

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR TÜRBİNİ PERVANE GÖBEĞİ ÜRETİMİ VE
YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Metalurji ve Malzeme Mühendisi Çağlar YÜKSEL

**FBE Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Üretim Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof.Dr.Ahmet EKERİM (YTÜ)

İSTANBUL, 2011

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. DÖKME DEMİRLER	3
2.1. Kimyasal Bileşim ve Döküm Yapısı.....	3
2.1.1. Karbon.....	3
2.1.2. Silisyum.....	5
2.1.3. Mangan.....	7
2.1.4. Kükürt.....	8
2.1.5. Fosfor.....	8
2.1.6. Alüminyum.....	9
2.1.7. Karbon Eşdeğerliği.....	10
2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kimyasal Bileşiminin Kontrolü.....	12
2.2.1. Küreleştirici Elementler.....	12
2.2.1.1. Magnezyum.....	12
2.2.1.2. Kalsiyum.....	12
2.2.1.3. Nadir Toprak Elementleri ve Zararlı Elementler.....	13
2.3. Dökme demirin dokusal özellikleri.....	15
2.3.1. Grafit.....	16
2.3.2. Sementit.....	17
2.3.3. Ferrit.....	17
2.3.4. Perlit.....	18
2.3.5. Östenit.....	19
2.3.6. Ledeburit.....	19
2.3.7. Steadit.....	20
2.3.8. Beynit.....	20
2.4. Standartlara Göre Dökme Demir Çeşitleri.....	20
2.4.1. Gri Dökme Demir (Lamel Grafitli Dökme Demir).....	20
2.4.2. Küresel Grafitli Dökme Demir.....	21
2.4.3. Beyaz dökme demir.....	25
2.4.4. Temper dökme demir.....	26
2.4.5. Özel dökme demir.....	28
2.4.5.1. Hızlı soğutulmuş (çil uygulanmış) dökme demir.....	30
2.4.5.2. Benekli (Mottled) Dökme Demirler.....	31

2.4.5.3.	Vermiküler (Yumru Grafitli) Dökme Demirler.....	31
2.4.5.4.	Yüksek Alaşımli Dökme Demirler.....	31
3.	RÜZGÂR TÜRBİNİ PERVANE GÖBEĞİNİN DÖKÜM	
	METALURJİSİ.....	33
3.1.	Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demir.....	34
3.2.	Bileşim Kontrolü.....	35
3.3.	Aşılama ve Mg-Prosesi.....	37
3.4.	Mg-İşlemi İçin Küreleştirici Seçimi.....	38
3.5.	Aşılama Prosesi.....	49
3.5.1.	Aşılama Mekanizmaları.....	52
3.5.2.	Kalın Kesitli Dökme Demirlerin Aşılama.....	53
3.5.2.1.	Kalın Kesitlilerde Aşılama Uygulamaları.....	55
3.5.2.2.	Kalın Kesitli Dökme Demirlerin Potada Aşılama.....	55
3.5.2.3.	Kalın Kesitli Dökme Demirlerin Kalıpta Aşılama.....	56
3.5.2.3.1.	Kalın Kesitli Dökme Demirler İçin Döküm Havuzuna Yerleştirilmiş İlave.....	57
3.5.2.3.2.	Kalın Kesitli Dökme Demirler İçin Yolluk Sistemine Yerleştirilmiş İlave.....	57
3.5.3.	Kalın Kesitli Dökme Demirlerle Aşılama Küreselliğinin Solması.....	58
3.6.	Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirin Katılma, İçyapısı ve Özellikleri.....	62
3.6.1.	Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirin Katılma.....	63
3.6.1.1.	Heterojen Çekirdeklenme Kuramı.....	63
3.6.1.2.	Grafit Çekirdeklenme Mekanizmaları İçin Kuramlar.....	66
3.6.1.2.1.	Gaz Balonu Kuramı.....	66
3.6.1.2.2.	Grafit Kuramı.....	67
3.6.1.2.3.	Silisyum Karbür Kuramı.....	67
3.6.1.2.4.	Sülfat/Oksit Kuramı.....	68
3.6.1.2.5.	Silikat Kuramı.....	68
3.6.1.3.	Metalik Olmayan İnklüzyonların Doğası.....	70
3.6.1.3.1.	Sülfatlar.....	70
3.6.1.3.2.	Karbürler.....	71
3.6.1.3.3.	Oksitler.....	71
3.6.1.4.	İnklüzyonlarda Grafitin Çekirdeklenmesi.....	72
3.6.1.5.	Magnezyum İşleminde Sonra Grafitin Çekirdeklenmesi.....	73
3.6.1.6.	Aşılama İşleminde Sonra Grafitin Çekirdeklenmesi.....	74
3.6.1.7.	Grafit Çekirdeklenmesinde Nadir Toprak Elementlerinin(NTE) Etkisi.....	74
3.6.2.	Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirin Doku Özellikleri.....	76
3.6.3.	Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirin Küreselliği.....	77
3.6.4.	Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirde İçyapı Oluşum Kinetikleri.....	78
3.6.4.1.	Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirde Küre Oluşum Kinetiği.....	78
3.6.4.2.	Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirde Ferrit-Perlit Miktarı Oluşum Kinetiği.....	86
3.6.4.3.	Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirin Ferrit Tane Boyutu.....	88
3.7.	Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirin Döküm Pratiği.....	89
3.7.1.	Kalıplama Malzemesi.....	90
3.7.2.	Yolluk Çıkıcı Sistemleri.....	90

3.7.3.	Döküm Zamanı ve Sıcaklığı.....	90
3.7.4.	Akışkanlık.....	91
3.7.5.	Kalıp Bozma.....	91
3.8.	Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirin Isıl İşlemi.....	93
4.	DENEYSEL İNCELEME.....	94
4.1.	Deney Prosedürü.....	94
4.2.	Mekanik Deneylerin İncelenmesi.....	95
4.3.	Çekme Dayancı İncelenmesi.....	95
4.4.	Charpy Çentik Darbe Dayancı İncelenmesi.....	95
4.5.	Sertlik İncelenmesi.....	96
4.6.	İçyapı(Doku) İncelenmesi.....	97
5.	DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	98
5.1.	Çekme Dayancı Değerlendirilmesi.....	98
5.2.	Çentik Darbe Dayancı Değerlendirilmesi.....	99
5.3.	Brinell Sertlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	99
5.4.	İçyapı(Doku) Değerlendirilmesi.....	100
7.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	107
	KAYNAKÇA.....	109
	ÖZGEÇMİŞ.....	113

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Karbonun mekanik özelliklere etkileri..... 5
Şekil 2.2	Silisyumun mekanik özellikler üzerindeki etkisi.....6
Şekil 2.3	Mangan bileşiminin mekanik özelliklere etkisi..... 7
Şekil 2.4	Fosforun mekanik özelliklere etkileri..... 9
Şekil 2.5	Karbon eşdeğerliğinin etkisi..... 10
Şekil 2.6	Dökümün oluşumunda karbon ve silisyumun etkisi..... 16
Şekil 2.7	Temper dökme demirin içyapısındaki küresel grafitler (sol) ve gri dökme demirin içyapısındaki yaprak şekilli grafitler (sağ)..... 17
Şekil 2.8	Döküm sonrası gri dökme demirin içyapısı. E, ötektik; F, çökelmiş grafitteki ferrit; P, perlit..... 18
Şekil 2.9	Döküm sonrası östenitik küresel grafitli dökme demir. Östenit ve ötektik M_7C_3 tipi karbürler..... 19
Şekil 2.10	Döküm sonrası gri dökme demir içyapısı. E, fosforlu ötektik. Hücre sınırlarında beyaz steadit yapılar..... 20
Şekil 2.11	Çeşitli dökme demirlerin gerilme-uzama eğrilerine grafit morfolojisinin etkisi..... 24
Şekil 2.12	Çeşitli dökme demirlerin içyapıları (a) Gri dökme demir (b) Küresel grafitli dökme demir (c) Beyaz dökme demir (d) Temper dökme demir..... 29
Şekil 2.13	Dökme demirlerin sınıflandırılması ve içyapıları..... 30
Şekil 3.1	Farklı tasarıma sahip tipik rüzgar türbini göbekleri..... 34
Şekil 3.2	Ferritik küresel grafitli dökme demirlerde darbe dayancına karbonun etkisi..... 36
Şekil 3.3	Ferritik küresel grafitli dökme demirlerde darbe dayancına silisin etkisi..... 36
Şekil 3.4	Silisyum bileşimine bağlı fosforun darbe dayancı değerine etkisi..... 37
Şekil 3.5	FeSiMg Alaşımı Seçiminde Proses Çeşitliliğinin Etkileri..... 39
Şekil 3.6	FeSiMg Alaşımı Seçiminde Demir Bileşiminin Etkileri..... 39
Şekil 3.7	Küresel grafitli dökme demir pota işlemi yöntemindeki FeSiMg ilavesini etkileyen etkenler..... 40
Şekil 3.8	%5 Mg, %1 RE ve %1Ca içeren bir FeSiMg alaşımının homojen içyapıdaki tipik fazlara örnek..... 41
Şekil 3.9	Üzerine döküm, sandviç ve tandış örtülü potaların şematik gösterimi..... 43
Şekil 3.10	Küresel grafitli dökme demirin işlem prosesleri için “reaksiyon şiddeti”, “magnezyum verimi”, “toz ve cüruf oluşumu” ve “aşılama etkisi” parametreleri arasındaki ilişkinin şematik gösterimi..... 44
Şekil 3.11	Tandış örtülü potanın şematik görünümü..... 44
Şekil 3.12	Kükürt içeriği, işlem sıcaklığı, alaşım cebi, pota çeşidine bağlı verim artırımının şematik gösterimi..... 46
Şekil 3.13	Ana demirdeki artan kükürt ve oksijen bileşimi daha yüksek oranlarda magnezyum ilavesi gerekliliğinin gösterilmesi..... 47
Şekil 3.14	Farklı iki demirin farklı S ve FeSiMg ilave oranlarını gösterimi..... 47
Şekil 3.15	(a) Mg-işlemden sonra uzun bekleme süresi neticesindeki solmanın grafiksel gösterimi, (b) işlem potasındaki magnezyum solmasının sunumunun şematik gösterimi..... 49
Şekil 3.16	Ferrosilis aşılayıcısındaki tepkime veren elementlerin toplamının bir fonksiyonu olarak aşılama etkisi..... 50
Şekil 3.17	Küresel Grafitli Dökme Demirdeki İnküzyonlar..... 53

Şekil 3.18	Küresel grafitli dökme demirin farklı büyütmelelerdeki mikro-inklüzyonları ve grafitin çekirdekleşme bölgesinin bileşiminin şematik gösterimi.....	54
Şekil 3.19	İşlenmiş küresel grafitli dökme demirde cüruf ve mikro-çekirdekleşme olarak inklüzyonların tane dağılımının şematik gösterimi.....	54
Şekil 3.20	Aktarım potasında, döküm potasında veya kalıpta aşılama için değişik yöntemlerin şematik gösterimi.....	55
Şekil 3.21	Tabletin ölçülerinin şematik gösterimi.....	56
Şekil 3.22	Döküm havuzuna yerleştirilen tabletin şematik gösterimi.....	57
Şekil 3.23	Yolluk sistemine yerleştirilen tabletin şematik gösterimi.....	57
Şekil 3.24	Döküm havuzundaki değişik tiplerde tabletlerin uygulamaları.....	58
Şekil 3.25	Aşılama solmasının bekleme zamanı, kalıntı sayısı ve yoğunluğu ile ilişkisi.....	59
Şekil 3.26	Potansiyel çekirdekleşme bölgelerinin sayısındaki düşüş sebebiyle irileşme fenomeni olarak tanımlanan aşılama solması.....	60
Şekil 3.27	Magnezyum ve aşılama sonrası oluşan solmanın iki farklı dokudaki görünüşü.....	60
Şekil 3.28	Heterojen çekirdekleşmenin şematik gösterimi.....	63
Şekil 3.29	Karakteristik aşırı soğuma-düzlemsel kafes aykırı bağlanımı grafiği.....	65
Şekil 3.30	Karsay'ın gaz balonu kuramı.....	66
Şekil 3.31	(a) Küresel grafitli dökme demirde silikat çekirdeklerinin TEM muayenesi, (b) (Ca, Al) ihtiva eden ferrosilis aşılama işleminden sonra inklüzyonlardaki Mg, Ca, Al ve Si'in dağılımının TEM X-ışını görüntüleri, (c) Küresel grafitli dökme demirde heterojen çekirdekleşmenin şematik gösterimi.....	69
Şekil 3.32	SEM görüntüleri karmaşık çift katmanlı magnezyum sülfat ve silikat inklüzyonlarında grafit çekirdeğini göstermektedir. (a) çekirdekteki çekirdekçik ile grafit küresi (b) çekirdeğin büyütülmüş görüntüsü.....	72
Şekil 3.33	Enstatit ($MgO \cdot SiO_2$) ve forsterit ($2MgO \cdot SiO_2$) grafitin çekirdekleşmesinin (a) $MgO \cdot SiO_2$ (enstatit), (b) $2MgO \cdot SiO_2$ (fosterit), (c) grafit/ $MgO \cdot SiO_2$ arayüzeyinde kafes diziliminin detayları.....	73
Şekil 3.34	Çekirdek/substrat arayüzeyde kafes diziliminin detaylarını göstermektedir. (a) koheren grafit/ $BaO \cdot SiO_2$ arayüzeyi (b) koheren grafit/ $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ arayüzeyi.....	74
Şekil 3.35	ASTM A247'ye göre tipik grafit şekilleri. I; Küresel grafit, II; Bozulmuş küresel grafit, III; Temper(dövülebilir) grafit; IV; Yoğuşuk grafit, V; Yengeç şekilli grafit, VI; Patlamış grafit, VII; Lamel grafit.....	76
Şekil 3.36	Ferritik dokulu küresel grafitli dökme demirin içyapısında bulunan ferrit (açık bölgeler) ile grafit kürelerini(koyu renkli yuvarlak şekilli) 100X büyütme ile büyütülmüş ve %2 nital ile dağlanmış olası içyapıyı göstermektedir.....	77
Şekil 3.37	Çekirdekleşme kuramının grafiksel gösterimi.....	79
Şekil 3.38	a) Ötektik gelişim modeli, b) faz diyagramı.....	81
Şekil 3.39	a) Fe-C-Si üçlü faz diyagramından bir parça b) Üçlü faz diyagramının üstten görünüşü.....	82
Şekil 3.40	Ötektik sıcaklıktaki soğuma oranı ile küresellik arasındaki ilişki.....	84
Şekil 3.41	a) 10, b) 20 ve c) 30 mm kesit kalınlıklarındaki parçaların deneysel ve hesaplanan dokuların gösterimi.....	85
Şekil 3.42	Ötektik reaksiyondan başlayan soğuma hızları ve küresellik ile ferrit yüzdesindeki değişimler.....	87
Şekil 3.43	Ferrit tane boyutu ile küre çapı arasındaki ilişki.....	88
Şekil 3.44	Farklı kesit kalınlıklarındaki dökümün optik mikroskop görüntüleri. (a) 3mm, (b) 5mm, (c) 24mm, (d) 50mm.....	92
Şekil 3.45	Ferritik doku için yaklaşık kalıp bozma süresi.....	92

Şekil 4.1	Mekanik muayeneler ve doku denetimi için kullanılan bloğun şematik gösterimi.....	94
Şekil 4.2	Mohr-Federhaff Universal çekme-basma makinesi.....	95
Şekil 4.3	Mohr-Federhaff çentik darbe test cihazı.....	96
Şekil 5.1	EN-GJS400-18U-LT malzemesi için çekme testi grafiği.....	99
Şekil 5.2	Dağlanmamış FKGDD'in optik mikroskobu görüntüsü (x50).....	101
Şekil 5.3	Dağlanmamış FKGDD'in SEM görüntüsü (x100).....	101
Şekil 5.4	Dağlanmamış FKGDD'in SEM görüntüsü (x200).....	102
Şekil 5.5	Dağlanmamış FKGDD'in SEM görüntüsü (x300).....	102
Şekil 5.6	Dağlanmamış FKGDD'in SEM görüntüsü (x1000).....	103
Şekil 5.7	Dağlanmış FKGDD'in SEM görüntüsü (x100).....	103
Şekil 5.8	Dağlanmış FKGDD'in SEM görüntüsü (x200).....	104
Şekil 5.9	Dağlanmış FKGDD'in SEM görüntüsü (x300).....	104
Şekil 5.10	Kırılma yüzeyi SEM görüntüsü (x1000).....	105
Şekil 5.11	Kırılma yüzeyi SEM görüntüsü (x500).....	105
Şekil 5.12	Kırılma yüzeyi SEM görüntüsü (x100).....	106
Şekil 5.13	FKGDD'in EDS spektral analizi.....	106

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Kesit kalınlığına ve döküm sıcaklığına bağlı önerilen $C_{E\dot{S}}$ değerleri..... 11
Çizelge 2.2	Alaşımatsız dökme demirlerin kimyasal bileşimleri..... 11
Çizelge 2.3	Lamel grafitli dökme demirlerin çekme dayanımları..... 21
Çizelge 2.4	Küresel grafitli dökme demirlerin sertlik değerleri ve diğer mekanik özellikleri..... 23
Çizelge 2.5	Küresel grafitli dökme demirlerin kesit kalınlığına bağlı bazı mekanik özellikleri..... 25
Çizelge 2.6	Beyaz Temper Dökme Demirlerin normları ve mekanik özellikleri..... 27
Çizelge 2.5	Siyah Temper Dökme Demirlerin normları ve mekanik özellikleri..... 28
Çizelge 3.1	Ferritik dokulu küresel grafitli dökme demir için kimyasal bileşimi..... 35
Çizelge 3.2	Rüzgar türbini pervane göbeği üretimi için kullanılan kimyasal bileşimi..... 35
Çizelge 3.3	FeSiMg alaşımları için farklı işlem prosesleri için tipik spesifikasyonlar..... 40
Çizelge 3.4	Mg İşlemi için uygulanan proses çeşitleri..... 42
Çizelge 3.5	FeSiMg kimyasal bileşimi..... 45
Çizelge 3.6	Aşılaiıcı olarak kullanılan elementler..... 49
Çizelge 3.7	Kalıpta aşılaiamada kullanılan tablet ölçüleri..... 56
Çizelge 3.8	IIA grubu sülfatlarının kristal yapısı, ergime sıcaklığı ve standart serbest enerjilerinin özeti..... 70
Çizelge 3.9	IIA grubu karbürleri için kristal yapısı, ergime sıcaklığı ve standart serbest enerjilerinin özeti..... 71
Çizelge 3.10	IIA grubu oksitleri için kristal yapısı, ergime sıcaklığı ve standart serbest enerjilerinin özeti..... 71
Çizelge 3.11	Mikro modellemede kullanılan değişkenler ve sabitler..... 83
Çizelge 3.12	İçyapıdaki chunky grafit ile mekanik özellikler arasındaki ilişki..... 89
Çizelge 4.1	EN-GJS-400-18U-LT (GGG 40.3) spektral analizi..... 94
Çizelge 5.1	EN-GJS400-18U-LT çekme testi değerleri..... 98
Çizelge 5.2	Charpy V-çentikli darbe dayancı verileri..... 99

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmalarım süresince, bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Prof.Dr.Ahmet EKERİM'e, en derin saygılarımla teşekkür ederim.

Yürüttüğüm deneysel çalışmalarda, desteğini esirgemeyen, Arş.Gör.Alptekin KISASÖZ'e, Arş.Gör.Kerem Altuğ GÜLER'e, Arş.Gör.Zekeriya CÖMERT'e, Arş.Gör.Gökhan ÖZER'e, Teknisyen Şaban CEYLAN'a, KOSGEB çalışanı meslektaşım Metalurji ve Malzeme Mühendisi Köksal YILMAZ'a ve Arş.Gör.Dr.Özkan Şen'e teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca en büyük destekçilerim olan, yüksek lisans çalışmalarım da manevi desteğini esirgemeyen sevgili annem Selma YÜKSEL'e ve her daim varlığı hissettiğim rahmetli babam Erdoğan YÜKSEL'e, şu zamanlarda vatani görevini tamamlamak için ayrı kaldığımız can yoldaşım kardeşim Bilgehan YÜKSEL ile çok değerli sevgili eşim Meral YÜKSEL'e sevgi ve minnet duygularıyla teşekkür ederim.

Ocak, 2011

ÖZET

Temiz enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisinden yararlanmak için önemli araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalar sonucu ağır çalışma koşullarını karşılamaya yönelik yeni malzemelerin kullanılması veya mevcut malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesidir. İklimsel etkiler için gereksinimleri karşılayacak, fiziksel ve mekanik özellikleri yüksek, kullanım süresinde çalışma güvenliği ve emniyeti sağlayacak, üretimi, şekillendirilmesi, bakımı ve onarımı kolay, verimli işletme koşullarına uyumlu malzemeler tercih nedenleridir.

Tasarım gereksinimleri sağlanmış rüzgâr türbininin göbeği, mukavemet, sertlik, işlenebilirlik, aşınma direnci, çentik darbe dayanımı ve korozyon direncine sahip küresel grafitli dökme demir malzemeler literatür verilerine göre incelenmiş ve mevcut özellikleri araştırılmıştır. Dökme demir malzemeler genel olarak incelenmiş ve pervane göbeği yapımında kullanılan küresel grafitli dökme demirlerin dökülebilirliği, üretilebilirliği, tasarım gereksinimlerini karşılaması için modelleme ve simülasyon çalışmalarından da yararlanılarak EN-GJS-400-18U-LT standardına uygun malzeme seçilmiştir.

Seçilen malzemenin şekilli parça olarak dökülebilmesi için modeli, kum kalıba dökümü, dökümde katılma hızının kontrolü ve ferritik dokuda olması, grafit yapısı, çekme ve akma dayancı, kopma uzaması, çentik darbe dayanımı v.b. mekanik özelliklerinin sağlanması amacıyla deneysel çalışma yapılmıştır. Yüksek gerilime sahip bölgeler, parçanın imalatı sırasında farklı kesit kalınlıkları ve bu kesitlerdeki farklı sıcaklık gradyanları nedeniyle oluşacak problemleri belirlemek için 100x100x800 mm ölçülerinde döküm parçası dökülmüştür. Numune döküm parçasından çekme deneyi, çentik darbe deneyi ve metalografik incelemeler için örnekler çıkarılmıştır. TS EN 1563'e göre çekme deneyleri ve çentik darbe deneyi yapılmıştır. Doku incelemeleri için yüzeyler metalografik olarak hazırlanmış, grafit yapıları dağlama yapmadan, mikro yapılar %2'lik nital ile dağlanarak SEM ve optik mikroskobunda incelenmiştir.

İncelemeler sonucu, çekme dayancı 459 Mpa, akma dayancı 310 Mpa, sertlik değeri 150 HB, kopma uzaması %19 bulunmuştur. Çentik darbe deneyi charpy deney metoduna göre gerçekleştirilmiş -20°C'de 10J/cm² olarak bulunmuştur. Dokusal inceleme sonucunda yapıda %95 ferritik, %5 perlit elde edilmiştir. Standart 5x50 büyütmede grafitlerin şekli sayısı ölçülmüştür. Grafitlerin küresel şekilli olduğu ve birim alandaki küre sayısının 105 (adet/mm²) olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr türbini, Pervane göbeği, Ferrit, küresel grafitli döküm

ABSTRACT

One of the clean resources of energy that is called wind energy is investigated significantly. These researches' result is using new materials to meet the severe operating conditions or making development of properties of existing materials. Materials that have higher physical and mechanical properties, resistance against the climate effects, safety, formability, cheap and easy maintenance are preferred for wind turbine production.

Design requirements provided for the wind turbine hub and strength, hardness, machinability, wear resistance, impact resistance and corrosion resistance of spheroidal graphite cast iron materials were examined and existing properties were investigated according to the literature. Generally, cast iron materials were studied and castability, producibility of spheroidal graphite cast iron that is used for fabrication of wind turbine hub were investigated. Moreover, Materials selection was carried out to provide design criteria by using modeling and simulation according to EN-GJS-400-18U-LT.

Casting and solidification analyze were studied in experimental studies. Materials characterization was carried out to examine microstructure, graphite structure and mechanical properties. Experimental studies were performed to define high stress zones and other casting problem that occur due to different cross-sectional thickness of material and temperature gradients. Specimen was obtained from casting material for metallographic examination, tensile and V-notched impact tests. Tensile tests and impact tests were applied according to the TS EN 1563. Planes were set up for metallographic examinations, graphite structures were examined before etching, SEM and optical microscopes were used for microstructure examination after etching with Nital %2.

According to mechanical tests, tensile strength was determined as 459 MPa, yield strength was determined as 310 MPa, hardness of the cast specimen was determined as 150 HB. According to tensile test, 19% elongation was obtained. According to Charpy V-notched impact test method 10J/cm² impact value was found at -20°C. With microstructural examination %95 ferritic, %5 pearlitic phases was observed. Graphite shapes was measured at standard 5x50 magnification. Graphite shapes were spheroidal and graphite count was 105 nodule/mm².

Keywords: Windmill, wind turbine, rotor hub, ferritic heavy-section ductile iron

1. GİRİŞ

Rüzgâr enerjisi yenilenebilir, ekonomik ve çevre dostu bir enerji olması dolayısıyla Dünya’da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Türkiye’deki kullanım düzeyi dünyadakine göre oldukça düşük seviyelerde bulunmaktadır. Fakat Türkiye rüzgâr enerjisi üretilebilirliği açısından yüksek bir potansiyele ve konuma sahip olmasına rağmen bu potansiyelin yaklaşık %1’ini kullanmaktadır. Bu yüzden Türkiye’deki dökümhaneler ve girişimci firmalar için yeni hedefler ve fırsatlar bulunmaktadır.

Günümüzde dökme demirler geniş kullanım alanlarıyla yaşantımızda büyük bir yer edinmişlerdir. Dökme demirlerin üstün mekanik özellikleri ve diğer önemli özelliklerinin yanı sıra fiyatlarının da alternatiflerine göre düşük olması sayesinde tercih sebebi olmuşlardır. Mühendislik malzemeleri içinde dökme demirlerin özel bir yeri vardır. Küresel grafitli dökme demirler ise, çeliğin mekanik özelliklerine ve dökme demirin üstün özelliklerine sahip yeni bir dökme demir grubu olarak tanımlanır. Küresel grafitli dökme demirlerin, yüksek mukavemet ve tokluk ile mükemmel dökülebilirliklerinin yanı sıra yüksek korozyon ve aşınma direnci, düşük üretim maliyeti, yüksek işlenebilirlik ve sönümlene kabiliyetleri nedeniyle kullanım alanlarını her geçen gün biraz daha genişlemektedir. Günümüzde dökme demirler özellikle otomobil endüstrisinde; rüzgâr türbini parçaları, valfler, krank milleri, dişli kutuları, egzoz sistemleri vb. yerlerde kullanılır.

Ağır çalışma koşulları nedeniyle rüzgâr türbinlerinde kullanılan malzeme nitelikleri büyük bir öneme sahiptir. Büyük kesit kalınlığı küresel grafit oluşumunu zorlaştırdığı için, bu tür dökümleri hatasız ve yüksek kalitede üretmek uygulamalarda önemli zorluklar çıkarmaktadır. Dökümhanelerin özellikleri kontrol edebilecek imkânlara sahip olmasını gerekli hale getirmiştir. Bunun yanında üretim işlemlerinin başlangıçtan sonuna kadar deneyimle elde edilen teknik verilerin kontrol altında tutulması zorunludur.

Rüzgâr türbini pervane göbeğinin yapımında kullanılan en önemli malzeme günümüzde küresel grafitli dökme demirlerdir. Küresel grafitli dökme demirler, mukavemet, sertlik, işlenebilirlik, aşınma ve korozyon direncinin yanı sıra fiyatlarının da alternatiflerine göre düşük olması sayesinde tercih sebebidir. Kimyasal bileşim ve mukavemet özelliklerini kontrol etmek için, bazı iz elementlerini en aza indirirken, olumlu etki yapan elementleri ilave ederek uzun ömür elde edilir. Bu nedenlerle uygulamalarda çok geniş kullanım yerleri mevcut olup, binlerce mühendislik uygulamaları için yeterli özellik ve ekonomi temel beklentilerdendir.

Mühendislik uygulamaları içinde küresel dökme demirlerin (KGDD) ayrı bir önemi vardır. Küresel grafitli dökme demirler çeliğe alternatif olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Mekanik özellikleri çeliğe benzer olduğundan ve daha uygun maliyetlerle aynı çalışma verimini verebildiğinden üretim sektöründe tercih edilen bir malzemedir.

Bu tezde, EN-GJS-400-18U-LT (EN 1563) standardındaki malzemeden 2MW gücündeki bir rüzgâr türbini pervane göbeğini döküm yoluyla şekillendirerek, yüksek dayanım, yüksek kopma uzaması ve düşük sıcaklıklarda yüksek çentik darbe dayanımı olan bir ürünü elde etme amaçlanmıştır. Kompozit malzemelerden de rüzgâr türbini pervane göbeği yapılabilirse de üretimindeki zorluklar ve yüksek maliyet nedenleriyle günümüzde rüzgâr türbininde tercih edilmemektedir. En çok tercih edilen ve yaygın olarak kullanılan küresel grafitli dökme demir malzemelerden EN-GJS-400-18U-LT (EN 1563) standardında olması sağlayacaktır. Ayrıca tasarlanan geometrik şekle uygunluğun sürekli üretilebilirliğinin verileri, laboratuvar koşullarında elde edilecek verilerden belirlenecektir.

Tez kapsamında rüzgâr türbini pervane göbeğinin üretimi ve yapısal özelliklerinin belirlenmesi konularından; malzemenin seçimi yapılacak, özellikleri ve göbeği temsil edecek örnekler üretilecektir. Göbeğin yapılmış olan modelinden ve simülasyonundan da yararlanılarak döküm bitmiş son haliyle gerçekleştirilmeden deneysel veriler elde edilecektir. Elde edilen deneysel verilerden yararlanılarak yapısal özellikler ve karakterizasyon çalışmaları daha sonraki bir çalışmada ortaya konulabilecektir.

2. DÖKME DEMİRLER

Döküm sanayisinde en yüksek üretim payına sahip ürünü dökme demirlerdir. Demir alaşımları dökümcülüğü birçok avantaja sahiptir. Bunların en önemlileri, alaşımı meydana getiren hammaddeler ucuzdur ve doğada bulunması kolaydır, üretilen ürünler yüksek sertliğe sahip, yüksek aşınma direnci gösterirler, düşük sıcaklıklarda yüksek çentik darbe enerjisine sahiptirler, korozyona dayanaklı olmalarıyla birlikte geniş bir aralıkta çok çeşitli ve farklı özelliklerin elde edilebildiği bir metalürjik özelliğe sahiptir. Dökme demir ismi genel bir ailenin tanımı olup, geniş kapsamlı ve özellikleri çok farklı demir alaşımlarının tamamını kapsar. Dökme demir, sıcakta ve soğukta biçimlendirmeye elverişli olmayıp, döküldüğü şekilde kullanılan bir Demir-Karbon-Silisyum (Fe-C-Si) alaşımıdır. Bileşimindeki karbon %2–4'e ve silisyum % 3,5'e kadar bulunabilir. Dökme demirin ana yapısı olan demirin dışında karbon, silisyum, manganez, fosfor ve kükürt de alaşım yapısında bulunur. Kükürt, dökme demirin özelliklerinde zararlı etki gösterdiğinden, bileşimde bulunmaması veya çok az miktarda bulunması gerekir. Fosfor da dökme demirin içinde belirli sınırlar dâhilinde bulunmalıdır. Dökme demirin bileşiminde bulunan bu elementler, dökme demirin ana yapısına ve özelliklerine oldukça etki ederler. Bu elementlerin dışında dökme demirde istenen özelliklere göre bakır, nikel, krom, molibden, bor gibi alaşım elementleri ilave edilebilir. Bu tip dökme demirlere özel dökme demir veya alaşımlı dökme demir adı verilir.

Ötekiğe yakın bileşimlerde erime sıcaklığı düşük (1150 – 1250)°C, katılaşma aralığı dar olur. Karbonun grafit olarak ayrışması sırasında hacim arttığından, malzemenin kendini çekmesi düşüktür (~%1). Dökme demirin elde edilmesinde başlangıç malzemesi olarak genellikle yüksek fırın piki ve çelik hurdası kullanılır (Aran, 1989). Dökme demir içinde karbon ve silisyumdan başka manganez, fosfor ve kükürt de bulunur. Özel hallerde nikel, krom, molibden, titanyum, alüminyum, bakır vb. elementlerden biri veya birkaçı da bulunabilir. Demir karbon alaşımları, dökme demirler ve çelik dökümler olmak üzere iki ana bölüme ayrılırlar. Bileşiminde % 2' ye kadar karbon bulunduranlar çelik, % 2'den çok karbon bulunduranlara dökme demir denilmektedir. Şekil 2.2 'de dökme demirlerin sınıflandırılması ve temel iç yapıları görülmektedir. Dökme demirlerin grafit ve içyapılarına göre beyaz dökme demir, gri dökme demir, küresel grafitli dökme demir ve temper dökme demir olarak sınıflandırılırlar. Bunun dışında da; grafit yapısına, dayanım özelliğine ve standarda göre çeşitli sınıflandırmalar yapılabilir.

2.1 Kimyasal Bileşim ve Döküm Yapısı

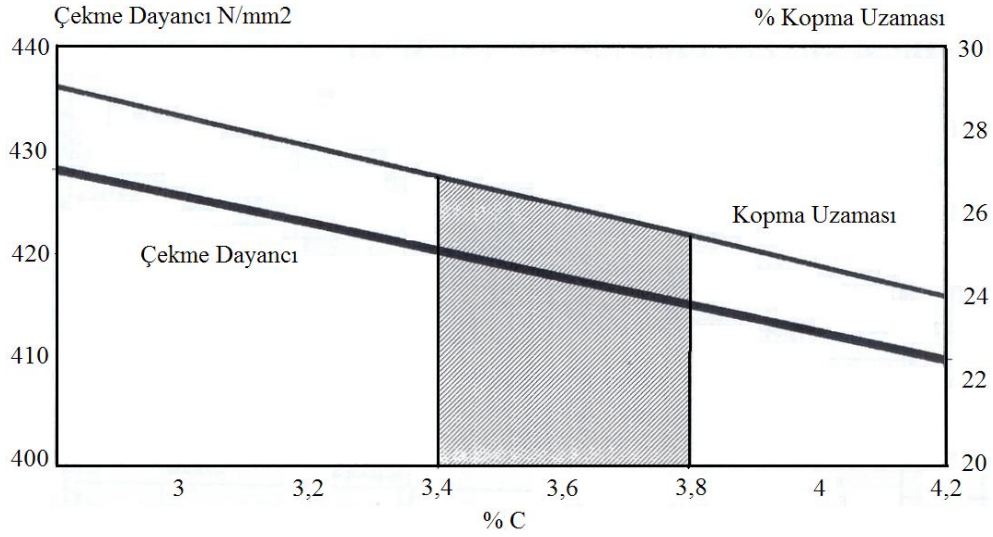
Döküm malzeme bileşiminde bulunan alaşım elementlerini iki ana gruba ayırmak mümkündür. Birinci grupta alaşımsız standart malzeme özelliklerini sağlamak amacıyla sınırlandırma yapılan karbon, silis, mangan, kükürt, fosfor, alüminyum, v.d. elementler önemlidir. İkinci grupta ise dokusal özellikleri ortaya çıkarmak için yapılan kısıtlamalardır.

2.1.1. Karbon

Dökme demirin bileşiminde bulunan karbon % 2-4 arasındadır. Karbon dökme demirin ergime sıcaklığını düşürür ve akıcılığını artırır. Karbon, dökme demirin bileşimine ve soğuma hızına bağlı olarak serbest karbon veya bileşik karbon (karbür) halinde bulunur. Bileşimde, serbest karbon bulunması, alaşımın grafitli olduğunu veya grafitleşmeyi artırıcı elementlerin bulunduğunu; bileşik karbon bulunması ise alaşımın sementit olduğunu veya karbürleşmeyi artırıcı elementlerin bulunduğunu gösterir.

Dökme demir sıvı halde iken, bileşimindeki karbon, demirle bileşik halde (demir karbür – Fe_3C) olarak bulunur. Katılaştırma esnasında ve katılaştırmadan sonra karbonun östenit içinde tam olarak yayındığını kabul edersek, dökme demirin katılaştırılması ve yapısı basit demir-karbon ikili denge diyagramı vasıtasıyla kalitatif(niteleyici) olarak anlaşılabilir. Soğuma anında demir bileşiği ayrışır ve karbonun bir kısmı grafit olarak serbest hale geçer. Bir kısmı da, gene demirle bileşik halinde kalır. Soğuma hızı artırılırsa, karbonun büyük bir kısmı demirle bileşik olarak kalır ve serbest hale geçemez (Flemings, 1996).

Bileşimindeki karbonun büyük bir kısmı serbest karbon (grafit) halinde ayrışan dökme demirler, yumuşak olur. Karbonun bileşik halinde kaldığı dökme demirler ise çok sert ve kırılımandır. Karbonun dayanım ve uzamaya olan etkileri Şekil 2.1 de gösterilmiş olup, artması her iki özelliğinde düşmesine neden olmaktadır.



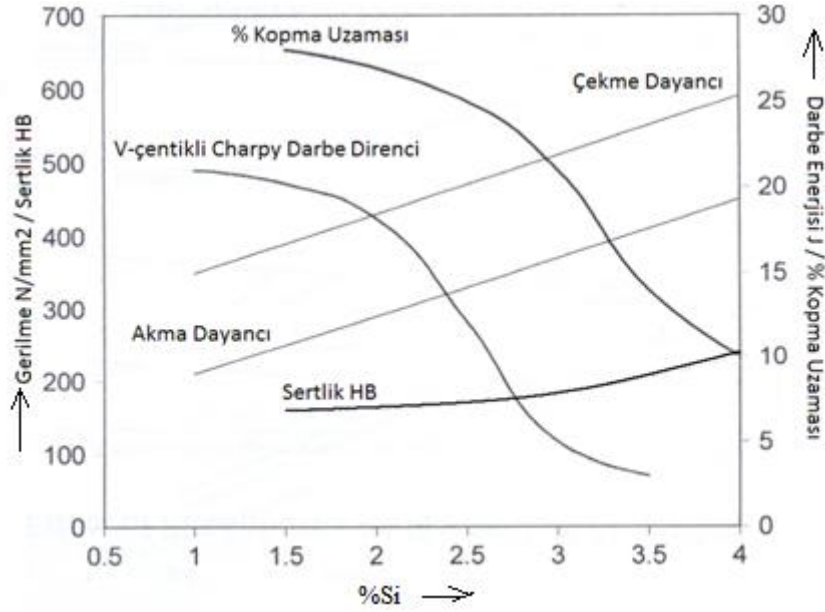
Şekil 2.1 Karbonun mekanik özelliklere etkileri(Henych, 1998)

Karbon küresel grafitli dökme demirde ana alaşım elementi olarak yer alır. Karbon oranı, grafit kürelerinin çekirdekleşme merkezlerinin sayısı, grafit kürelerinin boyutu ve sayısını doğrudan etkiler. Ayrıca karbon oranının artması dökümün akışkanlık ve beslenme özelliklerinin iyileştirilerek döküm kabiliyetim artırır(Henych, 1998).

2.1.2. Silisyum

Dökme demirin bileşimindeki silisyum genellikle % 0,50 – 3,50 arasında değişir. Dökme demirin katılaşmasında karbonun bileşik halden, grafit halinde ayrılmasına yardım eder. Silisyumun, dökme demirin bileşiminde %3,50 ile sınırlandırılması istenir. Çünkü bu değerden fazla bulunan silisyum, alaşımın sert ve kırılgan olmasına sebep olur. Dökme demirden istenilen özelliklerin sağlanabilmesi için silisyum miktarının doğru ayarlanması gerekir.

Silisyumun, karbon üzerindeki etkisi nedeniyle, ince kesitli veya küçük parçalar, silisyum miktarı fazla dökme demirden, kalın kesitli parçalar silisyum miktarı az dökme demirden dökülürler. Bunun sebebi, ince kesitli parçalar hızlı soğuduklarından bileşimdeki karbon, bileşik halinde kalır. Dökülen parçalar sert ve kırılgan olur. Bu tip parçalarda silisyum oranı % 2 – 3'dür. Kalın kesitli parçalarda durum, bunun tam tersidir. Silisyum miktarı % 1 ile sınırlandırılır.



Şekil 2.2 Silisyumun mekanik özellikler üzerindeki etkisi(Henych, 1998)

Silisyum ferrit oluşumunu teşvik eder ve karbür oluşumunu bastırır böylece süneklik artar. %2 silisyum ihtiva eden demir yapısında çekme dayancı, %0,2 akma dayancı, ferritin sertliği artar bununla beraber % kopma uzaması ve çentik darbe dayancı da düşer(Henych, 1998).Silisyumun mekanik özellikler üzerindeki etkisi Şekil 2.2 de gösterildiği gibi, sertlik, çekme dayancı ve akma dayancı artarken kopma uzaması ve çentik darbe dayanımı azalmaktadır.

Silisyum grafitleştirici ve grafit sayısını arttırıcı görevi yanında %4 miktarına kadar ferrit dokusu sertliğini arttırır, bu etki özellikle tavllanmış durumda belirgindir. Silisyum küresel grafitli dökme demirde olumsuz etkileri çentik darbe değerinin düşmesi ve geçiş sıcaklığının yükselmesi yanında ısı iletkenlik katsayısının azalmasıdır. Silisyum miktarının artması ile küre sayısı artmakta ve şekli iyileşmektedir, buna karşılık kalın kesitli parçalarda yüksek silisyum miktarında grafit bozulması (küresel şekilden uzaklaşma) ve chunky adı verilen grafitlerin oluşumu gözlenmektedir(Kleeman, 1995).

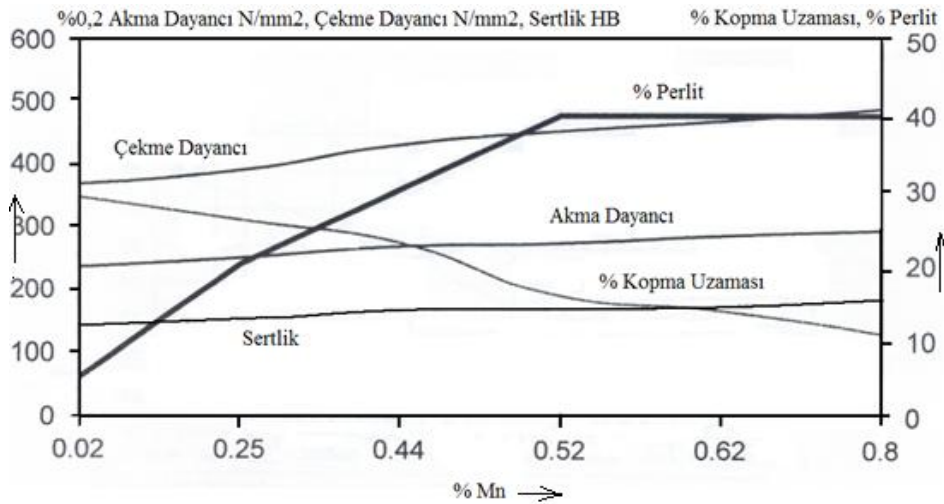
İhtiyaç olan silisyum miktarı mangan, antimon gibi perlit teşekkül ettirici elementlerin miktarlarına bağlıdır(Henych, 1998). Silisyum miktarı %(3,5–7) arasında küresel grafitli dökme demirlerin, yüksek sıcaklık oksidasyonuna karşı direnci artmaktadır. Azami Si oranlarına sahip küresel grafitli dökme demirler 800 °C'ye kadar oksidasyona karşı dirençli fakat oda sıcaklığında kötü bir süneklik özelliğine sahiptirler. Ferritik dökme demirde silisyum %(2,3–6) arasındadır. Yüksek silisyum içerikleri abrasif aşınma direnci sağlamak amacıyla kullanılmaktadır(Kleeman, 1995).

2.1.3. Manganez

Dökme demir içinde genel olarak % 0.50 – 1.00 arasında bulunur. Bileşimdeki karbonun, demirle bileşik halinde bulunmasına yardım ederek, dökme demirin sert ve kırılğan olmasına sebep olur. Dökme demirlerde manganez ile kükürdü birlikte ele almak gerekir. Çünkü manganez, kükürdün kötü etkilerini engelleyen bir elementtir. Kükürt ile birleşir ve mangansülfür (MnS) halinde cürufa karışır. Çok az miktarı yapı içinde kalır. Manganez miktarı, bileşimdeki kükürdün kötü etkilerini gidermek için gerekli miktardan daha fazla olmamalıdır, kısaca manganezin miktarı, bileşimdeki kükürt miktarına bağlıdır(Fidaner vd, 1979). Karbon ve silisyumdan sonra en etkili element mangandır. Manganez karbürleştirici ve perlit oluşturucu bir elementtir. Ferritik dokulu demirlerin döküm haliyle “as cast” üretimleri için manganezi mümkün olduğunca düşük tutmalıyız. Bunun için geliştirilmiş basit bir formül de mevcuttur.

$$\text{Mn} + \text{Cr} \leq \%0,25$$

Ayrıca dökümhanelerde perlitleştirici etkiye sahip elementlerinde tıpkı karbon eşdeğerliği gibi birlikte kullanıldığı bir manganez eşdeğerliği (MnE) vardır. $\text{MnE} = \% \text{Mn} + 2,2\% \text{Cu} + 148\text{Pb} + 29\text{Sb}$ Küresel grafitli ferritik dokulu dökme demir için MnE değeri 0,30'dan düşük olmalıdır (Henyeh, 1998). Şekil 2.3 de mekanik özelliklere etkisi gösterilmiş olup, manganez oluşumuna neden olmakta, çekme ve akma dayanımını artırırken kopma uzamasını azaltmaktadır.



Şekil 2.3 Manganez bileşiminin mekanik özelliklere etkisi(Henyeh, 1998).

Manganez karbür yapıcı etkisi parça et kalınlığına bağlı olarak silisyum miktarının seçilmesi ile indirgenebilir. Manganez birikimi (segregasyon) soğuma hızına ne kadar yavaş ise o denli fazladır. Manganez miktarı %0,4 olan eriyikte en son katılaştıran kısımda manganez miktarı %2,5

civarındadır. Mangan miktarının küresel grafitli dökme demir üretiminde asgari sınırlarında tutulmasının bir olumlu etkisi de pinhole (ince gaz boşlukları) hatalarının önlenmesi olmaktadır(Baydoğan, 1996; Labrecque ve Gagné, 1998).

2.1.4. Kükürt

Karbonun, grafit halinde ayrışmasını güçleştirir. Dökme demirin bileşiminde demirler birleşmiş olarak demir-sülfür ve manganle birleşmiş olarak mangan sülfür halinde bulunur. Kükürt, dökme demire ham demirden (pik) karışır. Bununla birlikte demir filizleri ve ham demirin yapımında kullanılan yakacaklardır. Kalın kesitli parçalarda kükürt % 1,0'dan, ince kesitli parçalarda ise % 0.08 den az olduğu durumlarda, dökme demirin özelliklerini fazla etkilemez. Fakat bileşimde bu miktarlardan daha fazla kükürt olması, dökme demirin sertliğini artırır ve akıcılığını azaltır. Bunu sonucu olarak parçada gaz boşlukları oluşabilir.

Küresel grafitli dökme demirde kükürdün en önemli etkisi grafitleri küreselleştirmek amacıyla ilave edilen magnezyum miktarını arttırmaktır. Magnezyum ilavesinden sonraki kükürt oranı yaklaşık %0,05 civarındadır. Çok düşük kükürt istenmesinin ana sebebi kükürdün magnezyuma olan yüksek afinitesindedir(Henych, 1998).

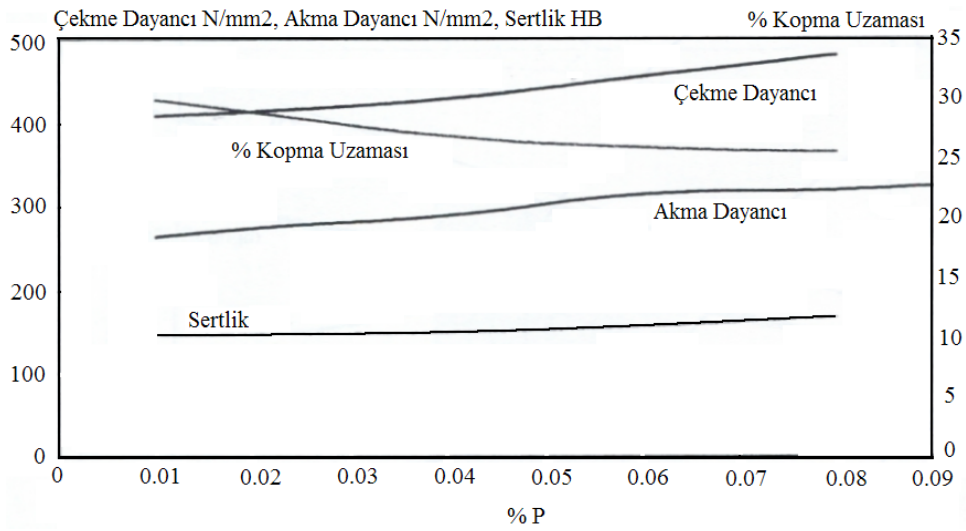
Kükürt miktarı azaldıkça, küreleştirici olarak verilecek Fe, Si, Mg alaşımı miktarı azalır. Aynı zamanda magnezyum etkisi de daha uzun süre kalıcı olur. Bu nedenle küreleştirme öncesi eriyik kükürt miktarının azami %0,03 olmasına gayret gösterilmelidir. Ayrıca kükürt miktarının alt sınırının da karbür oluşumu nedeni ile %0,004 alınması gerekir. Ferritik dökme demirde kükürt azami %0,015 olmalıdır. Kükürt miktarının artmasıyla artan magnezyum miktarı MgS inklüzyonları ve kalıcı magnezyum miktarının fazla olmasının neden olduğu diğer elverişsizliklere neden olur. İdeal kükürt miktarı %0,01 – 0,02 olmalıdır. Bu şartlarda çekme dayanımı ve akma sınır değerleri yüksektir. Küre sayısı daha fazladır. Kalıp içi küreleştirme işleminin uygulanması halinde eriyik kükürt miktarı %0,01 olmalıdır (Kökden, 1998).

2.1.5. Fosfor

Fosfor, küresel grafitli dökme demirlerde de "Steadit" olarak bilinen çok kırılğan bileşiğin oluşumuna yol açar. Fosfor elementi, süneklik, plastik şekillenme ve kaynaklama özelliklerini olumsuz etkilediği gibi, beslenmede de problem yaratır. Fosforun yapıda bulunması hücreler arası karbürler ve perlit oluşumunu teşvik ettiği gibi fosfor ayrıca galvaniz kırılğanlığının da sebebidir(Henych, 1998).

Bu nedenle tüm şartnamelerde azami fosfor miktarı %0.08 olarak verilmiş olmasına rağmen, uygulamada fosfor miktarı %0.04'ün üzerinde alınmamalıdır. Bazı ender durumlarda sürünme direncinin artırılmasında fosfor, molibden ile birlikte kullanılır. Örneğin fosfor miktarının %0.02'den %0.1'e artırılması 425°C'de sürünme hızını %500 azaltmaktadır. Aşınmaya dirençli küresel grafitli dökme demirlerde de fosfor miktarı da yükseltilmektedir.

Şekil 2.4'te görüldüğü gibi fosforun çekme ve akma dayanımını artırırken kopma uzamasını düşürerek malzemeyi sünek bir malzemeden gevrek bir malzemeye doğru eğilim göstermesine neden olur.



Şekil 2.4 Fosforun mekanik özelliklere etkileri(Henych, 1998)

2.1.6. Alüminyum

KGDD'de grafit küreleri için çekirdekleri küreleştirici ilavesinden oluşan ürünlerin çekirdek olarak görev yapmalarının dışında muhtemelen gri dökme demirdeki grafit lamelleri için de aynıdır. Çekirdek olarak görev yapan bu ürünler, magnezyum oksit (3MgO) veya magnezyum silikattır (2SiO₂, 2H₂O). Küresel grafitli dökme demirde çekirdek olarak görev yapan bu ürünlerin etkisi Küresel grafitli dökme demirde gri dökme demire kıyasla daha fazla sayıda ötektik hücre oluşumu ile açıklanabilir.

Deneysel bulguları, grafit kürelerinin gri dökme demirde olduğu gibi doğrudan küresel grafitli dökme demir, sıvıdan büyüdüğünü göstermektedir. Bu küreler sıvı temas halinde taban düzlemi ile grafit tabanına dik yönde büyürler. Ancak, çok geçmeden östenit kabuğu ile kuşatılabilirler. Daha ileri büyüme karbonun kabuk içerisinden yayılımı ile olur, karbon kabuğa doğru etki etmek zorunda olduğunda kürelerin büyümesi gri dökme demirin ötektik katılaşmasından daha yavaştır. Bu nedenle sıvı eriyik geniş bir sıcaklık aralığında bulunur ve

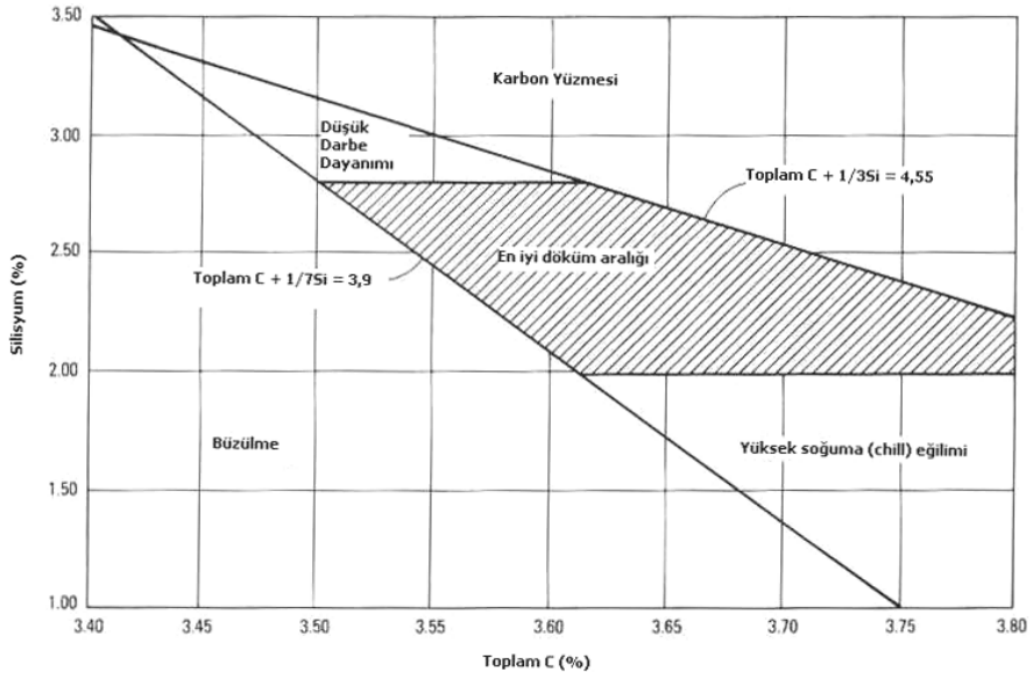
küresel grafitli dökme demirde sıcaklığı gri dökme demirden daha fazla düşürür(Kökden, 1998; Labrecque ve Gagné 1998)

2.1.7. Karbon Eşdeğerliği

Karbon eşdeğerliği ergiyikteki silis ile karbon bileşenleri arasında olan en önemli orandır. Bu değişken dökme demirin katılaşıma karakteristiğini ve akışkanlığını belirler. Yıllardır süregelen birçok formül üretilmiştir ancak uygulamalarda en pratik olan formül olarak aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$\text{Karbon Eşdeğerliği } C_{E\text{Ş}} = \% \text{ Toplam Karbon} + \left[\frac{(\% Si + \% P)}{3} \right] \quad (2.1)$$

Ötektik grafitin hacmi ve ikincil grafit genişmesi, artan $C_{E\text{Ş}}$ ile artan sıvı daralmasını dengeler. 4,2 civarında aşırı $C_{E\text{Ş}}$ değerlerinde birincil grafitler döküm parçasının yüzeylerine segrege olabilirler. Grafit yüzmesine katılaşıma zamanı, kesit kalınlığı gibi değişkenler etki eder. Hyper ötektik $C_{E\text{Ş}}$ değerlerinin kullanımı cüruf hatalarına ve chunky grafit oluşumuna sebebiyet verebilir. Demirin metalurjik kalitesinde karbon eşdeğerliğinin etkileri Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Karbon eşdeğerliğinin etkisi(Davis, 1996)

Genel olarak $C_{E\text{Ş}}$ döküm sıcaklığı ve kesit kalınlığı ile sınırlandırılmıştır. Bazı tecrübelerden elde edilen değerler aşağıdaki gibi önerilmiştir.

Şekil 2.5'te döküm için en uygun aralığı göstermektedir. Bu diyagramdan çıkarılan sonuç yüksek karbon eşdeğerliği ile karbon yüzmesi olarak adlandırılan döküm kusuru, düşük karbon eşdeğerliği ile malzemenin yeteri kadar beslenememesi ve bu durumdan mütevellit katılaşma esnasında büzülme meydana gelebileceği gösterilmektedir.

Çizelge 2.1'de önemli döküm parametrelerinden karbon eşdeğerliğinin döküm sıcaklığı ve kesit kalınlığı ile olan ilişkisini göstermektedir. Kesit kalınlığı arttıkça karbon eşdeğerliği düşmektedir çünkü uzun katılaşma gerektiği durumlarda yüksek karbon eşdeğerliği karbon yüzmesine ve mekanik özelliklerde düşüşe sebep olur.

Çizelge 2.1 Kesit kalınlığına ve döküm sıcaklığına bağlı önerilen $C_{EŞ}$ değerleri(Henych, 1998)

Sıcaklık °C	20 mm	30 mm	50 mm	80 mm
1370	4,50	4,46	4,38	4,24
1400	4,47	4,43	4,35	4,21
1425	4,45	4,40	4,32	4,19
1455	4,42	4,37	4,29	4,10

Karbon ve silisyum içeriğinin yanında, bunların grafit oluşturma etkileri de dökme demirin dokusal yapısına da etki eder. Her iki element de artan yüzdelerde grafit oluşumunu teşvik edici rol oynarlar (Çavuşoğlu, 1992). Çizelge 2.2'da bazı alaşımsız dökme demirlerin kimyasal bileşim aralıkları görülmektedir.

Çizelge 2.2 Alaşımsız dökme demirlerin kimyasal bileşimleri(Davis, 1996)

Dökme Demir Çeşidi	Bileşim Miktarı (%Ağ)				
	C	Si	Mn	P	S
Lamel Grafitli (Gri)	2,5 – 4,0	1,0 – 3,0	0,2 – 1,0	0,002 – 1,0	0,002 – 0,25
Küresel Grafitli (Sfero)	3,0 – 4,0	1,8 – 2,8	0,1 – 1,0	0,01 – 0,1	0,01 – 0,03
Beyaz	1,8 – 3,6	0,5 – 1,9	0,25 – 0,8	0,06 – 0,2	0,06 – 0,2
Temper	2,2 – 3,9	0,9 – 1,9	0,5 – 1,2	0,02 – 0,2	0,02 – 0,2

Karbon, dökme demirlerde, demir karbür (sementit – Fe_3C) halinde bulunursa bileşik karbonu, serbest olarak bulunursa grafitleri oluşturur. Dökme demirlerde grafitin oluşması

için bileşimde % 2'den fazla karbon olmasına gerekir. Demir karbürü daha az stabil hale getiren grafitleştirici elementler, örneğin silisyum, grafit oluşumunu teşvik ederler (Çavuşoğlu, 1992).

2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kimyasal Bileşiminin Kontrolü

Küresel Grafitli Dökme Demirlerde istenen özellikleri sağlamak için kontrol edilmesi gereken en önemli etkenlerden birisi de kimyasal bileşimidir. Küresel grafitli dökme demirlerde, yapıya etki eden küreleştirici ve alaşım elementleri olmak üzere iki grubu vardır.

2.2.1. Küreleştirici Elementler

Karbonun yapı içerisinde grafit küreleri şeklinde kristalleşmesi, başta magnezyum olmak üzere kalsiyum ve nadir toprak elementlerinin etkisi sonucunda oluşmaktadır. Bu elementlerin görevi, karbon atomlarının lamel grafit oluşturacak şekilde çökmesini sağlayan kükürt ve oksijen gibi yüzey aktif elementlerini pasif hale getirmektir. Bu sayede karbon yapı içerisine küreler şeklinde oluşması için gerekli koşulları sağlamaktadır. Küreleştirici elementler, oksijen veya kükürt ile reaksiyona girerek cüruf üzerinde yüzebilen ve çekirdekleşme bölgeleri olarak hizmet veren bileşikler oluştururlar. Bu sayede ergimiş metal, oksijen ve kükürt bakımından da temizlenmiş olur(Labrecque ve Gagné, 1998; Keeleman, 1995).

2.2.1.1. Magnezyum

Magnezyum, kükürt ve oksijenin eriyikten bertaraf edilmesi için kullanılan bir elementtir. Böylece eriyik katılaşmaya kadar geçen süre içinde tekrar oksidasyon ve kükürt alımına karşı korunmuş olur. İhtiyaç duyulan miktarın üzerindeki kalıcı magnezyum miktarı, grafit şekil bozukluklarına neden olur, küre sayısını azaltır.

Sementit ve perlit oluşumunun sağlar. Magnezyum miktarı, dökme demirin ana bileşimindeki kükürt ve oksijen miktarına büyük ölçüde bağlıdır(Oksijen ve kükürt giderici rol oynamaktadır). Ergimiş metalin oksijen ve kükürt içermesi çok yüksek ise önemli miktarda magnezyum, magnezyum oksit ve sülfürlerin meydana gelmesinde harcanacaktır. Küresel grafitli dökme demirdeki içeriği %0,02-0,08 seviyelerinde olmasına karşın etkinliği dökme demirin kükürt ve oksijen içeriği ile ilgilidir. Bununla birlikte küreleşmeyi emniyete almak için magnezyum çok küçük oranlarda nadir toprak elementleri ile birlikte eklenir.

2.2.1.2. Kalsiyum

Küresel grafitli dökme demirlerde tek başına küreleştirici olarak kullanılmasına rağmen ana rolü, magnezyum reaksiyonunun uçuculuğunu düşürmek ve magnezyumun etkinliğini

geliştirmektir. Kalsiyum aynı zaman da eriyikteki oksijenle reaksiyona girip CaO oluşturarak aşılama uygulamasının etkinliğini artırır. Buna karşılık eklenen kalsiyum miktarının %0,03'ü aşması durumunda magnezyumun karbür oluşturma eğilimi ortaya çıkar(Baydoğan, 1996).

2.2.1.3. Nadir Toprak Elementleri ve Zararlı Elementler

Nadir toprak elementleri atom numaraları 57-71 arası olan elementlerdir. Seryum (Ce), Lantanyum (La), Praseodmiyum (Pr) ve Neodmiyum (Nd) nadir toprak elementleri ailesinden küreleştirici olarak en çok kullanılan elementlerdir. Eğer nadir toprak elementleri düşük kükürt esaslı dökme demirde yalnızca küreleştirici olarak kullanılırsa, tamamen küresel bir yapı getirmesine karşılık küresellik seviyesi % 60'ın altında olur. Ce, Pb, As, Sb ve Al gibi elementlerin zararlı etkilerini etkisizleştirir. Genelde magnezyum ile muamele edilmiş eriyikteki bu elementlerin etkisini gidermek için %0.002–0.005 Seryum ilavesi yeterlidir. Nadir toprak elementleri içerisinde en yararlı olanı Seryum iken, Lantanyum şiddetli bir şekilde karbür kristalleşmesini teşvik edici rol oynar.

Alüminyum (Al); Kaynağı ferroalaşım, aşılama, hurdalardır. Bir cüraf hatası olarak yüzeyde iğnemi hidrojen boşluğu hatasını teşvik eder çok yüksek miktarlarda bulunması halinde grafit bozunmasında oldukça etkindir bu yüzden yapıda azami olarak % 0,10 civarında bulunması öngörülür.

Antimon (Sb); kaynak olarak emayeli hurdalar, çok yüksek oranda perlit teşekkül ettiricidir ve %0,04'ten yüksek değerlerde bozunmuş grafit oluşumuna sebebiyet verir bu yüzden azami %0,02 civarında bulunmalıdır.

Arsenik (As); Arsenik mutlak suretle yapıda bulunur çünkü ergitme hammaddesi olan pik demir ve çelik hurdasında mutlaka ihtiva edilir. Perlitleştirici etkiye sahiptir. Kalın kesitli dökme demir üretiminde eğer yeterli nadir toprak elementleri(Ce, La) ya da Mg ile dengelenmezse küresel yapının bozunmasına, dokuda parça parça bulunmasına ve mekanik özelliklerin düşmesine sebep olur, yapıda azami %0,05 bulunmalıdır.

Bizmut (Bi); kasten maça ve kalıp kaplamalarında bulunmasından mütevellit döküm esnasında yapıya sızması olasıdır. Bu elementin yapıda bulunması grafit bozunmasına neden olur ancak yeterli nadir toprak elementleri ile dengelenirse yıkıcı etkisi yok edilir. Ayrıca küresel grafitli dökme demir üretiminde bizmut elementi küre sayısını düşürmeye eğilimlidir bu yıkıcı etki de nadir toprak elementlerinin yeterli miktarda eklenmesi ile giderilir. Yapıda azami %0,02 oranında bulunmalıdır.

Bor (B): Bor da kalay gibi emayeli hurdalardan ve ocak astarlarından yapıya geçebilir. Borun ilginç etkileri mevcuttur hem ferritik dokuyu destekler fakat ferritik dokunun istendiği durumlarda istenmeyen karbürleri de teşekkül ettirici etkiye sahiptir. Bu yüzden bor ilavesi özellikle kalın kesitli dökme demirlerde pek düşünülmez. En fazla %0,01 civarına izin verilir.

Seryum (Ce): Seryum da bor gibi ilginç bir elementtir küreleştirici olarak kullanılması yanında fazla miktarlarda yapıda bulunması da kalın kesitli dökme demir üretiminde yüksek saflıkta hammadde kullanılması durumunda chunky grafit oluşumunu destekler. Seryum misk metal, aşılavıcı, alaşım elamanı olarak kasten ilave edilir. Seryum elementi yıkıcı elementlerin grafit şekillerine yapmış olduğu negatif etkileri etkisizleştirir. Magnezyum solması denilen yetersiz miktardaki küreleşme işlemi de engelleyip küreleştirmeye yardımcı olur. Eğer %0,01'den fazlaysa karbür oluşumunu tetikler bu yüzden azami %0,02 miktarında olmalıdır.

Krom (Cr): alaşımli çelik hurdası ve pik demir kaynak olarak gösterilebilir. Güçlü karbürleştirici bir elementtir. Kalın kesitli dökümler için oldukça tehlike bir elementtir çünkü kalın kesitli dökümlerde hücrelere segregasyon olarak çok kararlı karbürler oluşturur ayrıca da perlitleştirici etkiye de sahiptir. Ferritik dokulu bir yapı istendiği durumlarda %0,15 seviyesini geçmemelidir.

Bakır (Cu): Demir dışı hurdaların, çelik hurdalarının, bazı pik demirlerin kasten ilavesi ile yapıda bulunur. Kuvvetli perlit oluşturunucudur bu yüzden yüksek perlitik doku istenen durumlarda dahi %1'i geçmemelidir. Ancak ferritik dokulu küresel grafitli dökme demir mevzu bahis olduğunda azami olarak %0,1 mertebesinde bulunmalıdır.

Kurşun (Pb): emaye parçalar, boyalar, demir dışı alaşımlar, bazı pik demirler ve lehim hurdaları kaynağıdır. Perlitleştirici etkiye sahiptir. Seryum gibi nadir toprak elementlerinin bulunmadığı hallerde grafit şekline olumsuz etki yapar ve grafitleri küresel halden uzaklaştırır. Bu yüzden %0,005 gibi çok düşük miktarlarda bulunması istenir.

Molibden (Mo): Kaynağı çelik hurdaları, bazı pik demirlerdir. Perlitleştirici etkiye sahiptir. Ferritik dokuda fazla istenmeyebilir ancak SiMo gibi özel parçalarda %0,8 civarında yapıya ilave edilmesi halinde yapıya yüksek termal şok dayancısı kazandırır. Bu durumların dışında %0,05 civarında olmalıdır(Henych, 1998).

Nikel (Ni): çelik hurdalarından ve pik demirden yapıya geçer. Yıkıcı bir etkiye sahip değildir aksine %0,8 mertebesinde yapıya eklenen nikel, hem silisyumun fazla eklenip ferritik dokuda ferrit sertleşmesini önleyeceği gibi hem de akma dayancısını 40 N/mm^2 civarında bir artış sağlayarak dokuya oldukça olumlu bir etki yapar(Forrest, 2006).

Kalay (Sn): çelik hurdası, lehimler, demir dışı alaşımlar kaynak olarak gösterilebilir. Bakıra kıyasla hemen hemen 10 katı kadar kuvvetli perlitleştirici etkiye sahiptir. Yüksek perlitik doku istenen dökme demirlerde %0,1 civarında yapıya eklenir ancak bu oranın üzerinde eklenmesi durumunda kırılgenlik yaparak mekanik özellikleri düşürür. Ferritik dokulu dökme demirlerde azami olarak %0,02 seviyesinde bulunur(Henych, 1998).

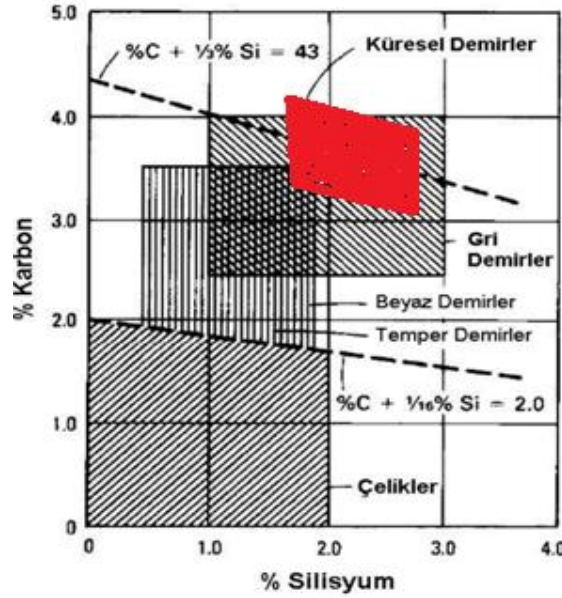
Grafit kürelerinin çevrelerindeki hatta kalay atomları için yeterli alan yoksa fazla olan kalay atomları en son katılaştıran bölgelere doğru segregasyon olurlar ve malzemenin tokluğuna büyük oranda zarar verirler(Mullins, 2006).

Titanyum (Ti): pik demirler, çelik hurdaları, bazı emaye hurdaları ve boyalardan yapıya geçer. Seryum gibi küreleştirici etkiye sahip elementlerin bulunmadığı durumlarda %0,04 gibi çok düşük oranlarda dahi grafit oluşumuna ve şekline olumsuz etki yapar. Alüminyum ile birlikte iğnemsiz hidrojen boşluklarını tetikler. Mangan (Mn), Krom (Cr), Vanadyum (V) ile birlikte de kuvvetli karbürleştirici etkiye sahiptir. Diğer yıkıcı etkilere sahip elementlerin bu yıkıcı etkilerini kuvvetlendirerek yapıya zarar verir. Ve yine yapıya zarar veren bir diğer element olan azot (N₂) ile %0,02 gibi çok düşük miktarlarda bileşik oluşturarak azotun yapıda kalmasını sağlar. Seryumun yapıya ilavesi ile bu yıkıcı etkileri etkisiz hale getirebilir. Bu kadar yıkıcı etkiye sahip titanyumun da dökme demirin yapısında bulunması istenmeyeceğinden yapı azami %0,06 civarında titanyum içermelidir.

Vanadyum (V): çelik hurdaları ve bazı pik demirlerden yapıya sızar. Perlitleştirici ve karbürleştirici bir elementtir bu yüzden ferritik dokulu küresel grafitli dökme demirlerin yapısında bulunması istenmez. Bu yüzden hurdalardan gelecek miktarlar göz önünde bulundurularak azami %0,06 oranlarını geçmemesi istenir(Henych, 1998).

2.3. Dökme demirin dokusal özellikleri

Karbon ve silisyum dökme demirin özelliklerinde etkin rol oynayan en önemli iki elementtir. Dökme demirlerde karbon ve silisyum içerikleri, içyapı özelliklerini değiştirir Şekil 2.6.'de karbon ve silisyumun birlikte döküm yapısına olan etkileri görülmekte olup, küresel grafitli dökümün meydana geldiği bölge kırmızı renkle gösterilmiştir. Dökme demirlerin metal özellikleri büyük ölçüde metalografik yapılarına bağlıdır. Dökme demirin yapısal bileşikleri ayrı tipte dökme demirlerin ve değişik şekilli grafitlerin oluşumuna neden olurlar. En önemli yapılar; grafit, sementit, ferrit, perlit, ostenit, ledeburit, steadit ve bainittir(Çavuşoğlu, 1992).



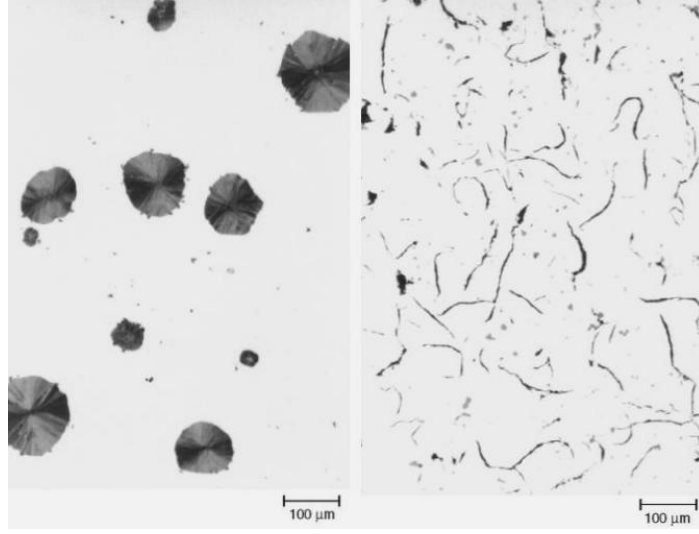
Şekil 2.6 Dökümün oluşumunda karbon ve silisyumun etkisi(Davis, 1996)

2.3.1. Grafit

Dökme demirlerde karbon, kimyasal bileşim ve soğuma hızına bağlı olarak, bileşik veya serbest halde bulunabilir. Gri dökme demirde katılaşmayla birlikte grafit lamelleri de oluşur ve düşük yoğunlukları nedeniyle toplam döküm hacminin % 6-17 sine erişebilirler. Dökme demirde lamel'den farklı şekilde de grafitler oluşabilir, örneğin beyaz dökme demirin ısıtılması ile temper karbonu veya rozet şekilli grafitler oluşabilir (Çavuşoğlu, 1992).

Grafit, gerek kristal şekli gerekse bağ kuvvetleri yönünden zayıftır. Bunun için grafitin şekli, büyüklüğü ve yapıdaki dağılmasına göre dökme demirin özellikleri üzerinde büyük etkisi vardır. Gri dökme demirde süneklik özelliğinin olmayışı lamel grafitler nedeniyledir. Temper dökme demir yapısındaki rozet şekilli grafitler veya küresel grafitli dökme demirdeki küre şekilli grafitler süneklige lameller kadar kötü etki etmez(Çavuşoğlu, 1992). Şekil 2.7'de küresel ve yaprak şekilli grafitler görülmektedir.

Dökme demirde saf karbonun en kararlı halidir. Önemli fiziksel özellikleri düşük yoğunluk, düşük sertlik ile yüksek ısı iletkenlik ve kayganlıktır. Grafit, şekil itibariyle iğnemsî yapıdan küreselliğe kadar değişen mekanik özellikler üzerinde etkin bir rol oynayan yapıdır. İğnemsî yapıdaki grafitler dökme demir yapısında çatlak etkisi yaparken, küresel grafit tam ters etki ile çatlak durdurucu olarak görev yaparak grafitin mekanik özellikler üzerindeki ilginç etkilerini göstermektedir(Mullins, 2006).



Şekil 2.7 Temper dökme demirin içyapısındaki küresel grafitler (sol) ve gri dökme demirin içyapısındaki yaprak şekilli grafitler (sağ) (Radzikowska, 2004).

2.3.2. Sementit

Dökme demirlerde karbonun bileşik halde bulunmasından oluşan sementit (Fe_3C) dökümde karbürleştirici ortamda gelişir. Yapı içerisinde karbon tamamen veya kısmen sementit halinde kimyasal olarak birleşmiş durumda bulunabilir. Beyaz ve çil uygulanmış dökme demirlerin katılaşması esnasında sementit ya serbest halde ya da kitleler şeklinde oluşur. Kitlesele olarak sementit, perlit ve ledeburit içinde bulunur. Sementit fazı çok sert ve kırılğan olup, ana bileşen olarak baskın olduğu dökme demir tiplerine de bu özelliklerini yansıtır. Bu oluşumların vukuu bulduğu hallerde malzemeyi işlemede sıkıntılar oluşabilir. (Çavuşoğlu, 1992)

Karbürler ya da sementit fazı doku oldukça sert, molibden, vanadyum, krom gibi güçlü karbür oluşturucu ya da demir ile karbonun kırılğan yapısıdır. Kuvvetli karbürler dökme demirin aşınma direncini arttırlar fakat kırılğan ve işlenmesi zor bir yapıya çevirirler. Yayılmış karbürler hem lamel hem de küresel grafit içeren yapılarda mukavemet sağlamada ve döküm haliyle üretilmiş malzemeler ile ısıl işlem uygulanmış malzemelerde aşınma direncinde önemli rol oynar(Mullins, 2006).

2.3.3. Ferrit

Oda sıcaklığından $910^{\circ}C$ 'ye kadar kübik hacim merkezli yapıda, demir ile az miktarda karbonun oluşturduğu nispeten yumuşak, sünek ve orta derecede mukavemetli bir katı eriyik olarak tariflenebilir. Dökme demirlerde ferrit bileşimindeki silisyumu içeren fazdır. Silisyum ferriti sertleştirir ve mukavemetini artırır. Yapısal açıdan, dökme demirlerde ferrit ya serbest halde ya da perlit içinde oluşur. Ferritin dökme demirlerde serbest halde bir yapı elemanı

olarak bulunabilmesi genel olarak kimyasal bileşim ve dökümün soğuma hızına bağlıdır. Yani dökme demirin karbonu serbest olarak oluşabiliyorsa, bileşimde grafitleştiriciler varsa ve soğuma yavaş ise serbest ferritin oluşma şansı yüksektir(Çavuşoğlu, 1992).

Ayrıca silisyum miktarına bağlı olarak ferritin sertliği 100-140 HB, uzaması %20-30 ve mukavemeti 35-50 kg/mm² değerlerinde olabilir. Tamamen ferritik yapılar normal olarak yalnız tavlama ile elde edilebilir. Şekil 2.8'de ferrit yapısı görülmektedir.

2.3.4. Perlit

Dökme demirin soğuması anında östenitin ötektoid sıcaklığında, ferrit ve sementite ayrışmasıyla bunların lameller halindeki karışımından meydana gelmiş bir yapıdır. Perlit orta sertlikte, yüksek dayanımlı ve esnek bir yapı olup aşınmaya karşı dayanıklıdır. Perlitik gri dökme demir yaklaşık olarak % 0,5 – 0,9 bileşik karbon içerir. Oluşan perlit miktarı grafitleşme mertebesine bağlıdır. Bileşik karbonun daha düşük oluşu ise genellikle serbest ferritin bulunduğunu işaret eder (Fidaner vd, 1973; Çavuşoğlu, 1992). Çekme mukavemeti 84 kg/mm² civarında ve sertliği 200 - 300 HB'dir. Bu nedenle yüksek dayanımlı dökme demirlerin yapıları genellikle perlitiktir. Şekil 2.8'de gri dökme demirdeki perlit yapısı görülmektedir.

Perlit ferritik dokuda lamel sementitin iç içe karışımı olarak ötektoid tepkime olarak üretilir. Dökme demirlerde genel kanı olarak perlit yüksek sertliğe karşın düşük sünekliğin bulunduğu birçok mühendislik uygulamasının ihtiyacını karşılayan bir dokudur(Mullins, 2006).

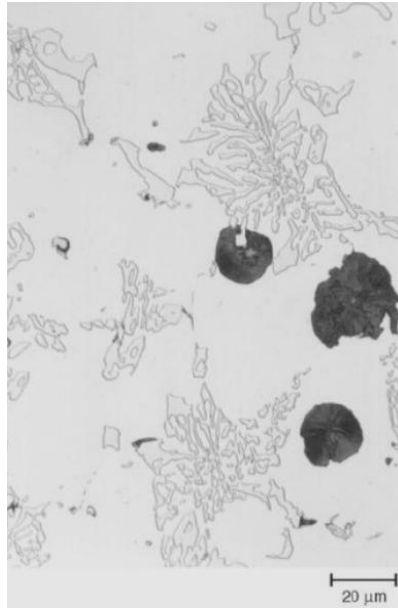


Şekil 2.8 Döküm sonrası gri dökme demirin içyapısı. E, ötektik; F, çökelmiş grafitteki ferrit; P, perlit(Radzikowska, 2004).

2.3.5. Östenit

(910 – 1410)°C arasındaki sıcaklıklarda allotropik şekli olan kübik yüzey merkezli demir ile karbonun meydana getirdiği, katılaşma esnasında oluşan ve yavaş soğuma ile perlit, ferrit veya ikisinin karışımına dönüşen bir katı eriyik olarak tanımlanabilir. Oda sıcaklığında içyapıda östenitin bulunması, ancak dökme demirin özel olarak östeniti bu sıcaklıkta stabil hale getiren, nikel ile alaşımlandırılması ile mümkündür(Çavuşoğlu, 1992). Şekil 2.9’da östenit yapısı görülmektedir.

Normalde demirde karbonun çözünmesiyle oluşan yüksek sıcaklık fazı olan östenit oda sıcaklığında östenitik ve östemperlenmiş dökme demir var olur. Östenitik demirlerde östenit nikel tarafından %18-36 oranında kararlaştırılır. Östemperlenmiş demirlerde ise östenit hızlı soğuma ile perlit oluşumunu engelleyerek oluşturulur. Östemperleme esnasında karbonun aşırı doygunluğu oda sıcaklığının da altında östenitten martenzite dönüşümünün başlangıcını bastırır. Östenitik dökme demirlerde tüm sıcaklıklarda östenit dokulu dökme demirler süneklik ve tokluk sağlar ayrıca iyi korozyon direnci ve özellikle ısı çevrim koşulları altında iyi yüksek sıcaklık özellikleri gösterir. Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir düşük mukavemet oranlarında östeniti kararlaştırmıştır



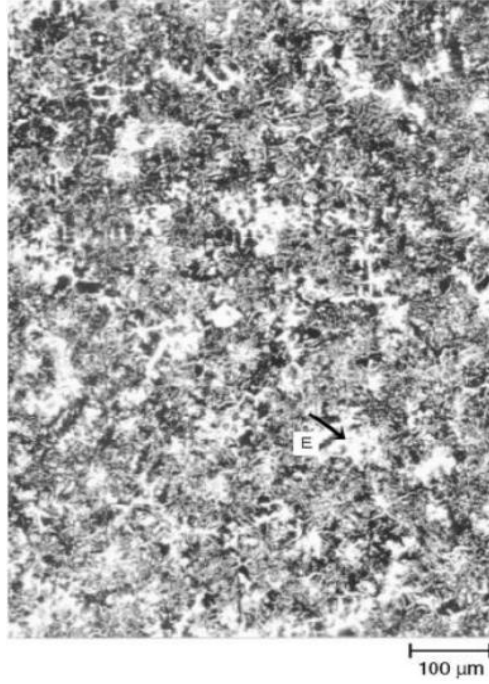
Şekil 2.9 Döküm sonrası östenitik küresel grafitli dökme demir. Östenit ve ötektik M_7C_3 tipi karbürler(Radzikowska, 2004).

2.3.6. Ledeburit

Östenit ile sementit karışımı bir yapıdır. Ledeburit, ötektik yapının özel adı olarak tanınır(Çavuşoğlu, 1992). Şekil 2.10’da ledeburit yapısı görülmektedir.

2.3.7. Steadit

Dökme demirlerde yapıdaki fosfor, düşük ergime dereceli (954–982)°C bir demir-demir fosfür(Fe_3P) ötektiği olan steadit şeklinde bulunur. Ötektik bileşim %10,2 P ve % 89,8 Fe'dir. Fosfor, katılaşmada en son katılan bölgelere toplandığından dokuda steadit bölgeleri genellikle hücrenel bir görünüme sahiptir. Demir fosfür de demir karbür gibi çok sert ve kırılgandır. Şekil 2.10'da gri dökme demirin ötektik yapısındaki steaditler görülmektedir(Çavuşoğlu, 1992; Radzikowska, 2004).



Şekil 2.10 Döküm sonrası gri dökme demir içyapısı. E, fosforlu ötektik. Hücre sınırlarında beyaz steadit yapılar(Radzikowska, 2004).

2.3.8. Beynit

Beynit, ferrit ve karbürlerin bir karışımı olan alaşımlama ya da ısıl işlem yoluyla üretilen bir fazdır. Oldukça sert bir fazdır ve işlenebilirliği düşüktür(Mullins, 2006).

2.4. Standartlara Göre Dökme Demir Çeşitleri

2.4.1. Gri Dökme Demir (Lamel Grafitli Dökme Demir)

Grafitli dökme demir, alaşım katılaştığında bileşimindeki karbon, kısmen veya tamamen grafit halinde olan dökme demirdir. Kırılmış yüzeyi her zaman gri renktedir. Şekil 2.2.a'da dökme demirin içyapısı görülmektedir. Grafitli dökme demir, bileşimindeki karbonun şekline göre aşağıdaki kısımlara ayrılır:

1. Lamel grafitli dökme demir: Lamel grafitli dökme demir, bileşimindeki grafit yaprağımsı lameller (tabaka-pul) şeklinde olan dökme demirlerdir.
2. Östenitik dökme demir: Östenitik dökme demir, uygun ve yüksek miktarda alaşım elementlerinden dolayı ana dokusu östenit olan ve içinde genellikle lamel veya küresel grafit bulunan dökme demirdir.

Çizelge 2.3'te lamel(pik) grafitli dökme demirlerin kesit kalınlıklarına bağlı olarak dökülecek malzemeye birlikte kalıplama ve ayrı kalıplama durumlarına bağlı çekme dayançlarının standartlara bağlı değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.3 Lamel grafitli dökme demirlerin çekme dayanımları (EN 1561:1997)

Gri Dökme Demirler		Kalınlıklar	Çekme Dayancı	
Norm	Malzeme No	mm	Ayrı Dökülmüş N/mm ²	Bitişik Dökülmüş N/mm ²
EN-GJL-100	EN-JL-1010	5 < t ≤ 40	100 – 200	–
EN-GJL-150	EN-JL-1020	2,5 < t ≤ 5	150 – 250	–
		5 < t ≤ 10		–
		10 < t ≤ 20		–
		20 < t ≤ 40		120
		40 < t ≤ 80		110
EN-GJL-200	EN-JL-1030	80 < t ≤ 150	200 – 300	100
		2,5 < t ≤ 5		–
		5 < t ≤ 10		–
		10 < t ≤ 20		–
		20 < t ≤ 40		179
EN-GJL-250	EN-JL-1040	40 < t ≤ 80	250 – 350	150
		80 < t ≤ 150		140
		5 < t ≤ 10		–
		10 < t ≤ 20		–
		20 < t ≤ 40		210
EN-GJL-300	EN-JL-1050	40 < t ≤ 80	300 – 400	190
		80 < t ≤ 150		170
		10 < t ≤ 20		–
		20 < t ≤ 40		250
		40 < t ≤ 80		220
EN-GJL-350	EN-JL-1060	80 < t ≤ 150	350 – 450	210
		10 < t ≤ 20		–
		20 < t ≤ 40		290
		40 < t ≤ 80		260
		80 < t ≤ 150		230

2.4.2. Küresel Grafitli Dökme Demir

Küresel grafitli dökme demir (KGDD) serbest karbonun lamel yerine küre şeklinde bulunduğu dökme demir ailesinin tanımıdır. Karbonun lamel yerine küre şeklinde oluşumun sağlamak için aşılama işlemi yapılır. Yani dökümden önce eriyik demire çok küçük miktarda

magnezyum ya da seryum ilavesi ile elde edilir. Küresel grafitli dökme demirin kimyasal kompozisyonu gri dökme demire benzer. Ancak kırılma mekaniğinin de açıklayacağı gibi yapıda bulunan grafitlerin lamel yerine küre şeklinde olmasından dolayı mekanik özellikleri oldukça gelişmiştir.

Kükürt ve fosfor gibi elementlerin miktarları çok azdır. Küresel grafitli dökme demirler sünek yapılarının yanında iyi bir akma dayanımı aralığına sahiptir ve temper dökme demirin aksine ince ve kalın kesitli parça aralıklarında dökülebilirler. Küresel grafitli dökme demirler ferrit, perlit veya her ikisi içerisinde dağılmış küresel grafitlerden meydana gelmektedir. Küresel grafitli dökme demirin katılaşması sırasında karbonun çoğu gri dökme demirdeki lamel grafitlerin yerine küresel grafitler oluşturur. Sünek dökme demirin genel dökülmüş mikro yapısı perlitik dokuda ferritle kuşatılmış dana gözü grafit kürelerinden meydana gelir.

Küresel grafitli dökme demirler diğer dökme demirlerin sahip olduğu düşük ergime noktası, iyi akıcılık ve dökülebilirlik, mükemmel işlenebilirlik ve iyi aşınma direnci gibi avantajlara da sahiptir. Aynı zamanda küresel grafitli dökme demirler yüksek dayanıma süneklik, tokluk ve soğuk-sıcak çalışılabilmeğe de sahiptir. Gri dökme demirde grafitler lameller halindedir ve keskin köşelidirler. Malzeme herhangi bir gerilim yüklemesine maruz kaldığında grafit köşelerinde gerilme yoğunluğu artar.

Küresel grafitli dökme demirde ise grafitler küre halindedir. Bu sebepten dolayı uygulanan gerilmeler grafitlerin adeta çatlağa çakılan bir çivi etkisi göstererek gelen enerjiyi yüzeylerinde dağıtarak sönmleme etkisi gösterir bu da üstün dayanım sağlar. Küresel grafitli dökme demirlerin bileşimi ile gri dökme demir bileşimi arasında önemli bir fark yoktur. Fakat özellikleri, kullanım alanları ve amaçları bakımından büyük farklılıkları vardır. Küresel grafitli dökme demirin yapısındaki grafitler ise çeliğe benzer bir doku içinde dağılmış küresel parçacıklar halindedir.

Grafitin küreler halinde olmasını sağlamak için BCIRA ve INCO yöntemi uygulanır. BCIRA yöntemi, gri dökme demirle aynı bileşimde olan ötektik üstü demirlere ergimiş halde, Seryum (Ce) ilavesinden ibarettir. Seryumun büyük bir kısmı, bileşimdeki kükürdü gidermekte ve geri kalan seryum ise grafitlerin lamel yerine küre şeklini almalarını sağlamaktadır.

INCO yönteminde ise, ötektik altı ve üstü dökme demirlere benzer olarak, sıvı demire magnezyum ilavesi yapılmaktadır. Bu yöntemlerin tanıtılmalarından sonra bugün hemen hemen her yerde daha ekonomik oluşu nedeniyle uygulanan magnezyum aşılama yöntemi tercih edilmektedir(Çavuşoğlu, 1992).

Küresel grafitli dökme demirler, gri dökme demirin başlıca avantajlarını(düşük ergime derecesi, iyi akışkanlık, iyi işlenebilme kabiliyeti) yanı sıra çeliğin mühendislik açısından avantajlarını(yüksek mukavemet, süneklik, tokluk) birleştiren yeni bir malzeme olarak, dökme demirler arasında yeni bir grubu oluşturmaktadır.

Karbon ve silisyumun yanında küresel grafitli dökme demirler periyodik tablodaki yaklaşık 50 elementi bileşimlerinde bulundurabilirler. Zararlı ve yıkıcı etkilerinden dolayı bu elementlerden birçoğunun (Pb, Bi, Sb, As, P, S) dökme demir bünyesinde bulunması istenmez. Daha üstün mekanik özellikler elde etmek için küresel grafitli dökme demirler değişik alaşım elementleriyle alaşımlandırılırlar. Bu alaşım elementlerinin bir kısmı tek başına, bir kısmı da başka elementle değişik birleşim oranlarında dökme demire ilave edilirler. Bu elementlerinin en önemlileri: Ni, Mo, Cr, Mn, V, Cu' dur.

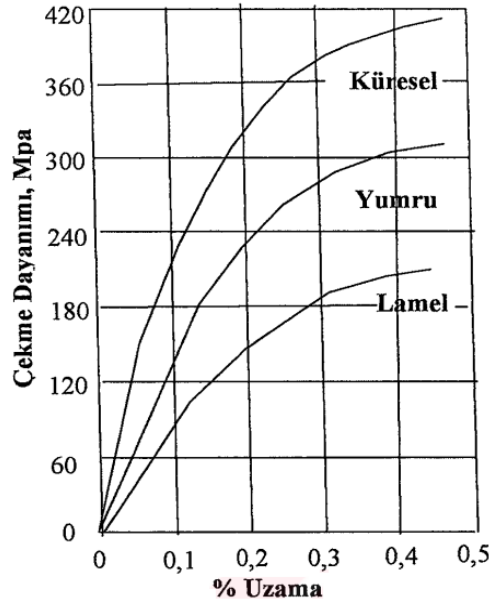
Küresel grafitli dökme demirlerin sertlik, çekme dayanımı ve akma sınırı değerleri Çizelge 2.4.'te verilmiştir(Yüksel, 2001).

Çizelge 2.4 Küresel grafitli dökme demirlerin sertlik değerleri ve diğer mekanik özellikleri (Yüksel, 2001)

Küresel Grafitli Dökme Demirler EN 1563:2000		Brinell Sertlik Değeri (HB)	Çekme Dayancı (N/mm ²)	Akma Dayancı (N/mm ²)
Semboller	Malzeme No			
EN-GJS-H130	EN-JS-2010	< 160	350	220
EN-GJS-H150	EN-JS-2020	130 - 175	400	250
EN-GJS-H155	EN-JS-2030	135 - 180	400	250
EN-GJS-H185	EN-JS-2040	160 - 210	450	310
EN-GJS-H200	EN-JS-2050	170 - 230	500	320
EN-GJS-H230	EN-JS-2060	190 - 270	600	370
EN-GJS-H265	EN-JS-2070	225 - 305	700	420
EN-GJS-H300	EN-JS-2080	245 - 335	800	480
EN-GJS-H330	EN-JS-2090	270 - 360	900	600

Küresel grafitli dökme demirler yapısında bulunan grafitler büyük ölçüde küresel şekilde bulunduğu için bu şekilde adlandırılmıştır. Lamel grafitli dökme demirlerden farklı olarak küresel grafitli dökme demirlerde grafit şeklinin küresel olmasını sağlayan; ergimiş demirin dökümden önce az miktarda (% 0,03 – 0,08 oranında) seryum (Ce) veya magnezyum (Mg) elementleriyle kesit kalınlığına bağlı olarak hesaplanmış döküm sıcaklığı aralıkları baz alınarak yaklaşık 1250 – 1350°C'da başarılı bir şekilde aşılmasıdır. Seryum elementinin büyük kısmı kükürdü gidermekte kullanılıp kalan kısmı da küreleşmeyi sağlamaktadır.

Seryum elementi nadir toprak elementlerinden olmasından maliyet olarak biraz külfetlidir. Magnezyum ile aşılama ise ekonomik oluşundan dolayı bugün yaygın olarak tercih edilmektedir. İçyapıda bulunan grafit küreleri, ferritik, perlitik veya ferritik-perlitik doku içinde dağılmış durumdadır. Grafit şeklinin küre oluşu, lamel grafitlerin tersine olası bir yükleme anında gerilme yığılması etkisi yaratmayarak çatlak oluşumunu önleyici rol oynar. Bu durum pek çok uygulamada küresel grafitli dökme demirlere yüksek mukavemet, tokluk, süneklik gibi oldukça üstün özellikler kazandırır. Şekil 2.11'de çeşitli dökme demirlerin gerilme-uzama eğrilerine grafit morfolojisinin etkisi verilmiştir. Bu eğrilerden de görüleceği üzere küresel grafitli dökme demirler aynı uzama miktarlarında diğer dökme demirlere göre daha fazla çekme dayanımına sahiptir. Küresel grafitli dökme demirlerin kırık yüzeyi parlak çeliğimsi görünümündedir(Baydoğan, 1996).



Şekil 2.11 Çeşitli dökme demirlerin gerilme-uzama eğrilerine grafit morfolojisinin etkisi (ASM International 1990)

Ağır çalışma koşulları için en uygun küresel grafitli dökme demir malzemeler, DIN normu 1693'e göre GGG 40,3 ve GGG 35,3 ile yeni ve uygulamadaki standartlarına göre de ASTM A536 standardında 40-60-18 ve de ülkemizde sanayide kullanılan TS 526 EN 1563 standardına göre en uygun malzemeler EN-GJS-350-22-LT veya EN-GJS-400-18U-LT sembolleri ile tanımlanmıştır.

Çizelge 2.5 Küresel grafitli dökme demirlerin kesit kalınlığına bağlı bazı mekanik özellikleri
(TS 526 EN 1563/2000)

Kısa Gösteriliş	Malzeme No	Et Kalınlığı t (mm)	Çekme Dayancı R_m (N/mm ²)	Akma Dayancı $R_{%0,2}$ (N/mm ²)	Kopma Uzaması A (%)
EN-GJS-350-22 LT	EN-JS 1019	$t \leq 30$	350	220	22
		$30 < t \leq 60$	330	210	18
		$60 < t \leq 200$	320	200	15
EN-GJS-350-22U-RT	EN-JS 1029	$t \leq 30$	350	220	22
		$30 < t \leq 60$	330	220	18
		$60 < t \leq 200$	320	210	15
EN-GJS-350-22U	EN-JS 1032	$t \leq 30$	350	220	22
		$30 < t \leq 60$	330	220	18
		$60 < t \leq 200$	320	210	15
EN-GJS-400-18U-LT	EN-JS 1049	$t \leq 30$	400	240	18
		$30 < t \leq 60$	390	230	15
		$60 < t \leq 200$	370	220	12
EN-GJS-400-18U-RT	EN-JS 1059	$t \leq 30$	400	250	18
		$30 < t \leq 60$	390	250	15
		$60 < t \leq 200$	370	240	12
EN-GJS-400-15U	EN-JS 1072	$t \leq 30$	400	250	15
		$30 < t \leq 60$	390	250	14
		$60 < t \leq 200$	370	240	11
EN-GJS-450-10U	EN-JS 1132	$t \leq 30$	450	310	10
		$30 < t \leq 60$	Tüketici isteğine bağlıdır.		
		$60 < t \leq 200$	Tüketici isteğine bağlıdır.		
EN-GJS-500-7U	EN-JS 1082	$t \leq 30$	500	320	7
		$30 < t \leq 60$	450	300	7
		$60 < t \leq 200$	420	290	5
EN-GJS-600-3U	EN-JS 1092	$t \leq 30$	600	370	3
		$30 < t \leq 60$	600	360	2
		$60 < t \leq 200$	550	340	1
EN-GJS-700-2U	EN-JS 1102	$t \leq 30$	700	420	2
		$30 < t \leq 60$	700	400	2
		$60 < t \leq 200$	660	380	1
EN-GJS-800-2U	EN-JS 1112	$t \leq 30$	800	480	2
		$30 < t \leq 60$	Tüketici isteğine bağlıdır.		
		$60 < t \leq 200$	Tüketici isteğine bağlıdır.		
EN-GJS-900-2U	EN-JS 1122	$t \leq 30$	900	600	2
		$30 < t \leq 60$	Tüketici isteğine bağlıdır.		
		$60 < t \leq 200$	Tüketici isteğine bağlıdır.		

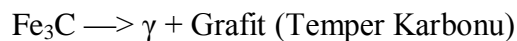
2.4.3. Beyaz dökme demir

Kırıldığında kırık yüzeyinin beyaz kristalin görünüşünden dolayı bu şekilde adlandırılan dökme demir çeşididir. Beyaz dökme demir, alaşım katılaştığında, bileşimindeki karbon, sementit (Fe_3C) halinde olan dökme demirdir (Fidaner vd, 1979). Hızlı soğuma ile elde edilen ötektik altı alaşımlardır. Beyaz dökme demirler demir-sementit sisteminde katılırlar ve

ıçyapılarında grafit ıçermezler. zellikleri iyileştirmek amacıyla yapıya alaşım elementi ilave edilmesi durumunda ise karmaşık karbür bileşimleri oluşturur (kromkarbr, wolframkarbr gibi). Alaşımsız beyaz dökme demirlerde sementit ve perlit ıçyapısı göze çarpmaktadır. Alaşım elementi ilavesi ıçyapıyı asiküler yapılı beynit ve martenzite dönüştürür. Bu Şekilde mukavemet, sertlik, darbe direnci, aşınma direnci, korozyona ve ısıya karşıya direnç gibi özelliklerde olumlu değişimler meydana gelir ve bu Şekilde bu tür dökme demir gruplarına geniş kullanım alanları sağlar. Yüksek oranda sementit ıçermeleri beyaz dökme demirleri sert ve aşınmaya karşı dirençli hale getirir. Bununla birlikte oldukça gevrektiler ve işlenebilmeleri zordur. Beyaz dökme demirler aşınma dirençlerine ilave olarak, 650°C gibi kritik sıcaklıklara yakın sıcaklıklarda güvenle kullanılabilir. nk bu sıcaklık seviyelerinde, beyaz dökme demirin sertliğinde alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerde olduğu gibi düşüş görülmez. Beyaz dökme demirlerin kullanım alanlarını sınırlayan faktörler ise düşük darbe dirençleri ve işlenebilme özelliklerinin kötü oluşudur(Kökden, 1998; Yüksel, 2001). Bu özellikleriyle cevher kırıcıları, öğütücü değirmen bilyeleri, çeşitli astarlar, tarım alet ve makineleri, pistonlar ve dişlileri, çeşitli konveyörler, greyder bıçakları, pompalar, diskler, tuğla kalıpları, segmanlar ve çubuklar, madencilik ve mineral sanayi gibi yüksek abrasif aşınma direnci gerektiren yerlerde kullanılırlar(avuşoğlu, 1992).

2.4.4. Temper dökme demir

Temper dökme demir; grafitsiz, sert ve kırılğan bir yapıya sahip olan beyaz dökme demirin temperleme (maleabilizasyon) olarak adlandırılan ısıl işlem ile karbürlerinin parçalanması sonucu oluşan, yüksek mukavemetli, sünek, iyi işlenebilme özelliğine sahip ve ıçyapısı ferrit ve temper karbonundan meydana gelen dökme demir türüdür. Temper dökme demiri elde etmede, beyaz dökme demir (800–970)°C sıcaklık aralığına kadar tavlansarak yapısında bulunan sementit ve perlit parçalanır. Temel katı hal reaksiyonu aşağıdaki gibidir(Kökden, 1998).



ıçyapıda var olan sementit ve perlit parçalandıktan sonra, serbest kalan karbon çok yavaş soğuma hızı ile rozet Şeklini alır ve temper karbonunu oluşturur. Nihai ıçyapı, grafit ve perlit, perlit ve ferrit veya yalnızca ferritten oluşur. Doku tavlamaadan sonraki soğuma hızına bağlı bir fonksiyondur(Kökden, 1998). Kaliteli bir temper dökme demir üretimi için ergitmede esas kıstas, serbest lamel grafitleri ıçermeyen tamamen beyaz bir yapı elde etmektir. nk grafit, temper özelliklerine olumsuz etki etmektedir(avuşoğlu, 1992).

Temper dökme demir, uygun kimyasal bileşimdeki sementit dokulu beyaz dökme demirin temperlemeye elverişli boyut ve biçimde dökülmüş ve sonradan ısıtılma işlem (tavlama - temperleme) yapılarak bileşimindeki karbonu, rozet şekilli grafit kümeleri şekline getirilmiş bir dökme demirdir.

Beyaz temper dökme demir daha çok Avrupa'da, siyah temper dökme demir ise Amerika'da üretilmektedir. Bu iki tipin birbirinden başlıca farklılığı, temper karbonu şeklinin bir miktar farklı oluşu ve genellikle ortası beyaz olanın bir miktar birleşik karbon içermesinden kaynaklanmaktadır. Bu fark bileşimden ve üretim yöntemlerindeki değişiklikten ileri gelmektedir. Ancak Avrupa'da da günümüzde üstün özellikleri sebebiyle daha çok ortası siyah temper döküm gerçekleştirilmektedir.

Çizelge 2.6 Beyaz Temper Dökme Demirlerin normları ve mekanik özellikleri(Yüksel, 2001)

BEYAZ TEMPER DÖKME DEMİRLER		Numune Çapı d	Çekme Dayancı R _m	Akma Dayancı R _{%0,2}	Kopma Uzaması A	Brinell Sertlik Değeri
Sembol	Malz. No	mm	N/mm ²	N/mm ²	%	HBS
EN-GJMW-350-4	EN-IM1010	6	300	-	10	230
		9	340	-	5	
		12	350	-	4	
		15	360	-	-	
EN-GJMW-360-12	EN-JM1026	6	290	-	16	200
		9	320	-	15	
		12	360	170	12	
		15	370	190	-	
EN-GJMW-400-5	EN-JM1030	6	300	-	12	220
		9	360	-	8	
		12	400	200	5	
		15	420	220	-	
EN-GJMW-450-7	EN-IM1040	6	33	-	12	220
		9	0	-	10	
		12	400	230	7	
		15	450	260	4	
			480	280		

Temper dökme demirin çeşitleri aşağıdaki gibidir:

1. Siyah temper dökme demir: Siyah temper dökme demir, uygun kimyasal bileşimindeki sementit dokulu beyaz dökme demirin nötr bir ortamda uzun süre belli sıcaklıkta (östenit alanında) ısıtılmasıyla hazırlanan bir temper dökümdür. Kırılmış kesiti genellikle siyah renktedir(Çavuşoğlu, 1992).

2. Beyaz temper dökme demir: Beyaz dökme demir, uygun kimyasal bileşimdeki sementit dokulu beyaz dökme demirin, oksitleyici bir ortamda uzun süre belli sıcaklıkta (östenit alanında) ısıtılmasıyla hazırlanan bir temper dökümdür. Kırılmış kesiti genellikle beyaz renktedir.

Bir üçüncü tip olarak, kullanımı giderek yaygınlaşan perlitik dokulu siyah temper dökme demir belirtilebilir. Bu tip dökme demirler birleşik karbon içerdiklerinden dolayı, ferritik temper dökümlerden daha yüksek mukavemet, aşınma direnci ve süneklik gösterirler(Çavuşoğlu, 1992; Çelik, 2001).

Çizelge 2.7 Siyah Temper Dökme Demirlerin normları ve mekanik özellikleri

SİYAH TEMPER DÖKME DEMİRLER		Numune Çapı d	Çekme Dayancı R_m	Akma Dayancı $R_{%0,2}$	Kopma Uzaması A	Brinell Sertlik Değeri
Sembol	Malz. No	Mm	N/mm ²	N/mm ²	%	HBS
EN-GJMB-300-6	EN-JM1110	12 veya 15	300	-	6	≤ 150
EN-GJMB-320-2	EN-JM1120	12 veya 15	320	190	12	≤ 150
EN-GJMB-350-10	EN-JM1130	12 veya 15	350	200	10	≤ 150
EN-GJMB-450-6	EN-JM1140	12 veya 15	450	270	6	150-200
EN-GJMB-500-5	EN-JM1150	12 veya 15	500	300	5	165-215
EN-GJMB-550-4	EN-JM1160	12 veya 15	550	340	4	180-230
EN-GJMB-600-3	EN-JM1170	12 veya 15	600	390	3	195-245
EN-GJMB-650-2	EN-JM1180	12 veya 15	650	430	2	210-260
EN-GJMB-700-2	EN-JM1190	12 veya 15	700	530	2	240-290
EN-GJMB-800-1	EN-JM1200	12 veya 15	800	600	1	270-310

2.4.5. Özel dökme demir

Özel dökme demir, bileşiminde silisyum, manganez, fosfor ve kükürtten başka özel olarak alaşım elementleri katılmış olan dökme demirlerdir. İkiye ayrılırlar:

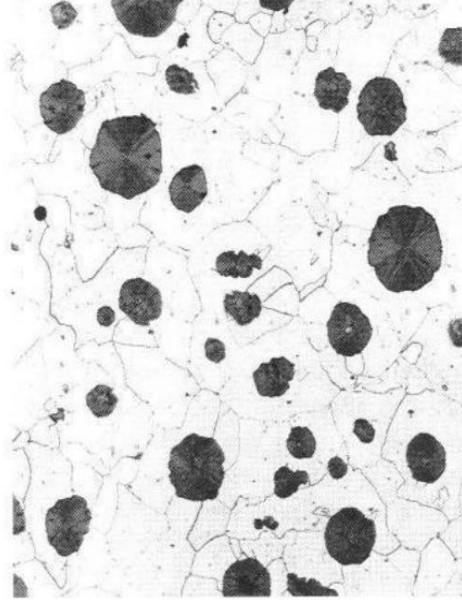
1. Az alaşımlı özel dökme demir: Özel olarak katılmış alaşım elementlerinin toplamı %5'den az olan, özel dökme demirdir.

2. Yüksek alaşımlı özel dökme demir: Özel olarak katılmış alaşım elementlerinin toplamı %5 'den çok olan, özel dökme demirdir.

Şekil 2.13'te içyapılarına göre sınıflandırılmış dökme demir ailesinin optik mikroskobu görüntüleri gösterilmektedir.



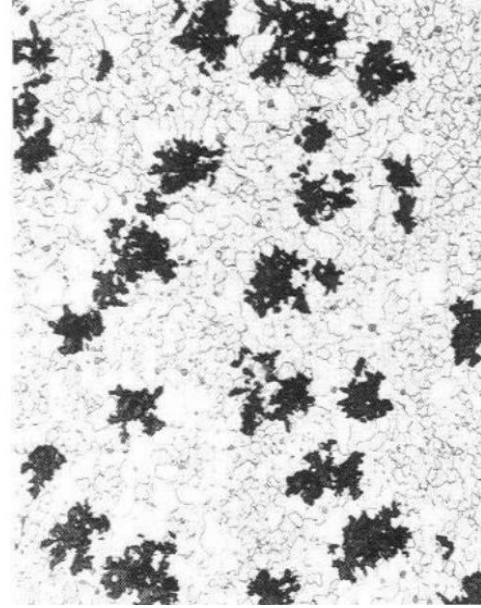
(a)



(b)



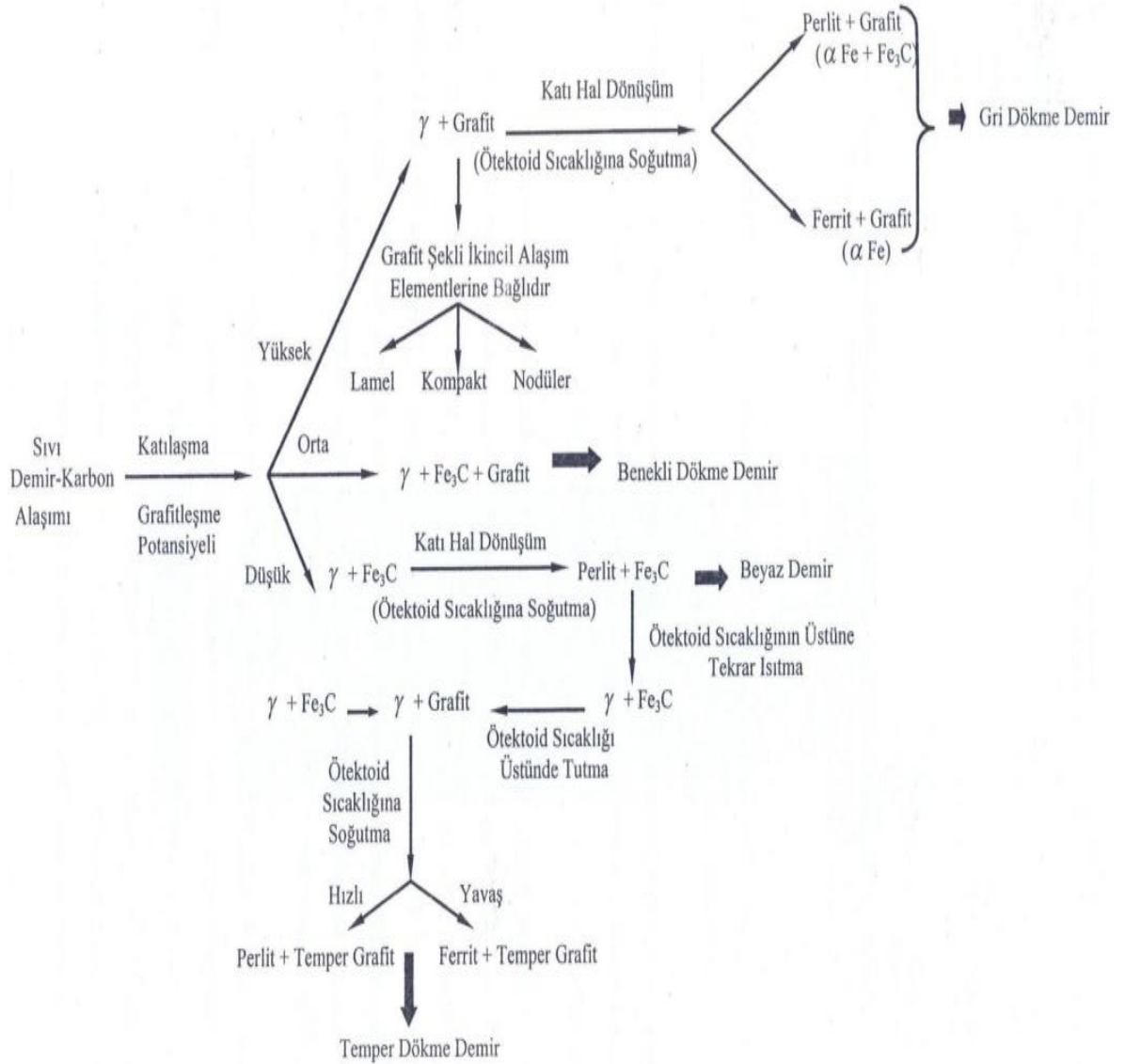
(c)



(d)

Şekil 2.12 Çeşitli dökme demirlerin içyapıları (a) Gri dökme demir (b) Küresel grafitli dökme demir (c) Beyaz dökme demir (d) Temper dökme demir (Url-1)

Şekil 2.13'te dökme demir grubunun içyapı ve sınıflara ayrılmasının şematik gösterimi mevcuttur.



Şekil 2.13 Dökme demirlerin sınıflandırılması ve içyapıları(Davis, 1996).

2.4.5.1. Hızlı soğutulmuş (çil uygulanmış) dökme demir

Katılma sırasında normal gri dökme demirin yapısını verecek dökme demire, bazı kısımlarında soğumayı hızlandırmak için, özel yöntemler (çil) uygulayarak yapılan bir dökme demir çeşididir. Kırılmış yüzeyinin hızlı soğutulmuş kısımlarında beyaz, normal soğumuş kısımlarında esmer (grafitli) dökme demir yapısı görülür. Hızlı soğutulmuş dökme demir, sert ve dayanıklıdır.

2.4.5.2. Benekli (Mottled) Dökme Demirler

Normal soğuma şartlarında kısmen gri kısmen de beyaz dökme demir halinde katılacak şekilde bir ara bileşime sahip dökme demirlerdir ve her iki dökme demir tipinin içyapı ve kırılma yüzeyi karakteristiklerini yansıtır(Çavuşoğlu, 1992; Çelik, 2001).

2.4.5.3. Vermiküler (Yumru Grafitli) Dökme Demirler

Bu tip dökme demirdeki grafitler, gri dökme demirdeki lamel grafitlere benzemesine karşın daha kaba ve uçları yuvarlanmış şekillidir. Yapısı ise gri dökme demirle küresel grafitli dökme demir yapısı arasındadır. Bu tip dökme demir, gri dökme demire kıyasla daha yüksek mukavemete ve sünekliğe sahiptir. Küresel grafitli dökme demirle karşılaştırıldığında ise termal iletkenliği yüksek ve işlenebilirliği iyidir(Çavuşoğlu, 1992; Çelik, 2001; ASM, 1996)

2.4.5.4. Yüksek Alaşımli Dökme Demirler

Bu tip dökme demirler, mukavemet, aşınma direnci, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilme gibi özellikleri geliştirmek amacıyla genellikle gri veya küresel grafitli dökme demirlere belirli oranlarda nikel, krom ve molibden gibi alaşım elementlerinin ilavesi ile elde edilirler.

Korozyona dayanıklı dökme demir elde etmek için yapıya silisyum, krom ve nikel olmak üzere başlıca üç alaşım elementi ilave edilir. Yapıda % 15'e kadar bulunabilen silisyum özellikle sülfürik asite, %35'e kadar bulunabilen nikel daha çok redükleyici asitlere ve alkalilere, % 28'e kadar bulunabilen krom ise koruyucu oksit tabakası oluşumuna yardımcı olarak oksitleyici asitlere, karşı direnç sağlar. Korozyona dayanıklı dökme demirler, ferritik, perlitik, martenzitik veya östenitik içyapıya sahip olabilirler. Ayrıca bileşim, soğuma hızı ve aşılama işlemine bağlı olarak beyaz, gri veya küresel grafitli dökme demir yapısında olabilirler.

Isıya dayanıklı dökme demirler, yüksek sıcaklıkta oksidasyon direnci ile yumuşamaya veya içyapısal bozulmaya karşı dayanımı içeren dökme demirlerdir. Isıya karşı dayanıklı dökme demirler gri veya küresel grafitli dökme demirlerden oluşmakta ve genellikle ferritik veya östenitik döküm yapısına sahip olmaktadır. Isıya karşı dayanıklı dökme demirlerde en çok kullanılan alaşım elementi kromdur. Kromun hem karbürleri stabil yapan etkisi hem de sıkı ve koruyucu bir oksit tabakası oluşturması, dökme demirin yüksek sıcaklıklardaki kullanımını kolaylaştırır. Buna karşılık nikel, oksitlenmeye karşı direnci sağlamakla birlikte yüksek

sıcaklıklarda tokluk ve mukavemeti artırır. Molibden yüksek sıcaklık dayanımı, alüminyum ve silisyum ise oksitlenmeye karşı direnci arttırlar.

Yüksek aşınma direnci istenen yerlerde ise yüksek krom ve molibden içeren martenzitik beyaz dökme demirler üretilirler. Yüksek alaşım içeriği nedeniyle bu dökme demirlerin içyapılarında oldukça fazla dönüşmemiş östenit bulunmaktadır. Perlitik beyaz dökme demir de aynı zamanda aşınmaya dayanıklı bir malzeme tipi olarak kullanılabilir(Çavuşoğlu, 1992; Çelik, 2001).

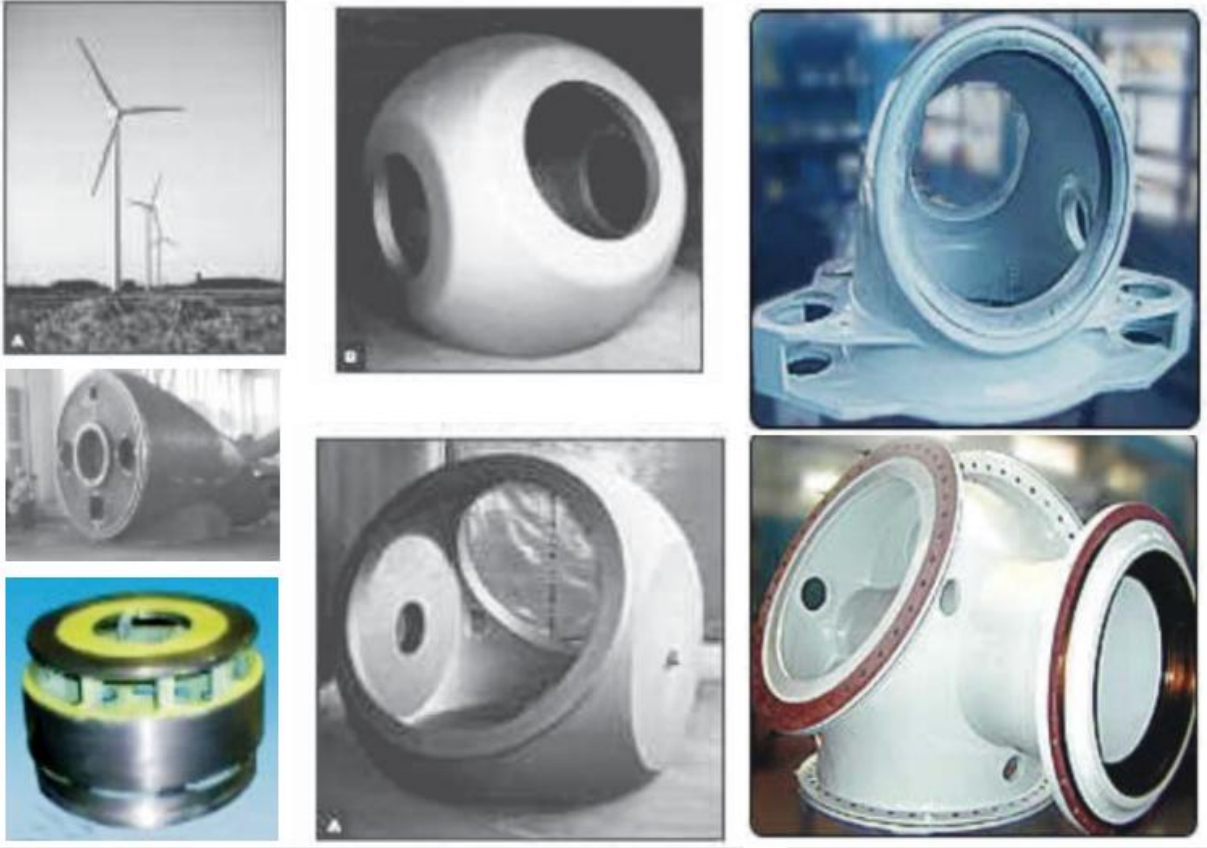
3. RÜZGÂR TÜRBİNİ PERVANE GÖBEĞİNİN DÖKÜM METALURJİSİ

Rüzgâr türbini parçası için tesis ve işletme koşulları dikkate alındığında dökülebilirlik, işlenebilirlik gibi şekillendirilebilme, mekanik, mukavemet özellikleri, ömür ve performans gibi nitelikliksel beklentilerin karşılanabilmesinde metalürjik; ergitme, alaşımlama, kalıp ve maça, döküm ortamı ve zamanı ile termodinamik ve kinetik koşulların bilinmesini zorunlu hale getirir. arj malzemeleri ve tüm katılma ve metalürjik parametrelerle denetim altına alınır.

50 yıldan fazladır küresel grafitli dökme demir endüstrisinde önemli araştırmalar ve başarılı proses safhalarındaki gelişmeler bu malzemeyi günümüzde hem yaygın hem de aranan malzeme olmasına imkan sağlamıştır. Öyle ki günümüzde artan taleplerle birlikte nükleer yakıt tanklarında, gaz türbinlerinde, rüzgâr enerjisi bileşenleri gibi çok özel ve önem arz eden bölümlerde kullanımı artmıştır. Bu tezinde konusu olan rüzgar türbini pervane göbeği dökümü için gerekli proses parametreleri incelenmiştir.

Rüzgâr türbini jeneratörleri tipik olarak küresel grafitli dökme demirin bir dizi bileşeninden oluşur. Bunlar pervane göbeği, ana şaftı içeren muhafaza, dişli kutusu ve destek üssü gibi bileşenlerdir. Bu bileşenlerin küresel grafitli dökme demirden üretilmesinin sebepleri tasarımlarının geliştirebilmesi, düşük ergime sıcaklığında üretime imkân vermesi, maliyetin düşük olmasıdır. Ayrıca karmaşık geometrik gereksinimler, yapısal talepleri küresel grafitli dökme demirin uygun bir şekilde karşılayabilmesi ve aynı özellikleri sağlayacak çelikten daha uygun maliyetlere sahip olması nedeniyle tercih sebebidir(Till, 2010).

Şekil 3.1’de rüzgar türbini pervane göbeği için çeşitli tasarımlarda üretilmiş olan kalın kesitli ferritik küresel grafitli dökme demirlere birkaç örnek verilmiştir.



Şekil 3.1 Farklı tasarıma sahip tipik rüzgar türbini göbekleri(Riposan vd, 2010).

3.1. Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demir

Ferritik dokuya sahip EN-GJS-350-22-LT ve EN-GJS-400-18U-LT en çok tercih edilen döküm malzemelerdir. Tercih edilmesinin en önemli nedenlerinden birisi, düşük sıcaklıkta yüksek tokluk ve dayanç beklentisinin karşılanmasıdır. Kullanım yerindeki elektriksel gücün 2MW olması dikkate alınarak yapılan seçimde döküm ağırlığının 10 tonun üzerine çıkması ve dayanç için de nispeten kalın kesitli olması beklenir. Uygulamalarda bu malzeme ile hemen hemen aynı değerleri veren EN-GJS-400-18U-LT'nin seçilmesi bu noktada öne çıkmıştır. İlk defada hatasız döküm (as-cast) katılaşmanın ferritik dokuda olmasını sağlayacak parametrelerin termodinamik modele, kinetik parametrelere uygun modelleme ve simülasyon yapılmayı gerekli hale getirir. Rüzgâr türbinlerinin malzemelerinde yüklere karşı dayanç ve rijitlik bu malzemedeki beklenen büyük beklentilerdir(Till, 2010).

Ferritik dokulu küresel grafitli dökme demir malzemelere ait tipik bir kimyasal analizi Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Ferritik dokulu küresel grafitli dökme demir için kimyasal bileşimi(ASTM A874/A 874M, 2004)

Element	En az (%ağ.)	En çok (%ağ.)
Karbon	3,0	3,7
CE [karbon+ 1/3*(silis+fosfor)]	—	4,5
Silisyum	1,2	2,3
Fosfor	—	0,03
Magnezyum	—	0,07
Mangan	—	0,25
Bakır	—	0,1
Nikel	—	1,0
Krom	—	0,07

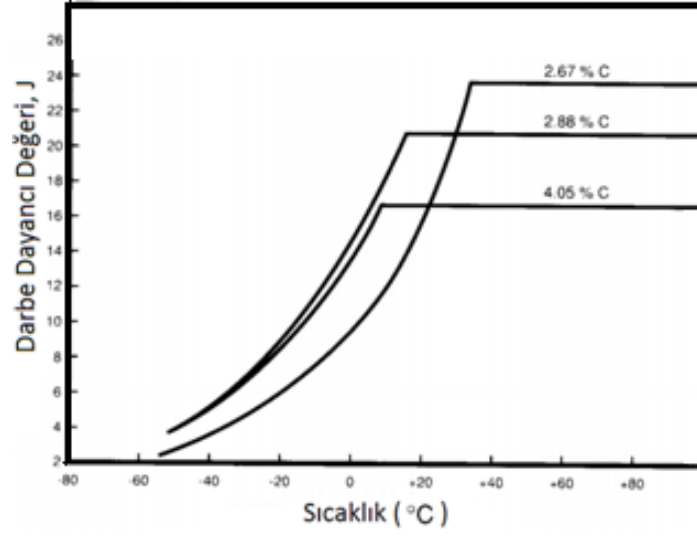
ASTM ve Avrupa Standartları incelenerek daha karmaşık ve rüzgar türbini bileşenlerinde kullanılan doğrudan EN-GJS-400-18U-LT malzemesinin kimyasal bileşimi uygulamadaki gerçek kimyasal bileşimleri de Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Rüzgar türbini pervane göbeği üretimi için kullanılan kimyasal bileşim(Roedter ve Gagné, 2003).

Element	Oran
% C	3,3 – 3,5
% Si	1,9 – 2,2
% Mn	< 0,15
% Mg	0,040
% P	< 0,030
% S	0,008 – 0,012

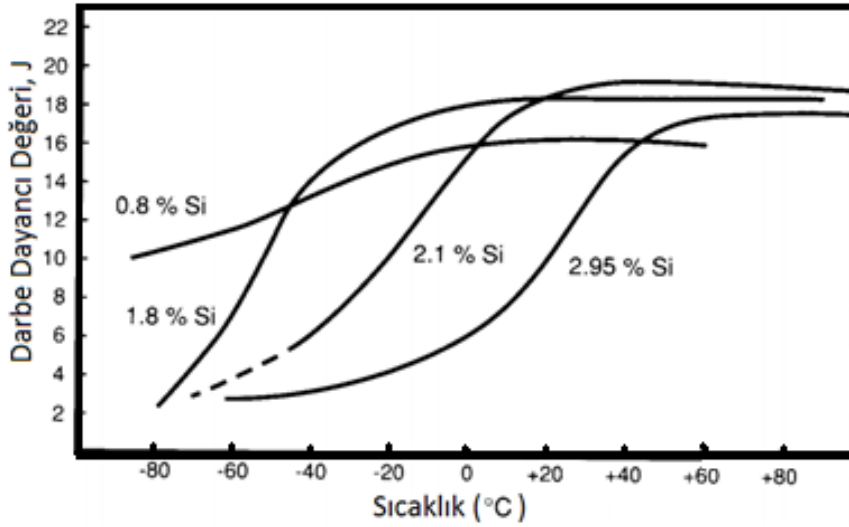
3.2. Bileşim Kontrolü

Karbon: Yüksek karbon bileşimi geçiş sıcaklığını düşürmesine rağmen darbe enerjisini azaltır. Düşük karbon bileşimi ise yüksek darbe enerjisi için uygundur ama geçiş sıcaklığını yükseltir.



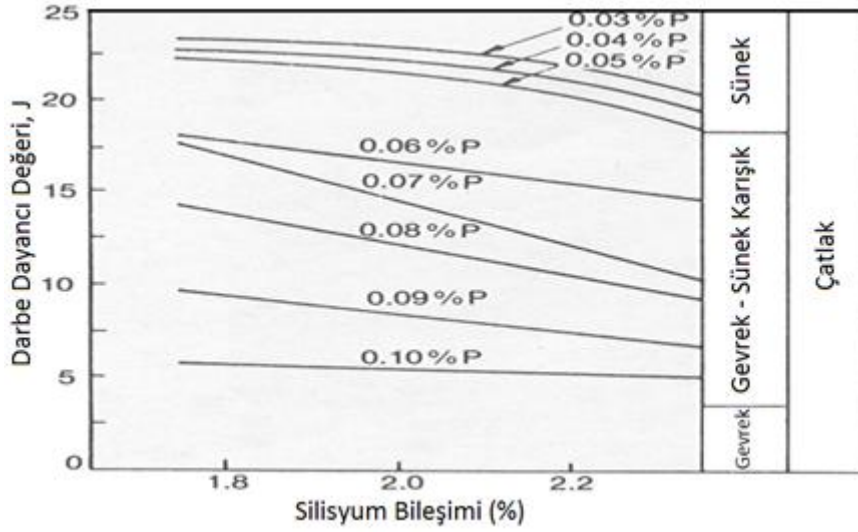
Şekil 3.2 Ferritik küresel grafitli dökme demirlerde darbe dayanıcısına karbonun etkisi(Rio Tinto, 1998).

Silisyum: Düşük silisyum içeriği, düşük geçiş sıcaklığı verir. Bununla birlikte silisyum grafitleşme potansiyeli ve son aşı ilavesi olarak gereklidir.



Şekil 3.3 Ferritik küresel grafitli dökme demirlerde darbe dayanıcısına silisin etkisi(Rio Tinto, 1998).

Fosfor: Fosfor kırılğan bir element olduğundan en düşük seviyede tutulmalıdır. Ayrıca katılaşma sırasında hücre sınırlarına ayrılarak steadit (Fe_3P) yapısı oluşturur. Bu nedenle pervane göbeği gibi kalın kesitli dökümlerde fosfor bileşimi %0.030'dan düşük hatta tercihen %0,025'den de düşük olması tavsiye edilir.



Şekil 3.4 Silisyum bileşimine bağlı fosforun darbe dayancı değerine etkisi (Roedter ve Gagné, 2003).

Mangan: Kalın kesitli dökümlerde mangan hücre sınırlarına ayrışır ve orada perlit oluşumunu teşvik eder. Özellikle rüzgâr türbini dökümlerinde perlit oluşumunu önlemek için en fazla %0,15 Mn oranı önerilir. Perlit oluşturan diğer elementler düşük miktarda tutulmalıdır.

Magnezyum: Mg içeriği %0,045'ten düşük olması, cüruf oluşumunu en aza indirmek ve iyi küreselleşme sağlamak için önerilir.

Kükürt: Kükürt içeriği grafit küreselliğini etkilememesi için %0.012'in altında ve aşılama için en az %0.006 olmalıdır (Roedter ve Gagné, 2003; Forrest, 2006).

3.3. Aşılama ve Mg-Prosesi

Sınaî uygulamalarda ve literatürde artakalan magnezyum ve magnezyum toparlanması her zaman tartışılan konular olmuştur. Pota işleminde magnezyumun ilave oranı ile toparlanmasına etki edecek önemli etkenler bulunmaktadır. Magnezyum küresel grafitli dökme demir üretiminde kullanılan asıl elementtir. Her zamanki dökme demirlerin döküm sıcaklığının en az 200°C altında 1190°C kaynama noktası ile en bilinen yöntem ferrosilis ihtiva eder halde kullanılır. Ferrosilismagnezyum gibi bir alaşımın kullanımı nadir toprak elementleri gibi diğer yararlı elementlerin aynı zamanda uygulanmasına izin verir. Magnezyum grafit kürelerinin oluşumu için grafit çökmesine izin veren bir etkiye sahiptir böylece dökme demirin mekanik özelliklerini denetleyebilmek için demir esaslı doku elde edilir. Ancak dökme demirde aşırı artakalan magnezyum demir karbür(çil) oluşumuna, küre sayısının düşmesine ve çekintinin artması gibi olumsuz etkilere sahiptir. Bundan dolayı FeSiMg alaşımlarının doğru kimyasal bileşimi ve boyut denetiminin başarılması küresel grafitli dökme demirin üretimi için esastır.

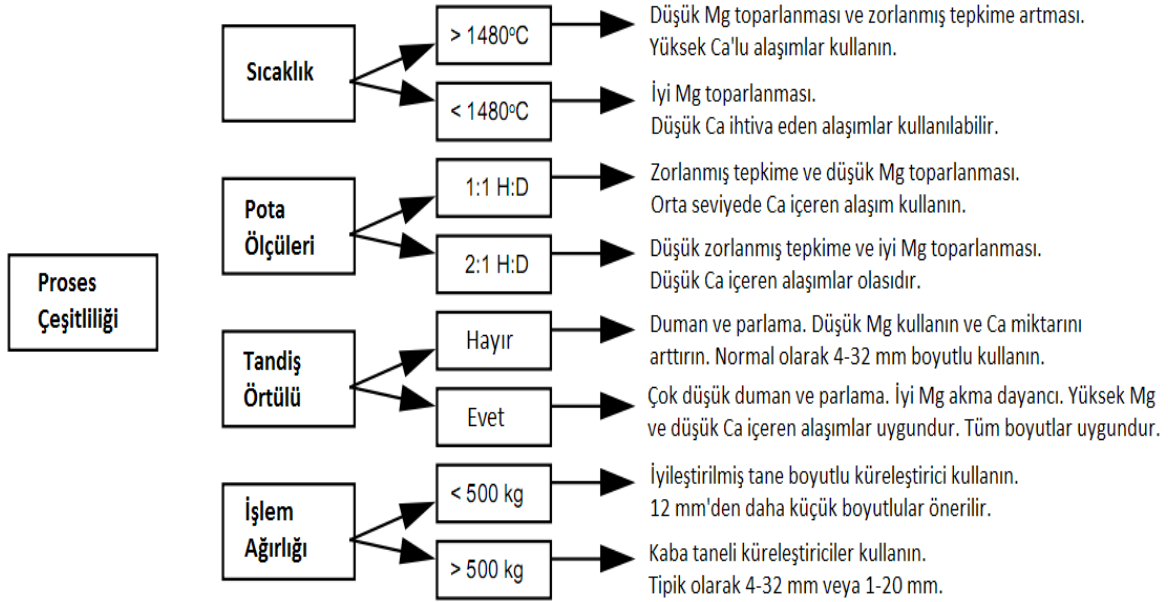
Antimon, kurşun, bizmut ve arsenik gibi eser elementleri dökümhanelerde kullanılan şarj malzemelerinden kaynaklı ortaya çıkabilir. Bu elementler küresel grafitlerin oluşumunu engeller ve bozunmuş grafit oluşumuna eğilim sağlar. Mg-işlemine küçük miktarlarda nadir toprak elementleri ilavesi ile zararlı etkiler etkisizleştirilebilir. FeSiMg alaşımına nadir toprak elementi ilavesi yapıldığında ayrıca ilavelerden kaçınılmalıdır. Nadir toprak elementleri iyi grafit çekirdekleşmesini teşvik eder böylece aşılama sonrası yüksek küre sayısı elde edilir. Fazla miktarlarda nadir toprak elementleri çil eğilimin arttırabilir ve chunky ve patlamış grafit FeSiMg alaşımları içerisinde kalsiyumun küçük miktarlarda bulunması magnezyumun tepkinirliğini düşürür böylece duman yayılımını asgariye indirir ve magnezyumun yararını arttırır. Kalsiyum, kükürt ve oksijen ile tepkime vererek sülfür ve silikat fazlarının değiştirilmesine ön ayak olur. Bu etki yüksek küre sayısı veren grafit kürelerinin gelişimini iyi oranda arttırır ve yüksek seviyedeki çekirdekleşme sağlar. Kalsiyum cüruf oluşumu eğilimini arttırdığında FeSiMg içindeki kalsiyumun miktarı işlem yöntemine bağlı olarak ayarlanmasına ihtiyacı vardır.

Alüminyum FeSiMg içerisinde kasten ilave edilmesinden kaçınılmasına rağmen küçük miktarlarda bulunur. Aşırı alüminyum, hidrojen ile yüksek oranda Hidrojen-pinhole hatasını teşvik eder. Hidrojenin çözünürlüğü döküm esnasında sıcaklığın düşürülmesi ile azalır ve aşırı çözünmüş hidrojen, gözeneklerin oluşumuna neden olur. Eğer ilk Al miktarı düşük ise doğru miktarlarda Al aşırısoğumayı ve çekinti eğilimini düşürür, küçük miktarlarda Al ilavesi aşılama yardımcı olur. Ayrıca Al küresel grafitli dökme demirde ferrit oluşumunu attırıcı

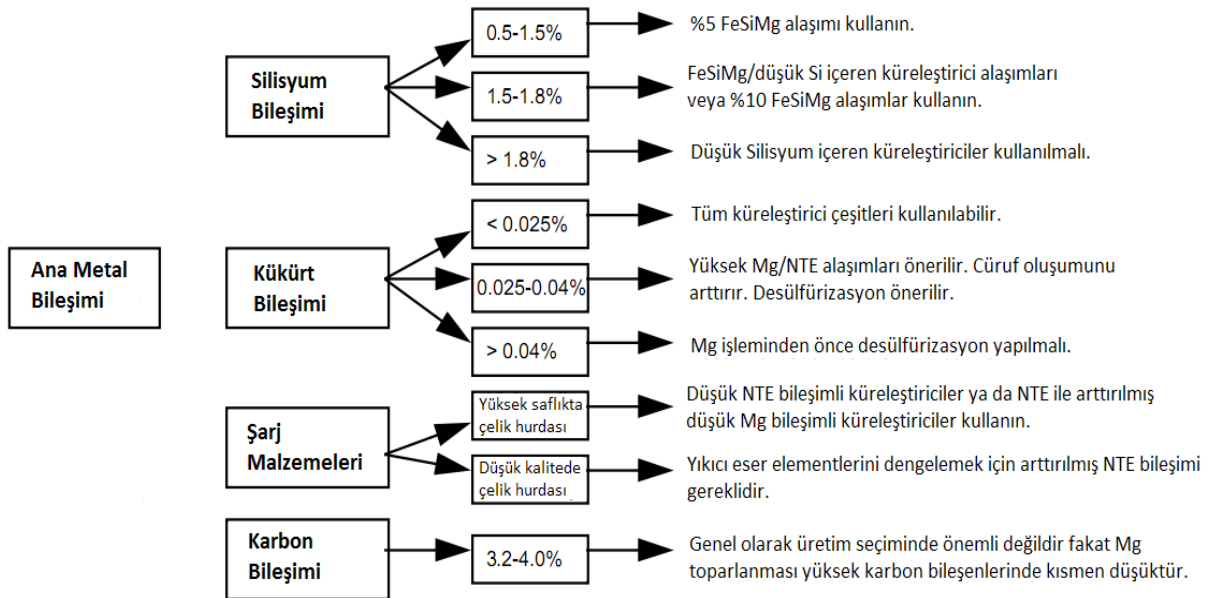
3.4. Mg-İşlemi İçin Küreleştirici Seçimi

Sfero dökümde analitik olarak tespit edilen artakalıcı magnezyum miktarı çözünen magnezyum miktarıyla aynı değildir. Bekletme sırasında magnezyum miktarının azalması cüruf oluşumu, inklüzyon yüzmesi ve çözünen magnezyumun buharlaşarak kaybolması olarak izah edilir. Bazı durumlarda magnezyum miktarındaki azalma sıvı demirin temizlenmesi ve cüruf hatalarının oluşmasının önlenmesini pozitif yönde etkiler. Çünkü istenmeyen cüruf parçacıkları bekleme süresinde sıvı metal yüzeyine doğru çıkar ve böylece sıvı metalden uzaklaştırılabilir. Bir numunedeki toplam magnezyum miktarı (cüruflar, mikro parçacıklar ve çözünmüş Mg) konvansiyonel analiz metotlarıyla tespit edilebilir. Bekletme sırasında çözünmüş magnezyum kayıplarının küçük oluşu ve magnezyum ilavesine bağlı küresel grafit yapının bozulması genellikle aşılama ile beslemenin bir sonucudur. Tamamen küresel grafit yapılar az miktarda geç aşılama ilavesiyle tekrar kazanılabilir(Gagne, 2004).

Dökümhaneler arasında her zaman döküm prosesi için küreleştirici seçimi hakkında çekinceler vardır. Aşağıdaki iki diyagram FeSiMg alaşımının seçimine etkiyecek bazı çeşitlilikleri göstermektedir. Diyagram verilen proses ve ekipmanlar için doğru alaşım bileşimini seçiminde yardımcı olabilir. Şekil 3.5 de çeşitli prosesler gösterilmiştir.



Şekil 3.5 FeSiMg Alaşımı Seçiminde Proses Çeşitliliğinin Etkileri(Jepsen ve Popovski, 2007).



Şekil 3.6 FeSiMg Alaşımı Seçiminde Demir Bileşiminin Etkileri(Jepsen ve Popovski, 2007).

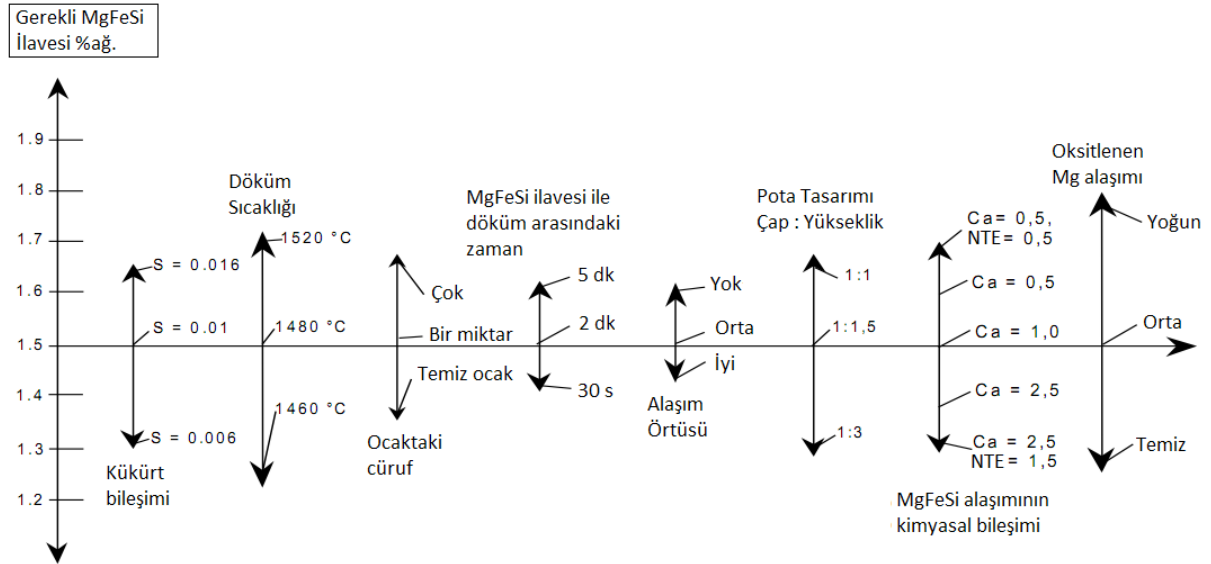
Kalsiyum, magnezyumun tepkimeye girme eğilimini düşürmek için eklenerek Mg toparlanmasını en uygun seviyede verir. Düşük alüminyum cüruf eğilimini ve cürufa bağlı hataları azaltır. Bunlar özgün analizlerdir ve diğer alaşım bileşenleri karakteristik ihtiyaçları

karşılatabilmek için uygundur. Çizelge 3.3'te farklı işlemler için verilmiş FeSiMg bileşenlerini göstermektedir.

Çizelge 3.3 FeSiMg alaşımları için farklı işlem prosesleri için tipik spesifikasyonlar(Jepsen ve Popovski, 2007).

Elementler	İşlem Prosesi		
	Kalıpta Aşılama	Akışta Aşılama	
Silisyum	% 44-48	% 44-48	% 44-48
Magnezyum	% 5,0-6,0	% 2,8-3,5	% 3.5-4.0
Kalsiyum	% 0,4-0,6	% 1,1-1,6	% 1.3-1.8
Alüminyum	% 0,8-1,2	% 0,5-1,0	% 0.5-1.0
Lantan	% 0,25-0,40	—	—
Nadir Toprak Elementleri	—	% 1,1-1,4	% 1.1-1.4
Tane Boyutu	1-4 mm	2-12 mm	2-12 mm

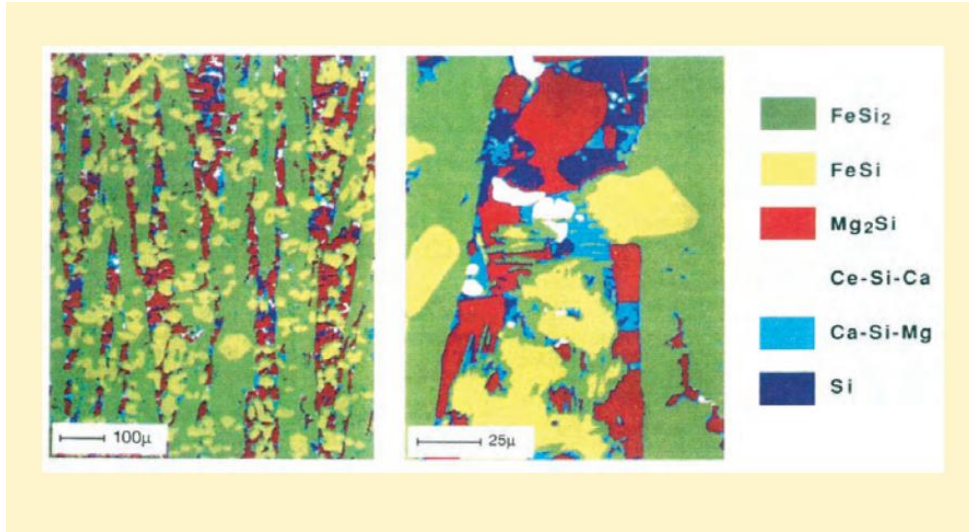
Döküm sıcaklığı, kükürt ve oksijen miktarı, pota tasarımı, örtü malzemesi, FeSiMg alaşımını kimyasal bileşimi gibi FeSiMg ilave miktarına etki eden birçok parametre vardır. Bunlar Şekil 3.7'de grafiksel olarak izah edilmiştir.



Şekil 3.7 Küresel grafitli dökme demir pota işlemi yöntemindeki FeSiMg ilavesini etkileyen etkenler(Hartung 2003; Url 2)

FeSiMg alaşımı ihtiva ettiği elementlere göre değişik tipte faz yapısına sahiptir. Daha fazla termodinamiksel olarak kararlı olan Ca-Si-Mg fazının oluşumu Mg_2Si fazına kıyasla

tepkimenin şiddetini düşürür. Ayrıca ilave edilen Ca cüruf oluşumunu arttırabilir. Şekil 3.8'de FeSiMg alaşımındaki fazları göstermektedir(Url 2).



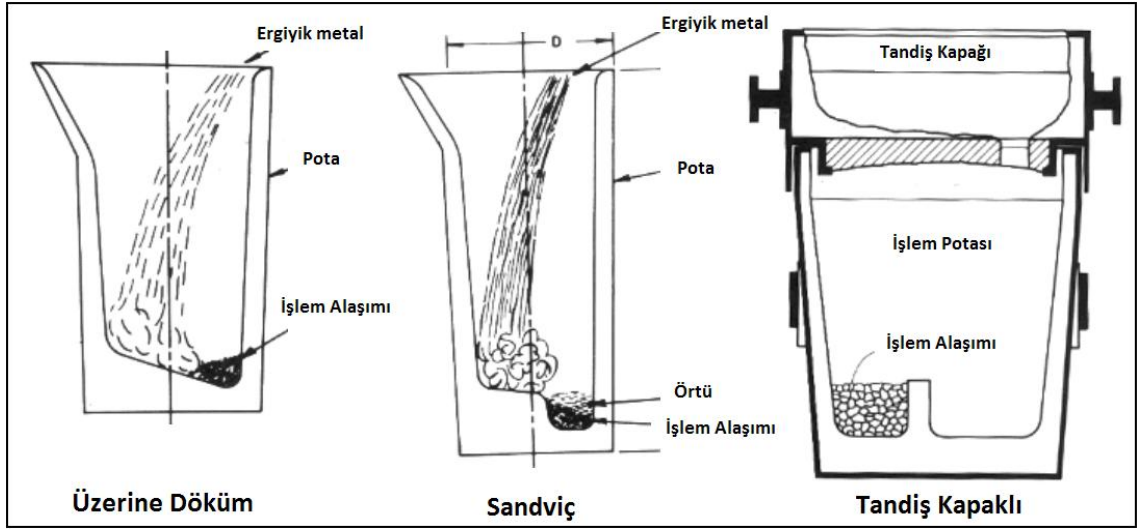
Şekil 3.8 %5 Mg, %1 RE ve %1Ca içeren bir FeSiMg alaşımının homojen içyapıdaki tipik fazlara örnek(Url 2).

Yaygın şekilde kullanılan çeşitli magnezyum işlem proseslerine karşılaştırmalı olarak yer verilmiştir. Farklı proseslerin önemli karakteristik özellikleri Ni/Mg alaşımı, MgFeSi alaşımları, Mg metali ve Mg/Fe briketler gibi değişik tretman malzemeleri için aşağıda sıralanmıştır. Tanımlanan değişik prosesler üzerine döküm ya da sandviç, tundiş örtülü, kalıpta, akışa verme ve Mg teldir (cored wire). Çizelge 3.4'te Mg İşlemi için uygulanan proses çeşitleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.4 Mg İşlemi için uygulanan proses çeşitleri(Elkem, 2001).

	Üzerine döküm ya da sandviç	Tandış Örtülü	Kalıpta	Akıшта	Mg tel
Prosesse uygun işlem alaşımı	FeSiMg	FeSiMg	FeSiMg	FeSiMg	FeSiMg
Mg-oranı (%)	3 - 10	3 - 10	3 - 10	3 - 5	20 - 100
Mg-verimi (%)	35 - 70	50 - 80	70 - 80	30 - 50	30 - 50
Yatırım maliyeti	Yok	Düşük	Yok	Düşük	Orta
Çıkan toz	Orta/Yüksek	Düşük	Yok	Orta	Yüksek
Toz tutma ihtiyacı	Evet	Hayır	Hayır	Hayır	Evet
Ana metal kükürt limitleri (%)	0,03	0,03	0,01	0,03	Yok
İşlem yeri	Ocak	Ocak	Kalıpta	Uygun yerde	Uygun yerde
İşlem ağırlık limitleri	Yok	Yok	< 500 kg	Yok	> 500 kg
İşlemede aşılama etkisi	Düşük/Orta	Orta/Yüksek	Çok Yüksek	Orta/Yüksek	Yok/Düşük
Reaksiyon şiddeti	Orta/Yüksek	Düşük/Orta	Çok Düşük	Orta	Yüksek
Artık silisyum kalma riski	Evet	Evet	Evet, ama düşük	Evet	Hayır
Prosesse uygun üretim birim boyutu	Küçükten Büyüğe	Küçükten Büyüğe	Ortadan Büyüğe	Küçükten Büyüğe	Ortadan Büyüğe

Birçok uygulamada tandış örtülü işlem, kolaylığı, en iyi kararlılığı vermesi, düşük bakım ve operasyon maliyetleriyle birlikte yüksek magnezyum verimi sağlaması gibi avantajlarından dolayı birçok küçük ve büyük dökümhane için iyi bir seçimdir. Şekil 3.9'da en çok kullanılan pota yöntemlerinin şematik gösterimleri mevcuttur.

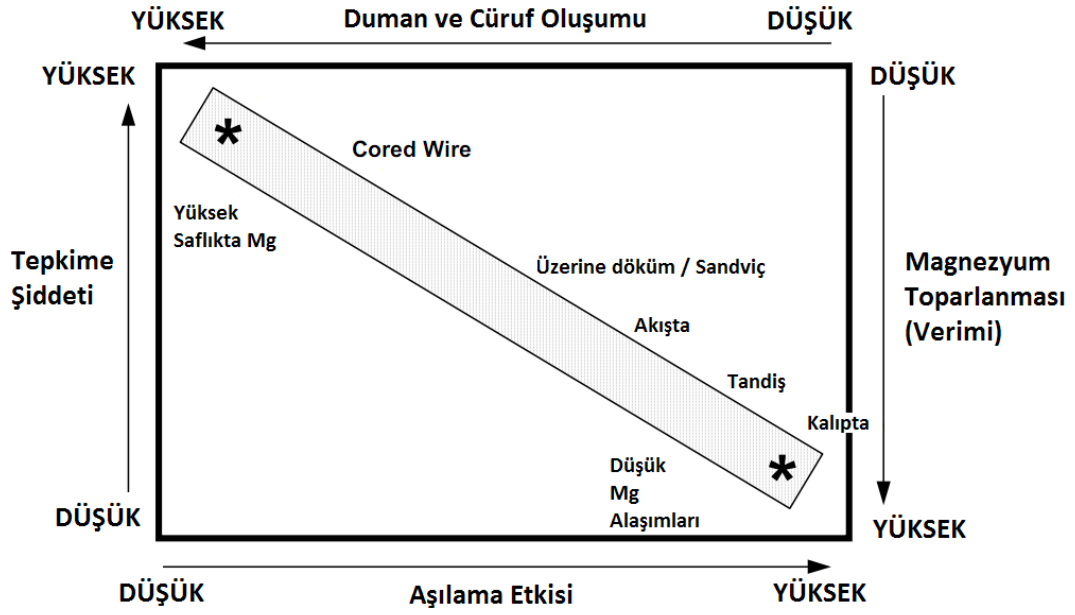


Şekil 3.9 Üzerine döküm, sandviç ve tandiştirilmiş potaların şematik gösterimi(Skaland, 2003).

Şekil 3.10'da reaksiyon şiddeti, magnezyum verimi, toz ve cüruf oluşumu ve aşılama etkisi gibi parametrelerin seçilen işlem prosesinden ne denli etkilendiği şematik olarak gösterilmektedir. Bu dört parametre arasında net bir ilişki mevcuttur ve tüm ticari işlem işlemleri şekildeki gölgelendirilmiş bölge boyunca yer alır.

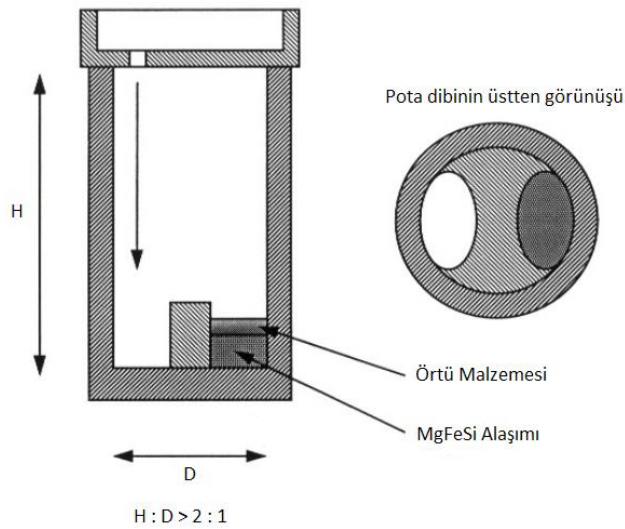
Şeklin sol üst kısmında yüksek magnezyum içeren malzemelere uygulanan cored wire işlemleri yer alırken, sağ aşağı kısımda tandiştirilmiş örtülü ya da kalıpta uygulama gibi yüksek etkili prosesler bulunur.

Yüksek şiddette meydana gelen reaksiyonlar tipik olarak düşük magnezyum verimi, yüksek miktarda toz ve cüruf oluşumu ve aşılama zor metal oluşmasına neden olur. Reaksiyon şiddeti düşük olan prosesler ise aksine yüksek magnezyum verimi, düşük toz ve cüruf oluşumu ve iyi bir aşılama performansı sağlar. Diyagramın üst sağ ya da alt sol tarafına hiçbir proses yerleştirilemez.



Şekil 3.10 Küresel grafitli dökme demirin işlem prosesleri için “reaksiyon şiddeti”, “magnezyum verimi”, “toz ve cüruf oluşumu” ve “aşılama etkisi” parametreleri arasındaki ilişkinin şematik gösterimi(Elkem, 2001).

Küresel grafitli dökme demirin çekirdeklenmesi için yapılan magnezyum işlemi değişik yöntemlerle yapılabilir. Tandış örtülü pota tüm koşullarda ekonomiklikle birlikte tatmin edici, verimli ve güvenlidir. Geniş çaplı işlem boyutlarında dahi bu pota işleminde istenen yoğunluk ve yüksek verim sağlanır. Diğer tüm yöntemlerde operasyon ve bakım masraflarıyla karşılaştırıldığında, doğru uygulanan bir tandiştir sistemi %60-80 magnezyum verimiyle çok daha ekonomiktir. Tandıştir pota işleminde ayrıca küçük patlamalar ya da metal sıçratma görülmezken karbon ve ısı kaybı da asgari düzeydedir.(Duman çıkışı %90 azdır). Aşağıdaki şekilde olası bir tandiştir potası görülmektedir(Skaland, 2003).



Şekil 3.11 Tandıştir örtülü potanın şematik görünümü(Elkem, 2001).

Aşağıdaki Eşitlik 3.1’de tandış kapaklı tepkime cebinin ölçülerinin hesaplanmasında kullanılabilir;

$$d = 0,07 \sqrt{\frac{W}{t \cdot h}} \quad (3.1)$$

d = tepkime cebinin ölçüsü (cm), W = ergiyik ağırlığı (g), t = döküm zamanı (s), h = tandış havuzundaki ergiyik metalin yüksekliği (cm). Buradaki önemli nokta “ h ”nin metalin pota içerisindeki yüksekliğidir, potanın kendi yüksekliği değildir.

Tandış potasının maksimum oranda verimliliğini sağlamak için sıvı metalin sülfür içeriğinin pota işlemi öncesi tercihen % 0,02’yi geçmemesinde fayda vardır. Sülfür seviyesinin daha yüksek olması durumunda, küreselleştirme öncesi kükürt giderme işleminin uygulanması tavsiye edilmektedir. Tandış pota işleminde % 3 ile 12 arasında magnezyum içeren hemen hemen bütün magnezyum ferrosilis alaşımları kullanılabilir; ancak genellikle % 4 ile 6 Mg içeren alaşımlar kullanılır. Tablodaki gibi bir Mg-alaşımı çelik hurda, pik demir ve döndü içeren bir sıvı demirin işlemi için kullanılabilir. Küçük çaplı işlem için alaşım boyutu 1 ile 10 mm arasında uygunken, büyük çaplı işlemlerde 4 ile 35 mm’ye kadar olan alaşımlar tercih edilir. Çizelge 3.5’te örnek bir alaşım gösterilmektedir.

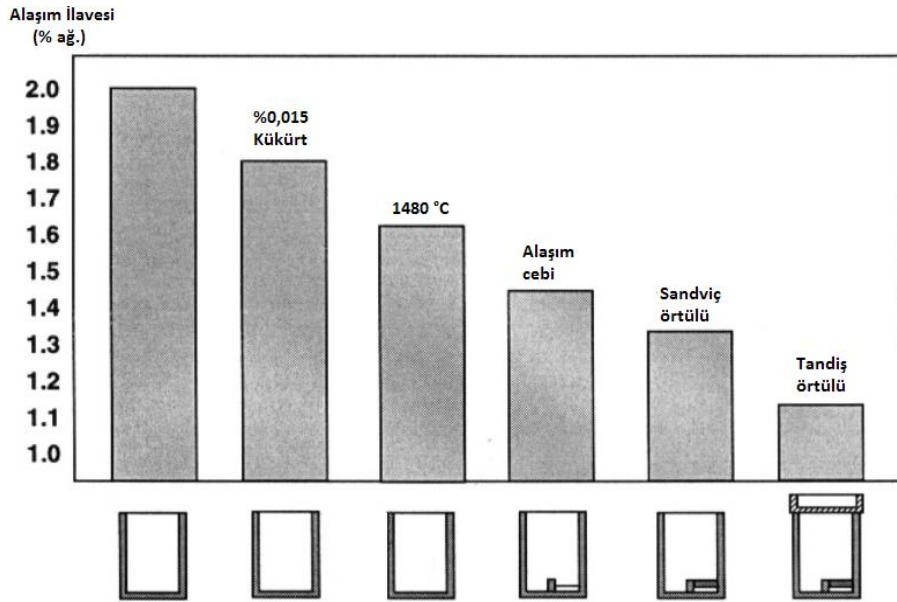
Çizelge 3.5 FeSiMg kimyasal bileşimi(Elkem, 2001).

Element	Bileşim
Si	% 45
Mg	% 6
Ca	% 1
Nadir Toprak Elementleri	% 1
Al	Azami % 1
Fe	Geriye kalanı

Eklenecek alaşım miktarı, demirin kükürt içeriği, metal sıcaklığı, alaşımın magnezyum içeriği ve prosesin tekrarlanabilme sıklığına göre, ağırlık olarak %1.2 ile %1.8 arasında belirlenir. Maksimum işlem verimi elde edebilmek için tepkime cebinde magnezyum alaşımının bir örtü malzemesi ile kapatılması önerilir. Örtü malzemesi, alaşımı tepkime başlamadan mümkün olduğu kadar uzun süre cepten sızdırmadan tutmalıdır. Örtü malzemesi genellikle temiz çelik

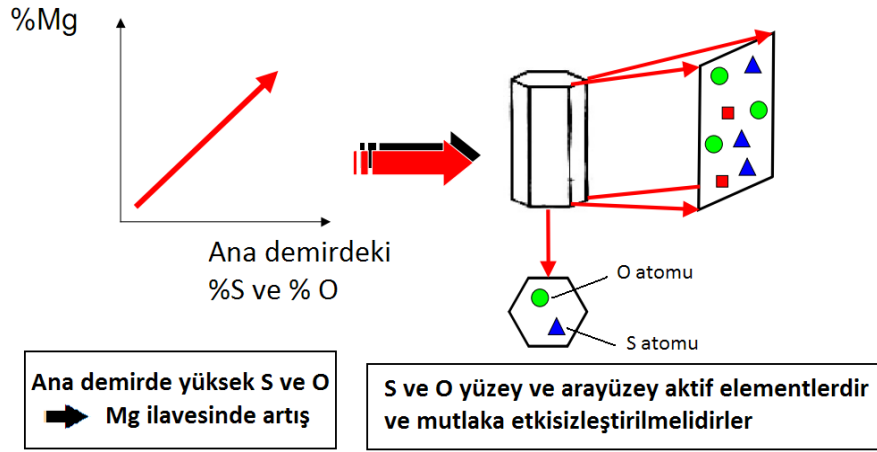
levhalar ve ergitme şarjlarında kullanılanlara benzer kesme parçalarından oluşur. Dökme demir kapak levhaları dökümden arta kalan malzemeyle dökülmelidir. Bununla birlikte en iyi sonuçlar ferrosilis alaşımlarının örtü malzemesi olarak kullanıldığı durumlarda elde edilir(Skaland, 2003).

Sülfür içeriği, işlem sıcaklığı ve pota tasarımı modifikasyonlarının bir fonksiyonu olarak verim artırmanın şematik sunumudur. Birinci örnekte yer alan % 2,0 aşılavıcı ilavesi oranı, % 0,03 S ve 1520°C işlem sıcaklığında uygulamayı temsil etmektedir(Elkem, 2001). Şekil 3.12'te ilave edilecek alaşıma etkiyen parametrelerden kükürt içeriği, işlem sıcaklığı, alaşım cebi, pota çeşidine bağlı verim artırımını şematik gösterimi mevcuttur.



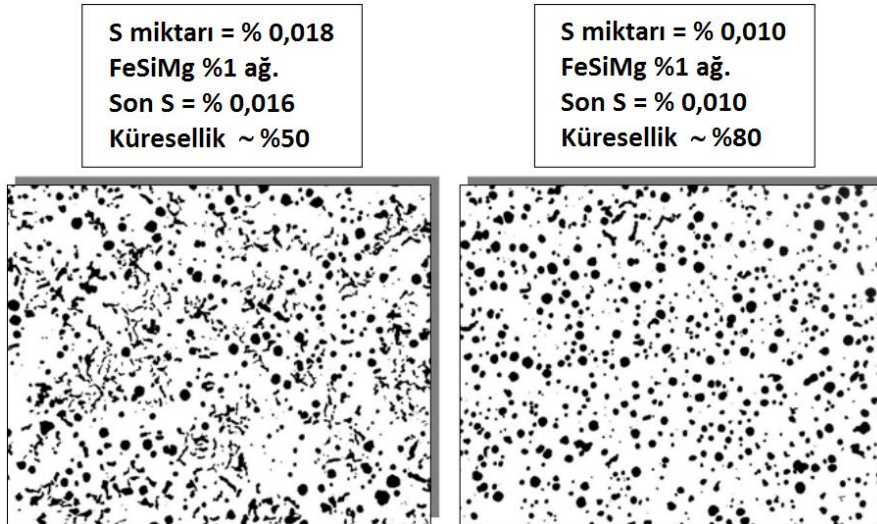
Şekil 3.12 Kükürt içeriği, işlem sıcaklığı, alaşım cebi, pota çeşidine bağlı verim artırımının şematik gösterimi(Elkem, 2001).

Küresel grafitli dökme demir üretiminin temel ilkeleri değerlendirilirse grafitin gelişim mekanizması incelenmelidir. Ergiyik ile bağlantılı olarak en düşük ara yüzey enerjisi ile düzlemin ucu boyunca gelişeceği öngörülür. Bu düzlem en yüksek paket yoğunluğuna ve en yüksek gelişim oranına sahip düzlem olacaktır. Prizma düzlem sergileyen O ve S gibi yüzey-aktif elementleri ile gelişim çok hızlı olacaktır ama bu elementler esas düzeni yok edip tekrardan en yüksek gelişim oranına sahip olmaktadır. En yüksek gelişim oranı küresel grafitli dökme demirde esas düzlemden, kır dökme demirde ise prizma düzleminden olacak şekildedir. Fakat magnezyum ilave edildiğinde kükürt ve oksijen gibi yüzey-aktif elementleri etkisizleştirilir. Bu demek oluyor ki; ana demirdeki artan kükürt ve oksijen bileşimi daha yüksek oranlarda magnezyum ilavesi gerektirir. Şekil 3.13'te bu durum şematize edilmiştir(Hartung, 2003).



Şekil 3.13 Ana demirdeki artan kükürt ve oksijen bileşimi daha yüksek oranlarda magnezyum ilavesi gerekliliğinin gösterilmesi(Hartung, 2003).

Şekil 3.14'de ise FeSiMg miktarında artış yapılmadan ana demirdeki yüksek kükürt seviyesinin etkilerini gösteren bir örnektir.



Şekil 3.14 Farklı iki demirin farklı S ve FeSiMg ilave oranlarını gösterimi(Hartung, 2003).

%0,018 oranında S içeren ana demir küreselleştirme işleminden sonra %50 küresellik oranı verirken, 0,010 oranında S içeren yapı %80 civarında küresellik vermiştir(Hartung, 2003).

Mg tepkimesinin şiddetli olmaması için döküm veya işlem sıcaklığı mümkün olduğunca düşük olmalıdır. Yüksek sıcaklık demek daha fazla buharlaşma ve düşük Mg toparlanması demektir. Saf magnezyumun kaynama noktası 1110°C civarındadır ve dökümhanedeki olağan işlem sıcaklığı 1500 °C'de bitecektir. Önısıtma yapmamak ve alaşımın oksitlenmemesi için magnezyum ilavesi ile döküm arasındaki zaman oldukça düşük olmalıdır. Aynı zamanda potada alaşım ile tepkimeye girecek bir önceki işlemde kalma sıvı metal artığı olmamalı bu da düşük magnezyum toparlanmasına yol açar. Cüruf ergiyikten atılmalıdır ve işlem potasına

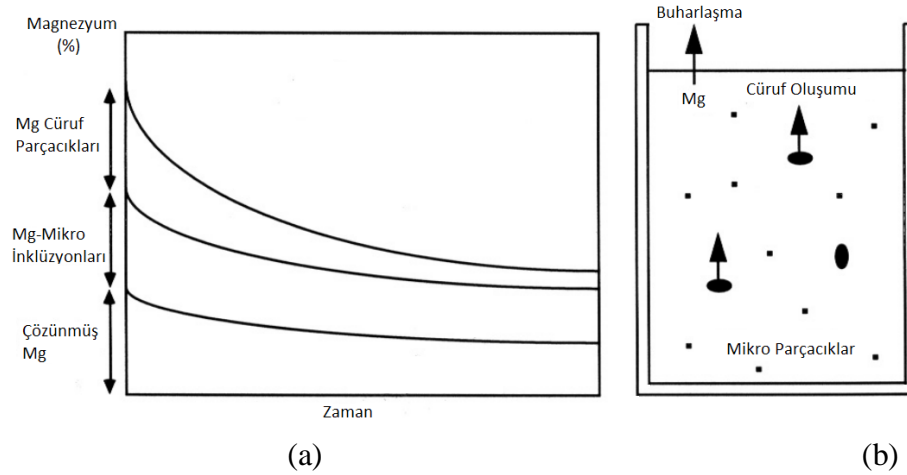
hiç cüruf aktarılmadığından emin olunmalıdır. Ocaktan potaya aktarılan cüruf magnezyum ile tepkimeye girerek Mg toparlanmasını düşürecektir. Bu ilk işlemde önce ocağın yüzeyi cüruftan temizlenmeli yoksa diğer işlemlerde cüruf bulaşmasından dolayı sıkıntı oluşturabilir(Hartung, 2003).

Magnezyum, sıvı dökme demire genellikle ferrosilis magnezyum alaşımı (MgFeSi ya da FeSiMg) olarak eklenir. Magnezyum katkısının ilk etkisi demirde bulunan kükürt ve oksijenle birleşerek sülfürler ve oksitler oluşturmasıdır. Sıvı demirin bünyesindeki kükürt ve oksijen tamamen bağlanmadığı sürece yapıda küreler oluşturan serbest magnezyumun bulunması söz konusu değildir. Ana malzeme olan demirin içerdiği tüm kükürt ve oksijen miktarındaki dalgalanmaların üstesinden gelebilmek amacıyla gerekli olandan daha fazla miktarda magnezyum ilavesi yapılır. Bu fazla katkının tek amacı buharlaşan magnezyumu telafi edebilmektir. Sadece çok küçük bir miktar magnezyum, çekirdeklenme reaksiyonunun tamamlanmasından sonra demirin içinde çözünür.

Sıvı demirin toplam analitik ve kalıcı magnezyum içeriği işlemde sonra sadece;

- Çözünen magnezyum,
- Magnezyum bileşiklerinin mikro inklüzyonları (oksit ve sülfürler) halinde,
- Magnezyum içeren büyük cüruf parçalarından oluşur.

Metaldeki toplam magnezyum değişik yollardan bekletme süresi içinde reaksiyona girer. Aşağıdaki şekilde besleme özelliklerinin bekletme sırasında magnezyum miktarıyla olan ilişkisi şematik olarak gösterilmiştir. Sadece demirdeki toplam magnezyum miktarının belirlenebildiği geleneksel analiz teknikleriyle bu üç durumdan her birinin miktarını hesaplamak mümkün değildir(Gagne, 2004). Artakalan magnezyuma karışan bu katkılar ergiyiğin bekletilmesinden sonra değişik yollara tepkime girecektir. Stokes Kanunu'na göre bu cüruf parçacıkları yüzeye doğru hareket edecek ve yüzecekler. Yüksek oranlarda FeSiMg ilave oranı pota cebinde istenilen verimle çalışamaz. Eğer Mg toparlanması kalitesiz ise bunun sebebi fazla alaşım ilavesidir ve bu fazla alaşım gereksiz yerlere saçılır. Pota cebi mutlaka temiz tutulmalıdır böylelikle iyi Mg toparlanmasına ulaşılır. Aynı zamanda düşük FeSiMg ilavesi de düşük Mg toparlanmasının sebebidir. Bu durumda da yeterli küresel grafitli dökme demir üretilemez (Jepsen ve Popovski, 2007). Şekil 3.15'te magnezyumun zamanla solma etkisini ve bu etkinin hangi parametreler vasıtasıyla oluştuğunu gösteren şematik ve grafiksel gösterimidir.



Şekil 3.15 (a) Mg-işleminden sonra uzun bekleme süresi neticesindeki solmanın grafiksel gösterimi, (b) işlem potasındaki magnezyum solmasının sunumunun şematik gösterimi(Hartung, 2003).

3.5. Aşılama Prosesi

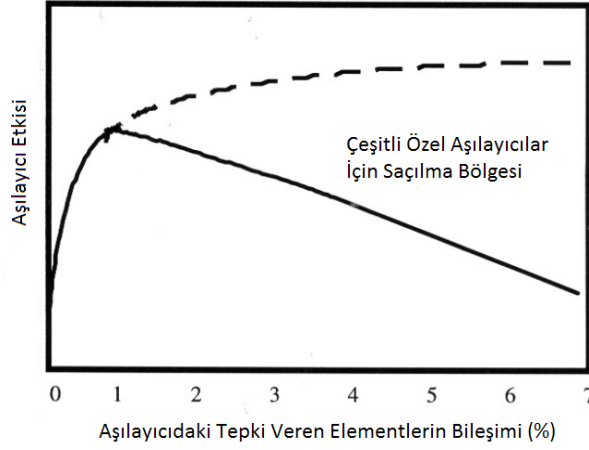
Dökme demirler için aşılama olarak kullanılan ferrosilis alaşımları demire gerekli etkileri yapabilmek için bir veya birden fazla elementten küçük ilaveler ihtiva etmelidir. Genel olarak aşılama yapılabilecek etkilere bağlı olarak bazı alaşım elementlerinin denetimli miktarlarda içerebilirler. Çizelge 3.6’da aşılama prosesinde kullanılan başlıca ve yardımcı elementleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.6 Aşılama olarak kullanılan elementler(Elkem, 2001).

Birincil Elementler	Yararlı Yardımcı Elementler
Kalsiyum	Zirkonyum
Baryum	Seryum (Nadir Toprak Elementi)
Stronsiyum	Alüminyum
	Kükürt
	Oksijen

Diğer elementler bir kombinasyon yaparak yararlı olurken stronsiyum, kalsiyum ve alüminyumun yokluğunda da tek başına mükemmel etkisi ile diğer elementlerden ayrılır. Stronsiyum, kalsiyum veya baryumun %0,6-1,5 arasındaki bileşimleri birçok dökümhane koşullarında dökme demirlerde gerekli aşılama seviyesini uygun olduğunu göstermiştir. Aşağıdaki şekil aşılama tepkime veren elementlerin(örn. Ca, Ba, Sr, vs.) bir fonksiyonu olarak aşılama etkisinin bir örneğini göstermiştir ve %0,5’in üzerindeki konsantrasyonlarda elde edilen en iyi etkiyi göstermektedir(Elkem, 2001). Şekil 3.16’da

ferrosilis aşılamaçısındaki tepkime veren elementlerin toplamının bir fonksiyonu gösterilmektedir.



Şekil 3.16 Ferrosilis aşılamaçısındaki tepkime veren elementlerin toplamının bir fonksiyonu olarak aşılamaçıcı etkisi (örn. küre sayısı ya da soğutucu etkisinin azaltılması) (Elkem, 2001).

Yeni bir yaklaşım olarak kalsiyum ve seryum esaslı FeSi çil oluşumunu ve eser elementlerin yıkıcı etkilerinin düşürdüğü sonucuna varılmıştır. Yeni aşılamaçıcı da denetimli ve az miktarlarda kükürt ve oksijen de içeriyor çünkü bu elementler sıvı metale girişleri esnasında kalsiyum ve seryum ile tepkime yapmaları için çok uygundur. Bu özel bileşim çil ve çekinti eğilimlerinin yüksek olduğu küresel grafitli dökme demirler için yüksek oranda grafit çekirdekleri elde etmek için tasarlandı. Özellikle sıcak nokta bölgelerinde çekintileri düşüren bir etkiye sahip olduğu gözlemlendi. Yeni (Ca, Ce, S, O) içeren aşılamaçıcı birçok kesitte küresel yapının hassasiyetini ortadan kaldırıp kalın ve ince kesitliler için en iyi sonuçları vermiştir. Grafit kürelerinin iki doruklu tane dağılımı sıklıkla elde edilmiştir. Bu küre dağılımı çekintiyi, perlitli ve karbür oluşumunu asgariye indirir (Skaland, 2001).

Aşılamaçıcılar döküm işlemi içerisinde genellikle dökme demirlere bu üç basamağın birinde veya birkaçında eklenir;

1. Ocaktan döküm potasına aktarım esnasında (pota aşılamaçısı),
2. Kalıba doldururken metal akışına (akışta aşılamaçısı),
3. Kalıpta yolluk sistemine yerleştirilen tablet şeklindeki aşılamaçıcı kullanımı (kalıpta aşılamaçısı),

Bu yöntemlerin seçilmesine etkiyen kıstaslar;

- Potaya doldurma zamanından dökümün sonuna kadar geçen zamana (genellikle solma zamanı olarak bilinir),

- Metal sıcaklığı,
- Döküm işleminde belirli bir noktada aşılama ilavesi edebilme yeteneği,
- Döküm sisteminin akışta geç aşılama işlemine uygunluğu.

Potada Aşılama: Potanın taşınmasında geçen kaçınılmaz uzun sürelerle bağlı olarak solmanın süresini uzatmak için nispeten fazla miktarlarda aşılama ilavesi gereklidir. Çoğunlukla küresel grafitli dökme demirler için kritik bir oran olan %0,75'e kadar değişen ilave oranları vardır. Aşılama alaşımları pota ağırlığına göre seçilmelidir ve tozsuz bir pota kullanıldığında hava akımı veya oksidasyon ile oluşan kayıplar bir nebze telafi edilir. Genel olarak 300kg'a kadar olan potalar 0,5-3 mm tane boyutu kullanılabilir ancak bu tonajdan büyük potalarda 1-6 mm tane boyutlu malzeme kullanımı önerilir.

Aşılama ilavesinden yüksek oranda verim elde etmek için aşağıdaki basit ilave kurallarını izleyin;

- Aşılama ilavesini metal potaya aktarılırken akışına ilave edin, kesinlikle doldurmadan önce yani pota boş iken ilave etmeyin.
- Potanın doluluk oranı %25 iken aşılama ilavesini serpererek ilave etmeye başlayın ve %75'ine dolana kadar ilave işlemini tamamlayın böylece iyi bir karışım ve çözelti oluşabilecek ortam sağlanmış olur.
- Potaya dökülmeden önce metalin cürüfsüz olduğundan emin olun, aksi takdirde cüruf aşılama ilavesini kullanılmaz hale getirip etkisini kaybetmesini sağlar.
- Metal ile pota arasındaki aktarımlarda, aşılama ilavesini dökümden önceki en son aktarımda ilave etmeliyiz ki, solmanın etkisini asgariye indirelim.

Küresel grafitli dökme demirde aşılama işlemi magnezyum tepkimesi bittikten sonra uygulanmalıdır. Küreleştirici madde veya magnezyum tepkimesi esnasındaki aşılama ilavesi aşılama ilavesinin etkinliğini önemli ölçüde düşürür bu da dökümden karbürlerin artmasına sebebiyet verebilir. Aynı potada küreleştirici ve aşılama ilavesi gerekli olduğu durumlarda döküm işlemi kademeli olarak yapılmalıdır, küreleştirici işlem için metalin 2/3'ü kullanılarak küreleştirici alaşımın üstüne dökülmelidir. Sonra küreleştirme tepkimesi bitene kadar beklenmeli ve daha sonra da aşılama ilavesi yukarıda tanımlandığı gibi geri kalan(%25'ten %75'e kadar) metalin akışına ilave edilmelidir.

Döküm Akışında Aşılama: Geç aşılama olarak ya da ikinci basamak aşılama olarak nitelendirilir. Metal akışında geç aşılama işlemi uygulandığında kalıba doldurulan metalin akışına aşılama ilavesi solmanın etkisini neredeyse yok eder. Küresel grafitli dökme demirler için geleneksel pota işlemine kıyasla akışta aşılama işleminde ilave edilen aşılama oranları

muazzam bir düşüş göstererek %0,05-0,2 civarında kullanılır. Metalin hızlı soğumasını denetimli takip edebilmek için aşılama ilavesi özellikle 0,2-0,7 mm boyutlarında olmalıdır ve tatbik edilen potada da akışkanlığı iyi olmalıdır. Akışta geç aşılama sabit döküm sistemlerine veya sabit potalara kolayca uygulanmıştır ancak hareketli potalara henüz daha uygulamaları başılamadı.

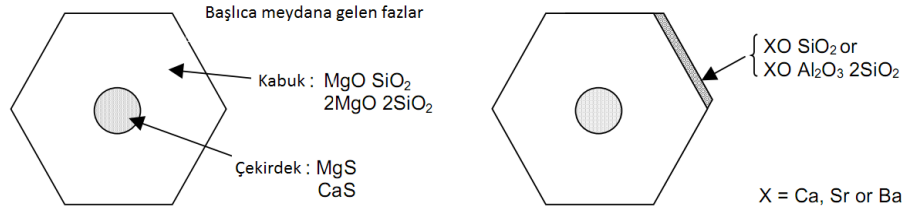
Kalıpta Aşılama: Döküm ya da preslenmiş aşılama ilavesi parçanın(tablet) kullanımı bu proseste sigorta niteliğindedir ve nadiren kullanılan bu çeşit aşılama şekli aşılamanın birincil kaynağı olarak kullanılır. Farklı boyutta ve bileşimdeki tabletleri vardır. İkincil aşılama olarak kullanıldığında veya akışta geç metal aşılamanın mümkün olmadığı zamanlarda belirgin bir şekilde solma zamanı uzun olduğundan kalıpta aşılamanın ne kadar değerli olduğu ispatlanır. Kalıba tablet(ilave parça) eklerken insan hatası olasılığı yüksek olduğundan daha sonra dikkatli döküm muayenesi gereklidir bu durum genellikle tabletlerin tek başına aşılama olduğu yerlerde kullanılır(Elkem, 2001).

3.5.1. Aşılama Mekanizmaları

Dökme demirlerde grafitin çekirdekleşmenin açıklamak için birçok teori geliştirilmiştir. Bu teoriler en sonunda katılma esnasında grafitin heterojen çekirdekleşmesi ve bu çekirdeğin etrafında metalik olmayan malzemeler kabuk oluşturduğuna dair bir varsayım üzerine dayandırıldı ve Ca, Ba, Sr gibi ikincil elementler çekirdekleşme sürecinde önemli rol oynarlar.

Mg işlemi uygulanmış dökme demirde işlem sonrası mikro inklüzyonlar ağırlıklı olarak magnezyum, kalsiyum, kükürt, silisyum ve oksijen içerirler. Bunlar magnezyum işleminin birincil tepkimesinin ürünleridir. Bu inklüzyonların çekirdeği kükürt, kabuk kısmında silikadan oluşur. Kabuk kısmı karışık magnezyum silikatlarından(örn. $MgSiO_3$, Mg_2SiO_4) oluşurken kükürt çekirdeği de MgS ve CaS fazlarından oluşur. Çekirdek/grafit arayüzey enerjisinin büyüklüğünden dolayı katılma esnasında grafit için bu fazlar çekirdekleşme bölgeleri olarak hareket etmeyeceklerdir. Ca içeren ferrosilisyumlu aşılama işlemi sonrası küreselleşme esnasında üretilmiş sülfür/oksit inklüzyonların yüzeyinde hegzagonal silika fazları olan $CaSiO_3$ ve $CaAl_2Si_2O_8$ oluşacaktır. Hegzagonal kristal yapısı, grafit kristal kafes yapısına çok uygun olduğundan(örn. düşük arayüzey enerjisi), katılma esnasında grafit çekirdekleşmesi için kalsiyum silikatların olduğu bölgeler çok fazla tercih edilen bölgeler olacaktır. Sağdaki şekil hem Ca, Ba hem de Sr içeren ferrosilisyum aşılama sonrası inklüzyon bileşiminin şematik gösterimi verirken sol alttaki şekil küreselleştirme sonrası küresel grafitli dökme

demirdeki tipik mikro inklüzyonları gösterir(Elkem, 2001). Şekil 4.17’te küresel Grafitli Dökme Demirdeki olası inklüzyonların şematik gösterimi mevcuttur.



(a) Küresel grafitli dökme demirde
çift sülfür/oksit mikro inklüzyonlar

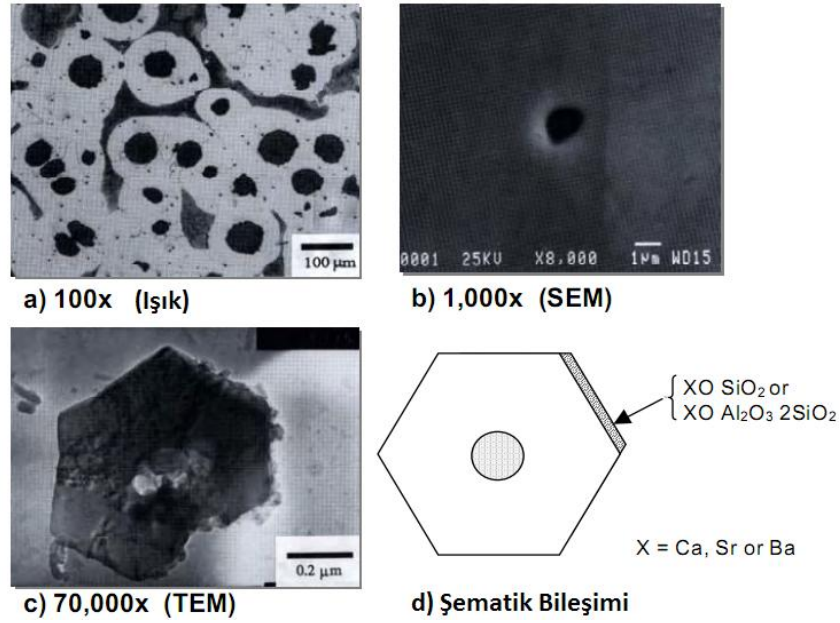
(b) X içeren ferrosilisyum aşılama sonrası bir inklüzyon mekanizmasının şematik sunumu (X = Ca, Ba veya Sr).

Şekil 3.17 Küresel Grafitli Dökme Demirdeki İnküzyonlar(Elkem, 2001).

Gövde yani esas kısım küreselleştirme işleminin bir ürünü olurken, kabuğun yüzeyi aşılama ilavesi esnasında oluşan hegzagonal kalsiyum silikatlarının içerir. Bu yüzden aşılama ergiyikteki çekirdek sayısını arttırmaz fakat küreselleştirme işleminden sonra üretilmiş olan yüzeyleri değiştirmeyi tercih eder. Bu oluşum da magnezyum işlemi ile aşılama arasındaki önemli ilişkiyi açıklar ve küreselleştirme esnasında etkin küresel grafit dökme demir aşılması için kaideyi açıklar. İnküzyon yüzey değişimine bağlı olarak neticelenen küre sayısı yoğunluğu geniş ölçüde ayrılacaktır. Aşılama, stronsiyum veya baryum ihtiva eden ferrosilisyum aşılama ile uygulandığında hegzagonal silikatlar, kalsiyum silikatlara eşit olarak oluşacaktır. (örn. $SrSiO_3$, $SrAl_2Si_2O_8$, $BaSiO_3$, $BaAl_2Si_2O_8$)

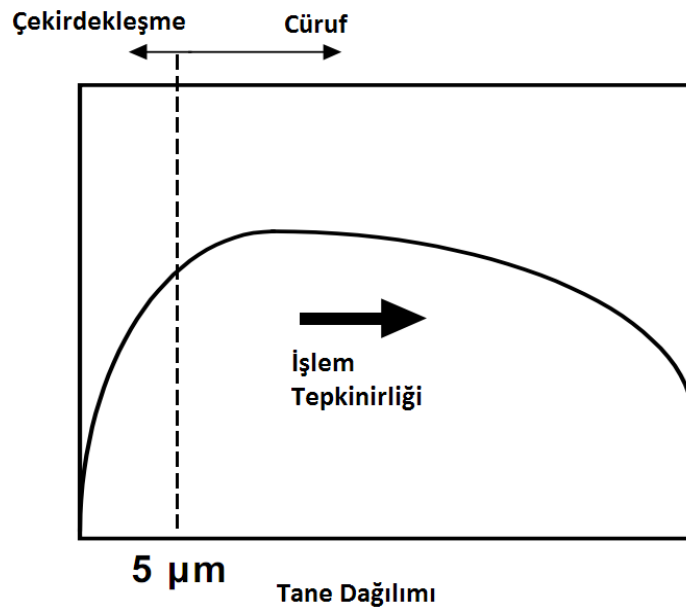
3.5.2. Kalın Kesitli Dökme Demirlerin Aşılması

Aşılamanın önemli faydaları içyapının sert, kırılman, karbür(ementit) oluşumunu engellemek ve ötektik katılama esnasında grafit oluşumunu teşvik etmektir. Küresel grafitli dökme demirlerde belirli bir aralığın üzerindeki kesit kalınlığında grafit kürelerinin sayısındaki artış ile daha eş dağılımlı yapı üretilir. Bazı yapılar mekanik özelliklerin artırılmasını, bazı alaşımların veya demirdeki bazı zararlı elementlerin segregasyon eğilimlerinde düşüşü destekler ve daha iyi işlenebilirlik verir. İlk kükürt bileşeni, sıcaklık ve toplam “solma” zamanı gibi belirli ana demir koşulları aşılama seçimine etki edecektir. Ayrıca Şekil 3.18’de küresel grafitli dökme demir için çekirdekleşme bölgelerinin farklı büyütme oranlarında neden oldukları mikro-inklüzyonların nasıl gözlemlendiğini gösterir(Olsen vd, 2004).



Şekil 3.18 Küresel grafitli dökme demirin farklı büyütmelelerdeki mikro-inklüzyonları ve grafitin çekirdekleşme bölgesinin bileşiminin şematik gösterimi(Olsen vd, 2004).

Aşılammamış koşullarda fazla karbürler dökme demirin mekanik özelliklerini parçalar ve işlenebilirliği zorlaştırır. Bu yüzden aşılama prosesi işlenebilirliği basitçe yapabilmek için küresel grafitli dökme demir işleminde elzem bir işlemdir. Küresel grafitli dökme demir küreleştirme işlemi aşılama etkinliğine etkiyecektir ve bundan dolayı doğru işlem prosesini ve doğru magnezyum içeren alaşımı seçmek çok önemlidir. Magnezyum işlemi esnasında küçük mikro-inklüzyonların yüksek sayısı bir avantajdır ve Şekil 3.19'da etkin aşılama öncesi küreselleştirmenin işleme nasıl yarar sağladığını gösterir.

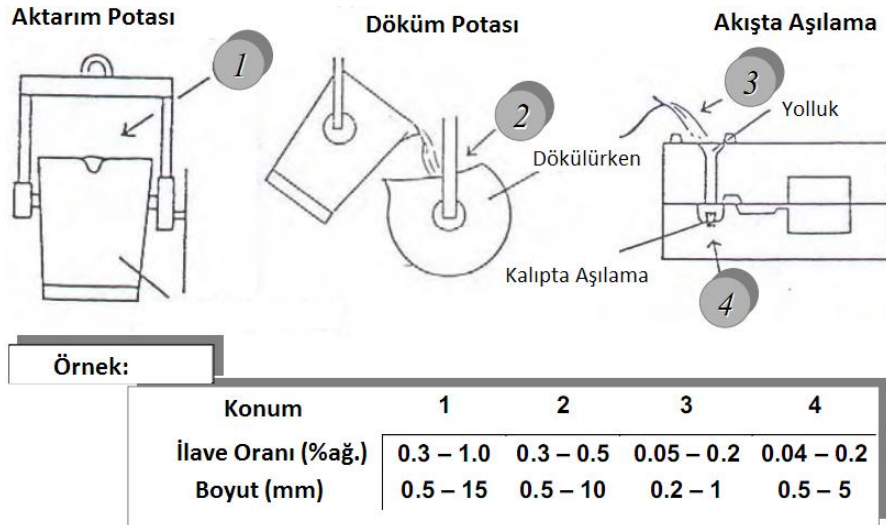


Şekil 3.19 İşlenmiş küresel grafitli dökme demirde cüruf ve mikro-çekirdekleşme olarak inklüzyonların tane dağılımının şematik gösterimi(Olsen vd, 2004).

3.5.2.1. Kalın Kesitlilerde Aşılama Uygulamaları

Döküm işlemi sırasında aşılama dökme demire genel olarak iki veya üç basamakta eklenir; potada, akışta ve kalıpta. Kalın kesitli küresel grafitli dökme demir aşılması için iki adımda yapılan uygulamalarda faydalı sonuçlar elde edilmiştir. Kalın kesitli dökümler için belki kalıpta aşılama zor olabilir ancak aşılama sisteminde ikinci adımı olarak kalıpta doğru boyutta yerleştirilen parça(tablet) çok yararlı olacaktır. Kalın kesitli dökümlerin iki adımda aşılması için birinci adımda baryum içeren aşılama maddelerinin kullanılması ikinci adımda ise tablet şeklinde Al-Ca zengini aşılama maddesi tipi önerilebilir.

Ayrıca sıvı metale aşılama maddesinin gerekli ilave oranı aşılama maddesinin nerede ve ne zaman ortaya konacağı ile oldukça ilgilidir. Şekil 3.20 aktarım potasına erken ilavesinde metal akışına geç ilave yapıldığında ilave oranındaki düşüşün esasının bir örneğini göstermektedir. Hala yeterli ve en iyi aşılama etkisine sahip olan diğer seçenek akışta aşılama sadece %0,1 gibi bir ilave gerekebilecekken, aktarım esnasında kullanılacak aşılama maddesi oranı %1 gibi yüksek bir oranda olabilir. Aslında buradaki esas geç aşılama tanecik irileşmesi ve solma etkileri için az zaman verilmesinden dolayı bu etkiler oluşmak için fırsat bulamazlar(Olsen vd, 2004).



Şekil 3.20 Aktarım potasında, döküm potasında veya kalıpta aşılama ilavesi için değişik yöntemlerin şematik gösterimi(Olsen vd, 2004).

3.5.2.2. Kalın Kesitli Dökme Demirlerin Potada Aşılması

Pota taşınması esnasında elde olmadan harcanan uzun sürelerden dolayı meydana gelecek olan solmayı dengelemek için büyük miktarlarda aşılama maddesi ilavesi gereklidir. Birçok kritik küresel grafitli dökme demiri için %0,2'den %0,75'e kadar değişik oranlarda ilave edilir. Aşılama maddesinin derecesi potanın ölçüsüne bağlıdır.

Aşılama işleminden yüksek etki elde etmek için basit ilave yolları aşağıdaki gibidir;

- Sıvı metal ocaktan potaya aktarılırken aşılama ilavesini akışa eklemek,
- Metalin toplam hacminin %25'inden %75'ine kadar aşılama ilavesini eklenmeli,
- Potaya dökülürken metalin cürufsuz olmalıdır,
- Metal ile pota arasındaki bir çok aktarım olduğunda, aşılama solmasını asgariye indirmek için dökümden önce en son basamakta aşılama ilavesini ekleyiniz.

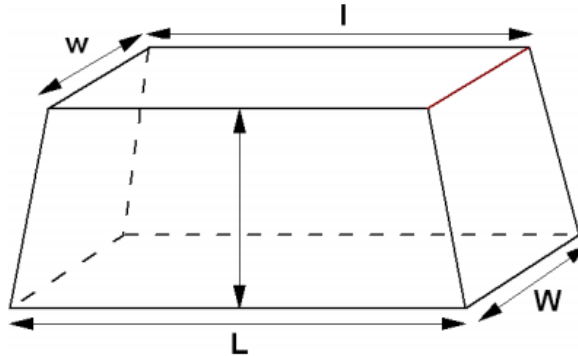
3.5.2.3. Kalın Kesitli Dökme Demirlerin Kalıpta Aşılama

Geç metal akışı aşılama işlemi mümkün olmadığı durumda azami aşılama etkisi verebilmek için ikincil yol olarak kalıp/döküm sisteminde bir ilave aşılama ilavesi kullanılmalıdır. Bu tabletler ya kalıbın içinde yolluk sisteminde ya da döküm havuzuna belirli ölçülerde yerleştirilir. En iyi performans aşılama ilavesi ağırlığının %0,015–0,15 civarında kullanıldığı durumlarda elde edilmiştir. Çizelge 3.7'te uygun ilave ölçüleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.7 Kalıpta aşılama için kullanılan tablet ölçüleri(Elkem, 2001).

İlave (Tablet)	L	W	H	l	w
D2kg	164	74	76	134	42
D5kg	222	100	110	172	52
D10kg	266	130	132	220	80
D20kg	312	170	166	260	116

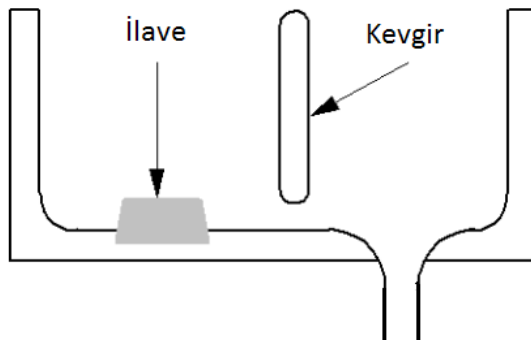
Şekil 3.21'de aşılama prosesinde kullanılacak tabletin ölçülerinin şematik gösterimi mevcuttur.



Şekil 3.21 Tablet ölçülerinin şematik gösterimi(Elkem, 2001).

3.5.2.3.1. Kalın Kesitli Dökme Demirler İçin Döküm Havuzuna Yerleştirilmiş İlave

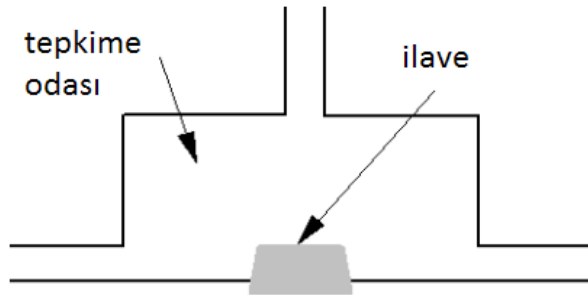
Orta ve büyük-ölçekli dökümlerde döküm havuzunda Al-Ca zengini aşılama tipleri ile aşılama yapılır. Döküm havuzu ergimiş metalin toplam kapasitesinden en az %20'si kadar olmalıdır ayrıca hızlı döküm esnasında türbülans ve sıçramalardan kaçınmak için mutlaka her zaman tam dolu olacak şekilde dökülmelidir. Başarılı bir kalıpta aşılama yapabilmek için döküm havuzunun boyutu da oldukça önemlidir. Büyük dökümler dökülürken birkaç tane ilave tabletlerin farklı kombinasyonları da uygulanabilir.



Şekil 3.22 Döküm havuzuna yerleştirilen tabletin şematik gösterimi(Elkem, 2001).

3.5.2.3.2. Kalın Kesitli Dökme Demirler İçin Yolluk Sistemine Yerleştirilmiş İlave

Yolluk sistemlerine yerleştirilen tabletler orta-ölçekli dökümler içindir. Tabletler düşey yolluk sisteminde bulunan yolluğun altındaki tepkime odasına yerleştirilir. Döküm delikleri dikdörtgen iken; tabletlerin tasarımı ikiz-kenar yamuk(trapezoidal) şeklindedir. Birinci döküm deliği ile tepkime odası arasındaki mesafe en az 120 mm olmalıdır. Tepkime odasının boyutları yükseklik için bu tabletlerin 1,5 katıyla çarpılıp, diğer ölçüleri de 2 katı ile çarpılarak hesaplanmalıdır. Şekil 3.23'te aşılama olarak kullanılacak tabletin yolluk sistemde kullanım şeklinin şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 3.23 Yolluk sistemine yerleştirilen tabletin şematik gösterimi(Elkem, 2001).

Şekil 3.24'te aşılama esnasında kullanılan tabletlerin döküm havuzundaki yerleşimi gösterilmektedir.



Şekil 3.24 Döküm havuzundaki değişik tiplerde tabletlerin uygulamaları(Uebrick, 2010).

Çözünme Zamanı: dökme demirin sıcaklığı tarafından etki edilen döküm sıcaklığı ile yönetilen tabletler çözünmek için özellikli ve çok özel zamana ihtiyaç duyarlar. Örnek olarak; D2kg için çözünme zamanı 1370 ± 40 °C gibi bir sıcaklıkta 40 s olacaktır(Elkem, 2001).

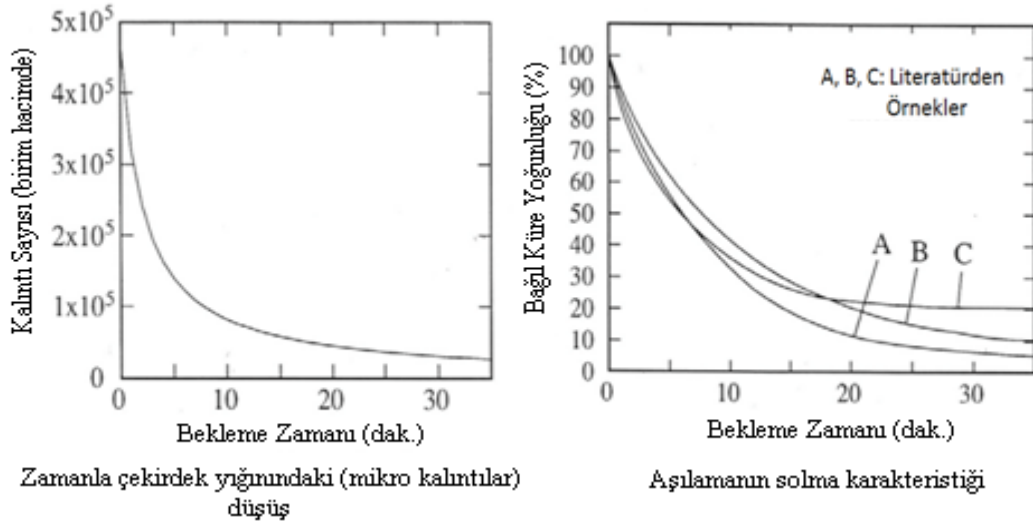
3.5.3. Kalın Kesitli Dökme Demirlerle Aşılama Küreselliğin Solması

Dökme demirler için aşılama katılaşma esnasında grafit büyümesi için uygun çekirdekleşme bölgelerinin sayısını bariz şekilde oluşturarak kendi etkilerini kendileri üretirler. Böylece küresel grafitli dökme demirlerin grafit kürelerinin sayısındaki artış bariz bir şekilde ortaya çıkar. Grafit kürelerindeki artış aşırı soğumada bir düşüşe neden olur böylece demir karbürlerin oluşum riski ve hızlı soğutulmuş kesitlerde “soğutucu(çil)” etkisini asgariye indirilmiş olur. Aşılama katılaşma etkileri ilave edildikten sonra anında azami seviyeye çıkar ve zamanla solarlar.

Solma oranının bağlı olduğu durumlar;

- Aşılama katılaşma bileşimi • Demir çeşidi • Sıcaklık • Yüzey enerjileri • Yayınım oranları

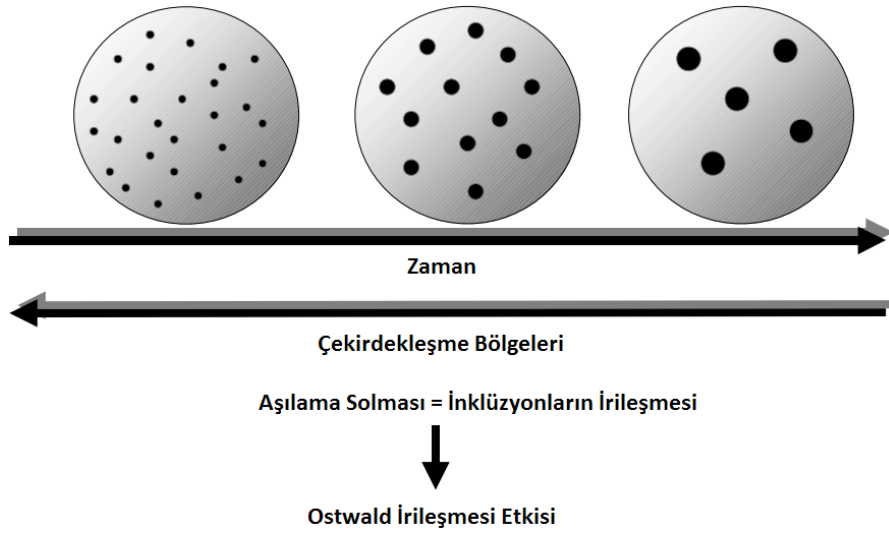
Aşılama katılaşma ilavesinden sonraki ilk 5 dakika içerisinde aşılama katılaşma katılaşma katılaşma çoğu etkisinin kaybolması ile solma hızlı bir şekilde oluşabilir. Aşılama katılaşma katılaşma potansiyel çekirdekleşme bölgelerinin toplam sayısının düşmesi ile çekirdek yığınının yeniden çözülmesi ve birleşmesi ile açıklanabilir(örn, çekirdek parçacıklarının irileşmesi veya büyümesi). Bu davranış aşağıdaki resimlerde gösterildiği gibi solmanın deneysel gözlemleri ile yakın ilişkilidir. Şekil 3.25’te aşılama katılaşma katılaşma beklenen zamanı, inklüzyon sayısı ve yoğunluğu ile ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.25 Aşılama solmasının bekleme zamanı, kalıntı sayısı ve yoğunluğu ile ilişkisi(Elkem, 2001).

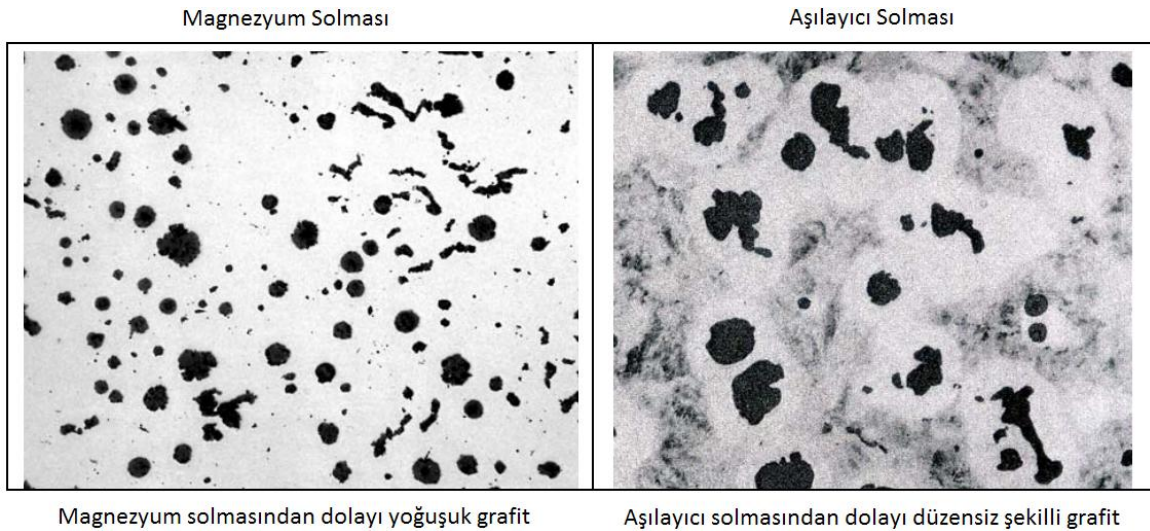
Ötektik katılma esnasında aşırı soğumanın oluşması solmaya neden olur böylece gri ve küresel grafitli dökümlerde “soğutucu(çil)” eğilimini artırır. Solma yapıdaki grafit küreleri ve ötektik hücrelerin sayısını düşürür ve grafit oluşumunda bozulmalara sebep olur. Birçok solma küresel grafitli dökme demirde belirgin miktarlarda küresel olmayan grafitin ve dökme demirde ferrit dokusu ile ilişkili aşırı soğutulmuş grafit oluşumunu teşvik edebilir. Ancak bu grafitler ferritik dokulu küresel grafitli dökme demirler için uygun olan grafit tipleri değildir.

Sıvı metal bekletilmesi esnasında aşılama etkisinin basamaklı kaybı dökümcüler tarafından çok iyi bilinir ve eğer ergiyik metal dökümden önce uzun sürelerde bekletilirse bu aşılama solması en nihayetinde karbür oluşumunu ve düşük grafit yapıları ile sonuçlanır. Solma kaybının sonucu “Ostwald İrileşme Etkisi” diye bilinen mikro-inklüzyonların gelişimi ve irileşmesidir. İrileşmenin öncü kuvveti inklüzyon özellikli yüzey alanlarındaki düşüştür bundan dolayı da sistemin toplam enerjisi düşer. Yüksek parçacıklı faz kararlılığına bağlı olarak metalik olmayan inklüzyonların hacimsel oranı değiştirilmemiş halde geri kalacaktır(Davis, 1996). Mikro-parçacıkların arası kısa olduğunda aşılama sonrası solma etkisi çok hızlıdır ve artakalan magnezyumun solma kayıplarından demir kalitesi çok katı ve sert olur. Şekil 3.26’te iri tanecikleşme tarafından meydana getirilen aşılama solma etkisini ve bu zaman esnasında potansiyel çekirdekleşme bölgelerinin yoğunluğundaki azalmayı gösterir. Aşılamanın solma oranı tepkinirliği yüksek elementlerin sıvı metale doğru yayılım oranıyla doğrudan ilişkilidir(Olsen vd, 2004).



Şekil 3.26 Potansiyel çekirdeklenme bölgelerinin sayısındaki düşüş sebebiyle irileşme fenomeni olarak tanımlanan aşılama solması(Olsen vd, 2004).

Geç aşılama yapıldıktan sonra ergiyük uzun süre bekletilirse aşılama etkileri dereceli olarak solacaktır. Aşılama çeşidine ve ilave oranına bağlı olarak küresel grafitli dökme demirin küre sayısı ve küreleri, küresel şekillerini dereceli olarak kaybedeceklerdir. Tipik olarak düzensiz şekillenmiş küreler, küre sayısındaki genel düşüşün bir sonucudur. Sağ tarafta verilen örnekte olduğu gibi. Düşük küreselleşme durumları bulunduğu kalifiye dökümcünün bu iki çeşidi birbirinden düzgün ve doğru bir şekilde ayırt etmesi çok önemlidir. Düşük küreselliğin iki çeşidi de yani magnezyum ve aşılama için çareler bazı aşamaları tersine çevirerek aşılabılır. Şekil 3.27'deki içyapılar magnezyum işlemi ve aşılama sonrası küresel grafitli dökme demir dokusunun her iki içyapıda da 2 farklı solma mekanizmasını göstermektedir.



Magnezyum solmasından dolayı yoğunluk grafit

Aşılama solmasından dolayı düzensiz şekilli grafit

Şekil 3.27 Magnezyum ve aşılama sonrası oluşan solmanın iki farklı dokudaki görünüşü(Elkem, 2001).

Aşılama solması ile ilgili saptamalar: Tüm aşılama ajanlarının etkisi zamanla solar. Aşılama sonrası solmanın meydana gelmediği hiçbir süreç veya işlem yoktur. Azami etkiyi elde edebilmek için metal aşılama sonrası hemen sonra mümkün olduğunca hızlı dökülmelidir ve en yüksek aşılama verimi dökümün akışına yapılandır. Bazı aşılama ajanlarının etkileri diğerlerinden daha yavaştır bu da diğerlerinin kimyasal bileşimine ve kullanılma koşullarına bağlıdır. En yüksek ötektik hücre sayısını veren aşılama mutlaka soğutucu etkisini en etkin şekilde düşüren aşılama olacak denemez. Bazı ayarlanmış koşullarda dahi kimyasal bileşiminden aşılama solma karakteristiğini öngörmek mümkün olmayabilir. Böylece dökümhaneler kendileri için faydalı ve en uygun aşılama ajanına karar vermek için denemeler yapmalıdır. Bu deneyler metal sıcaklığı, aşılama depolanması gibi faktörlerin yanlış ya da sahte etkilerinden kaçınmak için dikkatlice denetlenerek yapılmalıdır(Elkem, 2001).

Geç aşılama yapıldıktan sonra ergiyik uzun süre bekletilirse aşılama ajanının etkileri dereceli olarak solacaktır. Aşılama çeşidine ve ilave oranına bağlı olarak küresel grafitli dökme demirin küre sayısı ve küreleri, küresel şekillerini dereceli olarak kaybedeceklerdir. Tipik olarak düzensiz şekillenmiş küreler, küre sayısındaki genel düşüşün bir sonucudur. Sağ tarafta verilen örnekte olduğu gibi. Düşük küreselleşme durumları bulunduğu kalifiye dökümcünün bu iki çeşidi birbirinden düzgün ve doğru bir şekilde ayırt etmesi çok önemlidir. Düşük küreselliğin iki çeşidi de yani magnezyum ve aşılama solmaları için çareler bazı aşamaları tersine çevirerek aşılabilir.

Aşılama solması düzensiz şekillenmiş grafit ve düşük küre sayısına sebep olur, aşağıdaki yöntemlerle çözülebilir; Solmaya dayanıklı daha güçlü geç aşılama kullanın veya daha fazla aşılama ilave edin. Yüksek bekleme sıcaklıkları ve yüksek bekleme zamanlarından kaçının. Daha sonra ilaveten ikincil, güçlü, özellikli bir geç aşılama malzemesi kullanın. Bazen düzensiz şekilli küreler ve düşük küre sayıları aşırı magnezyum ve küreleştirici ilavesinden kaynaklanır. Örn. düşürülmüş Mg ilavesi küreselliği artırabilir.

Uzatmalı zamanlar kullanarak küresel grafitli dökme demirin doğru şekilde aşılansa veya işlense dahi grafitin küre şekillerinde bozulmaların oluşması olağan bir durumdur. Buna genel olarak “küreselliğin solması” denmektedir. Küreselliğin solması bir iki fenomenle ilişkilidir bunlar magnezyum solması ve aşılama solmasıdır. Burada önemli olan solmanın çeşidini doğru saptamaktır, zamanla oluşan düşük küresellikten kaçınmak için çare olarak bu iki fenomeni mükemmel şekilde ayırt etmek gerekir. Aşağıdaki içyapılar magnezyum işlemi ve

geç aşılama sonrası küresel grafitli dökme demir dokusunu her iki içyapıda 2 farklı solma mekanizmasını göstermektedir(Olsen vd, 2004).

Aşılama solması düzensiz şekillenmiş grafit ve düşük küre sayısına sebep olur, aşağıdaki yöntemlerle çözülebilir; Solmaya dayanıklı daha güçlü geç aşılama kullanın veya daha fazla aşılama ilave edin. Yüksek bekleme sıcaklıkları ve yüksek bekleme zamanlarından kaçınınız. Daha sonra ilaveten ikincil, güçlü, özellikli bir geç aşılama malzemesi kullanın. Bazen düzensiz şekilli küreler ve düşük küre sayıları aşırı magnezyum ve küreleştirici ilavesinden kaynaklanır. Örn. düşürülmüş Mg ilavesi küreselliği arttırabilir.

Magnezyum Solması İle İlgili Saptamalar: Sıvı metal etrafında magnezyumun etkisinin kaybolduğu durumlarda(örn. cüruf, refrakter, buharlaşma) küreselleştirmenin gücünün zamanla kaybolması olağandır. Bu da demir içerisinde tipik artakalan magnezyum bileşiminin kaybolması ile ilişkilidir veya artakalan magnezyumun etrafındaki oksijen ya da kükürdün magnezyumu toparlaması ile dereceli tüketiminin neden olduğu bir sonuçtur. Artakalan magnezyum yetersiz olduğu durumlarda düşük küreleşmeden mütevellit yoğunlaşmış(compact) grafit ya da solucansı(vermiküler) grafit oluşacaktır. Şekil 3.27’de bulunan sol taraftaki içyapıda gösterilen örnek gibi(Elkem, 2001).

Magnezyum solması yoğunlaşmış grafit şekillerine sebep olacaktır bu sorun bazı yöntemlerle çözülebilir. Artakalan magnezyum ve/veya nadir toprak elementleri ilavesini arttırmak, Yüksek metal sıcaklığından ve ergiyiği uzun bekletmekten kaçınılmalı, Temel demirdeki sülfür bileşimi düşük kükürt ihtiva eden şarj malzemeleri ile ilaveleri ile düşürülmeli, Demirin yeniden kükürtlenmesinden kaçınmak için yüzeyden cüruf sıyırma işlemi geliştirilmeli, Artakalan magnezyumun havadan oksitlenmesine neden olacak metal temasından kaçınılmalı, Mg kaybının önlemek için nadir toprak elementleri içeren geç aşılama yöntemi kullanınız.

3.6. Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirin Katılaşması, İçyapısı ve Özellikleri

Küresel grafitli dökme demirler katılaşma esnasında grafit kürelerinin oluşumuna neden olan karbon ile demir ve silisyumun birlikte kimyasal bileşimini oluşturduğu bir demir-karbon-silisyum alaşımıdır. Karbon bileşimi genellikle %3-4, silisyum %2-3 civarında olan ve yaklaşık 1165°C sıcaklıklarda ötektik katılaşma ortaya çıkarırlar. Döküm işlemi için en önemli basamaklar üretimin ve kalıba döküme kadar olan metalurjik işlemlerin hazırlığındaki düşük maliyettir. İstenilen özelliklerde ve yapıda sağlam döküm elde etmek için aşılama prosesi ve küreselleştirmenin doğru olması, doğru grafitleşme potansiyeli, ergiyiğin doğru koşullarda taşınması ve ergitilmesine bağlı olarak sıcaklık ve kimyasal bileşimi doğru şekilde

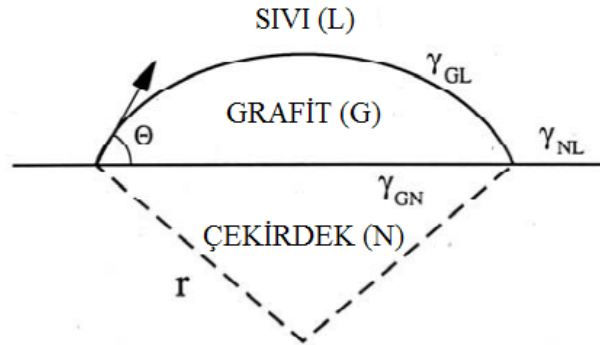
ayarlamak gerekir. Küresel grafitli dökme demir üretiminde en çok kullanılan küreleştirici element Mg'dur ve genellikle Ca, Si, NTE gibi elementleri ihtiva eden çoklu karışım şeklinde kullanılır. Bazı elementler tepkimenin şiddetini düşürür, grafit küreleşmesine yardımcı olur, grafit biçimlerinde impuritelere etkilerini etkisizleştirir ve dokuyu denetler. Küresel grafitli dökme demir küreleştiricisi için en çok kullanılan malzeme %45 Si, %3-12 Mg ve çeşitli seviyelerde NTE(Ca, Ce, La, vs.) içeren ferrosilis alaşımlarıdır. Aşılama, yetersiz soğumanın neden olduğu dökme demir özellikleri ve yapısının denetlemek ve katılaştırma esnasında grafit çekirdeklenme sayısını arttırmak için kullanılır.

3.6.1. Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirin Katılaştırması

3.6.1.1. Heterojen Çekirdeklenme Kuramı

Dökme demir metalurjisi için heterojen grafit çekirdeklenmesi önemli bir safhadır. Heterojen çekirdeklenmenin klasik modeli Şekil 3.28'de şematik olarak gösterilmiştir. Burada çekirdekten (N) gelişen grafit fazı (G) ve grafit fazının geometrik şekli olan kürenin yarıçapı(r) ile temas açısının(θ) bir bölümüdür. Grafit (G), çekirdek (N) ve sıvı (L) arasındaki arayüzey enerjileri γ_{GN} , γ_{GL} , γ_{NL} 'dir. Arayüzey enerjileri arasındaki ilişki aşağıda belirtilmiştir;

$$\gamma_{GL} \cos \theta + \gamma_{GN} = \gamma_{NL} \quad (3.2)$$



Şekil 3.28 Heterojen çekirdeklenmenin şematik gösterimi(Skaland, 2005).

Serbest enerjideki değişim, ΔG , grafit çekirdeğinin oluşumu aşağıdaki yapılanma ile verilmiştir; Şekil 3.28 Heterojen çekirdeklenmenin şematik gösterimi koherent ve semi koherent oluşumu gözlemlenmektedir. Grafitleşme potansiyeli olan bölgelerde bu tipte oluşan çekirdeklenmeler sonucu grafit çekirdeklenmesi oluşmaktadır.

$$\Delta G = -V_G \Delta G_V + A_{GL} \gamma_{GL} + A_{GN} \gamma_{GN} - A_{GN} \gamma_{NL} = f(\theta) \left(-\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_V + 4 \pi r^3 \gamma_{GL} \right) \quad (3.3)$$

V_G katı grafitin hacmi, ΔG_V grafit oluşumu için serbest enerji, A_{GL} ve A_{GN} sırasıyla grafit-sıvı arayüzey alanı ve grafit çekirdek ara yüzey alanı ve $f(\theta)$ şekil faktörüdür;

$$f(\theta) = \frac{(2 + \cos \theta)(1 - \cos \theta)^2}{4} \quad (3.3)$$

Kararlı çekirdeğin kritik yarıçapı, r^* , eşitlik 2'de r kullanılıp 0'a eşitleyerek;

$$r^* = -\frac{2\gamma_{GL} \sin \theta}{\Delta G_V} \quad (3.4)$$

Kritik serbest enerjiye karşılık gelen değer ise;

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\gamma_{GL}^3}{3\Delta G_V^2} f(\theta) = \frac{C_1}{(\Delta T)^2} f(\theta) \quad (3.5)$$

ΔT soğuma altı sıcaklık, C_1 is etki atındaki sistemin kinetik sabitesi.

$\theta = 0$ olduğunda grafit çekirdeği çekirdek için hiç enerji bariyeri olmadığı durumlarda tamamıyla çözünen maddeyi ıslatacaktır. Çekirdekleşme oranı \dot{N} (birim zaman ve hacimde oluşan grafit çekirdeklerinin sayısı) ΔG^* aşağıdaki eşitliğe göre doğrudan ilişkilidir.

$$\dot{N} = vN_V \exp \left[-\frac{(\Delta G_D + \Delta G^*)}{kT} \right] \quad (3.6)$$

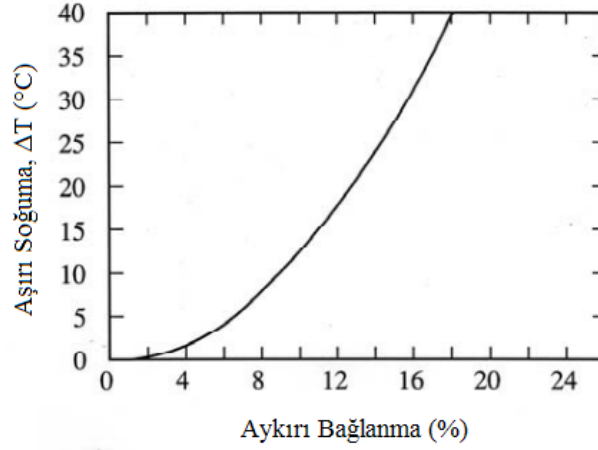
v sıklık etken, N_V birim hacimdeki heterojen çekirdek bölgelerinin toplam sayısı ve ΔG_D çekirdeğin arayüzeyine karşı yayınan atomları için aktivasyon enerjisi. Sıvıda ΔG^* ile kıyaslandığında ΔG_D ihmal edilebilir olduğunda grafitin çekirdekleşme oranı ΔG^* 'ye bakarak karar verilir. ΔG^* (veya ΔT) değeri çözünen madde ile çekirdekleşen katı arasındaki kristal aykırılık bağlanmaya bağlıdır.

Aykırılık bağlanma $\delta = (\Delta a_0/a_0)$ olarak tanımlanabilir. Δa_0 çözünen maddenin kafes parametresi ile düşük düzlem indeksi için katılaştıran katı arasındaki fark ve a_0 çekirdekleşmiş faz için kafes parametresidir. Yüzeysel kafes aykırılık bağlanmayı temsil eden ana etken aşağıdakilerle hesaplanabilir.

$$\delta(\%) = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3}{3} \times 100 \quad (3.7)$$

δ_1 , δ_2 ve δ_3 çözünen madde ve çekirdekleşen katının düzlemlerinin 90° lik en düşük indeksli düzlemlerini içeren aykırılık bağlanmaları olarak hesaplanmıştır. Uygulamada düzlemsel kafes aykırılık bağlanmasının değerinin artması ile aşırı soğuma ΔT 'de parabolik olarak artar (Şekil 3.29). Küresel grafitli dökme demirin katılaşması sırasında soğuma altı değerleri $2-10^\circ\text{C}$

(kesit kalınlığına göre değişir) çeşitlilik gösterir. Şekil 3.29'daki grafit ile aşılıyıcı arasındaki düzlemsel kafes aykırı bağlanması %3-10 aralığında olur. Bazı düşük değerler koherent/yarı koherent arayüzey karakteristikleri olarak gözlemlenir.



Şekil 3.29 Karakteristik aşırı soğuma-düzlemsel kafes aykırı bağlanımı grafiği(Skaland, 2005)

Bazı bilim adamları dökme demirlerdeki grafit oluşumunu homojen çekirdekleşmenin bir sonucu olabileceğini düşünmektedirler. Turnball'a göre artan aşırı soğuma sıcaklığı ΔT homojen çekirdeğe ihtiyaç duyar. Homojen çekirdekleşme meydana gelmeden önce gerekli aşırı soğuma büyüklüğü ergime sıcaklığının %20'si civarında olduğu bulunmuştur. Bu demek oluyor küresel grafitli dökme demirlerde gerekli grafit çekirdeklenmesi için aşırı soğuma sıcaklığı fazladan 250°C olabilir. Bu nedenle homojen çekirdek oluşumuna birçok eriyik işleminin katılmasında nadiren karşılaşılr. Eğer dökme demirde homojen çekirdekleşme meydana gelirse bu ancak aşırı soğuma sıcaklıklarında kararlı demir-karbür denge sıcaklıklarının altında oluşabilir böylece tamamıyla karbürlü yapı elde edilir.

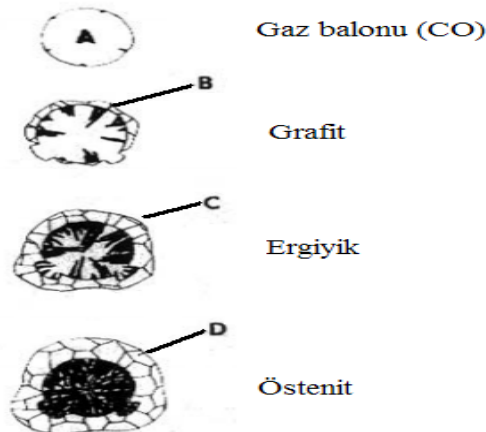
Geleneksel küresel grafitli dökme demir üretiminde işlem görmüş ergiyikte (oksidi ve sülfürü giderilmiş) mutlaka metal hacmine doğru yayılan heterojenlik olan bir dizi metalik olmayan inklüzyonların varlığı olacaktır. Yukarıda tanımlandığı gibi heterojen çekirdek bölgeleri aşırı soğuma sıcaklığının biraz altındaki derecelerde grafit çekirdekleri için en uygun ve en iyi düzlemsel kafes yapısına sahiptirler. Heterojenlikler, kristal olmayan heterojenlikler(amorf) gibi grafitte uygun bir kristalografiye sahip değildir. Bunlar heterojenlik ile grafit arasında en kötü uyumsuzluk sahiptir ve aşırı soğuma sıcaklıkları için 30 ile 50 derece arasında meydana gelir(Skaland, 2005).

3.6.1.2. Grafit Çekirdekleşme Mekanizmaları İçin Kuramlar

Geleneksel olarak dökme demir aşıl原因ıcıları ferrosilis, grafit veya kalsiyum silikatlardır. Saf Si ve ferrosilis aşıl原因ıcı olarak etkisiz olduğu durumlarda çekirdekleşme potansiyelleri alaşımdaki ikincil elementler olan Ca, Al, Zr, Ba, Sr, Ti gibi elementlerin varlığına bağlıdır. Dökme demir katılaşmasında grafitin heterojen çekirdekleşme fenomenini literatürde açıklanan birçok kuram bulunmaktadır.

3.6.1.2.1. Gaz Balonu Kuramı

Karsay'a göre grafit herhangi bir yüzeyde veya çatlakta, pinhollerde, inklüzyonlarda gibi düzensizliklerde kristalleşme eğilimindedir. Gaz balonu kuramı grafit kristallerinin bazı faz duvarlarıyla korunursa oluşabileceğini belirtir. Gerekli faz duvarları ergiyikteki CO(karbon monoksit) balonlarının varlığı ile sağlanır. CO balonları ergiyikte çok iyi bir şekilde dağılır ve boyutları 10 μm 'den küçük olabilir. Şekil 3.30'da Karsay'ın gaz balonu teorisi gösterilmektedir. Karsay'ın gaz balonu teorisi CO balonlarının varlığı esasına dayanır. Ancak sınaî küresel grafitli dökme demir ergitmesi Mg, NTE, Ca gibi güçlü oksit gidericiler(deoxidizers) çözülmüş şekildeki oksijeni veya CO gazlarını etkisizleştirmek ve ergitme işlemini sabitleştirmek için ilave edilirler. H, N, CO gibi çeşitli gazlar küresel grafitli dökme demir parçalarında bulunurlar ve yapıda boşluk oluşturarak hatalara sebep olurlar. Bunlar genellikle iç kısmında grafit bulunacak şekilde astar olarak grafiti kaplarlar. Ancak bu alışılmadık durumdur ve tamamıyla oluşmuş bir grafit küresinin gaz balonunun hacminin tamamına kadar genişleyecektir bunun sebebi grafitin kabuğuna doğru karbonun yayınıdır. Normal şartlar altında katı grafitte doğru C yayını için bir itici güç olmamalıdır. Kademeli katılaşmış ve su verilmiş dökme demirlerde parça parça gaz balonları oluşur. Bu balonlar olağan şartlarda küresel grafitli dökme demirin yapısında hiçbir durumda oluşamazlar.



Şekil 3.30 Karsay'ın gaz balonu kuramı(Skaland, 2005).

3.6.1.2.2. Grafit Kuramı

Heterojen çekirdekleşme için önceki kuramlar ergiyikteki grafit çekirdekleşmesi kristal doğrultusu ana yapı ile aynı olan(epitaksiyel) diğer grafit parçalarından meydana geldiği varsayımında dayanmaktadır. Eash bu fikirleri geliştirerek Si ihtiva eden aşılama ürünlerinin etkinliklerini öngörerek çözünen parçacıkların etrafındaki Si-zengini bölgelerin oluşumuna bağlı olarak grafit çökmesinin arttırmak için karbonun çözünürlüğü uygun ve yeterli miktarlarda düşürür. Sonra da Feest ergiyikteki ferrosilin çözünme zamanının sadece an meselesi olduğunu kanıtladıktan sonra bu yaklaşımın doğru olmadığını ve grafitin çözünen parça ile ergiyik arasındaki arayüzeyde oluşmaya eğilimli olduğunu gösterdi. Böylece Eash'in modelini değiştirerek ötektik sıcaklıktan aşağıya doğru kristal hâbeleri ergiyikte muhafaza edileceğini öngörüp, Sr ve Ba'u belirli miktarlarda bulundurup grafitin yeniden çözünmesini sağlamıştır.

Grafit teorisinin bir zayıf noktası vardır. Varsayılan küçük kristal grafit parçalarının uzun süreler için ergiyikte muhafaza edilir ve ergiyikte grafitin karbonlaştırıcı şekli ile düzgün bir şekilde bağdaşmaz. Grafit karbonlaştırıcısı milimetreler mertebesinde eklenir ve birkaç saniye ile birkaç dakika arasında çözünürler. Katılaştıran ergiyikte grafit ihtiva eden çekirdekleşme bölgeleri mikron boyutlarında olabilir ve dolayısıyla çözünme zamanları da çok kısa olabilir. Grafitin kendi çekirdekleşme bölgeleri hiç şüphe yok ki kendisi için en idealidir. Fakat sıvılaşma sıcaklığının üzerindeki mikron seviyesindeki grafit parçacıklarının termodinamik kararlılığı ile karmaşa yaşayabilirler ve aşılamanın solma zamanında kendi çözünme karakteristiği ile ters düşüp, direnebilir.

3.6.1.2.3. Silisyum Karbür Kuramı

Ergiyikte ferrosilisin çözünmesinin ardından Wang ve Fredriksson silisyum karbür kristalleri ve grafit parçalarının ergiyikteki çözünmüş ferrosilis parçalarına yakın yerlerde oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca bu geçici parçaların aşılama işleminden sonra yeniden çözünmeye hazır olduklarını da gözlemlemişlerdir. Oksit veya sülfat parçaları bulunmamıştır. Onların deneysel edinimlerine dayanarak bir kuram gelişti ve hesaplamalar grafitin çekirdekleşmesine ve solma mekanizmasına bağlı olarak yapıldı. Wang ve Fredriksson'un modelinde dikkat çekici bir varsayım C ve Si'in homojen olmayan bir dağılımda(yerel aşırı doygun) oluşu akabinde de SiC çözünmesi grafitin eşdağılımlı çekirdekleşmesi için gerekli itici gücü oluşturmuştur. Böylece solma etkisi yayılım ve taşınım aracılığıyla Si ve C ile alakalı ergiyiğin homojenleştirilmesi olarak tanımlanmıştır.

Grafit çekirdeklenmesi için SiC kuramının da bir zayıflığı vardır. FeSi aşılama süreçlerinde Ba, Sr ve Ca gibi kritik rol içeren elementler bu kuram ile açıklanamayabilir. SiC kuramının bir diğer zayıflığı C ve Si'in sınırlı yayılım ve iletim nedeniyle eş dağılımlı olmayan dağılımı (yerel aşırı doygunluk) varsayımıdır. Si ve C ergiyikte çok yüksek yayıma sahip olduğu hatırlanmalıdır ve sıcak metaldeki ısı taşınımı büyük bir oranda gerçekleşir. Ergiyikteki çözülmüş SiC parçacıkları, katılmanın içinde ve ergiyik prosesi boyunca Si ve C'nun yerel aşırı doygunluklarını muhafaza edemeyecektir.

3.6.1.2.4. Sülfat/Oksit Kuramı

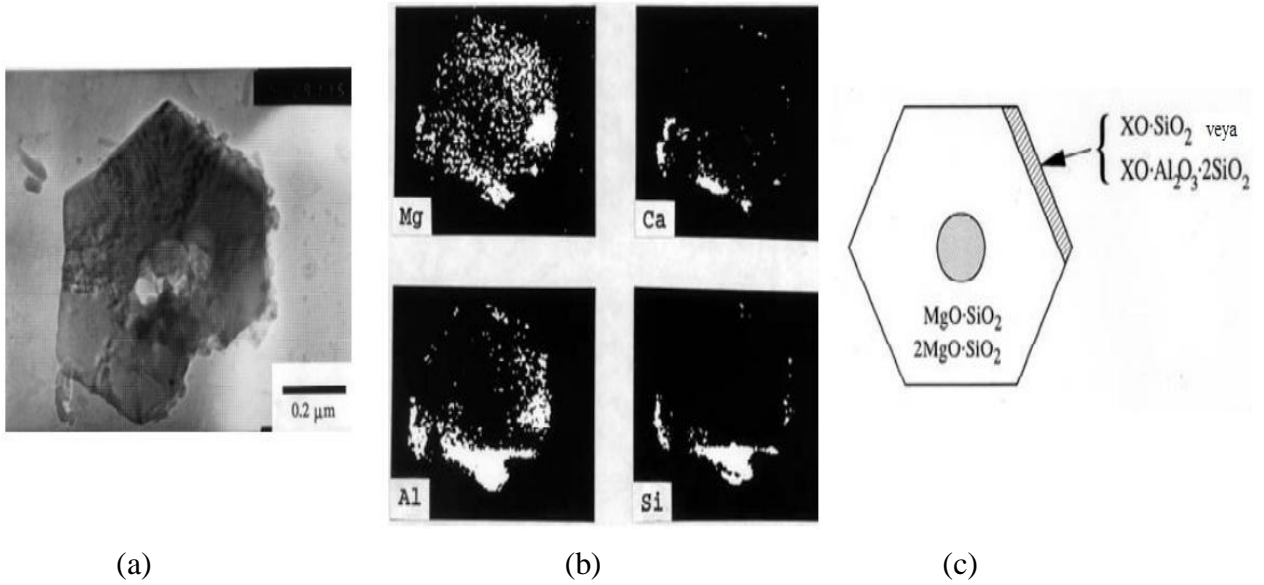
Birçok araştırmacı grafit çekirdeklenmesinin aşılama sonrası oluşan nitrat, oksit ve sülfat parçalarında meydana geldiğini iddia etmişlerdir. Lalich ve Hitchings metalik olmayan inklüzyonların önemini bir gösteri hipotezi ile onayladı (Lalich and Hitchings, 1976). FeSiMg alaşımı ile işleme tabi tutulan küresel grafitli dökme demirde grafit küreleri için magnezyum kalsiyum sülfat bileşimlerinin çekirdeklenme bölgeleri olarak davrandıklarını buldular. Küresel grafitli dökme demirde kürelerin çokluğu metalik olmayan inklüzyonlarla alakalı olduğu sonucuna varmışlardır ve bazı durumlarda bu grafit gelişimi bu inklüzyonların dağılımı ve şekli ile ilişkilidir.

Dökme demirden elde edilen grafit kürelerindeki inklüzyonlar katalizör parçacıklarını tanımlamak için birçok teknikle araştırılmıştır. Bu teknikler elektron difraksiyon desen analizi ile X-ışını mikro analizlerini içermektedir. Jacobs tarafından yapılan araştırmalarda çekirdeğin doğasını tanımlamak ve FeSiMg ile işleme tabi tutulmuş ergiyiğin kimyasal bileşimi ile kristal yapısındaki olası değişiklikleri saptamak için yapılmıştır. Akabinde yapılan aşılama işlemi de ticari Sr-FeSi alaşımının kullanımını içermektedir. Farklı uygulamalarda inklüzyon karakteristiklerinde Al ve Sr gibi elementlerin etkilerini temizlemek için uygulanır. Oksit kabuğu tarafından çevrelenmiş sülfat çekirdeğinden oluşan çift katmanlı çözünen madde yapısının apaçık şekilde ortaya çıkartan muayeneler göstermiştir ki; bu sonuçlar dökme demirler için genel olarak ilginçtir. Çekirdekte (Ca, Mg) ve (Sr, Ca, Mg) sülfatları ile kabukta (Mg, Al, Si, Ti) oksitlerinden oluşan farklı fazlar bulunmuştur. Dahası Jacobs bu küre merkezlerinde saptanan elementlerin oluşturduğu demir dokusuna yataklanmış tipik boyutları 1 µm civarında olan inklüzyon parçaları gözlemlemiştir (Skaland, 2005).

3.6.1.2.5. Silikat Kuramı

Küresel grafitli dökme demirde bir aşılama mekanizmasının araştırmasında Skaland inklüzyonlarda grafitin heterojen çekirdeklenmesinin bakış açısında önemli bir vurgu

yapmıştır. Küresel grafitli dökme demir de inklüzyonların çokluğu Mg işleminin birincil ve ikincil üretimi ile ilgili olduğunu göstermiştir. (Örn. MgS, CaS, $MgO \cdot SiO_2$ ve $MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ gibi). Ferrosilis ihtiva eden aşılama (Ca, Sr, Ba, Al) sonrası (X= Ca, Sr, Ba simgeleri) $XO \cdot SiO_2$ veya $XO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ gibi hegzagonal silikat fazları oksit inklüzyonlarının yüzeyinde oluşurlar büyük olasılıkla da MgO ile değişmeli tepkime yaparlar. Bu fazların varlığı grafitte nazaran inklüzyonların çekirdekleşme potansiyelini iyileştirmektedir. Çözünen madde ile çekirdek arasındaki koherent/semi koherent düşük arayüzey enerjisinin gelişimine izin verdiğinden dolayı özellikle kristalin (001) temel düzlemi grafit çekirdekleşmesi için çok uygundur. Şekil 3.31.a'da küresel grafitli dökme demirin TEM(Geçirimli Elektron Mikroskobu) incelemesini göstermektedir. Şekil 3.31.b'deki inklüzyondaki Mg, Ca, Al ve Si dağılımının X-ışını ile eşlenmiş görüntülerini göstermektedir. Şekil 3.31.c'deki küresel grafitli dökme demirde grafit için heterojen çekirdekleşme bölgelerinin şematik sunumudur.



Şekil 3.31 (a) Küresel grafitli dökme demirde silikat çekirdeklerinin TEM muayenesi, (b) (Ca, Al) ihtiva eden ferrosilis aşılama işleminden sonra inklüzyonlardaki Mg, Ca, Al ve Si'in dağılımının STEM X-ışını görüntüleri, (c) Küresel grafitli dökme demirde heterojen çekirdekleşmenin şematik gösterimi(Skaland, 2005).

Ayrıca Skaland aşılama mekanizması içinde bir kuram üretmiştir. Bu kuram zamanla inklüzyonların irileşerek ergiyikteki grafit için katalizör parçalarının toplam sayısında düşüş olduğunu açıklar.

3.6.1.3. Metalik Olmayan İnküzyonların Doğası

Çeşitli bileşimlerde metalik olmayan inküzyonlar birçok araştırmacılar tarafından dökme demirin dokusunda ve grafitin kürelerinin merkezlerinde gözlemlenmiştir. Çizelge 3.8’de küresel grafitli dökme demirde saptanan fazlar ve farklı element birleşimlerinin özetini vermektedir. Periyodik tablo IIA grubu elementleri Mg, Ca, Sr ve Ba kuvvetli sülfatlaştırıcı ve oksitleştirici elementlerdir bundan dolayı küresel grafitli dökme demir üretiminde özellikle ilgilidirler ve ferro alaşımlar içerisine kasıtlı bir şekilde eklenirler.

3.6.1.3.1. Sülfatlar

IIA grubu elementlerinin saf sülfatları NaCl yapısı gibi tamamı yüzey merkezli kübik yapıdır ve yüksek ergime noktaları ile benzer kafes parametreleriyle tanımlanırlar. Dökme demir ergiyiğinde bu sülfatlar daha kararlıdır ve metalik olmayan bileşimlerdir. Böylece sülfatlar oksitlerin var olduğu durumlarda oluşur. Bu sonuç Jacobs’un inküzyonların çekirdeğini sülfatların, kabuk kısmı da oksit tabakası ile kapladığını savunduğu kuram ile yakın ilişkilidir. Birçok araştırmacı tarafından IIA grubu elementlerinin sülfatları, grafit kürelerinin çekirdeklerinde esaslı içerik olduğunu bulmuşlardır. Çizelge 3.9’da IIA grubu sülfatları için standart serbest enerjisi, ergime noktası, kristal yapıların bir özetini vermektedir. Birçok literatür kaynağına göre küresel grafitli dökme demirde grafit kürelerinin çekirdeğinde bu IIA grubu sülfatlarının bulunduğu dair hiçbir kuşku yoktur. Birtakım taramalı elektron mikroskobu(SEM) bulgusu grafit kürelerinin çekirdeğinde özellikle Mg ve S’in varlığını ortaya çıkarmıştır. Bundan dolayı MgS, CaS ve diğer sülfatların grafit için heterojen çekirdekleşme bölgelerinde önemli oranlarda beklemek uygun olacaktır. Dökme demire Mg ilavesi kükürt giderimine ve akabinde gelişen küresel grafit morfolojisine yardımcı olur. Çizelge 3.8’de MgS ve CaS, SrS, BaS gibi IIA grubu diğer sülfatlar çok benzeş kristal yapılara, kafes parametrelerine ve aynı kararlılığa sahiptirler.

Çizelge 3.8 IIA grubu sülfatlarının kristal yapısı, ergime sıcaklığı ve standart serbest enerjilerinin özeti(Skaland, 2005)

Fazlar	Kristal Sistem	Kafes Parametresi (Å)	Ergime Sıcaklığı (T _M , °C)	Serbest Enerji (ΔG _F *)
MgS	Kübik	5,191	2000	- 232
CaS	Kübik	5,696	2450	- 380
SrS	Kübik	6,020	2000	- 370
BaS	Kübik	6,386	2227	- 356

*) Oluşum için standart serbest enerji 1327 °C

3.6.1.3.2. Karbürler

CaC_2 , SrC_2 ve BaC_2 karbürleri NaCl yapısı tipinde ortaya çıkar ve aynı kafes parametresine sahiptir. Ergiyikte kararlı oldukları varsayılır fakat bu fazların ergiyikte ferrosilisten dolayı oluşup oluşmadığı gerçekte belirsizdir. Aslında sülfatlar ve oksitlerin zıttı olan bazı karbürler teorik bakış açısı ile karbürlerin çekirdekleşme bölgeleri için uygun olmalarına rağmen grafit için çekirdekleşme bölgelerinde deneysel olarak saptanmamıştır. İlginç bir ek bilgi olarak MgC_2 tarzında Mg'un hiç bir bileşimi yoktur. Bu da küresel grafitli dökme demir üretiminde Mg'un neden aşılایıcı değil de küreleştirici olarak kullanıldığını açıklayabilir. Çizelge 3.9'da IIA karbürleri için kristal yapıları, ergime noktalarını ve standart serbest enerjilerinin bir özetini verir.

Çizelge 3.9 IIA grubu karbürleri için kristal yapısı, ergime sıcaklığı ve standart serbest enerjilerinin özeti(Skaland, 2005)

Fazlar	Kristal Sistem	Kafes Parametresi (Å)	Ergime Noktası (T_M , °C)	Serbest Enerji (ΔG_F^*)
MgC_2	---	---	---	---
CaC_2	Kübik	5,86	2300	- 106
SrC_2	Kübik	6,24		- 93
BaC_2	Kübik	6,56		- 96

*) Oluşum için standart serbest enerji 1327 °C

3.6.1.3.3. Oksitler

IIA grubu elementleri ergiyikte kararlı oksitler oluştururlar böylece bu elementleri içeren küreleştiriciler ve aşılایıcılar etkin oksit giderici elementleri olarak bilinirler. Çizelge 3.11'de saf oksitler için kristal yapısı, ergime noktası ve standart serbest enerjileri verilmiştir. IIA grubu sülfatlar ile oksitler Mg ve diğer üç element Ca, Sr ve Ba arasındaki kararlılık ile kristal yapısında çok az farklılıklar gösterirler. Böylece diğer elementler aşılایıcı olarak etkin iken, tek başına saf oksitler küresel grafitli dökme demirde neden Mg'un tek başına küreleştirici olduğunu tam olarak açıklayamazlar.

Çizelge 3.10 IIA grubu oksitleri için kristal yapısı, ergime sıcaklığı ve standart serbest enerjilerinin özeti(Skaland, 2005).

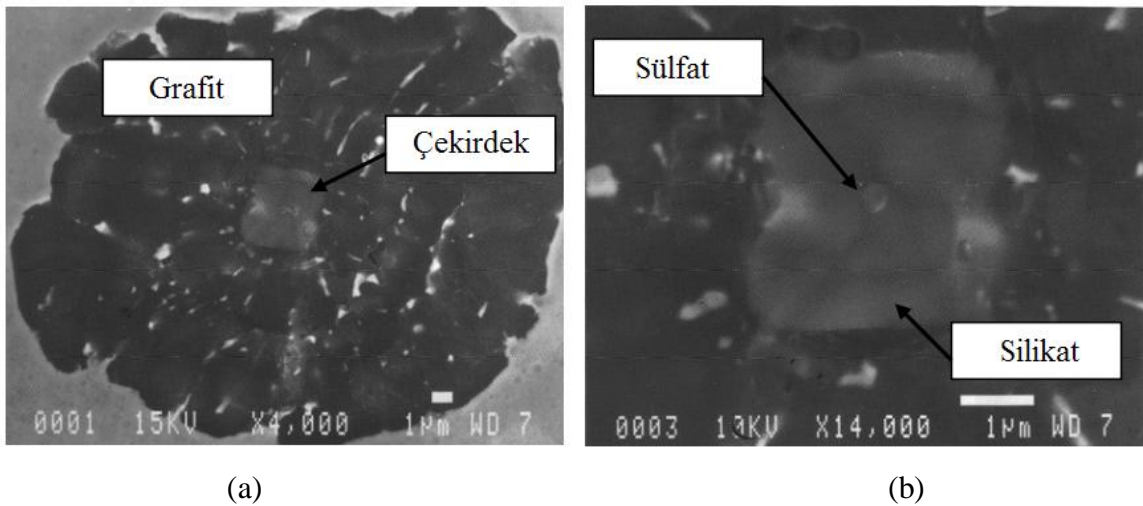
Fazlar	Kristal Sistem	Kafes Parametresi (Å)	Ergime Noktası (T_M , °C)	Serbest Enerji (ΔG_F^*)
MgO	Kübik	4,215	2832	- 401
CaO	Kübik	4,811	2927	- 466
SrO	Kübik	5,140	2665	- 428
BaO	Kübik	5,539	2013	- 395

*) Oluşum için standart serbest enerji 1327 °C

İştirakçi element olarak Mg, Ca, Sr veya Ba içeren çok karışık oksit inklüzyonlarının farklı çeşitleri mevcuttur. Bu elementler ferrosilis alaşımlar ile ilave edildiğinden bu yana XO–Al₂O₃–SiO₂ üçlü sisteminde oksit inklüzyonlarının irdeleme için elverişli temel oluşmuştur (X= Mg, Ca, Sr veya Ba). Bu açıdan özellikli ilgi MgO–Al₂O₃–SiO₂ ve CaO–Al₂O₃–SiO₂ üçlü sistemlerindedir. Uygulanan aşılama ve oksit gidermeye bağlı çeşitli farklı fazlar oluşabilir.

3.6.1.4. İnküzyonlarda Grafitin Çekirdeklenmesi

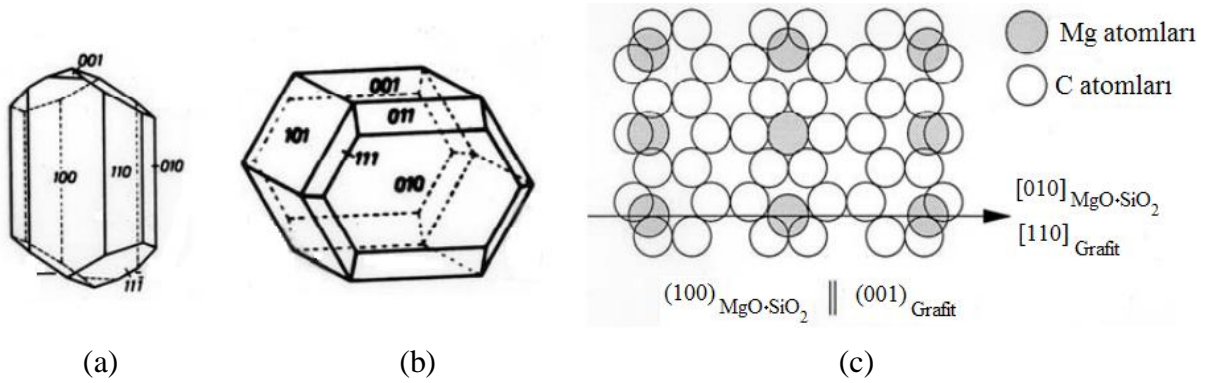
Küresel grafitli dökme demirde meydana gelen heterojen grafitin çekirdeklenmesi literatür ile aynı olduğu görülmüştür. Bileşimi, yüzey karakteristiği, kararlılığı gibi bu heterojenliklerin doğasına karar vermek asıl sorundur. Şekil 3.32'deki SEM içyapısında magnezyum sülfür çekirdekli ve karmaşık magnezyum silikat kabuğu içeren metalik olmayan inklüzyonlar ile grafitin ilişkisini göstermektedir. Küresel grafitli dökme demirin Mg işlemleri çekirdeklenen grafit kürelerinin sayısını arttırmada etkin olmadığından bu fazların bulunması grafit oluşumu için uygun bir kıstas olmadığına önemle dikkat edilmelidir. Aşılmalılar içinde ikincil elementlerin ilavesi ile inklüzyon yüzey kimyasının değişikliği her zaman yüksek küre yoğunluğunun başarılmasıyla elde edilir. Bu nedenle küresel grafitli dökme demirde içyapı tekâmülünün daha iyi anlaşılmasında anahtar niteliği küreleştirici ve aşılmalı arasındaki önemli farklılığın tanımlanması yatmaktadır.



Şekil 3.32 SEM görüntüleri karmaşık çift katmanlı magnezyum sülfat ve silikat inklüzyonlarında grafit çekirdeğini göstermektedir. (a) çekirdekteki çekirdekçik ile grafit küresi (b) çekirdeğin büyütülmüş görüntüsü(Skaland, 2005).

3.6.1.5. Magnezyum İşleminden Sonra Grafitin Çekirdeklenmesi

Oksitleri giderilmiş ana ayrışan maddeler olarak Mg işleminden sonra oluşan Enstatit($MgO \cdot SiO_2$) ve forsteritin($2MgO \cdot SiO_2$) olası kristal gelişim morfolojisi Şekil 3.33'de gösterilmiştir. Şekil 3.33'de (001) grafit düzlemi ile $MgO \cdot SiO_2$ 'in (100) düzlemi arasındaki arayüzeyde bulunan kafes yerleşiminin kabataslak görünümünü de içermektedir. Bu yönlendirme küresel grafitli dökme demirde grafitin olağan gelişim şekli olan inklüzyon yüzeyine dik esas düzleminin kutbundan boyunca grafit gelişimine uyumu ile alakalıdır. Ortorombik birim hücrede köşe atomlarının konumu tek başına düşünülerek (Şekil 3.33.c'de kabataslak görünümüne bakın) yönlendirme ilişkisinin geniş spektrum için grafit, enstatit ve forsterit arasındaki düzlemsel kafes uyumsuz yerleşimi hesaplanmıştır.



Şekil 3.33 Enstatit ($MgO \cdot SiO_2$) ve forsterit ($2MgO \cdot SiO_2$) grafitin çekirdeklenmesi. (a) $MgO \cdot SiO_2$ (enstatit), (b) $2MgO \cdot SiO_2$ (forsterit), (c) grafit/ $MgO \cdot SiO_2$ arayüzeyinde kafes diziliminin detayları(Skaland, 2005).

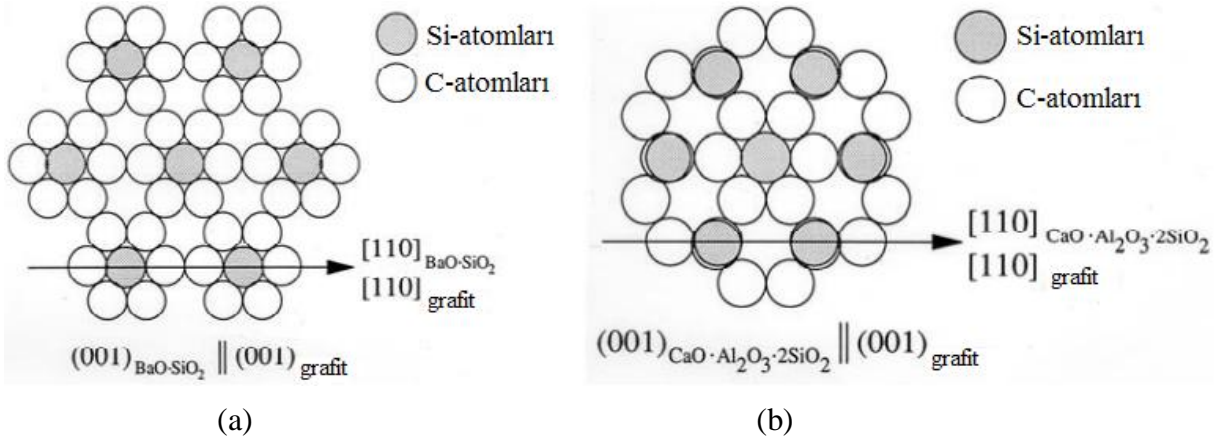
Grafit, $2MgO \cdot SiO_2$ veya $MgO \cdot SiO_2$ arasındaki küçük düzlemsel kafes aykırı bağlamasının elde edilmesindeki değişimler çok düşüktür. Buna bağlı olarak da heterojen çekirdeklenmeye karşı enerji bariyeri yüksektir. Bundan dolayı Mg işleminin birincil tepkimesinde üretilen bu fazlar katılma esnasında grafit için tercihli çekirdeklenme bölgeleri olarak hareket etmezler. Ayrıca bu yaklaşımda Mg işleminin genel olarak grafitin çekirdeklenmesinde etkinlik sağlamadığının göstergesidir.

Mg işlenmiş akabinde gerçekleştirilecek aşılama işleminin önemli altyapısını sağlamaktadır. Ergiyiğin her tarafına dağılmış nitratlar, silikatlar, oksitler ve küçük magnezyum sülfatlarının çok sayıda oluşumu heterojenliğin oluşumunu kolaylaştırmak ve çekirdeklenme bölgelerinin potansiyelinin artırımı beklenir. Hafif ve sakin Mg işlemi şiddetli ve tepkinirliği yüksek işleme göre aşılama işlemi için daha iyi koşullar sağlayacağı bilinmektedir. İşlem proses tepkinirliği işleminden sonra küçük dağılımlı çekirdeklenme bölgeleri mi olacağı yoksa büyük cüruf yığıntıları mı olacağını göstermektedir. Böylece Mg işlemi kendisi potansiyel

çekirdekleşme bölgeleri sağlamamasına rağmen yüksek sayıdaki potansiyel fazlar üreterek aşılama için çok önemli altyapı hazırlar.

3.4.1.6. Aşılama İşleminde Sonra Grafitin Çekirdekleşmesi

Ca, Sr ve Ba içeren ferrosilis aşılması esnasında $XO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ veya $XO \cdot SiO_2$ ($X = Ca, Sr$ veya Ba) tipi hegzagonal kristal yapıları silikat fazları Mg işlemindeki inklüzyonların yüzeyinde oluşabilir. Bilhassa (001) esas kristal düzlemi grafit çekirdekleşmesi için tercihli bölge olacaktır bundan dolayı bu kristal yapıları Şekil 3.34'de örneklediği gibi grafit ve çekirdek arasında düşük arayüzey enerjisi koherent/yarı koherent oluşumuna izin verir. Aslında aşılama işleminden sonra inklüzyonların yüzeyinde oluşabilen $XO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ve $XO \cdot SiO_2$ tipi hegzagonal silikat fazlarının neredeyse tamamı grafit için etkin katalizör substrat olurlar. Aşılama esnasında oluşabilen farklı silikatlar ile grafit arasındaki hesaplanan düzlemsel kafes aykırı bağlanmasının örneklerini vermektedir. Düşük kafes aykırı bağlanması neden dökme demir için ticari aşılama için Ca, Sr veya Ba ihtiva ettiğini açıklar.



Şekil 3.34 Çekirdek/sabstrat arayüzeyde kafes dizimlinin detaylarını göstermektedir. (a) koheren grafit/ $BaO \cdot SiO_2$ arayüzeyi (b) koheren grafit/ $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ arayüzeyi (Skaland, 2005)

3.6.1.7. Grafit Çekirdekleşmesinde Nadir Toprak Elementlerinin(NTE) Etkisi

Küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri ve içyapı üzerindeki Ce ve diğer nadir toprak elementlerin(NTE) etkileri geniş bir biçimde şimdiye kadar irdelenmiştir. Bu çalışmalar FeSiMg küreleştirici alaşımındaki NTE ilavesini içerir. Fakat Amin deneylerini Ce elementini ön alaşımlı FeSiMg'a ilave ederek, FeSiMg ile ayrı ekleyerek, aşılama ile ekleyerek ve hem FeSiMg hem de aşılama içerisinde ekleyerek yönetmiştir.

İlave edilmesine ve koşullarına bağlı olarak küresel grafitli dökme demirlerde mekanik özelliklerde ve içyapıda Ce ve La gibi nadir toprak elementleri hem yararlı hem de zararlı

etkilere sahiptirler. Örneğin NTE'in düşük miktarlarda ilavesi antimon(Sb), kurşun(Pb), Titanyum(Ti) gibi eser elementlerin zararlı etkilerini içeren küresel grafitli dökme demirde grafit küre sayısını ve küreselliği düzenlemek için kullanılır. Diğer bir açıdan da nadir toprak elementlerinin fazla miktarlarda kullanımı ince kesitli dökme demirlerde çil etkisi, kalın kesitli dökme demirlerde ise chunky grafit oluşumuna sebebiyet vererek mekanik özelliklerde düşüşe sebep olabilir.

NTE'nin en uygun seviyede ilavesi ile yüksek küre sayısı ve karbür oluşumuna meyli düşürücü etkiye sahiptir. Fakat en uygun nadir toprak elementi ilavesi değişim göstermektedir. Örneğin, Lalich düşük Ce için en uygun seviye %0,006-0,010 olarak belirleyip, yüksek seviye içinse %0,015-0,020 olarak belirlemiştir.

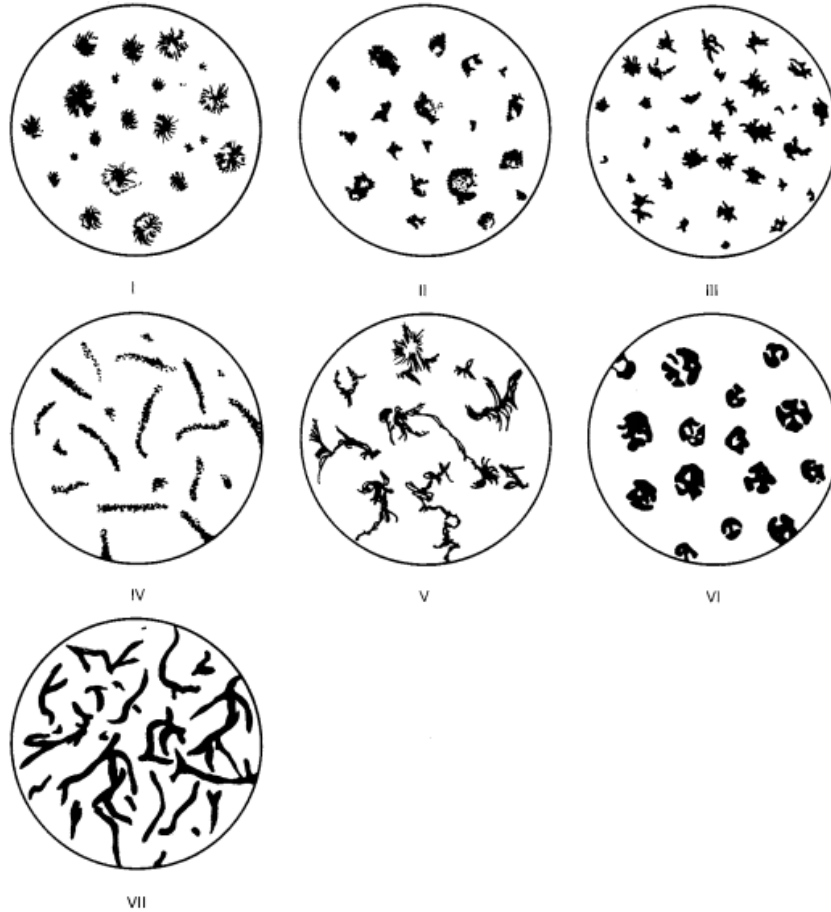
Kanetkar ise en yüksek küre sayısının %0,007-0,010 olarak belirleyip, parasedimiyum(Pr) %0,010, neodim(Nd) %0,017, lantan(La) %0,018, yitrum(Y) %0,02 ve seryum(Ce) %0,032 gibi nadir toprak elementleri için en uygun değerleri deneysel olarak saptamıştır. Onsøien ise en uygun Ce seviyesini %0,035 ve en uygun La seviyesini de en düşük kükürt oranlarına sahip küresel grafitli dökme demir de %0,017 civarında raporlamıştır.

Ayrıca kararlı nadir toprak element sülfatları ile NTE oksitleri oluşumu beklenir çünkü bu fazlar küresel grafitli dökme demirde heterojen çekirdekleşmede önemli rol oynarlar. Heterojen çekirdekleşmeyi teşvik edici substratın etkinliği çekirdekleşecek grafit ile substrat arasındaki aykırı kristalografik bağlanmaya bağlıdır. Uygulamada aşırı soğuma (ΔT) düzlemsel kafes aykırı bağlanmasının artışı ile artar. Küresel grafitli dökme demirde katılma esnasındaki aşırı soğuması çok düşük olduğunda grafit fazı ile çekirdek arasındaki kafes aykırı bağlanması da mutlaka düşük olmalıdır. Bu durum koherent/semi-koherent arayüzeyleri ile kıyaslanabilir. Farklı inklüzyonların(sülfatlar, oksitler, nitratlar ve silikatlar) çeşitliliği sıvı fazda oluşabilir. IIA grubu elementlerinin sülfatları ve oksitleri NaCl-yapısı şeklinde hepsi yüzey merkezli kübiktir ve benzeş kafes parametreleri ile yüksek ergime noktaları ile karakterize edilirler. Diğer üç element Ca, Sr ve Ba küreleştirme etkisi sağlarken, bu fazlar arasındaki benzerlik küresel grafitli dökme demirde grafit için magnezyumun(Mg) neden potansiyel küreleştirici olduğunu açıklamaz. Mg işleminden sonra ergiyikteki inklüzyonların geniş spektrumu enstatit ve forsterit tipi Mg silikatları içermektedir. Bu fazlar katılma esnasında grafit için potansiyel çekirdekleşme bölgeleri olarak davranmayacaklardır çünkü bu fazlar hegzagonal kristal yapıya sahip değildirler(ortorombiktirler) ve hegzagonal grafit ile aykırı kafes bağına sahiptirler. Ca, Sr veya Ba ihtiva eden ferrosilis aşılama

prosesinden sonra Mg işleminden meydana gelen inklüzyonların yüzeyinde $XO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ve $XO \cdot SiO_2$ tipi hegzagonal silikat fazları oluşabilir. Hegzagonal görünüm, çekirdekleştirici ile grafit arasındaki koherent/yarı-koherent düşük arayüzey enerjisinin oluşumu için izin verdiği için dolayısıyla birçok faz grafit çekirdekleşmesi için uygun olacaktır (Skaland, 2005).

3.6.2. Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirin Doku Özellikleri

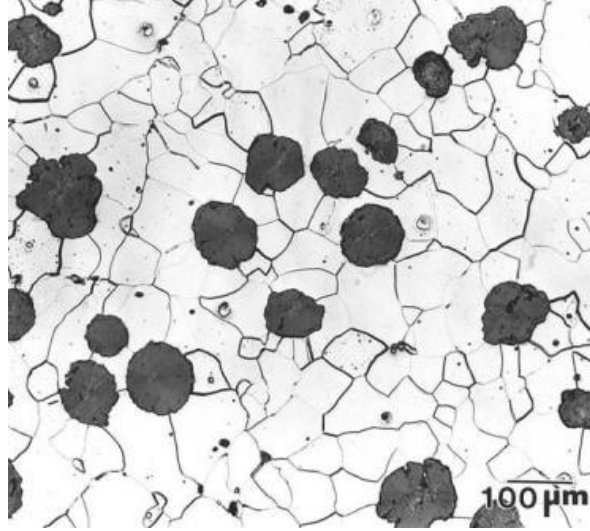
Küresel grafitli dökme demir adından da anlaşılacağı gibi küreler ya da yuvarlak şekilli grafitlerden oluşur. ASTM küresel grafitli dökme demirler ve diğerlerinin iç yapısında bulunan grafitlere göre sınıflandırma yapmıştır. Şekil 3.35'te bu sınıflandırmanın şematik gösterimi mevcuttur.



Şekil 3.35 ASTM A247'ye göre tipik grafit şekilleri. I; Küresel grafit, II; Bozulmuş küresel grafit, III; Temper(dövülebilir) grafit; IV; Yoğuşuk grafit, V; Yengeç şekilli grafit, VI; Patlamış grafit, VII; Lamel grafit (Bramfitt vd, 2001).

Küresel grafitli dökme demir Tip I grafiti içermelidir. Tip II grafiti bozulmuş küresel grafitli dökme demire bir örnektir ve mekanik özellikleri düşürücü bir etkiye sahiptir. Tip III temper dökme demiri, Tip IV yoğuşuk (compacted) grafiti ve Tip V kır dökme demirin lamel

grafitlerini simgelemektedir. Şekil 3.36’da ise ferritik dokulu küresel grafitli dökme demirin olası içyapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.36 Ferritik dokulu küresel grafitli dökme demirin içyapısında bulunan ferrit(açık bölgeler) ile grafit kürelerini(koyu renkli yuvarlak şekilli) 100X büyütme ile büyütülmüş ve %2 nital ile dağlanmış olası içyapıyı göstermektedir(Bramfitt vd, 2001).

3.6.3. Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirin Küreselliği

Başlangıçta da belirtildiği gibi küresellik (N) dökme demirlerin grafit şeklinin sınıflandırılmasında bir metottur. Japan Dökümcüler Birliği (JFS) metodunda küreler Tip I-V olmak üzere 5’e ayrılır. Tip IV ve V istenen küre şekilleridir(45).

N_{JFS} aşağıdaki formül ile hesaplama yapar;

$$N'_{JFS} = \frac{(0 + N_I + 0,3N_{II} + 0,7N_{III} + 0,9N_{IV} + N_V) \cdot 100}{(N_I + N_{II} + N_{III} + N_{IV} + N_V)} \quad (3.8)$$

Buradaki N_i , Tip i kürelerinin sayısıdır.

ISO 945’e göre küreler Tip I’den Tip VI’ya kadar 6 şekilde sınıflandırılır. Tip V ve Tip VI istenen küre şekilleridir. Küresellik N'_{ISO} aşağıdaki formül ile hesaplama yapar;

$$N'_{ISO} = \left(\frac{N_V + N_{VI}}{\sum_{I}^{VI} N_i} \right) \cdot 100 \quad (3.9)$$

Küreselliğin yüzdesi ötektik katılma zamanının bir fonksiyonudur. Küresellik ve katılma zamanı arasındaki ilişkinin araştırılması çok az sayıda sayısal olarak yayımlanmıştır bu veri de eşitlik 3.10’da verilmiştir.

$$N'_{JFS} = 87,5 \exp(-0,0539t) \quad (3.10)$$

Buradaki t, bir saatteki ötektik reaksiyonun başlangıcı ile bitişi arasındaki zamandır. JFS metoduna göre küresellik ISO metodu kullanılarak ilişkilendirilirse;

$$N'_{ISO} = 4,58 + 1,05N'_{JFS} \quad (3.11)$$

3.6.4. Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirde İy Yapı Oluşum Kinetikleri

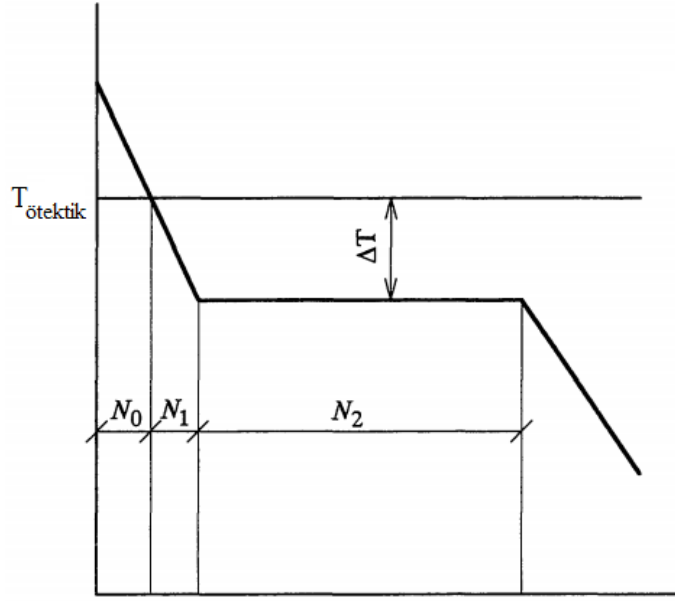
3.6.4.1. Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirde Küre Oluşum Kinetiği

Ferritik küresel grafitli dökme demirde katılma prosesi esnasında bir dizi termal-doku analizlerinden elde edilen veriler neticesinde küre sayısına ulaşılır. Bu analiz ile elde edilmek istenen küre sayısı için ötektik katılmanın altındaki ergiyiğin aşırı soğuması hesaplanır. Ötektik katılma sıcaklıklarında soğuma hızlarının yavaş olduğu durumlarda (10 K.dak^{-1} 'dan daha az) ve küre sayısını arttırmak için aşılmalı kullanılan yerler ile aşırı soğuma miktarının çok düşük ($< 1\text{K}$) olduğu durumlarda bu analizin kullanılmasına gerek yoktur.

Küre sayısını hesaplamada üç fenomen vardır; çekirdekleşme, gelişim ve solma. Çekirdekleşme katılma başlangıcı ergiyikteki grafitin çekirdeği oluşumudur, gelişim bu katılma esnasındaki bu grafit çekirdeklerinin gelişimidir ve solma katılma esnasında zaman ile çekirdek sayılarındaki düşüş olarak tanımlanabilir.

Çekirdekleşme: Gelişimin oluşabilmesi için öncelikle çekirdekleşmenin olması gerekir. Genel olarak olağan döküm koşullarında dökme demirlerde çekirdekleşme heterojen şekilde meydana gelir. Çekirdekleşme oranı klasik çekirdekleşme kuramlarına bağlı olarak aşırı soğumaya dayandırılır. Ancak klasik çekirdekleşme kuramı dökümün katılmasına başarılı bir şekilde uygulanamamıştır(Almansour vd, 1995). Bu çalışmada çekirdekleşme oranı Oldfield'in eşitliğinden elde edilebilir(Donelan, 2000).

$$\frac{dN}{dt} = a \cdot \Delta T^b \quad (3.12)$$



Şekil 3.37 Çekirdekleşme kuramının grafiksel gösterimi(Almansour vd, 1995).

ΔT ötektik sıcaklıktan itibaren ölçülen aşırı soğuma derecesi (ötektik soğuma sıcaklığı ile ergiyiği gerçek sıcaklığı), a ve b deneysel çalışmalar elde edilen sabitlerdir.

Şekil 3.37’de gösterilmiş olan grafitte çekirdekleşme bölgeleri ve aşırı soğuma oranları gösterilmektedir. Toplam küre sayısı en yüksek aşırı soğuma oranına erişildiği zaman oluşacağı varsayılan çekirdeklerin sayısı (N_1) ve katılaşma bitene kadar olan en yüksek aşırı soğumadan çekirdekleşecek çekirdeklerin sayısının toplamı (N_2) olacağı varsayılmıştır.

N_1 ve N_2 değerleri yukarıdaki eşitlikten çıkarım yapılarak aşağıdaki eşitliklerdeki aşırı soğuma ve zaman ile ilişkilendirilirler.

$$N_1 = \int a \cdot \Delta T^b \cdot dt = \frac{a}{CR} \int \Delta T^b \cdot d(\Delta T) = \frac{a}{CR \cdot (b+1)} \cdot \Delta T^{b+1} \quad (3.13)$$

$$N_2 = \int a \cdot \Delta T^b \cdot dt = a \cdot \Delta T^b \cdot t_s \quad (3.14)$$

$\Delta T = 0$ iken N_0 grafit parçalarının sayısı deneysel verilerin analizi ile bulunmuştur. Herhangi bir aşırı soğuma oranına erişilmeden önce de birkaç çekirdekleşme prosesi olabileceği varsayılmalıdır.

Sonuç olarak toplan küre sayısı katılaşma esnasındaki soğuma oranları (CR) ve aşırı soğuma verileri (t_s) göz önünde bulundurularak aşağıdaki eşitlik ile açıklanabilir.

$$N = \left(\frac{a}{b+1} \cdot \frac{\Delta T^{b+1}}{CR} \right) + (a \cdot t_s \cdot \Delta T^b) + N_0 \quad (3.15)$$

b sabiti varsayılarak, a sabiti ise doğrusal çoklu regresyon analizi ile bulunmuştur(Almansour vd, 1995).

Küre Gelişimi:

Sıcaklık ötektik denge sıcaklığının altında düştüğünde ötektik taneler oluşacaktır yani küre gelişimi olarak bilinen karbonun östenit kabuğuna doğru yayılımı başlar. Şekil 3.39'da grafit küresinin östenit kabuğu ile sarıldığı ve küre gelişiminin dairesel yönde meydana geldiği varsayımı gösterilmektedir(Almansour vd, 1995). Yani katılma esnasında grafit küreleri östenit tarafında çevrenir ve kürenin gelişim oranı ergiyikten östenite doğru, östenitten de gelişen küreye doğru yayılan karbon oranının bir fonksiyonu olarak gerçekleşir. Östenit kabuğunun gelişim oranı yarı-düzenli hal varsayımı ile açıklanır ve bu oran aşağıdaki eşitlik ile elde edilebilir(Donelan, 2000);

$$\frac{dR_{\gamma}}{dt} = \frac{D_C^{\gamma}(C_C^{\gamma/L} - C_C^{g/L})R_g}{(R_{\gamma} - R_g)R_{\gamma}(C_C^L - C_C^{\gamma/L})} \quad (3.16)$$

R_{γ} ; östenit kabuğunun çapı (m),

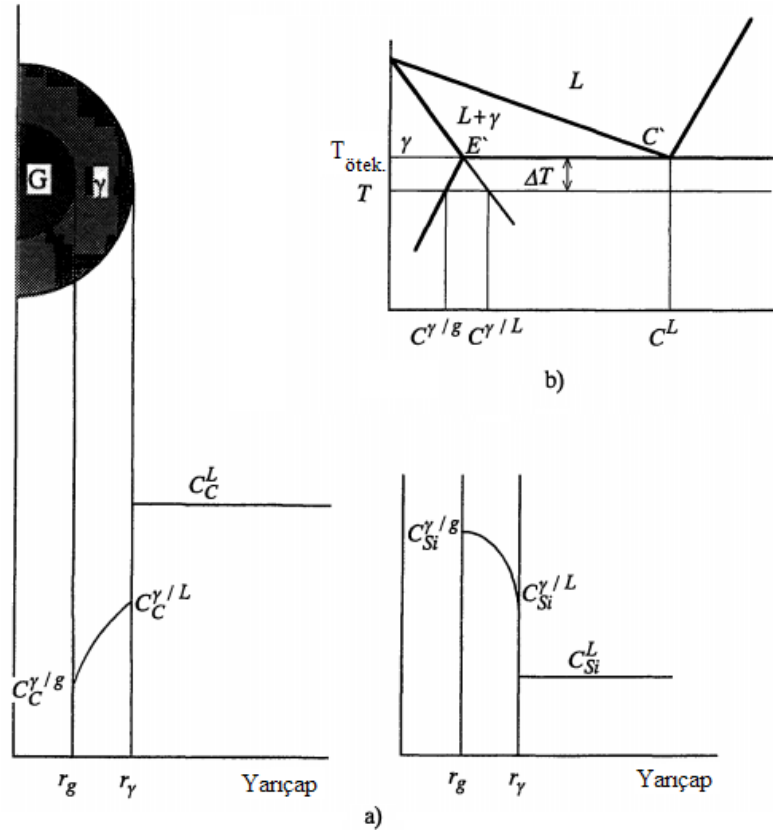
D_C^{γ} ; östenitteki karbon yayılımı katsayısı ($m s^{-1}$),

$C_C^{\gamma/L}$; sıvı sınırlarındaki östenitin karbon konsantresi (% ağı.),

$C_C^{g/L}$; grafit sınırlarındaki östenitin karbon konsantresi (% ağı.),

C_C^L ; östenit sınırlarındaki sıvının karbon konsantresi (% ağı.),

$C_C^{\gamma/L}$, $C_C^{g/L}$ ve C_C^L değerleri kullanılan alaşıma göre faz diyagramlarından elde edilir(Almansour vd, 1995).



Şekil 3.38 a) Ötektik gelişim modeli, b) faz diyagramı(Almansour vd, 1995).

Bu şekildeki model herhangi bir arayüzeyde hesaplanan karbon ve silis bileşimi prosedürüne dayanır böylece grafit oranını öngörebiliriz tabii ergiyikteki silisin yeniden dağılım davranışı bilinirse. Silisin segregasyon olması katılaşma esnasında ergiyikte silisin miktarındaki düşüşün bir sonucudur. Bu yeniden dağılım FDM şekillenmesiyle Sheil'in eşitliği ile aşağıdaki gibi açıklanır(Almansour vd, 1995);

$$\Delta C_{Si}^L = \frac{\Delta f_s}{1 - f_s} (C_{Si}^L - C_{Si}^{\gamma/L}) \quad (3.17)$$

$C_{Si}^{\gamma/L}$, östenit/sıvı arayüzeyindeki östenitte bulunan silis miktarı ve Δf_s 'de hacimdeki artış

$$\Delta f_s = S_\gamma \cdot \Delta r_\gamma \quad (3.18)$$

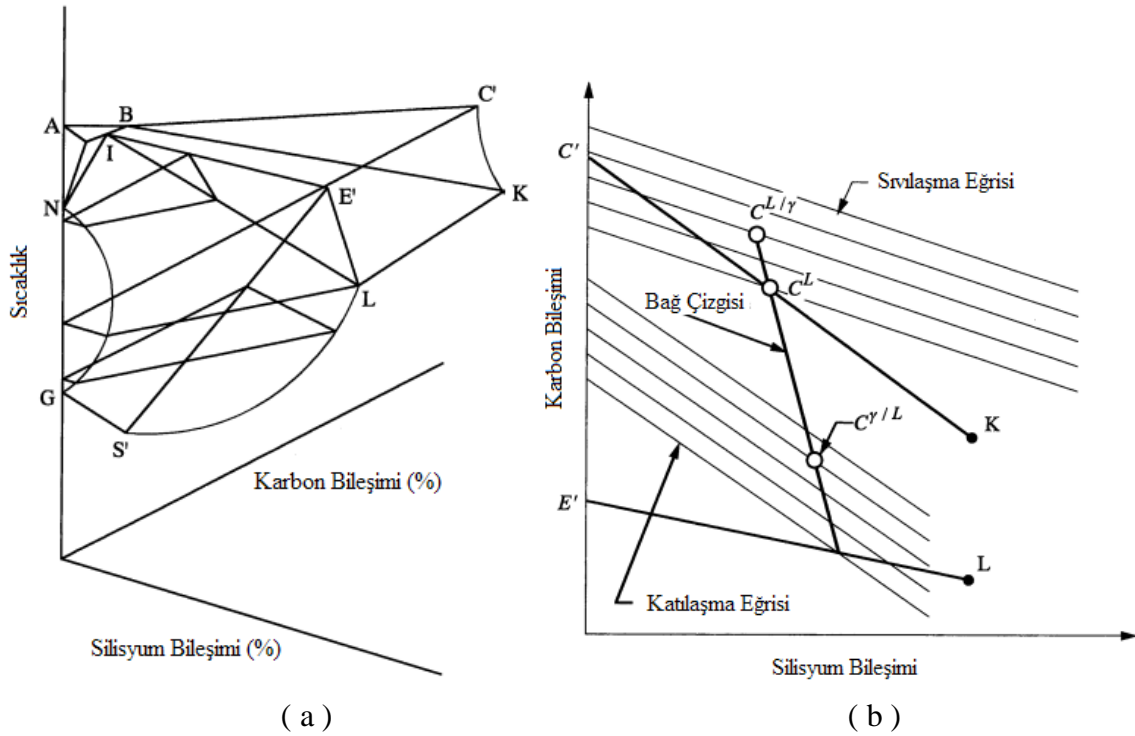
$$S_\gamma = (1 - f_s) \cdot 4 \cdot \pi \cdot r_\gamma^2 \cdot N \quad (3.19)$$

S_γ Avrami varsayımını kullanarak tanelerdeki çarpışmalar için hesaplanan sıvı ile etkileşim halindeki östenit tanelerinin yüzey alanı. C_{Si}^L , bilindikten sonra ergiyikteki karbon bileşimi olan C_C^L ve ötektik sıcaklıktaki kararlı denge sıcaklığı $T_{ötek}^{st}$ da aşağıda gösterildiği gibi;

$$C_C^L = 4,25 - 0,33 \cdot C_{Si}^L \quad (3.20)$$

$$T_{\text{ötek}}^{st} = 1153 \cdot 3,8 \cdot C_{Si}^L \quad (3.21)$$

Pratik olarak γ / L arayüzeyinde ergiyikteki silis bileşimi aşırı soğumadan dolayı tüm bileşimden daha düşüktür. Fakat bu durum Şekil 3.38’de gösterildiği gibi tahmin edilen ve ihtiva eden bileşimi gösterilmiştir. γ / L arayüzeyinde östenitteki silis bileşimi Şekil 3.39’da gösterildiği gibi ötektik C_{Si}^L ve sıvıdaki silis bileşiminin $C_{Si}^{\gamma/L}$ oranı olarak kararlaştırılan dağılım katsayısı ile hesaplanmıştır.



Şekil 3.39 a) Fe-C-Si üçlü faz diyagramından bir parça b) Üçlü faz diyagramının üstten görünüşü(Almansour vd, 1995).

γ / L arayüzeyinde östenitteki karbon bileşimi katılma eğrisinden doğrudan sırasıyla hesaplanmıştır. γ / g ‘de silisyum bileşimi denge durumundaki dağılım katsayısının miktarında katılma başlangıcındaki C_{Si}^L ‘den hesaplanmış ve tüm proses için sabite olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak γ / g ‘deki karbon bileşimi her zaman adımındaki çözünebilir limit yüzeyinden hesaplanır. Çizelge 3.11’de kullanılan mikro-modeldeki değişkenleri göstermektedir. Östenit tanesi gelişimi dR_γ , grafit kürelerinin gelişimi eşitlik 3.22 ile hesaplanabilir;

$$\rho_\gamma \cdot S_\gamma \cdot (C_C^L - C_C^{\gamma/L}) \cdot \Delta R_\gamma - \rho_\gamma \cdot (1 - f_s) \cdot \Delta C_C^L = 100 \cdot S_g \cdot \rho_g \cdot \Delta R_g - \rho_\gamma \cdot S_g \cdot C_C^{\gamma/g} \cdot \Delta R_g \quad (3.22)$$

Çizelge 3.11 Mikro modellemede kullanılan değişkenler ve sabitler(Almansour vd, 1995).

Mikro hesap için zaman basamakları	0,001	s
Grafit yoğunluğu, ρ_g	1710	kg / m ³
a	808	
b	1	
D_C^Y	D_0 (m ² /s) = $1,75 * 10^{-6}$	Q(J / mol) = 113462
Katılma Çizgisi	T (°C) = $1614,4 - 34,6 * C_{Si}^{Y/L} - 277,8 * C_C^{Y/L}$	
Yüzeyde		
Limit	$T \text{ (°C)} = \frac{5,5 \cdot (C_{Si}^{Y/g} + 1,1)^2 \cdot 731,3 + 5,5 \cdot C_{Si}^{Y/g} - 9,7 \cdot C_{Si}^{Y/g} + 415,045}{1,33 + 0,169 \cdot C_{Si}^{Y/g} \cdot (C_C^{Y/g} - 0,68 + 0,029 \cdot C_{Si}^{Y/g})}$	
Çözünürlük		

Yeniden düzenlemeden sonra grafit küresinin yarıçapındaki artış eşitlik 3.23 ile açıklanabilir;

$$\Delta R_g = \frac{s_Y \cdot (C_C^L - C_C^{Y/L}) \cdot \Delta R_Y - (1 - f_s) \cdot \Delta C_C^L}{s_g \cdot \left(100 \cdot \frac{\rho_g}{\rho_Y} - C_C^{Y/g}\right)} \quad (3.23)$$

ρ_g grafitin yoğunluğu ve S_g östenit ile etkileşim halindeki grafit kürelerinin yüzey alanı olarak ifade edilirse modeldeki kıvamda tutarlılık için östenit tanelerin yüzey alanı varsayımı ile benzer bir eşitlik ile hesaplanır;

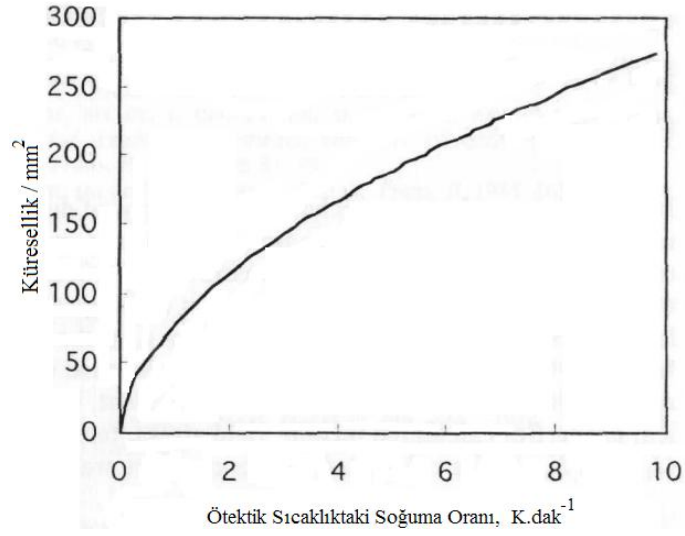
$$S_g = (1 - f_s) \cdot 4 \cdot \pi \cdot R_g^2 \cdot N \quad (3.24)$$

f_s , grafit fraksiyonudur(Almansour vd, 1995).

Ayrıca katılma esnasında aşırı soğuma, ergime gizli ısı oranının kaybedilen ısının oranından gazla olana kadar yükselir. Bu noktada daha fazla küre oluşumu beklenmez ve küre sayısı en yüksek aşırı soğuma oranından elde edilir.

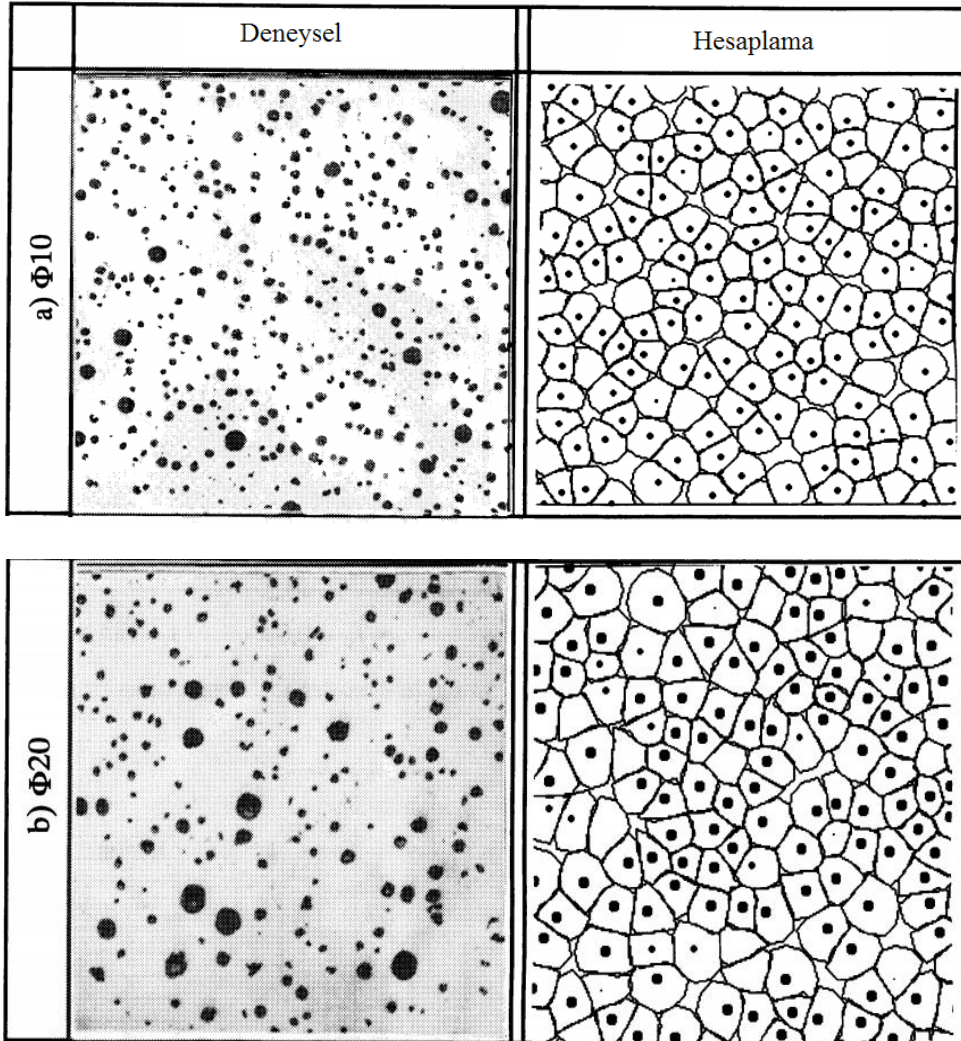
Doku analizden ısıl analizi ayrıştırarak küre sayısı ile soğuma oranları arasındaki ilişkiden elde edilen ötektik sıcaklıklardaki farklı soğuma oranları çözümlendiğinde Şekil 3.41'de gösterilen katılma sıcaklığındaki soğuma oranlarının dağılımı elde edilmiştir. Aşırı soğumanın yeterli miktarda düşük olması durumunda birincil soğuma oranına belirgin bir şekilde etkisi olmayacaktır. Bu ilişki küre sayılarının elde edilmesinde termal analizin kullanımını basitleştirir(Donelan, 2000).

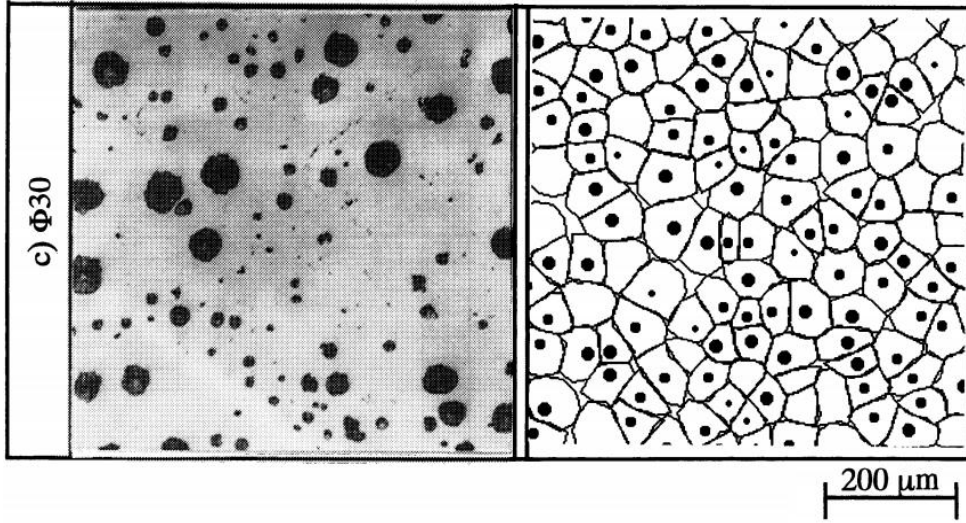
Şekil 3.40'da katılma esnasındaki ötektik sıcaklıktaki soğuma oranı ile küresellik arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 3.40 Ötektik sıcaklıktaki soğuma oranı ile küresellik arasındaki ilişki(Donelan, 2000).

Şekil 3.41'de deneysel ve deneylerden önce hesaplanan dokular ile deneyler neticesinde ortaya çıkan içyapıların mukayesesi gösterilmektedir. Bu deneyler a) 10, b) 20 ve c) 30 mm kesit kalınlıklarına göre uygulanıp hesaplanmıştır.





Şekil 3.41 . a) 10, b) 20 ve c) 30 mm kesit kalınlıklarındaki parçaların deneysel ve hesaplanan dokuların gösterimi (Almansour vd, 1995).

Solma: grafit oluşumu için potansiyel çekirdek olarak davranacak ergiyiğin içerisindeki bir dizi yerleşmelerin sayısındaki düşüştür. Bu fenomenin dayanağı kullanılan aşılama tipidir fakat genel olarak asıl sebep zamanla küre sayısındaki üstel şekilde düşüştür. Bu etkiyi düzeltmek için Şekil 3.41.'deki küre sayısını $\exp(-t/t^*)$ ile çarpmak gereklidir. t , katılma tepkimesinin başladığı zaman ile aşılama işlemi arasındaki zaman. t^* , kullanılan aşılama tipine bağlı parametre. Bu doğrulama kalın kesitli dökme demirler için oldukça önemlidir çünkü bu tür dökümlerde katılma ile döküm arasındaki zaman ciddi ölçüde fazladır ve bu durumda solmanın oluşması kaçınılmazdır(Donelan, 2000).

Küre sayısı, düzenlenmemiş solma için aşağıdaki iki eşitliğin eş zamanlı çözümü ile elde edilir. Çözülmesi gereken eşitlikler;

$$V = \frac{4\pi}{3} \int_0^t \frac{dN}{dt} \left(\int_{\tau}^t \frac{dR_a}{dt} \right)^3 d\tau \quad (3.25)$$

$$f = 1 - \exp(-V) \quad (3.26)$$

$$Q = L \frac{df}{dt} \quad (3.27)$$

V; katının hacim fraksiyonu,

f; katının hacim fraksiyonu (hücreler için)

Q; Gizli ısının ortaya çıkış oranı

T; zaman

L; Gizli ısı (kJ kg^{-1})

3.6.4.2. Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirde Ferrit-Perlit Miktarı Oluşum Kinetiği

Perlit ve ferrit yüzdesini hesaplamada Wessen'in metodu kullanılır. Sıcaklık kararlı ötektoid sıcaklığının altına düştüğünde (750-800 °C, bileşime bağlı), östenit ferrite ayrışır. Ferritin karbon bileşimi, grafit kürelerine yayınması için serbest bırakılan östenitin karbon bileşiminden daha azdır. Dönüşümün oranı ferrite yayınan karbonun oranı ve kürelerdeki karbonun kaynaşma oranı ile kontrol edilir. Wessen bu dönüşümü 3 basamakta tanımlamıştır;

- (i) kürelerin etrafındaki tüm ferrit kabuğunun oluşumu,
- (ii) kürenin içindeki karbon geçişinin oranı tarafından yönetilen ferrit kabuğunun gelişimi,
- (iii) ferritteki karbon yayınının oranı tarafından yönetilen ferrit kabuğunun gelişimi,

Bu çalışmanın başında model yapımı denemesinin ilk basamağında sorunlarla karşılaşıldı. Fakat birinci basamak geliştirilmesi gerektiğini gösterdi ve prosesin temeli sadece ikinci ile üçüncü basamakta yakalandı. Bu (ii) basamakta ferritin gelişim oranı aşağıdaki gibi verilmiştir;

$$\frac{dI^x}{dt} = \frac{(C_c^{xy} - C_c^{xgr})}{(C_c^{yx} - C_c^{xy})} \left(\frac{R_g}{R_x}\right)^2 \exp\left(\frac{4\pi R_x^3}{3}\right) \mu \quad (3.28)$$

(iii) basamakta gelişim oranı;

$$\frac{dI^x}{dt} = \frac{(C_c^{xy} - C_c^{xgr})}{(C_c^{yx} - C_c^{xy})} \frac{R_g D_C^x}{I^x R_x} \quad (3.29)$$

I^x , ferrit kabuğunun kalınlığı (m),

R_x , ferrit kabuğunun yarıçapı (m),

R_g , grafit küresinin yarıçapı (m),

D_C^x , ferritte karbonun yayınım katsayısı (m s⁻¹),

μ , grafit yüzeyini kapsayan karbon atomunu oranı (m s⁻¹),

C_c^{xgr} ve C_c^{xy} ferrit/grafit ve östenit/ferrit sınırlarında ferritin karbon konsantrasyonu (wt-%),

C_c^{yx} östenit/ferrit sınırlarında östenitin karbon konsantrasyonu (wt-%),

Sıcaklık yarı-kararlı ötektik sıcaklığın (demirin kompozisyonuna bağlı olarak kararlı sıcaklığın ~30°C altında kalan sıcaklıktır) altına düştüğünde, perlit kalan herhangi bir östenitten dönüşüme başlar. Perlitin gelişim oranı ferritinkinden hızlıdır.

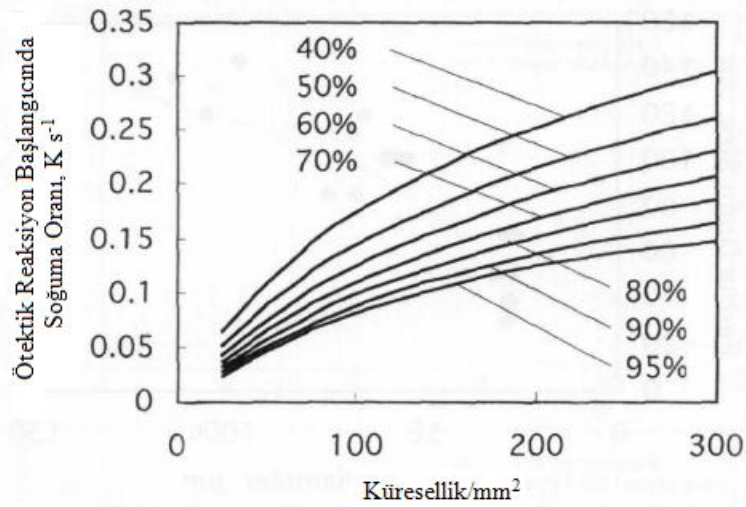
$$dR_p/dt = k\Delta T^2 \quad (3.30)$$

R_p , perlit kabuğunun yarıçapı,

$$k \approx 9,4 \times 10^{-10}$$

Bu eşitliği çözerek manganın ve silisyumun segregasyonunu ve ötektoid sıcaklıktaki etkilerini göz önünde bulundurmak gereklidir. Segregasyon Scheil's ile Boeri'nin eşitliklerine dayanarak hesaplanır.

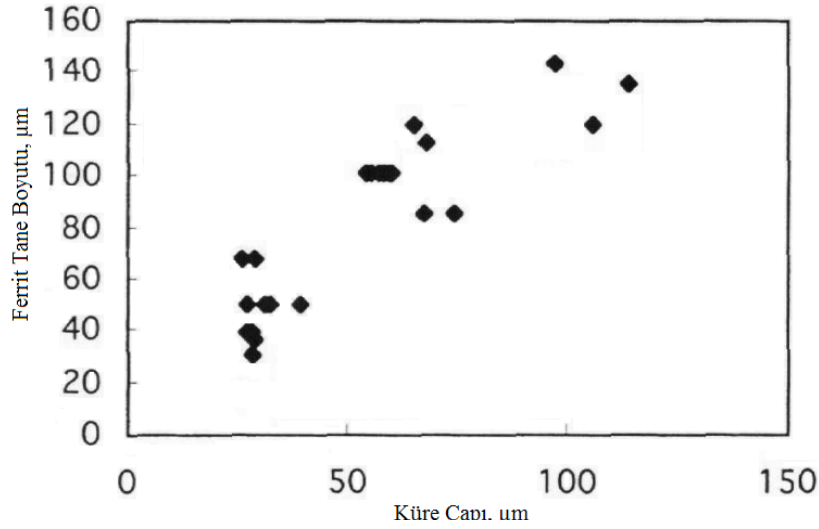
Küresellik sonuçları Şekil 3.42'de gösterilmiştir. Sonuçlar, ferrit yüzdesinin, ötektoid sıcaklık için soğuma oranını ve küre sayılarını göstermektedir. Bu sonuçları kullanarak ferrit ve perlitin yüzdesi döküm prosesinin termal analizinden sonraki proses için sıcaklık-zaman çıktısı elde edilebilir.



Şekil 3.42 Ötektik reaksiyondan başlayan soğuma hızları ve küresellik ile ferrit yüzdesindeki değişimler(Donelan, 2000).

3.6.4.3. Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirin Ferrit Tane Boyutu

Literatürde KGDD'in ferrit tane boyutunu hesaplayacak bir metot bulunamadı. Şekil 3.43'te Frenz'in verilerinden ferrit tane boyutu yaklaşık olarak küre çapının 1,6 ile çarpımına eşit olduğu bulunmuştur.



Şekil 3.43 Ferrit tane boyutu ile küre çapı arasındaki ilişki(Donelan, 2000).

Bu sonuç ısıtılmış ve ısıtılmamış numuneleri için kabul edilebilir. Yanagisawa'nın sonuçları karbon bileşimi %2-4 arasında olanlar için oldukça tutarlıdır fakat karbon bileşiminin bu aralığın dışında olduğu durumlarda pek geçerli olmadığı görülmüştür.

Kalın Kesitli Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirde Chunky Grafiti:

Küresel grafitli dökme demirde chunky grafit kimyasal bileşime, aşılama, döküm sıcaklığına (aşırı ısıtma) ve katılma zamanı gibi birçok etkene bağlı olarak seyrek olarak oluşan bir grafit çeşididir. Parçanın şekline bağlı olan sıcak bölge gibi ısının muhafaza edildiği döküm kesitleri de önemli etkindir. Koyu noktalar testere ile kesimde veya yüzey işlemi bitmiş parçalarda kolayca gözlemlenebilir ve koyu noktalı doku da görülür. Koyu noktalar ASTM A395 veya EN 1563 standartlarında karşılaşmayacağınız bir dokuya sahiptir ve tanımlanması kişinin algısına bağlı bir durumdur. Koyu noktaların içerisinde chunky grafit içeren doku vardır ve bu da bir tür grafit bozunmasıdır. Çekme dayanımında, kopma uzamasında ve düşük çevrimli yorulmadaki düşüş bu grafit varlığının metale etki eden oranı(döküm kesitinin ısıtma merkezi) ile alakalıdır. Bu kaynak zinciri mutlaka anlaşılmalıdır çünkü gerilme ve sıcaklıklar gelişmiş türbin uygulamalarında artışına devam eder. Kalın kesitli dökme demirin kalitesi gelecek uygulamalar için uygun bir aday olduğunu kanıtlamak için gelişmelidir. Artık rekabet döküm parçasının riskli bölgeleri için katılma oranını, sıcaklığı ve kimyasal bileşimleri ölçme yollarını bulmaya, daha sonra da kalıplama, döküm prosesleri gibi son bileşime etki eden etmenlere bağlıdır(Bouse vd, 2010). Çizelge 3.12'de yapıdaki olası chunky grafit ile mekanik özellikler arasındaki ilişkinin gösterimidir. Chunky grafit bulunması malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde düşürmektedir.

Çizelge 3.12 İçyapıdaki chunky grafit ile mekanik özellikler arasındaki ilişki(Uebrick, 2010).

Kopma Uzaması (%)		ekme Dayancı (MPa)	
Chunky grafitsiz	Chunky grafitli	Chunky grafitsiz	Chunky grafitli
25	5	440	345
20	3	500	440
22	4,5	405	315

Chunky grafitin etki ettiği bölgeler sertlik ve akma dayancına etki edemezken, çekme dayancı ve kopma uzaması düşer. Chunky grafit ötektik katılaşma esnasında erkenden oluşur ve ötektik hücrelerin içinde i bağlantılı ve dallanmıŐ Şekildedir. DŐuk CE, il, aşırı olmayan NTE miktarı ve dŐuk aşırı soğuma chunky grafitin yok edilmesine yardımcı olabilir. AŞırı NTE içeren yüksek saflıktaki Őarjlar chunky grafit oluşumunu teşvik eder. AŞırı fazla seryum ve antimonun bulunması chunky grafit oluşumunu engellemek için en uygun element ilaveleridir. NTE eklendiğinde küresel grafitlerden sonra chunky grafit oluşur fakat her durumda mutlaka önce küresel grafit oluşur. Yüksek küre sayısı diğer grafit çeŐitlerinin oluŐmasını engeller. Chunky grafit oluşumu için tek bir etken yoktur birçok etken bir arada etki ederler.

3.7. Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirin Döküm Pratiği

Küresel grafitli dökme demir imalatında hiç Şüphe yoktur ki en önemli safhalarından biri de dökümdür. Bir dökümde üretilecek parçanın özellikleri büyük lde dökümde çok kısa bir zaman aralığında tamamlanan katılaşmaya bağlıdır.

Dkmdeki katılaşma mekanizması kimyasal bileşim ile katılaşma arasındaki soğuma hızıyla da oldukça ilişkilidir. Ayrıca imal edilecek malzemenin döküm kusurlarından arınmıŐ halde bulunması büyük lde kalıp malzemesine de bağlıdır. Bir diğer önemli etmenler ise kalıplama tekniği, kalıp, yolluk, çıkıcı tasarımı, döküm sıcaklığı ve döküm zamanıdır.

3.7.1. Kalıplama Malzemesi

Küresel grafitli dökme demir üretiminde yaş ve kuru kum kalıplama teknikleri kullanılır. Kalıplamada kullanılan kalıp kumlarının su miktarları çok özenli bir Şekilde denetlenmelidir. Kumlardaki su miktarlarının denetiminde titiz hareket edilmesine, küresel grafitli dökme demirler ilave edilen kreleŐtiricilerin kuvvetli oksitlenen elementler ihtiva etmesine sebep olacaktır.

Küresel grafitli dökme demirler için kullanılan kum karışımlarının aşağıdaki gibi olması tavsiye edilmektedir.

Silika kumu : AFS tane iriliği 50-60

3.7.2. Yolluk Çıkıcı Sistemleri

Küresel grafitli dökme demirlerin dökümünde tatbik edilen yolluk ve çıkıcı sistemlerinin tespitinde aşağıdaki prensiplere riayet etmek gerekir;

- Cüruf ve artıkları kalıp boşluğundan daha ileriye götüren yolluk sistemleri kullanılmalı,
- Metalin kalıp içerisinde az türbülanslı hareket etmesi sağlanmalı,
- Metalin kalıp boşluğuna girişi denetimli olmalı,
- Sıvı metalin kalıp boşluğunda çok iyi bir dağılıma uğraması gereklidir.

Bu esaslardan hareket ederek yolluk sistemleri, basınçlı sistemlerde düşey yolluk taban kesiti, yatay yolluklar giriş kesitleri ve arar yollukların kesitleri arasında 4 : 8 : 3 oranı esas alınarak kalıp hazırlanır. Ayrıca yatay yollukların yükseklikleri genişliklerinin 2 katı olarak yapılır.

Küresel grafitli dökme demirler, dökülmüş halde perlitik yapıya sahip olduklarından çelikler gibi çekinti boşluklarına sahiptirler. Katılaşıma esnasındaki çekilme boşluklarını gidermek için kullanılacak besleyicilerin boyutlandırılması ve kullanılma yerlerinin seçimine ait esaslar Dunphy, Ackerlid, Pellini tarafından yapılan çalışmalarda belirtilmeye çalışılmıştır.

3.7.3. Döküm Zamanı ve Sıcaklığı

Ergiyikten yüksek metalurjik kalite ve gerekli çekirdekleşme potansiyelini sağlayabilmek için aşırı ısıtma sıcaklığını azami 1500°C sıcaklığında fazla uzun sürelerde bekletmeden ısıtmak gereklidir(Roedter ve Gagné, 2003). Ancak burada önemli etken yine kesit kalınlığı olduğundan bu denli yüksek sıcaklık kalın kesitli dökme demirler için uygun olmayabilir. Çünkü yüksek sıcaklık kalın kesitli dökme demirler için çekirdekleşme potansiyelinin düşmesi anlamına geleceğinden döküm sıcaklığı kesit kalınlığına bağlı olarak 1230-1360 °C sıcaklıkları arasında olmalıdır(Uebrick, 2010). Ayrıca besleyicisiz dökümler genellikle 1370-1400 °C sıcaklıklarında dökülür. Döküm sıcaklığı kullanılan besleme yöntemine ve döküm kesitine göre belirlenmelidir(Gagne, 2004).

Küresel grafitli dökme demirlerin dökümünde kullanılan döküm sıcaklıkları genel olarak ince kesitli dökümler için likidüs sıcaklığının 100-150 °C üzerinde, kalın kesitliler dökümler içinse 50-100 °C üzerinde bir sıcaklık döküm sıcaklığı olarak kabul edilir.

Dökme demirler likidüs sıcaklığı kimyasal bileşime bağlıdır. Ampirik bir formül likidüs sıcaklığının bulunmasında kullanılabilir.

$$\text{Likidüs sıcaklığı (} ^\circ\text{F)} = 2981 - 218 F$$

$$F = \% C + \frac{1}{2} \% P + \frac{1}{4} \% Si \quad (4.31)$$

Döküm süresi, döküm parçasının ağırlığı ile ampirik olarak aşağıdaki formüller bulunabilir.

$$\text{Döküm Zamanı} = \text{Sabit} \sqrt{\text{Döküm Ağırlığı}} \quad (4.32)$$

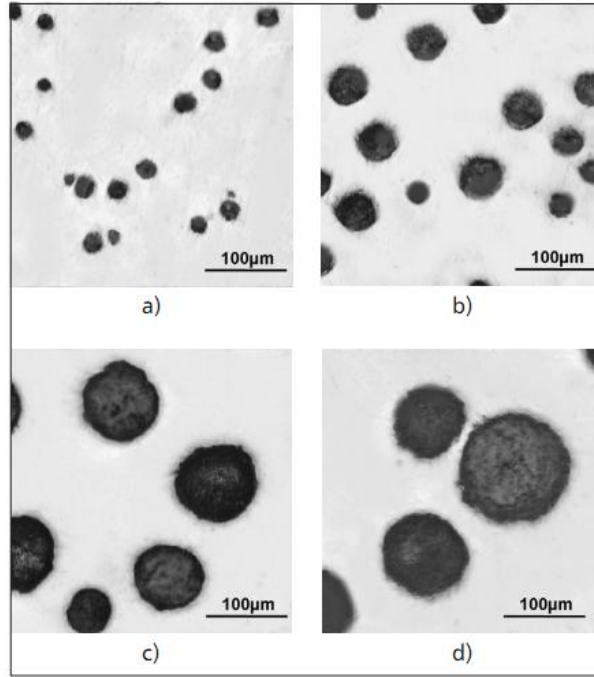
Burada döküm süresi(t) saniye(s), ağırlığı libre olarak alınırsa sabit $\approx 0,65$, eğer ağırlık kg cinsinden ise sabit ≈ 1 olur(Dikeç, 1971).

3.7.4. Akışkanlık

Dökme demirler ötektik bileşime yakın alaşımlar olduklarından, akışkanlıkları oldukça iyidir. Bu bakımdan çok ince kesitli parçalar dahi kolaylıkla dökülebilir. Akışkanlık büyük ölçüde kimyasal bileşim ve döküm sıcaklığına bağlıdır. Kimyasal bileşim olarak ötektik tipi alaşımlarda akışkanlık en yüksektir. Döküm sıcaklığının artışı ile de akışkanlık artmaktadır(Dikeç, 1971).

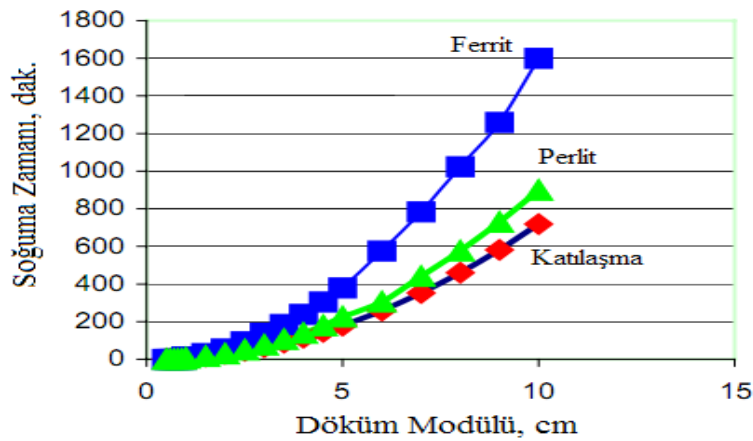
3.7.5. Kalıp Bozma

Kalıp bozma süresi ve kesit kalınlığı doku üzerinde oldukça etkindir. Ötektik bileşimdeki ergiyikler kullanılarak kesit kalınlığı 3-50 mm arasında değişen döküm plakalardan elde edilen verilerde kesit kalınlığı ve kalıp bozma süresinin küre şekilleri üzerinde çok etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca küre sayısında da bekleme zamanının etkisi oldukça fazladır(Bockus ve Zaldarys, 2008). Şekil 3.44'te kesit kalınlığına bağlı küreleşme oranlarını ve küre boyutları gösterilmektedir.



Şekil 3.44 Farklı kesit kalınlıklarındaki dökümün optik mikroskop görüntüleri. (a) 3mm, (b) 5mm, (c) 24mm, (d) 50mm(Bockus ve Zaldarys, 2008).

Kalıptaki soğuma zamanı perlit oluşumundan kaçınmak ya da engellemek için oldukça kritik bir parametredir. Şekil 3.45’de döküm modülünün bir fonksiyonu olarak ferritik dokulu bir yapı elde edebilmek için önerilen asgari kalıp bozma süresini göstermektedir. Mukayeseli bir gösterim olarak şekilde ayrıca perlitik dokulu yapının da elde edilebileceği yaklaşık kalıp bozma süresini vermektedir(Cabanne, 2004).



Şekil 3.45 Ferritik doku için yaklaşık kalıp bozma süresi(Cabanne, 2004).

Aslında bu çizgeler genellikle yaş kum kalıp için ve döküm sıcaklığı 1400°C ‘ye kadar olan parçalar ile kalıp bozma sıcaklıkları da 660°C civarında olan dökümler için tasarlanmaktadır. Ayrıca kuru kum kalıba dökümler ile kalın kesitli parçaların dökümünde bu sürelerin biraz

daha üzerine çıkılması önerilir. Bu nedenle kuru kum kalıplama da her 50 mm için bir gün beklemek çok uygun bir kural olacaktır(Mullins, 2006).

3.8. Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirin Isıl İşlemi

İstenilen özellikleri döküm haliyle (as-cast) üretmek kesinlikle istenilen ilk seçenektir fakat her zaman bu durum sağlanamayabilir buna etken en önemli olgu kesit kalınlığıdır. Isıl işlem ile ince kesitli dökümlerde karbürler yok edilecektir, istenilen yapıya göre daha kararlı bir içyapı elde edilir ve özellikle normalleştirme ısıl işleminin sık kullanıldığı ısıl işlemler ile mekanik özellikler arttırılabilir.

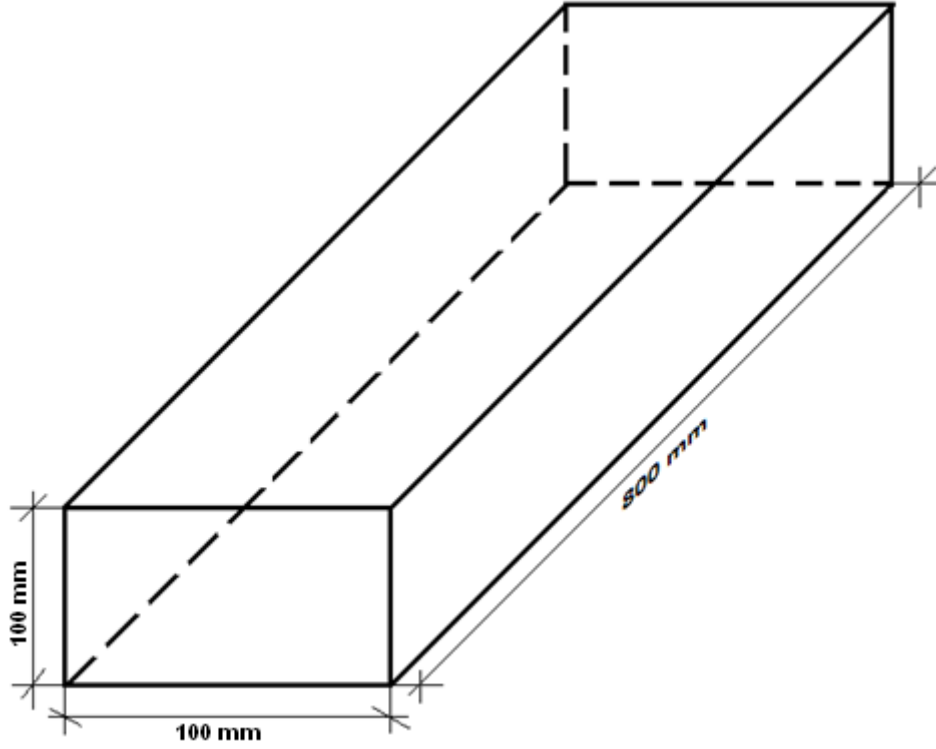
Gerilim Giderme: 50-100 °C/saat arasında ısıtarak 600 °C'ye çıkın, bir saat kadar yeterli çözünme sağlanması için ve en kalın kesitte her 25 mm için yarım saat daha bekleyin. Sonra 50-100 °C/saat aralığında 200 °C ve daha düşük seviyelere soğutun.

Karbürleri Gidermek: Bazı dökümler döküm haliyle üretildiklerinde yapılarında karbür ihtiva edebilirler, bu karbürleri yok etmek mekanik özellikleri arttıracaktır. Bu giderme işlemi döküm parçasını 900-925 °C'de 3-5 saat bekletilerek yeterli çözünme sağlanana kadar bekleterek uygulanır.

Ferritik doku için ısıl işlem: Döküm parçaları 900-925 °C'de 3-5 saat mutlaka bekletilmeli akabinde kritik sıcaklık olan 800-710 °C'lere doğru 20-35 °C /saat civarında yavaş soğutulup fırın atmosferinde 200 °C'ye kadar 50-100 °C/saat aralıklarında soğutulmalıdır(Brown, 2000).

4. DENEYSEL İNCELEME

Deneysel olarak Haytaş Döküm San. A.Ş.'de deneme amaçlı EN-GJS400-18U-LT (GGG 40.3) ferritik küresel grafitli dökme demir malzemesi için numune dökümü yapılmıştır. Prizmatik bir numunenin dökümden çıkmış ve ana döküm parçası birlikte dökülmüş örnek Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1 Mekanik muayeneler ve doku denetimi için kullanılan bloğun şematik gösterimi

Deneyde kullanılan parça bloktur ve modül hesabı olarak aslolan ana parçaya bağlı olarak 2,35 cm civarında seçilmiştir.

4.1. Deney Prosedürü

Deneylerde, kimyasal bileşimleri Çizelge 4.1'de verilen ferritik dokuya sahip malzeme kullanılmıştır. Malzemeler, Haytaş Döküm San. A.Ş.'den EN 1563 standardına göre bitişik döküm numuneleri olarak alınmıştır. Numuneler, 500 kg kapasiteli bir indüksiyon ocağı kullanılarak kum kalıba dökülmüştür.

Çizelge 4.1 EN-GJS-400-18U-LT (GGG 40.3) spektral analizi.

%C	%Si	%Mn	%P	%Mg	%S
3,27	1,78	0,11	0,024	0,034	0,007

4.2. Mekanik Deneylerin İncelenmesi

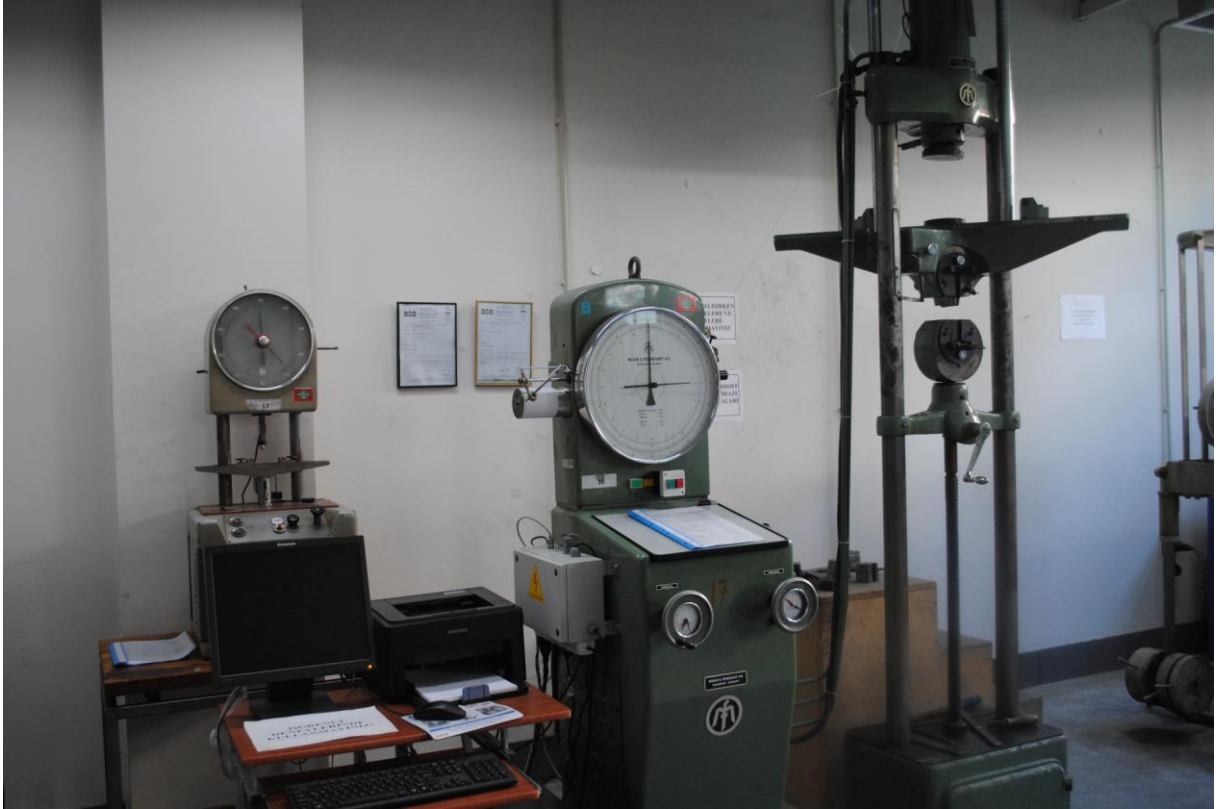
Döküm parçasına mekanik özellikleri inceleyebilmek için bazı tahribatlı muayeneler uygulanmıştır. Bunlar çekme dayancısı için çekme testi, darbe dayancısı için Charpy darbe dayancısı muayenesi, sertlik için Brinell sertlik testi uygulanmıştır.

4.3. Çekme Dayancısı İncelenmesi

Şekil 4.2’de görülen çekme-basma cihazı kullanılarak çekme dayancısı EN 1563 standardına göre çekme testi uygulanmıştır.

$$\% \delta = \frac{L_s - L_0}{L_0} \times 100 \quad (4.1)$$

L_s ; son boy, L_0 ; ilk boy, δ ; kopma uzamasını simgelemektedir.



Şekil 4.2 Mohr-Federhaff Universal çekme-basma makinesi

4.4. Charpy Çentik Darbe Dayancısı İncelenmesi

Avrupa’da kullanılan Charpy çentik darbe testleri esas alınarak EN-GJS400-18U-LT malzemesinin EN 1563 normuna göre 10*10*50 mm ölçülerinde hazırlanmış çentikli darbe dayancısı numuneleri için Şekil 4.3’te görülen çentikli darbe test cihazı kullanılarak -20 °C sıcaklıkta uygulanmıştır.



Şekil 4.3 Mohr-Federhaff çentik darbe test cihazı

4.5. Sertlik İncelenmesi

Sertlik testi malzeme kalınlığına ve malzeme cinsine bağlı olarak seçilmektedir. Dökme demirlere uygulanan sertlik testi Brinell sertlik değerlerine göre 400 BSD değerlerine kadar çıkılabilmektedir. Deneyde uygulanacak yük kullanılan bilye çapına ve malzemenin cinsine göre seçilmektedir.

$$P = C \cdot D^2 \quad (4.2)$$

P = Uygulanacak Basınç (N),

C = Numunenin malzemesine göre değişen katsayı,

D = Bilye Çapı (mm),

- Demir esaslı malzeme (Çelik, DD) C=30
- Cu ve Al alaşımlı malzeme C=10
- Yumuşak malzeme C=5

Uygulanan yükün doğru olup olmadığı da ölçülen iz çapı ile bilye çapı arasındaki orana bağlı olarak 0,2 - 0,7 arasında ise uygulanan yük doğrudur.

$$\frac{d}{D} = 0,2 - 0,7 \quad (4.3)$$

Ölçülen değerler aritmetik ortalamaları alınarak aşağıdaki eşitliğe yerleştirilerek Brinell Sertlik Değerine ulaşılır.

$$BSD = \frac{P}{A} = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot [D - \sqrt{(D^2 - d^2)}]} \quad (4.4)$$

4.6. İçyapı (Doku) İncelenmesi

Dökülen malzemenin doğrudan döküm haliyle ferritik dokuda olması beklenmektedir. Herhangi bir ısı işlem uygulanmadan yapının gerekli mekanik özellikleri sağlaması istenir. İçyapı incelemesinde malzemenin mm²'deki küre sayısı, küre yapısı, dokusu hem optik mikroskobu hem de sem görüntüleri ile değerlendirilmiştir. Numuneler dağlanmadan önce grafit oranı, dağlandıktan sonra da doku analizi "image analyzer" yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Dağlama işlemi %2 nital ile kullanılarak yapı içerisindeki fazlar incelenmiştir. Ayrıca EDS analizi yapılarak dokudaki elementler de tespit edilmiştir.

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Deneysel irdeleme hem mekanik hem de dokusal analizleri esas alarak uygulanmıştır.

5.1. Çekme Dayancı Değerlendirilmesi

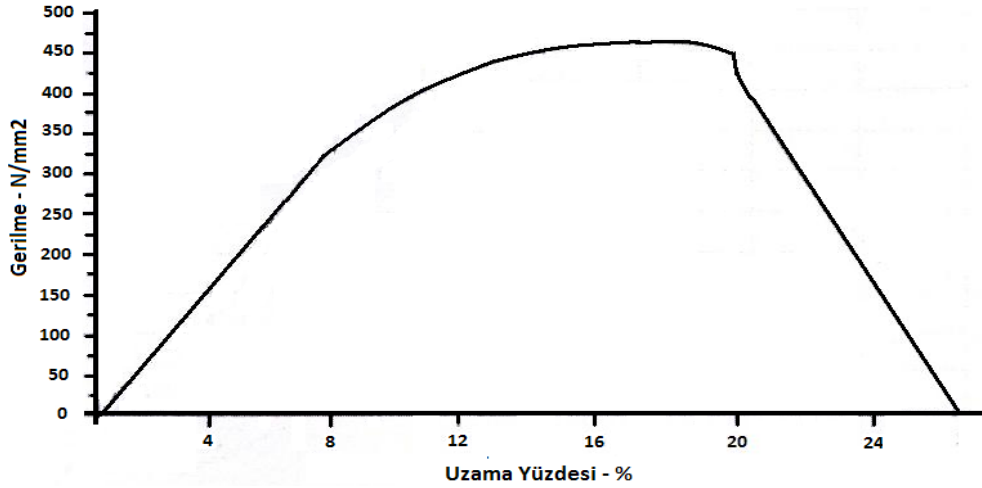
Standartta önerilen d_0 ve L_0 değişkenlerine göre elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge 5.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 EN-GJS400-18U-LT çekme testi değerleri

Kesit alanı (mm^2)	78,22
d_0 (mm)	10
L_0 (mm)	50
L_s (mm)	59,77
R_a (N/mm^2)	310,9
$R_{\text{ç}}$ (N/mm^2)	459,33
$R_{\text{ç}} / R_a$	1,48
Kopma Uzaması (%)	19,5

İlk boyu 50 mm olan malzemenin çekme testi sonucunda son boyu 59,77 mm'ye ulaşmıştır. Mühendislik kopma uzaması eşitliğine göre;

Deney sonucunda elde edilen kopma uzaması $\% \delta = 19,5$ ile akma ve çekme dayançlarının $R_a = 310 \text{ N}/\text{mm}^2$, $R_{\text{ç}} = 459 \text{ N}/\text{mm}^2$ beklenen $400 \text{ N}/\text{mm}^2$ çekme dayancı değeri ile $240 \text{ N}/\text{mm}^2$ akma dayançları değerlerinden çok yüksek olması bu malzemenin gayet sünek bir malzeme olduğunu ve standartlarda gösterilen değerlerini karşıladığından çalışma koşullarında emniyetli bir malzeme olduğunu göstermiştir. Çizelge 5.1'de verilen değerlerin grafiksel gösterimi Şekil 5.1'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1 EN-GJS400-18U-LT malzemesi için çekme testi grafiği.

5.2. Çentik Darbe Dayancı Değerlendirilmesi

İlgili standart EN 1563'te $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 3 numunenin V-çentikli darbe dayançları hesaplanmış olup Çizelge 5.2'de bu veriler sergilenmektedir.

Çizelge 5.2 Charpy V-çentikli darbe dayancı verileri

Numune Adı	Boyutlar		Test Sıcaklığı	Kırma Enerjisi (J)	Darbe Tokluğu (J/cm ²)
	H mm	W mm			
GGG 40.3	8,04	9,98	-20°C	9,37	11,68
	8,06	10,01		11,18	13,68
	8,09	10,05		11,01	13,54

Bu üç deney numunesinden çıkarılan ortalama değer ise $a_{\text{ç}} = 10\text{ kJ} / \text{cm}^2$ 'dir. Elde edilen deneysel verilerin malzemenin kesit kalınlığına bağlı olarak bu değeri güvenli addedilebilir. Ancak bazı durumlarda kesit kalınlığının artması ile mekanik özelliklerin beklenen değerlerin altında seyretmesi olağan bir durumdur. Bu durumu çekme dayancı, akma dayancı, vb, mekanik verilerde de gözlemlemek mümkündür.

5.3. Brinell Sertlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Brinell sertlik deneyinde bilye çapı malzemenin et kalınlığına göre 2,5 mm seçilmiş, uygulanan yük ise malzemenin cinsine göre 187,5 seçilmiş olup 3 farklı noktadan sertlik değerleri elde edilmiştir.

1. nokta için;

d_1	d_2	d_{ort}	$d/D = 0,2 - 07$	Bilye çapı (mm)	Uygulanan yük (kgf)	BSD
1,21	1,21	1,21	0,48	2,5	187,5	152,21 HB

2. nokta için;

d_1	d_2	d_{ort}	$d/D = 0,2 - 07$	Bilye çapı (mm)	Uygulanan yük (kgf)	BSD
1,23	1,23	1,23	0,49	2,5	187,5	147,59 HB

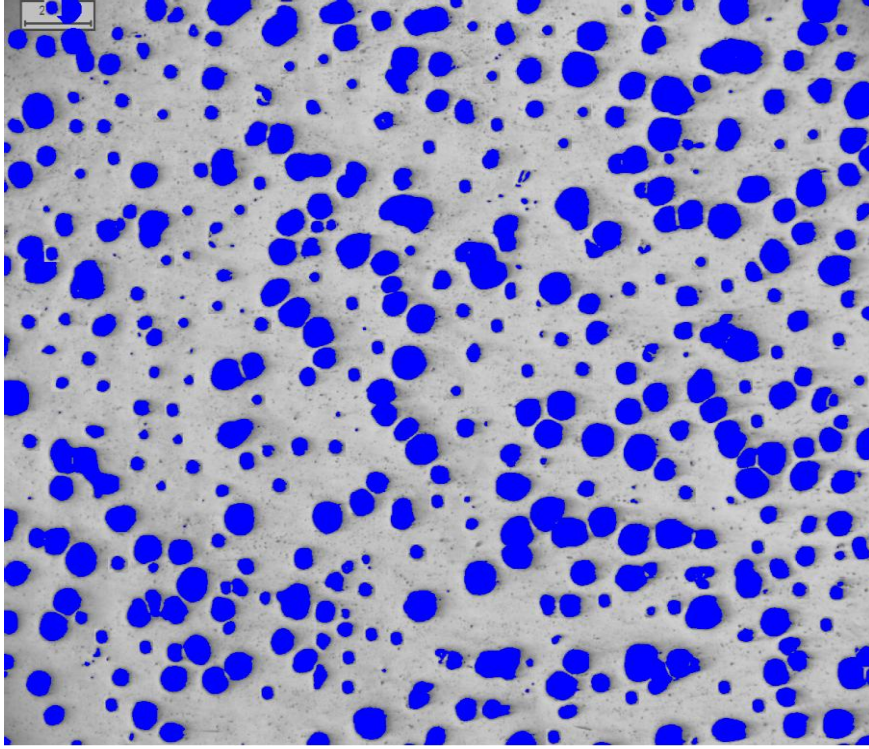
3. nokta için;

d_1	d_2	d_{ort}	$d/D = 0,2 - 07$	Bilye çapı (mm)	Uygulanan yük (kgf)	BSD
1,22	1,21	1,215	0,48	2,5	187,5	151,53 HB

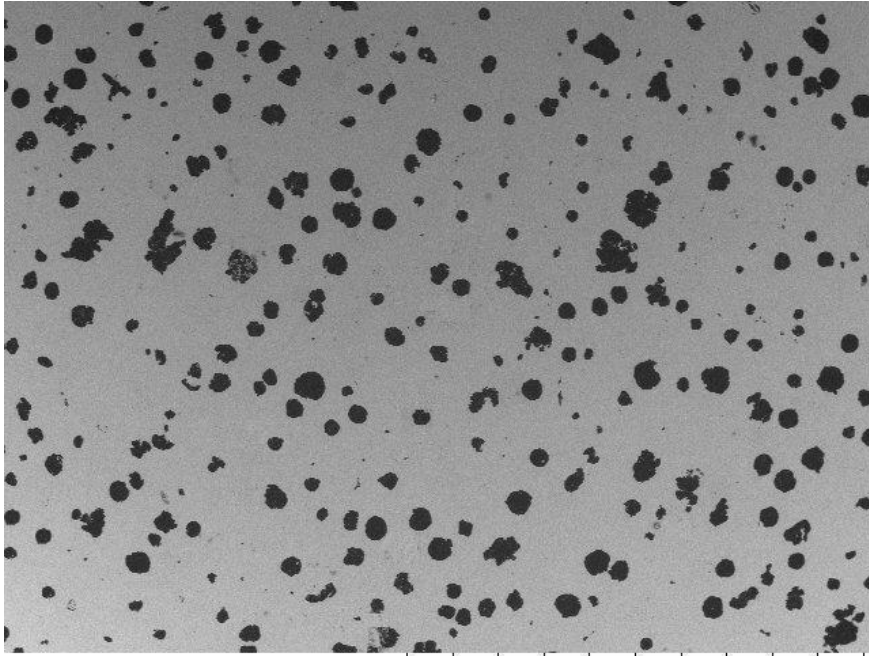
Bu 3 farklı noktadan alınan değerleri incelersek test edilen numunenin sertlik değeri ortalama 150 HB 2,5/187,5 olarak bulunmuştur.

5.4. İyçayı(Doku) Değerlendirilmesi

EN-GJS400-18U-LT malzemesinin tabiatıyla ferritik dokuda olması beklenmektedir. Yapıdaki kürelerin sayısı mm^2 'de 100-200 olması beklenmektedir bu kürelerin sayımı dağlamadan image analyzer yazılımı vasıtasıyla hesaplanmıştır. Şekil 5.3'te dağlanmamış görüntüsü bulunan EN-GJS400-18U-LT malzemesinin dokudaki grafit yani küre oluşumu açıkça görünmektedir. Bu görüntüyü kullanarak küre sayısını 105 küre sayısı/ mm^2 olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 5.2 Dağlanmamış FKGDD'in optik mikroskobu görüntüsü (x50)

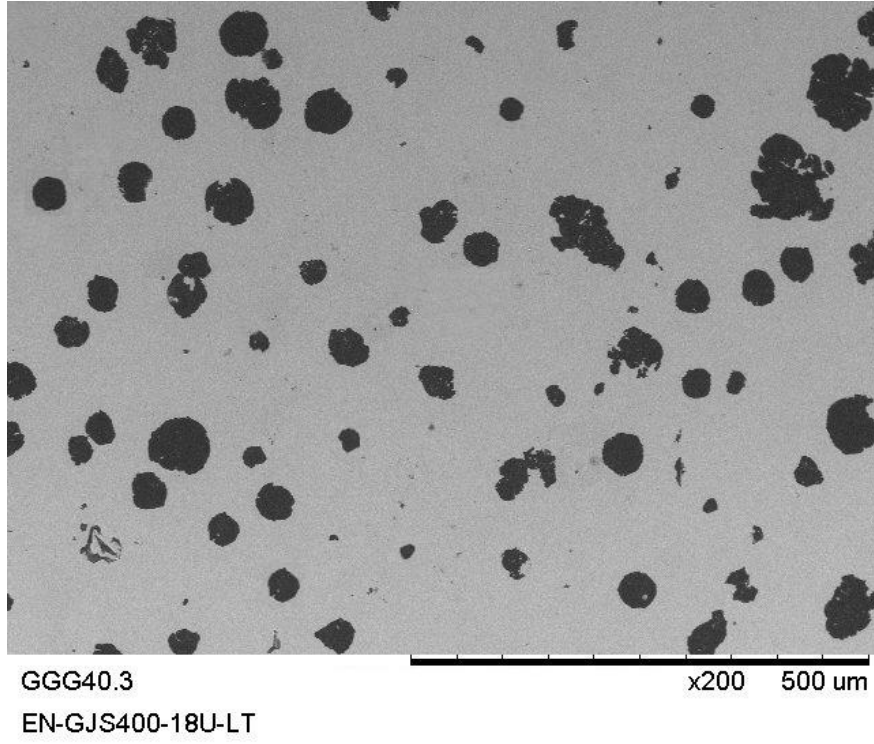


GGS40.3

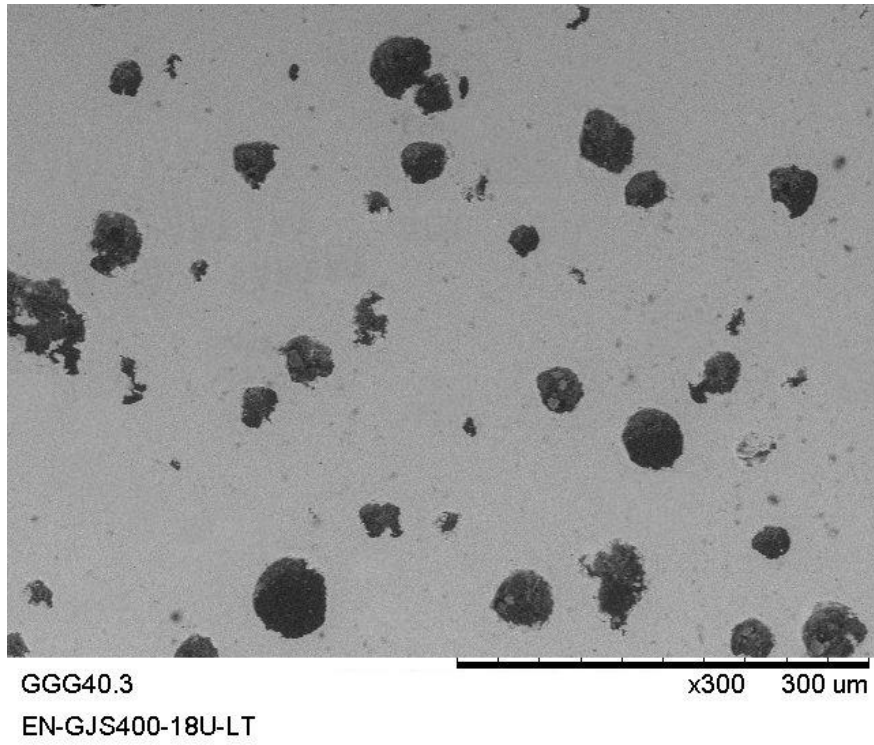
x100 1 mm

EN-GJS400-18U-LT

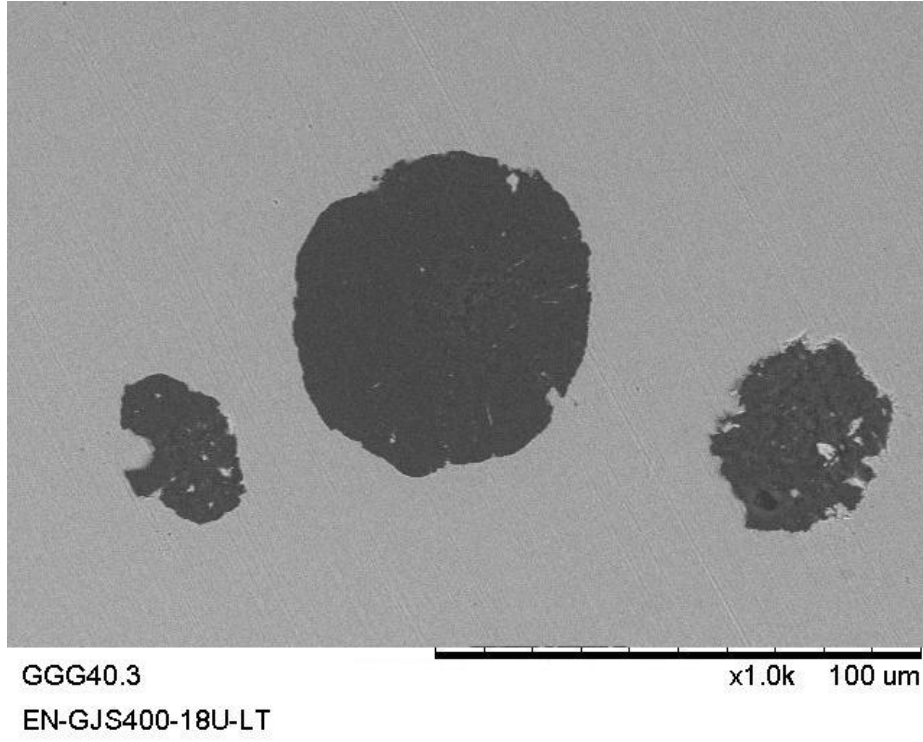
Şekil 5.3 Dağlanmamış FKGDD'in SEM görüntüsü (x100)



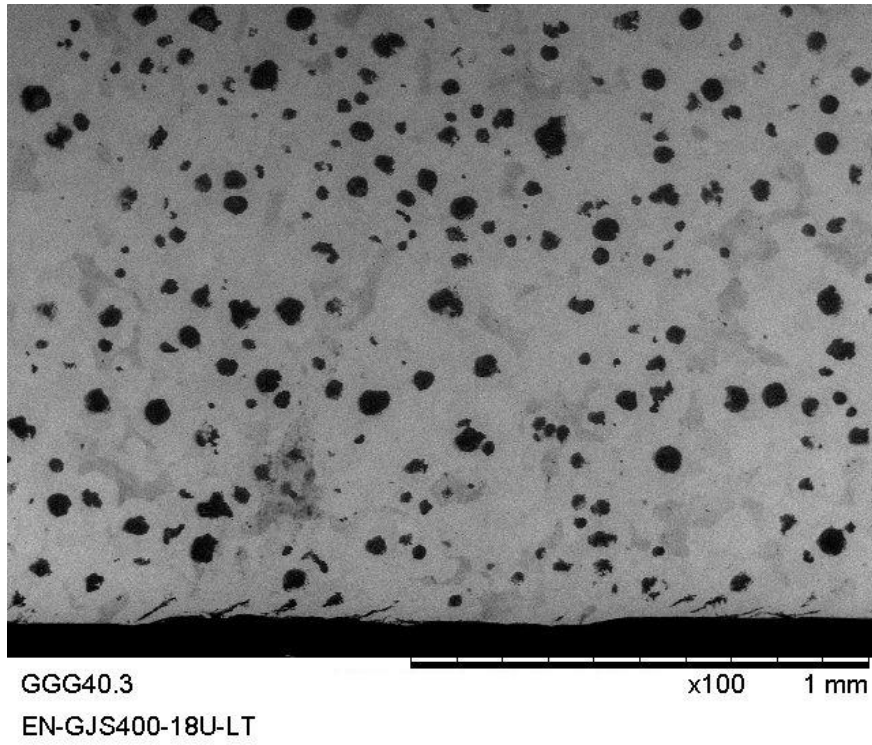
Şekil 5.4 Dağlanmamış FKGDD'in SEM görüntüsü (x200)



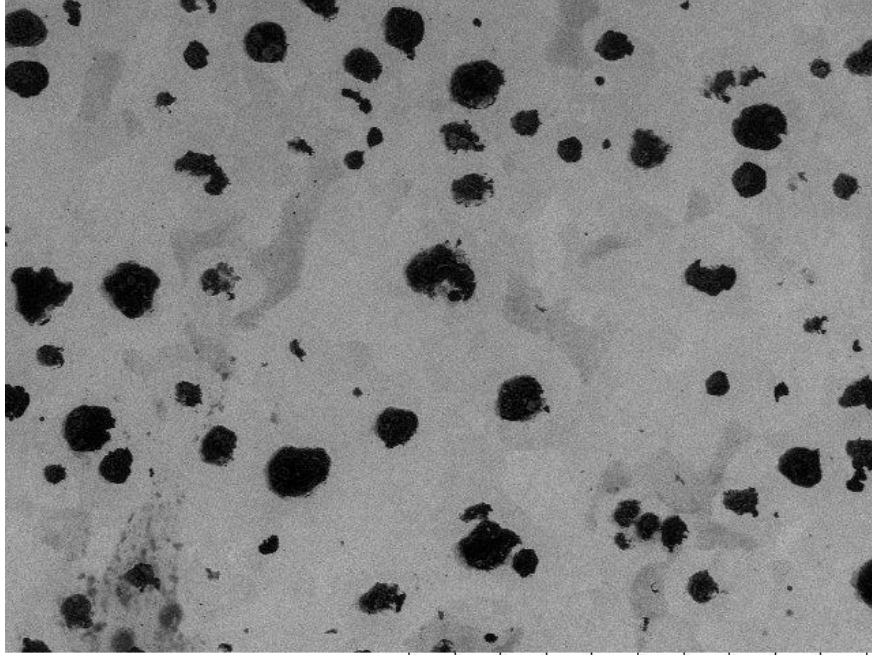
Şekil 5.5 Dağlanmamış FKGDD'in SEM görüntüsü (x300)



Şekil 5.6 Dağlanmamış FKGDD'in SEM görüntüsü (x1000)



Şekil 5.7 Dağlanmış FKGDD'in SEM görüntüsü (x100)

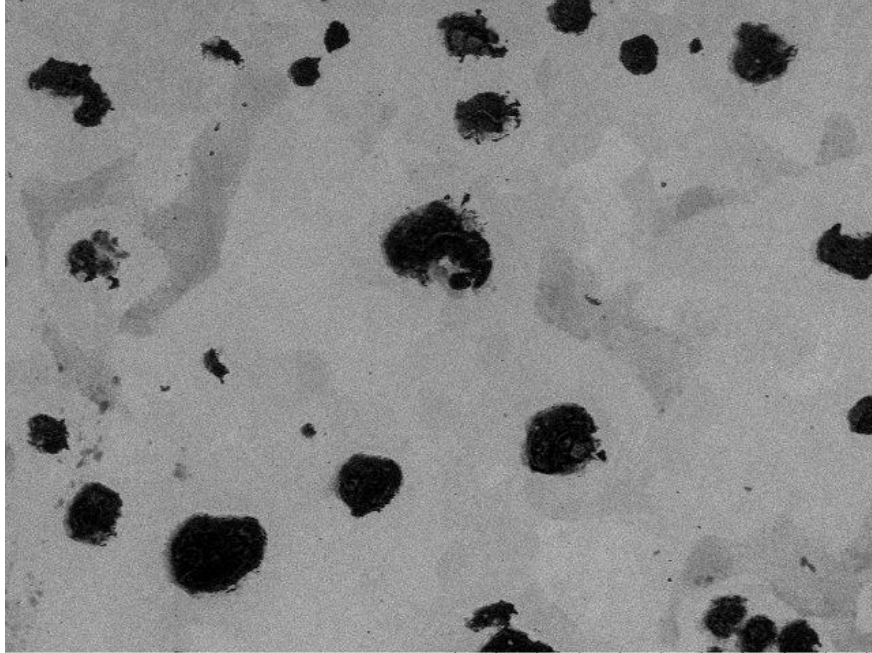


GGG40.3

x200 500 um

EN-GJS400-18U-LT

Şekil 5.8 Dağlanmış FKGDD'in SEM görüntüsü (x200)

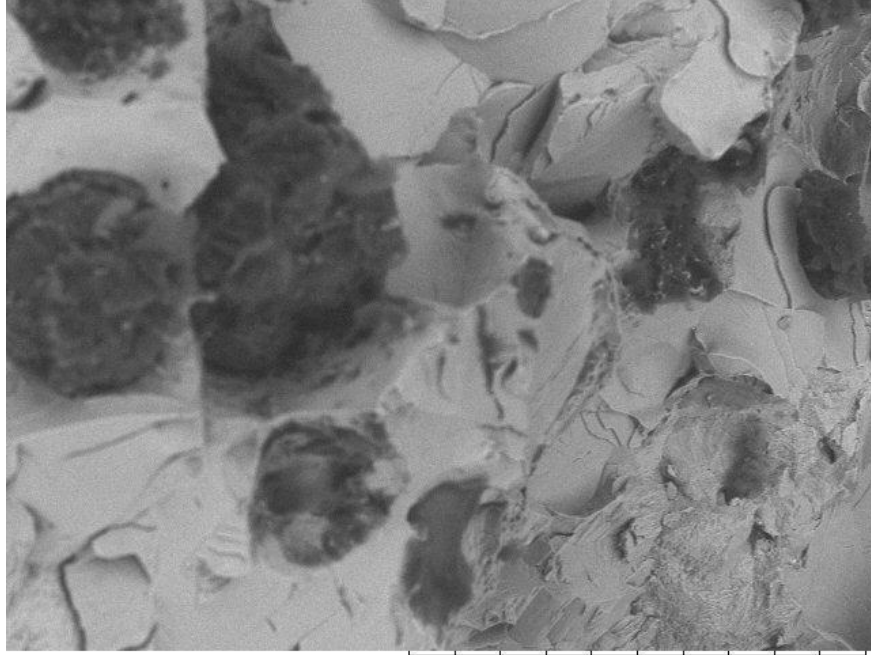


GGG40.3

x300 300 um

EN-GJS400-18U-LT

Şekil 5.9 Dağlanmış FKGDD'in SEM görüntüsü (x300)

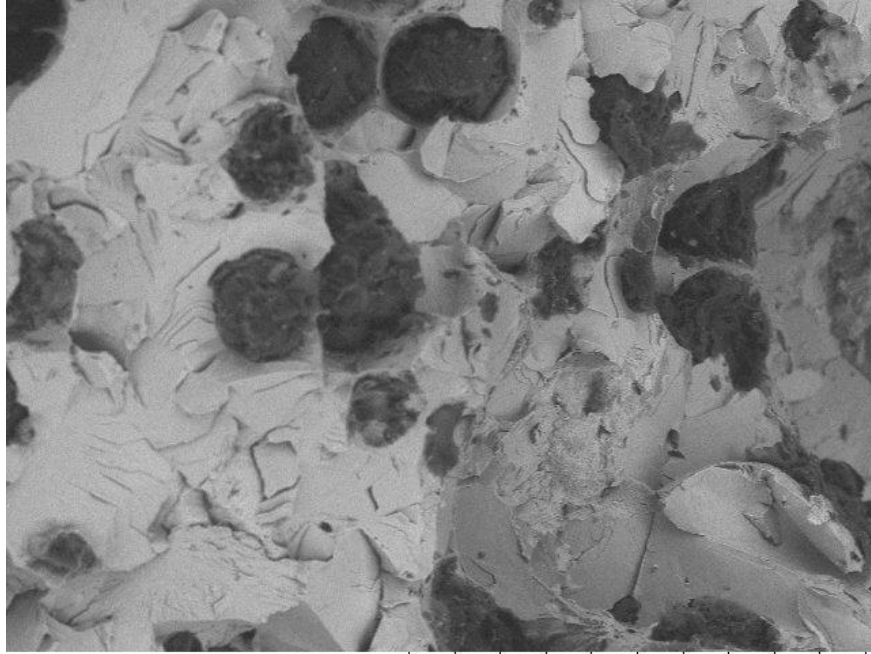


GGG40.3

x1.0k 100 um

EN-GJS400-18U-LT

Şekil 5.10 Kırılma yüzeyi SEM görüntüsü (x1000)

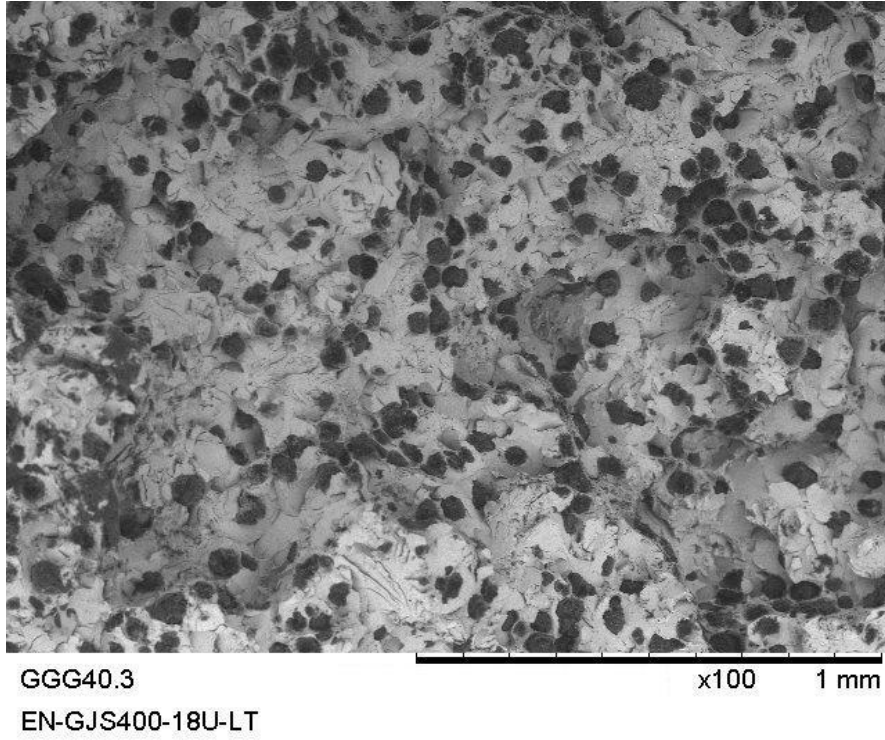


GGG40.3

x500 200 um

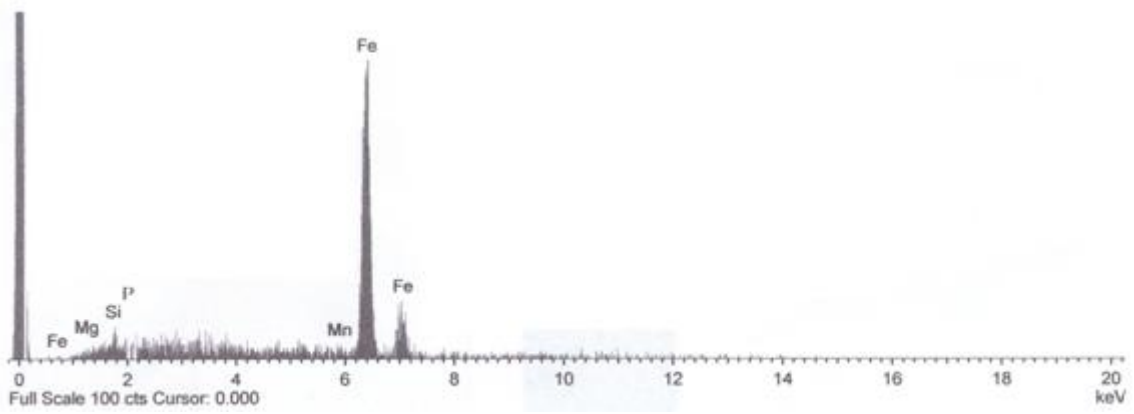
EN-GJS400-18U-LT

Şekil 5.11 Kırılma yüzeyi SEM görüntüsü (x500)



Şekil 5.12 Kırılma yüzeyi SEM görüntüsü (x100)

Şekil 5.13’de görülen EDS spektral analizinden elde edilen elementlerin kimyasal analiz sonuçlarından çıkan elementler ile örtüştüğü, EDS verilerinde de gözlemlenmektedir.



Şekil 5.13 FKGDD’in EDS spektral analizi

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Rüzgar türbini pervane göbeği için bitmiş ürün özellikleri standartlarla belirlenmiştir. Ana döküm karakteristiklerini temsil edecek ve ana parça ile birlikte numune döküm yapılmaktadır. Üretime esas katılma modelleri ve bu modele uygun yapılan döküm numuneleri üzerinde analizler, mekanik metalürjik testler, metalürjik ve dokusal yapının belirlenmesi için metalografik çalışmalar sonucu istenilen değerlere yaklaşım sağlanmıştır. Sıvı kalitesini temini, metalürjik parametrelerin oluşturulması, döküm malzemesi, aşılama ve kalıp yapımı deneysel olarak geliştirilmiştir. Metalografik olarak ferritik dokunun elde edilmesi, küresel grafitlerin şekli ve sayısının elde edilmesine yönelik işletme koşullarının tespiti ve sürekliliğinin sağlanması çalışmanın esasını oluşturmuştur. Nitelikli ürün özelliklerinin ortaya çıkarılmasına:

- Döküm için kullanılan kumun köşeliliği, EN-GJS400-18U-LT malzemesinin elde edilmesinde etkin rol oynadığı ve reçineli kalıplama yapılmasının gerektiği,
- Geleneksel reçineli kum kalıba döküm yöntemlerine alternatif olabilecek dolu kalıba döküm tekniklerinde kullanılan yüksek yoğunluklu polistren malzemedeki modelin yapıldığı,
- İndüksiyonla yapılan ergitme sonucu sıvı metalin kimyasal kompozisyonu ile dökülmüş malzemenin kompozisyonu arasındaki farkın özelliklerde etkin rol oynadığı, karbon eşdeğerinin $4,1 \pm 0,05$ olabileceği,
- Yüksek aralıkta Sorel piki kullanılmasının gerektiği ve aşılamanın %5,6 Mg içeren FeSiMg ile yapılmasının mümkün olacağı, aşılama seçiminde de baryum esaslı aşılama ajanlarının kullanılması,
- Döküm zamanının kısa ve 10 dakikadan kısa olmasının gerektiği, seçilecek olan sıcaklığın ortalama değerinin 1180 ± 20 °C olmasını gerektiği,
- Ferritik doku elde etmek için modül önemli kısıttır 2,53 cm modüle sahip döküm bloğu için 360 dakika civarında bir soğutma ve kalıp bozma süresi olmalıdır, 5,27 cm modüle sahip esas parçadaki soğutma ve kalıp bozma süresi “over night” diye tabir edilen yaklaşık 12-14 saat arası bir kalıp bozma süresi öngörüldüğü,
- Ferritik doku elde edecek kadar ve serbest karbonun grafit küreleri oluşturmasına izin verecek kadar yayılım süresine ihtiyacı vardır bu yüzden katılmanın oldukça yavaş

olması gerektiği ve bunun için de 3 °C/dak soğutma hızı gerektiği, 5,27 cm module sahip esas parçanın da 1,5-2 °C/dak mertebesinde soğutma hızı gerektiği,

- Dayanım ve patent hakkı almak için yapılan şekilsel tasarım dökümün metalürjik parametrelerini etkilediği ve önemli tezatlıklar içerdiği,
- Ferritik dokuda %5'in altında oluşabilecek perlitin mekanik metalürjik özellikler üzerinde önemli bir olumsuzluk meydana getirmeyeceği,
- Yapılan deneyler sonucu ilgili standartlarda(EN1563) belirtilen 400 MPa çekme dayanımı beklenmektedir deneysel sonuçlardan elde edilen değer 459 MPa çekme dayanımı olduğu,
- Akma dayancı standartlardaki asgari 240 MPa beklenirken deneylerden çıkan sonuç 310 Mpa akma dayanımı elde edildiği,
- Avrupa normu EN 1563 ile ASTM E23'e göre uygulanan Charpy V-çentikli darbe dayancı için 10J/cm² darbe dayanımı öngörülmektedir deneysel verilerden 10J/cm²'lik darbe dayanımı olduğu,
- Dökme demir olduğu için uygulanması gereken sertlik testi olan Brinell sertlik testine 150 HB sertlik standart değerler olup deneylerden çıkan sonuç olan 150 HB sertlik değeri bu malzemeyi çalışma şartları içerisinde güvenli bir malzeme olduğu,

belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında uygulanan yöntemler ve elde edilen deneysel veriler kullanılarak boyutsal tasarım ölçüleri değiştirilerek metalürjik parametrelerdeki değişimler gözlemlenmelidir. Ortalama 250kg ağırlık için elde edilen deneysel veriler malzeme standardında ön görülen sınır değerler içinde kalınarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu veriler 2 – 2,5 – 3 – 4 – 6,3 – 8 ve 10 ton döküm için yapılarak döküm ağırlığının artmasıyla meydana gelecek değişimler araştırılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Almansour, A., Matsugi K., Hatayama T. ve Yanagisawa, O., (1995), "Simulating Solidification of Spheroidal Graphite Cast Iron of Fe-C-Si System", Materials Transactions, pp. 109 to 1495.
- Aran, A., (1989), "Metal Döküm Teknolojisi", İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Ofset Atölyesi.
- ASTM, (2004), A874/A 874M – 98, "Standard Specification for Ferritic Ductile Iron castings Suitable for Low-Temperature Service".
- Baydoğan, M., (1996), "GGG 50 ve GGG 80 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Abrasif Aşınma Davranışına Östemperleme Isıl İşleminin Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Beeley, P.,(2001), "Foundry Technology", Butterworth.
- Bilici, M.K., (2004), "Alaşımız Dökme Demirlerin Aşınma Özelliği", Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri.
- Bramfitt, B.L. ve Bescoter, A.O., (2001), "Metallographer's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels", ASM Publications.
- Brown, J.R., (2000), "Foseco Ferrous Foundryman's Handbook".
- Bockus, S. ve Zaldarys, G., (2008), "Influence of The Section Size and Holding Time on The Graphite Parameters of Ductile Iron Production", The Metalurgija Journal.
- Bouse, G.K., Parolini, J., Rojek, N. ve Zhou, C., (2010), "Quality Requirements for General Electric Ductile Iron Castings Exceeding 10 Tons Used for Wind and Gas Turbine Components – Revisited", The Ductile Iron Magazine, Issue 1
- Cabanne, P.M., (2004), "Wind Energy: A Market for High Quality Ductile Iron Castings", 66th World Foundry Congress, İstanbul.
- Çavuşoğlu, E., (1992), "Döküm Teknolojisi I". İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul.
- Çelik, Ö., (2001), "Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışları", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Davis, J.R., (1996), Classification and Basic Metallurgy of Cast Irons, Cast-Irons-ASM Speciality Handbook, ASM International, Materials Park, OH.
- Dikeç, F., (1971), "Magnezyum ile Yapılan Küresel Grafitli Dökme Demir Üretiminde Bileşim ve Bazı Döküm Şartlarının Etkileri", Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Donelan, P., (2000), "Modeling Microstructural and Mechanical Properties of Ferritic Ductile Cast Iron", Materials Science and Technology.

Erdoğan, M., (2000), "Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özelliği", Nobel Yayın Dağıtım, Cilt 1, Ankara, Türkiye.

"Fading Nodularity in Ductile Iron", Technical Information 26, Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, 2001.

"Fading of Inoculation", Technical Information 6, Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, 2001.

Fidaner, S., Çelik, S., Doğmuş, H. ve Süzen, C.,(1979), "Genel Dökümcülük Bilgisi", Milli Eğitim Basımevi, İstanbul.

Flemings M. C., (1976), "Döküm ve Katılaştırma Tekniği", Mcgraw-Hill College, USA.

Forrest, R.D., (2006), "Meeting Low Temperature Property Specifications in Ductile Iron", Suggestions for Ductile Iron Production, Technical Sheet 82.

Forrest, R.D., (2006), "Meeting Low Temperature Property Specifications in Ductile Cast Iron", Sorelmetal.

Gagne, M., (2004), "Ductile Iron and Wind Energy: A Symbiotic Relationship", Rio Tinto Iron & Titanium Inc., U.S.

Hartung, C. ve Hartung, C., (2003), "Recovery of Magnesium in a Ductile Iron Process".

Henych, I., (1998), "Trends in Melting and Magnesium Treatment of Ductile Iron Melt", Keith Mills World Symposium on Ductile Iron.

"Inoculant Alloy Composition", Technical Information 23, Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, 2001.

"Inoculation of Heavy Section Castings", Technical Information 36, Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, 2001.

"Inoculation Practices", Technical Information 4, Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, 2001.

Jepsen, E. ve Popovski, V., (2007), "Magnesium Recovery and Addition Rate in Tundish-Treated Ductile Iron", DIS.

Kökden, U., (1998), "GGG 60 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirde Östemperleme Isıl İşleminin Çekme, Yorulma ve Aşınma Özelliklerine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Labrecque, C. ve Gagné, M., (1998), "Review Ductile Iron: Fifty Years of Continuous Development", Canadian Metallurgical Quarterly.

"Magnesium Treatment Processes", Technical Information 9, Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, 2001.

Mullins, J., (2006), "Basic Ductile Iron Alloying", Sorelmetal.

- Mullins, J., (1998), "Ductile Iron Data for Design Engineers", Rio Tinto Iron & Titanium, Montréal.
- Mullins, D., (2006), "Casting Shake-Out or "Is It Cold Enough Yet"?", Sorelmetal.
- Olsen, S.O., Skaland, T. ve Hartung C., (2004), "Inoculation of Grey and Ductile Iron: A Comparison of Nucleation Sites and Some Practical Advises", WFC.
- Radzikowska, J.M., (2004), Metallography and Microstructures of Cast Iron, Metallography and Microstructures, 9:1282-1384, ASM Handbook, ASM International.
- Roedter, H. ve Gagné, M., (2003), "Ductile Iron for Heavy Section Wind Mill Castings: An European Experience", Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron.
- Riposan, I., Chisamera, M. ve Stan, S., (2010), "Performance of Heavy Ductile Iron Castings for Windmills", China Foundry, 7(2).
- Sağlam, C., (2009), "Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Aşınma Direncine Alaşım Elementleri İlavesinin Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Skaland, T., (2001), A New Approach to Ductile Iron Inoculation, AFS Transactions.
- Skaland, T., (2003), "A New Method for Chill and Shrinkage Control in Ladle Treated Ductile Iron", Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron.
- Skaland, T., (2005), "Nucleation Mechanisms in Ductile Iron", AFS.
- Tan, E., (2005), "Dökme Demirden İmal Edilen Hadde Merdanelerinin Aşınma Davranışına Bakır Katkı Oranının Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Till, K.R., (2010), "Design Overview of Large Ductile Iron Casting Wind Turbine Generator Components", The Ductile Iron Magazine, Issue 1.
- TSE, (2000), TS 526 EN 1563/2000 – Dökümler – Küresel Grafitli Dökme Demirler.
- Uebrick, S., (2010), "Wind Energy Castings - Metallurgical Challenge", DIS Heavy Section Ductile Iron Conference.
- Yüksel, M., (2001), "Malzeme Bilgisi", TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Ankara.
- Yüksel, Ç. ve Şen, Ö., (2009), "Türkiye'nin Rüzgâr Enerjisi Türbini İhtiyacı ve Kalın Kesitli Rüzgâr Türbin Rotor Göbeğinin Sfero Dökümden Üretilmesinin Prensipleri", Döküm ve Çevre Sempozyumu.

İnternet Kaynakları

- [1] <http://www.owl.net.rice.edu> alındığı tarih 12.04.2009.
- [2] <http://www.foundry.elkem.com> alındığı tarih 25.08.2009.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	25.01.1984	
Doğum yeri	İzmir	
Lise	1995-2002	Bergama Akif Ersezgin Anadolu Lisesi Balıkesir Rahmi Kula Anadolu Lisesi
Lisans	2003-2008	Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı Kurumlar

2007-2008	Şef - Eksen Çelik
2008-2009	Üretim Şefi – Önmetal Döküm San.
2010-.....	Araştırma Görevlisi - Atatürk Üniversitesi