve ergitme işlemine bağlı olarak dökme demirler termodinamik kararlı Fe-FeC veya kararlı Fe-grafit sistemine göre katılır. Şekil 2.1' de Fe-C sistemindeki kararlı ve kararlı sistemler görülmektedir. Grafit ve karbür fazı denge

bölgesinde iki ötektiğe sahiptir (1153-1147°C). Ötektik dönüşüm sıcaklığı ve bileşimi yapıdaki elementlere bağlı olarak değişir.



Şekil 2.1. Demir-Karbon Denge Diyagramı. (— Kararlı Sistem, Demir-Grafit).

Grafit fazı, yapıdaki karbonun grafit şeklinde ayrışması ile ve katılaşmada, sıcaklığın düşüşüyle, karbon çözünürlüğünün azalması sonucu elde edilir. Katılaşma grafitleşmeye izin verilecek şekilde gerçekleştiğinde, 3.2% C ve 2% Si içeren dökme demirde düşük çözünürlüğü olan karbonun çoğu masif karbür yerine, grafit şeklinde oluşur. Grafitleşme karbon ve/veya silisyum miktarı arttıkça kuvvetli bir şekilde artar.

Dökme demirlerde özellikle kullanılan yararlı bir faktör, karbon eşdeğeridir ve yaklaşık olarak Formül (2.1)' deki gibidir.

$$C_{eş} = C \% + (Si \% / 3) \quad (2.1)$$

Daha kesin olarak karbon eşdeğerinin belirlenmesi için, nikel, mangan, fosfor gibi elementlerin de hesaplanması gerekir, ancak etkileri daha az olduğu için gözardı edilmektedir. Karbon eşdeğeri 4.3 olan demir ötektik bileşime sahiptir. Karbon eşdeğeri 4.3' den düşük ise ötektik altı, 4.3' den yüksek ise ötektik üstü olarak isimlendirilir.

Doymuşluk derecesi, kullanılan diğer bir faktördür ve şöyle tanımlanır: Dökme demirlerde elementlerin Fe-C denge diyagramındaki ötektik noktanın kaymasına olan etkisini oransal olarak ifade eden kavramdır. Doymuşluk derecesi şu şekilde formüle edilir:

$$S_c = C_T (\%) / (4.26 - 0.31 Si (\%) - 0.25 P (\%)) \quad (2.2)$$

Dökme demirlerin katılaşması esas olarak demir-karbon-silisyum denge sistemine bağlıdır. Ötektik katılaşma, lamel grafitli dökme demirin ötektik sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda başlar. Bu durumda küre şeklindeki grafitler bir östenit kabuğu ile çevrilidir ve yalnız bir faz (östenit) ötektik sıvı ile temas halindedir ve bu tip katılaşmaya "neoötektik katılaşma" denir. Her bir grafit küresi ve östenit kabuğu bir hücre olarak kabul edilir ve grafit kürelerinin büyüebilmesi için karbonun östenit kabuğundan içeriye doğru yayılması gerekir. Sonuçta katılaşma olayı gri dökme demirinkine nazaran daha yavaş olmakta ve küresel grafitli dökme demirin ötektik katılaşma aralığı 490°C kadar olabilmektedir.

Neoötektiğin büyümesi başladıktan sonra, başka küresel grafit çekirdeklenmesi olmaz; dolayısıyla grafit kürelerinin sayısı katılaşmanın hemen başlangıcında belirlenmiş olmaktadır.

Yalnızca ötektoid sıcaklığına kadar mevcut grafit küreleri üzerine, grafit çökmesi meydana gelir.

Gri dökme demirde olduğu gibi ötektoid sıcaklığından geçerken ki soğuma hızı ve alaşım elementleri, matris yapısını belirlerler. Tamamen küresel yapının eldesinde, uygun küre sayısına ulaşmak gerekir. Küre sayısının az olması karbonun yayımlanabileceği yer sayısının az olması demektir.

Soğuma hızı arttıkça grafit çekirdeklenmesi artar ve grafitler incelir. Yavaş soğuma ile ise karbon difüzyonuna yeterince zaman verildiği için grafit miktarı ve boyutu artar.

2.3. Grafit Oluşumu /4, 5, 15/

Dökme demirlerde, grafitin hangi mekanizma ile küre şeklinde varolduğuna dair çeşitli teoriler söz konusudur. Ancak hala bu konuda ortak fikir birliğine varılmış değildir. Teoriler şöyledir:

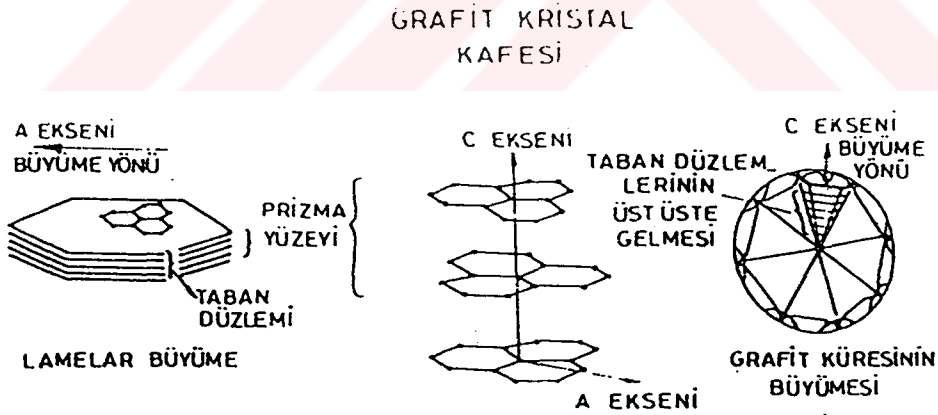
I. Grafitin küre şeklinde büyümesini sağlayan grafit kafes özellikleri ve heterojen çekirdeklenmedir. Bu şekilde heterojen çekirdeklenmeye örnek magnezyumdur. Magnezyumun oluşturduğu heterojen grafit kristalizasyonunda her yönde aynı hızla, yani bir küreyi meydana getirecek şekilde olması nedeni ile küresel tipte grafit elde edilir.

II. Küresel grafit kristalizasyonu, büyüyen grafit dendritlerinin dallanma olasılığının artması ile meydana gelmektedir (Şekil 2.2). Bir küresel grafit kristalinin, lamel biçiminde büyümesi gibi olduğu varsayımından yola çıkılmaktadır. Dallanma olasılığı az ise grafit lamel şeklinde oluşacak, ancak küreselleşmeyi etkileyecek elementlerin varlığı durumunda, dallanma dolayısıyla küreselleşme gerçekleşecektir (Deneysel olarak geçersiz kuram).



Şekil 2.2. Dallanma Frekans Teorisine Göre Bir Grafit Küresinin Büyümesindeki Kademeler.

III. Küreselleşme eriyiğin yüzeysel geriliminin artması ile meydana gelmektedir. Deneysel çalışmalar demir eriyiğinin FeSiMg ile işlem görmesi sonucu, eriyik yüzeysel geriliminin % 30-50 oranında arttığını göstermektedir. Böylece grafit kristal kafesi c-ekseni prizma yönünde büyümektedir. Küresel grafitli dökme demirde ergiyik ile grafit kristali prizma yüzeyi arasındaki sınır yüzey enerjisinin, kafes baz (a) yüzeyi arasındakine nazaran büyük olması ile grafitin baz yüzeyine dik bir yönde büyümesi ile halkalar şeklinde grafit kolonilerinin gruplanması sonucu oluşmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Yüzey Enerjisi Teorisine Göre Grafitin Küresel Formda Büyümesi Olayı.

IV. Gaz kabarcıkları teorisine göre, aşırı doymuş eriyik demirlerde karbon tercihen, eriyik içerisindeki gaz kabarcıklarının oluşumunu hızlandırır. Eğer kabarcıklar karbon tarafından doldurulursa küresel grafitler elde edilecektir. Bu teoriye göre grafitlerin küreselliğinden gaz kabarcıkları sorumludur. Magnezyum kabarcıklarının varlığı; magnezyum ile işlem görmüş saf demirde görülen küresel boşluklar tarafından desteklenmektedir.

2.4. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Matrisin Kontrolü /6/

Küresel grafitli dökme demirlerin yapısında, ana doku içinde dağılmış ve hacmin % 8-10' unu oluşturan grafit küreler vardır. Ana doku ferritik, perlitik, ferritik-perlitik, östenit ve uygulanan ısı işleme bağlı olarak bey nitik veya martenzitik olabilir. Karbürlerin mevcudiyetleri östenitik küresel grafitli dökme demirler hariç mukavemet ve süneklik özelliklerini düşürdüğü için arzulanmaz.

Tablo 2.1' de matris yapısına göre değişen mekanik özellikler görülmektedir. Yapı ferritten perlitte doğru değiştiğinde; çekme dayanımı 412 MPa' dan 784 MPa' a, akma mukavemetide 275 MPa' dan, 490 MPa' a artarken, uzama değerleri % 12' den % 2' e doğru düşüş göstermektedir.

Tablo 2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri ve Yapıları.

Kısa Gösterilişi	Çekme Muk. (MPa)	Akma Muk. (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)	Matris
DDK-40	412	275	12	140-201	Daha Çok Ferritik
DDK-50	490	343	7	170-241	Ferrit + Perlit
DDK-60	588	392	3	192-269	Perlit + Ferrit
DDK-70	686	441	2	229-302	Daha Çok Perlitik
DDK-80	784	490	2	248-352	Perlitik

difüzyonunu engelleyerek perlit oluşturur. Sonuç olarak % 0.05' den fazla kalay içeren yapılarda ferrite rastlanılmaz. Çekme dayancı ve uzama arasındaki optimum kombinasyon için grafitlerin tamamı veya büyük bir kısmı ferrit zarfları ile sarılmalıdır ve bu nedenle kalay miktarı % 0.05 ile sınırlı tutulmalı ve perlitik yapılarda kalay miktarının üst sınırı % 0.1 olmalıdır. Kalay miktarı arttıkça, çekme dayancı artmaksızın uzama değeri düşer.

Üç perlit oluşturucu elementi kıyaslar isek en güvenli bakır, en kuvvetli kalay ve en ekonomik olanı mangandır. Tamamen ferritik matris için bu elementlerden uzak durulmalıdır.

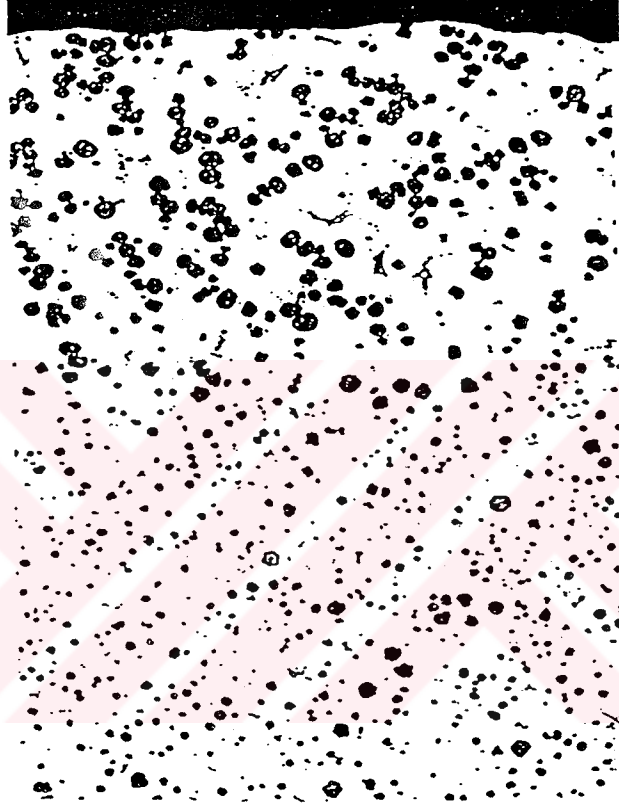
Ferritik yapı arzulandığında silisyum kullanılır, çünkü silisyum ferrit oluşturucu bir elementtir. Düşük alaşımlı dökme demirlerde % 2.6 silisyum ile ferrit miktarı maksimum değere erişir. Aynı zamanda silisyum, ferritik matrisin sertliğini arttırıcı etkiye sahiptir.

2.4.2. Grafit Kürelerinin Şekil ve Dağılımlarının Önemi /6, 15/

Efektif aşılardan ayrı olarak dökme demirin karbon miktarı, yapının özelliklerini ve dökme demirin servis performansını etkileyen en önemli faktördür. Yüksek karbon miktarı karbon eşdeğerini ötektik değerin üstüne çıkarır ve böylece hiperötektik grafit küreleri ayrıştır. Yavaş soğumanın gerçekleştiği kalın kesitlerde, hiperötektik grafit kürelerinin üst kısımda yüzmesine neden olacak kadar, katılma sırasında yeterli süre vardır. Şekil 2.5' de grafit yüzmesi görülmektedir ve yapıdaki bu homojensizlik mekanik özellikler ile aşınma dayanımını olumsuz şekilde etkiler.

Grafit dağılımını, birim hacimde bulunan grafit kürelerinin sayısı şeklinde tanımlayabiliriz. Küresel grafitli dökme demirlerde, kısmende olsa grafit dağılımını etkileyen element silisyumdur. Çünkü silisyum miktarının artması ile küresel grafitlerin sayısında artış gözlenir.

Tamamen küresel formda grafitlere sahip yapının eldesi için, bazı elementlerin tek veya beraberce bulunması gerekmektedir. Bu gruba giren elementler; magnezyum, seryum, kalsiyum, lityum, sodyum, potasyumdur. Magnezyum ve seryum en büyük etkiye sahiptir ve magnezyum ekonomik açıdan en yaygın kullanılanıdır. Magnezyum, alt ve üst ötektik demirlerde grafitin küreselleşmesini sağlar.



Şekil 2.5. Hiperötektik Grafit Nodüllerinin Döküm Yüzeyinde Yüzmesi.

Aşılama ve magnezyum işlemi başarı ile yapılmış dökme demirlerde, bazı elementlerin çok düşük miktarlarda mevcut oldukları durumlarda bile grafit şeklini bozucu etkiye sahiptirler. Hatta grafit şeklini lamelar bile yapacak güçte olabilirler. Bu elementler, kurşun (>% 0.0051), bizmut (>% 0.002), antimuan (>% 0.004) ve titanyum (>% 0.08).

Daha önce de belirtildiği gibi küresel grafitli dökme demirlerde mekanik özellikler temel olarak matrise bağlıdır, ancak bu kabul grafitler küresel ve yapıda uniform dağılıma sahip olduğunda geçerlidir. Grafitin küresel formda ve uniform dağılımda varolmasını sağlayan faktörler ve etkileri göz önünde bulundurulmalıdır.

2.5. Magnezyum İşlemi /2, 6, 15/

Birçok dökümhanede, grafitin küresel oluşumunu sağlamak için magnezyum içeren ferrosilisyum veya nikel-magnezyum kullanılmaktadır. Eğer kükürt miktarı yeteri düşük ise her iki malzeme ile de başarılı sonuçlar elde edilir. Magnezyum işlemi için 1454-1510°C arasındaki sıcaklıklar tercih edilir. İşlem sırasında veya sonrasında ergiyik metal içindeki magnezyum, gerek buharlaşma, gerekse cüruf ve refrakterle girilen reaksiyonlarla kaybolur. Kaybolma hızı, pota boyutları ve şekline, magnezyum ve kükürt miktarına ve ergiyik sıcaklığına bağlı olarak değişebilir.

Uygulanılan prosesin türüne bakılmaksızın, magnezyum işlemi efektif olmalıdır, ideal olarak yapıdaki artık magnezyum miktarı, kükürt miktarı % 0.01' den düşük olduğunda, % 0.04-0.05 kadar olmalıdır. Artık magnezyum miktarı ile grafit şekli bozulmaktadır. Bir çok araştırmada, grafit şeklinin küreselden kompakt grafitte doğru bozulması ile, yapıdaki ferrit-perlit oranı gözönünde bulundurulmadan çekme dayancında ve süneklikte düşüş olduğu gözlenmiştir.

2.6. Aşılama ve Etkileri /6, 14/

Mühendislik uygulamalarında kullanılan dökme demirlerin büyük bir kısmının sahip olduğu grafit formu ve yapısı mekanik özellikleri önemli şekilde etkiler. Dökme demirlerin aşılama işlemi, dökümden hemen önce ergiyiğe ilave edilen, grafit-östenit ve ötektiğinin çekirdeklenmesini sağlayan ilave malzemeler ile yapılır. Genellikle aşılایıcılar silisyumca

zengin ferrosilisyumdur. Aşılama işlemi grafit küre sayısını artırırken, tanelerarası segregasyon ve karbür oluşumunu engeller.

Aşılamanın pratik sonuçlarını şöyle sıralayabiliriz: Karbür oluşumunu önler ve ince kesitlerde, hızlı soğuma etkisi ile karbür oluşumu tehlikesini ortadan kaldırır. Döküm yapısındaki farklılıkları (grafit yüzmesi) azaltır ve böylece işleme problemlerini yok eder.

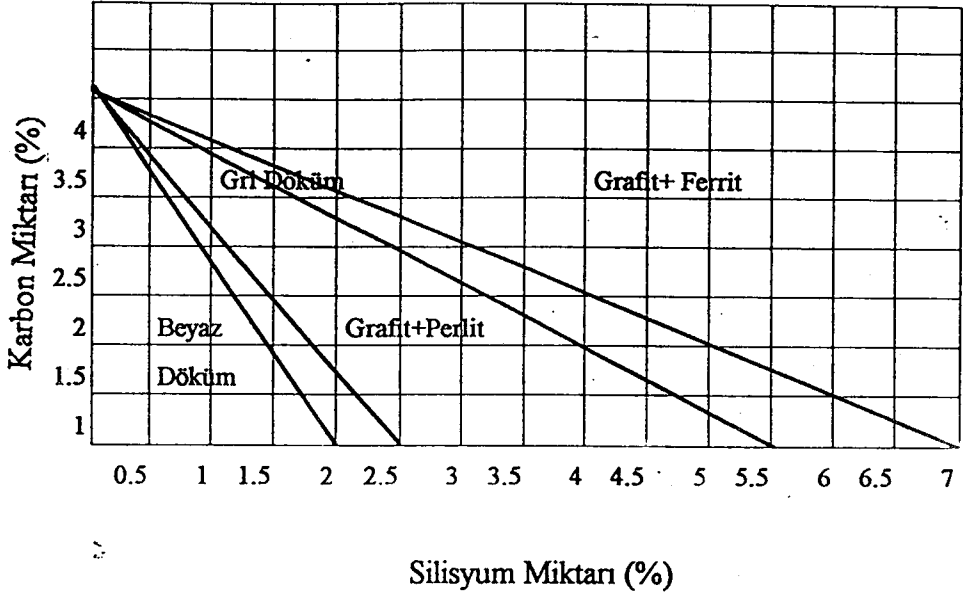
Magnezyum işlemi ve efektif aşılama sonucu çok sayıda, yüksek küreselleşme oranına sahip grafit küreleri elde edilir. Bütün bu oluşumların neticesinde, yüksek mukavemet ve uzama değerleri, plastik alanda segregasyondan kaynaklanan beklenmedik kırılmaları minimize ederek elde edilir.

2.2.7. Kimyasal Analizin Seçimi

2.7.1. Karbon ve Silisyum /2, 6, 7, 8, 9, 12/

Karbon ve silisyum dökme demirlerdeki temel alaşım elemanlarıdır. Karbon, yapıda bağlantılı olarak demirkarbür veya serbest olarak grafitte bulunabilir. Dökme demir yapısında karbon miktarı arttıkça (özellikle % 2' nin üzerinde) grafitleşme eğilimi ve akışkanlık artar.

Karbon ve silisyumun beraber etkileri en iyi şekilde Maurer diyagramı (Şekil 2.6) ile açıklanır. İki elementin toplam bileşimleri belirli bir miktarın altında olduğunda katılaşma sonu beyaz dökme demir oluşur. Bu elementlerden birisi aynı seviyede tutulurken diğeri arttırılırsa yapı beyaz dökme demirden benekli (mottled) yapıya ve gri dökme demire doğru değişir. Ancak diyagram farklı soğuma şartları ve farklı kesitler için geçerli değildir. Büyük kesitlerde gerçekleşen soğuma şartlarında eğriler sola doğru, ince kesitlerde ise sağa doğru kayar.



Şekil 2.6. Maurer' e Göre Dökme Demir Diyagramı.

Karbon ve silisyum, karbür miktarını azaltmakta ve bu nedenle üst sınırlarda kullanılmaktadır. Bu elementlerin miktarı, karbonun ergiyikte çözünebilme yeteneği ve silisyumun süneklilik ve ısı iletkenlik katsayısını düşürmesi ile sınırlıdır.

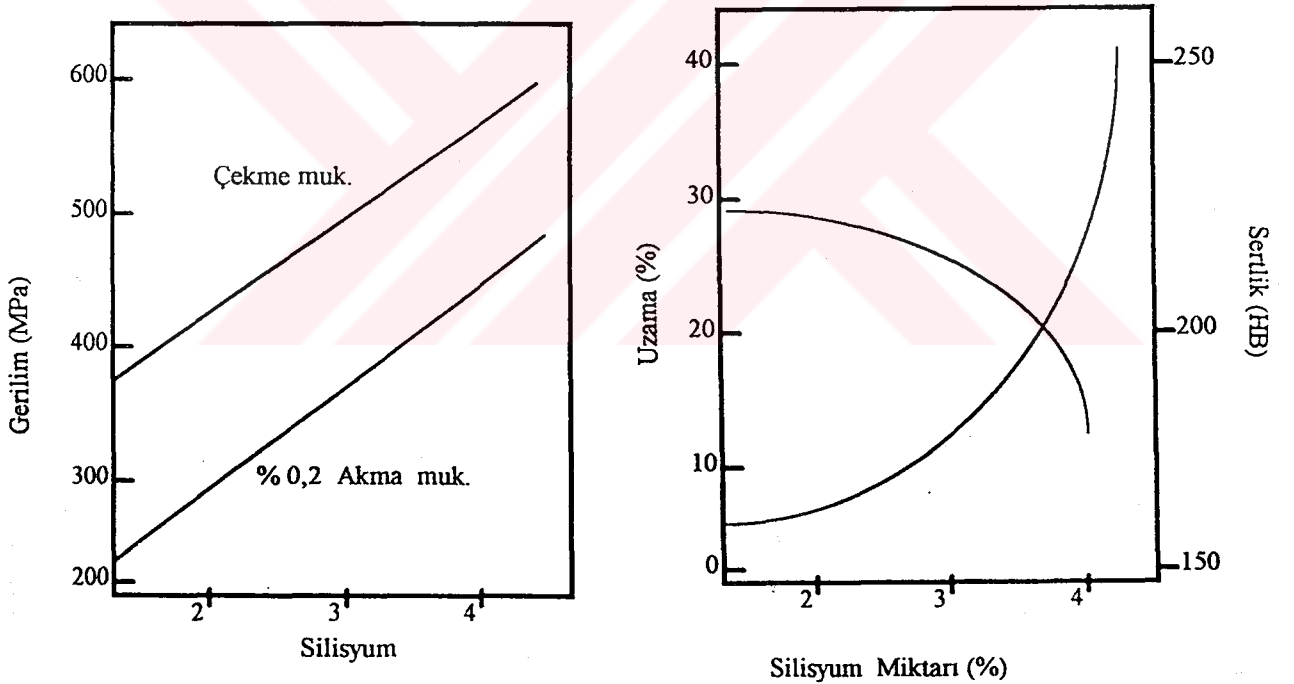
Karbon miktarının yükselmesi ile grafit kürelerinin hacimsel miktarı ve küre sayısı artar. Birçok dökme demirde karbon miktarı ve küre sayısının yükselmesi ile ferrit miktarı artmaktadır.

Ferritik dökme demirlerde; karbon miktarı azaldıkça çekme mukavemeti ve sertlikte az bir artış ve uzama değerlerinde önemli derecede düşüş gözlenir (Tablo 2.3). Bu nedenle yüksek süneklilik arandığında karbon miktarı düşük tutulmalıdır. Perlitik dökme demirlerde, % 3.4-3.8 arasındaki karbon miktarlarında mekanik özelliklerde önemli bir değişiklik görülmez.

Grafitleşme yani stabil sisteme göre katılaşmayı arttıran element silisyumdur. Genel olarak küresel grafitli dökme demirlerde % 2-2.8 miktarlarında kullanılır. Eriyikte karbonun aktivitesini artırır ve grafit ayrışmasını kuvvetlendirir. Ötektik bileşimi daha düşük karbon değerine kaydırır. Silisyum kararlı ötektik sıcaklığını yukarı çekerken, yanıkaraklı ötektik sıcaklığı aşağı çekerek, ötektik sıcaklıklararası farkı artırır ve böylece kararlı sistemde katılaşmayı teşvik eder.

Silisyumun yukarıda bahsedilen grafitleştirici ve küre sayısını arttırıcı etkisinin yanısıra % 4 miktarına kadar mukavemet değerlerini ve sünekliliği arttırıcı etkisi sözkonusudur.

Ferrit oluşturuucu bir element olan silisyum miktarının artışı ile çekme ve akma mukavemeti düşerken uzama miktarı artar (Şekil 2.7).



Şekil 2.7.Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Silisyumun Etkisi.

Silisyum ferritin sertliğini ve mukavemetini arttırıcı etkiye sahiptir, fakat yüksek silisyum miktarları gevrek kırılmalara neden olur. Tamamen perlitik yapı mevcut ise silisyum miktarının artması ile yapının plastik deformasyona dayancı da artar.

Alaşımız veya az alışımlı küresel grafitli dökme demir için önerilen karbon ve silisyum oranları Tablo 2.3' de verilmektedir.

2.7.2. Mangan /6, 7/

Mangan kuvvetli perlit oluşturan bir alışımlı elementidir. Karbürlerin yapıda mevcudiyetini engellemek için mangan miktarı minimum % 0.4, ferritik matris için % 0.1' den az, perlitik matris için % 1.2' den fazla olmalıdır.

Mangan kükürdün kötü etkilerini dengeleyebilmek için kullanılır. Eğer yapıda mangan bulunmaz ise tane sınırlarında arzulanmayan 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. Mangan miktarı % 0.4 olan eriyikte, son katılaşılan kısımda mangan miktarı % 2.5' dir. Manganın karbür yapıcı etkisi, parça kesitine bağılı olarak silisyumun seçilmesi ile indirgenebilir.

2.7.3. Magnezyum /14/

Grafitin küresel formda olması için gerekli magnezyum miktarı % 0.02' den fazla olabilir. Eriyikteki kükürt ve oksijeni gidermek amacı ile kullanılır. İhtiyaç duyulanın üzerinde magnezyum miktarı grafit şeklini bozucu ve küre sayısını azaltıcı etkiye sahiptir.

Tablo 2.3. Alaşimsız ve Alaşımlı Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Karbon ve Silisyum Oranları İçin Genel Öneriler.

Kesit Min.	Kalınlığı (mm) Max.	Perlitik Yapı		Ferritik Yapı	
		TC (%)	Si (%)	TC (%)	Si (%)
0.64	0.64	3.90	3.25	3.75	3.75
	1.27	3.70	3.25	3.55	3.75
	2.54	3.40	3.25	3.25	3.75
	5.08	3.25	3.25	3.10	3.75
	7.62	3.20	3.25	3.05	3.75
	>10.16	3.20	3.25	3.05	3.75
1.27	1.27	3.85	2.75	3.70	3.25
	2.54	3.55	2.75	3.40	3.25
	5.08	3.40	2.75	3.25	3.25
	7.62	3.35	2.75	3.20	3.25
	>10.16	3.35	2.75	3.20	3.25
2.54	2.54	3.60	2.50	3.50	3.00
	5.08	3.45	2.50	3.35	3.00
	7.62	3.40	2.50	3.30	3.00
	>10.16	3.40	2.50	3.30	3.00
5.08	5.08	3.60	2.10	3.40	2.75
	7.62	3.55	2.10	3.35	2.75
	>10.16	3.55	2.10	3.35	2.75
7.62	7.62	3.60	2.00	3.40	2.50
	>10.16	3.60	2.00	3.40	2.50
>10.16	10.16	3.60	2.00	3.40	2.50

2.7.4. Kükürt /6/

Kükürt miktarı azaldıkça, küreselleştirici olarak kullanılan FeSiMg miktarı düşer ve magnezyumun etkisi daha uzun sürer. Bu nedenle kükürt miktarı maksimum % 0.03 olmalıdır, ayrıca kükürt miktarının alt sınırı karbür oluşumu nedeni ile % 0.004 olarak alınmalıdır. Mn/S oranı ferritleşme eğilimini etkiler ve mangansülfür, grafit oluşumunda çekirdek görevi görür.

2.7.5. Fosfor /13/

Pratikte fosfor maksimum % 0.04 alınmalıdır, çünkü fosfor süneklik, plastik şekil değiştirme ve kaynaklanabilirlik özelliklerini olumsuz etkiler. Çözünürlük sınırı % 0.08' in üzerinde çok sert demir-karbon-fosfor ötektiği oluşur.

Çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve sertlik değerleri artan fosfor miktarı ile artış sergilerken, uzama değerinde oldukça büyük düşüşler gözlenir (Tablo 2.4).

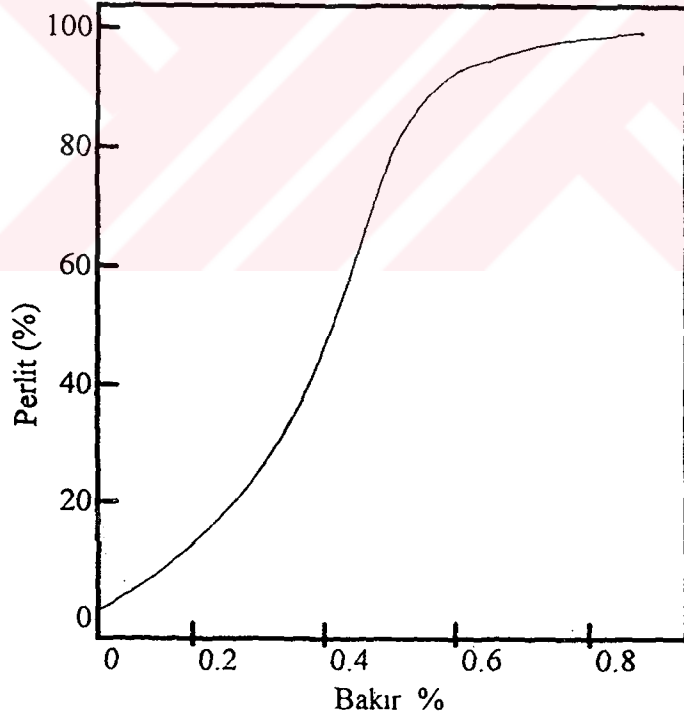
Tablo 2.4. Kalın Kesitli Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Fosfor Miktarının Mekanik Özelliklere Etkisi

	Akma Muk. (MPa)	Çekme Muk. (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)
Düşük Fosfor (0.015 %)	284	423	19	144
Yüksek Fosfor (0.069 %)	342	404	2	175

2.7.6. Bakır /6, 8, 11/

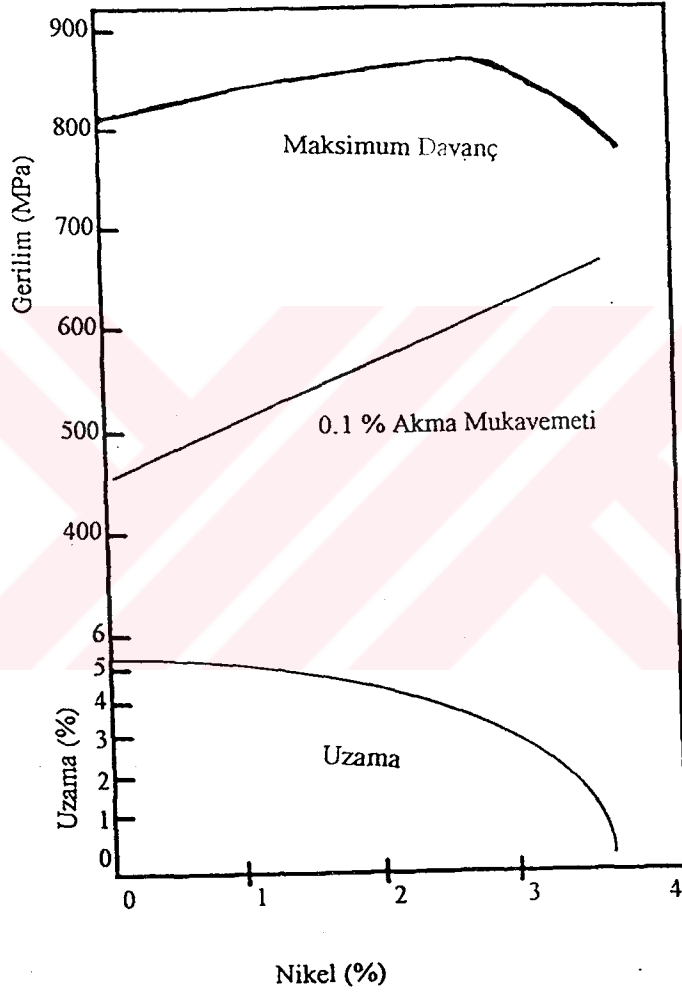
Bakırın ergiyik dökme demirdeki çözünürlüğü yaklaşık % 3.5 ile sınırlıdır ve daha fazla bakır miktarlarında, yapıda çözünmemiş bakır küreleri şeklinde bulunur. Bakırın demirdeki çözünürlüğü magnezyum miktarı ile düşer, % 0.08 fazla magnezyum değerlerinde bakırın % 1.5 gibi miktarlarında yapıda serbest bakır partikülleri gözlenir. % 3 bakır değerlerine kadar grafit şekline hiçbir olumsuz etkisi yoktur. Ancak bakırın varlığı, titanyum ve kalay gibi lamel grafit formu oluşturan ve mekanik özellikleri negatif yönde etkileyen elementlere karşı dökme demirleri daha hassas duruma getirir.

Bakır grafitleştirici bir element olup küresel grafitli dökme demirlere ilave edildiğinde özellikle ince kesitlerde ötektik karbür oluşum eğilimini azda olsa düşürür. Bakır miktarı yükselirken, yapıdaki perlit miktarı artar (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Bakır İlavesinin Perlit Miktarına Etkisi.

Bakır nedeni ile artan perlit miktarına bağı olarak, sertlik, çekme ve akma dayanımı artarken süneklilik düşer (Şekil 2.9). Yapı tamamen perlitik olduğunda, bakır ilavesi ile mekanik özelliklerin artış oranı azalacaktır. Yüksek bakır miktarlarında yapı kırılganlaşır, akma değeri artar ve çekme ile sertlik değeri düşer. Küresel grafitli dökme demirlerde bakır miktarı diğer alaşım elementleri ve kesite bağı olarak seçilir.



Şekil 2.9. Nikel Miktarının Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Mekanik Özelliklere Etkisi.

2.7.7. Nikel /10/

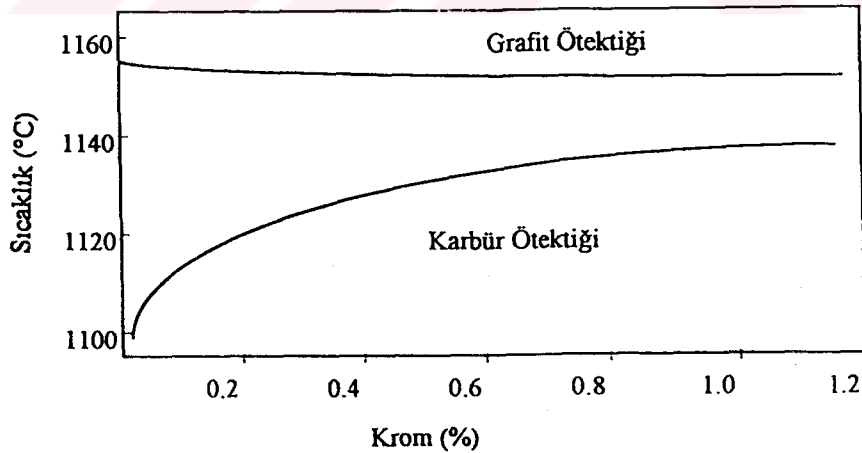
Nikel ergiyik ve katı halde küresel grafitli dökme demirlerde tamamen çözünebilir. 1% nikel artışı ile ergiyikteki karbonun çözünürlüğü % 0.05 düşerken grafit-östenit ötektik sıcaklığı 3-4°C yükselir ve östenit-ferrit dönüşüm sıcaklığı 22°C azalır.

Nikel, silisyumun grafitleştirici etkisinin dörtte birine sahiptir ve özellikle ince kesitlerde karbür oluşumu riskini azaltır. Döküm halindeki küresel grafitli dökme demirlerde perlit oluşumunu teşvik eden elementlerdendir ancak etkisi bakır ve mangandan daha azdır.

Tamamen ferritik yapının arzulanmadığı haller dışında, % 0.75' den düşük nikel miktarlarında perlit oluşturma etkisi önemsizmeyecek derecede azdır. Nikel miktarı artışı ile sertleşebilirlikte artar. Şekil 2.9' da nikel miktarının özelliklere etkisi görülmektedir.

2.7.8. Krom /5,8/

Krom, silisyumun iki ötektik arasındaki sıcaklık farkını arttırıcı etkisinin tam tersine, iki ötektik arası sıcaklık farkını azaltıcı etkisi ile karbür oluşumunu teşvik eder (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Kromun Ötektik Katılma Sıcaklığına Etkisi.

2.8. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri /5, 6, 7, 8/

Mühendislik malzemeleri içinde küresel grafitli dökme demirlerin özel yeri, başka hiç bir demir esaslı malzemenin, aynı mekanik özellikleri ve dökülebilirlik özelliğini bir arada sağlayamamasından kaynaklanmaktadır.

Grafitin yapıda küresel formda bulunduğu küresel grafitli dökme demirlerde, grafit küreleri etrafındaki gerilim konsantrasyonu düşüktür ve mekanik özellikleri matrise bağlıdır. Kırılma öncesi yaklaşık % 1 uzayan gri dökme demirin tersine, küresel grafitli dökme demir kırılma öncesi plastik deformasyon ve % 2-25 uzama göstermektedir. Döküm hali ile veya tavllanmış durumda ferritik yapının sertliği ve mukavemeti, uzama değeri ile ters orantılıdır. Isıl işlemlerle yüksek mukavemetli matrisler elde edilebileceği gibi, sünekliğin ve dayanımın artırılması da mümkündür.

Genellikle küresel grafitli dökme demirler, döküm halleri ile kullanılır ve bunlar çoğunlukla perlitik-ferritik yapılardır. Perlitik yapının mekanik özellikleri Tablo 2.6' da verilmiştir. Ferritik matris; şarj malzemesi olarak saf pik dökme demir kullanıldığında döküm şartlarında elde edilir. Ancak genelde ferritik matris ısıl işlem ile üretilmektedir. Ferritik yapının elde edildiği ısıl işlemde, yaklaşık 900°C' de östenit alanında belirli bir süre bekletilip kalan perlitin ferrite dönüştüğü 690°C'e kadar fırında ve takiben oda sıcaklığına kadar yavaş soğutulur. Ferritik matrisin özellikleri Tablo 2.5' da verilmiştir.

Tablo 2.5. Ferritik ve Perlitik Mikroyapıların Mekanik Özelliklere Etkisi.

Mikroyapı	Ferritik	Perlitik
Çekme Muk.,(MPa)	370-500	650-750
Akma Muk. (0.1), (MPa)	221-323	360-410
Sertlik (HB)	116-170	239-255
Uzama (%)	25-12	5-1

Küresel grafitli dökme demirin işlenebilirliği, eşdeğer sertlikteki gri dökme demirden ve eşdeğer mukavemete sahip çelikten daha iyidir. Ayrıca korozif ortamlarda aşınmaya direnci gri dökme demire eş ve genellikle karbon çeliğinden daha iyidir.

Küresel grafitli dökme demirlerde kesitin özellikler üzerine etkisi gri dökme demire nazaran daha azdır. Ancak, kesit boyutunun, katılaşmada soğuma hızını etkilemesi sonucu, bileşime de bağlı olarak, ferrit ve perlitin sertliği ve yapıdaki perlitin oranı ve tane büyüklüğü değişmektedir. Yüksek mukavemet ve sertlik, dolayısıyla düşük süneklilik, ince perlitik veya beyritik matris ile elde edilir. Buna karşılık, mukavemet ve sertlikteki azalma ile beraber yüksek süneklilik, matrisin tamamen ferritik olması ile mümkündür.



3. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir

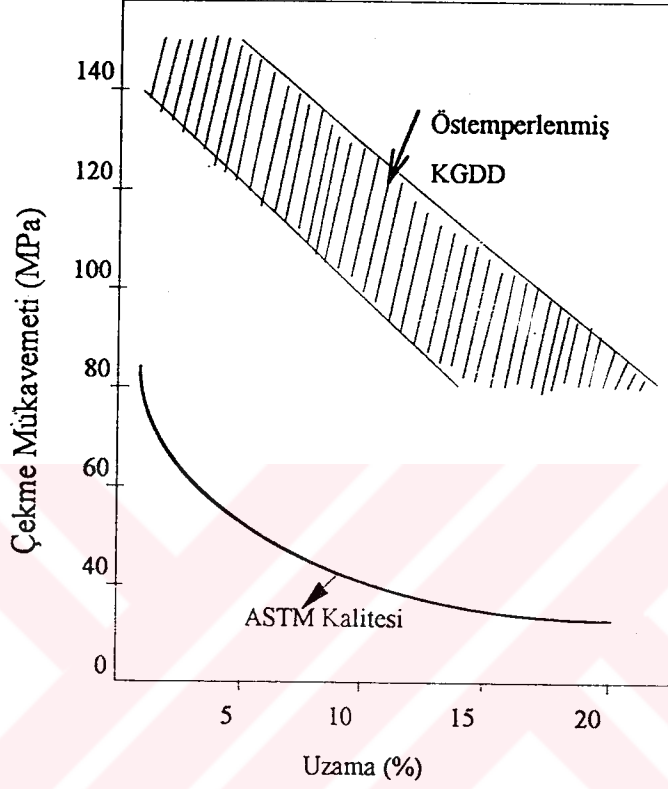
3.1. Giriş /23, 24, 25, 26, 27/

1930 ve 1940 yılları arasında, metalurjistler gri dökme demire kalıpta soğuma süresince Ni, Mo, Cu, Mn gibi alaşım elementlerinin ilavesi ile γ -perlit dönüşümünü kısmende olsa engelleyerek yüksek mukavemetli gri dökme demirler elde etmişlerdir. Bu dökme demirlerde nihai yapı; beynit, martenzit ve kalıntı östenitten meydana gelir. Beynitik dökme demirler yüksek mukavemet ve tokluk yanısıra, yüksek aşınma dayanımı sergilerler ve bu özelliğin nedeni yapıdaki östenitin yüksek deformasyon karakteridir. Beynitik dökme demir üretiminin sınırlı olmasının nedenlerinden en önemlisi, soğuma hızındaki en küçük bir değişimin nihai yapıda büyük farklılıklar meydana getirmesi ve mekanik özellikleri etkilemesidir.

1970 yılının ortalarında Johansson Kymi Kymimene' de östemperleme işlemi sonucunda beynitik mikroyapıya sahip yeni bir küresel grafitli dökme demir geliştirmiştir. % 30-40 kadar kalıntı östenit içeren bu dökme demirlerde hem çekme mukavemetinin hemde sünekliğin yüksek olduğu gözlenmiş, bunun yanısıra yorulma mukavemeti ile aşınma direnci sonuçlarında hayret verici şekilde iyi olduğu gözlenmiştir. Yapılan deneylerde % 40 daha iyi neticeler elde edilmiştir.

Alaşım elementleri ilavesi ve sürekli soğuma ile elde edilen beynitik dökme demirlerin yüksek mukavemet göstermeleri yanısıra, östemperleme yolu ile elde edilen beynitik yapılı dökme demirler hem daha yüksek mukavemet hemde yüksek tokluk özellikleri göstermişlerdir. Şekil 3.1' de çeşitli küresel grafitli dökme demirlerin mukavemet ve süneklik açısından karşılaştırmaları yapılmıştır.

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir (ÖKGDD) aynı mukavemete sahip standart dökme demirlerin tokluğundan iki kat daha fazla olan dökme demirlerin yeni bir sınıfını oluşturmaktadır.



Şekil 3.1. Çeşitli Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mukavemet ve Yüzde Uzama İlişkileri.

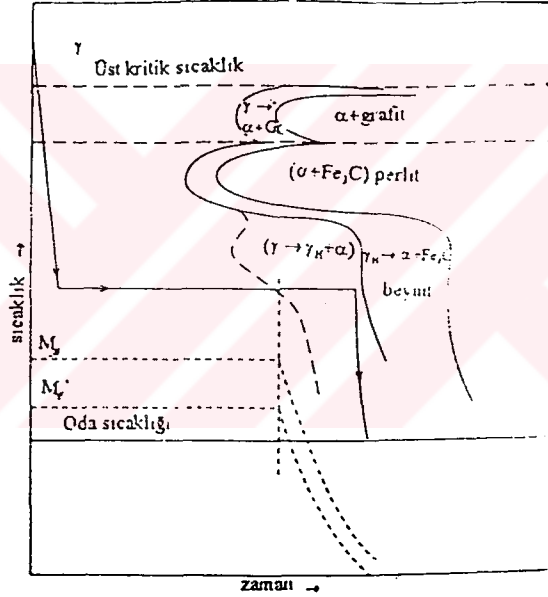
Genelde, konvansiyonel olarak östemperlenmiş çeliklerde beynitik ferrit ve demir karbürden oluşan bir mikroyapı söz konusudur. Halbuki östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde yapı, beynitik ferrit ve yüksek karbonlu östenitten oluşur.

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde yapı, ferrit ve östenit karışımıdır. Yapıdaki östenit iki şekilde oluşabilir; bulardan ilki beynitik ferrit oluşumu ile ilgili olan karbonca

zengin östenittir, ikincisi ise tanelerarası bölgelerde görülen dönüşmemiş östenittir ve istenmez. Karbonca fakirleşen östenit kararlı bir faz değildir.

3.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Östemperlenmesi /27, 28/

Östemperleme uygun bir östenitleme sıcaklığına (850-900°C) ısıtma, daha sonra beynit dönüşüm bölgesinde (250-450°C) sabit sıcaklıktaki ortamda su verme ve burada dönüşümün oluşması için yeterli süre tutma şeklinde yapılır. Alaşımsız küresel grafitli dökme demirler için bu olay şekil 3.2' de görülmektedir.



Şekil 3.2. Alaşımsız Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Şematik İzotermal Dönüşüm Diyagramı.

Östemperleme sıcaklığına su verme işlemi perlitik veya ferritik dönüşüme meydan vermeyecek ölçüde hızlı olmalıdır.

3.2.1. Östenitleme Sıcaklığı ve Süresi /27, 29, 31/

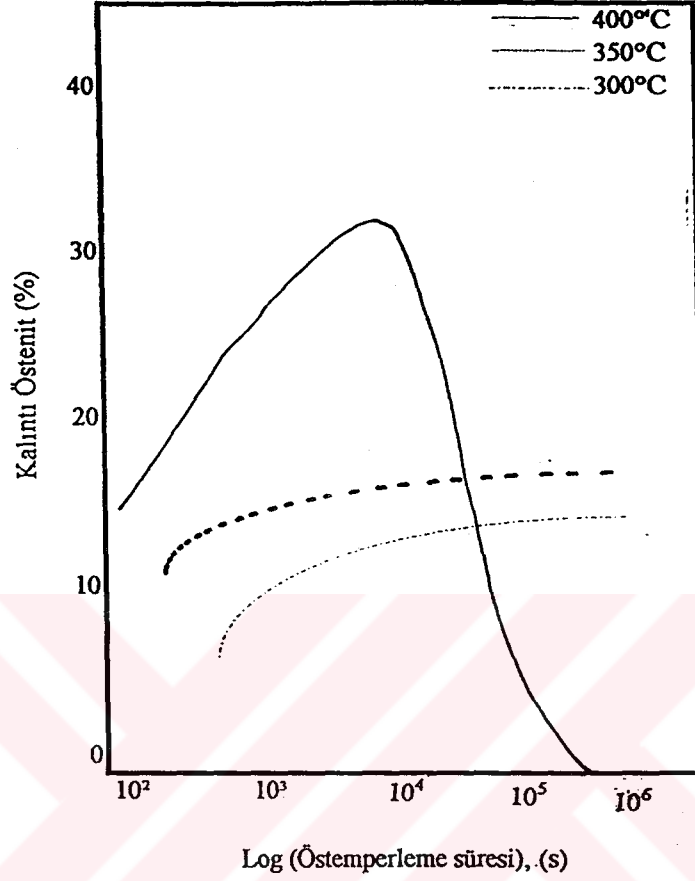
Östenitleme sıcaklığı 815-915°C sıcaklıkları arasındadır. Yüksek östenitleme sıcaklığı beynit reaksiyonun kinetiğini etkiler, artan sıcaklık ile matriksin karbon içeriği artar ve östenit tane boyutu büyür.

Alaşım elementlerinin östenit karbon içeriğini etkilediği bilinmektedir. Arayer elementleri matriks karbonunu azaltabilir veya arttırabilir. Aynı şekilde beynit reaksiyonunun hızını ve derecesini de etkiler arayer elementlerinden silisyum karbonun yapıda çözünebilirliğini azaltırken mangan, krom ve molibden arttırır.

Genelde artan östenitleme sıcaklığı, östemperleme dönüşümünü geciktirir, optimum östemperleme sıcaklığını düşürür ve proses aralığının boyunu daraltır. Dolayısı ile, denge karbon içeriğini östenitleme sıcaklığıyla arttırma yoluna gitmek yerine, östenitleme süresiyle kontrol etmek yoluna gidilmesi tavsiye olunmaktadır.

Östemperleme sıcaklığı ve süresi beynit oluşum morfolojisinin yanısıra matriksteki toplam karbon içeriği ile kalıntı östenit miktarını da etkilemektedir.

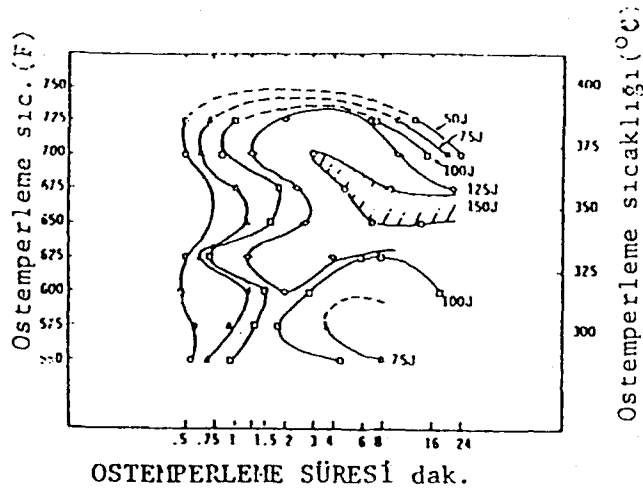
Östemperleme süresi çok kısa olduğu zaman, dönüşmemiş östenit düşük karbon içeriği yüzünden havada soğuma sırasında kısmen martenzite dönüşür ve kalıntı östenit miktarında azalma görülür. Östemperleme süresi artarken dönüşmemiş östenitin karbon içeriği de artar ve sonuç olarak büyük miktarda östenit havada soğuma sırasında martenzite dönüşmeksizin kalır. Östemperleme süresi daha fazla arttığı zaman karbonca beynitik ferrit ve karbüre ayrışır. Böylece kalıntı östenit miktarı ilkinde maksimuma ulaşırken, artan östemperleme süresiyle azalma gösterir. Kalıntı östenit miktarı östemperleme sıcaklığı ile de ilgilidir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Çeşitli Sürelerde 300, 350, 400°C' de Östemperlemeden Sonra Kalıntı Östenit Miktarındaki Değişim.

Östemperleme sıcaklığı azalırken ferritin çekirdeklenme hızının artışı ile karbon difüzyonunun hızı aniden azalır.

Janowak ve Gundlach en uygun östemperleme proses aralığını bulmak için darbe tokluğu deneyinden yararlanmışlardır. Şekil 3.4' den de görülebileceği gibi taralı bölge min 150 J darbe tokluğunda malzeme üretmek için gerekli proses aralığını göstermektedir.



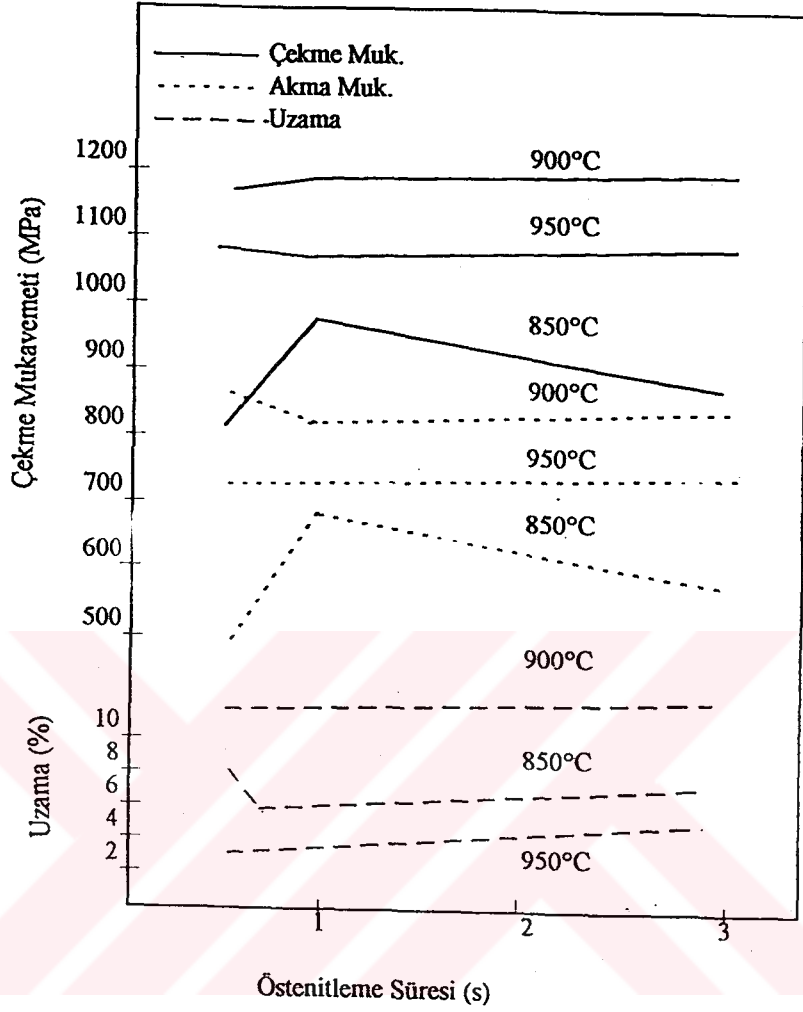
Şekil 3.4. Östemperleme Sıcaklığı ve Süresinin Fonksiyonu Olarak Proses Aralığının Değişimi.

357 ve 371°C sıcaklıkları arasında gevreklik reaksiyonunun hızlanması yüzünden daralmaktadır. Fakat 343 ve 357°C sıcaklıkları arasında yüksek miktarda kararlı östenit elde edilebilir.

3.3. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri /28, 29/

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri geniş bir aralıkta değişim gösterir. Özellikler, esas olarak östemperleme sıcaklığına ve süresine bağlı olarak değişmektedir. Proses değişkenlerinin etkisi aşağıdaki bölümlerde ele alınmıştır.

Alaşsız küresel grafitli dökme demirlerde östenitleme sıcaklığı ve süresinin mekanik özellikler üzerine olan etkisini gösteren diyagramlar şekil 3.5' de verilmiştir. Başlangıçta, ferritik döküm yapısına sahip malzeme 350°C' de 1 saat östemperleme işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.5: 375⁰C' de 1 Saat Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Mekanik Özellikleri Üzerine Östenitleme Sıcaklık ve Süresinin Etkisi.

Maksimum çekme ve % 0.2 akma mukavemeti 900⁰C' deki östenitleme şartlarında elde edilirken, 950⁰C' de bu bu değerlerde bir düşüş gözlenmiş ve her iki sıcaklıkta da östenitleme süresinin önemli bir etkisi gözlenmemiştir. 850⁰C' de östenitleme işlemi 1 saat kadar yapıldığında maksimum bir değere erişilmiş ise de sonuçlar 900⁰C ve 950⁰C' de elde edilen

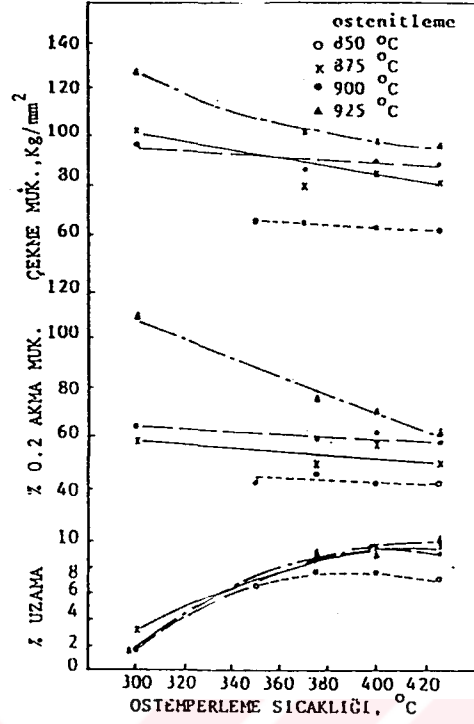
değerlerin altında kalmıştır. 850°C' de çekme ve % 0.2 akma mukavemetinin östenitleme sıcaklığı ile önce artıp sonra düşmesinin nedeni açıklanamamıştır.

Maksimum yüzde uzama değerine de 900°C' de erişilmiş olduğu halde minimum değerlerin 950°C' de elde edildiği görülmektedir. Her iki sıcaklıkta da östenitleme süresinin önemli bir etkisi görülmemekte, 850°C' de östenitleme süresine bağlı olarak uzama değerlerinin önce azalmakta, daha sonra da artma gösterdiği anlaşılmaktadır.

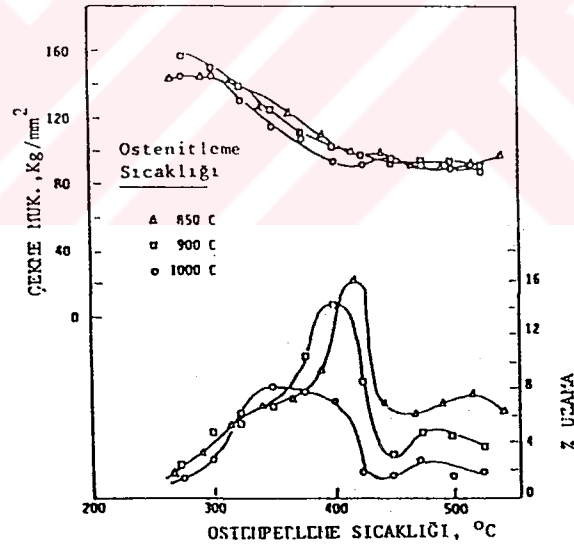
Yapılan diğer bir çalışmadan östenitleme sıcaklığı ile çekme mukavemetinde önemli bir değişme olmadığı ve östemperleme sıcaklığının artışıyla azalma gösterdiği anlaşılmaktadır (Şekil 3.6).

Bunun yanısıra, sünekliliğin östenitleme sıcaklığına bağımlı olduğu ve maksimum sünekliliğin 850°C' de östenitleme işlemi ile elde edildiği görülmektedir.

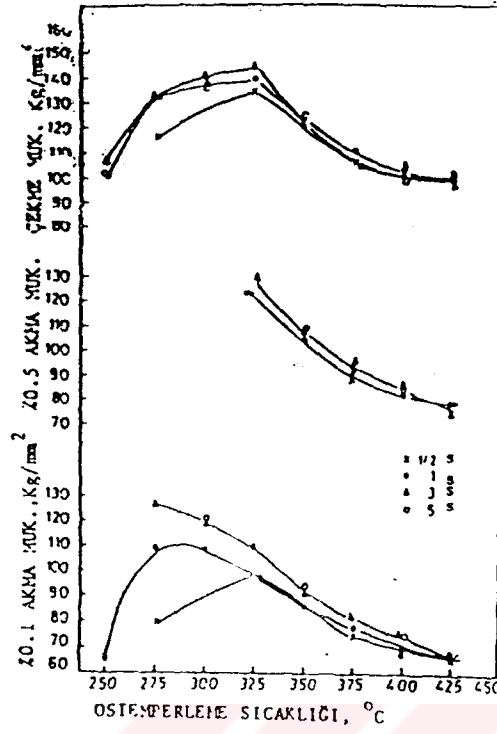
Harding' in yaptığı çalışmada ise, çekme mukavemetinin östenitleme sıcaklığına bağlı olduğu ve sıcaklıkla bir artma gösterdiği, sünekliliğin ise östenitleme sıcaklığı ile önemli bir değişme göstermediği anlaşılmaktadır (Şekil 3.7).



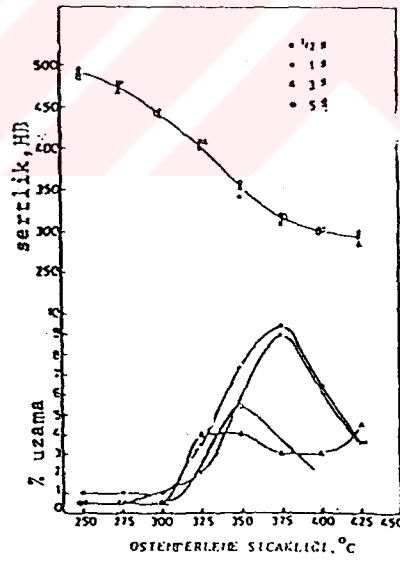
Şekil 3.6.: Östenitleme ve Östemperleme Sıcaklığının Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi.



Şekil 3.7: Östenitleme ve Östemperleme Sıcaklığının Değişimi ile Mekanik Özelliklerin Değişimi.



Şekil 3.8: Östempereleme Sıcaklığı ve Süresinin Mekanik Özellikler Üzerine Olan Etkisi.



Şekil 3.9: Östempereleme Sıcaklığı ve Süresinin Yüzde Uzama ve Sertliğe Etkisi.

Alaşımız küresel grafitli dökme demirlerde östemperleme sıcaklık ve zamanının muhtelif mekanik özellikler üzerine olan etkisi şekil 3.8' de verilmiştir. Görüleceği üzere, çekme mukavemeti, akma dayanımı, sertlik ve yüzde uzama miktarı gibi özellikler 250°C ile 425°C arasında yapılan çalışmalarda östemperleme sıcaklığına bağlı olarak önemli değişiklikler göstermektedir. Şekil 3.9, çekme dayanım-sıcaklık eğrisinden maksimum mukavemetin 325°C' de elde edildiği anlaşılmaktadır. % 0.1 akma gerilmesi ise zamana bağlı olarak maksimum değere 275-325°C sıcaklık aralığında erişmektedir. Yine, 250-425°C sıcaklık aralığı ele alındığında sertlik, zamandan bağımsız olarak sıcaklıkla birlikte sürekli bir azalma sergilemektedir. Malzemeye maksimum sünekliliğin, östemperleme süresine bağlı olarak 325-375°C sıcaklık aralığında östemperleme sonucu kazandırıldığı anlaşılmaktadır.

3.4. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması /30, 33/

Amerika Birleşik Devletlerinde 4 tür östemperlenmiş dökme demir esas alınmıştır; bunlardan ADI 1 (austempered ductile iron), en düşük mukavemet ve en düşük sünekliliğe sahip olanı iken ADI 4 en yüksek mukavemete ve en düşük sünekliliğe sahip olandır.

George Fischer sınıflandırmasında da 4 çeşit östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir bulunmakta olup bu sınıflandırmada minimum çekme mukavemeti esas alınmıştır.

BCIRA sınıflandırmasında 3 tür östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir mevcuttur. Sınıflandırmanın temelinde minimum çekme mukavemeti ile minimum uzama değerleri yatmaktadır. Bu sınıflandırmalar tablo 3.1' de toplu olarak görülmektedir.

Tablo 3.1. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması.

U.S.A. Sınıflandırması	ADI 1	ADI 2	ADI 3	ADI 4
Min. Çekme Muk. (MPa)	862	1034	1207	1379
Min. %0.2 Akma Muk.(MPa)	586	689	827	965
Min Uzama (%)	10	7	4	2
G.Fisher Sınıflandırması	GF 90	GF 120	GF 140	GF 100
Min. Çekme Muk. (MPa)	850	1200	1400	1000
Min. %0.2 Akma Muk.(MPa)	600	950	1200	-
Min Uzama (%)	5-12	2-5	1-2	-
BCIRA Sınıflandırması	ADI 950/6	ADI 1050/3	ADI 1200/1	
Min. Çekme Muk. (MPa)	950	1050	1200	
Min Uzama (%)	6	3	1	
Castuf Sınıflandırması	Castuf 1	Castuf 2	Castuf 3	Castuf 4
Min. Çekme Muk. (ksi)	120	140	160	180
Min Uzama (%)	9	6	4	3

3.5. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları /34, 35, 36/

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler daha iyi mekanik özellikler göstermelerinden dolayı birçok alanda kullanılmakta ve kullanılması düşünülmektedir. Dişli yapımında oldukça yaygın olarak kullanılan dövme yada yüzey sertleştirilmiş çeliklerin yerine bu yeni malzemenin kullanılması büyük ilgi uyandırmıştır. Bunun yanısıra krank mili gibi yüksek mukavemetli parçalar ve iş makinelerinin kepçe ve palet gibi aşınan parçalar da bu tür malzemelerden imal edilmektedir. Dişli olarak kullanıldığında çeşitli avantajlara sahip olduğu görülmüştür. Bunlar;

A) Teknik Avantajlar:

1. Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir çeliğe kıyasla % 10 daha hafiftir.
2. Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir dişliler, çelik dişlilerden daha sessiz çalışmaktadır. Çünkü yapısındaki grafit sönüm kapasitesinin yaklaşık % 40 artmasını sağlar.
3. Grafit aynı zamanda, sürtünme direncinin gelişmesine yardım etmektedir.
4. Küresel grafitli dökme demirin çelikten daha az çentik duyarlılığı vardır ve bu yüzden yüzey hatalarının etkisi azalmaktadır.

B) Ticari Avantajlar

Teknik avantajların yanısıra birçok ticari avantajlarının da olduğu görülmüştür. Bunlar;

1. Hammadde olarak çelik, dökme demire oranla oldukça pahalıdır.
2. Isıl işlem görmeden önce dahi küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirlikleri tavllanmış çelikten oldukça iyidir. Bu nedenle pahalı bir işlem olan işlemede takım masrafı ve işleme süresi azalmaktadır.

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde görülen bu avantajlar birçok sanayi sektörünün de ilgisini çekmiş ve önceden dökme demirlerin kullanılmasının uygun olmadığı belirlenen birçok alanda kullanılmaya başlanılmıştır. Kullanım alanları ve kullanılan parça tipleri şöyledir:

1. Madencilik: pervane ve pompa karteri, maden vagon tekerleri, haddeler ve zincir baklaları.
2. Tarım ve Ormancılık: pulluk, pulluk bıçakları ve kepçeler.
3. Makina: kılavuzlar, taşıyıcı silindirler, bıçaklar, tirbün kanatçıkları, kağıt makinaları, kağıt makinaları, çeşitli hidrolik parça üretimi ve konveyör haddeleri.
4. Ulaşım: demiryollarında sürtünmeye maruz kalan parçalar ve lokomotif tekerleri.
5. Savunma Sanayii: tahrik dişlileri, tank paletleri.

6. Otomotiv: dişli, krank mili, amortisör, kumanda mil çatalı, dingil direksiyon parçaları, karden milleri, göbek dişlisi, otomatik dişli kutuları ve dizel motorların zamanlama dişlileri.



4. Mikroyapı Parametrelerinin Görüntü Analiz Sistemi ile Belirlenmesi

Malzemelerin mekanik özellikleri ve ömürlerini yapılarındaki bileşenler, bir başka deyişle mikroyapı parametreleri belirler. Malzemelerin incelenmeleri sayesinde, üretim şartları, kompozisyonları ve servis performanslarını belirten mikroyapı hakkında çok önemli bilgiler elde edilir. Mikroyapının göz ile yapılan muayeresi bu kadar büyük öneme sahip parametrelerin belirlenmesinde yetersiz kalmakla birlikte, yapıların çeşitlilikleri ve iki boyuttan üç boyuta geçişteki benzersizlikler hatalı bilgilendirmelere yol açmaktadır. Parlatılmış numune yüzeyinin incelenmesi ile üç boyutlu özellikler tayin edilebilir. Malzemelerin mikroyapı parametrelerinin belirlenmesi manuel, yarı- otomatik veya tam otomatik yöntemler ile yapılmaktadır.

Manuel yöntemler, nokta sayma ve lineer analizdir. Nokta sayma metodunda üzeri işaretlenmiş objektif kullanılır, incelenilen alanda faz ile objektiftaki noktaların kesişme noktaları sayılır. Lineer analizde üzerine paralel çizgiler çekilmiş saydam sayfa konulur. Ölçülmek istenilen faz ile kesişen çizgilerin uzunluğu belirlenir. Her iki tür ölçüm, istatistiksel güvenilirlik açısından her numunede yirmi alan incelenilecek şekilde yapılır. Oldukça zahmetli, uzun zaman alan ve uzman gerektiren bu yöntemler kesin sonuç vermeyebilirler.

İlk kullanılan görüntü analiz sistemlerinde; bilgisayar, dijitalize tabla ve kalemden oluşan bu yarı otomatik sistemde yine fotoğraflar çekilir dijital tablaya yerleştirilir. Özel ışık kalemi ile incelenilen fazın üzerinden geçilir, bilgisayar ekranına bağlı olan kaleminin çevrelediği alanlar ekranda belirir ve hesaplamalar bilgisayar tarafından yapılır.

Görüntü analiz sistemi tıp, biyoloji, jeoloji ve mineroloji bilimleri yanısıra metalurjide de kullanılmaktadır. Günümüzde gelişen teknolojinin eseri olan modern cihazlarla iki boyuttan, üç boyuta geçiş, verilerin saklanması ve değerlerin yüksek hassaslıkta eldesi vb. kolaylaşırken işlemlerin hızı konvansiyonel yöntemlere kıyasla oldukça artmıştır.

Tam otomatik görüntü analiz cihazları ise; ışık mikroskobu, bilgisayar ve kameradan oluşur. Işık mikroskobundan alınan görüntü kamera tarafından dijitalize edilir ve bilgisayar ekranına aktarılır. Mikroyapı pikseller (en küçük fotoğraf karakteri) ile karakterize edilir. Aktarılan görüntü üzerinde sahip olunan program dahilinde işlemler yapılır ve yaklaşık 30-40 mikroyapı parametresi ölçülebilir.

Metalografik olarak hazırlanan numune ışık mikroskobuna konulur ve kamera tarafından gri görüntü bilgisayar ekranına dijitalize olarak altarılır.

Sistem siyah ve beyazın dahil olduğu 256 (0-255) gri tonu birbirinde ayırd edebilecek özelliğe sahiptir. Bu özellikten yararlanılarak ölçümü yapılmak istenilen fazın grilik sınırları otomatik olarak belirlenir. Bu sınırlar içerisinde görüntü “eşik değeri (threshold)” yardımı ile renklendirilir. Artık bilgisayara ölçümü istenilen faz tanımlanmıştır. Bundan sonra yapılacak işlem, parametrelerin seçimidir.

Ölçüm modu seçildiğinde istenilen parametrelerin; maksimum, minimum ve ortalama değerleri grafik veya liste halinde ekranda verilir.

Sistem ölçümlerinde stereoloji ve kuantitatif metalografiden yararlanılmıştır. İki boyutlu kesitten elde edilen verilerden üç boyuta geçişte geometrik olasılıklar ve varsayımlar kullanılır.

Sistem ile alan (field analysis), yapı (feature analysis) ve lineer analiz (linear analysis) gerçekleştirilir.

Görüntü analiz sistemi ile hangi malzemede ne tür parametrelerin ölçülebileceğine dair aşağıda örnekler verilmiştir:

1. Küresel grafitli dökme demirlerde; küresellik, grafit boyutu, perlit/ferrit oranı, küre sayısı,
2. Gri dökme demirlerde grafit miktarı ve grafit lamellerinin uzunlukları,
3. eliklerde; inklüzyon miktarları ve büyüklükleri,
4. Yüksek alaşımlı çeliklerde; karbür miktar ve dağılımları,
5. Kaplamalarda; kaplama kalınlıkları,
6. Ferritik ve östenitik çeliklerde; tane boyutu,
7. Kompozitlerde; fiber miktarları ve boyutları.



şekil 4.1: Görüntü Analiz Sistemi.

5. ULTRASONİK MUAYENE /22/

Bir tahribatsız muayene yöntemi olan ultrasonik muayene 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, laminasyonlar, çekme boşlukları, gözenek ve diğer süreksizlikler gibi arayüzeyleri yansıyan hatalar kolaylıkla detekte edilebilir. İnküzyonlar ve diğer homojensizlikler de kısmi yansıma veya ultrasonik dalgaların saçılması ile belirlenebilir.

Hataları analiz eden birçok ultrasonik muayene cihazları monitörler ile aşağıdakilerden bir yada daha fazlasını detekte edebilirler:

- Malzeme sınırlarındaki arayüzeyler veya metaldeki süreksizliklerden sesin yansıması,
- Güç vericinin giriş ve çıkış noktalarından, test numunesi boyunca geçen ses dalgasının geçiş süresi,
- Test numunesinde 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. Basitçe uygulama alanları; malzemelerin iç ve yüzeysel yapı hatalarının belirlenmesi, bağlantı

karakteristiklerinin ortaya çıkarılması, kalınlık ölçümleri, korozyon derinliği, fiziksel özelliklerin tespiti (yaygın olarak kullanılmaz), yapı, tane boyutu ve elastiklik sınırının tespitidir.

5.1. Temel Ekipmanlar /22/

Birçok ultrasonik muayene sistemleri aşağıdaki temel ekipmanları içerir:

- Elektronik sinyal jeneratörü,
- Güç kaynađı,
- Couplant,
- Elektronik devre,
- Display veya test numunesinden alınan outputların kaydedildiği yada gösterildiği bir gösterge,
- Elektronik saat.

5.2. Avantaj ve Dezavantajlar /22/

Ultrasonik muayenenin, diğer tahribatsız muayene yöntemlerine göre avantajları:

- Ultrasonik muayene yöntemi ile rutin olarak 6m' e kadar olan, örneğin uzun çelik şaftlar gibi parçaların kalınlıkları ölçülebilir,
- Yüksek hassaslıkla çok küçük hataların bile deteksiyonu mümkündür,
- İç kusurların, yerinin, büyüklük, şekil ve oryantasyonlarının 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 ve ekipmanlar ve malzemelere bir etkisi mevcut değildir,
- Kolay taşınabilir,
- Bilgisayar ile çalışılabilir ve alınan veriler yardımı ile hataların karakterizasyonu ve malzemelerin özellikleri belirlenebilir.

Ultrasonik muayenenin dezavantajları:

- Manuel operasyonlar büyük titizlik ve uzman eleman gerektirir,
- Muayene prosedürlerinin geliştirilmesi için konu hakkında geniş bilgiye ihtiyaç duyulur,
- Çok ince ve küçük, şekilsiz ve yüzeyi kaba parçaların muayenesi oldukça güçtür,
- Yüzeyin hemen altındaki süreksizlikler belirlenemeyebilir,
- Kalibrasyon ve hata karakterizasyonları için referans standartlara ihtiyaç duyulur.

4.3. Uygulanabilirlik /22/

Metallerin ultrasonik muayeneleri prensip olarak süreksizliklerin tespiti için geliştirilmiştir. Bu metod birçok metal ve alaşımlarındaki hataların deteksiyonunda kullanılabilir. Kaynak, lehim ve adheziv birleştirmeler ile oluşturulan 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 komprasör parçaları,
- İşleme malzemeleri: kalıp blokları ve takım çelikleri,
- Demiryolu parçaları: akslar, tekerlekler ve kaynaklı raylar,
- Otomobil parçaları: dökme demirler, lehimli ve /veya kaynaklı komponentler.

İncelenen yapı kusurları; çatlaklar, laminasyonlar, kötü bağlantılar ve inklüzyonlar vb. Bunlar hammadeden gelmeyip uygulanan üretim ve ısıl işlem sonucu yada servis sırasında yorulma, darbe, abrazyon, korozyon veya diğer nedenler sonucu oluşurlar.

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.

Ultrasonik muayene yönteminin başarı ile tatbik edilmesi için tetkik sisteminin uygun ve operatörün iyi eğitilmiş olması şarttır. Eğer durum tam tersi ise, oldukça ciddi sorunlar ile karşılaşılabilir.

5.4. Ultrasonik Muayene ile Ölçümler /21, 22/

Ultrasonik dalgalar, malzemelerin atomik yada moleküler oskilasyonları (seyremè, titreme) ve vibrasyonlarını içeren mekanik dalgalardır. Bu dalgalar audio 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 deteksiyonu, 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 ve safiyetlerden kuvvetle yansır ve saçılırlar.

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.

Malzemenin içinden bir hatadan ve malzemenin öbür yüzünden yansiyarak toplayıcı proba ulaşan ultrasonik dalgaların meydana getirdikleri elektrik dalgaları arasındaki çok kısa zaman farkı bir katot ışını tüpü vasıtasıyla tespit olunabilir. Bu zaman farkı hatanın muayene yüzeyine uzaklığı ile orantılıdır. Darbenin yüksekliği ise hatanın büyüklüğü, şekli, oryantasyonu ve yapısı hakkında değerli bilgilere sahiptir. Ultrasonik yöntemle döküm içindeki hataların niteliği, büyüklüğü, varlığı ve yerlerinin belirlenmesi için gerek pulse-echo (darbe-yankı, uyarı-yansıma) veya throughtransmission (bir baştan bir başa iletim) teknikleri başarı 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 cüruf, sünger ve kaba damarlarında bu yolla kontrolü mümkündür.

Ultrasonik yöntemle dökümlerin kontrolünde ortaya çıkan belli başlı sınırlamalar şunlardır: Dökümlerin boyutları, biçimi, kalınlığı, yüzeysel girintili çıkıntılı ve hataların yönüdür. Öte yandan ses dalgaları karmaşık enerji paketleri olduğundan ultrasonik kontrolün sonuçlarının tam anlamı ile yorumlanması için iyi eğitilmiş operatörler gerekmektedir.

Yassı ve paralel kenarlı dökümlerin büyük izolasyonlu kesintilerinin ses ötesi denetiminin açık olmasına karşın yöntemin uygulanmasına özen gösterilmesi gereklidir. Ayrıca daha karmaşık biçimler ve daha küçük kesintilere ilişkin sonuçların yorumlanmasında ustalık gerektirir. O halde ultrasonik denetleme çoğunlukla görelî bir küçüklükte ve tek biçimli kesitlerin ve bu denetleme tekniğinin ekonomik olduğu uzun üretim işlemlerinde kullanılır. Eğer herhangi bir dökümün biçimi ve girintili çıkıntılığı ses dalgasının döküm içine iletimini engelliyorsa çok az yararlı bilgiler elde edilebilir ve bu durumda alternatif denetim tekniklerinden olan radyografi yöntemi kullanılmalıdır. Tüm bunlara ek olarak eğer dökümün metalurjik yapısı ses enerjisinin saçılmasına neden olurda ses demeti gerekli derinliğe sızamassa kesintiler açısından dökümün içinin ancak sınırlı bir kesiti denetlenebilir. Bununla birlikte deneyler odaklaştırılmış 2,25 MHz lik dalgaların 150-300 mm arası ve aşırı derecede damarlı paslanmaz çelik ve nikel alaşımli dökümlere tatmin edici biçimde sızdığı göstermiştir.

Ses demetinin döküme derin nüfuzu sonucu ciddi bir biçimde dağılmış olmasına karşın ultrasonik teknikler x-ışınları veya gamma ışınlarının nüfuz edemediği kesit kalınlıklarının denetimi için gereklidir. Ultrasonik uyarı yansıma denetlemesi genellikle dökümün tüm derinliğine sesin nüfuz edebileceği yerlerdeki kesintilerin denetlenmesi için kullanılmalıdır ki sesin önemli bir bölümü arka yüzey tarafından yansıtılabilsin ve tekrar araştırma birimine dönebilsin. Bu koşullar sağlandığında, dökümün içinin tümü denetlenebilir.

Dökümün denetlenemeyecek bölümü yüzeye yakın olan bölümdür ve ölü bölge adını alır. Denetlenemeyen yüzey katmanının kalınlığı test frekansının, uyarı biçiminin ve yüzey girintili çıkıntılığının bir fonksiyonudur. 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.

Ultrasonik incelemede deteksiyon hassasiyeti ses dalgalarına bağı olarak süreksizliğin yönü ile ilgilidir. Eğer herhangi bir çatlak gibi süreksizliğin konumu ses dalgasına dik ise burada enerjinin maksimum yansması böylelikle maksimum hassasiyeti söz konusudur. Eğer çatlak ses dalgasının gidiş yönüne paralel ise sadece çatlağın kenarı ses enerjisini yansıtacak ve büyük bir ihtimalle çatlak gözlenmeyecektir. Dolayısıyla şüphe edilen süreksizliğin yönü bilinmiyor ise birden fazla yönde inceleme gerekmektedir. Herhangi bir dökümde spesifik bir süreksizlik beklenirse, odaklanmış arama birimleri deteksiyon hassasiyetini arttırmada kullanılabilir. Böylece birimler yüzey rezolasyonunu iyileştirmede de kullanılabilirler.

5.5. 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. Cihazdan okunan kalınlığın, cihazdan okunana oranı ile çelik kalibrasyon bloğundan elde edilen hız değeri çarpıldığında, numunenin ultrasonik hız değeri belirlenir. Kalibrasyon bloğunun malzemesi St 52,3' dür.

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

6.1.

cx: numunenin ultrasonik hızı,

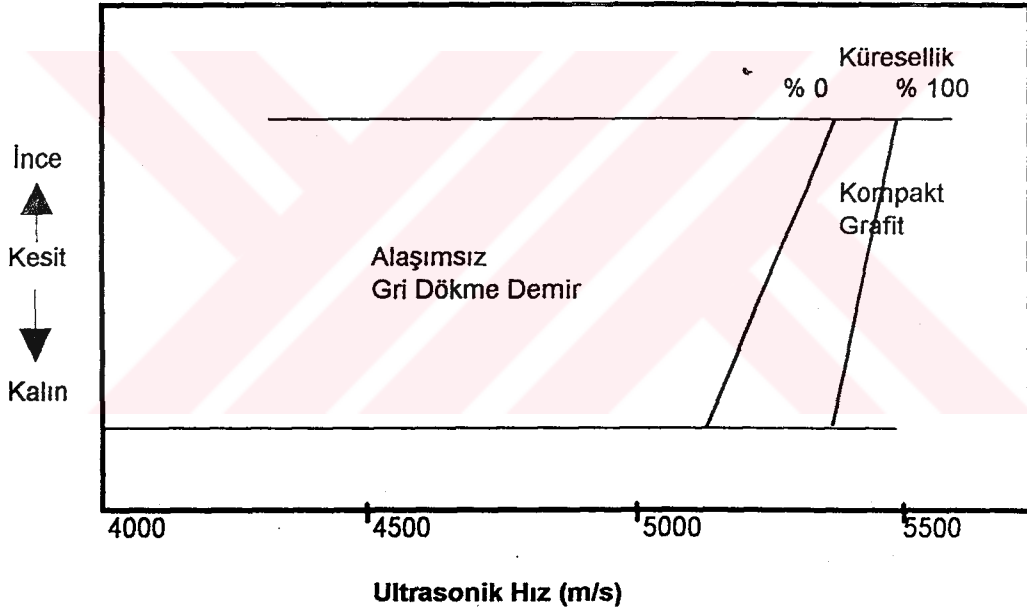
- c: Çelik kalibrasyon bloğunun hız değeri,
d: Numunenin kalınlığı (kumpasla vb. ölçülen değer),
ds: Cihazdan okunan numunenin kalınlığı.



6. Ultrasonik Muayene ile Mikroyapı Kontrolü /20, 37/

Batı Avrupa'da ultrasonik muayene ile grafit formu kontrol edilmektedir. Zemanik, grafitin küresellikten lamel forma doğru değişmesi ile ultrasonik hızın düştüğünü tespit etmiştir. Kompakt grafitin ticari olarak kullanımının başladığı 1976 yılını takiben Ewans, Dawson ve Lalich ergiyik işlem sonuçlarını ultrasonik test ile kontrol etmişlerdir.

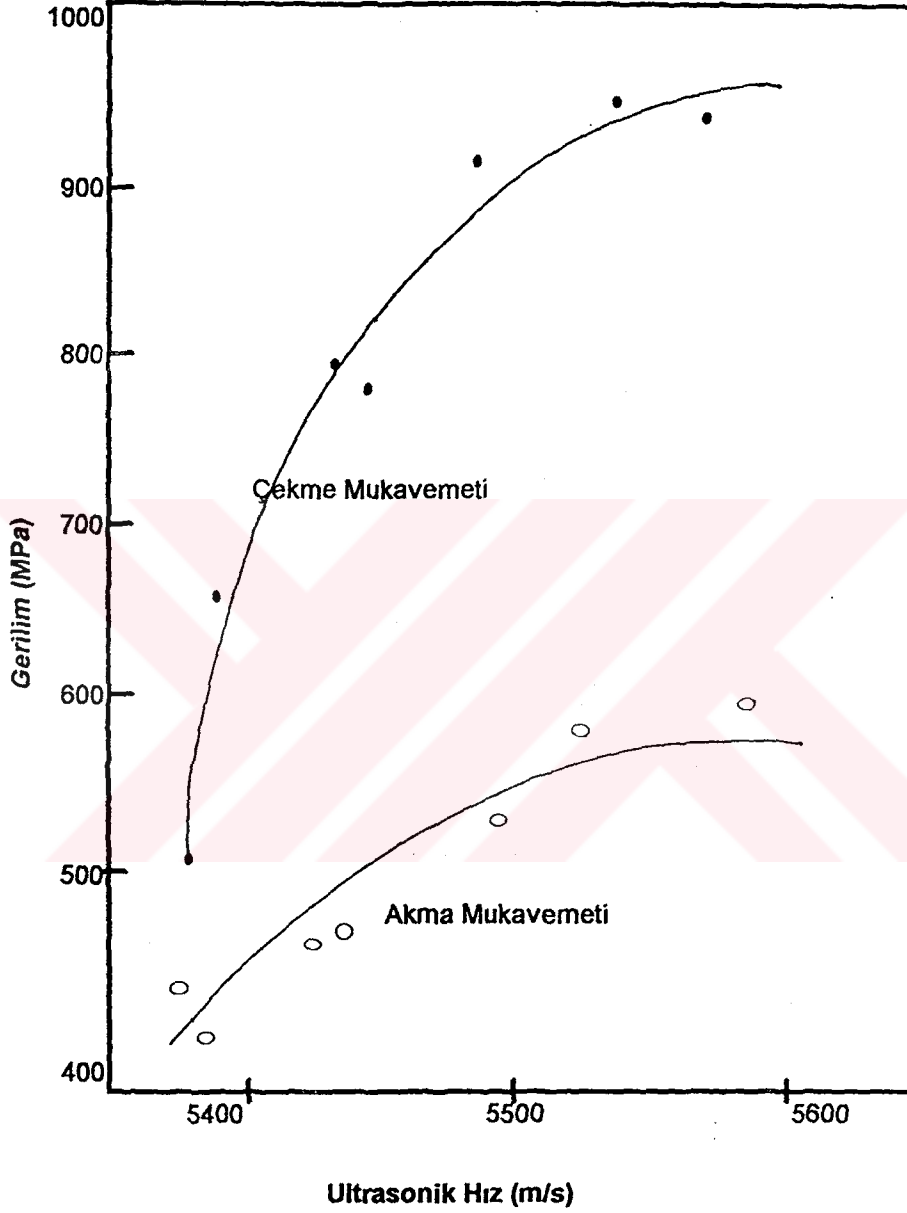
Emerson' un 1986' da gerçekleştirdiği araştırmada, küresel grafitli dökme demirin ultrasonik hızının 5600 m/s, gri dökme demirin 3500-4900 m/s aralığında olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.1). Matris formu göz önünde bulundurulmadan yapılan ölçümlerde hız ve mekanik özellikler arasında bir ilişki kurulması sağlıklı değildir.



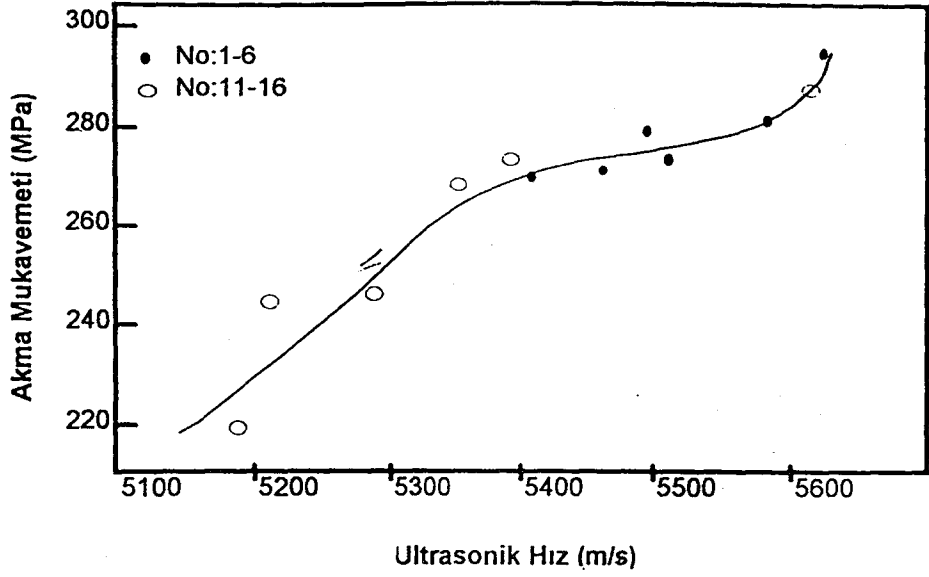
Şekil 6.1. Grafit Şeklinin Ultrasonik Hıza Etkisi.

Dökme demir üreticileri uygulaması basit ve hızlı olan ultrasonik hız yöntemi ile grafit formunun kontrolünü yapabilirler. Bununla birlikte, dökme demirlerin servis performansını belirleyen, mekanik özellikler doğrudan grafit şekline bağlı değildir. Kabul edilemez hızların

eldesinde, nedeni yalnızca grafit formuna bağlanamaz, matrisin uygunluğu incelenmelidir. Şekil 6.2' de görüldüğü üzere tamamen perlitik yapıya sahip numunelerin incelenmesi sonucunda hız ve akma mukavemeti arasında bir ilişki vardır, aynı olay tamamen ferritik yapı içinde vardır (Şekil 6.3), ancak karışık yapılar için matris muhakkak incelenmelidir.

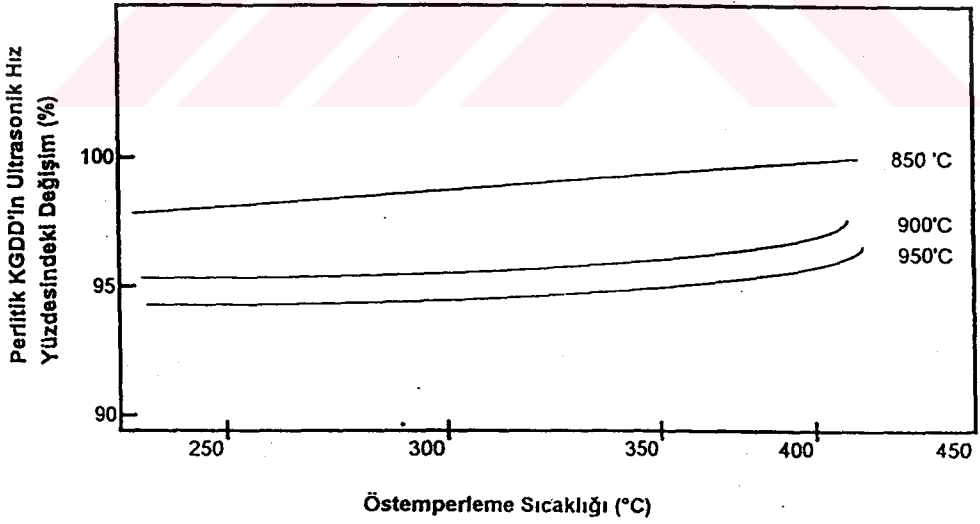


Şekil 6.2: Perlitik Dökme Demirlerde, Ultrasonik Hız ile Akma ve Çekme Dayanımları Arasındaki İlişki.



Şekil 6.3: Ferritik Dökme Demirlerde, Ultrasonik Hız ile Akma Dayanımı Arasındaki İlişki.

Son yıllarda uygulama alanı bulan östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin sahip olduğu grafit şeklide ultrasonik hız ile kontrol edilebilmektedir. Eğer düşük östenitleme sıcaklığı seçildi ise hız düşer, fakat östempereleme sıcaklığının hız üzerine oldukça düşük bir etkisi vardır (Şekil 6.4).



Şekil 6.4: Östemperlenmiş Dökme Demirlerde Ultrasonik Hız Değişimi.

Sergeant ve Fuller dökümhanelerde, grafit formu ve matris yapısındaki ve dolayısı ile mekanik özelliklerin değişimlerinin tahribatsız muayene ile belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmanın amacı, ultrasonik muayene ile dökümhanelerin müşterlerine minimum spesifik özelliklerini garanti edebilmeleridir.

Çalışmalarında diğer yönden, perlitik ve ferritik matris yapısı ve grafit formu aynı zamanda değişen yapılar kullanmışlardır (artan küresel olmayan grafit içeren kompakt grafit -ASTM tip IV- sahip olan farklı ferrit ve perlit miktarları içeren matris). Grafit formunun etkisini ve matris yapısındaki değişimlerin mekanik özelliklere olan etkisini belirlemek için ultrasonik hız ölçümleri uygulanmıştır.

Döküm özelliklerin tayini, aynı zamanda metalografik yöntemlerle özellikle görüntü analiz sisteminden yararlanılarak yapılmıştır. Bununla birlikte yapılan çalışmanın sonucunda metalografik yöntemin, tahribatsız muayene yönteminin diğer metodlarına alternatif olamayacağı ortaya çıkmıştır.

Yapılan bu çalışmada; perlitik matriste farklı karbür ve küresel olmayan grafitte sahip dökme demirlerin mekanik özelliklerinin ultrasonik testler sonucu elde edilen hızlar ile mekanik özelliklerinin tayini araştırılmıştır.

6.1.Yapılan Çalışmalar /20/

Aşağıdaki farklı varyasyonlardaki dökme demir numnelerinin dökümü yapılmış ve incelemeler döküm halleri ile gerçekleştirilmiştir:

- 1- Küreselleşmiş grafitlerin çoğunlukta olduğu yapı; % 90, % 70, % 50,
- 2- Uniform karbür dağılımı içeren yapı (grafitsiz alanda) ve geri kalan alan perlitik matris, % 2.5, % 7-12 ve % 17-22.

Küresel olmayan grafit yapısı, aşılama malzemesinin yani artık magnezyum miktarının azaltılması ile sağlanmıştır. Bu grafitler kompakt (ASTM tip IV) grafit formdadır. Matrisdeki perlit miktarı az miktarda katılan kalay miktarı ile elde edilmiştir. İlk yapılan testler sonucunda yalnızca ferrokrom katkısı ile arzulanan yüksek miktarda üniform dağılımlı karbür sağlanamadığı gözlenmiştir.

Dokuz döküm gerçekleştirilmiş ve her dokuz tretmanda, iki çift test bloğu test numunelerinin alınması ve aşağıdaki verilen amaçlara yönelik dökülmüştür:

- 1- Çekme mukavemeti, akma mukavemeti, uzama, sertliğin belirlenmesi,
- 2- Ultrasonik hız ölçümleri,
- 3- Gözle ve görüntü analizi ile yapılan ölçümlerle grafit yapısı ve karbür miktarlarının tayini.

Dökme demir serisinin dökümünde seçilen nominal kimyasal kompozisyon; % 3.6 C, % 2.4 Si (magnezyum işlemi sonrası), % 0.4 Mn, % 0.02 S (sülfür miktarı magnezyum işleminde önemlidir) ve maksimum % 0.029 P. Her 80 kg' lık eriyik için yapılna şarj tablo 6.1' de görülmektedir. Tablo 6.2' de ise şarj malzemelerinin kompozisyonları verilmiştir.

Tablo 6.1. Ocak Şarjı ve Aşılama Miktarları.

No	Ocak Şarjı (kg)						Aşılama (kg)	
	Pik Demir	İsveç Demiri	Fe-Si	Fe-Mn	Sn	Fe-Cr	MgFeSi	Fe-B
1	76.85	0.100	2.135	0.460	0.080	0.375	0.960	0.045
2	76.85	0.100	2.135	0.460	0.080	0.375	0.960	0.090
3	76.85	0.180	2.030	0.460	0.080	0.400	1.008	0.180
4	74.28	2.665	2.115	0.460	0.080	0.400	1.000	0.030
5	76.85	0.100	2.135	0.460	0.080	0.375	1.008	0.090
6	76.85	0.180	2.030	0.460	0.080	0.400	1.008	0.180
7	74.28	3.320	1.460	0.460	0.080	0.400	2.000	0.030
8	76.85	0.235	2.080	0.460	0.080	0.375	1.056	0.090
9	74.28	3.360	1.420	0.460	0.080	0.400	2.000	0.200

Tablo 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		
İsveç Piki	<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								
MgFeSi		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		

Çil döküm spektral analiz numunelerinde vakum spektrometresinde analiz edilip; silisyum, bor, mangan, fosfor, magnezyum, kalay ve krom miktarları belirlenmiştir. Karbon ve kükürt miktarları ise spektral analiz numunelerinden yararlanılarak (kesilerek) karbon/ kükürt detektörü ile tayin edilmiştir. Dökümlerin analizleri tablo 6.3' de görülmektedir.

Tablo 6.3: Döküm Analizleri.

Numune No:	C %	Si %	Mn %	S %	P %	Mg %	Sn %	Cr %	B %
1	3.47	2.47	0.44	0.016	0.010	0.027	0.091	0.27	0.008
2	3.64	2.59	0.45	0.018	0.010	0.025	0.082	0.25	0.013
3	3.73	2.29	0.44	0.010	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	3.62	2.53	0.47	0.016	0.009	0.025	0.078	0.26	0.012
6	3.58	2.51	0.48	0.013	0.008	0.025	0.082	0.28	0.026
7	3.51	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	3.66	2.30	0.37	0.012	0.010	0.028	0.082	0.28	0.031

1.25, 2.5, 5.0 ve 10 MHz' lik nominal frekanslar ile ultrasonik hız ölçümleri, ultrasonik test bloklardan üç yönde ultrasonik dalgalarının geçiş zamanlarının belirlenmesi ile yapılmıştır. Ultrasonik yansımalar, yaklaşık 500 MHz tekrar frekanslarının uygulanması şeklindeki standart ultrasonik testin kullanılması ile elde edilir.

Her ergiyik için yapılan çekme testi sonrası kırılan test çubuğu uçları kesilerek alınan numuneler metalografik incelemeye tabii tutulmuştur. Her ergiyik için, çubukların bu kısımlarından alınan numuneler ile döküm bloğunun diğer kısımları arasında grafit yapısı ve matris yapısı arasında çok büyük farklılıklara rastlanılmamıştır. Yapılar hakkındaki detaylı yorumlar şöyledir:

1. Işık mikrobi yardımı ile iki deneyimli metalurjistin bağımsız tahminleri ile küresel grafitlerin oranları belirtilmiştir.
2. Karbür miktarının tahmin edilmesi. Bu işlem ışık mikroskobu ile birçok alanın taranması ve karbür miktarının belirlenmiş fotoğraflar ile karşılaştırılması ile belirlenmiştir.
3. Görüntü analiz sistemi ile karbür miktarının belirlenebilmesi için % 10' luk amonyum sülfat çözeltisi ile yapı dağlanmıştır.
4. Çekme çubuk uçlarından kesilen numunelerdeki grafit yapısı görüntü analiz sistemi ile incelenmiştir. Toplam grafit alanı, grafit boyutu ve nodül sayısı ölçülmüştür. Her numunede 40 alan yani yaklaşık 0.254mm x 0.01778mm' lik alan detekte edilmiştir. Ölçümde yalnızca 0.30, 0.40, 5.978 ve 12.39 mikron genişliğe sahip grafit partikülleri gözönünde bulundurulmuştur Ölçümlerin ortalamaları, maksimum, minimum ve standart sapma değerleri ile beraber verilmiştir.

Sertlik ve çekme testlerinin sonuçları tablo 6. 4' deki gibidir.

Tablo 6.4. Mekanik Test Sonuçları.

Numune No	Akma Muk. (MPa)	Çekme Muk. (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)
1	400.15	474.31	1	244
2	407.87	461.95	1	257
3	414.05	457.31	2	256
4	432.59	560.83	1	256
5	423.32	508.30	1	255
6	438.77	497.48	2	257
7	435.68	593.27	2	255
8	444.95	540.24	1	257
9	443.41	522.20	0.5	285

Ultrasonik hız ölçümlerinin detayları tablo 6.4' deki gibidir. Tablo 6.5' de ultrasonik hız ölçüm sonuçları verilmiştir. Tablo 6.6' da mikroyapıdaki küreselleşme oranları gözle ve karbür oranı belli olan mikroyapı fotoğrafı referans alınarak yapılan karşılaştırma ile belirlenen karbür oranlarını göstermektedir. Aynı zamanda görüntü analiz sistemi ile yapılan karbür oranı incelemeleri de bu tabloda yer almaktadır. Tablo 6.7' da görüntü analiz sistemi kullanılarak belirlenen grafit parametreleri görülmektedir.

Tablo 6.5. Ultrasonik Hız Ölçüm Sonuçları.

Ultrasonik Hız (m/s)				
Numune No	1.25 MHz	2.5 MHz	5.0MHz	10.0 MHz
1	5580.38	5600.76	5600.7	5608.32
2	5610.86	5638.80	5638.80	5755.64
3	5674.36	5694.68	5712.46	5712.46
4	5755.64	5786.12	5803.90	5493.74
5	5715.00	5712.46	5727.70	5745.48
6	5722.62	5727.70	5735.32	5778.50
7	5814.06	5836.92	5854.70	5862.32
8	5755.64	5778.50	5768.34	5793.74
9	5824.22	5829.30	5844.54	5869.94

Tablo 6.6. Grafit ve Matris Yapısının Gözle ve Görüntü Analiz Sistemi ile Tetkik Sonuçları.

Numune No	Karbür Miktarı (%)		Küreselleşme (%)
	Gözle Muayene	Görüntü Analiz Sistemi	Gözle Muayene
1	2.5	3.5	40
2	8.0	8.4	40
3	15.0	13.9	50
4	1.0	1.9	75
5	7.5	8.7	65
6	15.0	13.4	70
7	1.0	1.9	100
8	8.0	7.1	100
9	15.0	14.4	100

Tablo 6.7: Görüntü Analiz Sistemi ile Belirlenen Grafit Parametreleri.

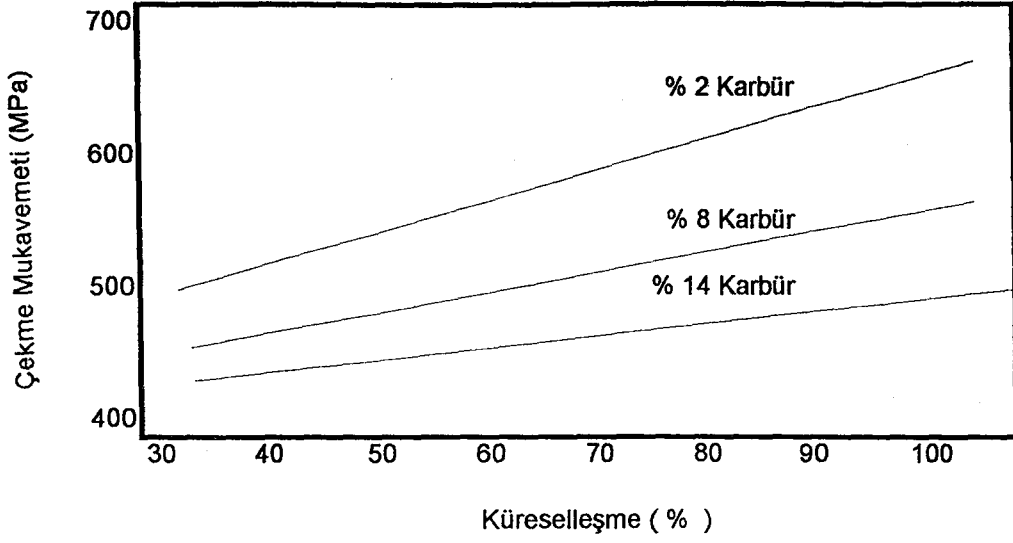
Grafıt Parametresi	Grafıt Çapı (mm)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Alan (%)	>0.31	9.6	8.7	9.6	9.5	9.2	9.2	8.9	10.6	9.5
	>1.55	8.5	7.6	8.8	9.0	8.5	8.6	8.5	10.0	9.0
	>3.10	7.2	6.5	8.0	8.4	7.7	8.0	7.9	9.5	8.5
	>6.20	5.4	4.8	6.4	7.4	6.4	6.9	7.0	8.4	7.6
	>12.40	2.6	2.8	4.2	5.5	4.4	5.1	5.3	6.6	6.1
Nodül Sayısı (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

Araştırma için dökümü gerçekleştirilen 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 % 65-75, 7-9 numaralılarda ise tamamen küresel grafitler mevcuttur. Bu üç gruptaki karbür miktarları ise numune numarası artışına paralel olarak yükselmektedir. Karbür miktarlarının tahmini için referans mikrofotografların kullanımı ile belirlenen karbür miktarları şöyledir; 1, 4 ve 7 için % 1.0-2.5; 2, 5 ve 8 için % 7.5-8; ve 3, 6 ve 9 için % 15' dir. Görüntü analiz sistemi ile yapılan karbür miktarının analizinde görülen, karşılaştırmalı tahmin miktarı ile analize kıyasla özellikle yüksek karbür miktarları için daha güvenilir sonuçlar vermektedir.

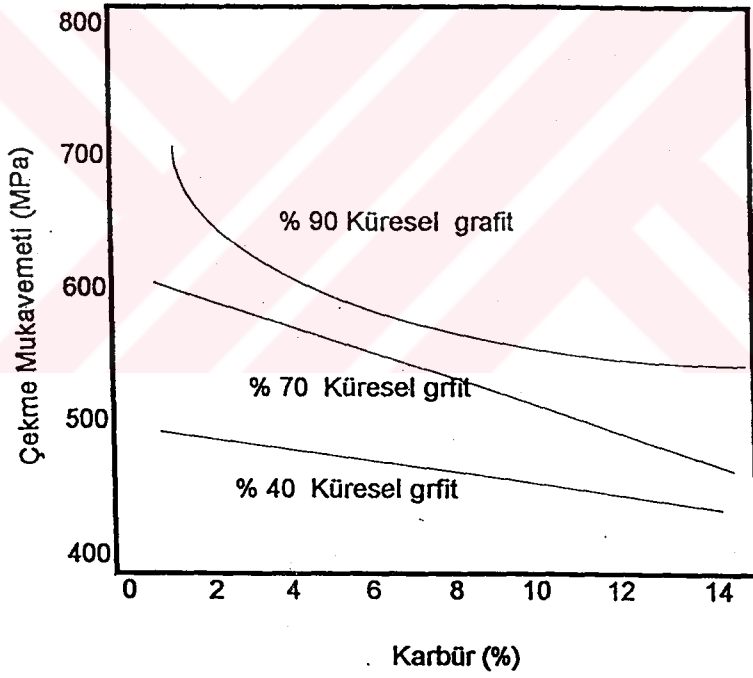
Çekme mukavemeti ve uzamanın küresel olmayan grafit miktarı yüzdesinin artışından olumsuz olarak etkilendikleri daha önce yapılan araştırmada belirtilmiştir. Bu etki grafitin kompakt değilde "spiky" grafit olarak adlandırılan formda olması ile bu etki daha da olumsuzlaşır. Şekil 6.5 ve 6.6' da mikroyapı varyasyonlarının çekme mukavemetine olan etkisi görülmektedir. Dökme demirin matris yapısı değişmeksizin yapıdaki küresel olmayan grafit miktarı artışı ile çekme dayanımı düşmektedir. Tamamen küresel grafitlere sahip yapılarda karbür miktarının varlığının çekme dayanımına etkisi çok daha fazla olup dayanımı oldukça düşürür. Küreselleşme yüzdesi yüksek dökme demirlerde, çekme mukavemeti karbür varlığı ile ilk önce hızla düşerken, daha sonra bu düşüş yavaşlar.

Grafit alanı, nodül sayısı ve grafit boyutun ölçümü görüntü analiz sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Önceki çalışmada, ölçülen grafit parametreleri ile matris yapısı arasında, karbür miktarı değişimlerine rağmen bir ilişki kurulmamıştır. Küresel olamayan grafit yüzdesi artışı, küre sayısı, grafit boyutu artar ve mikroyapıda büyük grafitler gözlenmiştir.

Grafit alan ölçümleri ile, küçük küreler hesaba katmadığında, önemli ilişkiler ortaya çıkarılmıştır. Grafit alanı artışı ile küreselleşme yüzdesi, akma dayanımı ve ultrasonik hız artar.



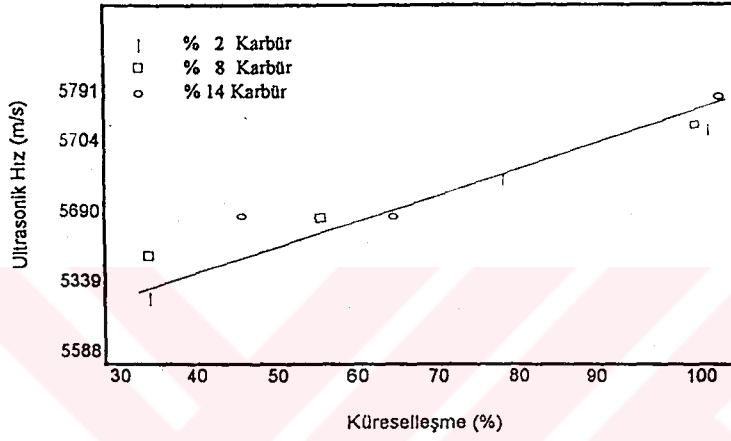
Şekil 6.5: Farklı Miktarlarda Karbür İçeren Dökme Demirlerde, Küreselleşme-Çekme Mukavemeti İlişkisi.



Şekil 6.6: Farklı Küreselleşme Yüzdesine Sahip Dökme Demirlerde, Karbür Miktarı- Çekme Mukavemeti İlişkisi.

Ultrasonik ölçümlerde, ısıtılmış dökme demirler için 5563 m/s alt limit olarak tavsiye edilirken, döküm hali ile yapıdaki perlit miktarına bağlı olarak 5639-5690 m./s aralığı seçilmelidir. Eğer yapı tamamen küresel grafitlerden oluştuğu garanti ediliyor ve karbür içeriyorsa ultrasonik hız 5666 m/s' e kadar artırılabilir.

Şekil 6.9' de karbür içeren yapılardaki ultrasonik hız ölçümleri ile küreselleşme arasındaki ilişki tek bir çizgi halinde görülmektedir. Hız ölçümlerinde 5766 m/s' e çıkmıştır.



Şekil 6.9: Farklı Karbür Miktarlarına Sahip Dökme Demirlerde, Ultrasonik Hız-Küreselleşme İlişkisi.

Fuller ve Sergeant' ın yaptığı bu çalışma sonucunda, her iki matris yapısı (perlit ve ferrit) ve farklı grafit formlarında basitçe uygulanabilen tahribatsız muayene yöntemi ile mekanik özellikler ve yapıların tahmini başarı ile yapılabileceği ortaya çıkarılmıştır.

7. DENEYSEL ARAŞTIRMALAR

7.1. Döküm Hali ile Numunelerin İncelenmesi

Tablo 7.1' de verilen kimyasal kompozisyondaki DDK 40 ve DDK 60 numuneleri incelenmiştir.

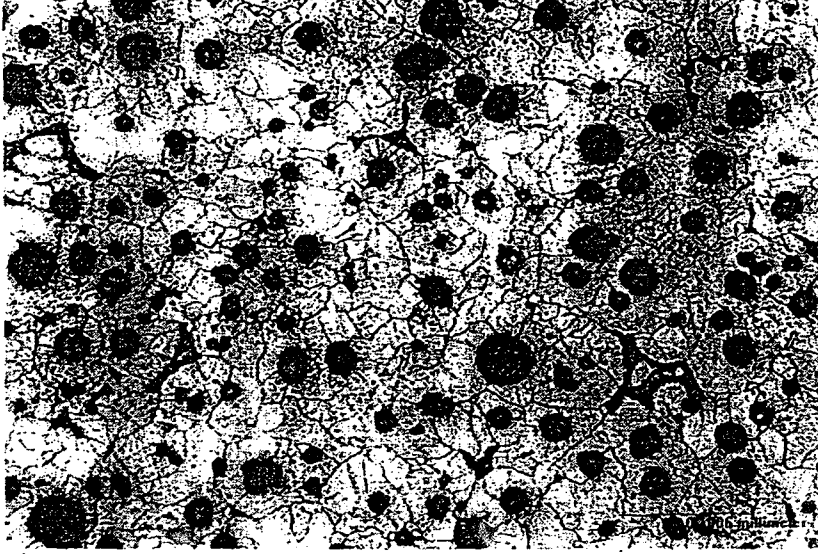
Tablo 7.1. DDK 40 ve DDK 60' ın Kimyasal Kompozisyonu.

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cu (%)	P (%)	S (%)	Mg(%)
DDK 40	3.83	2.75	0.13	0.09	0.02	0.01	0.027
DDK 60	3.79	2.68	0.38	0.57	0.02	0.01	0.034

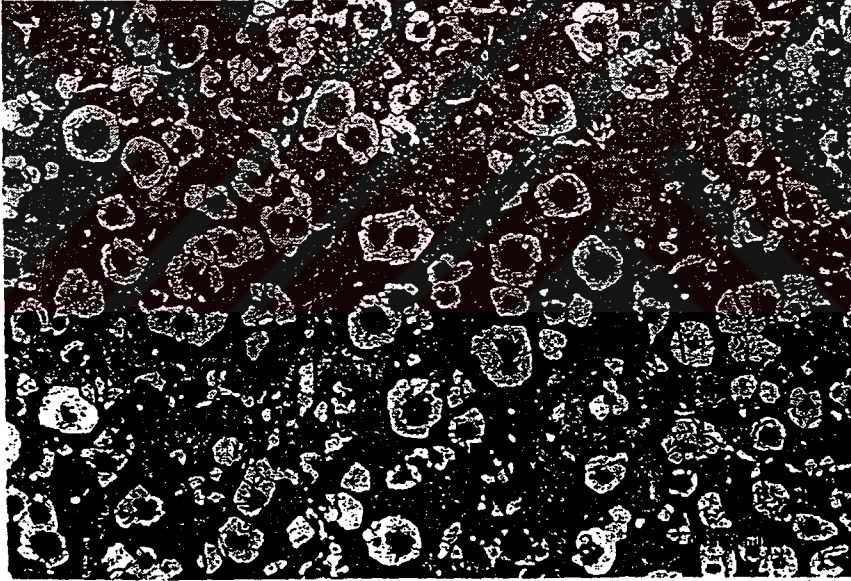
Numuneler 15 mm çap ve 25 mm yükseklikte işlenmiştir. Numunelerin metalografik incelemeleri görüntü analiz sistemi ile yapılmıştır. Parlatılmış halde iken numunelerin grafit karakteristikleri belirlenirken, % 3 HNO₃ ile dağlanan numunelerde perlit/ferrit oranları belirlenmiştir. Görüntü analiz sistemi olarak Buehler firmasının Omnimet Advantage adlı sistemi kullanılmıştır. DDK 40 ve DDK 60' a ait dağlanmış mikroyapı fotoğraflarında (Şekil 7.1-7.2) aynı sistemden alınmıştır. Görüntü analiz sonuçları Tablo 7.2' deki gibidir.

Numunelerin çekme mukavemeti, uzama yüzdeleri ve sertlik değerleri Tablo 7.3' de verilmiştir. Perlitik- ferritik olan DDK 60' ın mukavemet değerleri DDK 40' a göre daha yüksektir ve neden olarak mikroyapıdaki perlit fazı gösterilebilir.

İncelenen 15 numunenin mekanik ve mikroyapı analizleri sonrası ultrasonik hız ile olan ilişkiyi ortaya koyabilmek amacı ile ultrasonik test yapılmıştır. Test sonuçları Tablo 7.4' de görülmektedir.



Şekil 7.1. DDK 40 Mikroyapı Fotografi, % 3 HNO₃ ile Dağlanmış, X100.



Şekil 7.2. DDK 60 Mikroyapı Fotografi, % 3 HNO₃ ile Dağlanmış, X100.

Tablo 7.2. Görüntü Analiz Sonuçları.

Numune No	Küreselleşme (%)	Küre Sayısı (1/mm ²)	Grafit Çapı (µm)	Grafitlerarası Mesafe (µm)	Grafit (%)	Perlit (%)	Ferrit (%)
1	67.57	271	23.99	126.59	15.00	6.02	93.98
2	76.14	206	28.37	147.56	13.85	9.94	90.06
3	61.20	173	31.61	154.29	13.40	8.83	91.17
4	85.16	188	34.01	137.66	15.61	4.73	95.27
5	66.13	247	23.58	149.23	11.19	3.25	96.75
6	66.81	214	26.93	145.87	13.40	2.84	97.16
7	85.47	201	30.30	146.75	13.43	1.91	98.09
8	80.43	180	33.73	141.67	15.37	1.14	98.85
9	78.13	227	26.30	148.69	12.41	74.77	25.23
10	81.97	325	23.08	123.61	11.92	75.80	24.20
11	86.29	222	29.55	141.06	12.77	79.75	20.25
12	71.79	180	27.86	177.27	10.76	76.94	23.06
13	82.30	232	25.56	154.49	10.38	77.67	22.33
14	81.46	278	24.16	138.66	10.75	72.74	27.26
15	81.77	296	22.84	100.37	10.83	75.92	24.08

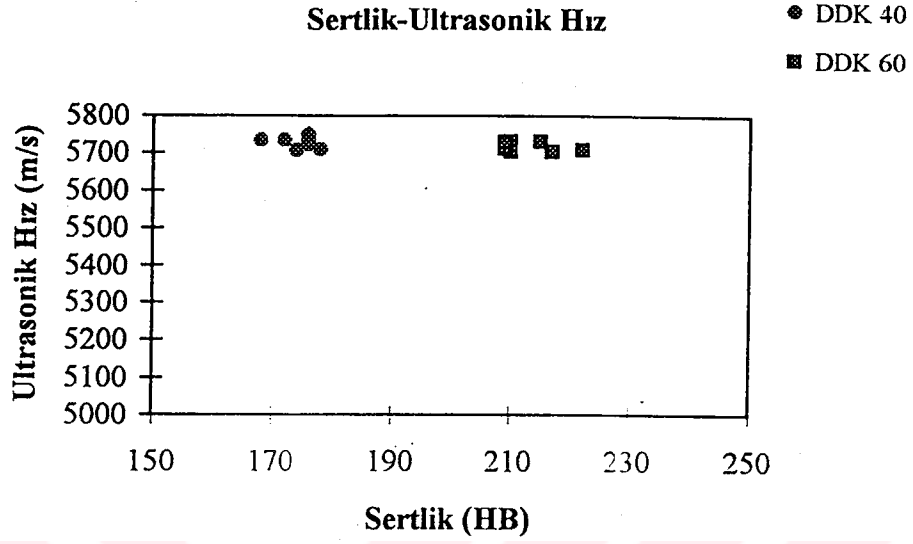
Tablo 7.3. Numunelerin Mekanik Özellikleri.

Numune No	Sertlik (HB)	Üzama (%)	Çekme Mukavemeti (MPa)
1	168	22.18	456.95
2	175	23.05	459.11
3	174	22.31	453.22
4	176	19.26	455.48
5	178	17.14	454.20
6	176	19.17	455.58
7	172	22.46	452.54
8	176	22.55	459.21
9	210	5.71	745.56
10	222	4.57	714.17
11	210	5.71	716.13
12	215	3.55	713.19
13	209	5.19	655.21
14	217	6.67	704.95
15	210	6.19	656.19

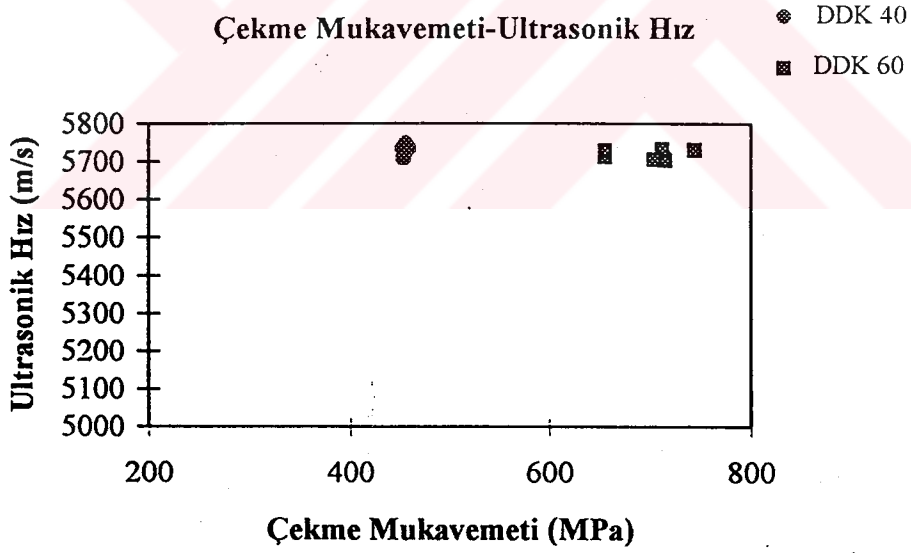
Tablo 7.4. Ultrasonik Test Sonuçları.

Numune No	Ultrasonik Ölçüm (mm)	Mekanik Ölçüm (mm)	Ultrasonik Hız (m/s)
3	26.10	24.98	5708.074
4	25.90	24.85	5722.216
5	26.00	24.89	5709.383
6	25.90	24.97	5749.849
7	26.00	25.00	5734.615
8	25.90	24.90	5736.032
9	25.90	24.89	5731.427
10	26.00	24.89	5709.383
11	26.10	24.96	5703.503
12	26.00	24.99	5732.322
13	26.10	25.00	5712.644
14	26.00	24.87	5704.795
15	25.90	24.88	5729.124

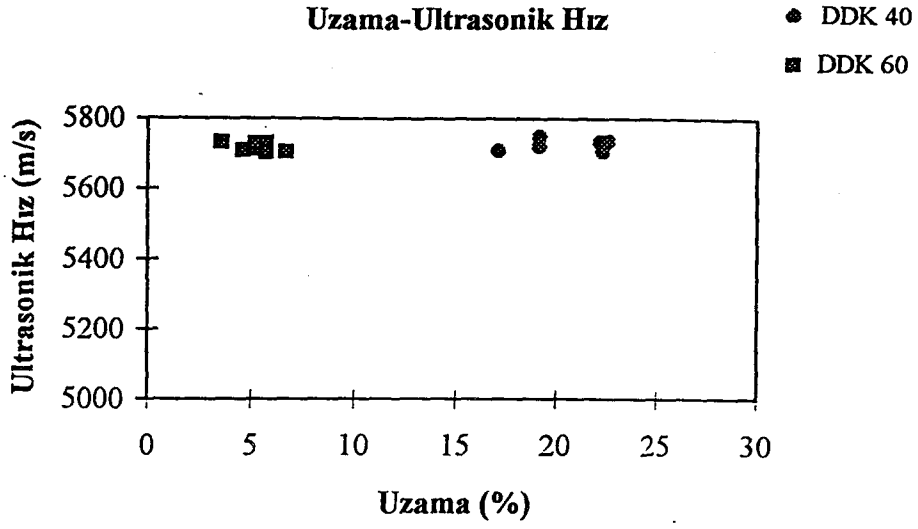
Mekanik özellikler ve mikroyapı parametreleri ile ultrasonik hız arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarabilmek için bir dizi diyagram hazırlanmıştır (Şekil 7.3-7 9).



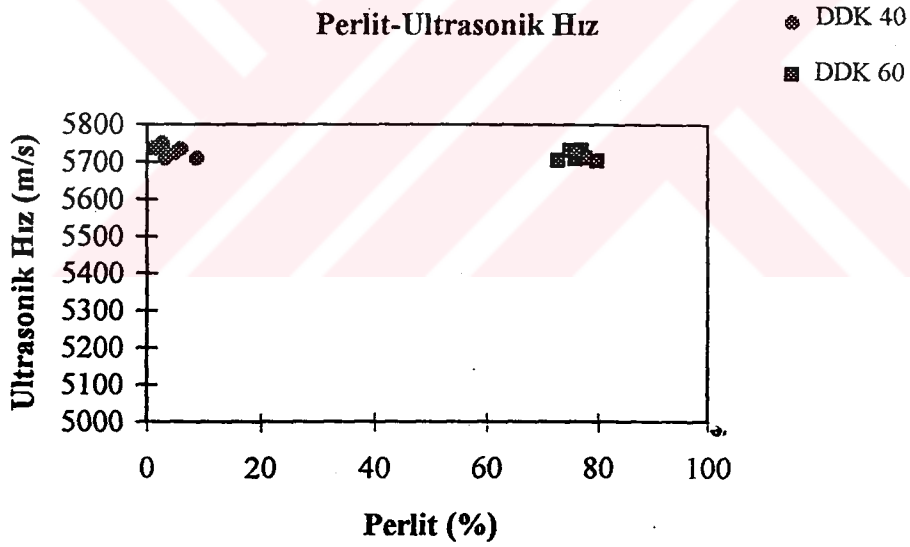
Şekil 7.3. Sertlik Değeri- Ultrasonik Hız İlişkisi.



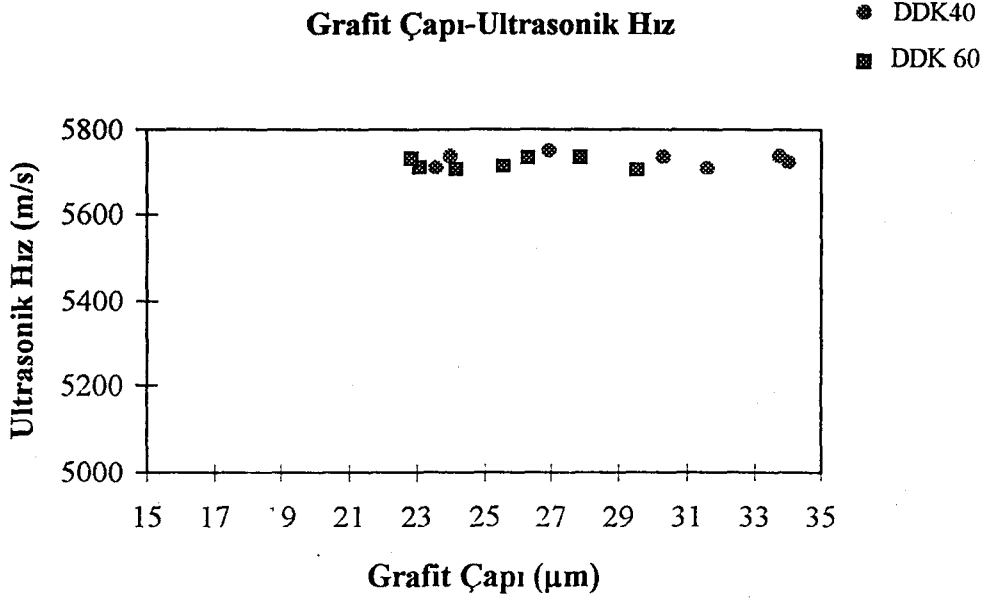
Şekil 7.4. Çekme Mukavemeti-Ultrasonik Hız.



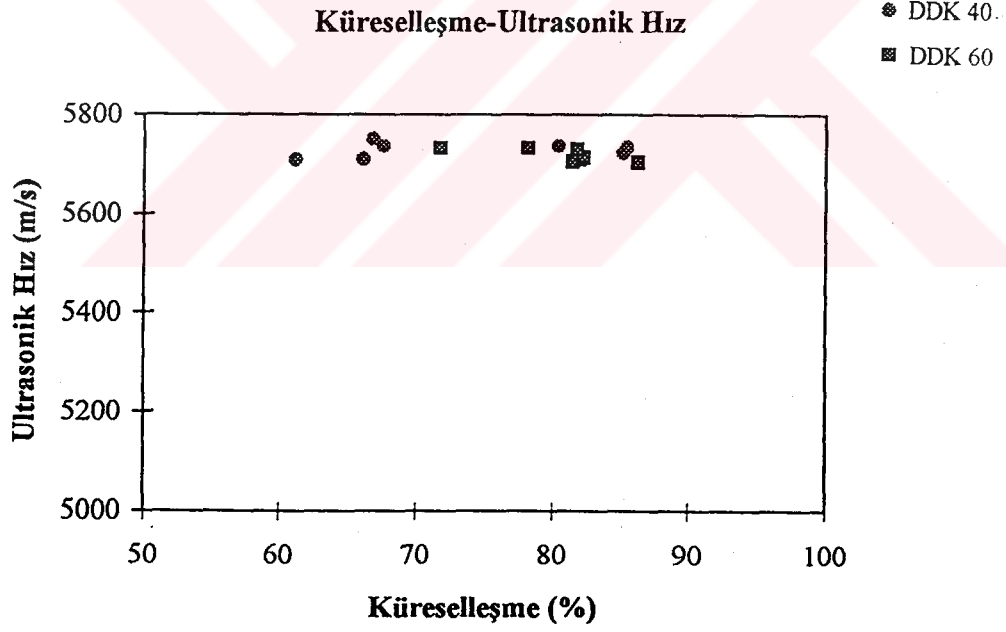
Şekil 7.5. Uzama Yüzdesi-Ultrasonik Hız.



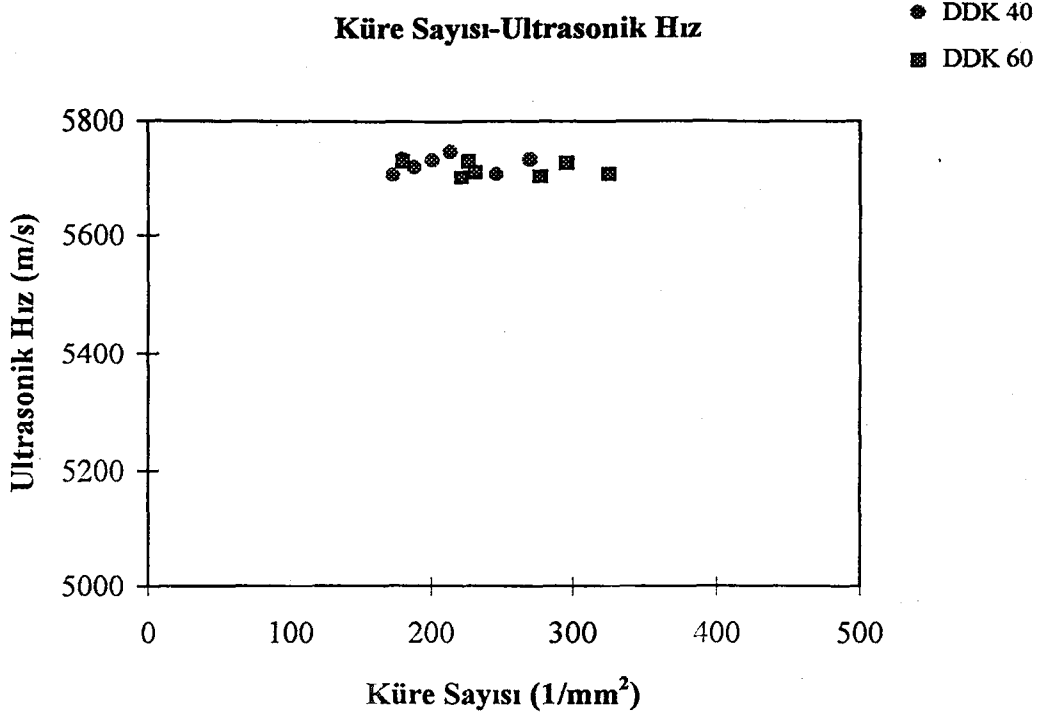
Şekil 7.6. Perlit Miktarı-Ultrasonik Hız.



Şekil 7.7. Grafit Çapı-Ultrasonik Hız.



Şekil 7.8. Küreselleşme-Ultrasonik Hız.



Şekil 7.9. Küre Sayısı-Ultrasonik Hız.

7.2. Östemperleme

İncelenen 15 adet küresel grafitli dökme demir numunesinden; 4, 7, 8, 13, 14 ve 15 östemperleme işlemi için seçilmiştir. Uygulanılan ısıl işlem şartları Tablo 7.5' de verilmiştir. Seçilen bütün numunelerin östenitleştirme işlemleri 900°C' de ve 2 saat yapılırken, östenitleme sıcaklığı olarak 235, 270 ve 370°C' ler seçilmiştir. Östemperleme ortamı için % 10 sodyumnitrat, % 50 potasyumnitrat ve % 40 sodyumnitrit içeren tuz banyosu hazırlanmıştır. Östemperleme işlemleri sonucunda ultrasonik muayeneleri yapılan numunelerin hızları tablo 7.6' de görülmektedir.

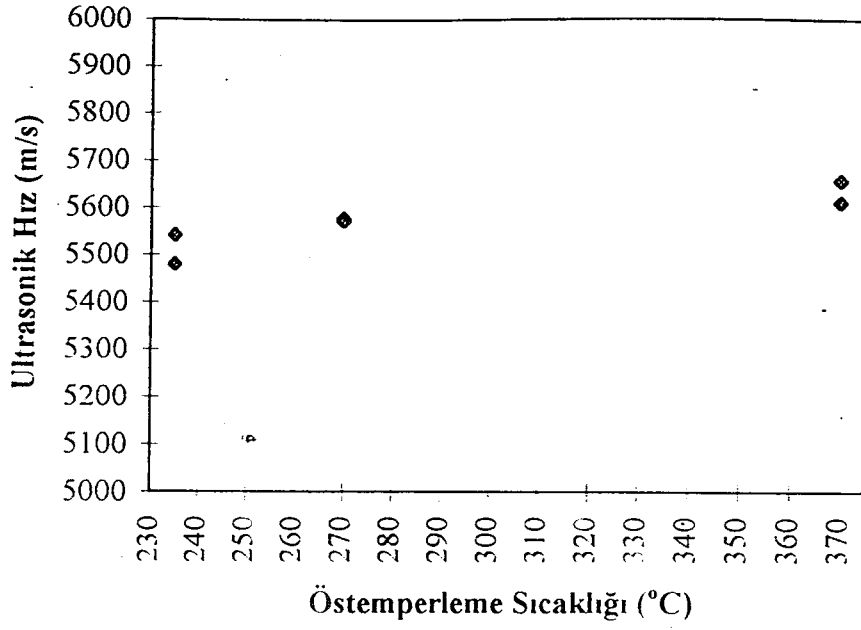
Tablo 7.5. Isıl İşlem Şartları.

Numune No	Östenitleme Sıcaklığı (°T)	Östenitleme Süresi (saat)	Östempereleme Sıcaklığı (°T)	Östempereleme Süresi (saat)
4	900	2	370	2
7	900	2	270	2
8	900	2	235	2
13	900	2	370	2
14	900	2	270	2
15	900	2	235	2

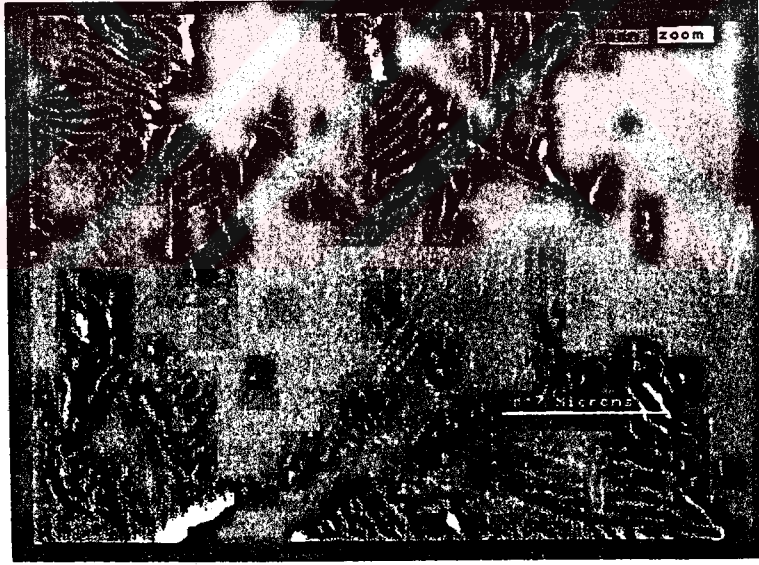
Table 7.6. Ultrasonik Test Sonuçları.

Numune No	Ultrasonik Ölçüm (mm)	Kumpasla Ölçüm (mm)	cx (m/s)
4	26.60	24.95	5614.221
7	27.20	24.88	5577.423
8	25.90	25.00	5480.699
13	26.20	24.30	5660.191
14	26.50	24.20	5572.603
15	25.60	24.35	5541.948

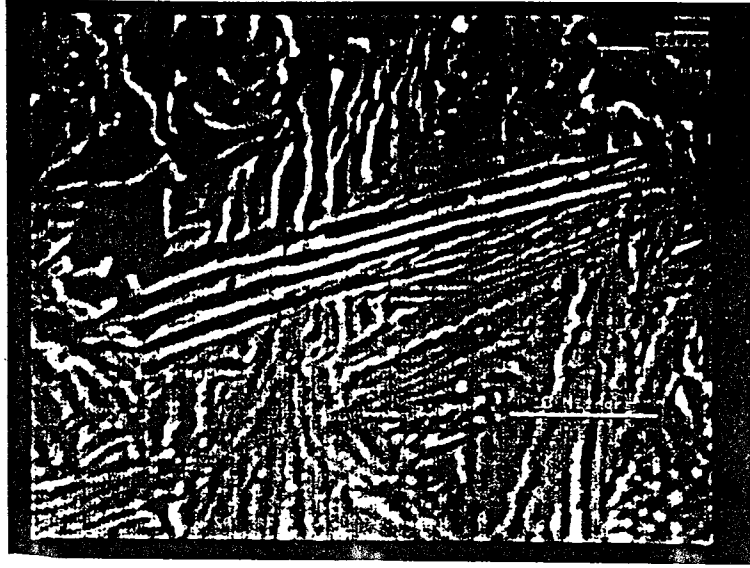
Östempereleme sıcaklığı ile ultrasonik hız ilişkisi şekil 7.10' de verilmiştir. 235°C' den 370°C' e doğru bir artış söz konusudur. Şekil 7.11 ve 7.12' de 235 ve 370°C' lerde östemperelenen numunelerin tarama elektron mikroskopundan alınan görüntüleri verilmiştir.



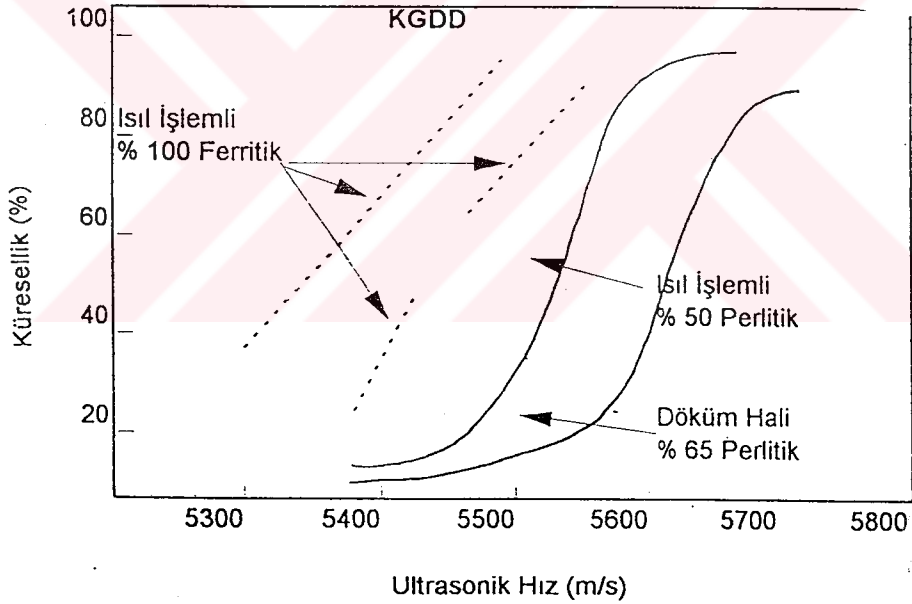
Şekil 7.10. Östemeleme Sıcaklığı ile Ultrasonik Hız İlişkisi.



Şekil 7.11. 900°C' de 1saat östenitlenip, 370°C ' de 2 saat östemeleme numune yapısının tarama elektron mikroskobu fotoğrafı (Jeol-Superprobe 733). X3000



Şekil 7.12. 900°C’ de 1saat östenitlenip, 235°C ‘ de 2 saat östemperlenen numune yapısının tarama elektron mikroskobu fotoğrafı (Jeol-Superprobe 733).



Şekil 7.13: Döküm halinde ve ısıl işlem yapılmış halde farklı ferrit/perlit oranlarına sahip dökme demirlerde küreselleşme-ultrasonik hız ilişkisi.

SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmalar aşağıdaki sonuçlara ulaşmıştır:

1. DDK 40' daki düşük ve DDK 60' daki yüksek sertlik değerlerine rağmen ultrasonik hızda önemli bir değişiklik olmamıştır.
2. Aynı şekilde DDK 40 ve DDK 60' ın farklı çekme dayançlarına sahip olmalarına rağmen ultrasonik hızda önemli bir değişiklik olmamıştır.
3. Benzer şekilde yüzde uzamanın artışına karşın hız değerlerinde bir değişim olmamıştır.
4. Mikroyapıdaki perlit miktarının artması hızda bir bir değişim oluşturmamıştır.
5. Küreselleşme yüzdeleri her iki malzemede % 60-100 olup küreleşmeteki değişimlerin hız değerleri üzerinde bir değişiklik oluşturmamıştır. Bu durum Metals Handbook 11. ciltte, dökümlerin tahribatsız muayenesi bölümündeki şekil 7.13' da açıklanan duruma uymaktadır.
6. Östemperleme sonucu 235⁰C' de yapılan östemperlemede en düşük hız, 370⁰C östemperlemede ise en yüksek hız elde edilmiştir. Östemperleme sonucu yapının yapılan tarama elektron mikroskobu incelemesinde 370⁰C' de üst beynit, 270⁰C ve 235⁰C' de ise alt beynit yapısı olduğu gözlenmiştir. Buna göre üst beynit matris yapısında ultrasonik hızın alt beynit yapısından daha yüksek olduğu görülmektedir.
7. Çizilen diyagramlar, dökümhanelerde görüntü analiz incelemesi yerine kullanılabilir. Aynı zamanda östemperleme işleminin kontrolünde de bu veriler mümkün olabilecektir.

KAYNAKÇA

1. Millis K., Journal of Metals, June 1960. "The Metallurgy of Ductile Iron", p.p.459.
2. "Ductile Iron" ASM Metals Handbook 9th edition, Vol. 15.
3. "Grey Iron" ASM Metals Handbook 9th Edition, Vol. 15.
- 4 Minkoff I. "Solidification and Cast Structure" chapter 12, p.p.192-200
5. S.İzgiz, Küresel Grafitli Dökme Demir, 1991, SEGEM.
- 6 Forrest R.D. "Some Factors Affecting the Mechanical Properties of Ductile Iron", BCIRA, Report 1755.
7. Morrogh H. "The Status of the Metallurgy of Cast Irons, JISI, January 1968.
8. Gilbert G.N.J. "An Introduction to the Mechanical Properties of Nodular Cast Iron", BCIRA, Report 1649.
9. BCIRA Broadsheet 211-7 "Effect of Carbon in Nodular SG Irons".
10. BCIRA Broadsheet 211-5 "Effect of Nikel in Nodular SG Irons".
11. BCIRA Broadsheet 211-4 "Effect of Cupper in Nodular SG Irons".
12. BCIRA Broadsheet 211-1 "Effect of Silicon in Nodular SG Irons".

13. BCIRA Broadsheet 211-2 "Effect of Phosphorus in Nodular SG Irons".
14. 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 Press London, p.p. 223.
15. Chang B, Kawano Y, Murakami Y., R. Ozaki, Yamamoto S, *Metal Science*, 1975, Vol.9, p.p. 290.
16. Guilemany J. M., *Practical Metallography*, 1990, 27, p.p. 189.
17. Lesuer D.R., Sherby O.D., Syn C.K., *Met. and Mat. Trans.A*, 1994, Vol. 25, p.p. 1481.
18. Lui T.S., Yanagisawa O., *Met. and Mat. Trans. A*, 1985, Vol. 16, p.p. 667
19. Patterson W., *The Gray Iron Castings Handbook*, 1963.
20. Sergeant G.F., A Fuller.G., "The Effect Upon Mechanical 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*, 1982, p 331-360.
21. Topuz A., *Tahribatsız Muayeneler*, İstanbul 1993, YTÜ.
22. *Metals Handbook*, Vol.16, p.p.231-377.
23. Janowak, J.F., Gundlach, R.B. " Approaching Austempered Ductile Iron Properties by Controlled Cooling in the Foundry", *J. Heat Treat.*, Vol. 4, No.1, June 1985, p. 25.

24. Johansson, M. " Properties and Applications of Austempered Austenitic-Bainitic Ductile Iron", 45th Int.Foundry Congress, 29 Sept.-2 Oct., 1978, Budapest- Hungary.
25. " Cast Iron and Steel: the Differnce in Austempering" Heat Treat., May 1985.
26. Dubensky W.J., Rundman, K.B. " An electron Microscope Study of Carbide Formation in Austempered Ductile Iron", AFS Trans. 85-64, p.389.
27. Janowak, J.F., Gundlach, R.B. " Austempered Ductile Iron Combines Strength with Toughness and Ductility, Met. Progress, July 1985,p.19.
28. Harding, R.A. "Effect of Metallurgical Process Variables on Austempered Ductile Irons", Metals and Materials, Feb.1986, p.65.
29. Janowak, J.F., Gundlach, R.B. " Development of a Ductile Iron for Commercial Austempering" AFS Trans., 83-54, p. 377.
30. Morgan, H.L. " Introduction to Foundry Production and Control of Austempered Ductile Irons" British Foundryman, 80(2), 1987, p..98.
31. Voight, R.C. "Microstructural Analysis of Austempered Ductile Cast Iron Using the Scanning Electron Microskope", AFS Trans., 83-89, p.253.
32. Blackmore, P.A., Harding, R.A. " The Effect of Metallurgical Process Variables on the Properties of Austempered Ductile Irons", J. Heat Treat. Vol. 3, No.4, Dec.1984, p.310.
33. Harding, R.A., Gilbert, G.N.J. "Why the Properties of Austempered Ductile Irons Should Interest Engineers", British Foundryman, 79(10), Dec. 1986, p.489.

34. Harding, R.A., "Austempered Ductile Irons-Gears", *Materials and Design*, Vol. 6, No. 4, August/Sept. 1985.
35. Hughes, I.C.H. "Austempered Ductile Irons-Their Properties and Significance", *Materials and Design* Vol.6, No.3, June/July 1985.
36. Fuller, A.G. "Austempered Ductile Irons-Preselected Applications" *Materials and Design* Vol.6, No.3, June/July 1985.
37. Emerson P.J. "Assessing Properties of Graphitic Irons by Ultrasonic Methods The European Experience"



Ö Z G E Ç M İ Ş

Adı ve Soyadı : A. Kamelya Doğuşcu
Doğum Tarihi : 09.01.1971
Doğum Yeri : Gaziantep

Ö Ğ R E N İ M D U R U M U

<u>Tarih</u>	<u>Okul</u>	<u>Derece</u>
1992-	YTÜ Fen Bilimleri Yüksek Lisans	Yüksek Lisans Diploması (Met. Yük. Müh.)
1994 - 1995	Max- Planck Institut Stuttgart- Almanya	Misafir Öğrenci ve Araştırmacı
1992 - 1993	YTÜ Fen Bilimleri Dil Eğitim Programı YTÜ Yüksek Lisans İngilizce Programı	İyi Derecede İngilizce
1987 - 1991	YTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji Bölümü, İstanbul	Lisans Diploması (Mühendis)
1981 - 1987	Adana Kız Lisesi, Adana	Lise Diploması

İ Ş D E N E Y İ M İ

<u>Tarih</u>	<u>Firma</u>	<u>Pozisyon</u>
1995-	Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları Ferro Döküm San. ve Tic. A. Ş., İstanbul	Araştırma-Geliştirme Mühendisi
1994-1995	Max- Planck Institut Stuttgart- Almanya	Image Analyser Uzmanı
1991-1992	Ser Metal Hassas Döküm San. ve Tic Ltd.,	Kalite Kontrol Müh.