

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÖKME DEMİRLERDE TERMAL ANALİZ VE
MATEMATİKSEL YAKLAŞIM**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Müh. Lütfü Cihan AYTAÇOĞLU

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜH.
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ahmet ÖZEL**

Ocak 2012

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖKME DEMİRLERDE TERMAL ANALİZ VE
MATEMATİKSEL YAKLAŞIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Müh. Lütfü Cihan AYTAÇOĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ


Bu tez 9 / 01 / 2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Doç. Dr. Ahmet Özel

Jüri Başkanı


Prof. Dr. Süleyman Can
KURNAZ

Üye


Yrd. Doç. Dr. Erdal
KARADENİZ

Üye

ÖNSÖZ

Çalışmalarında bana destek olan tez danışmanım değerli öğretim üyesi Sayın Doç Dr. Ahmet ÖZEL'e, deneylerin gerçekleştirilmesinde bana yardımcı olan yüksek mühendis L. Cenk KUMRUOĞLU'na, İntuğ Döküm çalışanlarına ve yöneticilerine, Kırtek Döküm çalışanlarına ve yöneticilerine teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarında bana manevi destek olan arkadaşlarım Alper DURSUN, Onur MEYDAN ve Sefa KÜÇÜK'e teşekkür ederim

Son olarak tez çalışmamda bana yardımlarını esirgemeyen Yasemin AYDIN'a TANYU ailesine, amcam Vecdet AYTAÇOĞLU, babam Vedat AYTAÇOĞLU ve annem Yüksel AYTAÇOĞLU'na teşekkürleri bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar.....	xvi
ÖZET.....	xviii
SUMMARY.....	xix

BÖLÜM 1.

DÖKME DEMİRLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

1.1. Giriş.....	1
1.2. Dökme Demirin Çeşitleri.....	3
1.2.1. Lamel grafitli dökme demir.....	4
1.2.1.1. A Tipi gri dökme demir.....	5
1.2.1.2. B Tipi gri dökme demir.....	6
1.2.1.3. C Tipi gri dökme demir.....	6
1.2.1.4. D Tipi gri dökme demir.....	7
1.2.1.5. E Tipi gri dökme demir.....	8
1.2.2. Küresel Grafitli Dökme Demir	8
1.2.2.1. Ferritik küresel grafitli dökme demirler.....	9
1.2.2.2. Perlitik - Ferritik küresel grafitli dökme demirler....	10
1.2.2.3. Perlitik küresel grafitli dökme demirler	11
1.2.2.4. Temperlenmiş küresel grafitli dökme demir.....	11
1.2.2.5. Ostenitik küresel grafitli dökme demirler.....	12
1.2.3. Beyaz dökme demirler.....	12

1.2.4. Temper dökme demir.....	13
1.2.5. Silindirik dökme demir.....	14
1.3. Dökme demir standartları.....	16

BÖLÜM 2.

DÖKME DEMİRLERDE KATILAŞMA

2.1. Lamel Grafitli Dökme Demirde Katılmaşma.....	20
2.1.1. Karbon eşdeğeri, doymuşluk derecesi, Sıvılaşma Eşdeğeri ...	20
2.1.2. Stabil olmayan demir - demirkarbür sistemi.....	22
2.1.3. Demir - karbon - silisyum alaşımının katılmaşması.....	24
2.1.4. Lamel grafitli dökme demirdeki elementlerin katılmaşmaya etkisi.....	25
2.1.4.1. Karbon.....	25
2.1.4.2. Silisyum.....	25
2.1.4.3. Kükürt ve manganez.....	26
2.1.4.4. Fosfor.....	28
2.1.4.5. Nikel.....	29
2.1.4.6. Molibden.....	29
2.1.4.7. Krom.....	29
2.1.4.8. Bakır.....	30
2.1.4.9. Alüminyum.....	30
2.1.4.10. Titanyum.....	30
2.1.4.11. Kurşun.....	30
2.1.4.12. Bizmut.....	30
2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Katılmaşma.....	33
2.2.1. Küresel grafitin kristalleşmesinde öne sürülen teoriler.....	35
2.2.2. Küresel grafitli dökme demirde aşılamanın etkisi.....	39
2.2.3. Elementlerin küresel grafitli dökme demire etkisi.....	41
2.2.3.1. Karbon.....	41
2.2.3.2. Silisyum.....	42
2.2.3.3. Manganez.....	42

2.2.3.4. Fosfor.....	42
2.2.3.5. Kükürt.....	43
2.2.3.6. Bakır.....	43
2.2.3.7. Kalay.....	43
2.2.3.8. Magnezyum.....	43
2.2.3.9. Nikel.....	44
2.2.3.10. Krom.....	44
2.3. Silindirik Dökme Demirin Katılaşması.....	47
2.3.1. Alaşım elementlerinin vermiküler grafitli dökme demire etkisi.....	47
2.3.1.1. Magnezyum.....	47
2.3.1.2. Silisyum.....	48
2.3.1.3. Kükürt.....	48
2.3.1.4. Titanyum.....	51
2.3.1.5. Fosfor.....	51
2.3.1.6. Manganez.....	52
2.3.1.7. Bakır.....	52

BÖLÜM 3.

DÖKME DEMİRLERDE AŞILAMA

3.1. Lamel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi.....	53
3.1.1. Kesit boyutları ve grafit tipi.....	53
3.1.2. Aşırı ısınma.....	53
3.1.3. Aşılama (İnokülasyon).....	53
3.1.4. Çil kontrolü.....	55
3.1.5. Döküm sıcaklığı ve akışkanlık.....	57
3.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi.....	59
3.2.1. Küreleştiricilerden Mg'nın etkisi.....	59
3.2.2. Küreleştirme etkisinin zamanla azalması.....	61
3.2.3. Potada küreleştirme yöntemleri.....	62
3.2.3.1. Açık pota.....	63

3.2.3.2. Sandwich yöntemi.....	63
3.2.3.3. Kapaklı pota yöntemi.....	65
3.2.3.4. İbrikli pota yöntemi.....	67
3.2.3.5. Flotret yöntemi.....	67
3.2.3.6. Vorteks yöntemi.....	69
3.2.3.7. Inmold yöntemi.....	69
3.2.3.8. Daldırma yöntemi.....	71
3.2.3.9. MAP yöntemi.....	72
3.2.3.10. Konverter yöntemi.....	72
3.2.3.11. Enjeksiyon.....	73
3.2.3.12. Basınçlı pota.....	74
3.2.4. Küresel grafitli dökme demirlerde porozite oluşumu ile ilgili teoremler.....	74
3.2.5. Küresel grafitli dökme demirde normal olmayan grafit şekilleri.....	78
3.3. Silindirik Dökme Demirlerin Üretimi.....	80
3.3.1. Bekleme süresi ve döküm sıcaklığının etkisi.....	80
3.3.2. Soğutma hızının etkisi.....	81
3.3.3. Kimyasal bileşimin etkisi.....	81
3.3.4. Vermiküler grafitli dökme demirlerin mikroyapısı.....	82

BÖLÜM 4.

TERMAL ANALİZ

4.1. Termal Analizin Temel Prensipleri.....	83
4.1.1. Lamel grafitli dökme demirde termal analiz.....	84
4.1.1.1. CEL ve SC belirlemede kullanılan hesaplamalar.....	87
4.1.1.2. Karbon içeriğinin belirlenmesi.....	88
4.1.1.3. Silisyum içeriğinin belirlenmesi.....	89
4.1.1.4. Ötektik sıcaklığındaki alt soğuma.....	91
4.1.1.5. Mekanik özelliklerin alt soğumayla olan ilişkisi.....	92
4.1.2. Küresel grafitli dökme demirde termal analiz.....	92
4.2. Soğuma Eğrisinin Parametreleri.....	94

4.3. Soğuma Hızı Grafiğinin Parametreleri.....	97
4.4. Termal Analiz ile Isı İletim Katsayısı Arasındaki İlişki.....	98
4.5. Aktif Karbon Eşdeğeri	100
4.6. Döküm Sıcaklığı ve Yoğunluk Arasındaki İlişki.....	103
4.7. Ötektik Noktanın Termal Analizde Gösterilmesi.....	104
4.8. Tersine Beyaz Katılma	106
4.9. Termal Analizde Sıvı Besleme ve Grafit Genleşmesi.....	109

BÖLÜM 5.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Deneysel Numuneler.....	112
5.1.1. Bir nolu dökümün hazırlanması.....	112
5.1.2. İki nolu dökümün hazırlanması.....	114
5.1.3. Üç nolu dökümün hazırlanması.....	115
5.1.4. Dört nolu dökümün hazırlanması.....	116
5.2. Deneylerde Kullanılan Cihazlar.....	117
5.2.1. Termal analiz.....	117
5.2.2. Kesme cihazı.....	120
5.2.3. Zımparalama ve parlatma cihazı.....	121
5.2.4. Optik mikroskop cihazı.....	121
5.2.5. Sertlik cihazı.....	122

BÖLÜM 6.

DENEYSEL SONUÇLAR VE MATEMATİKSEL YAKLAŞIM

6.1. Dökümlerde Elde Edilen Termal Analiz Verileri.....	123
6.1.1. Bir nolu dökümde elde edilen sonuçlar.....	123
6.1.2. İki nolu dökümde elde edilen sonuçlar.....	126
6.1.3. Üç nolu dökümde elde edilen sonuçlar.....	129
6.1.4. Dört nolu dökümde elde edilen sonuçlar.....	131
6.2. Metalografik Sonuçlar.....	134
6.2.1. Bir nolu döküm numunelerinin mikroyapı fotoğrafları ve image analizi.....	134

6.2.2. İki nolu döküm numunelerinin mikroyapı fotoğrafları ve image analizi.....	136
6.2.3. Üç nolu döküm numunelerinin mikroyapı fotoğrafları ve image analizi.....	138
6.2.4. Dört nolu döküm numunelerinin mikroyapı fotoğrafları ve image analizi.....	140
6.3. Numunelerin Sertlik Değerleri.....	141
6.4. Termal Analizin Matematiksel Yaklaşımı.....	142

BÖLÜM 7.

SONUÇLARIN İRDELENMESİ VE ÖNERİLER

7.1. Bir Numaralı Dökümde Elde Edilen Sonuçlar.....	155
7.2. İki Numaralı Dökümde Elde Edilen Sonuçlar.....	158
7.3. Üç Numaralı Dökümde Elde Edilen Sonuçlar.....	159
7.4. Dört Numaralı Dökümde Elde Edilen Sonuçlar.....	161
7.5. Öneriler.....	163

KAYNAKLAR.....	164
----------------	-----

ÖZGEÇMİŞ.....	167
---------------	-----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ACEL	: Aktif Karbon Eşdeğeri
CEL	: Karbon Eşdeğeri
AISI	: Amerika demir ve çelik enstitüsü
ASTM	: Amerika malzemeler ve testler derneği
CAD	: Bilgisayar destekli tasarım
°C	: Sıcaklık birimi Santigrat derece
EPS	: Genişletilmiş polistyrene köpük
GGG	:Küresel grafitli dökme demir
GG	: Lamel grafitli dökme demir
Kg	: Kilogram
Mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
SEM	: Taramalı electron mikroskobu
Sn, (s)	: Saniye
TL	: Likidüs sıcaklığı
TS	: Solidüs sıcaklığı
3D	: Üç boyut
%	: Yüzde
Sc	:Saturation degree
HB	: Brinel sertlik değeri birimi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Fe-C diyagramının gösterilişi.....	1
Şekil 1.2.	Değişik tipteki dökme demirlerde karbon ve silisyum miktarları..	4
Şekil 1.3.	Gri dökme demirde standart lamel boyutlarının gösterilişi (x100)	5
Şekil 1.4.	ASTM' ye göre A-Tipi grafit şekli.....	6
Şekil 1.5.	ASTM' ye göre B-Tipi grafit şekli.....	6
Şekil 1.6.	ASTM' ye göre C-Tipi grafit şekli	7
Şekil 1.7.	ASTM' ye göre D-Tipi grafit şekli	8
Şekil 1.8.	ASTM' ye göre E-Tipi grafit şekli	8
Şekil 1.9.	KGDD de standart grafit nodul boyutları.....	9
Şekil 1.10.	Ferritik küresel grafitli dökme demir.....	10
Şekil 1.11.	Perlitik-ferritik küresel grafitli dökme demir.....	10
Şekil 1.12.	Perlitik küresel grafitli dökme demir	11
Şekil 1.13.	Temperlenmiş martenzitik küresel grafitli dökme demir	12
Şekil 1.14.	Ostenitik küresel grafitli dökme demir	12
Şekil 1.15.	Beyaz dökme demir mikroyapısının gösterilişi	13
Şekil 1.16.	Temper dökme demir mikroyapısının gösterilişi.....	14
Şekil 1.17.	Vermiküler grafitli dökme	15
Şekil 2.1.	Fe-Fe ₃ C ve Fe-C diyagramında oluşacak fazların gösterilişi	23
Şekil 2.2.	Artan silisyum miktarıyla Fe-C diyagramının değerleri değişimi.	24
Şekil 2.3.	Gri dökme demirde manganez - Sülfür enklüzyonları.....	27
Şekil 2.4.	Frekans hipotezine göre bir grafit küresinin büyümesindeki muhtemel kademeler.....	36
Şekil 2.5.	Yüzey enerjisi teorisine göre grafitin küresel bir biçimde büyüme olayı.....	36
Şekil 2.6.	Grafitin faz ve prizmatik yüzeyi üzerine konan kükürtlü ve magnezyumla işlem görmüş demir eriyik damlacığı.....	37

Şekil 2.7.	Faz sınırı teorisine göre küresel grafitin büyüme kademeleri.....	39
Şekil 2.8.	Aşılama durumuna sıcaklığın etkisi.....	40
Şekil 2.9.	1370°C uygulanan iki aşılama yöntemini karşılaştırılması.....	40
Şekil 2.10.	Kükürt oranının grafit yapısına etkisinin gösterilişi.....	50
Şekil 3.1.	Üç tip çil derinliği kontrol örneği.....	55
Şekil 3.2.	Çil derinliği ile karbon ekivalent arasındaki ilişkinin yaklaşık gösterilişi.....	56
Şekil 3.3.	Çil test numunelerinin kalıptaki pozisyonları.....	56
Şekil 3.4.	Aşılama miktarının çil derinliğine etkisi.....	57
Şekil 3.5.	Lamel, Kompakt ve Küresel grafitli dökme demirlerden dökülmüş spiral akışkanlık test numunelerinin gösterilişi.....	59
Şekil 3.6.	Magnezyumun küreselleşmeye etkisi.....	60
Şekil 3.7.	Magnezyum etkisinin işlem süresi ile değişimi.....	62
Şekil 3.8.	Küresel grafitli dökme demir üretiminde açık pota yöntemi.....	63
Şekil 3.9.	Sandwich potası yönteminin gösterilişi.....	64
Şekil 3.10.	Mg faydalanma yüzdesinin işlem sıcaklığı ile değişimi.....	65
Şekil 3.11.	BCIRA – Kapaklı pota yönteminin gösterilişi.....	66
Şekil 3.12.	İbrikli pota yönteminin gösterilişi.....	67
Şekil 3.13.	Flotret yönteminin kademeli olarak gösterilişi.....	68
Şekil 3.14.	Inmold yönteminin gösterilişi.....	70
Şekil 3.15.	Daldırma yönteminin gösterilişi.....	71
Şekil 3.16.	GF Fischer Konverter yönteminin gösterilişi.....	73
Şekil 3.17.	Enjeksiyon yönteminin şeması.....	73
Şekil 3.18.	Patlamış küresel grafitin gösterilişi.....	78
Şekil 3.19.	Chunky tipi grafitin gösterilişi.....	79
Şekil 4.1.	İki faz diyagramında soğuma eğrisinin gösterilişi.....	83
Şekil 4.2.	Fe-C diyagramında stabil ve metastabil katılaşmanın gösterilişi...	84
Şekil 4.3.	Hipoötektik kompozisyona sahip dökme demirin, stabil sistemde oluşturduğu soğuma eğrisinin gösterilişi.....	86
Şekil 4.4.	Hipoötektik kompozisyona sahip dökme demirin, metastabil sistemde oluşturduğu beyaz katılaşmanın soğuma eğrisinde gösterilişi.....	86
Şekil 4.5.	Aktif karbon eşitliği ve likidüs arasındaki ilişkinin gösterilmesi...	87

Şekil 4.6.	Beyaz katılaşmanın ötektik çizgisinde gösterilişi.....	88
Şekil 4.7.	TL(likidüs) ve TS(solidus) sıcaklıklarının %C oranıyla olan ilişkisinin gösterilişi.....	89
Şekil 4.8.	Farklı fosfor oranlarıyla meydana gelen TS ve %Si arasındaki değişimin gösterilmesi.....	90
Şekil 4.9.	Soğuma eğrisinin gösterilişi.....	94
Şekil 4.10.	Soğuma hızının birinci türevde gösterilişi.....	97
Şekil 4.11.	Grafit 2 faktörünün hesaplanmasında, etkin bölgenin gösterilişi...	98
Şekil 4.12.	Kır dökme demir, Sfero ve vermiküler dökme demirin ısı iletim katsayılarının karşılaştırılması.....	100
Şekil 4.13.	Termal modülün aktif karbon eşdeğerine olan etkisi.....	102
Şekil 4.14.	Sıcaklık ve yoğunluk arasındaki ilişkinin gösterilişi.....	103
Şekil 4.15.	Ötektik noktanın düşük ötektik sıcaklığıyla olan ilişkisinin gösterilişi.....	104
Şekil 4.16.	Aktif karbon eşdeğerinin soğuma zamanı karşısındaki değişimleri.....	105
Şekil 4.17.	Tipik bir tersine beyaz katılaşma ve 2. tip iğne şeklindeki karbürler.....	107
Şekil 4.18.	Yüksek Mn-miktarı ve birikimi nedeni tane sınırı karbürler.....	107
Şekil 4.19.	Çil eğiliminin soğuma eğrisi üzerinde gösterilmesi.....	108
Şekil 4.20.	Ters çil eğiliminin soğuma eğrisi üzerinde gösterilişi.....	108
Şekil 4.21.	Sürekli (sol) ve süreksiz (sağ) grafit genleşmesinin gösterilişi.....	110
Şekil 5.1.	Üç nolu dökümde kullanılan quik kapların gösterilişi.....	116
Şekil 5.2.	Quik kap çizimi ve fotoğrafının gösterilişi.....	118
Şekil 5.3.	Quik Kap Tutucusunun gösterilişi.....	119
Şekil 5.4.	Numune boyutları ve fotoğrafı.....	119
Şekil 5.5.	Atas yazılımı ve dataloggarın bulunduğu koruyucu kasa.....	120
Şekil 5.6.	Disk kesme cihazının gösterilişi.....	120
Şekil 5.7.	Metalografik parlatma cihazı.....	121
Şekil 5.8.	Optik mikroskobun görüntüsü.....	121
Şekil 5.9.	Sertlik test cihazının görüntüsü.....	122
Şekil 6.1.	Bir nolu dökümde elde edilen soğuma eğrileri.....	124
Şekil 6.2.	Bir nolu dökümde elde edilen soğuma hızı eğrileri.....	125

Şekil 6.3.	İki nolu dökümde elde edilen soğuma eğrileri	127
Şekil 6.4.	İki nolu dökümde elde edilen soğuma hızı eğrileri.....	128
Şekil 6.5.	Üç nolu dökümde elde edilen soğuma eğrileri.....	129
Şekil 6.6.	Üç nolu dökümde elde edilen soğuma hızı eğrileri.....	131
Şekil 6.7.	Dört nolu dökümde elde edilen soğuma eğrileri.....	132
Şekil 6.8.	Dört nolu dökümde elde edilen soğuma hızı eğrileri.....	133
Şekil 6.9.	Bir nolu dökümde elde edilen mikroyapı görüntüsü.....	134
Şekil 6.10.	İki nolu dökümde elde edilen mikroyapı görüntüsü.....	136
Şekil 6.11.	Üç nolu dökümde elde edilen mikroyapı görüntüsü.....	138
Şekil 6.12.	Dört nolu dökümde elde edilen mikroyapı görüntüsü.....	140
Şekil 6.13.	M1, M2, M3, M4 numunelere ait soğuma eğrileri.....	143
Şekil 6.14.	M1, M2, M3, M4 numunelerinin soğuma hızı eğrileri.....	145
Şekil 6.15.	M1, M3, M4 numunelerine ait soğuma eğrilerinin, mikroyapı görüntüleriyle beraber gösterilmesi.....	148
Şekil 6.16.	M1 numunesine ait ATAS programındaki soğuma hızı eğrisinin, $\frac{dT}{dt}$ fonksiyonundan elde edilen eğrinin birlikte gösterilmesi.....	149
Şekil 6.17.	M2 numunesine ait ATAS programındaki soğuma hızı eğrisinin, $\frac{dT}{dt}$ fonksiyonundan elde edilen eğrinin birlikte gösterilmesi.....	149
Şekil 6.18.	M3 numunesine ait ATAS programındaki soğuma hızı eğrisinin, $\frac{dT}{dt}$ fonksiyonundan elde edilen eğrinin birlikte gösterilmesi.....	150
Şekil 6.19.	M4 numunesine ait ATAS programındaki soğuma hızı eğrisinin, $\frac{dT}{dt}$ fonksiyonundan elde edilen eğrinin birlikte gösterilmesi.....	150
Şekil 6.20.	M1 numunesine ait soğuma eğrisinin ATAS programıyla birlikte gösterilmesi.....	151
Şekil 6.21.	M2 numunesine ait soğuma eğrisinin ATAS programıyla birlikte gösterilmesi.....	151
Şekil 6.22.	M3 numunesine ait soğuma eğrisinin ATAS programıyla birlikte gösterilmesi.....	152
Şekil 6.23.	M4 numunesine ait soğuma eğrisinin ATAS programıyla birlikte	

	gösterilmesi.....	152
Şekil 7.1.	Bir nolu dökümde elde edilen soğuma eğrilerinin mikroyapılarla, beraber gösterilişi.....	155
Şekil 7.2.	Numune 1.1'in tellürlü kaptan oluşturduğu soğuma eğrisi.....	157
Şekil 7.3.	İki nolu dökümde elde edilen soğuma eğrilerinin mikroyapılarla, beraber gösterilişi.....	158
Şekil 7.4.	Üç nolu dökümde elde edilen soğuma eğrilerinin mikroyapılarla, beraber gösterilişi.....	160
Şekil 7.5.	Dört nolu dökümde elde edilen soğuma eğrilerinin, mikroyapılarla beraber gösterilişi.....	162

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	Lamel grafitli dökme demirin sınıflandırılması.....	17
Tablo 1.2.	Küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	18
Tablo 1.3.	Temper dökme demirlerin sınıflandırılması.....	19
Tablo 2.1.	Elementlerin lamel grafitli dökme demire etkilerinin gösterilişi.	32
Tablo 2.2.	Elementlerin küresel grafitli dökme demire etkileri.....	45
Tablo 2.3.	Elementlerin küresel grafitli dökme demire etkileri(devamı).....	46
Tablo 3.1.	Ticari aşılایıcıların kimyasal kompozisyonu.....	54
Tablo 3.2.	Lamel grafitli dökme demirin döküm sıcaklıkları.....	58
Tablo 3.3.	Inmold yönteminde küreselleştirici miktarının artmasıyla nodul sayısındaki değişimin gösterilişi.....	70
Tablo 3.4.	Reaksiyon odası Geometrisinin değerleri.....	71
Tablo 4.1.	Kır dökme demir, Sfero ve vermiküler dökme demirin çeşitli sıcaklıklardaki ısı iletim katsayısı.....	99
Tablo 5.1.	Bir nolu dökümün sarj malzemeleri ve yüzdeleri.....	113
Tablo 5.2.	Aşılama işleminde kullanılan Ultraseed aşılایıcının tane boyut dağılımı ve malzemenin kimyasal bileşimi.....	113
Tablo 5.3.	Birinci dökümde elde edilen numunelerin aşılایıcı miktarları ve yüzdeleri.....	114
Tablo 5.4.	İkinci dökümün sarj malzemeleri ve yüzdeleri.....	114
Tablo 5.5.	Kullanılan Sorel ve H2 piklerinin kimyasal analizi.....	114
Tablo 5.6.	Sfero dökümünde kullanılan çelik hurdanın kimyasal analizi....	114
Tablo 5.7.	İkinci dökümde elde edilen numunelerin aşılایıcı ve titanyum miktarları.....	115
Tablo 5.8.	İki nolu dökümde üretilen numunelerin kimyasal analizi.....	115
Tablo 5.9.	Üçüncü dökümün sarj malzemeleri ve yüzdeleri.....	115
Tablo 5.10.	Üç nolu dökümün kimyasal analizi.....	116

Tablo 5.11.	Dört nolu dökümün sarj malzemeleri ve yüzdeleri.....	117
Tablo 5.12.	Dört nolu dökümün kimyasal analizi.....	117
Tablo 6.1.	Bir nolu dökümde elde edilen termal analiz dataları.....	123
Tablo 6.2.	İki nolu dökümde elde edilen termal analiz dataları.....	126
Tablo 6.3.	Üç nolu dökümde elde edilen termal analiz dataları.....	129
Tablo 6.4.	Dört nolu dökümde elde edilen termal analiz dataları.....	131
Tablo 6.5.	Birinci dökümde üretilen numunelerin görüntü analizi.....	135
Tablo 6.6.	İkinci dökümde üretilen numunelerin görüntü analizi.....	137
Tablo 6.7.	Üçüncü dökümde üretilen numunelerin görüntü analizi.....	139
Tablo 6.8.	Dördüncü dökümde üretilen numunelerin görüntü analizi.....	141
Tablo 6.9.	Bir nolu döküm numunelerinin sertlik değerleri.....	141
Tablo 6.10.	İki nolu döküm numunelerinin sertlik değerleri.....	142
Tablo 6.11.	Üç nolu döküm numunelerinin sertlik değerleri.....	142
Tablo 6.12.	Dört nolu döküm numunelerinin sertlik değerleri.....	142
Tablo 6.13.	M1 numunesinin sayısal verilerinin ATAS ın sayısal verileriyle beraber gösterilişi.....	153
Tablo 6.14.	M2 numunesinin sayısal verilerinin ATAS ın sayısal verileriyle beraber gösterilişi.....	153
Tablo 6.15.	M3 numunesinin sayısal verilerinin ATAS ın sayısal verileriyle beraber gösterilişi.....	153
Tablo 6.16.	M4 numunesinin sayısal verilerinin ATAS ın sayısal verileriyle beraber gösterilişi.....	154

ÖZET

Anahtar kelimeler: Dökme demirler, Soğuma eğrisi, Termal analiz, Aktif karbon eşdeğeri

Mekanik özelliklerinin geniş aralıklarda kullanılması ve üretim maliyetinin düşük olması, dökme demirleri malzeme seçiminde tercih edilen mühendislik malzemesi haline getirmektedir. Dünya döküm üretiminin yarısından çoğunu kapsayan dökme demirler, kullanım alanının genişlemesiyle üretim kapasitelerini arttırmaktadır.

Dökme demir kullanımının artması, teknolojik gelişmeler, kaliteli döküm parçalarına olan talebi arttırmıştır. Üreticinin kaliteli dökme demir üretme isteği, termal analizi ortaya çıkarmıştır. İş parçası üretilmeden önce malzemede ortaya çıkacak sorunlar termal analiz ile tespit edilip, üreticiye sorunun iyileştirilmesi için çözümler sunabilmektedir. Böylelikle malzeme üretiminden doğan parça hataları ve oluşacak iş kaybı önlenmiş, maliyetler düşürülmüş olacaktır.

Bu çalışmada dökme demirlerin grafit şekli ve dağılımları değiştirilerek ortaya çıkan karakteristik soğuma eğrileri yorumlanmış ve parametreler incelenmiştir. Ayrıca mevcut termal analiz yazılımları dışında, soğuma eğrilerine matematiksel yaklaşım yapılarak, elde edilen veriler termal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

THERMAL ANALYSIS OF CAST IRON AND MATHEMATICAL APPROACH TO THERMAL ANALYSIS

SUMMARY

Keywords: Cast irons, Cooling curve, Thermal analysis, Active carbon equivalent

The fact that cast iron has a broad range of mechanical attributes and its low cost of production makes it a preferable option in engineering materials. Iron casting, which comprises more than half of the world's casting production, has been increasing in capacity as its popularity and production demand escalates.

The increase in the production of cast iron and technologic development resulted in more demand for quality cast iron products. Therefore, thermal analysis process was developed for use of the manufacturers. This process allows producers to identify potential complications before the production stage and provides them with solutions to ease the production. Consequently, manufacturing defects and costs will decrease while efficiency increases.

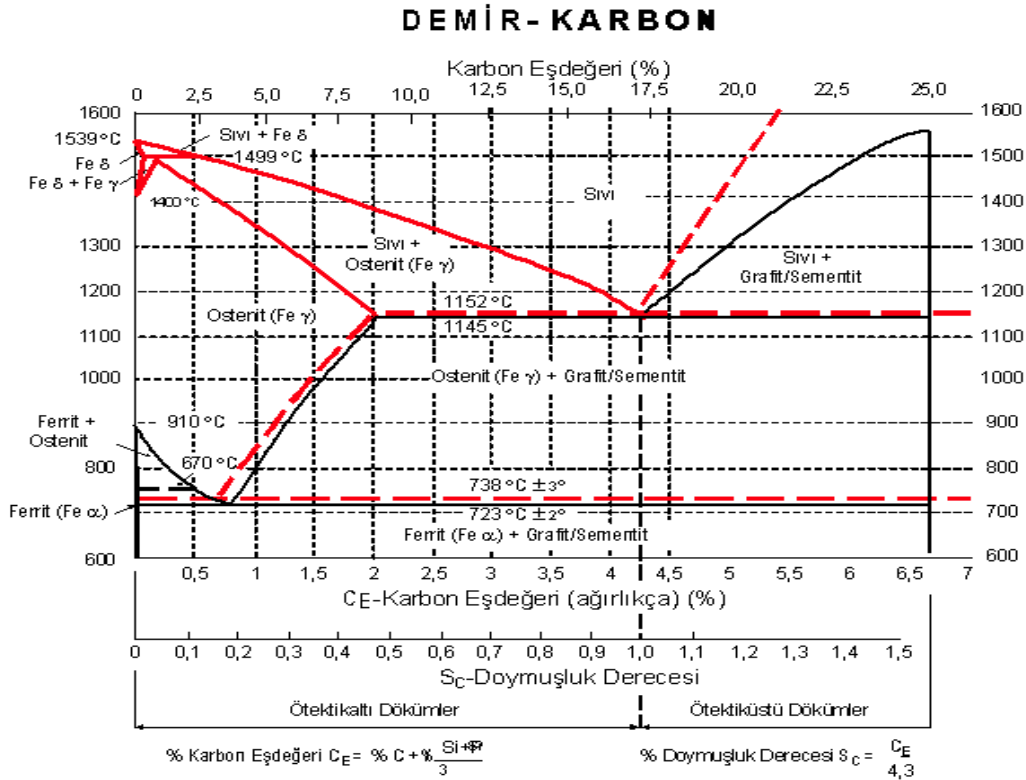
In this work assignment, cast irons' graphite forms and their cooling curves of various different mixtures are interpreted and parameters are observed. Moreover, related cooling curves besides present thermal analysis are illustrated in graphs and mathematically explained and results were compared

BÖLÜM 1. DÖKME DEMİRLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

1.1. Giriş

Demir cevherinin indirgenmesi ve ergitilmesi yoluyla elde edilen ve içinde %2 den fazla C ve diğer alaşım elementleri içeren (Mn, Si, F, Cr, ...) bulunduğu bir Fe-C alaşımına pik denir. Elde edilen pikin fırınlardan yeniden geçirilerek bazı metalurjik işlemlerden geçirildikten sonra bir kalıp içine boşaltılması ve kalıp boşluğu şeklini alarak katılaşması ile meydana gelen malzemeye dökme demir [3].

Dökme demirler Fe-C diyagramına baktığımızda %2 den %6.67 ye kadar dökme demir olarak gösterilir. Ancak yüksek karbon oranı kırılmalığa sebebiyet verdiği için pratikte % 4,4'e kadar karbon ve %3.5'a kadar silisyum içeren bir Fe-C-Si alaşımı olarak bilinir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Fe-C diyagramının gösterilişi

Dökme demirlerde karbonun katılma sırasında ayrışması mikro yapısında ayrı bir eleman olarak görülür. Bu ortaya çıkan karbonun oluşturduğu şekil ve biçim dökme demirin tipini belirlemekte ve dolayısıyla özelliklerine de etki etmektedir [3].

Döküm endüstrisinin birçok özelliklerinden dolayı en büyük kapasitesi dökme demirlere aittir. Dökme demirler, gerek döküm ve gerekse mamul parça özellikleri bakımından birçok üstünlüklere sahiptirler. Bunların başlıcaları:

- a) Alçak ergime sıcaklıklarına sahiptir. (1150 -1300⁰C),
- b) Ötektik birleşimine yakınlığından dolayı iyi akışkanlık gösterir.
- c) Döküm ve kalıp şeklini alabilme kabiliyeti yüksektir.
- d) Ergime sıcaklığının düşük olması sebebiyle maliyetin ucuzdur.
- e) Kimyasal bileşim sınırlarının geniş tutulabilmesi ve yakın özellikler elde edilebilmesi üretim kolaylığı sağlar.
- f) Çeşitli kısımlardan ibaret bir iş parçasının tek bir işlemlerle elde edilebilmesi.
- g) Üretim şartlarının basit ve kolay oluşu tasarımda final ürününe hızlı geçiş yapılmasını sağlar ve talaşlı imalat tekniğiyle iyi işlenebilir.
- h) Titreşim söndürme özelliğinin çok iyidir.
- i) 1) Basma mukavemetinin yüksektir.
- j) Aşınma ve korozyona dayanımı yüksektir.
- k) Çok geniş bir aralıkta mekanik/fiziksel özellik göstermesi, örneğin mukavemet 10 Kg/mm² ile 160 Kg/mm² arasında değişir. Sertlik değerleri 120-300 HB standartları arasında değişirken, özel aşınmaya dayanıklı dökme demirlerde 600 HB değerindedir.
- l) Spesifik mukavemet değerleri iyidir.
- m) Aynı mukavemet seviyelerinde karşılaştırıldıklarında, Çeliklere göre daha düşük yoğunluk ve daha yüksek termal iletkenlik gösterirler
- n) Yüksek hız ve kapasitelerde Mükemmel işlenebilirlik, özellikle yapıdaki serbest grafit yağlayıcı özelliği göstererek işlemleri kolaylaştırır ve enerjiyi minimuma indirir.
- o) Özellikle gri dökme demirler mükemmel sönüm kapasitesi özelliği gösterirler
- p) Eşdeğer malzemelerle karşılaştırıldığında oluşan artık gerilimlerin daha az çarpılmaya sebep olduğu bilinmelidir.

Mühendislik uygulamalarında mukavemet ve esneklik konusunda biraz zayıf kaldığı bilinmektedir. Zira dökme demirlerde kopma mukavemeti $14-30 \text{ kg/mm}^2$ sınırları içerisinde, kopma uzaması ise yok denecek kadar azdır.

Dökme demirlerin geniş kullanım alanlarının olması, en önemli avantajlarından birisidir. Dökme demirler otomotiv endüstrisinde (krank milleri, diferansiyel kutuları, direksiyon dişli kutusu, vb.), ziraat makinalarında (transmisyon kutuları, ön tekerlek çatalları, vb.) makine sanayinde (hidrolik presler, dövme presleri kafa ve silindirleri, dişliler, akslar, vb.), kimya sanayinde (rafineri valfleri, plastik ekstrüzyon silindirleri, doğalgaz boruları, vb.), inşaat sanayinde (kreyn parçaları, beton karıştırıcı parçaları, vb.), madencilik ve metalurji sanayinde (curuf potaları, kalıplama dereceleri, sıcak hadde merdaneleri, vb.), ulaştırma sanayinde (volanlar, vb.), güç sektöründe (brülör gövdeleri, sıcağa dayanıklı fırın parçaları, su tirbünleri için dökme parçalar, gaz türbinleri için kompresör kutuları, vb.) denizcilikte, takım tezgâhlarında ve ev eşyası gibi alanlarda kullanılır [1].

1.2. Dökme Demirin Çeşitleri

Dökme demirlerin sınıflandırılmasında en başarılı yöntem, döküm mikroyapısına göre yapılan sınıflandırmadır. Demir dökümlerde mikroyapıyı kontrol eden başlıca dört faktör bulunmaktadır. Bunlar;

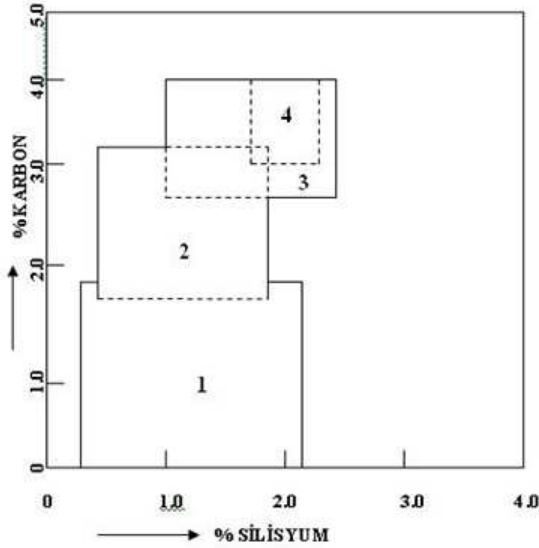
- a) Karbon içeriği,
- b) Alaşım elementi emprüte miktarı,
- c) Katılaşma sırasında ve katılaşma sonrası soğuma hızı,
- d) Dökümden sonraki ısıl işlemlerdir.

Bu değişkenler karbonun yapıda nasıl bulunacağını ve morfolojisini de kontrol ederler. Dökme demirleri sınıflandırıldığında 5 gruba ayrılır. Bunlar;

1. Gri Dökme Demir
2. Küresel Grafitli Dökme Demir
3. Beyaz Dökme Demir

4. Temper Dökme Demir
5. Silindirik Grafitli Dökme Demir

Dökme demirlerin, karbon ve silisyum oranlarından doğan farklılıklar Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



- | | |
|-------------------------------|--|
| 1. Çelik Dökümler | 2. Beyaz Dökme Demirler (Temper Dökme Demir) |
| 3. Lamel Grafitli Dökme Demir | 4. Küresel Grafitli Dökme Demirler (Nodular-Sfero) |

Şekil 1.2. Değişik tipteki dökme demirlerde karbon ve silisyum miktarları

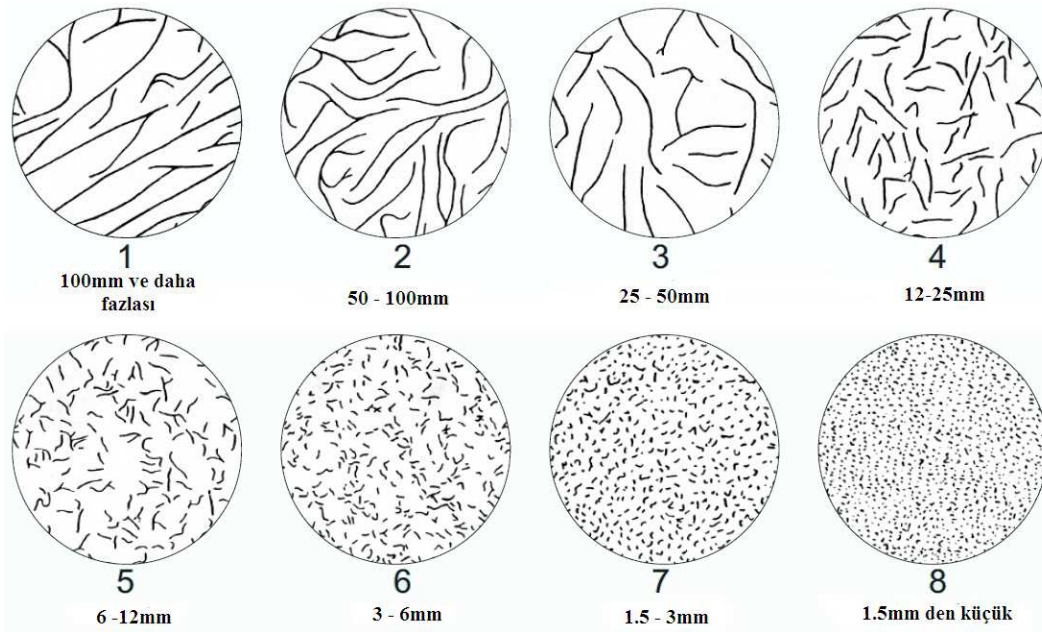
1.2.1. Lamel grafitli dökme demir

Katılaşmadan sonra içerdiği C un büyük kısmı serbest halde veya başka deyimle grafit lamelleri halinde bulunacak şekilde bir birleşime sahip dökme demir tipidir. Lamel grafitli dökme demirin kırık yüzeyi isli gri renktedir. Lamel grafitli dökme demirin diğer bir adı gri dökme demirdir. Lamel grafitli dökme demirlerin, yalnız grafit seklı göz önüne alındığında 5 bölüme ayrılır. Bunlar;

1. A tipi Gri Dökme Demir
2. B tipi Gri Dökme Demir
3. C tipi Gri Dökme Demir

4. D tipi Gri Dökme Demir
5. E tipi Gri Dökme Demir dir

Lamel Grafitli Dökme demir sınıflandırılmasında birkaç kategoriye ayırmak mümkündür. Bunlardan biri de Şekil 1.3'te gösterilen lamel uzunluklarıdır.



Şekil 1.3. Gri dökme demirde standart lamel boyutlarının gösterilişi (x100) [6]

1.2.1.1. A Tipi gri dökme demir

Yapıda lamel grafitlerin, muntazam bir büyüklüğe sahip olup düzgün dağılım göstermesi a tipi gri dökme demirin ayırt edilebilecek en önemli özelliğidir (Şekil 1.4). Lamel grafitli dökme demirlerin tipik grafit şekli olup ferrit veya perlit ile beraber bulunmaktadır. Oluşum nedenlerinin basında düşük miktarlarda alt soğuma olması, yüksek miktarlarda çekirdeklenme sağlanabildiği takdirde düşük miktarlarda bir alt soğuma oluşacaktır. Bu durumda grafit hücrelerinin büyüme hızları düşük olur; yani A tipi grafitler oluşur. Katılma süresinin uzun tutulması, katılmanın çok uzun bir soğuma aralığında olması ve hatta teşvik edilmesi gerekir. Bu sayede grafit boyları ve kalınlıkları artırılabilir. A tipi grafitleşme yalnız ötektik katılma aralığında gerçekleşebilir [3].



Şekil 1.4. ASTM' ye göre A-Tipi grafit şekli [6]

1.2.1.2. B Tipi gri dökme demir

En belirgin özelliği grafitlerin mikro yapıda grafit yumakları (rozet) şeklindeki olması ve gelişmiş güzel dağılımasıdır (Şekil 1.5). Elektrik ve ısı iletim özelliği küresel ve vermikular grafitli dökme demire göre çok iyidir. Çekme ve basma özellikleri ilave element, ısıl işlem gibi çeşitli müdahalelerle yükseltilebilir. Lamel boyutları büyüdükçe malzeme yumuşaklık kazanır. İşlenebilirlik özellikleri çok iyidir. Genellikle 10mm kalınlığındaki kesitlerin yüzeyinde görülmekte olup soğuma hızının yavaş olduğu merkez kısmında A tipi grafitler görülebilmektedir [3].



Şekil 1.5. ASTM' ye göre B-Tipi grafit şekli [6]

1.2.1.3. C Tipi gri dökme demir

Ötektik üstü katılaşma sonucu oluşan grafit yapısıdır. C tipi Gri dökme demir üretmek için bazı koşulların sağlanması gerekmektedir. Bunlar:

- Çekirdek sayısının üst düzeyde olması
- Kristalleşme hızının düşük seviyelerde tutulması
- Büyüme hızının yüksek olması ve
- Malzemenin soğuma hızının yüksek seviyelerde tutulmasıdır

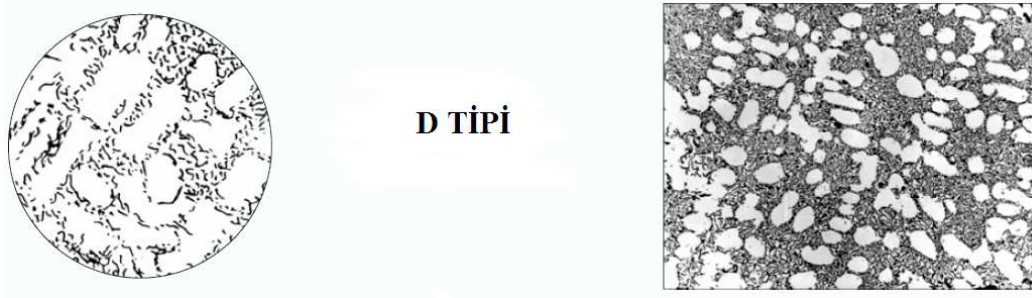
Katılma süresi, katılma başlamasından çok kısa bir süre içerisinde gerçekleşir. Cr, Mn gibi bazı alaşım elementleri C- tipi grafit yapısını teşvik edici özellik taşımaktadır. Tipik görünümüleri kiş adı verilen kalın grafit yaprakları şeklindedir (Şekil 1.6). Bu tip grafit ihtiva eden dökme demirler termal soka dayanıklıdır, ancak düşük mukavemet ve islendikten sonra kaba yüzey verir. Yapıda bulunan çok iri grafitler çekme mukavemetini düşürür. İşlenmiş yüzeylerde görünüm bozukluklarına sebebiyet verirler. Sistemin elastik modülü düşüktür [3].



Şekil 1.6. ASTM' ye göre C-Tipi grafit şekli [6]

1.2.1.4. D Tipi gri dökme demir

Hiperötektik alaşımlarda görülür. Yüksek silisyum içeren dökme demirlerin hızlı soğuma şartlarında gelişigüzel yönlendirilmiş küçük boyutlu grafitlerdir. Bu ince grafit tipi genellikle matris perlitik olduğunda dahi ferrit ile birlikte olmaktadır. Hücresel şekilde olan bu tip grafitlerin oluşumuna katılma esnasında aşırı soğumanın neden olduğu ileri sürülmektedir. Dikine kesitlerde A veya B tipi grafitlerle beraber bulunan bu tip çoğunlukla soğuma hızının hızlı olduğu ince kesitlerde bulunmaktadır. Malzemenin mukavemetinde bir artış meydana getirmeyip, iyi islenebilirlik özelliği kazandırır. Ti, Al gibi bazı alaşım elementleri karbür ve perlit oluşumuna teşvik eder [3] (Şekil 1.7).



Şekil 1.7. ASTM' ye göre D-Tipi grafit şekli [6]

1.2.1.5. E Tipi gri dökme demir

Hipoötektik katılaşmada görülen grafit yapısıdır. Hipoötektik bileşimlerin katılaşması esnasında oluşan bu tip grafitin malzemenin mukavemetinde A tipi grafitlere nazaran daha iyi olduğu görülmüştür. Düşük karbonlu dökme demirlerde tercihli yönlenme durumu gösteren ve dentritler arası yapı arz eden grafitlerdir. Birincil östenit miktarının yüksek oluşu, E tipi grafitin oluşumunda önemli rol oynar. Çok yüksek döküm sıcaklıklarında görülürler. Sertlik, çekme mukavemeti, basma mukavemeti nispeten yüksektir. [3] (Şekil 1.8).



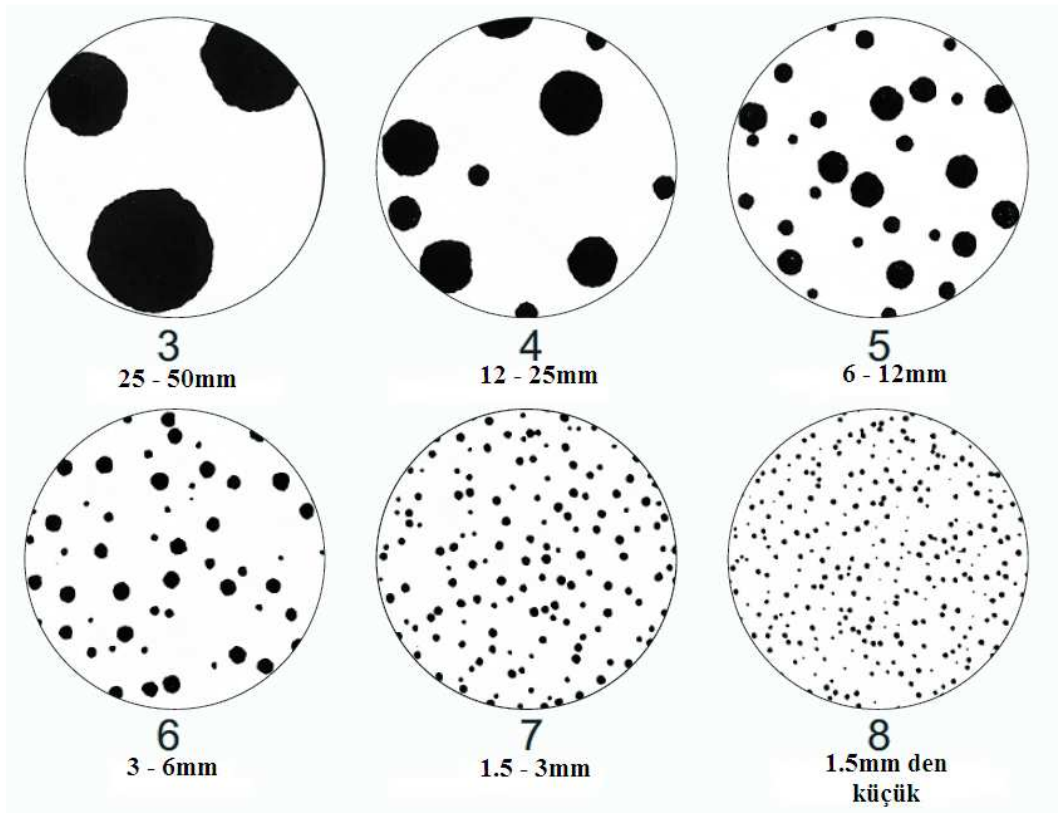
Şekil 1.8. ASTM' ye göre E-Tipi grafit şekli [6]

1.2.2. Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD)

Küresel grafitli dökme demirlerde grafit, lameler formdan küresel forma dönüştürülür. Karbonun küre formuna dönüşmesi sağlamak için dökme demire ergimiş halde seryum ve magnezyum (Ce ve Mg) gibi nadir toprak elementleri ilave edilir. Grafit şeklinin lamel yerine küre oluşu dökme demire süneklik ve mukavemet kazandırır. Bu üstün mukavemet ve tokluk birçok uygulamada ısıl işlem

gerekmeksizin küresel grafitli dökme demiri gri ve temper dökme demire göre daha avantajlı hale getirmektedir Küresel grafitli dökme demirler aynı zamanda nodüler, sfero ve düktil gibi isimlerle de anılırlar [9].

Nodullerin boyutları göz önüne alındığında 50mm den başlayıp 1.5mm kadar 6 bölümde incelemek mümkündür. Şekil 1.9'da görüldüğü üzere x100 büyütmede nodullerin boyutları arasındaki ilişki gösterilmektedir.

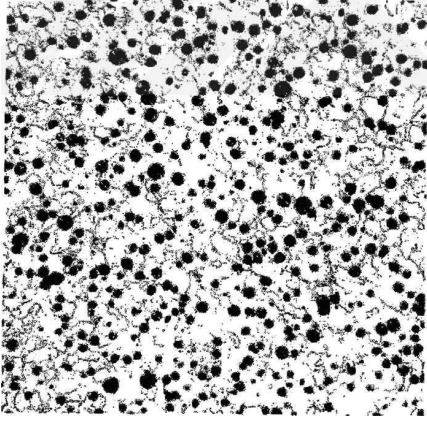


Şekil 1.9. KGDD de standart grafit nodul boyutlarının x100 büyütmede gösterilişi [6]

1.2.2.1. Ferritik küresel grafitli dökme demirler (GGG 40)

Ostenit içerisinde çözülen karbonun tamamı küresel grafitte dönüşmeye zaman bulursa, meydana gelecek malzemenin mikro-yapısı, ferritik bir matris ve bu matris içerisinde rasgele dağılmış küresel grafitten ibaret olur. Şekil 1.10'da ferritik küresel dökmenin mikroyapısı görülmektedir. Küresel grafitli dökme demir üretiminin önemli bir kısmını oluşturan bu grup, yüksek süneklik ve çentik darbe dayanımının yanı sıra çok iyi talaş kaldırılabilme özelliğine

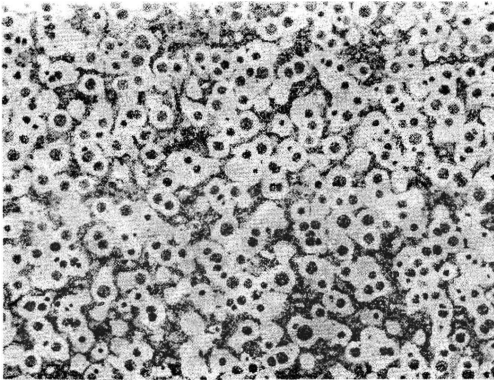
sahiptir Fittingsler, inşaat iskele parçaları, fren merkezleri, büyük tekerlekler, pnömatik makina pistonları, potlar, fırın ve ocak kapakları, vb. yerler kullanıldığı alanlardır [1].



Şekil 1.10. Ferritik küresel grafitli dökme demir. Büyütme: x40. Nital ile dağlanmış [1]

1.2.2.2. Perlitik - Ferritik küresel grafitli dökme demirler (GGG 50-60)

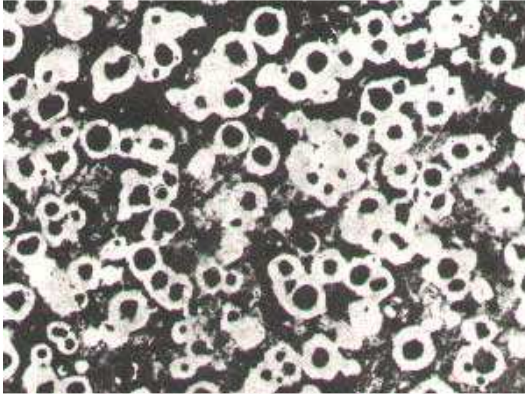
Aynı oranlarda olabilen perlitik ve ferritik yapının mikroyapısı Şekil 1.11’de gösterilmektedir. Bu ana dokuya sahip KGDD nin ferritik yapılara göre daha yüksek çekme değeri ve aşınma direncine sahip oldukları bilinmektedir. Kompresör pistonları, tekerlekler, pompa gövdeleri, dişli kutuları, traktör parçaları, tarım makinaları parçaları, valfler, büyük dişliler, kâğıt sanayiinde kullanılan haddeler, hidrolik kontrol alet yatakları, uçak motor parçaları, vb malzemeler Perlitik - Ferritik KGDD in kullanıldıkları alanlarıdır



Şekil 1.11. Perlitik-ferritik küresel grafitli dökme demirin büyütmeye: x40 ile gösterilişi Nital ile dağlanmış [1]

1.2.2.3. Perlitik küresel grafitli dökme demirler (GGG 70)

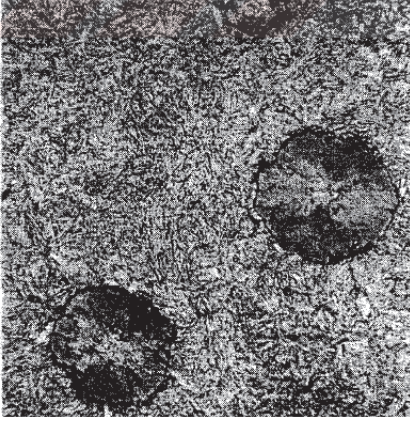
Ostenitten ayrılan karbon, grafitlerin bulunduğu bölgelere kadar ilerleyemediği ve orada katılaşmaya zaman bulamadığı durumlarda, grafitler İnce demir levhalar şeklinde oluşurlar. Bu karbürlü levhalar ferrit matrisin devamlılığını bozarlar. Ferrit ve karbür levhalar devamlı olarak birbirlerine bitişik durumda oluşurlar. Böyle bir malzeme yapısına "perlit" ismi verilir. Perlitik küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısı Şekil 1.12'de gösterilmektedir. Kam milleri, kazıcı uçlar, kavramalar, pistonlar, kalıplar, makina parçaları, vb. parçalarda kullanılmaktadır [1,10].



Şekil 1.12. Perlitik küresel grafitli dökme demir büyütme: x40 ile gösterilişi Nital ile dağlanmış [1,10].

1.2.2.4. Sertleştirilmiş ve temperlenmiş küresel grafitli dökme demirler

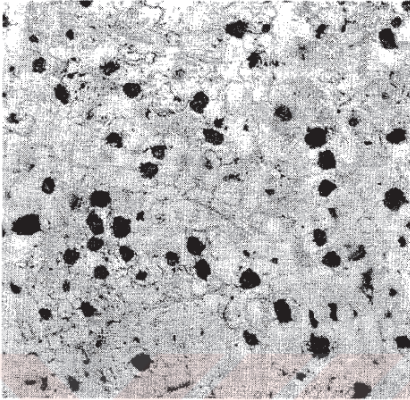
Özel alaşımlanmış, alaşımsız halde yağda su verilmiş veya temperlenmiş küresel grafitli dökme demirler ile ostemper veya martemper işlemlerine tabii tutulan küresel grafitli dökme demirler, maliyetleri yüksek olmakla birlikte çok üstün özellikler gösterirler. Bu grubun ana dokuları beynitik yada temperlenmiş martenzit'tir. Sertleştirilmiş ve temperlenmiş küresel grafitli dökme mikroyapısı Şekil 1.13'te gösterilmektedir [1].



Şekil 1.13. Temperlenmiş martenzitik küresel grafitti dökme demir. Büyütme: x400. Nital ile dağlanmış [1]

1.2.2.5. Ostenitik küresel grafitli dökme demirler

İçerisinde %35'e kadar Nikel (Ni) bulunan ostenitik küresel grafitli dökme demirlerin korozyona mukavemetleri yüksektir [1].



Şekil 1.14. Ostenitik küresel grafitli dökme demir. Büyütme: x 100. Nital ile dağlanmış [1]

1.2.3. Beyaz dökme demirler

Karbonun tamamı sementit olarak bileşik haldedir. Katılaşma sıcaklığında hızlı soğuma yoluyla elde edilir. Beyaz dökme demirlerde önemli miktarda sementit bulunmasından ve sementitin sert ve gevrek bir bileşik oluşundan dolayı, beyaz dökme demirlerin yapılan sert ve aynı zamanda aşınmaya karşı dirençlidir [9,12].

Bütün beyaz dökme demirler ötektik altı alaşımlardır. Beyaz dökme demir mikroyapısı sementit ve perlitten oluşur (Şekil 1.15). Bunun yanında gevrek ve islenebilmeleri zordur. Beyaz dökme demirlerin düşük darbe dirençleri ve islenebilme kabiliyetlerinin kotu olusu uygulama alanlarını sınırlar daha çok çimento karıştırıcıların astarları, değirmen bilyeleri, tel çekme kalıpları ve ekstruzyon nozulları gibi süneklik gerektirmeyen aşınmaya dirençli alanlarda kullanılır [12].

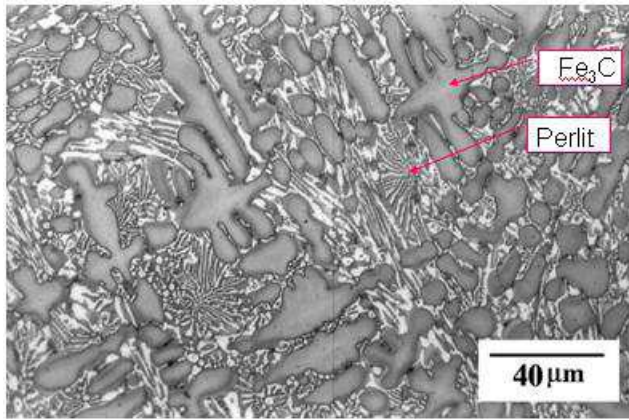
Ayrıca temper dökme demir üretmek için yüksek miktarlarda beyaz dökme demir kullanılmaktadır. Alaşımsız beyaz dökme demirin mekanik özellikleri aşağıdaki aralıklarda değişmektedir [12].

Cekme mukavemeti: 140-495 MPa

Basma mukavemeti: 1410-1760 MPa

Elastisite modulu : $1,4 \times 10^6$ - $1,76 \times 10^6$ MPa

Sertlik : 375-600 HB



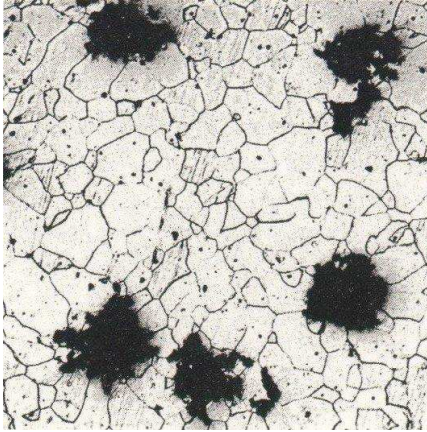
Şekil 1.15 Beyaz dökme demir mikroyapısının gösterilişi

1.2.4. Temper dökme demir

Karbon içeriğinin önemli bir kısmı veya tamamı temper karbonu olarak adlandırılan düzensiz rozetler şeklindedir. Beyaz dökme demirin ısı işlem tabi tutularak yapıdaki sementit ve perlit parçalanır. Yapıda parçalanmış halde bulunan sementit ve perlit yavaş soğutulmuş karbonun rozet şeklini (temper karbon) alması sağlanır (Şekil 1.16). Mikroyapısına bakıldığında ferritik ve perlitik olarak ikiye ayrılır. Ferritik

temper dökme demirler, temperlemenin oksidan ya da nötr bir ortamda yapılmasına göre ikiye ayrılır;

1. Beyaz temper dökme demir (Oksidan ortamda üretilen)
2. Siyah temper dökme demir (Nötr ortamda üretilen)



Şekil 1.16 Temper dökme demir mikroyapısının gösterilişi

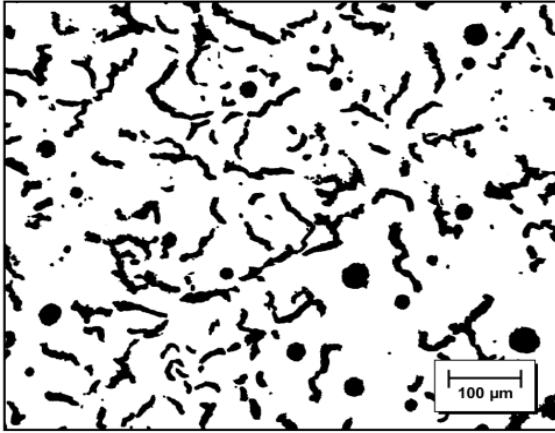
1.2.5. Silindirik dökme demir

Silindirik dökme demirlerin birden fazla isime sahiptir. Bunlardan en çok kullanılanları

1. Vermiküler Grafitli Dökme Demir
2. Kompakt (Compact) Grafitli Dökme Demir
3. Lamelimsi Dökme Demir
4. Yüksek mukavemetli Dökme Demirdir.

Vermiküler grafitli dökme demirler gösterdikleri mekanik özellikler açısından lamel ve küresel grafitli dökme demirler arasında bir yerde bulunmaktadır. Vermiküler grafitli dökme demirler, yetersiz magnezyum ve seryum uygulamaları sırasında tesadüfi olarak bulunmuştur ve 1965'ten itibaren dökme demir ailesindeki yerini almıştır. Vermiküler grafitli dökme demirlerin mikroyapısına baktığımızda içerisinde hiç lamel grafit olmayan, ortalama %20 oranında küresel grafit ve %80 oranında vermiküler grafit olan bir yapıya sahiptir. Grafit yapısının özelliğinden ötürü

iletkenlik, KGDD den yüksek Lamel grafitli dökme demirden düşüktür. Vermiküler grafitler lamel grafitlerden daha kalındırlar ve lamel uçları yuvarlatılmıştır. [5,11] İngot kalıplarda, krank mili, silindir başlığı, egzoz manifold, fren diskleri vb. yerlerde kullanılmaktadır [5].



Şekil 1.17 Vermiküler grafitli dökme demir. Büyütme: x 100 [5]

Vermiküler grafitli dökme demirin tercih edilmesindeki başlıca sebebler;

- a) Vermiküler dökme demirin özelliklerinin iyileştirilmesi kolaydır ve üretim esnasında islenmemiş malzemelerin kullanımı, küresel grafitli dökme demirlerinkinden daha etkilidir.
- b) Vermiküler grafitli dökme demirler yüksek karbon eşdeğerine bağlı olarak mükemmel akıcılığa sahiptirler.
- c) Küresel grafitli dökme demirlerle mukayese edildiğinde, vermicüler grafitli dökme demirlerle döküm yapıldığında döküm randımanında önemli gelişmeler elde edilmektedir
- d) Vermiküler grafitli dökme demirlerin sertlikleri ferritik sfero gibidir ve çoğunlukla ferritik matris yapı sergilerler.

1.3. Dökme Demir Standartları

KGDD ve GDD lerin üretimi için gerekli parametreler geniş aralıklarda olmasına karşın farklı kimyasal bileşim, yapı ve özellikler oluşabilmektedir. Buda ülkeler arası sınıflandırma farklılıkları oluşmasına neden olmaktadır. Bunun aşılması için birçok sınıflandırma mevcuttur. Aralarında türkiyede en çok kullanılan DIN standartlarındaki dökme demir sınıflandırmasıdır. DIN standartları dökme demirlerin kg/mm^2 olarak minimum çekme mukavemetlerini baz alarak oluşturulmuştur. (20, 40, 80, vb) Türkiye standartlar enstitüsünde gri (lamel) dökme demirlere DDL, küresel grafitli dökme demirlere DDK denilmektedir. Bu harflerin sonuna gelen rakamlar malzemenin minimum çekme mukavemetini (kg/mm^2) göstermektedir. [9,10]

Tablo 1.1. Lamel grafitli dökme demirin sınıflandırılması [13]

TS-552 Lamel Grafitli Dökme Demirler / Genel Amaçlar İçin					
	DDL-15	DDL-20	DDL-25	DDL-30	DDL-35
Çekme Mukavemeti (N/mm²) min	150	200	250	300	350
Sertlik HB	160-190	170-210	180-250	200-240	210-250
Mikroyapı	Ferritic + Perlitik	Perlitik + Ferritik	Perlitik (min %90)	Perlitik (min %100)	Perlitik (ince)
Künyasal Kompozisyon	C: 3,40-3,60 Si: 2,30-2,50 Mn: 0,50-0,80 S: 0,12 (max) P: 0,50 (max)	C: 3,20-3,40 Si: 2,10-2,30 Mn: 0,50-0,80 S: 0,12 (max) P: 0,40 (max)	C: 3,00-3,25 Si: 1,85-2,10 Mn: 0,40-0,70 S: 0,12 (max) P: 0,25 (max)	C: 2,95-3,10 Si: 1,70-2,00 Mn: 0,40-0,70 S: 0,10 (max) P: 0,20 (max)	C: 2,70-3,00 Si: 1,70-2,00 Mn: 0,60-0,80 S: 0,10 (max) P: 0,20 (max)
Eşdeğer Standartlar					
Türkiye - TSE TS-552	DDL-15	DDL-20	DDL-25	DDL-30	DDL-35
AB - EN 1561	GJL 150	GJL 200	GJL 250	GJL 300	GJL 350
Almanya - DIN 1691	GG 15	GG 20	GG 25	GG 30	GG 35
USA - ASTM A 4876	Class 20 B	Class 25 B	Class 35 B	Class 50 B	Class 55 B
İngiltere - BS 1452	Grade 150	Grade 220	Grade 250	Grade 300	Grade 350
Fransa - NF A32-101	Ft 15 D	Ft 20 D	Ft 25 D	Ft 30 D	Ft 35 D
İtalya - UNI 5007	GG 15	GG 20	GG 25	GG 30	GG 35
Japonya - JIS G 5501	FC 150	FC 200	FC 250	FC 300	FC 350

Tablo 1.2. Küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması

TSE TS-526 Küresel Grafitli Dökme Demirler / Genel Amaçlar İçin							
TS-526	Çekme Dayanımı Kgf/mm ² min	Akma Sınırı Kgf/mm ² min	Kopma Uzaması % min	Sertlik HB	Çekme Dayanımı min. Kgf/cm ² (20C)		Doku
					3.Deney Ortalaması	Bir deney	
DDK-40	42	28	12	140-201	-	-	Daha çok ferritik
DDK-50	50	35	7	170-241	-	-	Ferritik / Perlitik
DDK-60	60	40	3	192-269	-	-	Perlitik / Ferritik
DDK-70	70	45	2	229-302	-	-	Daha çok Perlitik
DDK-80	80	50	2	248-352	-	-	Perlitik
DDK-35.3	35	22	22	-	1,9	1,7	Ferritik
DDK-40.3	40	25	18	-	1,6	1,4	Ferritik
Eşdeğer Standartlar							
Türkiye - TSE TS-526	DDK- 35.3	DDK- 40.3	DDK- 40	DDK- 50	DDK- 60	DDK- 70	DDK- 80
AB - EN 1563	GJS 350-22LT	GJS 400-18LT	GJS 450-15	GJS 500-7	GJS 600-3	GJS 700-2	GJS 800-2
Almanya - DIN 1693	GGG- 35.3	GGG-40.3	GGG-40	GGG-50	GGG-60	GGG-70	GGG-80
USA - ASTM A 536		60-40-18	65-45-12	80-55-06	100-70-03	120-90-2	
İngiltere - BS 2789		Grade 370/17	Grade 420/12	Grade 500/7	Grade 600/3	Grade 700/2	
Fransa - NF A32-101		FGS 370-17	FGS 400-12	FGS 500-7	FGS 600-2	FGS 700-3	
İtalya - UNI 5007		GS 370-17	GS 400-12	GS 500-7	GS 600-2	GS 700-2	
Japonya - JIS G 5502	FCD 350- 22L	FCD 400-18L	FCD 400-15	FCD 500-7	FCD 600-3	FCD 700-2	FCD 800-2

Tablo 1.3. Temper dökme demirlerin sınıflandırılması

TS 519 Beyaz Temper Dökme Demirler						
TS 519	Çekme Dayanımı kgf/mm ²	Akma Sınırı kgf/mm ²	Kopma Uzunması %	Sertlik HB	Doku Özellikleri	
DDTB-35	35	-	4	220	Ferritik iç düzey+temper karbon	
DDTB-40	40	22	5	220	Çekirdek dokusu lamelli perlit+temper karbon	
DDTB-45	45	26	7	200	Çekirdek dokusu taneli perlit+temper karbon	
DDTB-55	55	36	5	240	Çekirdek dokusu ince taneli perlit+temper karbon	
DDTB-65	65	43	3	270	Karbonsuzlaştırma derinliği az ve ısı işlemi uygulanan bir yapı + temper karbon	
DDTB-K38	38	20	12	200	Karbonsuzlaştırma derinliği çok ve kaynak yapıldıktan sonra ısı işlemi gerektirmeyen bir yapı+ temper karbon	
TS 519 Siyah Temper Dökme Demirler						
TS 519	Çekme Dayanımı kgf/mm ²	Akma Sınırı kgf/mm ²	Kopma Uzunması %	Sertlik HB	Doku Özellikleri	
DDTB-35	35	20	12	...-150	Ferrit+ temper karbon	
DDTB-45	45	30	7	160-200	Perlit lamelliden taneliye kadar değişebilen+derrit+temper karbon	
DDTB-55	55	36	5	180-200	Perlit lamelliden taneliye kadar değişebilen+temper karbon ferritte bulunabilir	
DDTB-65	65	43	3	220-250	Perlit lamelliden taneliye kadar değişebilen+temper karbon	
DDTB-70	70	55	2	240-270	Isı işlemi uygulanabilen bir yapı + temper karbon	

BÖLÜM 2. DÖKME DEMİRDE KATILAŞMA

2.1. Lamel Grafitli Dökme Demirde Katılma

Dökme demirlerde grafit miktarları, şekli, büyüklüğü ve dağılımı katılmaada önemli rol oynar. Grafit yapılarının diğere atomlarla kovalent bağ kurmasına karşın, grafit yapısının kendi aralarında wader waals zayıf bağ yapısının oluşu grafiti gevrek malzeme haline getirir.

Grafitin makro yapısı yaprak ve pervane gibidir. Üç eksen boyunca grafit kristalleşip, normal bir şekli alınca kopma mukavemeti ve uzaması sıfır olan bir malzeme meydana gelir. Grafit bu bakımdan dökme demire kötü tesir yapar.

Dökme demirlerde istenilen özelliklerin elde edilebilmesi için katılma sırasında grafit şekli ve miktarı kontrol altına alınması önemlidir. Dökme demirlerde grafitin iki türlü kötü tesiri vardır.

- a) Efektif bakımdan iş yapma alanını düşürür.
- b) Çentik etkisi yapar

2.1.1. Karbon eşdeğeri (CE), doymuşluk derecesi (Sc), Sıvılaşma Eşdeğeri

Saf Fe-C alaşımının ötektik değeri % 4,3 olmaktadır. Ancak alaşım içindeki bazı elementlerin mevcudiyeti ötektik değerini düşürmektedir. Özellikle silisyum ve fosfor değerinin 1/3 'ü ötektik değerini %0,1 kadar düşürmektedir. Böylece her hangi bir dökme demir için ötektik karbon değeri yaklaşık $4,3 - 1/3(Si+P)$ olmaktadır. Örneğin %25 Si'li ve % 0,42 P'li bir dökme demir %3,48 'lik karbon yüzdesi ile ötektik olabilmektedir. Bileşimi ötektik değer cinsinden ifade etmenin yolu karbon

eşdeğeri kullanmaktır. Alaşım elementlerinin ötektik değere yaptıkları etkinin bir ölçüsü olan karbon eşdeğerini (CES) bir genel formül halinde aşağıdaki bağıntı ile göstermek mümkündür.

$$CES = C + 1/3 (Si + P) \quad (2.1)$$

Alaşımın içinde bulunan elementlerden karbon, silis ve fosfor yüzdeleri yukarıdaki 2.1 formülünde yerine konularak, alaşımın ötektik noktası bulunabilmektedir.

2.1 formülünün dışında karbon, silis ve fosfor yüzdeleri kullanılarak daha hassas bir bağıntı 2.2 de gösterilmektedir.

$$CES = \%C + \%Si/4 + \%P/2 \quad (2.2)$$

Karbon eşdeğeri bulmak için kullanılan en hassas denklem 2.3’de gösterilmiştir. Sıvı metal içerisindeki elementlerin yüzdeleri formülde yerine konularak CES bulunmaktadır

$$CES = C + 0,33Si + 0,33P + 0,11Ni + 0,16Al + 0,13Ti + 0,065Cu - 0,08Mn - 0,33Cr - 0,15Mo - 0,8V \quad (2.3)$$

Fe – C ötektigindeki karbon yüzdesi % 4,3 olarak kabul edilirse, dökme demirlerin karbon eşdeğerleri hesaplandığında bulunan değerlere göre malzemeye isim verilir.

Bunlar

- CES < 4,3 ise alaşım ötektik altı (hipoötektik)
- CES = 4,3 ise alaşım ötektik tipi
- CES > 4,3 ise alaşım ötektik üstü (hiperötektik)

Karbon ekivalentine benzer olan diğeri bir kriterde “Doymuşluk derecesi” (Sc) dir. Sc toplam karbon miktarının ötektik karbon miktarına oranıdır.

$$Sc = \text{Toplam karbon} / \text{ötektik karbonu} = T.C / 4.3 - 1/3 (Si + P) \quad (2.4)$$

Formül 2.4'te gösterilen doymuşluk derecesinin bağıntısı, < 1 olduğunda hipoötektik alaşım, doymuşluk derecesi bire eşit olduğunda ötektik alaşım, doymuşluk derecesi >1 olduğunda ise hiperötektik alaşım olduğunu göstermektedir.

Ötektik altı kompozisyona sahip alaşımlarda sıvılaştırma sıcaklığı bileşime bağlı olarak değişir. C ve Si 'nin sıvılaştırma sıcaklığına etkisi de incelenebilir. Si ve P 'un sıvılaştırma sıcaklığına olan etkisi sıvılaştırma eşdeğeri (SEV) formülü ile aşağıdaki gibi yazılabilir [3,4,13]

$$SEV = \% C + \% Si / 4 + \% P / 2 \quad (2.5)$$

Formül 2.5 bağıntısı kullanılarak bulunan sıvılaştırma eşdeğeri SEV ile $s_{1v1} - s_{1v1} + \alpha$ sıcaklığı formül 2.6 da hesaplanabilir,

$$T = 1664 - 124 (\%C + \%Si / 4 + \%P / 2) ^\circ C \quad (2.6)$$

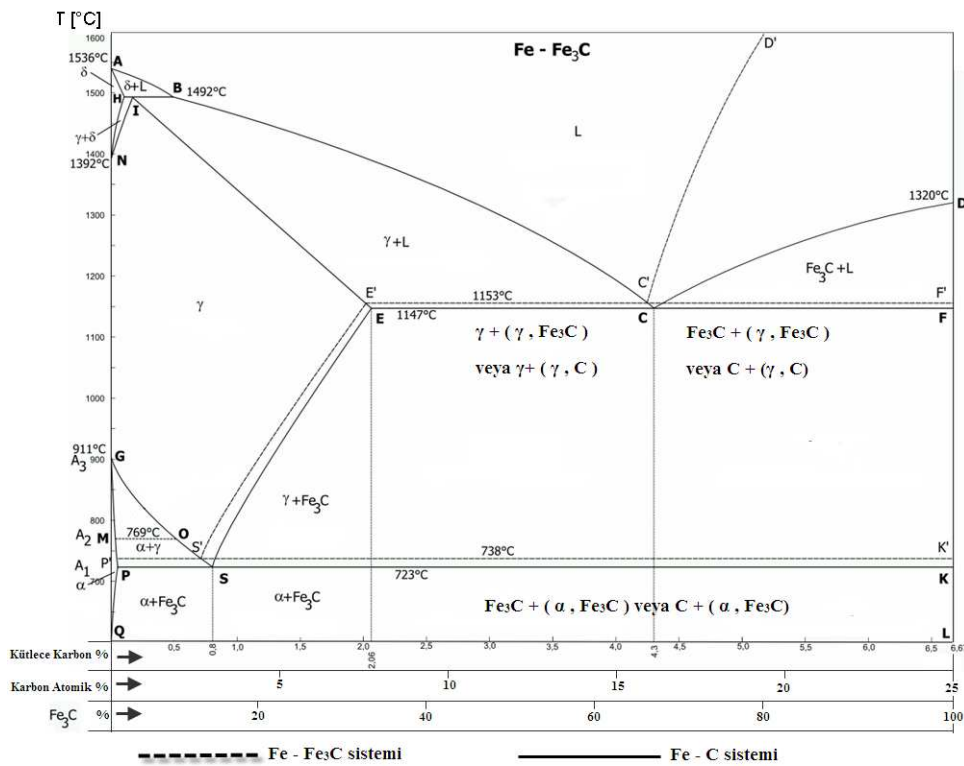
Ötektik altı bileşime sahip bir alaşımın katılaşması oldukça karışıktır. Kalıp cidarlarında önce östenit çekirdeklenmesi ve dendritik büyümesi görülür. Dendrit kolları arası karbon ve diğer elementler bakımından zenginleşir. Sıcaklık belirli bir seviyeye düştüğünde, dendrit kolları arasındaki sıvı ötektik olarak katılaşır. Bu katılaşma yapısı ya yarı düzenli Fe-Fe₃C ötektiği yada Fe – Grafit ötektiklerinden biridir. Fe – G ötektiklerinin yapısı: bileşim, aşılama, empürite ve ilaveler ile soğuma hızına bağlıdır. Katılaşma: östenitlerin (dendritik ve ötektik) perlitte katı hal dönüşümü ile takip edilir. Ötektik ve ötektik üstü bileşime sahip dökme demirler de benzer şekilde katılaşırlar. [3,4,13]

2.1.2. Stabil olmayan demir - demirkarbür sistemi

Demir - Demirkarbür faz sisteminde, alaşım içindeki karbon stabl olmayan (metastabl) demir karbür (Fe₃C) bileşiği halindedir. Katılaşma ergitme ve katı haldeki ısıl işlemlerde, demir karbür, denge diyagramının belirlediği normal prensiplere göre bir davranış gösterir. Örneğin % 4.30 dan az karbonlu hipotektik

alaşımın katılaşması ostenit dendritlerinin oluşması ile başlar ve ostenit Fe_3C ötektiğinin katılaşması ile son bulur (stabil olmayan demir karbür sistemi) (Şekil 2.1).

Katılaşmadan sonra, katı fazdaki soğuma esnasında ostenit perlitte dönüşür. Mikroyapıda, primer ostenit dendritleri, perlit alanları halinde görülürken, ostenit-karbür ötektiği, perlit- karbür karışımı halinde görülür. % 4.30 karbon içeren bir ötektik alaşımı ise primer ostenit dendritleri oluşmadan katılaşır ve yalnız ötektik bir yapıya sahip olur.

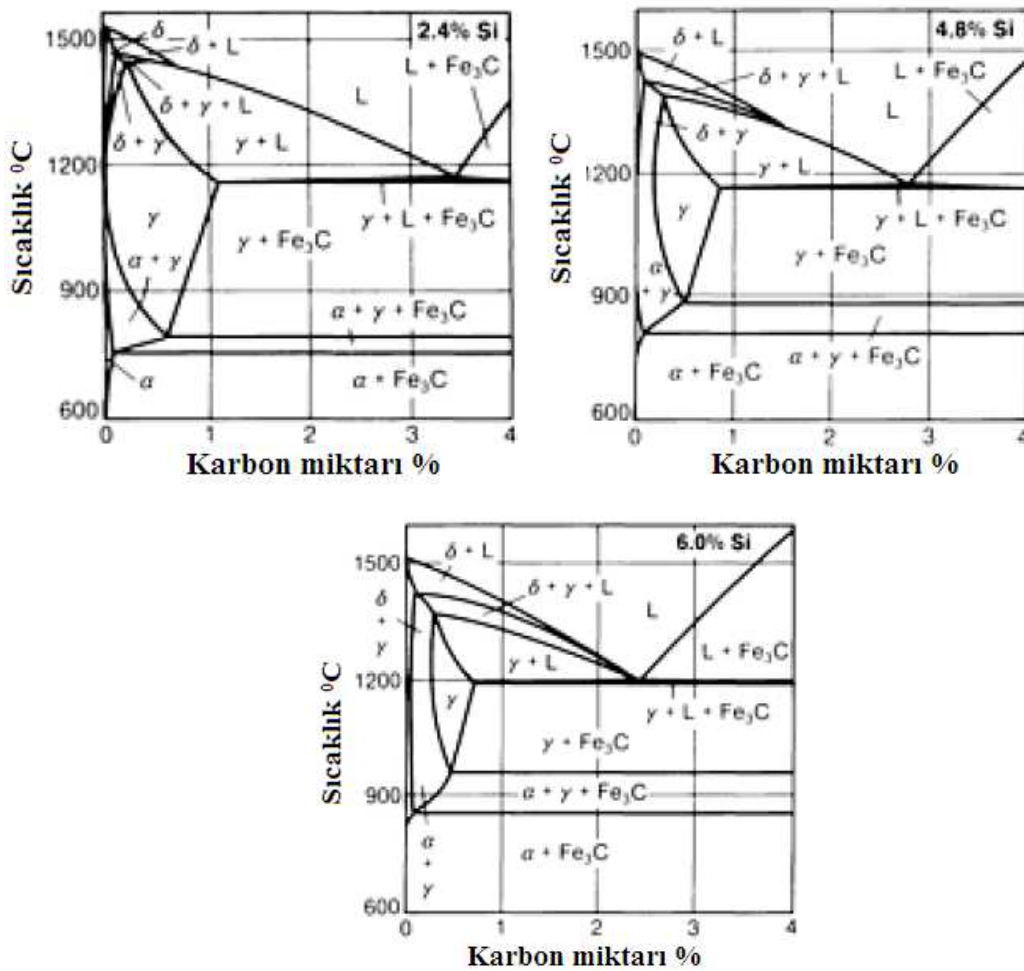


Şekil 2.1. Fe-Fe₃C ve Fe-C diyagramında oluşacak fazların gösterilişi

Bu tip mikroyapıya haiz alaşımların ısıtılması ve soğutulması esnasında meydana gelebilecek yapısal değişimler demir - demir karbür denge diyagramından belirlenebilir. Yüksek sıcaklıklarda uzun süre tutmak veya alaşımda bazı elementlerin bulunması, grafit çekirdeklerinin oluşumuna yol açar ki bu durumda metastabil demir karbürün stabil grafit haline dönüşmesini teşvik eder. Buna karşılık çabuk soğuma ve alaşımdaki bazı elementlerin etkisi ile, çekirdeklenme önlenir, bu durum metastabil demir - karbür fazının sürekli mevcudiyetine yol açar [13].

2.1.3. Demir - karbon - silisyum alaşımının katılaşması

Gri dökme demirlerde grafitleşmeyi teşvik edici en önemli bileşim faktörü, alaşımdaki silisyum'dur. Silisyum'un etkisi, Fe-C-Si üçlü sisteminden alınan düşey kesitler yardımı ile daha iyi gösterilebilir (Şekil 2.2). % 2 Si ve yaklaşık % 3.5 C içeren bir Fe-C-Si alaşımının katılaşması göz önüne alındığında: dengeli katılaşma şartlarında primer ostenit dendritleri 1260 - 1127°C da yani liküdüs eğrisi ile ötektik katılaşmanın başlangıcını belirten eğri arasındaki sıcaklık aralığında, meydana gelirler. 1127 - 1099°C aralığında ötektik (ostenit + grafit) katılaşması ile katılaşma olayı tamamlanır. Bahis konusu alaşımda katılaşma sona erdiğinde, mikroyapı % 20 primer ostenit dendritleri ve % 80 ostenit + grafit ötektiğinden oluşur. Sıcaklığın solüdüs'ün altına düşmesi ile karbon, ostenitten grafit halinde kusulur ve ötektikteki grafit lamelleri üzerine çöker.



Şekil 2.2. Artan silisyum miktarıyla Fe-C diyagramının değerlerinin değişimi

Karbon çökmesi ötektoid sıcaklığına (%2Si için yaklaşık 801 — 706°C) erişilinceye kadar devam eder. Ötektoid sıcaklığında % 2.0 Si'li ostenit yaklaşık olarak %0.60C içerir; bunun takip eden dengeli soğumada ise ostenit ferrite dönüşür ve karbonun geri kalan kısmında grafit lamelleri üzerine çöker. En son mikroyapı, primer ostenit dendritlerin-den oluşan ferrit alanları ile ostenit grafit ötektiğinden oluşan ferrit ve grafit karışımı şeklindeki alanlar halinde görülür.

Ticarî dökme demirlerde birçok başka elementin mevcut oluşu ve dolayısıyla başka faktörlerin işin içine girişi nedeniyle aynı katılma çok daha kompleks şekilde oluşur. Grafitleşmenin üç önemli kademesini ortaya konmaktadır, a) Katılma esnasındaki grafit-leşme, b) Ostenitten karbon çökmesi ile grafitleşme (katı halde) ve c) Ötektoid dönüşüm esnasındaki katı halde grafitleşme devam eder. 538°C'a kadar da bahsi geçen sıcaklıklarda geçecek sürenin çok uzun olmaması şartıyla grafitleşme meydana gelebilmektedir [3, 13].

2.1.4. Lamel grafitli dökme demirdeki elementlerin katılaşmaya etkisi

2.1.4.1. Karbon

% 2.5 ilâ 4.5 karbon içerebilen Lamel grafitli dökme demirler, 2 farklı fazda bulunabilmektedir. Bunlar;

1. Bileşik halde bulunan karbon
2. Serbest halde bulunan karbon

Kimyasal analizde verilen toplam karbon yüzdesi, her iki durumda bulunan karbon yüzdelерinin toplamıdır ve aşağıdaki bağıntı ile gösterilebilir

% Toplam karbon ~ % Grafit halindeki karbon + % Birleşik halindeki karbon

2.1.4.2. Silisyum

Gri dökme demirde silisyumun etkisi büyüktür. Gri dökme demirler % 1-3.50 arasında silisyum içerir ve en büyük etkisi grafitleşme üzerinedir. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi artan silisyum % si demir-karbon denge diyagramındaki ötektik

noktasını sola doğru kaydırır. Ötektikteki bu kayma, karbon eşdeğeri göz önüne alınarak aşağıdaki bağıntı ile tarif edilebilir.

$$\text{Ötektik (Fe-C-Si) alaşımında karbon } \% C = \% 4.3 - 1/3 * \% Si \quad (2.7)$$

Formül 2.7’de görüldüğü üzere gri dökme demir bileşimindeki silisyum yalnız ötekiği değil aynı zamanda ostenitin karbon eritme sınırını ve ötektoid noktasını sola doğru kaydırır. Bu nedenle örneğin % 2 Si içeren gri dökme demirde, perlit Fe—C diyagramındaki % 0.76 yerine yalnız % 0.60 karbon içerir. Mikroyapı açısından Silisyum ferrit içinde erimiş durumdadır, ferrite mukavemet kazandırır. % 2.0 Si içeren ferritik gri dökme demirin sertliği 120-130 Brinell civarındadır.

Silisyum grafitleşmeyi teşvik eder. Düşük yüzdelerde Silisyum katılma esnasında grafitleşmeyi sağlamak için yetersiz kalır, ancak yüksek sıcaklıkta ısıl işleme (örneğin temperlemede) katı halde çekirdek oluşumu ve grafitleşmeyi sağlar [3, 13].

2.1.4.3. Kükürt ve manganez

Gri dökme demir yapısında %c 0.25 oranına kadar bulunabilen kükürt, daha çok grafitleşmeyi sınırlayan (karbürü stabilize eden) bir elementtir. % 0.25'in üzerindeki kükürt dökme demire istenmeyen sertlik kazandırır ve işlenebilme kabiliyetini azaltır. Kükürtün etkisi, bileşimde bulunan manganez göz önünde tutularak incelenmelidir.

Kükürt miktarı arttıkça bileşik karbon miktarı da artar böylece sert ve gevrek beyaz dökme demir oluşumuna teşvik eder. Kükürt, bileşik karbon oluşturmasından başka, demirle reaksiyona girerek demir sülfür (FeS) oluşturur. Bu düşük ergime dereceli bileşik ince dentritler arası tabakalar şeklinde mevcut olup yüksek sıcaklıklarda kırılma ihtimalini artırır, diğer bir deyişle sıcak gevrekliğe sebep olur. Bu yüzden kükürtün mevcudiyeti arzu edilmeyen kötü dağılım gösteren FeS segregasyonlarına sebebiyet verdiği için malzemenin sertliğinde muntazam olmayan değişimlere ve işlenebilme zorluklarına sebep olur. Aynı zamanda FeS karbürlestirici bir bileşiktir, yani malzeme yapısında karbürlerin stabil olmasına sebebiyet verir

Manganez mevcut olduğunda, Mn'in % miktarına bağlı olarak MnS veya kompleks Demir - Manganez sülfürleri oluşur. Şekil 2.3'te MnS olarak kükürt, perlitik bir mikroyapıya neden olma etkisini büyük ölçüde kaybeder.



Şekil 2.3. Gri dökme demirde manganez - Sülfür enklüzyonları (açık gri renkli) (Dağlanmamış 200X)

Tek başına Mn grafitleşmeye direnç gösteren bir elementtir, dolayısıyla kükürt ile reaksiyon için yeterli miktardan fazla Manganez perlitik mikroyapının devamlılığına neden olur. Bahis konusu ilişkiyi ifade etmek için aşağıdaki kaideler ileri sürülmüştür

$\% S * 1.7 = \% Mn$ olduğunda, MnS oluşumu için kimyasal açıdan yeterli Mn ve S vardır. (2.8)

$\% S * 1.7 + 0.15 = \% Mn$, olduğunda maksimum ferrit ve minimum perlit oluşacaktır. (2.9)

$\% S * 3 + 0.35 = \% Mn$, olduğunda perlitik bir mikroyapı oluşacaktır. (2.10)

Kükürdün demirde bulunması ile kötü tesirler yaratan bir element olmasına karşın tamamen perlitik mikroyapının oluşumuna neden olduğu görülmüştür. Örneğin % 3,49 C ve % 2,01 Si içeren bir alaşım yaklaşık tamamı ferrit olan bir matrise sahip iken sadece % 0,018 S ilavesi bu manganezin lamel grafitli dökme demirdeki pozitif tesiri ise kükürt problemini bir dereceye kadar indirgemesidir. Manganez, sülfüre

karsı afinitesinin fazla olması nedeniyle MnS şeklinde bağlanır. MnS oluşturacak miktarda manganez mevcut olduğunda sülfürün etkisini giderek bileşik oranını azaltmış olur. MnS çökmeye erken başlamakta ve tüm katılaşma prosesi boyunca çökelmeye devam etmektedir. Yüzey geriliminin yüksekliği sebebiyle oldukça küreseldir ve genellikle rastgele dağılmış durumdadır.

Fe-C-Si alaşımı olarak tanımlanan dökme demirlerde manganez ilavesi, mevcut olan perlit miktarı açısından pek etkili olmamaktadır. Örnek vermek gerekirse %3,0 C ,% 1,91 Si' li kükürt içermeyen alaşımda % 1,22 Mn ilave edilmesinde serbest ferrit görülebilmektedir. Bu nedenle, kükürt ile reaksiyona girebilecek miktarda fazla manganez perlitik mikro yapının devamlılığına neden olacaktır. Dökme demirlerdeki manganez miktarıyla malzemenin yapısı arasındaki ilişki, yukarıdaki 2.8, 2.9, 2.10 bağıntılarında gösterilmiştir

2.1.4.4. Fosfor

Dökme demirlerin yapısında fosfor elementinin bulunması, mikroyapıda 980⁰C gibi düşük ergime sıcaklığına sahip %10,2 fosfor içeren demir fosfor ötektiği görülmesine neden olmaktadır. Fosfor segregasyonu olan steadit, hücrel bir yapıya sahip olup, katılaşma sıcaklığını 980⁰C kadar düşürmektedir. Bileşimdeki fosforun büyük bir miktarı demir ile birleşerek Fe₃P oluşumuna neden olmaktadır.

Kırılganlık yaratan fosforun mevcudiyeti, malzemenin kırılganlığı arttırmasına karşın düşük sıcaklıklarda katılaşmasını sağlayarak akışkanlığını arttırır. İşlenmesi gereken parçalar için fosfor miktarı limitler içinde olmalıdır. Sıvı metalin akışkanlığını arttırmak için belirli bir % ye kadar fosfor içerebilmektedir. Lamel grafitli dökme demirde % 0,05 – 1,00 miktarları arasında bulunabilir. Demir- karbon- silisyum alaşımlarına fosfor ilavesi % 0,70 gibi yüksek miktarlarda olsa dahi perlit miktarında orta derecede bir artış sağlar Formül 2.7'de fosforun etkisi, ötektik karbon % sini veren bağıntıda verilmiştir.

$$\text{Ötektik C \% si} = 4.30 - 1/3 (\text{Si} + \text{P}) \quad [10]$$

$$(2.11)$$

2.1.4.5. Nikel

Nikel demir içinde her oranda eriyebilmektedir, α dönüşüm sıcaklığını alçaltmakta ve her %1 Ni, Fe-C ötektiginin karbon içeriği %0.06 oranında düşürmektedir. Bu durum düşük alaşım içerdiğinde önemli olmamakla beraber yüksek nikel içinde önemli olmaktadır. Nikel aynı zamanda dökme demirin ergime noktasını yaklaşık 50°C kadar düşürmektedir ve akışkanlığı biraz arttırmaktadır.

Nikel orta derecede bir grafitleştiricidir, ferrit içinde erir ve bu fazın sertleşmesine sebep olur. Yalnız basına kullanıldığında lamel grafitli dökme demir yapısını elde etmek için gerekli silisyum miktarını azaltıcı rol oynar ve bu suretle grafit ve perlitik yapının da ince taneli oluşunu sağlar [3].

2.1.4.6. Molibden

Malzemenin mukavemeti çok artırır, tokluğu artırır ve üniform bir yapı sağlar. Parça hassasiyetini azaltır, yüksek sıcaklıklarda çok iyi mukavemet sağlar, ısıl işlem sırasında çok iyi sertleşebilme özelliği sağlar. Molibden; ostenitin ince perlit ve beyrit oluşumuna sebep olması nedeniyle sertleştirici ve mukavemetleştirici etki gösterir. Mukavemetin bu artışı molibdenin ferritteki katı eriyik halinde bulunmasından ve ostenit dönüşümünü geciktirmesinden dolayıdır. Düşük karbonlu lamel grafitli dökme demirde molibdenin etkisi daha çok olur. Çarpma dayanımını ve elastik modülü artırır [3].

2.1.4.7. Krom

Perlit yapısını teşvik edici bir elementtir. Krom % 0,15 ila %0,75 gibi küçük miktarlarda bile lamel grafitli dökme demirin tamamen perlitik bir mikro yapıya dönmesini sağlar. Kromun perlit dengeleme tesiri ve yavaş soğumada meydana gelen serbest ferriti ortadan kaldırması ile mekanik özellikleri yükseltir.

Krom sertlik ve mukavemet artışından başka malzemenin oksidasyon direncini de artırır. Bu şekilde ısıtılma esnasında tufal oluşumu önlenir ve dökme demirin ısıya

direnci artar. %30 kromlu yüksek alaşımlı dökme demirler, tufal ve korozyon direnci istenen yerlerde kullanılabilirler [3].

2.1.4.8. Bakır

Bakır dökme demirde orta derecede bir grafitleştirici elementtir. Ferrit fazında erimektedir. Aşınma ve korozyon direncini artırmak için %3 oranında kullanılabilir. Perlitik yapıyı nispeten inceltir. Grafit yapısına etkisi çok azdır. Yapıya sertlik artırıcı etki verir [3].

2.1.4.9. Alüminyum

%0,25 gibi düşük miktarlarda ilave edilebilen kuvvetli bir grafitleştirici olup lamel grafitli dökme demirde kullanılan alaşım elementidir. %8 gibi yüksek değerlerde kullanıldığında karbürleştirici etkisi de görülmektedir [3].

2.1.4.10. Titanyum

Lamel grafitli dökme demirde titanyum %0,05 - 0,25 gibi oranlarda kullanıldığında grafitleşmeyi teşvik eder. Grafit lamel boyutlarını küçültür. Ferrit oluşturur ve dolayısıyla perlitin stabilitesini azaltır [3].

2.1.4.11. Kurşun

Kurşun yalnız ilave edildiğinde aşırı soğuma miktarını artırır ve yapının D tipi grafit oluşumuna yönelmesine neden olur. Asılama sayesinde yapıda meydana gelen D tipi grafit ve ağ şeklindeki grafitler değişerek ve ötektik hücre büyümesi meydana gelir [3].

2.1.4.12. Bizmut

Ötektik hücre büyümesini engelleyen bir etkisi vardır. Dökme demire ilave edilen bizmut aşırı soğuma miktarının artmasına sebep olur. %0,5 bizmut miktarında %0,25

'e oranla daha fazla aşırı soğuma gözlenir. Bunun sonucunda D tipi grafitler oluşur. Çekirdeleşmeyi engellediği için hücre miktarında azalış meydana gelir. Kopma mukavemetini azaltıcı etkisi vardır. Bizmut içeren dökme demirler asılamayla, D tipi grafit oluşumunu kısıtlar ve kopma mukavemeti artar [3].

Tablo 2.1. Elementlerin lamel grafitli dökme demire etkilerinin gösterilişi

Grafitleştirici Etki	Karbürleştirici Etki	%Bileşik Karbona Etki	Perlitlik Dökme Demirlerde Kullanılan %	Metal Matrisi ile Perlit ve Ferrite Etki	Grafit Yapısına Etki
Grafitleşmeyi azaltanlar					
Krom	Kuvvetli karbürleştirici	Artırır	0.15-1.00	Perlitli inceltir ve sertleştirir, ferriti yok eder	Nispeten inceltir
Vanadyum	Kuvvetli karbürleştirici	Artırır	0.15-0.50	Perlitli inceltir ve sertleştirir, ferriti yok eder	İnceltir
Manganez	Karbürleştirici	Artırır	0.30-1.25	Perlitli inceltir ve sertleştirir, ferriti yok eder	Nispeten inceltir
Molibden	Karbürleştirici	Artırır	0.30-1.00	Perlitli inceltir, daha yüksek oranlarda iğnesel ve beynitlik yapı oluşturur	İnceltir
Grafitleşmeyi arttıranlar					
Silisyum	Kuvvetli grafitleştirici	Azaltır		Malzemeyi yumuşaltır ferrit oluşturur.	İrileştirir
Nikel	Grafitleştirici		0.10-3.00	Perlitli nispeten inceltir, sertlik verir	Nispeten inceltir
Bakır	Grafitleştirici		0.25-2.00	Perlitli nispeten inceltir, sertlik verir	
Grafitleşmeye İki yönlü etki					
Alüminyum	Küçük miktarlarda %0,5 grafitleştirici	Azaltır	----	Ferrit oluşturur, perlitin stabilitesini azaltır	Birçok etkene bağlı kompleks
Alüminyum	%8'den fazla Al'lı dökme demirler beyazdır ve karbürler ısı ile işlemle parçalanmaz	Artırır	----	Matrisi stabil karbürler ve perlitten oluşur.	Stabil beyaz dökme demir
Titanyum	Grafit haline dönüşmeyen çok stabil TiC'ler oluştururlar	Artırır	----		Grafiti azaltır
Titanyum	%0,25 ten az miktarlarda grafitleştiricidir	Azaltır	----	Ferriti oluşturur perlitin stabilitesini azaltır.	Grafit lamellerini inceltir.

2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Katılaşma

Küresel grafitli dökme demir, çeliğinkine benzer bir matris içinde dağılmış küre şekilli grafitlerden oluşan bir yapıya sahiptir. Yapı açısından gri dökme demirden yegâne ayrıcalığı grafitlerin şeklindedir [10].

Küresel grafitli dökme demirler gri dökme demirlerden farklı olarak, aynı karbon ekivalent değeri için, ötektik katılaşması daha yüksek sıcaklıkta başlayan malzemelerdir. Bu durumda küre şekilli grafit bir ostenit kabuğu ile çevrilir ve yalnız bir faz (ostenit) ötektik yapıyla temas halinde kalır. Bu tarz katılaşmaya neo-ötektik katılaşma denilmektedir. Her bir ostenit kabuğu bir hücredir. Bu hücre içindeki grafitin büyüebilmesi için ostenit kabuğundan içeriye doğru karbon difüzyonu olmalıdır. Bu nedenle küresel grafitli dökme demirlerde, gri dökme demirlere nazaran daha yavaş bir katılaşma olmaktadır. Neo-ötektiğin büyümesi başladıktan sonra, küresel grafit çekirdeklenmesi olmaz. Dolayısıyla küresel grafitlerin sayısı katılaşmanın hemen başlangıcında belirlenmiş olur. ötektoid sıcaklığına kadar mevcut grafitler üzerine karbon çökmesi olur [9,10,14].

Küresel grafitli dökme demirlerin genel sınıflandırmaları, mekanik özellikleri ve malzeme yapısı esas alınarak yapılmaktadır. Bu tarz dökme demirlerde grafitlerin küresel şekilleri nedeniyle, mekanik özellikler matrisin yapısına bağlıdır. Kürelerin büyüklüklerinin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi azdır. Küresel grafitler dökümün kesit kalınlığına ve grafit çökmesi için gerekli çekirdek sayısına bağlı olarak çeşitli büyüklüklerde olabilirler. Genellikle daha ince kesitlerde daha çok sayıda çekirdek bulunur. Buna bağlı olarak, ince kesitlerde grafit kürelerinin boyutları daha küçük olacaktır.

Küresel grafitli dökme demirlerde, grafitlerin sayısı ve dağılımı metalurjik kalitenin çok iyi ve hassas bir göstergesidir. Küre sayısının 100 adet/mm² olması ortalama bir değer olarak tercih edilir. Gri dökme demirde olduğu gibi ötektoid sıcaklığından geçerken ki soğuma hızı ve alaşımlandırma, matris yapısını tayin eder. Tamamen küresel grafitli bir yapının elde edilmesinde, uygun sayıda kürenin mevcut olması gerekir. Küre sayısının az olması karbonun yayımlanabileceği yer sayısının az olması

demektir ve bunun sonucu, işlem değişkenlerine ve bileşime bağlı olarak, müteakip soğuma esnasında ya lamel şekilli grafitler veya demir - karbür oluşacaktır [14].

Küresel grafitli dökme demirlerin yapısı, bir matris ve bu matris içindeki küresel grafitlerden oluşur. Grafitlerin hacimsel olarak yapının %8-10'unu kaplaması tercih edilir. Yapıda bulunabilecek karbürler ise, ostenitik küresel grafitli dökme demirler dışında tercih edilmez. Karbürler mukavemeti ve tokluğu olumsuz yönde etkilerler.

Hipoötektik bileşimli küresel grafitli dökme demirlerde ostenit dentritlerinin oluşumu ile katılaşma başlar. Hiperötektik bileşimlilerde ise katılaşma genel hatlarıyla aynı olup tek ayrıcalığı, ilk katılan faz (primer) küre şekilli grafitlerdir. İyi bir sfero üretimi için hipötektik katılaşma gerekmektedir.

Primer ostenit fazının katılaşması sonrasında alaşım ve alaşımsız küresel grafitli dökme demirlerin yapısı tamamen ostenittir ve katı çözelti halinde yaklaşık %1 C içerir. Döküm soğudukça, karbonun ostenitteki çözünürlüğü de azalır. Çözeltiden itilen karbon çökelir ve grafit kürelerine eklenir. Bu süreç, katılaşma tamamlanıncaya kadar devam eder.

Alaşımsız küresel grafitli dökme demirlerde ostenit oda sıcaklığında kararlı bir faz değildir ve demirin başka bir kristallografik formu olan ferrite dönüşür. Bu dönüşümün sıcaklığı yapıdaki Si miktarından etkilenir ve 723°C civarındadır

Küresel grafitli dökme demirlerde ostenit-ferrit dönüşümü matris yapının karbon oranını etkiler. Ostenitin kristalleşme sıcaklığında karbon oranı %1 civarındadır ve bu oran soğuma sırasında azalır. Ostenit-ferrit dönüşümü sırasında karbonun ostenitteki çözünürlüğü %0.55 civarındadır. Buna karşın karbonun ferrit içinde çözünürlüğü sıfırdır. Bu durumda dönüşüm sırasında karbon açığa çıkar. Açığa çıkan bu karbon; soğuma hızına, kimyasal bileşime ve grafit dağılımına bağlıdır. Düşük soğuma hızlarında açığa çıkan karbon çökelir ve grafit kürelerine eklenir. Bu durumda matris yapı tamamen ferrittir ve ferritik küresel grafitli dökme demir elde edilmiş olur. Oysa hızlı soğuma karbonun çökmesine olanak vermez. Karbon ferrit içinde çözünemediği ve ostenitte katılaşma sırasında dönüşümüne devam ettiği için

ostenit doku içinde çok ince demir karbür plakaları oluşmaya başlar. Bu plakalar matrisin sürekliliğini bozar ve ferrit ile ardışık plakalar oluşturur. Ortaya çıkan bu yapı perlittir. Bu şekilde oluşan demir ise perlitik küresel grafitli dökme demirdir.

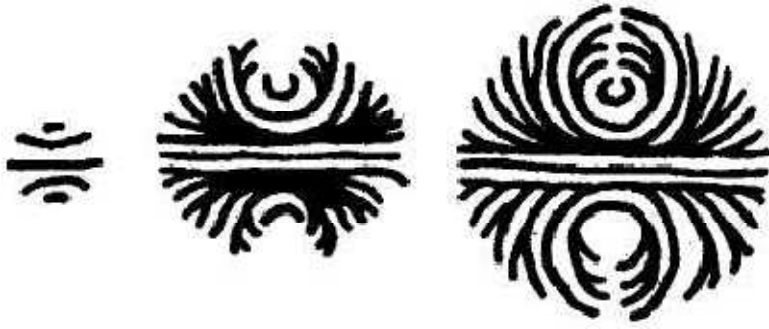
Küresel grafitli dökme demirlerin döküm sonrası matris yapılan çeşitli oranlarda ferrit ve perlit içerirler. Bunun dışında çeşitli ısı işlem ve katılaştırma teknikleriyle yapıyı değiştirmek mümkündür. Soğuma hızına müdahale edilerek veya katılaşmadan sonra mamul üzerinde ısı işlem uygulamalarıyla beyenitik, martenzitik veya ostenitik matris yapılar elde edilebilir [10,14].

2.2.1. Küresel grafitin kristalleşmesinde öne sürülen teoriler

Küresel grafitli dökme demirin katılaşmasının etüdü, soğuma eğrilerinin incelenmesi ve metalografik etüdün yapılması yoluyla olur. Bilim adamları tarafından tarif edilen katılaşma, bazı ufak münakaşalı sonuçları da beraberinde getirmiştir. Küresel grafitin kristalleşmesi konusunda, tamamen aksi düşünceye sahip olup birbirine ters düşen hipotezler ve deney sonuçları mevcuttur. Bu çelişki yaratan teorilerin bazıları aşağıda gösterilmiştir

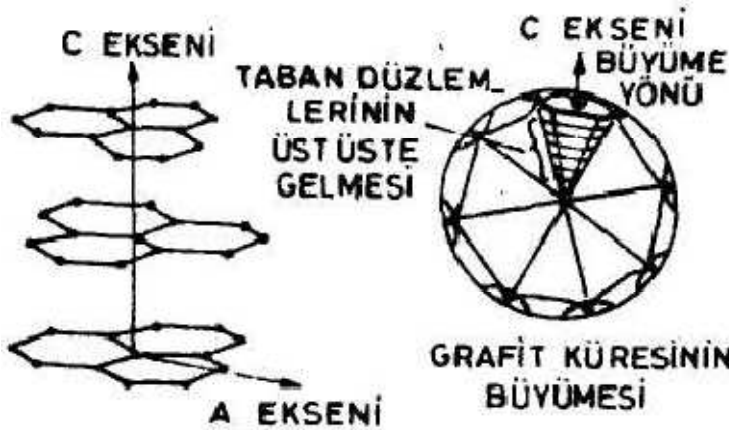
Bu teorilerden birincisi grafit şeklinin çekirdek tarafından seçildiği görüşüdür. Küresel grafitin, yabancı tanecikler vasıtasıyla her yönde aynı hızla büyümesi görüşüne dayanmaktadır. Metalografik kanıtın olmayışı bu teorinin en eksik yanısıdır; zira grafit kürelerinin polikristalin yapısı açıklanamamaktadır.

İkinci teori, küresel grafit kristalizasyonu, büyüyen grafit dendritlerinin dallanma olasılığının artması ile meydana gelmektedir. Bu açıklamada bir küresel grafit kristalinin, lamel biçimde büyümesi gibi olduğu varsayımından yola çıkılmaktadır. Dallanma olasılığı az ise, grafit lamel, yapraksı bir biçim alacak, ancak küreselleşmeyi etkileyen elementlerin var olması halinde, dallanma ve dolayısıyla küreselleşme meydana gelecektir. Bu teorinin deneysel olarak geçerliliği maalesef tespit edilememiştir



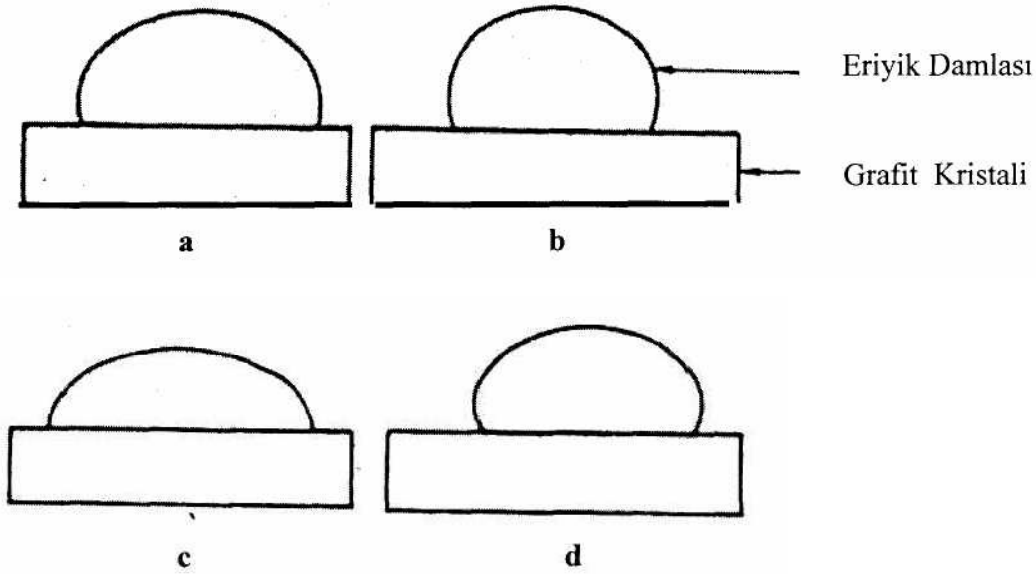
Şekil 2.4. Dallonma frekansı hipotezine göre bir grafit küresinin büyümesindeki muhtemel kademeler.

Üçüncü teori olarak, küreselleşme eriyiğin yüzeysel gerilimin artması ile meydana gelmektedir. Deneysel çalışmalar, demir eriyiğin Fe -Si - Al - Mg ile işlem görmesi sonucu, eriyik yüzey geriliminin %30-50 nispetinde arttığını göstermektedir. Böylece grafit kristal kafesi c eksenini, prizma yüzeyi yönünde büyümektedir [14,15] (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Yüzeysel enerji teorisine göre grafitin küresel bir biçimde büyüme olayı

Başka bir araştırmada eriyik demir damlacıkları ısıtmalı mikroskopta farklı yönlerde bulunan grafit plakalar üzerine (bazal yüzeyi veya prizma yüzeyi) bırakılmışlar ve sınır enerji gerilimleri saptanmıştır [14,15] (Şekil 2.6).

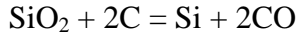


Şekil 2.6. Grafitin faz ve prizmatik yüzeyi üzerine konan kükürtlü ve magnezyumla işlem görmüş demir eriyik damlacıklarının kontakt açıları, a) Kükürt eriyik lamel grafitli dökme demir faz yüzeyi, b) Kükürtsüz eriyik, faz yüzeyi, c) Kükürtlü eriyik, faz yüzeyi, Kükürtsüz eriyik, prizmatik yüzeyi sınır enerjisi. $b > d > a > c$ [14,15]

A eksenini yönündeki grafit plaka üzerindeki kükürtlü demir eriyiğinin damlacık-plaka kontak açısı magnezyumlu eriyikle hemen hemen aynı büyüklükte bulunmaktadır. (Şekil 2.6. a- b). İki eriyik de yüksek sınır yüzeyi enerjisine sahiptir. Prizma, yani c eksenini yönündeki plakalarda ise kükürtlü eriyiğin sınır yüzeyi enerjisi azalmakta, magnezyumlu eriyik demir de ise artmaktadır (Şekil 2.6. c-d). KGDD' de eriyik ile grafit kristali prizmatik yüzeyi arasındaki sınır yüzey enerjisinin, kafes bazal yüzeyi (a) arasındakine nazaran büyük olması sonucu, grafitin bazal yüzeyine dik bir yönde büyümesi ile halkalar şeklinde grafit konilerinin gruplanması sonucu küreselleşme meydana gelmektedir

Bir başka teori, faz sınırı veya gaz kabarcığı teorisidir. Bazı araştırmacıların varsayımlarına göre; küresel grafitin büyümesi için yapıda serbest yüzeylerin mevcut olması gerekmektedir. Grafitler, Mg ve Zn gibi yüksek buhar basıncı olan elementlerin oluşturdukları gaz boşluklarının sayesinde çekirdeklendiği ve grafit büyümesinin gerçekleştiğine inanılmaktadır. Bilim adamı Yamamoto tarafından yapılan araştırmada gazlardan arındırılmış toprak elementlerin dökme demir içinde grafit küreselleşmesine sebep olmadığını bulgusuna ulaşmıştır ki Hidrojen, Nitrojen

gibi diğ er gazlarında küresel grafitin büyümesi için gerekli olabileceğ i önerisini ortaya koymuştur. Bu teoriye göre gerekli faz sınırlan sıvı metal içerisindeki CO gaz kabarcıkları ile aşağıdaki reaksiyon sonucu oluşmaktadır:



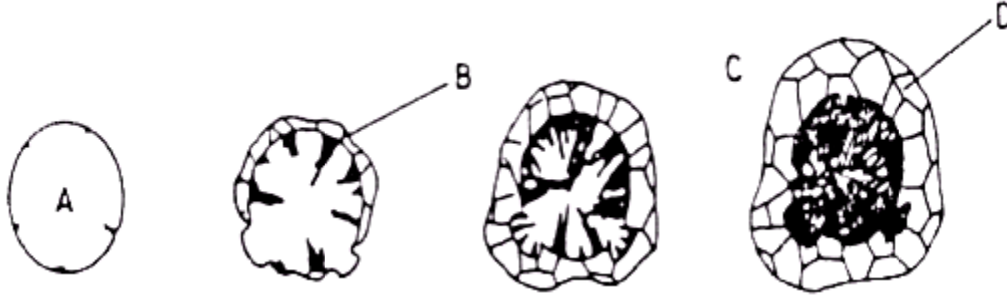
Kristalleşme için SiO_2 ' in mevcut olmasının gerekliliğ i birçok çalışmayla kanıtlanmış olup, özetle:

1. Eriyik grafitinin kristalleşmesi için heterojen çekirdeklere sahip olmalıdır. Bu çekirdekler kural olarak SiO_2 ' dirler.
2. $\text{SiO}_2 + 2\text{C} = \text{Si} + 2\text{CO}$ denge durumu sıcaklığının elli derece üzerinde eriyikteki silisyum oksijen alımına yol açar.
3. Eriyiğ in uzun süre belli bir sıcaklıkta tutulması, oksijen kaybına ve dolayısıyla grafitin şeklen bozulmasına neden olur. Bu olay vakumda ergitme şartlarına benzer bir etkiye sahiptir (D tipi grafit ve karbürlerin oluşması).
4. 4.Oksijen kaybı, aşılama ile giderilemez.
5. Mangan ile aşılama heterojen grafit çekirdeklenmesine engel olur.
6. Eriyiğ in aşılamaya cevap verebilmesi için, yeterli oksijen miktarına sahip olması gerekir.
7. Ca, Ba, Sr, Al gibi aktif aşılama ajanları stabil oksitler meydana getirirler ve SiO_2 bu oksitler üzerinde kristalleşir.

KGDD' in üretiminde, küreselleştirme işleminin oksijen miktarı 74 ppm' den 10 ppm değerine düşer, aynı zamanda kükürt miktarı da azalır. Bunu takip eden aşılama işleminin eriyik çok sayıda aktif aşılama ajanlarının oluşturduğu heterojen oksit çekirdeklerince zenginleşecektir. Ya yüzey elementlerinden aktif kükürdün giderilmesi veya olasılıkta diğ er yüzey aktif elementlerin mevcut oluşu (Mg) karşısında grafitin lamel şeklindeki büyümesi engellenmektedir.

Dislokasyonlar, grafit kristalinin büyümekte olan taban düzleminin kendi üzerinde katlamaya zorlar. Vida dislokasyonu ve spiral tipi bir büyümeye neden olur.

Dolayısıyla grafitin küre şeklinde büyüme kademeleri Şekil 2.7'deki gibi olacaktır [14,15].



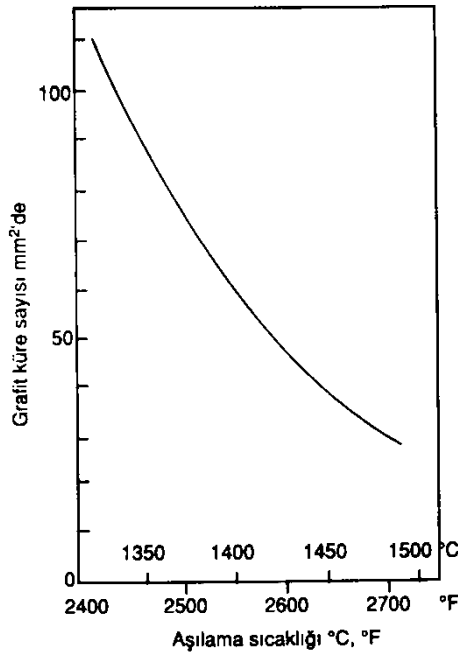
Şekil 2.7. Faz sınırı teorisine göre küresel grafitin büyüme kademeleri A Gaz, B Grafit tek kristali, C Eriyik, D Ostenit

2.2.2. Küresel grafitli dökme demirde aşılamanın etkisi

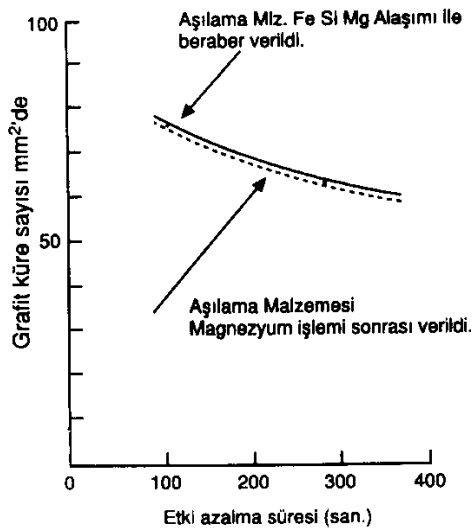
Aşılama malzemesinin etkinliği, FeSiMg 'un etkinliğine nazaran zamanla daha hızlı bir şekilde azalmaktadır (Şekil 2.8).

Seryum (Ce) ile birçok aşılama malzemesinin etkisi arttırılmaktadır. Seryum nodul sayısını arttırmakta, zamanla etkinin azalmasını engellemekte ve beyaz katılaşmaya temayülü indirgemektedir. Bu sonuçlara uymayan yegane aşılama malzemesi SrFeSi olmaktadır. Seryumun etkisinin en fazla olduğu alaşım FeSi dur.

Küresel grafitli dökme demirlerde seryum, küreleşmeyi olumsuz etkileyici elementlerin bu etkilerini azaltan bir görev üstlenir. Genel olarak kullanılan FeSiMg alaşımlarının çoğunda az miktarda seryum vardır. Ce miktarı % 0,01 'dir.



Şekil 2.8. Aşılama durumuna sıcaklığın etkisi.



Şekil 2.9. 1370°C uygulanan iki aşılama yöntemini karşılaştırılması.

Seryum ihtiva eden aşılama malzemelerinde Bizmut (Bi) bulunması halinde nodül sayısı kuvvetli bir şekilde artmaktadır. Bizmut 'un en etkili miktarı % 0,02 dir. FeSi, Mişmetal, Bizmutlu aşılama malzemelerinin kullanılmaları halinde yine zamanla bir etki azalması (nodul sayısı) gözlenmesine rağmen, FeSi 'a nazaran çok daha kuvvetli kalıcı bir etki mevcut olur (4-10 katı fazla).

Aşılama etkinliğinin azalması ile ince parça kesitlerinde karbür oluşumu artar, kalın kesitlerde grafit yüzmesi olayı ile grafit patlaması riski fazlalaşır.

Aşılama sonrası eriyik içinde bulunan SiO_2 , CaO , Al_2O_3 ve BaO nükleleri Brawn moleküler hareketini yapar durumdadır. Yani serbest bir şekilde eriyik içinde hareket halinde olup, diğer bir parçacığa çarpmaları halinde koagülasyon (daha büyük oksit taneleri) oluşur. Bu hareket sıcaklık ve süreye bağlı kaldığında zamanla Brawn moleküler hareketini yapan parçacık sayısı azalır ve aşılama sonrasında itibaren kısa bir zaman biriminde aşılamanın etkinliği sürekli olarak düşer.

2.2.3. Elementlerin küresel grafitli dökme demire etkisi

Küresel grafitli dökme demirlerin yapısını etkileyen birçok element mevcuttur. Pb, Bi, Sb, As, P, S gibi elementlerin küresel grafitli dökme demirler üzerinde olumsuz etkiler yarattığı için malzemenin bünyesinde yer alması istenmediği halde fiziksel özelliklerini geliştirmek için bazı elementlerin yapıya nüfuz etmesi istenir. Bunların önemli olanları Ni, Mo, Cr, Mn, V, Cu olarak sıralanabilir. Bu elementler, karbürlerin dağılımı ve yüzdesini grafit seklini ve matris yapı ve özelliklerini etkilerler. Diğer taraftan soğuma hızlarından doğacak karbür oluşumu, alaşım elementleri tarafından kontrol edilebilmektedir.

Küresel grafitli dökme demirlerde 3 önemli alaşım elementi önem sırasına göre karbon, silisyum ve manganezdır [2,3,9,10].

2.2.3.1. Karbon

Bileşimde %3-4 oranında bulunur. Karbon oranının artması grafit kürelerinin sayısının artmasına, dökümün akışkanlık ve beslenme özelliklerinin iyileştirilerek döküm kabiliyetinin artmasına neden olur. Hiperötektik kompozisyona sahip dökme demirler grafit kürelerinin oluşumunu ve büyümesini teşvik edilmiş olur [2,3,9,10].

2.2.3.2. Silisyum

Küresel grafitli dökme demirde, %1,80-2,80 aralığında silisyum içerir. Silisyum, ötektoid dönüşüm sırasında oluşan ferritin oranını ve sertliğini arttırarak dökme demir mukavemetinde de önemli bir artış meydana getirir. Bunun yanında küresel grafitli dökme demirin sünek gevrek geçiş sıcaklığını da yükseltir. Bu yüzden, maksimum süneklik ve tokluğunun sağlanması için oranı, %2'nin aşağısında tutulmalıdır. Silisyum miktarı karbon eşdeğerini etkilediği için grafitlesme ve karbon segregasyonu üzerinde önemli rol oynar. Silisyum, karbon aktivitesini yükseltmekte ve grafitin ayrışmasını kuvvetlendirmektedir. Silisyum daha çok ferrosilisyum olarak, işlem sonunda sıvı metale ilave edildiğinde grafit küreleri için çekirdekleştirici görevi görür ve nodül sayısının kontrolü için önem arz etmektedir.

2.2.3.3. Manganez

Yapıda segregasyona yol açan bir element olarak bilinir. Özellikle kalın kesitli dökümlerde manganez tane sınır karbürlerinin oluşumunu teşvik eder. Bunun sonucunda süneklik ve tokluk düşer. Ferritik döküm yapısı istenen demirlerde manganez oranının %0,2 ile sınıflandırılması maksimum sünekliğin elde edilmesi için gereklidir. Ancak perlitik döküm yapısı için manganez oranı %1'e kadar çıkabilir. Kükürtün kötü etkisini dengeleyebilmek tane sınırlarına demir sülfür ötekiği çekilmesini engellemek için kullanılır.

2.2.3.4. Fosfor

Gri dökme demirde olduğu gibi yapıda steadit fazı oluşturarak kırılabilirliği artırır. Tokluğu, sünekliği, kaynak edilebilirliği ve plastik şekil değiştirmeyi kötü yönde etkiler. Çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve sertlik fosforun artmasıyla artış gösterirken uzama değerinde düşüş gözlenir. Bu nedenle oranı, yapıda maksimum %0,05 olarak sınırlanmalıdır [2,3,9,10].

2.2.3.5. Kükürt

Grafitleri küreleştirmek için kullanılan magnezyum (FeSiMg) miktarının daha fazla kullanımını gerektirdiği için oranı, magnezyum işlemi öncesi %0,02 yada daha az bir seviyeye indirilmelidir. Mn/S oranı ferritleşme eğilimini etkiler ve MnS grafit oluşumunda çekirdek görevi görür.

2.2.3.6. Bakır

Bakırın sıvı dökme demirdeki çözünürlüğü yaklaşık %3,5 dur. Bakırın çözünürlüğü magnezyum miktarı ile düşer. % 3 bakır değerine kadar grafit sekline hiçbir olumsuz etkisi yoktur. Bakırın varlığı, titanyum ve kalay gibi lamel grafit formu oluşturan ve mekanik özellikleri negatif yönde etkileyen elementlere karşı dökme demiri daha hassas duruma getirir. Bakır grafitleştirici bir elementtir. Bakır miktarı yükselirken yapıdaki perlit miktarı artar. Yapı tamamen perlitik olduğunda, bakır ilavesi ile mekanik özelliklerin artış oranı azalacaktır. Yüksek bakır miktarında yapı kırılganlaşır, akma değeri artar ve çekme ile sertlik değeri düşer [2,10].

2.2.3.7. Kalay

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

2.2.3.8. Magnezyum

Grafitin küresel formda olması için gerekli magnezyum miktarı %0,02'den fazla olmamalıdır. Mg sıvı dökme demirdeki kükürt ve oksijeni gidermek içinde kullanılır. İhtiyaç duyulandan üzerinde magnezyum miktarı grafit seklini bozucu ve küre sayısını azaltıcı etkiye sahiptir.

2.2.3.9. Nikel

Küresel grafitli dökme demirlerde dayanımı arttırır. Malzemenin sertleşme özelliğini arttıracığından ısıtıl işlem uygulanacak dökümlerde ilave edilir. Bu tür alaşımlar Ni-Resist malzemelerin temelini oluştururlar.

2.2.3.10. Krom

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

Yukarıda sözü edilen elementlerden başka antimuan, kurşun, titanyum, tellür, bizmut ve zirkonyum gibi elementlerde çekirdekleşme potansiyeline etki ederler. Bu elementler ya çok küçük seviyelerde kullanılmalı, yada bileşimde hiç bulunmamalıdır. Krom, nikel, bakır, vanadyum ve bor gibi alaşım elementleri ise karbür yapıcı, perlitli kararlaştırıcı yada ferrit oluşumunu teşvik edici elementler olarak bilinirler [9].

Tablo 2.2. Elementlerin küresel grafitli dökme demire etkilerinin gösterilişi

ELEMENTLER	KULLANIM MİKTARI	POZİTİF ETKİLER	NEGATİF ETKİLER
Küreselleştirici Elementler			
Mg	%60.02-0.08	Sülfür ve oksijen içeriğini düşürür; grafitlerin küresel şekli almasına yardımcı olur.	Karbür oluşumunu gereğinden fazla arttırır
Toprak Alkaliler (RE)	%60.00-0.30	Küreselleşmiş grafit sayısını ve magnezyum ile birleşme kalitesini düzenler, zararlı elementlerin etkilerini nötralize eder.	İnce kesitlerde karbür, kaim kesitlerde ufalanmış grafit oluşumunu gereğinden fazla arttırır
Ca	Belirli değil	Küreselleşmiş grafit sayısını arttırıp kalitesini geliştirir, aşlamayı optimize eder.	Karbür oluşumunu gereğinden fazla arttırır
Ba	Belirli değil	Küreselleşmiş grafit sayısını arttırır, aşlamayı optimize eder.	—
Temel Elementler			
C	%63.00-4.00	Grafit oluşumunu hızlandırıp, yapıda serbest karbür oluşma eğilimini azaltır	Grafit oluşumunu fazlasıyla arttırabilir
Si	%1.80-3.00	Katılaşma ve matris oluşumu esasındaki grafitleşmevi düzenler	Feriti sertleştirir ve kuvvetlendirir, <u>nul-ductility</u> sıcaklığım arttırır
P	Yaklaşık %60.02	—	Tanelerarası karbür ağı oluşumunu şekillendirir
S	%60.01-0.02	Magnezyum ve nadir toprak elementleriyle birleşir	Magnezyum ekleme işleminin verimliliğini azaltır
Mn	%60.00-1.20	Ham döküm ve normalize edilmiş demirlerdeki perlit oluşumunu düzenler	%60.70 'in üzerinde bulurması durumunda taneler arası karbür oluşur
Karbür ve Perlit Oluşturucu Elementler			
Cr	%60.02-0.15	Karbür oluşumunu arttırmada çok etkilidir	Yumuşatma tavlamasında karbür direnci yaratır
B	<%60.0005	Karbür oluşumunu arttırır	Yumuşatma tavlamasında direnç yaratan, taneler arası karbür oluşur
Sn	<%60.10	Perlit oluşumunda çok etkilidir	Taneler arasında yaprak grafit oluşur
As	Max. %60.01	Perlitik yapı oluşumunda etkilidir	—
V	<%60.04	Karbür oluşumunu arttırır	Tavlamayı yavaşlatır

Tablo 2.3. Elementlerin küresel grafitli dökme demire etkilerinin gösterilişi (devam)

ELEMENTLER	KULLANIM MİKTARI	POZİTİF ETKİLER	NEGATİF ETKİLER
Alaşım Elementleri			
Ni	%0.01-2.00	Sertleştirilebilir için kullanılır	—
Mo	%0.01-0.75	Sertleştirilebilmeyi düzenler	Taneler arası karbür oluşumunu gereğinden fazla artırır
Cu	%0.01-0.90	Perlitik sertleştirilebilmeyi düzenler	Küreselleşmiş grafit sayısı veya kalitesi üzerinde önemli bir etkisi yoktur
Zararlı Elementler			
Te	<%0.005	Karınca hatalarını kontrol etmek için kullanılır	Nadir toprak elementleri yokluğunda küreselleşme üzerinde negatif etki yaratır
Pb	belirli değil	—	Taneler arasında yaprak grafit oluşumunu artırır
Ti	<%0.07	—	Vermiküller grafit oluşumunu artırır
Al	%0.003-0.06	Ferrolaşımında çil etkisini başarmak için kullanılır	Porozite oluşumunu artırır, özellikle kalın kesitlerde vermiküller grafit oluşumunu artırır
Sb	<%0.005	Perlit oluşumunu destekler, kalın kesitlerdeki ufalanmış grafit oluşum eğilimini azaltır	Nadir toprak elementleri yokluğunda, küreselleşmiş grafit yapısının bozulmasında çok etkilidir
Bi	<%0.01	Nadir toprak elementleri varlığında, küreselleşmiş grafit sayısı ve kalitesini artırır	Nadir elementlerin yokluğunda vermiküller grafit oluşumunu artırır
Zr	<%0.01	—	Vermiküller grafit oluşumunu artırır
Gaz Elementler			
O	<%0.005	—	Magnezyum ile birleşir
H	%0.0002-0.0015	—	Merkez hattında karbür oluşumunu ve <i>inverse chull</i> etkisini artırır, <i>poroziteyi</i> (karınca hatasını) artırır
N	belirli değil	—	Yumuşak karbür oluşuma eğilimindedir, porozite oluşumunu artırabilir

2.3. Silindirik Dökme Demirin Katılaşması

Vermiküler grafitli dökme demir, dökme demir ailesinin en genç üyesidir. Diğer dökme demirlerden farklı grafit morfolojisine sahip oluşu dikkatleri üstüne çekmiştir. Kompakt grafitin içindeki grafit gri demirdeki gibi birbirine bağlanmış ince tabakalar halinde bulunur. Bu durum özellikle kompleks veya karmaşık biçimdeki maça pasajlarında, hatasız döküm üretimini kolaylaştırmakta. Kompakt grafitin körleşmiş ve aralarındaki açıklık oldukça kısa olan uçları, daha iyi bir kuvvet, bir miktar süneklik ve gri demirden daha iyi islenebilirlik sağlar. Birbirine bağlı haldeki kompakt grafitlerin yapıda bulunması, biraz daha fazla ısı iletkenliği, daha fazla sönümlenme kapasitesi ve küresel grafitli dökme demirlerde elde edilebilenden daha iyi talaşlı islenme özelliğine sahip yapar. Kompakt grafitli dökme demirler, geçmişte küresel grafit üretmek üzere yetersiz magnezyum ve seryum seviyelerinin ergitilmesiyle tesadüf olarak ortaya çıkmıştır. Kompakt grafitli dökme demirin grafit yapısı oldukça karışıktır. Kabul edilir olan mikro yapı hiç lamel grafit olmayan, küresel grafitin %20'den az olduğu ve tüm grafitin %80'ninin kompakt olduğu bir KG dökme demirdir [11,16].

2.3.1. Alaşım elementlerinin vermiküler grafitli dökme demire etkisi

Vermiküler grafitli dökme demir içerisinde bulunan ve grafit yapmayı oluşturan elementlerin etkilerine aşağıda kısaca değinilmiştir.

2.3.1.1. Magnezyum

Ergime sıcaklığı 650°C ve yoğunluğu 1.73 gr/cm^3 olan Magnezyum çözeltiler içerisinde çabuk girmesi ve bundan dolayı demirin sıcaklığı düşük olsa da, magnezyumun ergime noktasının düşük olmasından dolayı, kolayca yayılabilmektedir. Bunun yanında düşük ergime sıcaklığının bir başka etkisi de, sıvı metal sıcaklığında iken yüksek buhar basıncı etkisi göstermesidir. Ayrıca magnezyum, lantanitlere nazaran daha kolay katılma özelliğine sahip olan bir metaldir. Magnezyum, oksijen ve kükürt gibi elementler yüksek ergime dereceli elementler ile karıştırılarak metal yüzeyinde lantanitlere göre daha kısa sürede kolayca

yüzebilir. Sıvı metal yüzeyinde, reaksiyon ürünlerinin oluşmaması sonucu aşırı gecikme durumunda, atmosferde magnezyumsülfür (MgS)'ün oksijen ile girdiği tepkimeye benzer bir şekilde, resülfürizasyona sebebiyet verebilirler. Sıvı demirde olabilecek maksimum magnezyum miktarı %0,04'ten fazladır ve bu da oksijen ve kükürt ile bileşik halinde bulunur. Daha az miktar söz konusu olduğu zaman ise grafitin vermiküler yapı kazanması imkânsız hale gelir, bu nedenle işlemler bastan kontrollü olarak yapılarak magnezyum ilavesi yapılır ve miktarı artırılır [11].

2.3.1.2. Silisyum

Eğer küreleştirme işlemi aşırı yapılırsa, düşük silikon içeriği (%1,55-2,75) düzensiz grafit veya karbür oluşumuna sebep olabilir. Kalın kesitli döküm parçaları için demirde ferrosilisyum ön çekirdeklenmesi düzensiz bir grafit oluşumuna sebep olabilir. Eğer işlem alaşımları yeterli miktarda silisyum içeriyorsa, kalın kesitler için demirin ön çekirdeklenmesi zorunlu değildir. Eğer silisyum miktarı işlem malzemesi içinde az miktarda ise, yüksek kükürt oranında, bir üst seviye silisyum veya yüksek miktarda işlem malzemesi kullanımı önerilmektedir [11].

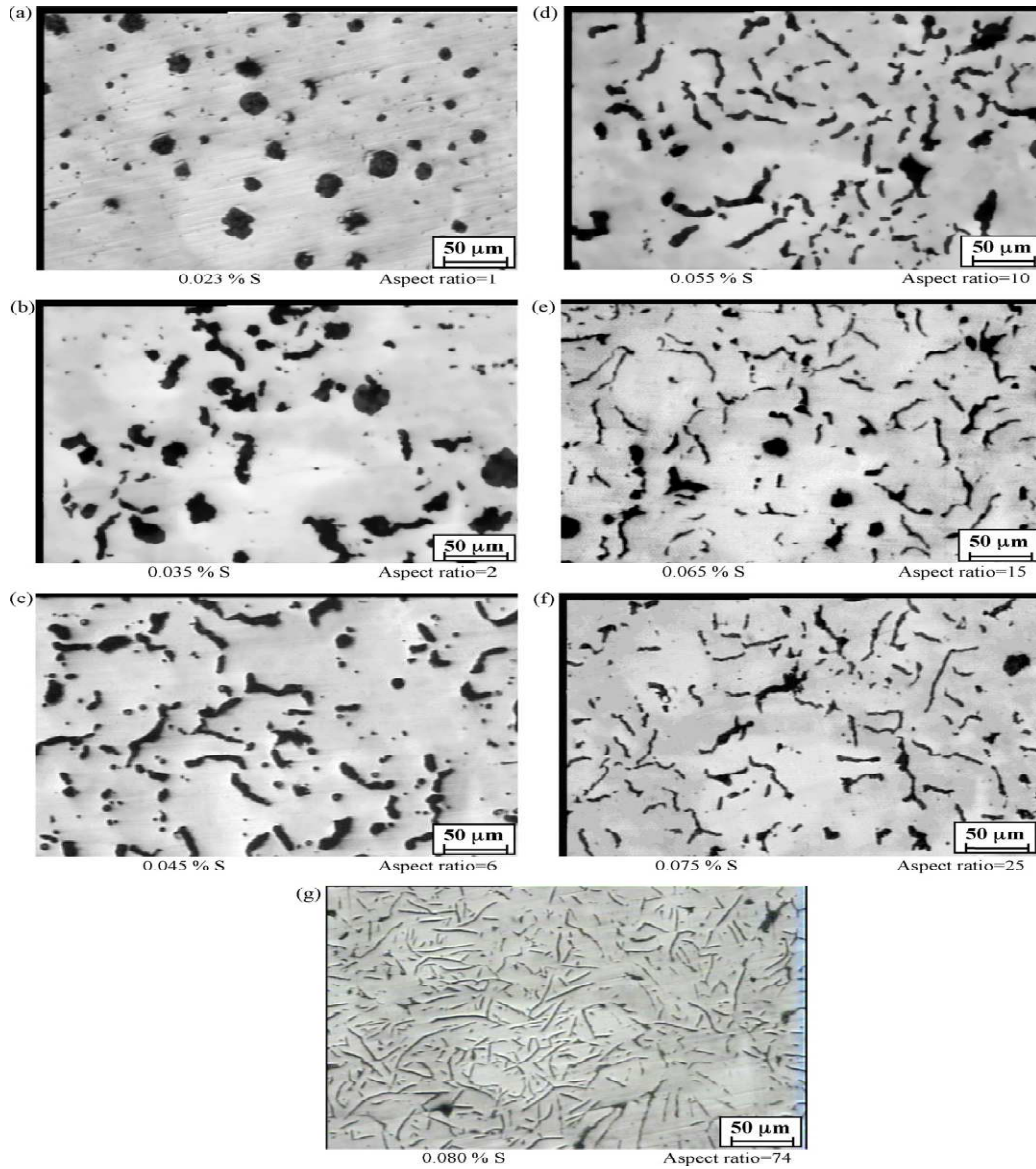
2.3.1.3. Kükürt

Vermiküler dökme demir üretimi için, kükürt oranının belirli sınırlar içerisinde olması gereklidir. Reaksiyonların termodinamiği kükürt ve oksijenin, ergimiş demirin magnezyum ve nadir toprak elementleri ile işlemi boyunca, ilk önce nadir toprak elementlerinin (RE_2O_2S) bileşiklerini oluşturduğunu göstermektedir. Bir sonraki reaksiyon ise nadir toprak elementlerinin sülfürlerini oluşturur. Birçok deneyden sonra nadir toprak elementleri ile işlemde ergimiş haldeki demirde yapılan en kararlı sülfür bileşiğinin RE_2S_3 olduğu anlaşılmıştır. Eğer aşırı kükürt hala varsa, o zaman kükürt MgS (magnezyumsülfür) oluşturmak üzere magnezyum ile tepkimeye girer. Bu reaksiyonlar su sırasıyla oluşur;

1. $2O + S + 2RE \rightarrow RE_2O_2S$
2. $3S + 2RE \rightarrow RE_2S_3$
3. $S + Mg \rightarrow MgS$

Vermiküler grafitli dökme demir yüksek kükürt içerikli demirden üretilmesine rağmen, demiri %0,01-0,025 oranlarına kadar desülfürize etmek daha kolaydır. Bunun haricinde Mg-S oranı 2:3 ila 7:1 oranlarında, %0,013-0,023 Mg ve %0,003-0,002 S sınırları arasında değişir. Yapılan araştırmalara göre, magnezyum işleminin %0,004-0,005 kalıntı kükürt ile yapılması vermiküler grafit üretiminde en çok tercih edilen yoldur. Yüksek magnezyum ve kükürt ile dökümde grafitin yapısının bozulmamasına dikkat edilmelidir. Yüksek kalıntı kükürt ve magnezyumun da grafit yapısını bozacağı bilinmelidir.

Yapılan bir çalışmada küresel grafitli dökme demirlerde kükürt oranını %0.023 ten %0.080 e çıkartarak grafit yapısındaki değişim incelenmiştir. Kükürt oranının artması mukavemeti kötü yönde etkilemiş olmasıyla beraber en boy oranı artarak grafit yapısının küresel grafitten lamel grafitli dökme demire dönüştüğü görülmüştür [11,18].



Şekil 2.10. Kükürt oranının grafit yapısına etkisinin gösterilişi

Çalışmada %0.035 ten sonra grafit yapısının değiştiği görülmüş olup, %0.035 den %0.080 e kadar grafit yapısının değişerek küresel grafitli yapıdan silindirik dökme demire oradan da lamel grafitli dökme demire dönüştüğü görülmüştür. Bu dönüşümün gerçekleştiği zaman dilimi içerisinde %0.075 kükürt içeren altıncı numunede (Şekil 2.10f) %95 silindirik grafit %5 nin küresel grafitin mevcut olduğu tespit edilmiştir.

Grafitin boyunun enine oranı (Graphite Aspect Ratio) :Grafit boyu / Grafit eni

2.3.1.4. Titanyum

Araştırmacılara göre Titanyum, vermiküler grafit üretiminde magnezyum ve lantanitlerin etki alanlarını genişletici bir etki göstermektedir. İşlenmiş demirde, Ti-Mg oran aralığı 4:1-10:1 civarındadır. Eğer titanyumun oranı %10 civarında ise lamellerde grafit oluşumu gözlenir. Yok eğer titanyum oranı %4'ün altında ise de küresel grafit oluşumu gözlenir. Lantanitlerle işlem yapıldığında ise titanyum (%0,05'ten fazla Ti) ilavesi çil eğilimini azaltıcı etki gösterir ve vermiküler grafit yüzdesini artırır [38]. Titanyum aynı zamanda azot tutucu etki de gösterir. Titanyumun dökme demirdeki bilinen en iyi özelliği ise aşırı çözünmüş azotun neden olduğu poroziteyi bastırabilmesidir [11].

Titanyumun dökme demirlerin sertliklerinde meydana getirdiği değişiklikleri unutmamak gerekir. Yüksek azot içerikli demirlerde, titanyum, azot ile tepkimeye girer ve çok kararlı bir titanyum karbonitrür bileşiği oluşturur. Titanyum ilavesi ile sertlik ve çekme mukavemeti azalır. Dökme demirlerde bulunan titanyum bileşikleri TiN (Titanyum nitrür), TiC (titanyum karbür), TiS₂ (titanyum sülfür) ve TiO₂ (titanyum oksit)'dir [11].

2.3.1.5. Fosfor

Bu element bütün şarj malzemelerinde bulunan bir elementtir. Demir fosfat (Fe₃P) bileşiğini oluşturur. Bu bileşik tanecikleri, kalın kesitli parçalarda iki katına çıkabilir, hatta kesit 25 mm üzerine çıktığında fosfor oranı 10 kat artabilir. Demir fosfat çok sert ve kırılğan yapıya sahip bir bileşiktir. Her %0,01 P, %0,064 Fe₃P oluşturmak üzere demirle reaksiyona girer. Bu çok küçük inklüzyonları fark etmek güç olmakla beraber etkilerini fark etmek ise çok kolaydır. Fosfor oranının %0,03'ten %0,06'ya çıkarılması ile yüzde uzama değeri yarı yarıya kadar düşebilir. Bu da süneklik ve dayanımı düşürür ve temper kırılğanlığa doğru eğilimi artırır. Ayrıca silisyum, fosfor ile birlikte dayanımı düşürür. Maksimum dayanım ancak %0,03 fosfor ve %2,5 silisyum içeriği olduğu zaman sağlanabilir [11].

2.3.1.6. Manganez

Manganez ideal miktarda ilave edildiğinde güçlü bir karbür oluşturur. İçeriği silisyum içeriğine ve kesit kalınlığına bağlı olarak sınırlandırılmıştır. Manganezin buradaki rolü, kükürdü bağlamaktır. Gri dökme demirden farklı olarak vermiküler grafitli dökme demirler pratikte sadece kükürt oranı düşük olduğunda elde edilebilmektedir. Buda yaklaşık olarak %0,02'den daha az bir kükürt demektir. Sonuç olarak manganezin tevsik edici etkisi kükürt tarafından yok edilmemektedir. Vermiküler grafitli dökme demirlerin manganez içeriğine dikkat edilmelidir [11].

2.3.1.7. Bakır

Perlit içeriğindeki bakır seviyesi artarken buna bağlı olarak Brinell sertlik değeri (BSD) de artar. Bakır miktarı % 0,31 ile % 0,47 arasında alındığında sürpriz bir şekilde hem perlit miktarı hem de BSD artmaktadır. Yüksek bakır içeriğinde çok iyi çekme dayanımı elde edilmesine rağmen, akma dayanımı aynı şekilde bir artış göstermemiştir. Çekme dayanımı artarken süneklik azalmıştır [11].

BÖLÜM 3 DÖKME DEMİRLERDE AŞILAMA

3.1. Lamel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi

3.1.1. Kesit boyutları ve grafit tipi

Lamel grafitli dökme demir üretiminde kalitesi, grafitin boyutu, sayısı ve dağılımı gibi faktörlerin yanı sıra çekirdeklenme ve büyüme prensiplerine bağlı olarak gelişir. Çekirdeklenme hızı düşük olduğunda gelişimi güzel yönlendirilmiş iri lameller meydana gelir; bu durumda yayınma için bol vakit olduğundan grafitleşme kolayca oluşur. Yayınma ve grafitleşme için yeterli süre olacak şekildeki bir aşırı soğuma nedeniyle oluşan hızlı çekirdeklenme küçük lamellere sebep olur. Daha fazla bir aşırı soğuma ise çekirdeklenme ve grafitleşmeyi önleyebilir ve bu durumda beyaz dökme demir oluşur. Dolayısıyla bütün mikroyapılar ve grafit tipleri herhangi bir gri dökme demirde oluşabilir; bu dökme demirin katılaşma esnasındaki soğuma hızına ve/veya sonradan gördüğü işlemlere bağlıdır [3,13].

3.1.2. Aşırı ısınma

Gri dökme demir için aşırı ısınma: sıvı metalin 1510°C'ın üstündeki sıcaklıklara ısıtılması demektir. Aşırı ısınmanın oluştuğu katılaşma süresinde aşırı soğumanın oluşma şansını da artırır. Grafit lamel boyutları küçülür ve aşırı ısıtma sonucu D ve E tipi grafitler oluşur. Uygun şekilde aşılama yapılmadıkları takdirde aşırı soğumayı önlemiş olup ince kesitlerde beyaz ve benekli dökme demir yapısı görülebilmektedir.

3.1.3. Aşılama (İnokülasyon)

Aşılama belirli etkilerinden faydalanmak için sıvı metale, bileşimde önemli değişim meydana getirmeyecek şekilde yapılan ilâvedir. Sıvı dökme demirin aşılama ile

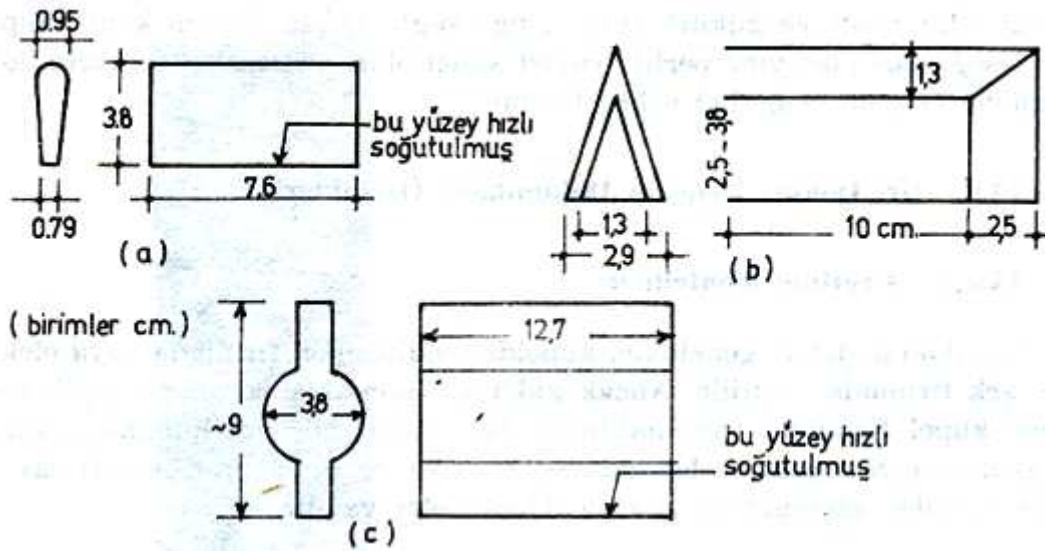
grafit tipinde önemli değişim sağlanabilir, örneğin ferrosilisyum veya bir başka grafitleştirici, % 0.05 ile % 0,25 gibi düşük % lerde ilâve edilirse (A) tipi grafitlerin oluşumuna yol açar. Aşırı soğuma aşılama ile önlenmektedir. Bu, özellikle aşırı ısınmış dökme demire aşılایıcı ilâve edildiğinde belli olur. Ergitme ve aşılama uygun yapıldığında istenen cinstе (boyutta) A tipi grafitlerin elde edilmesi mümkün olup istenmeyen beyaz katılaşmanın da önüne geçilmiş olur. Tablo 3.1’de bazı ticari aşılایıcıların bileşimi gösterilmiştir. Aşılایıcı, grafit yapısını değiştirdiği gibi Çil derinliğim de kontrol eder [3,13].

Tablo 3.1. Ticari aşılایıcıların kimyasal kompozisyonu

Aşılایıcı	%Si	%Ca	%Ba	%Sr	%Zr	%Ce	%Mn	%Al	%Ti	%Cr	%C
Superseed 50(Ferrosilisyum)	46-50	0.1 (max)	-	0.6-1	-	-	-	0.5 (max)	-	-	-
Superseed 75(Ferrosilisyum)	73-78	0.1 (max)	-	0.6-1	-	-	-	0.5 (max)	-	-	-
Superseed 85(Ferrosilisyum)	83-87	0.5-0.8	-	-	-	-	-	1.1-1.4	-	-	-
Ultraseed Ferrosilisyum	70-76	0.75-1.25	-	-	-	1.5-2	-	0.75-1.25	-	-	-
Kalsiyum Silisyum	61-64	29-31	-	-	-	-	-	0.5-0.75	-	-	-
V-5 Alaşımı	16-20	-	-	-	-	-	7-9	-	-	40	-
Graphidax	48-52	5-7	-	-	-	-	-	-	8-11	-	-
İnoculoy 63	59-62	1.8-2.4	4-6.5	-	-	-	9-12.8	0.8-1.5	-	-	-
SMZ	62-69	0.6-1.9	0.3-0.7	-	-	-	-	-	-	-	-
Grafit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	97-99
Ferrokrom	11	-	-	-	-	-	-	-	-	58-61	-
Baryum Aşılایıcı	72-78	1.0-2.0	2.0-3.0	-	-	-	-	1.5 (max)	-	-	-
Zirkonyum Aşılایıcı	73-78	2.0-2.5	-	-	1.3-1.8	-	-	-	-	-	-
Alüminyum Aşılایıcı	70-75	0.5-1.5	-	-	-	-	-	3.5-4.5	-	-	-

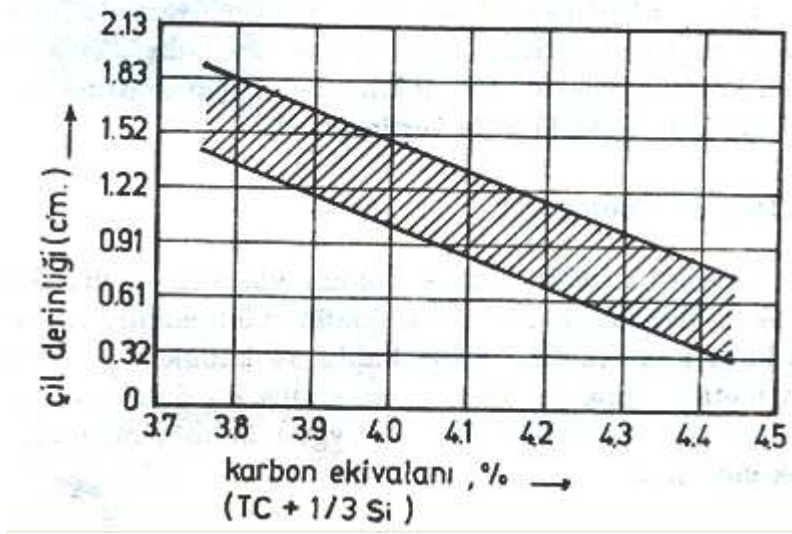
3.1.4. Çil kontrolü

Gri dökme demirde grafitleşme kontrolü özellikle ergitme safhasında önde gelen bir problemdir. Çil testi, dökme demirde grafitleşme meylini bir dereceye kadar belirleyen bir yöntemdir. Test örneği kupol ağzından veya potadan alınan sıvı metalin maça kumundan bir kalıba dökülmesiyle elde edilir. Örneğin şeklinden dolayı bazı kısımlar daha çabuk soğur. Bu tür örnekler Şekil 3.1’de verilmektedir.



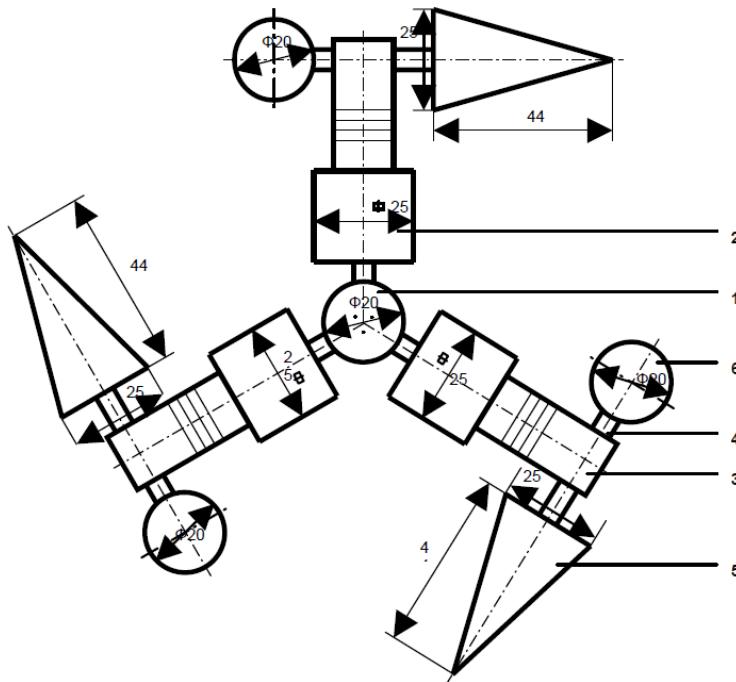
Şekil 3.1. Üç tip çil derinliği kontrol örneği

Örneklere karbür olarak katılmış kısmın derinliği ölçülerek çil derinliği tespit edilebilir. Çil derinliği bileşimle çok etkilenir, düşük C veya Si % leri daha derin bir çil oluşumuna yol açar. Çil derinliği ile karbon ekivalenti arasındaki ilişki Şekil 3.2 de gösterilmektedir. Dökme demirlerde çil derinliği büyük ölçüde pota ilâveleri ve aşıl原因ıcılar ile azaltılabilir. Şekil 3.2’te görüldüğü üzere karbon eşdeğerinin ötektik kompozisyona yaklaştıkça beyaz katılaşmanın azaldığı, çil derinliğinin düştüğü görülmektedir.



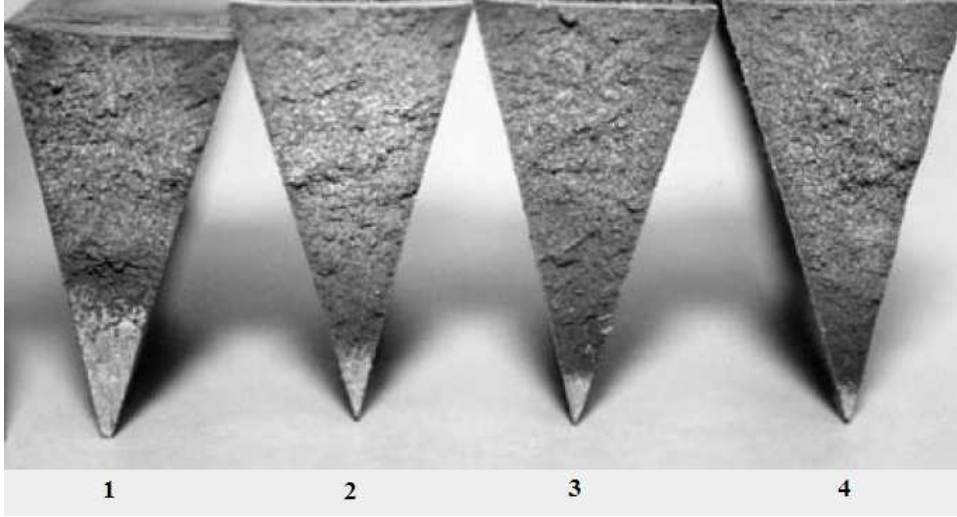
Şekil 3.2. Çil derinliği ile karbon ekivalent arasındaki ilişkinin yaklaşık gösterilişi.

İstenilen lamel grafitli dökme demirin üretimi için aşılacağı miktarı büyük önem taşımaktadır. Çekirdeklenmenin yavaş meydana gelmesi sonucu oluşan iri grafit lamellerin önüne geçilmesi için optimum aşılacağı miktarı önemlidir. Yapılan bir çalışmada aynı yollukta verilen sıvı metalin farklı aşılacağılar karşısında nasıl bir katılma rejimi gösterdiği Şekil 3.4'de gösterilmiştir [23].



Şekil 3.3. Çil test numunelerinin kalıptaki pozisyonları: 1-Düşey yolluk 2- Reaksiyon odaları 3-Yatay yolluk 4-Döküm ağız 5-Çil numunesi 6- Besleyici

Şekil 3.3'te sıvı metalin, tek yolluktan döküldüğü gözlenmekte olup reaksiyon odalarında farklı miktarlarda ferrosilisyum ile aşılansmış 3 çil numunesi görülmektedir.



Şekil 3.4. Farklı aşılama miktarının çil derinliğine etkisi 1- Aşılama uygulanmamış numune 2- %0.01 Aşılansmış numune 3- %0.02 Aşılansmış numune 4- %0.03 Aşılansmış numune

Kalıp içerisinde yapılan farklı miktar aşılamanın çil derinliğini değiştirdiği Şekil 3.4 te görülmekte olup istenilen lamel grafitli dökme demirin üretiminde aşılama miktarının önemli olduğu Şekil 3.4'te gösterilmiştir [23,13].

3.1.5. Döküm sıcaklığı ve akışkanlık

Kupol fırınında ergitilen gri dökme demir ön hazneye veya potaya yaklaşık olarak 1556°C da alınır. Endüksiyon fırınından alınan sıvı metal 1482°C tadır. Her transferde sıvı metal sıcaklığı 25°C veya daha fazla azalır. Belirli bir gri dökme demirin döküm sıcaklığı küçük ve ince kesitli dökümler için, iri ve kalın kesitlere nazaran daha yüksektir. Dökme demirin bileşimi de döküm sıcaklığını etkileyen bir faktördür. Tablo 3.2'de 4 değişik gri dökme demir için tipik döküm sıcaklıkları kalın ve ince kesitli iri ve küçük dökümler için verilmektedir.

Tablo 3.2. Lamel grafitli dökme demirin döküm sıcaklıkları

GRİ DÖKME DEMİR SINIFI	Likidüs sıcaklığı (yaklaşık °C)	DÖKÜM SICAKLIĞI			
		Küçük Dökümler		Büyük Dökümler	
		İnce Kesit	Kalın Kesit	İnce Kesit	Kalın Kesit
DDL 30 DDL35	1149-1177	1399-1427	1371-1399	1343-1371	1316-1343
DDL 40 DDL45	1199-1221	1449-1471	1421-1443	1393-1416	1366-1388

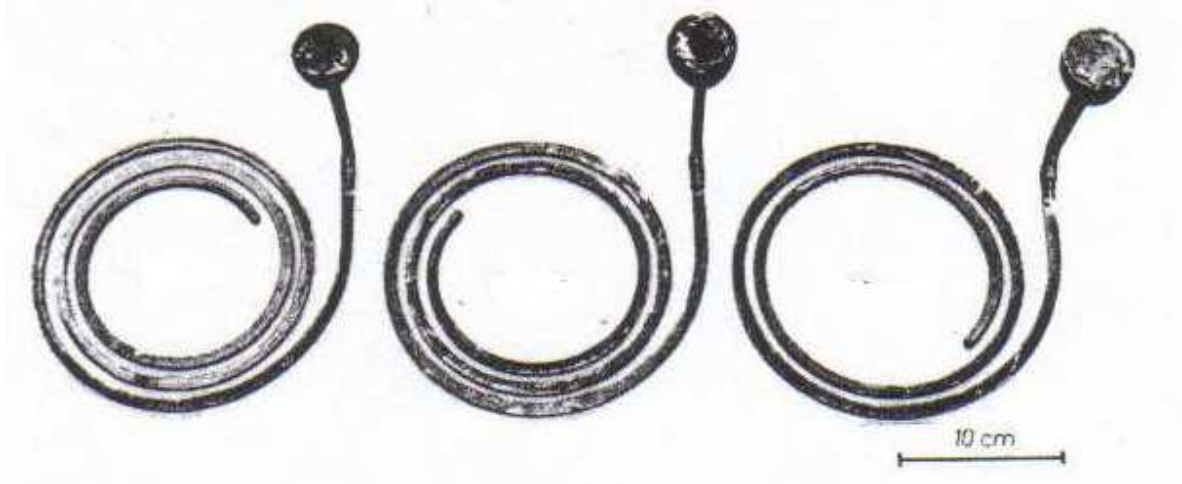
Gri dökme demir akışkanlığı, döküm sıcaklığı veya başka bir deyimle likidüs üzerinde ısıtıldığı sıcaklık ile orantılıdır. Bununla beraber aşıl原因ıcılar ve alaşım elementi ilâveleri akışkanlığı önemli ölçüde değiştirebilir; ancak gri dökme demir, demir esaslı alaşımlar içinde en akışkan olanıdır. Gri dökme demirler arasında en çok akışkan ötektik bileşimine en yakın olanıdır. Akışkanlık açısından gri dökme demirin ötektik davranışını belirlemek için formül 3.1 bileşim faktörü (CF) kullanılır.

$$\text{Bileşim faktörü (CF)} = \% C + (\% \text{ Si}/4) + (\% \text{ P}/2) \quad (3.1)$$

Akışkanlık spiralindeki uzunluk, bileşim ve döküm sıcaklığına aşağıdaki formül ile bağlıdır (Formülde sıcaklık değerleri °F olacaktır)

$$\text{Akışkanlık, (cm)} = [(14.9 \times \text{CF}) + (0.05 \text{ T} - 155)] \times 2.54 \quad (3.2)$$

Dolayısıyla döküm sıcaklığı arttıkça ve bileşim bir ötektik bileşimi olunca maksimum akışkanlık elde edilir. Gri dökme demirlerde hiperötektik bileşimlerde akışkanlığın azalması önemli bir problem teşkil eder. Buna neden sıvı metal soğurken çökelen karbon lamelleridir (Kish oluşumu). Hiperötektik bileşimdeki bir gri dökme demirde bu olay bazen o derece ciddi olabilir ki, sıvı metal en basit şekilli bir kesite dolacak kadar akışkanlığa bile sahip olmaz. Yukarıda verilen bileşim faktöründe belirtilen elementlerden başka kükürtün de akışkanlığa etkisi vardır.



Şekil 3.5. Lamel, Kompakt ve Küresel grafitli dökme demirlerden dökülmüş spiral akışkanlık test numunelerinin gösterilişi [16].

3.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi

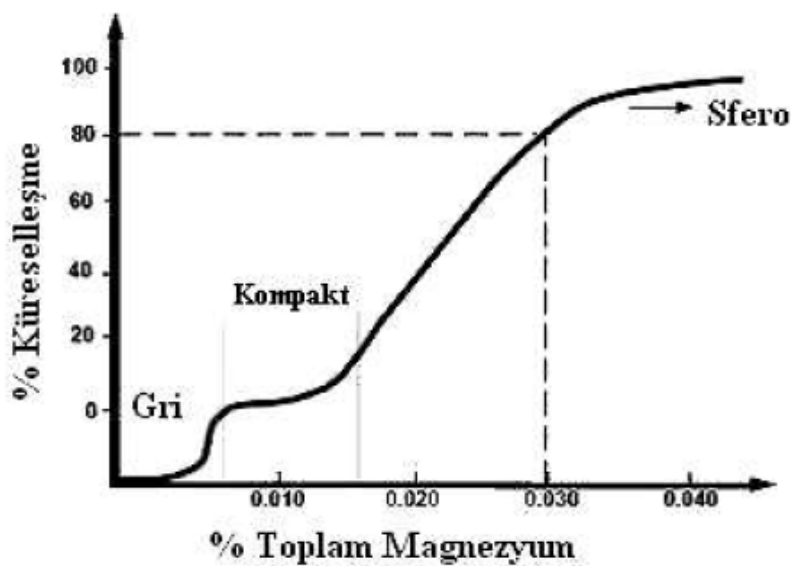
Küresel grafitli dökme demir üretiminde iki temel aşama vardır. Bunlardan birincisi küreleştirici ilavesidir. Küreleştirici olarak magnezyum bu amaç için en etkili ve ekonomik olan elementtir. Bileşimde minimum % 0,015-0,05 magnezyum yeterli kabul edilir. İkinci aşaması ise aşılama. Bu aşamada ergimiş metale üzerinde katılaşmanın başlayacağı çekirdekler sağlanmaktadır. Küresel grafitli dökme demirde en uygun aşılama ajanları ferro silisyum alaşımlarıdır. Yeni kristallerin oluşması için en uygun ortam, aşılama taneciklerinin katılaşma başlayana kadar erimeden kalmasıyla sağlanır. Sonuç olarak daha fazla sayıda grafitleşme merkezi daha fazla grafit küresinin oluşması anlamına gelir. Bu bakımdan aşılama, grafit oluşturma eğitiminin atmasını ve karbür oluşumunun önlenmesini sağlar [9].

3.2.1. Küreleştiricilerden Mg'nın etkisi

Sfero üretiminde gerek hipo gerekse hiper ötektik bileşimler olsun, küresel grafitler elde edilmesinde en çok kullanılan yöntem Magnezyum ilavesidir. Mg'dan başka elementler aynı amaçla denenmişse de bunlardan hiç biri yeter derecede uygun olamamıştır, bu elementler arasında Seryum, Kalsiyum ve Yitriyum sayılabilir.

Magnezyum bölüm 2.2.1’de bahsedildiği üzere küreselleştirme malzemesi olması yanında ergimiş metal için bir oksijen ve kükürt giderici olarak da rol oynamaktadır. Ergimiş metalin oksijen ve kükürt muhtevası çok yüksek ise önemli miktarda Magnezyum, magnezyum oksit ve sülfürlerinin oluşumunda harcanacaktır. Henüz kesin açıklanamayan bir mekanizma ile magnezyum lamel grafit oluşumunu önleyip, grafit şeklinin küre olmasını sağlamaktadır. Genel olarak küreleşmenin sağlanması için bileşiminde % 0.05 oranında artık Magnezyum gereklidir [14].

Küre şekilli grafitleri oluşturmak için gerekli olan magnezyum miktarı, dökme demirin ana bileşimindeki kükürt ve oksijen miktarlarına büyük ölçüde bağlıdır. Magnezyum işlemi sırasında, dökme demir sıcaklığı 1538-1560 °C civarında olup magnezyumun buharlaşma sıcaklığının oldukça üzerindedir. Dolayısıyla sıvı metal ile temas eden magnezyum aniden buharlaşır ve uygun şekilde yapılmadığı takdirde reaksiyon çok şiddetli olabilir. Magnezyum’un verimi, hava ile temas etmeden önce, magnezyum buharının içinden geçerek yükseldiği sıvı metal derinliğine bağlıdır. Dolayısıyla sıvı metalin magnezyum buharı ile yıkanan derinlik magnezyum verimi açısından önemli olmaktadır. Reaksiyon şiddetini azaltmak ve optimum metalurjik şartları sağlamak için, genellikle magnezyum başka elementlerle alaşımlandırılır. Şekil 3.6’de görüldüğü üzere artık magnezyum miktarının artmasıyla yapının lamel grafitli dökme demirden küresel grafitli dökme demire geçtiği görülmektedir.



Şekil 3.6. Magnezyumun küreselleşmeye etkisi [2,20]

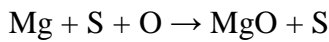
Sıvı metale ilave edilecek magnezyum miktarı ile ilgili birçok formül geliştirilmiştir. Bunlar arasında en basit ve kullanımı en kolay olanı aşağıda verilmiştir.

$$\%Mg (\text{İlave edilen}) = \frac{\text{İstenilen Mg (\%)}}{\text{Mg verimi (\%)} * 0.01} - \text{Bileşimdeki S (\%)} \quad (3.3)$$

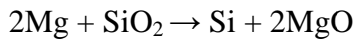
Bu bağıntıda şartlara bağlı oran, magnezyum verimine ait olandır. Bu oran % 10 ile % 90 arasında değişebileceğinden her uygulayıcı kendi şartları ve önceki tecrübelerinin sonuçlarına göre bu oranı saptamak durumundadır. Aşırı magnezyum kullanımının ekonomik sakıncası yanında, çekinti boşluğu oluşumunu arttırmaktadır. Dolayısıyla bileşimde istenen kalıcı magnezyum oranı % 0,040 ile % 0,050 aralığında kontrol edilmelidir ki bu da bilinen küreleştirme yöntemleri ile mümkündür [2].

3.2.2. Küreleştirme etkisinin zamanla azalması

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



Ve bu oksijen bir oksit kaynaklı bir birleşik alıyorsa örneğin SiO_2 , bu durumda

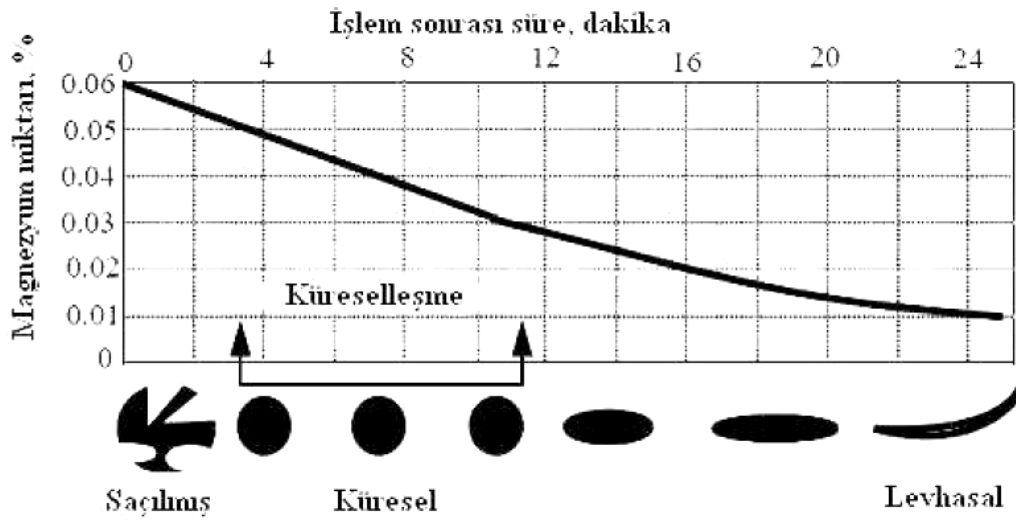


Küreselleştirme etkisinin azalması bazı faktörlere bağlıdır;

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

3. Curuf miktarı etki kaybını arttırmakta olup curufun hemen ve çok temiz olarak alınması gerekir.
4. Ocak astar malzemesi etkisi; Silika astar malzemesi ile çalışmada, etki kaybı bazik astara göre daha fazladır.

Etki kaybının artması kendisini hücre sayısının azalması ve grafit seklinin bozulması ile gösterir. Şekil 3.7’de magnezyum etkisinin işlem süresi ile değişim görülmektedir



Şekil 3.7. Magnezyum etkisinin işlem süresi ile değişimi

3.2.3. Potada küreleştirme yöntemleri

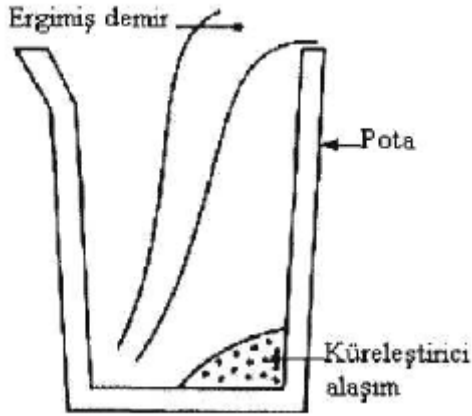
Küresel grafitli dökme demir üretimi için geliştirilmiş birçok farklı işlem yöntemi vardır. Bunlar:

1. Açık pota yöntemi ile küreselleştirme
2. Sandwich yöntemi ile küreselleştirme
3. Kapaklı pota yöntemi ile küreselleştirme
4. İbrikli pota yöntemi ile küreselleştirme
5. Flotret yöntemi ile küreselleştirme
6. Vorteks yöntemi ile küreselleştirme
7. Daldırma yöntemi ile küreselleştirme
8. Map yöntemi ile küreselleştirme
9. Konvertör yöntemi ile küreselleştirme
10. İnmold yöntemi ile küreselleştirme

11. Enjeksiyon yöntemi ile küreselleştirme
12. Basınçlı pota yöntemi ile küreselleştirme

3.2.3.1. Açık pota

Bu yöntem basitliğinden ve düşük yatırım maliyetinden dolayı çoğu dökümhanenin seçimidir. Alaşım işlem potasının tabanına yerleştirilir ve pota sonra doldurulur. Şekil.3.8’de açık pota yöntemi gösterilmektedir [2,15].

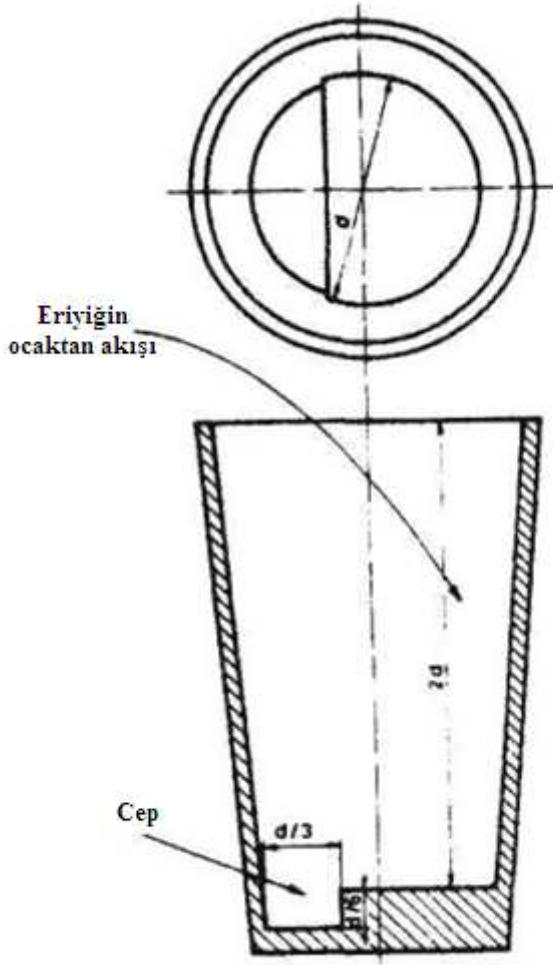


Şekil 3.8. Küresel grafitli dökme demir üretiminde açık pota yöntemi

3.2.3.2. Sandwich yöntemi

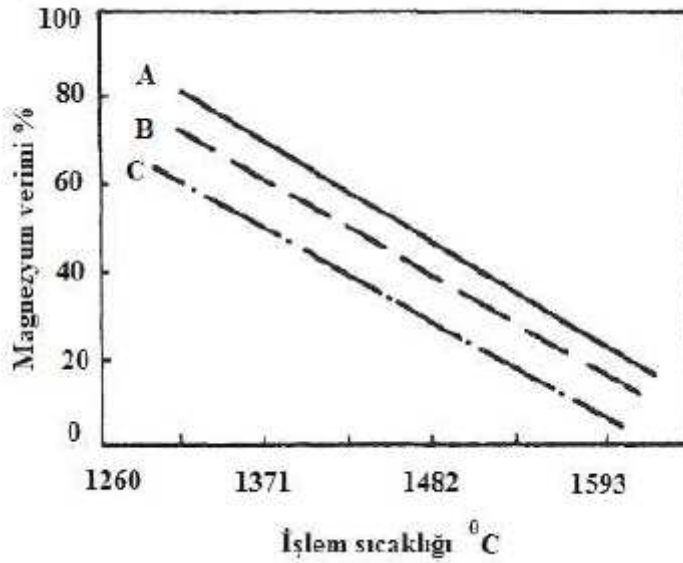
KGDD’ in büyük bir bölümü potada küreleştirme işlemine tabi tutulmaktadır. Bu yöntemlerin en önemli elverişliliği basit ve kullanışlı olmasıdır. Magnezyumlu alaşım malzemesi ön ısıtılmış, bos potanın tabanındaki cep denilen boşluğa yerleştirilir ve ergiyik üzerine dökülür. Bu yöntemde iki şart önemlidir;

1. Ocaktan dökülen ergiyik magnezyum alaşımı malzemesi üzerine direkt gelmemelidir.
2. Pota hızlı bir şekilde doldurulmalıdır



Şekil 3.9. Sandwich potası yönteminin gösterilişi

En çok uygulanan yöntem Sandwich yöntemi olup küreselleştirici malzemenin üzeri eriyiğin %2' si miktarında çelik talaşı ve KGDD talaşı ile örtülür. Böylece hemen dökümle birlikte FeSiMg' un yanması önlenir. Bu işlem sonu erişilen magnezyum faydalanma derecesi, işlemin yapıldığı eriyik sıcaklığına bağlıdır [2,15].



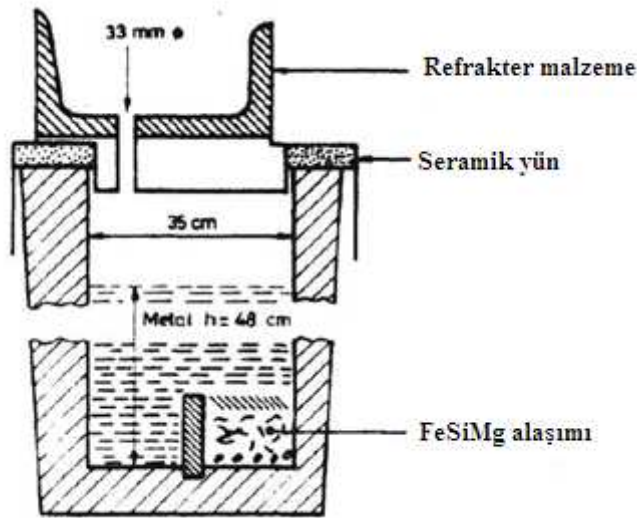
Şekil 3.10. Mg faydalanma yüzdesinin işlem sıcaklığı ile değişimi

- 15 Mg-85 Ni
- 15 Mg-50 Ni-35 Si
- 9 Mg-48 Si-1 Ca-42 Fe

Bu işlem sonu %2 miktarındaki çelik talaşının ısıtılması teorik olarak 26°C' lik bir ısı kaybına yol açmaktadır. 280 kg' lık işlem potasında yapılan sıcaklık ölçümleri toplam ısı kaybının 35°C civarında olduğunu göstermektedir [2,15].

3.2.3.3. Kapaklı pota yöntemi

Kapaklı pota yöntemi, pratik ve yaygın kullanımı olan bir metot olup sandwich yönteminin elverişsiz tarafları olan işlem esnasındaki MgO dumanının oluşmasını önlemek ve diğer taraftan da magnezyum verimini arttırmak amacı ile QIT Peret Titane tarafından geliştirilmiştir. Bir diğer elverişliliği ise işlem sıcaklığının ısı kayıplarının az olması nedeni ile 30°C daha düşük alınabilmesidir. Bu söz konusu sıcaklık farkı 42 kwh veya enerji sarfiyatında %6' lık bir tasarruf demektir.



Şekil 3.11. BCIRA – Kapaklı pota yönteminin gösterilişi

Kapaklı pota sistemleri 2 ana grupta toplanırlar;

1. Hareketli kapaklı yöntemler

- a. Konvansiyonel sistem, direkt ocaktan potaya döküm
- b. Endirekt sistem, ergiyiğin ocaktan alınıp bir diğer yerde, işlem istasyonunda küreselleştirilmesi.

2. Sabit kapaklı yöntemler

- a. UPO-sistemi
- b. Sifonlu pota sistemi

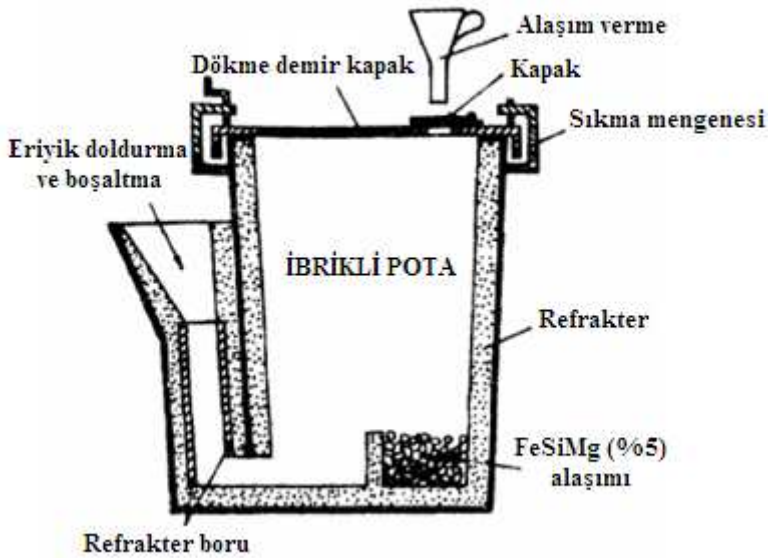
Konvansiyonel sistemde, ergiyik ocaktan tundish potasına alınır. Pota geometrik ölçüleri, geliştirilmiş bir diğer seki, nozul çapı ve yöntemin açık pota ile karşılaştırılması da verilmiştir. Magnezyum alaşımının potaya yerleştirilmesinde hareketli kapağın alınması dökümhanelerde değişik şekillerde yapılmaktadır. Bu yöntemle 80kg' dan 14 tona kadar ergiyikler küreselleştirme işlemine tabi tutulmaktadır. Magnezyum verimi %60' tır [2,15].

UPO yönteminde hareketli kapak yarı sabit bir hale getirilmiş, tundish'deki ergiyik doldurma deliği (100mm çap) aynı zamanda dizayn değişikliği ile boşaltma deliği

olarak ta kullanılmıştır. Kapak üzerindeki 2. bir delikten magnezyum alaşımı FeSiMg cep içine dökülmekte ve sonra bir sac kapakla burası kapalı tutulmaktadır. UPO potası ve kapağı grafitik silika refrakter ile astarlanmış olup 200 işlem yapılabilmektedir. FeSiMg miktarı %1,5 olup bu değer Sandwich yöntemine nazaran %30 oranında bir elverişlilik göstermektedir. Ergiyik sıcaklığı UPO yönteminde 1510°C'dir.

3.2.3.4. İbrikli pota yöntemi

Şekil 3.12'de gösterildiği gibi kapaklı potaların bir alternatifi olan bu yöntemde, eriyik potaya ibrik deliğinden verilmekte, reaksiyonun sona ermesinden sonra aynı delikten dökülmektedir. UPO yöntemindeki elverişliliklere sahip bir yöntemdir

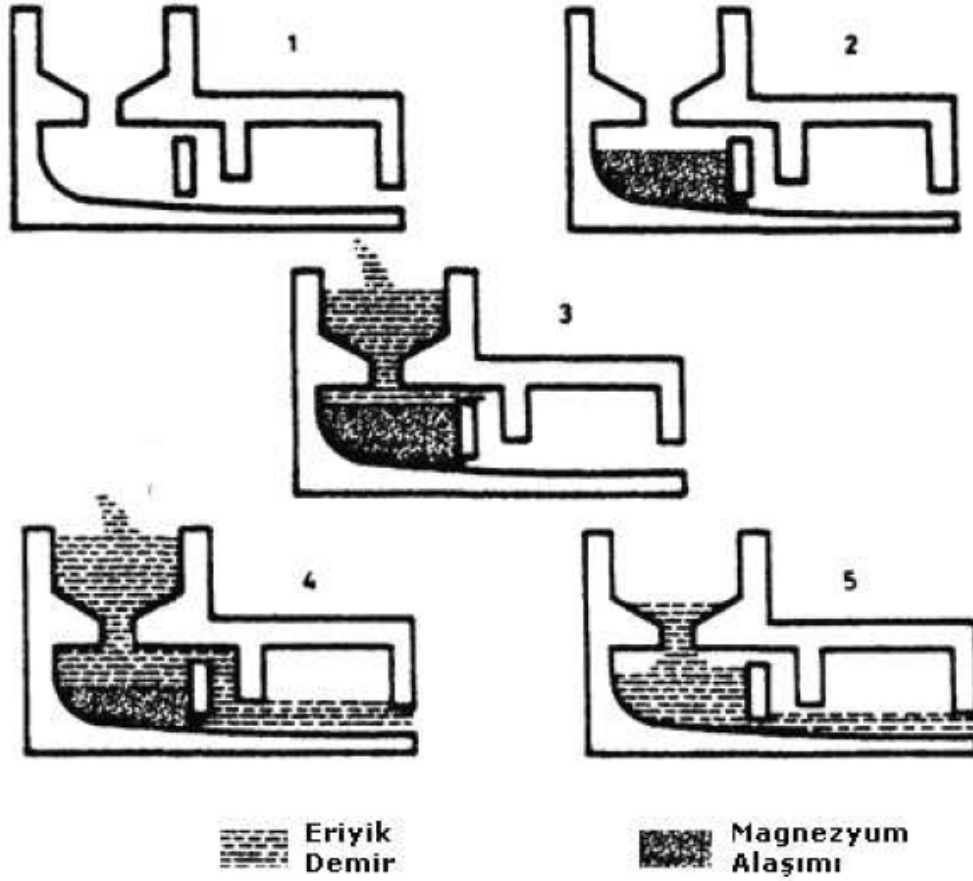


Şekil 3.12. İbrikli pota yönteminin gösterilişi

3.2.3.5. Flotret yöntemi

Bu yöntemde, refrakter malzemesi ile kaplanmış kapalı bir bölümünde reaksiyon haznesinin bulunduğu ve eriyiğin akışı esnasında küreselleştirme işlemine tabi tutulduğu yatay durumda birbirleri ile irtibatlı bir kanal sistemi mevcuttur. Küreselleştirme işlemi aralıklı yapılmakta ve her işlemde sonra ön bölüm üzerindeki kapak açılıp FeSiMg alaşımı hazne boşluğuna yerleştirilmektedir. Eriyik

ocaktan sistemin döküm yolluğuna verilmekte resimde görüldüğü gibi küreselleştirici malzeme haznesini sınırlayan tuğla veya bölüm tarafından eriyik toplanarak reaksiyon için gerekli yavaş akış hızı sağlanmaktadır.



Şekil 3.13. Flotret yönteminin kademeli olarak gösterilişi

Flotret yöntemi avantajları;

1. Düşük magnezyumlu (%3-4) küreselleştirici malzemeler kullanılmaktadır. Kullanım miktarı %2,2-2,3, magnezyum verimi %53-58' dir. Kalıcı magnezyum miktarı %0,04-0,05. Alaşım %1.5 Ce ihtiva etmektedir.
2. Grafit küre sayısı 150-200 küre / mm²' dir.
3. Şarjı düşük kükürt ve silisyum, mangan miktarına sahip pik, hurda malzeme ve soğuk şekillenen saç kırıntıları oluşturmaktadır.
4. İnce et kalınlıklarında dahi 4mm sementitsiz bir ana doku sağlanmaktadır.

5. GGG 40 - GGG 70 özelliklerinde KGDD döküm durumunda üretilmektedir. Perlit/ferrit oranı potaya bakır ilavesi ile kontrol altına alınmaktadır.

3.2.3.6. Vorteks yöntemi

Bu yöntemde küreselleştirici Mg alaşımı demir eriyiğin akış anında bir girdap oluşturması ile karıştırılmaktadır. Küreselleştirici olarak %8-20 arasında magnezyum içeren FeSiMg alaşımları kullanılabilir. Magnezyum verimi işlemin uygulama sıcaklığına ve kullanılan alaşım malzemelerindeki magnezyum miktarına bağlı olarak değişmektedir [2,15].

3.2.3.7. Inmold yöntemi

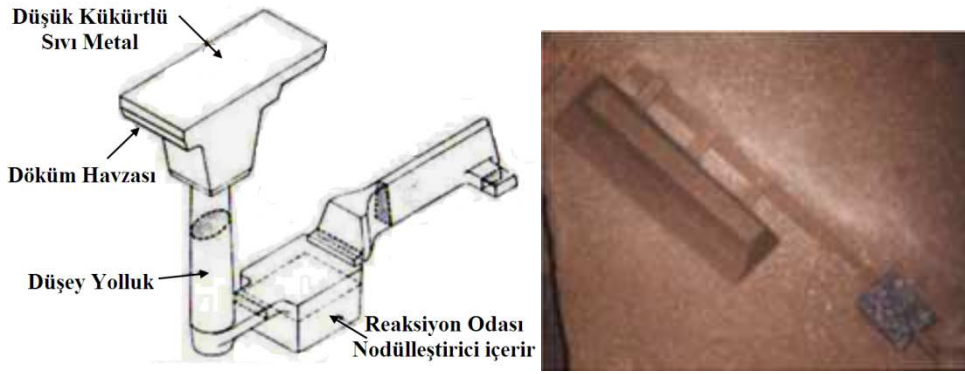
Kalıp içinde küreleştirme işleminin yapılması 1960'lı yılların sonuna doğru geliştirilmiş bir yöntem olup diğer bütün yöntemlerden farklılığı en son safhada kalıpta yapılmasıdır. Şekil 3.14'te inmold yönteminin gösterilmiştir.

Avantajları;

1. FeSiMg alaşımı 2 görevi yerine getirmekte, magnezyumun kuvvetli küreselleştirici ve silisyumun asılayıcı etkisinden faydalanılmaktadır. Dolayısı ile asılama için FeSi ilavesi gerekmemektedir.
2. Küreselleştirme işlemi ve asılama mümkün olan en son proses kademesinde yapıldığından magnezyumun oksidasyonu ve asılama etkisinin azalması söz konusu değildir.
3. Bu yöntem çok iyi özelliklerde döküm parçası üretimini mümkün kılmaktadır, bunlar;
 - a) Sementitler mevcut değildir
 - b) Küre sayısı fazladır
 - c) Grafit küreleri çok daha küçüktür
4. Mikro doku ve dolayısı ile mekanik özellikler döküm durumunda elde edilebildiğinden ısı işlemi gerekmez.

Dezavantajları;

1. Model ve maça sandığı fiyatı artar
2. Yolluk kanal ve besleyici tasarımı daha komplikedir, döküm öncesi pratik deneyimlerle tespit edilmelidir.
3. Baz ergiyiğin kükürt miktarı azami % 0,01 olmalıdır.
4. Bu yöntem bir parçanın seri üretimi söz konusu olduğunda uygulanır. Parça döküm sayısı az ise tercihen Sandwich yöntemine başvurulmalıdır.
5. Her kalıp bir işlem potası anlamına geldiğinden, kalite kontrol çalışmalarının buna göre yapılması gerekir



Şekil 3.14. Inmold yönteminin gösterilişi [21]

Tablo 3.3. Inmold yönteminde küreselleştirici miktarının artmasıyla nodul sayısındaki değişimin gösterilişi [21]

%MgFeSi	0.5 %	0.75 %	1.0 %	1.25 %	1.5 %
Nodül sayısı	Mevcut değil	Mevcut değil	44	102	86
Grafit form	Lamel	Lamel	Küresel %65	Küresel %95	Küresel %95

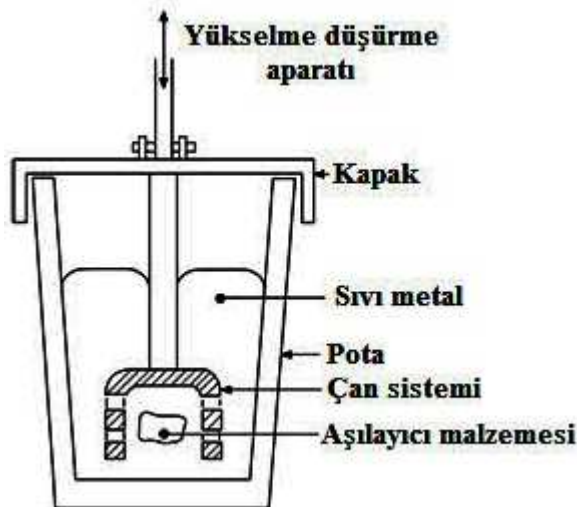
Reaksiyon sonucu oluşacak küreselleşmenin bazı parametrelere bağlıdır. Bunların en önemlisi reaksiyon odasının ölçüleridir. Tablo 3.4'de reaksiyon odası ölçüleri gösterilmektedir.

Tablo 3.4. Reaksiyon odası Geometrisinin değerleri [16]

Kalıp No :	Reaksiyon Odası Ölçüleri			Yatay Enine Kesit Alanı, cm ²	%5 Fe-Si-Mg Ağırlığı, gr
	Uzunluk, mm	Genişlik, mm	Derinlik, mm		
1	15,625	21.875	18.75	3.529	9.015
2	18,75	21.875	18.75	4.2322	10.9996
3	21,875	21.875	18.75	4.9419	13.0124
4	25	21.875	18.75	5.645	13.9968
5	25	25	25	6.4516	19.986
6	37.5	25	25	9.6774	29.9937
7	43.75	25	25	11.2903	40.00117
8	50	25	25	12.9032	44.99069

3.2.3.8. Daldırma yöntemi

Daldırma yönteminde ise genellikle %40 veya daha fazla magnezyum içeren alaşım refrakter malzemeden veya grafitten çan şekilli delikli bir kap içine konulur. Bu kap sıvı demir potasına daldırılır. Daldırma yöntemi, artık magnezyum seviyesinin çok daha iyi kontrol edilebilme olanağını sağlar ve açık potaya nazaran daha yüksek magnezyum verimi elde edilir. Magnezyum emdirilmiş kok veya demir-magnezyum briketleri için de aynı yöntem kullanılabilir. Belirtilebilecek başlıca dezavantajı, sıcaklık kaybının açık pota yöntemine nazaran daha fazla oluşudur [2,15].



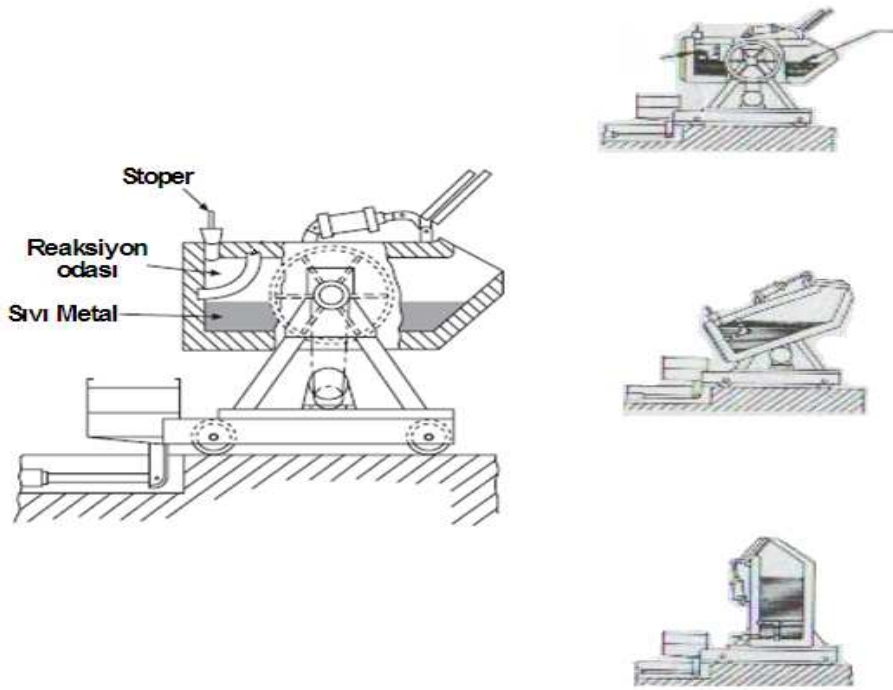
Şekil 3.15. Daldırma yönteminin gösterilişi [20]

3.2.3.9. MAP yöntemi

Küreselmeyi birkaç kat refrakter ile sıvanmış ve tabanında reaksiyonun başlaması için küçük bir yüzeyin açık bırakıldığı blok halindeki magnezyum ile gerçekleştirir. Bu blok, refrakter kaplı bir çubukla sıvı metale daldırılır reaksiyon süresi 30 ile 40 saniye kadardır. Magnezyum verimi, 1400°C' ta %65 olarak belirtilmektedir. Ancak verimin işlem sıcaklığı arttıkça azalacağı da açıktır.

3.2.3.10. Konverter yöntemi

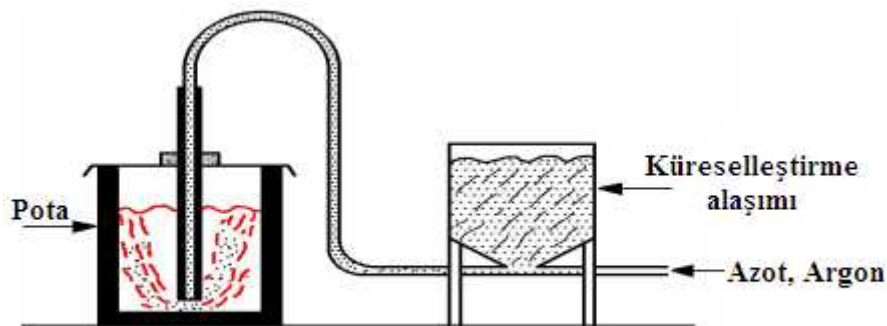
Konverterde küreselleştirme yöntemi, Georg Fischer firmasının getirdiği bu yenilik nedeni ile yöntem adı verilmiştir ve Fischer konverteri olarak adlandırılır. Konverter tabanının köşesine dışarıdan bir kapak aracılığı ile saf magnezyum yerleştirilir. Sıvı metal doldurulduktan sonra konverterin ağzı kapatılır ve reaksiyon ürünü gaz, dumanın dışarı çıkması önlenir. Bu şekilde magnezyum verimi de artar. Yöntemin diğer bir elverişliliği en ucuz küreselleştirici olan saf magnezyum metalinin kullanılmasıdır. Ayrıca ergiyik kükürt miktarı da diğer yöntemlere nazaran daha yüksek olabilmektedir. Yöntemin elverişsiz yönleri, uygulanmasında dökümhanelerin yüksek üretim kapasitelerine sahip olma zorunluluğudur. Bunun nedeni küçük konverterlerde sıcaklık kayıplarının fazla olması ve bir pota ile kıyaslamada komplike bir yöntem olması sebebi ile bakım masraflarının fazlalığıdır.



Şekil 3.16. GF Fischer Konverter yönteminin gösterilişi [16]

3.2.3.11. Enjeksiyon

Küresel grafitli dökme demir üretimi için, ince metalik magnezyum parçaları pota içindeki metalin içine itilir. Bu yöntem çok popüler değildir. Bu yöntemde küreleştirici; argon ve azot gibi gazlarla pota içindeki sıvı metale pülverize olarak püskürtülür. Bu iş için uygun bir aparat kullanılır. Bu yöntemde, küreleştirici gereç ile beraber sıvı metal içine istenirse kükürt giderici gereçler de püskürtülebilir.



Şekil 3.17. Enjeksiyon yönteminin şeması

3.2.3.12. Basıncılı pota

Bu yöntemde işlem potası sızdırmazlığı sağlanmış bir bölmeye yerleştirilir ve bölmenin basıncı yaklaşık 30 atmosfere çıkarılır. Sonra metalik magnezyum işlem potasındaki erimiş metale daldırılır. Basıncıdan dolayı, magnezyum metali etkili karıştırılır [2,15].

3.2.4. Küresel grafitli dökme demirlerde porozite oluşumu ile ilgili teoremler

Sfero üretiminde dikkat edilecek hususlardan biri malzemenin bünyesinde mikro ve makro düzeyde porozite teşekkül etmesidir. Bunun önlenmesi için birkaç teorem ortaya sürülmüştür. Dawson J.V. ve Smith L.V. , küresel grafitli dökme demirler üzerine yaptıkları çalışmalarda aşağıdaki sonuçlar elde etmişlerdir [1]:

1. Küresel grafitli dökme demirlerde aşılama olarak kullanılan ferrosilisyumda ki alüminyum içeriği, küçük gözenek oluşumuna sebep olabilmektedir. Alüminyum miktarı arttıkça, sıvı metaldeki hidrojen miktarı da artmaktadır.
2. Küresel grafitli dökme demirlerde yaklaşık %0.04 titanyum bulunması, alüminyumun küçük gözenek oluşturma etkisini arttırmaktadır.
3. Küresel grafitli dökme demirlerde %0.2'den fazla alüminyum kullanımı küçük gözenek oluşumunu azaltmaktadır.

Aras N., "Küresel Grafitli Demir Dökümü" isimli kitabında porozite oluşum nedenlerini ve önleme tekniklerini aşağıdaki şekilde belirtmiştir:

Katılma çekintisi sonucunda oluşan porozite, gözenekli görünüşü ile kendini belli eder. Döküm yüzeylerinde ince bir tabaka oluştuktan sonra döküm bir bütün olarak genişlemeye maruz kalır. Bu genişlemenin yayılması kalıp sağlamlığına bağlıdır. Kalıp genişmesi önlenmediği takdirde porozite oluşumu azalır. Buna karşılık, yumuşak dövülmüş kalıplarda, gözenekli yapı oluşumu fazladır. Dökümün ısı merkez çıkıcı içerisinde olursa, kullanılan çıkıcı porozite oluşumunu önler. Çoğu zaman bu hal, çıkıcının dökümden birkaç misli daha büyük olmasını gerektirir. Bu çözüm yolu pratik değildir. Soğutucu gibi katılma etkileyen araçların kullanılması biraz faydalı olabilir. Fakat porozite giderilmesinde, alınması gereken en iyi tedbir

kalıbın sıkı olarak dövülmesidir. Kuru kum, çimento, seramik ve cam suyundan hazırlanan kalıplar yaş kum kalıplarına tercih edilmektedir. Buna rağmen, yaş kum kalıplar daha iktisadi olması nedeniyle halen kullanılmaktadırlar. Toplu iğne başı büyüklüğündeki gaz boşluğu olarak kendini gösteren porozite, döküm yüzeyinin hemen altında oluşur. Rutubet ve kalıp duvarındaki gazların, sıvı metal içerisinde çözülmüş gazlara ilavesi sonucunda gaz boşlukları oluşur. Sıvı metalin katılaşması sırasında bu gazların bir kısmı kalıp yüzeyinden dışarı atılır. Bununla beraber, dökümden hemen sonra katılaştıran ince bir metal tabakası bu gazların kalıp yüzeyinden dışarı atılmasını önlemektedir [1].

Carter S.F. gri ve küresel grafitli dökme demirlerde küçük gözenek (karınca hatası) oluşumuna etkiyen faktörler üzerinde yaptıkları çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir:

1. Magnezyum işleminden sonra maruz kalman nem, ciddi oranda küçük gözeneklere sebep olmaktadır. Bu da küresel grafitli dökme demirlerdeki magnezyum varlığının, kalıptaki nemli ekipmanlardan (yaş kum gibi) hidrojen emme eğilimini büyük ölçüde arttırdığını göstermektedir.
2. Küresel grafitli dökme demirlerdeki nitrojen, magnezyum işleminin yan etkilerini ortadan kaldırdığı için probleme sebep olmamaktadır.
3. Alaşıma titanyum ekleme gri dökme demirlerde küçük gözenekleri ortadan kaldırmakta; küresel grafitli dökme demirlerde ise ters etki yaparak gözenek oluşumuna sebep olmaktadır.
4. Kalıp kumu olarak kullanılan yaş kumdaki nem oranı arttıkça, gözenek oluşma eğilimi de artmaktadır.

Naik R.F. ve Wallace J.F. , küresel grafitli dökme demirlerde gözenek oluşumunda yüzey gerilimi etkilerini inceleyerek aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir: [1]

1. Küresel grafitli dökme demirlerdeki bazı elementlerin varlığı veya eklenmesiyle veya sıvı metalin kalıptaki nem ile teması sonucu, yüzey gerilimi azaldığı takdirde, döküm parçada hidrojen gözenegine yatkınlık artmaktadır. Yüzey gerilimi arttıkça, hidrojen gözenegi oluşma eğilimi azalmaktadır.
2. Küresel grafitli dökme demirlerde, alüminyum seviyesine göre yüzey gerilimi değişmektedir. Sıvı metaldeki alüminyum miktarı çok düşük ise yüzey gerilimi

artmakta, dolayısıyla gözenek oluşumu azalmaktadır. Alüminyum seviyesi %0.01 ile %0.2 arasında olduğu takdirde yüzey gerilimi azalmakta; %0.2'yi geçtiği takdirde ise yüzey gerilimi tekrar artarak gözenek oluşumuna engel olmaktadır.

3. Küresel grafitli dökme demirlerdeki tellür ve kalsiyum eklerinin artırılması, yüzey gerilimini düşürerek, gözenek oluşma eğilimini arttırmaktadır, %0.019'a kadar olan boron elementi ise yüzey gerilimini arttırmaktadır.

Ryntz, E.F., küresel grafitli dökme demirlerde gözenek oluşumu hakkında yaptıktan çalışmalarda aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir:

1. Küresel grafitli dökme demirlerde gözenek oluşum sebebi, potada akışkan halinde bulunan maden cürufunun, sıvı metaldeki karbon ile yaptığı tepkime sonucu ortaya çıkan karbon-monoksit gazlarıdır.
2. Kalıp kumunda veya kalıp yüzeyinde gevşek halde bulunan ferrosiliko-magnezyum işlemleri alaşım, kalıp yüzeyinde küçük boşluklara sebep olmasına rağmen, yüzey altı gözenekleri oluşumunda etkili değildir.

Wallace J.F. belirttiğine göre, küresel grafitli dökme demirlerde aşağıdaki faktörler çekinti boşluğunu, dolayısıyla porozite oluşumunu etkilemektedir: [1]

1. Kalıp Malzemesi: Kalıp deformasyonu, kalıp malzemesinin mukavemetine ve ısı genleşme karakteristiğine direkt olarak bağlıdır. Yaş kum kalıp kullanımı, ekonomi, basitlik ve geniş kullanım sahası açısından avantajlı olmasına rağmen; reçineli kum kalıp gibi bir çok kalıp malzemesine kıyasla boyutsal kararlılığı azdır. Kalıp genleşmesi, kullardan kalıp kumuna göre farklılık gösterir. Kalıp genleşmesi, döküm sıcaklığından, yaş kum nem oranından, kalıptaki yaş kumun sıkıştırılma yoğunluğundan ve ergimiş metalin katılma karakteristiğinden etkilenir. Kalıp kumunun genleşmeye gösterdiği direnç azaldıkça, çekinti boşluğu artmaktadır. Yaş kumun kullanıldığı kalıplardaki çekinti hacmi, katılma esnasında deformasyon büyük olduğundan, alkali reçineli bağlayıcı kullanılan kalıplara göre ortalama %27 daha fazladır.

2. Kimyasal Yapı: Küresel grafitli dökme demirlerde katılaşma çekmesi miktarı, oluşan ötektik grafit miktarından etkilenir. Karbon eşdeğerliği 3.9 'a vardığı veya aştığı takdirde katılaşma çekmesi meydana gelmez.
3. Döküm Sıcaklığı: Kalıptaki sıvı çekmesini belirleyen döküm sıcaklığı; kalıp malzemesinin ısıl genişmesini, dolayısıyla kalıp duvarı hareketini ve kabuk oluşumunun başlama zamanını etkilemektedir. Eğer alaşımında kabuk oluşumu meydana geliyorsa, kalıp duvarlarında oluşan basıncın etkisini azaltır. Yüksek döküm sıcaklıklarında, yani hızlı katılaşma zamanlarında, çekinti oluşumu artmaktadır.
4. Aşılama: Aşılama, ötektik hücre oluşumunu artırır. Eriyikte aşılamanın varlığı, grafitlerin büyümesine olanak sağlar. Küreselleşmiş tane sayısındaki artışla, sıvı metal akışına karşı direnç büyüyeceğinden, kalıp genişmesinde bir artış beklenir.
5. Magnezyum İçeriği: Magnezyum, lamel grafitlerin oluşumunu önlemek, küresel grafit oluşumunu arttırmak için kullanılır. Sıvı metaldeki magnezyum içeriği çok düşük ise grafitlerin bir kısmı küresel şekil almayabilir. Buna nazaran, magnezyum içeriği yüksek ise, küreselleşmiş tane sayısında bir artış beklenir. Eğer magnezyum içeriği çok yüksek ise karbür oluşumu meydana gelebilir. Magnezyum ekleme işlemi zamanla etkisini yitirmektedir.
6. "Yüzey Alan - Hacim" Oram: Döküm parçasının katılaşma hızı, (yüzey alanı) / (hacim) bağıntısı ile orantılıdır. Katılaşma için gerekli zaman periyodu, bu iki parametre ile belirlenir. Kalıp duvarı hareketi, kalıbın "yüzey alan - hacim" oram, yani katılaşma zamanı yüksek ise, artış gösterir.

Wallace'ın belirttiğine göre Nicholas ve Hughs (1958), çekinti ve porozite oluşumunu etkileyen faktörler üzerinde yaptıkları çalışmalarda, yaş kum kalıp kullanıldığı takdirde kalıp genişlemesinin, küresel grafitli dökme demirlerde, gri dökme demirlere göre daha fazla olduğunu gözlemlenmişlerdir. Ayrıca, CO ile sertleştirme veya silika bağlayıcı kullanımı gibi etkenlerle kalıp kumu sertliği artırıldığı takdirde, kalıp genişlemesinde, dolayısıyla çekinti boşluğu oluşumunda büyük oranda düşüş olduğunu gözlemlenmişlerdir.

Bradley, yandan besleyici kullanarak yaptıkları küresel grafitli T-kesitli dökümlerde, tasarıma bağımlı ve tasarıma bağımsız olmak üzere iki çeşit çekinti davranışına rastlamışlardır. Yaptıkları deneylerde, tasarıma bağımlı çekinti davranışının, besleyicinin ergimiş metali aktarabilmesine; dolayısıyla parça geometrisine bağımlı olduğunu ve bu tip çekinti

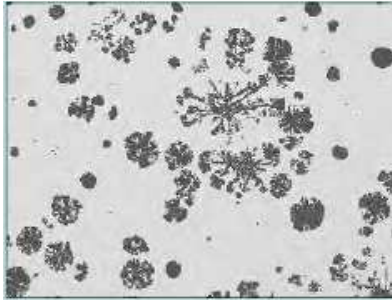
boşluklarının, yatay besleme kesitinin azalmasıyla arttığını gözlemlemişlerdir. Tasarıma bağımsız çekintiler üzerinde yaptıkları çalışmalarda ise besleyicinin ergimiş metali aktarabilmesinin, çekinti oluşumunda etkin olmadığını; dolayısıyla bu tip çekintilerin, döküm geometrisiyle oynanarak düzeltilemeyeceğini gözlemlemişlerdir [1].

3.2.5. Küresel grafitli dökme demirde normal olmayan grafit şekilleri

KGDD 'lerde grafitin küre biçiminden uzaklaşması ile meydana gelen farklılıklar aşağıdaki şekilde adlandırılmaktadır.

1. Patlamış grafit
2. Quasi-flake grafit
3. Lamel , yapraksı grafit
4. Chunk tipi grafit

Patlamış görünümlü küresel grafit; Bu grafitlerin şekli aynen patlamış mısır tanelerine benzer. Kalın kesitli parçalarda, soğuk potanın kullanılması halinde ve yüksek saflıkta sarj malzemeleri kullanımı durumunda aşırı nadir toprak elementi (RE) ilavesinden (Ce) kaynaklanabilmektedir.

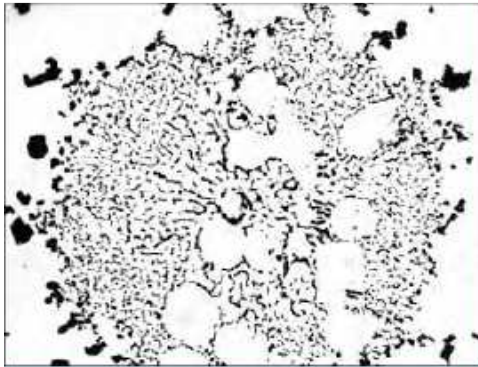


3.18. Patlamış küresel grafitin gösterilişi [6]

Quasi -flake grafit; Bu görünüme sahip grafit şekli, aynı zamanda vermicular olarak ta adlandırılmaktadır. Ti, ihtiva etmeleri veya magnezyumla işlemin yeterli düzeyde yapılmamasından kaynaklanmaktadır. Bunun için Mg miktarını arttırmak veya Mg verimini daha yüksek kılmak ve reaksiyonun hemen sona ermemesini sağlamak lazımdır.

Lamel, yapraksı grafit; Küreselleşmeyi kuvvetli bir biçimde olumsuz etkileyen elementlerin mevcudiyetine bağlıdır. Bunun yanında, magnezyum işleminin yapılmamış veya herhangi bir nedenle çok etkisiz kalmış olması neden teşkil eder. Bazı reçineli kumların sertleştirilmelerinde kullanılan sertleştiricilerin (paratuluol sulfon asiti) yüksek kükürt miktarları, döküm kumunda kömür tozu miktarının çok düşük olması ile kalıp içinde redükleyici bir atmosferin yaratılamaması belli başlı nedenler arasındadır. Lameller kısa, uçları yuvarlatılmış bir şekle sahiptirler, magnezyum işleminin yeterli olmadığını gösterirler. Uzun ve keskin uçlu lameller mevcut ise bu durumda olumsuz etkileyen elementlerin varlığı kuvvet kazanır.

Chunky tipi grafit; Çok ince dağılımlı, yuvarlatılmış kısa lamellerden oluşan grafit topluluklarına verilen tanımdır. Bazı elementler bu tür grafit şeklinin oluşmasını kuvvetleştirirken, etkileşim sırası ile kuvvetli ve daha az kuvvetli olacak şekilde aşağıda verilmiştir. Chunk tipi grafit oluşumunu arttıran elementlerin etkileri lamel tipi grafit şeklini kuvvetlendiren elementlerle dengelenebilir. Kalın kesitli veya karbon eşdeğeri yüksek döküm parçalarında yüksek saflıkta sarj malzemesi kullanımı durumunda aşırı nadir toprak elementi (RE) ilavesinden kaynaklanır.



3.19. Chunky tipi grafitin gösterilişi[6]

3.3. Silindirik Dökme Demirlerin Üretimi

Çekirdekleşme bölgelerinin sayısı, vermiküler grafitli dökme demirlerin kalitesini belirleyen başlıca parametredir. Çok fazla çekirdekleşme aşırı küreselleşmeye sebep olurken, az çekirdekleşme karbür yapının oluşmasına sebep olur. Çekirdekleşme işlemini gerçekleştiren ve bastıran faktörlerin vermiküler grafit yapısı üzerine direk etkileri vardır [19].

Grafit yapısını etkileyen üç temel faktör vardır. Bunlar;

- a. Bekleme süresi,
- b. Katılaşmada soğutma hızı,
- c. Kimyasal bileşimdir.

3.3.1. Bekleme süresi ve döküm sıcaklığının etkisi

İşlem ile döküm arasında uygun bir bekleme süresi, iyi bir vermiküler grafitli dökme demir üretmek için mutlaka uygulanması gereken bir durumdur. Zaman, işlem malzemesinin ergiyebilmesi ve difüze olabilmesine olanak verecek kadar yeterli olmalıdır. Düşük sıcaklıklarla ve fazla lantan içerikli malzemelerle çalışıldığında, zaman buna paralel olarak artış göstermelidir. Bekleme süresi yetersiz olursa karbürler uniform dağılımı sergilemezler. Sıcak demirlerde, uzun bekleme süreleri de demire düşük küresellik verirler. Yapılan deneyler sonucunda lantanitlerle işlenmiş demirde, küreselliğin 10 dakikada %35'ten %5'e kadar düştüğü görülmüştür. 20 dakika sonra ise grafitin lamelleştiği gözlenmiştir. Kalıntı işlem malzemesi ve kükürt miktarının da bekleme süresi ile azaldığı görülmüştür. Dökümden önce aşırı bekleme ise kükürdün geri kazanılmasına sebep olur ve işlem malzemesi tamamen kaybolur. Bazı araştırmacıların yaptıkları deneylerin sonuçlarına bakıldığında, düşük döküm sıcaklığının düşük küre sayısına neden olduğu görülmektedir. Eğer düşük döküm sıcaklığı istenmekte ise, yüksek küre sayısı elde edebilmenin tek yolu döküm sıcaklığının hızlı bir şekilde düşürülmesidir. Bu çalışmalar, magnezyum ilavesi, magnezyumun geri alınması, işlemden sonraki zaman, dökümden önceki çekirdeklenme ve küre sayıları arasında karşılıklı bir ilişkinin var olduğu anlamına gelmektedir. Hızlı soğutmanın küre sayısındaki artışı üzerine etkisi de bilinen bir

durumdur. Bu etki çekirdeklenme ve büyüme teorileri ile birbirine uygun bir etkidir. Bunun bir başka deyişi de ince kesitlerde küre sayısının daha fazla olacağıdır.

3.3.2. Soğutma hızının etkisi

Katılma boyunca soğutma hızının etkisi daha karmaşık bir yapıdır. Soğuma hızının artırılması çekirdeklenmeden doğan segregasyon oluşumu etkisini artırır. Düşük miktarda işlem malzemesi kullanımı da, yavaş soğuma ile birlikte lamel oluşumuna imkân verir. Soğutma hızı arttıkça vermiküler ve küresel grafit oluşumu da artar. İşlem malzemesinin yüksek miktarda kullanılması, vermiküler grafit yapısını değiştirmeye yol açan bir rol oynar. Yapılan çalışmalar sonucunda, vermiküler grafitin oluşumu için soğutma hızının yavaş olması gerektiği ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni, işlem alaşımının indirgenmesi gereken elementlerle reaksiyonunu gerçekleştirecek zamanın sağlanmasıdır. Vermiküler grafitli dökme demir üretiminde soğuma çok hızlı olursa magnezyum yeterli miktarda reaksiyona giremeyecek ve küresel grafit oluşumu başlayacaktır.

3.3.3. Kimyasal bileşimin etkisi

Vermiküler grafitli dökme demirin grafit yapısının oluşmasında, kimyasal bileşiminin etkisi çok büyüktür. Yüksek sıcaklıkta karbon eşdeğerinde tatmin edici bir artış gerekli olduğundan grafit yapısı istenmez çünkü sıcaklığın düşmesiyle grafit yapı istenilen özelliklere doğru yaklaşır. Aynı şekilde yüksek karbon eşdeğerli demirler için grafit çökeltmesi daha caziptir. Grafit yapı katılmanın ilk evrelerinde daha çok küresel veya düzensiz bir yapı oluşturmaya eğilimlidir. Bu grafit küreleri vermiküler grafit yapısının son küreselliğine de katkıda bulunur.

Karbon eşdeğeri yüksek ise grafitin çökmesi de yüksek sıcaklıklarda olur. Karbon ve silisyum küre sayısına etki eden en önemli elementlerdir. Vermiküler grafitli dökme demirlerin karakteristikleri geniş bir karbon eşdeğeri aralığında, ötektik altında (CE=3,7) ötektik üstüne (CE=4,7) ile %3,1-4 C içeriği ve %1,7-3 Si içeriği ile kullanılmıştır. Düşük karbon içeriği ve sabit silisyum düzeyi düşük küreselliğe sebep olur. Sabit karbon eşdeğeri ve yüksek silisyum içeriği ise küreselliği artırır.

10-40 mm kalınlığındaki kesitlerde optimum döküm özellikleri elde etmek için, ötektik kompozisyon (CE=4,3) tavsiye edilmektedir. Manganez içeriği en fazla %0,1-0,6 arasında fosfor içeriği de %0,06'dan az olmalıdır [40].

3.3.4. Vermiküler grafitli dökme demirlerin mikroyapısı

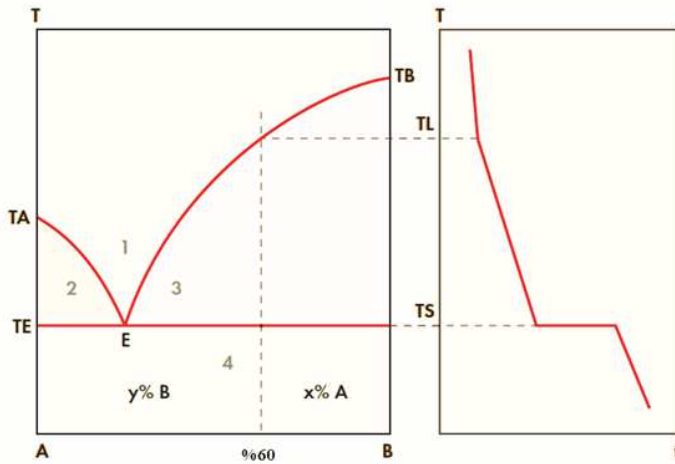
Vermiküler grafitli dökme demirin tanımı ASTM A 842-85 standartlarında IV. Tip grafit olarak yapılmıştır. Bunun yanı sıra JIS G 5503 ve ISO 945-1975 standartlarında 2. formdaki grafitler olarak tanımlanmıştır. Sistematik olarak vermiküler grafitler içyapıda %10 oranlarından %100'e kadar bulunabilmektedir. Vermiküler grafitli dökme demirin mikro yapısında %20 oranında küresel grafit kabul edilebilir bir değerdir. Ancak mikro yapıda lamel grafit arzu edilmez. Bunun nedeni lamel grafitin mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkisidir. Gri dökme demire benzer olarak, vermiküler grafitli dökme demir tanecikleri lamel yapıya benzer bir yapıdadır ve ötektik hücrelerle birbirine bağlı durumdadırlar. Ayrıca vermiküler grafit tanecikleri, mercansı görünümleri, yuvarlak kenarlı olmaları ve pürüzlü yüzeyleriyle gri dökme demirden farklıdır. Vermiküler grafitli dökme demirin mikro yapısı, gri dökme demir ile küresel grafitli dökme demir arasında bir yapıdadır. Aşılanmış vermiküler grafitli dökme demirler, ince parçalarında hemen hemen tamamında perlitik yapı gösterirler, aşılanmamış vermiküler grafitli dökme demirler ise ince kesitler de önemli miktarda grafitli yapı gösterirler. Lamel grafit yapısı aslında tamamen perlit iken vermiküler grafit üstün olarak ferritik matris yapı göstermektedir. Küresel grafitli dökme demirlerde ve vermiküler grafitli dökme demirlerde aynı matris kimyasında ferrit, puslu grafit yapısına sahip demirlere oranla daha fazla bulunmaktadır. Başka bir deyişle vermiküler grafitli dökme demirlerde perlitik bir yapı oluşturmak için daha fazla alaşım elementi kullanmak gereklidir. Vermiküler grafitli dökme demirlerde perlitik ve ferritik yapının oranına, silisyum ve magnezyum içeriği, küreselleştirici elementlerin miktarı ve ötektik dönüşüme bağlı soğutma hızı etki etmektedir.

BÖLÜM 4. TERMAL ANALİZ

4.1. Termal Analizin Temel Prensipleri

Termal analiz, soğuma eğrilerinin yorumlanmasına dayanan bir sistemdir. Soğuma eğrisi, sıcaklık ve zaman grafiğinde gösterilmekte olup bu grafikten sıvı halden katı hale geçene kadar bütün sıcaklık değişimleri kaydedilebilmektedir. Soğuma eğrilerinden alt soğuma değerini, recalescence ve dönüşümleri yakalamak mümkündür.

Soğuma eğrilerindeki sıcaklık değişiminin bu derece hassas ölçüldüğü bir sistemde faz diyagramlarının kullanıldığı ve soğuma eğrisi yorumlamada temel taşlarından biri olduğu aşikârdır. Şekil 4.1’de A ve B malzemelerin sıvı halde %100 çözünürlük gösteren ikili sistemi bulunmaktadır. %60 B içeren AB alaşımının soğuma eğrisi, faz diyagramında bulunan likidüs ve solidüs eğrileri kullanarak ortaya konduğu gösterilmektedir.



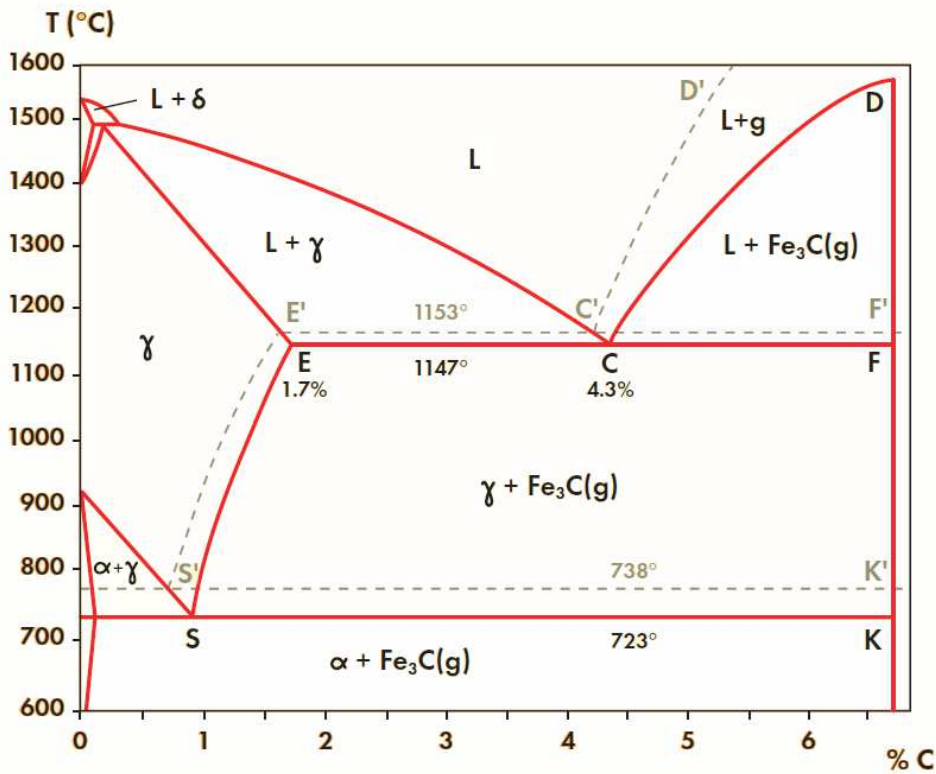
1. bölge: TAE-ETB çizgisinin üst kısmında bulunan, sıvı fazın dengede olduğu bölge
2. bölge: A elementi ve sıvı fazın dengede bulunduğu bölge
3. bölge: B elementi ve sıvı fazın dengede bulunduğu bölge
4. bölge: A ve B kristallerinin dengede bulunduğu bölge

Şekil 4.1. İki faz diyagramında soğuma eğrisinin gösterilişi

4.1.1. Lamel grafitli dökme demirde termal analiz

Dökme demirler Fe (demir) C (karbon) dışında Si (Silisyum), Mn (Mangan), P (Fosfor) ve S (kükürt) gibi malzemeler içerirler. Bu element çeşitliliği katılaşmanın kararlı (stabil) veya kararsız (metastabil) olmasını tayin edebilmektedir. Şekil 4.2'de Fe-C diyagramı üzerinde bulunan kesikli çizgi kararlı katılaşmayı göstermekte, düz çizgi ise kararlı olmayan katılaşmayı göstermektedir.

Karbon elementinin bulunma şekli dökme demirler için önemlidir. Katılaşma hızlarında olan değişim mikroyapıda karbon elementinin formunu etkilemektedir. Stabil katılaşma gerçekleşen bir malzemede karbon grafit şeklinde bulunmasına rağmen stabil olmayan bir sistemde karbon FeC (karbür) şeklinde bulunmaktadır.



Şekil 4.2. Fe-C diyagramında stabil ve metastabil katılaşmanın gösterilişi

Fe-C diyagramında açıkça görüldüğü üzere alaşımdaki karbon oranının artması veya azalması likidüs sıcaklığını ve soğuma eğrisinin değerlerini değiştirmektedir. Üstüne ilaveten Si ve P miktarını ve oksidasyon faktörünün vermiş olduğu etkileri

eklediğimizde, doğru soğuma karakterini tayin etmek zorlaşmaktadır. Bu yüzden ki modifiye edilmemiş Fe-C diyagramı bize soruların cevabını tam anlamıyla veremez.

Yapılan incelemeler sonucu karbon eşdeğeri diye ortaya atılan birçok formül mevcuttur. Bunların en çok kullanılanı formül 4.1 dir.

$$CEV = \%C + (\%Si + \%P) / 3 \quad (4.1)$$

Karbon eş değeri yardımıyla sıvı metalin ötektikaltı veya ötektiküstü alaşıma sahip olduğunu tahmin edebilmekteyiz.

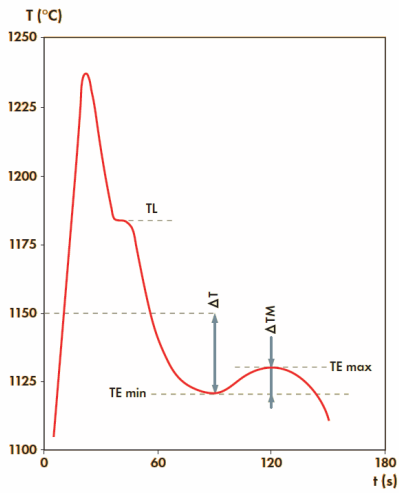
- Karbon eşdeğeri %4.3 ten küçükse hipoötektik katılaşma
- Karbon eşdeğeri %4.3 e eşit olursa ötektik katılaşma
- Karbon eşdeğeri %4.3 ten büyük olursa hiperötektik katılaşma

Si ve P elementlerinin %C oranını değiştirmesi Sc katsayısıyla da açıklanabilmektedir. Formül 4.2 de gösterilmektedir.

$$Sc = \%C_{total} / [4.30 - 1/3 (\%Si + \%P)] \quad (4.2)$$

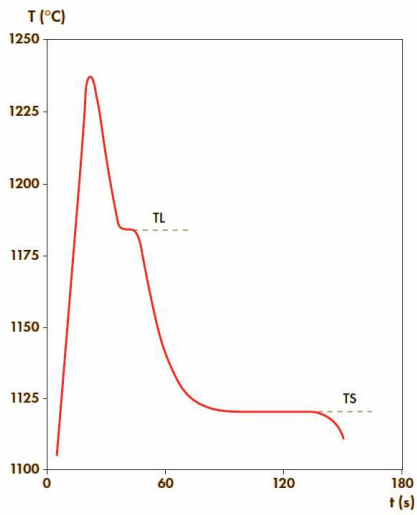
- Sc değeri 1'den küçük ise katılaşma hipoötektik karakterdedir
- Sc değeri 1'e eşit ise ötektik katılaşmadır
- Sc değeri 1'den büyük ise katılaşma hiperötektik karakterdedir.

Hipoötektik kompozisyona sahip lamel grafitli dökme demirin, yavaş soğuma sağlanarak stabil sistemde oluşan soğuma eğrisi Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Stabil sistemlerde katılaşma yavaş olması sayesinde alt soğuma değerini görülebilmektedir.



Şekil 4.3. Hipoötektik kompozisyona sahip dökme demirin, stabil sistemde oluşturduğu soğuma eğrisinin gösterilişi

Bu durumun aksine stabil olmayan (metastabil), hızlı katılaşmanın olduğu sistemlerde: soğuma eğrisi alt soğuma oluşturmadan beyaz katılaşma gösterdiği bilinmekte olup beyaz katılaşmayı gösteren soğuma eğrisi Şekil 4.4'tedir



Şekil 4.4. Hipoötektik kompozisyona sahip dökme demirin, metastabil sistemde oluşturduğu beyaz katılaşmanın soğuma eğrisinde gösterilişi

4.1.1.1. CEL ve SC belirlemede kullanılan hesaplamalar

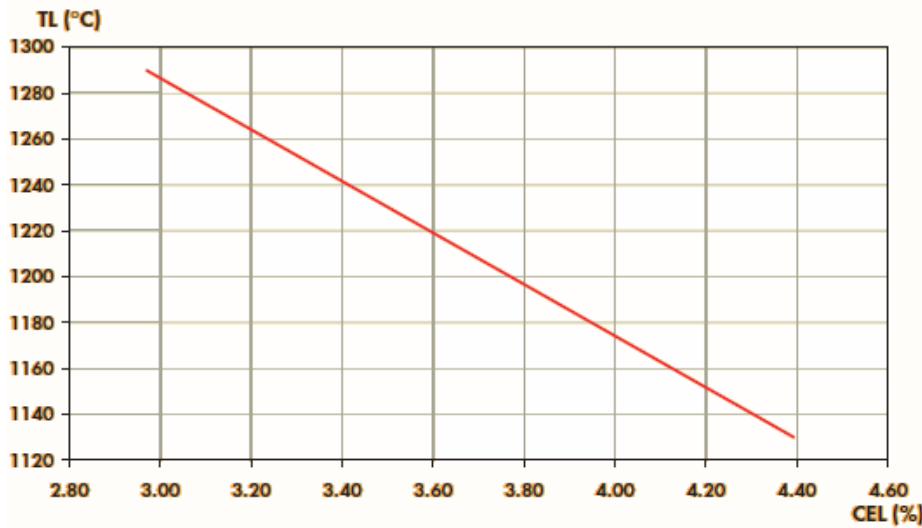
Dökme demirlerin termal analizinde Fe-C diyagramının kullanımının yetersiz olduğu, likidüs çizgisinin, malzemenin kompozisyonuna bağlı olarak değiştiği bilinmelidir. Bu durum özellikle karbon silisyum ve fosfor miktarlarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Beklenen katılma karakterizasyonunun belirlenmesi için CE ve SC değerlerinin kullanılması önem arz etmektedir.

Haraeus Electro-Nite şirketinin geliştirdiği birkaç formül ortaya konulmuştur. Formül 4.3'te likidüs değerlerini bulmak için elde edilen eşitlik yer almaktadır. Aktif karbon eşitliğinin likidüs sıcaklığı arasındaki ilişki formül 4.5'te gösterilmiş olup standart sapma değeri ± 0.047 dir.

$$TL(^{\circ}C) = 1623.60 - 112.36 (\%C + \%Si/4 + \%P/2) \quad (4.3)$$

$$CE = \%C + \%Si/4 + \%P/2 \quad (4.4)$$

$$ACEL = 14.45 - 0.0089*TL \quad (4.5)$$



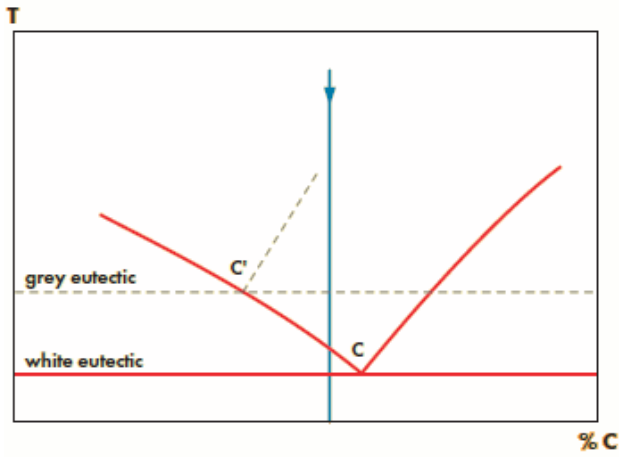
Şekil 4.5. Aktif karbon eşitliği ve likidüs arasındaki ilişkinin gösterilmesi

Diğer bir benzer çalışma Sc katsayısı için ortaya konmuştur. Formül 4.6'da bu eşitlik gösterilmiştir.

$$S_c = 3.674 - 0.0023 * T_L \quad (4.6)$$

4.1.1.2. Karbon içeriğinin belirlenmesi

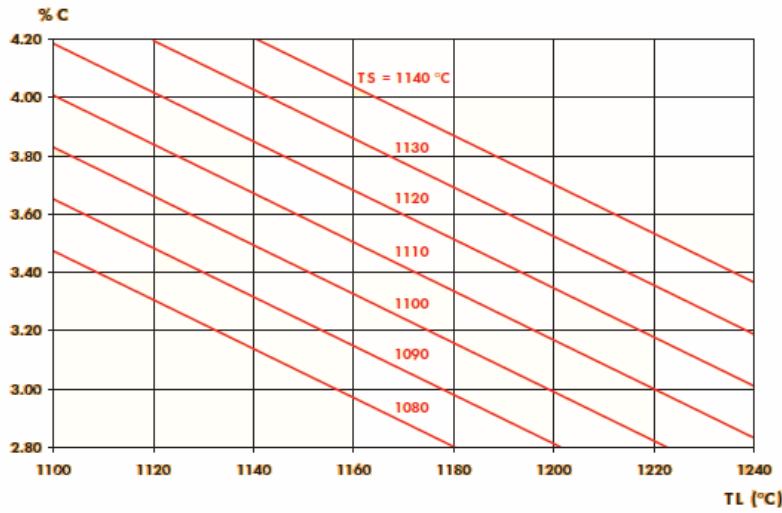
Karbon oranının belirlenmesinde çeşitli yöntemler vardır, bunlardan biri hızlı katılaşmayı sağlamaktır. Tellüriyum katılan termal analiz numunelerinde beyaz katılaşmanın meydana geldiği bilinmektedir. Hiperötektik bileşime sahip lamel grafitli dökme demirin bile tellüriyum ekleyerek stabil olmayan (metastabl) ortamda hypo ötektik katılaşmaya maruz kaldığı Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Beyaz katılaşmanın ötektik çizgisinde gösterilişi

Bu katılaşma karakterizasyonunda elde edilen likidüs ve solidüs sıcaklıkları, karbon değerini bulabilmemizde yardımcı olacaktır. Formül 4.7 de gösterilen fonksiyon, likidüs ve solidüs sıcaklıklarının karbon içeriğiyle olan ilişkisini göstermekte olup standart sapması ± 0.039 dur. Formül 4.7 de görüldüğü üzere likidüs sıcaklığı yükseldikçe karbon değerinin düştüğü, solidüs sıcaklığı düştükçe karbon değerinin düştüğü görülmektedir.

$$\%C = -6.51 - 0.0084 * T_L + 0.0178 * T_S \quad (4.7)$$



Şekil 4.7. TL(likidüs) ve TS(solidus) sıcaklıklarının %C oranıyla olan ilişkisinin gösterilişi

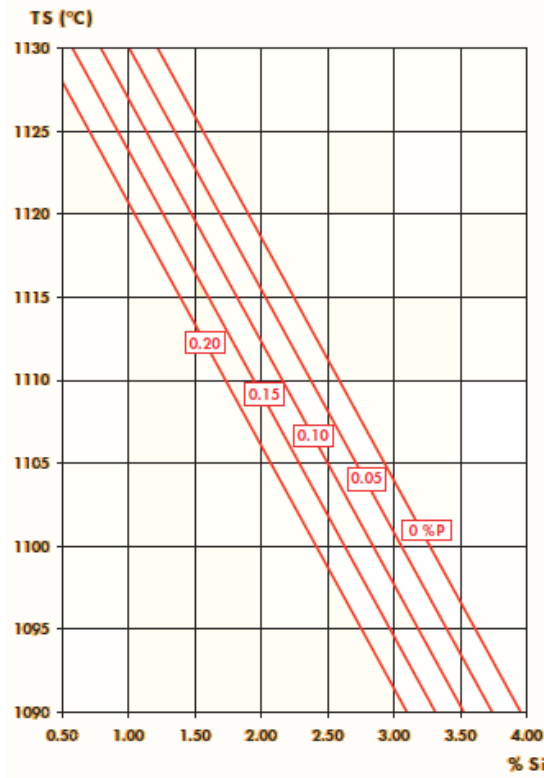
4.1.1.3. Silisyum içeriğinin belirlenmesi

Stabl olmayan sistemde ötektik ve solidüs sıcaklıkları düştüğünde silisyum içeriği azalmaktadır. Bu davranış P, Al, Si, Cu ve Ni içinde aynıdır.

$$TS = 1138.2 - 6.4 (Si + 4P) - 1.65(Si + 4P)^2 \quad (4.8)$$

$$\%Si = 78.411 - 4.28087 * Si\text{-}adj - 0.06831 * TS \quad (4.9)$$

Formül 4.8 de elde edilecek sonuçların gerçeğe yakın olması için Silisyum oranı % 1 ve 3 arasında ve fosfor oranı %0.2 civarında olması gerekmektedir. TS ve (Si + 4P) arasındaki ilişkinin doğru yansıtılması için bu şart önem arz etmektedir. Pratik uygulamalar için kullanılan diğer bir formül 4.9 dur. Si-adj doğrulama faktörüdür, P miktarı değişmesiyle Si-adj faktörü değişmektedir. P oranı arttıkça solidüs sıcaklığının düştüğü Şekil 4.8' de görülmektedir.



Şekil 4.8. Farklı fosfor oranlarıyla meydana gelen TS ve %Si arasındaki değişimin gösterilmesi

Si içeriğini bulmak için yapılan çalışmalar çok dikkat isteyen çalışmalardır. Solidüs sıcaklığındaki 1 °C nin %Si oranında 0.07 farklı hesaplamasına sebep olacaktır. Bunun için termal olarak kararlı ölçüler elde etmeliyiz. Ölçü için kullandığımız aletlerin kalibrasyonu yapılır olması gerekir.

Si-adj faktörünü bulmak için uygulanacak prosesler şunlardır:

1. Termal analizde solidüs sıcaklığı ölçüldükten sonra spektral analiz ile kontrol edilmeli sonuçlar karşılaştırılmalıdır.
2. Elde edilen solidüs sıcaklığı ve %Si değerleri formülde yazılarak doğrulama faktörü bulunmalıdır.
3. Elde edilen sonuçların doğrulanması için en az 3 kez tekrarlanması gerekmektedir.
4. Analizde elde edilen sonuçların ortalaması alınmalıdır.

4.1.1.4. Ötektik sıcaklığındaki alt soğuma

Maksimum ötektik sıcaklığı ile minimum ötektik sıcaklığı arasındaki farka alt soğuma denmektedir. Bu fark ötektik recalescence diye adlandırılabilir.

Termal analizde elde edilen soğuma eğrileri, alt soğumanın değerini çok açık bir şekilde ortaya koyabilmektedir. Elde edilen alt soğuma değeri, aşılama kontrol edebildiği gibi dökme demirlerde çekme mukavemeti ve sertlik gibi bazı mekanik özellikleri önceden tespit edebilmektedir.

Aşılama, çekirdeklenme potansiyelini arttırmak için yapılan ilavedir. Aşılama etkisiyle gri katılaşma eğilimi göstererek grafit şekli ve ötektik hücre sayısını arttırmaktadır. Aşılamanın diğer bir etkisi ise alt soğumayı düşürmektir.

Aşılama pratiğinde, optimum aşılama miktarının bulunması önemlidir. Yetersiz aşılamanın soğuma hızını arttıracığından sıvı metal metastabil ötektik altında katılaşacağı bilinmelidir. Dolayısıyla karbonun katılaşma boyunca yeterli grafit genişlemesini meydana getirmemesiyle yapıda karbür formları ve malzemede çekinti meydana gelmesine sebep olacaktır.

Fazla aşılama maliyetli olmasının yanı sıra yapıda çekinti de oluşturabilir. Bunun sebebi ise aşırı aşılamanın grafitin çok erken büyümeye başlamasından ve dolayısı ile grafit genişlemesinin katılaşma sonuna kadar devam edememesindedir. Bu durum aynı zamanda mikro çekintilerin oluşmasına da sebep olur. Çok erken grafit genişlemesinin meydana gelmesi sonucu kalıp duvarları genişler ve makro çekintiye sebep olur. Bu faktörlerden dolayı optimum aşılama miktarının belirlenmesi önemlidir.

Termal analiz sıvı metale için doğru aşılama miktarını belirleyerek, maliyetlerde önemli ölçüde tasarruf sağlamaktadır. İstenmeyen karbürler ve çekinti sebebiyle ıskartaya çıkan metal miktarını azaltılmış olur. Her döküm parçası veya her malzeme için tek bir optimum aşılama miktarı yoktur. Bu parçadan parçaya veya malzemeden malzemeye değişir. Bazı dökme demirler çekintiye karşı daha hassas iken bazıları

çekinti eğilimine karşı daha dirençlidir. Bunlar göz önüne alındığında termal analiz her bir parça ve malzeme için kritik aşılama oranını ve aşılama tipini belirlemede etkili ve kullanışlı bir yöntemdir

4.1.1.5. Mekanik özelliklerin alt soğumayla olan ilişkisi

Alt soğuma değerlerinin katılaşmayı etkilediği bilinmektedir. Mikro yapıya bakıldığında lamel grafitlerin hangi tipte matrise dağıldığı, malzemenin fiziksel özellikleri bakımından önemlidir. Bu konuyu araştıran Heller ve Jungbluth aşılantırılmamış malzemelerin çekme ve sertlik değerleri hakkında formül 4.10 ve 4.11' i ortaya koymuşlardır.

$$R_m(N/mm^2) = 9.81 (102 - 82.5*Sc) \quad (4.10)$$

$$HB = 538.6 - 354.75*Sc \quad (4.11)$$

Çekme mukavemeti 150den 400N/mm² kadar geçerli olabilecek mekanik özelliklerdir. Bununla beraber grafitlerin karbüre dönüşmemesi mikroyapıda lamellerin A tipi olması için paçanın et kalınlığı 15mm den küçük olmaması gerekmektedir. Parçanın et kalınlığının soğuma rejimini etkileyeceğini düşündüğümüzde aynı karbon eşdeğerine sahip dökme demirlerin çekme ve sertlik değerleri farklı çıkabileceği bilinmelidir

4.1.2. Küresel grafitli dökme demirde termal analiz

Termal analizde küresel grafitli dökme demirin karbon eş değerinin, karbon içeriğinin ve silisyum içeriğinin hesaplanması aşılantırılmamış lamel grafitli dökme demirle aynı işlemleri içerir. Daha öncede belirtildiği gibi tellüryum içeren test kaplarının stabil olmayan sistemde alınan soğuma eğrisi, bize bu parametreleri kolayca okumamızı sağlar.

Beyaz katılaşma elde etmek için kullanılan standart tellüryumlu kaplar, magnezyum ve tellüryumun arasında oluşan reaksiyon nedeniyle doğru soğuma eğrisi elde

etmemize engel olmaktadır. Standart termal analiz kaplarında yapılan analizlerde sağlıklı sonuç elde etmek için Heraeus Electro-Nite firmasının geliştirdiği özel test kapları üretilmiştir. Bu sorun test kaplarının içine düşük miktarda kükürt ilave edilerek çözülmüştür. Magnezyum ve kükürt arasında oluşacak reaksiyon sonucu sağlıklı beyaz katılaşmış soğuma eğrisi elde edilmiştir.

Kükürt içeren test kaplarında CEL, C, Si parametrelerini hesaplamak için TL değerini 5 °C TS değerinin 2.5 °C düşük okuduğu bilinmelidir.

Karbon eş değerini hesaplamak için 4.12 formülü kullanılır.

$$ACEL = 14.45 - 0.0089*(TL+5) \quad (4.12)$$

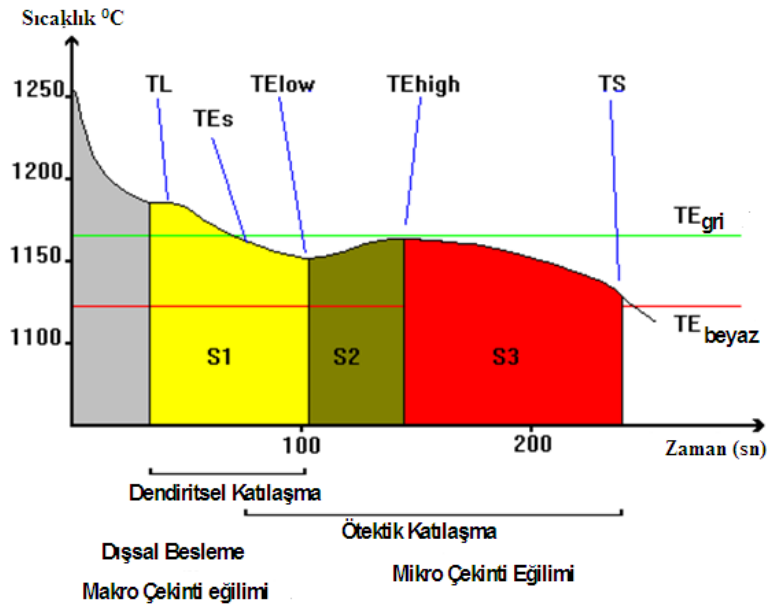
Karbon içeriğinin hesaplanmasında 4.13 formülü kullanılmaktadır.

$$\%C = -6.51 - 0.0084*TL + 0.0178*TS \quad (4.13)$$

Silisyum içeriğini hesaplamak için 4.14 formül kullanılmalıdır.

$$\%Si = 78.411 - 4.28087*Si-adj. - 0.06831*(TS + 2.5) \quad (4.14)$$

4.2. Soğuma Eğrisinin Parametreleri



Şekil 4.9. Soğuma eğrisinin gösterilişi

Bilgisayar destekli bir program olan termal analiz, aldığı numune sayesinde soğuma eğrisi elde eder ve bunu monitöre yansıtır. Soğuma eğrisi, belli bir tecrübeye sahip olan kullanıcıya dökme demirin katlaşma davranışını ile ilgili bilgiler vermektedir. Soğuma eğrileri; mikro veya makro çekinti eğiliminin ne düzeyde olduğu, döküş sıcaklığının optimizasyonu, aşılama veriminin ne olduğu ve ters çil eğiliminin oluşup oluşmayacağı hakkında birçok bilgi verir.

TL (Likidüs Sıcaklığı) : Sıvıdan katı faza geçerken ilk katı taneciğin oluştuğu noktaya denir. Hipoötektik alaşımda primer ostenit, hiperötektik alaşımda primet grafitler oluşmaktadır. Sfero için bu likidüs değeri, TE_{low} değerine eşit olması istenir. Karbon eşdeğeri belirlemede likidüs sıcaklığının bulunması önemlidir.

TE_s : Ötektik reaksiyonunun başladığı , bir sıvı fazdan iki ayrı katı fazın oluştuğu sıcaklıktır.

TE_{low} : Düşük ötektik sıcaklığını gösterir. Ötektik katılaşmadan ortaya çıkan gizli ısı ve ostenit fazının ilk dendritik katılaşması sonucu ortaya çıkardığı ısı bu noktada ortama verilir. Kaybedilen ısı yüksek ötektik sıcaklığına (TE_{high}) çıkararak dengelenir. Düşük ötektik sıcaklığının (TE_{low}) alt soğuma değerinin bulunması için önemlidir. Bilgisayar destekli bir program olan termal analiz, TE_{low} değerinden yola çıkılarak optimum aşılama miktarını belirler. Primer karbür oluşma riskinin düşük seviyelere indirmek için düşük ötektik sıcaklığının (TE_{low}) beyaz ötektikten yüksek olması istenir.

TE_{high} : Yüksek ötektik sıcaklığıdır. Soğuma eğrisinde sıcaklığın yükseldiği son noktadır. Gizli ısının serbest kaldığı son noktadır. Bundan sonraki reaksiyonlar kuvvetsiz reaksiyonlardır. Solidüs sıcaklığına ulaştığında sıvıdan katıya geçiş tamamlanmış olur.

R (Recalescence) : Düşük ötektik (TE_{low}) sıcaklığından yüksek ötektiğe (TE_{high}) çıkarken yapmış olduğu sıcaklık farkına denir. Bu zaman periyodu grafit genişmesi ile ilişkilendirilir. R (Recalescence) değerinin düşük olması, pratikte R nin 8 den aşağıda olması istenir. Bu değer yüksek olması durumunda primer grafitlerin meydana geleceği, grafit genişmesinin erken oluşabileceği ve kalıbı zorlayacağı bilinmelidir. Sıvı metalin kuma penetrasyonu ve çekinti riskini minimuma indirmek için recalescence değerinin düşük seviyelerde olması şarttır. Grafit genişme hızını yavaşlatmak için TE_{low} değerinin yükseltilmesi gerekir. Buda aşılama pratiğinin kontrolüyle mümkündür.[26]

TS (Solidüs sıcaklığı) : En son sıvı taneciğin katıya dönüştüğü noktadır. TS değerinin yüksek olması ters çil oluşma riskini minimuma indirir. Pratikte bu değer beyaz ötektiğin $25^{\circ}C$ aşağıda olması istenir. Silisyum, bakır, alüminyum solidüs sıcaklığını yukarı çekerken mangan, krom ve magnezyum solidüs sıcaklığını düşürmektedir.

TE_{gri} (TE_{grey}) : Karbon çökeltisinin grafit olarak çökeldiği, ötektik reaksiyon başlangıcıdır. Mümkün olduğunca yüksek tutulması istenir. Ni, Cu, Co, Al, Pt elementleri grafit ötektik sıcaklığını yükseltmesine karşın Cr, V, Ti, Mn, Sn, Mo, Sb, V, Mg, P elementleri ötektik sıcaklığını düşürmektedir. Teorik olarak yaklaşık TE_{gri} sıcaklığı formül 4.15 te bulunabilmektedir.

$$TE_{grey} = 1153 + 6.7 * \%Si \quad (4.15)$$

TE_{beyaz} (TE_{white}) : Karbon çökeltisinin karbür (Fe₃C) olarak çökeldiği, ötektik reaksiyonun başlangıcıdır. Mümkün olduğunca düşük sıcaklıkta olması arzu edilir. Hatta solidüs sıcaklığının altında bir sıcaklıkta yer alması ters çil oluşumu eğilimini minimuma çekmesi istenir. Cr, V, Ti, Al, Pt elementleri karbür ötektik sıcaklığını yükseltmesine karşın Si, Ni, Cu, Co, Mn, Sn, Mo, Sb, V, Mg, P elementleri karbür ötektik sıcaklığını düşürmektedir. Teorik olarak yaklaşık TE_{white} sıcaklığı formül 4.16 da bulunabilmektedir.

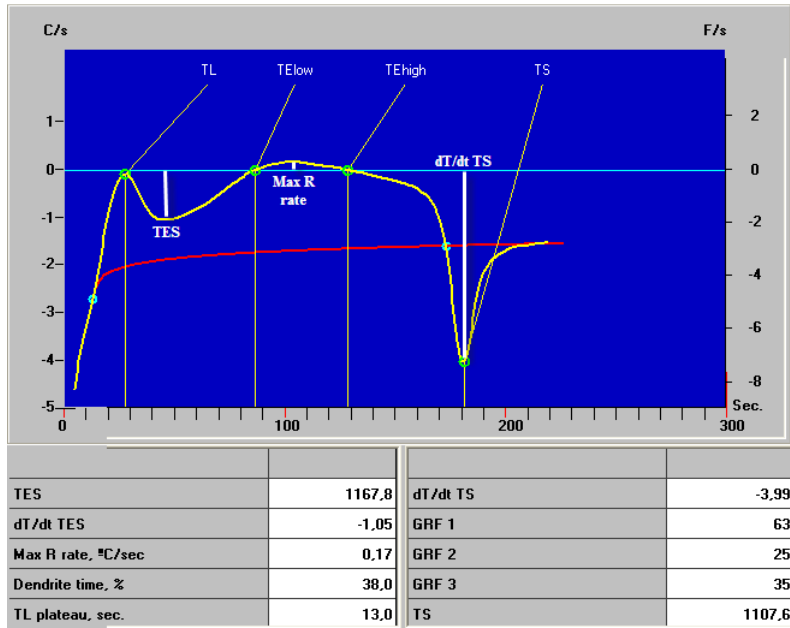
$$TE_{white} = 1147 - 12 * \%Si \quad (4.16)$$

S1 bölgesi : Likidüs sıcaklığının (TL) belirlendiği zamanı ile düşük ötektik sıcaklığının (TE_{low}) belirlendiği zaman dilimi içerisinde, soğuma eğrisi altında kalan alana S1 alanı denmektedir. S1 bölgesinde primer östenit kristalleri oluşmaktadır. Dendritik soğumayı temsil eder

S2 bölgesi : Düşük ötektik sıcaklığının (TE_{low}) belirlendiği zaman ile Yüksek ötektik sıcaklığının belirlendiği zaman dilimi içerisinde, soğuma eğrisinin altında kalan alana S2 alanı denmektedir.

S3 bölgesi : Yüksek ötektik sıcaklığının belirlendiği zaman ile solidüs sıcaklığının belirlendiği zaman dilimi içerisinde, soğuma eğrisinin altında kalan alana S3 bölgesi denir.

4.3. Soğuma Hızı Grafiğinin Parametreleri



Şekil 4.10. Soğuma hızının gösterilişi

Soğuma eğrisinin türevi alınarak soğuma hızları gösterilir. Birinci türev eğrisi göz önüne alındığında sıfır diye kabul edilen yatay çizgide soğuma hızının sıfır olduğunu gösterilmektedir. İncelediğimiz birinci türev eğrisi, sıfır kabul edilen yatay çizginin altına inmiş ise numunenin soğumakta olduğu ve belli bir soğuma hızına sahip olduğu anlamına gösterir. Şayet bu çizgi sıfır çizgisinin yukarısına çıktıysa bu eğrinin soğumayıp ısındığı anlamına gelmektedir. Şekil 4.10'da görüldüğü üzere düşük ve yüksek ötektik arasındaki periyotta soğuma hızının $+0.17$ °C/saniye olduğunu göstermektedir.

dT/dt TES : Ötektik reaksiyonun başlama sıcaklığındaki soğuma hızı

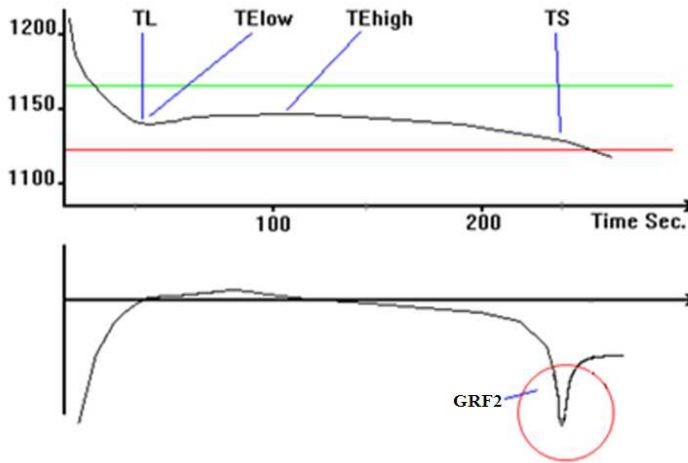
Max R rate : Düşük ötektik ve yüksek ötektik arasında oluşan maximum soğuma hızıdır.

dT/dt TS : Birinci türev eğrisinde minimum soğuma hızı değerine sahip parametredir. Pratikte bu değerin -2.8 ile -5.0 arasında olması istenir.

Dendrite Time : Dendrit oluşma zamanı, bütün katılaşma periyodunun yüzde kaçına tekabül ettiğini göstermektedir. Soğumanın likidüs sıcaklığına geldiği zamandan, düşük ötektiğe sıcaklığına geldiği zamana olan zaman farkının, numune katılaşması için gerekli süreye oranıdır.

GRF1 (Grafit 1 faktörü) : Ötektik grafit çökmesinin miktarını gösterdiği bir sayıdır. Grafite 1 faktörü yüksek ötektik sıcaklığından 15°C aşağısında tanımlanır ve yüksek olması istenir. Düşük olması halinde aşılama pratiği kontrol edilmelidir. Recalescence değerinin düşük seviyelerde olması durumunda GRF1 faktörünün düşük seviyelerde yer alması, karbon oranının düşük olduğu anlamına gelir. Bunun için R limitleri içerisinde karbon ilave etmek gerekir. GRF1 faktörünün düşük oluşu malzeme içerisinde mikro çekintiye sebep olacağı unutulmamalıdır.

GRF2 (Grafite 2 faktörü) : Birinci türev eğrisi, grafit şekilleri hakkında bize bilgi verebilmektedir. Solidüs sıcaklığının öncesi ve sonrasında oluşan açığı bize grafit şekli hakkında bize bilgi verir. Grafite 2 faktörünün düşük olması mikro çekinti oluşumunu engeller.



Şekil 4.11. Grafite 2 faktörünün hesaplanmasında, etkin bölgenin gösterilişi

4.4. Termal Analiz ile Isı İletim Katsayısı Arasındaki İlişki

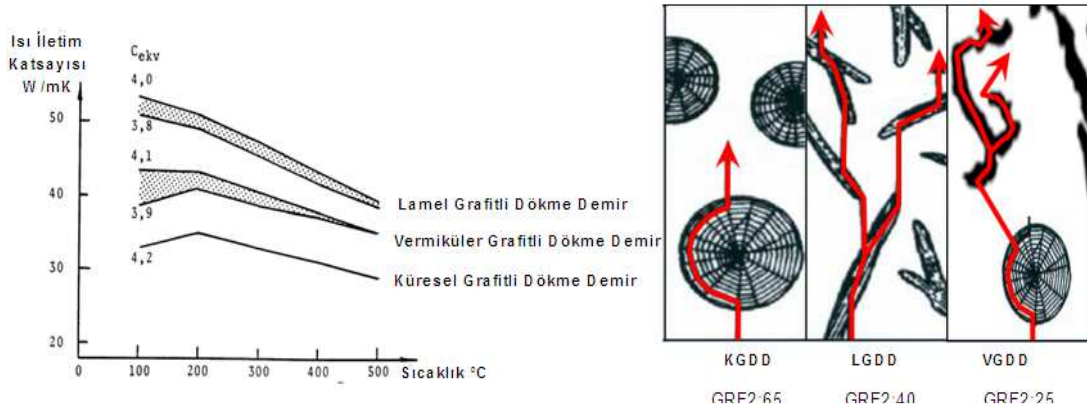
Isı iletim katsayısı, Tablo 4.1'de görüldüğü üzere grafit miktarının değişmesi, grafitlerin matrise dağılımı ve grafit formlarının değişmesi ile farklılık

göstermektedir. Dökme demirler arası karşılaştırma yapılırsa vermiküler dökme demirin ısı iletim katsayısı, lamel grafitli dökme demirden küçük, sferodan ise büyüktür. Bununla beraber vermiküler dökme demirlerde ötektik kompozisyona yaklaşıldıkça lamel grafitli dökme demirle arasındaki ısı iletim katsayısı farkı açılmaktadır [5,16,27].

Tablo 4.1. Kır dökme demir, Sfero ve vermiküler dökme demirin çeşitli sıcaklıklardaki ısı iletim katsayısı [27]

Grafit Şekli	Karbon Eşdeğeri	Isı İletim Katsayısı W/m . α K (Btu/ft · h · °F)				
		100 °C (212 °F)	200 °C (390 °F)	300 °C (570 °F)	400 °C (750 °F)	500 °C (930 °F)
Lamel	3.8	50.24 (29.02)	48.99 (28.30)	45.22 (26.12)	41.87 (24.19)	38.52 (22.25)
	4.8	53.39 (30.84)	50.66 (29.27)	47.31 (27.33)	43.12 (24.91)	38.94 (22.49)
Silindirik	3.9	38.10 (22.01)	41.0 (23.69)	39.40 (22.76)	37.30 (21.55)	35.20 (20.34)
	4.1	43.54 (25.15)	43.12 (24.91)	40.19 (23.22)	37.68 (21.77)	35.17 (20.32)
Küresel	4.2	32.34 (18.68)	34.75 (20.08)	33.08 (19.11)	31.40 (18.14)	29.31 (16.93)

Soğuma hızı eğrisinde gösterilen GRF2 faktörünün, grafit formu hakkında bize bilgi verdiği önceki bölümlerde bahsedilmişti. GRF2 faktörünün ısı iletimiyle ilişkili bir parametredir. Şekil 4.11’de soğuma eğrisinin birinci türev eğrisinden oluşan eğrinin solidüs sıcaklığı noktasında belli bir Φ açısı yaptığı gösterilmiştir. Bu GRF2 faktörünün sayısal değerinin minimum olması için Φ açısının mümkün olduğunca küçük olması gerekir. Bu sayı ne kadar düşük olursa mikro çekinti en aza indirgenir. Sfero için bu değer 30-70 arası olması idealdir. Sfero dökümlerde ortaya çıkan Φ açısının büyük oluşu, nodul boyutlarının üst seviyede, büyük olduğunu işaret etmektedir.



Şekil 4.12. Kır dökme demir, Sfero ve vermiküler dökme demirin ısı iletim katsayılarının karşılaştırılması [19]

Demirin 1140°C sıcaklıkta özgül ısısı $0.2\text{cal/gr}^{\circ}\text{C}$ dir. Bazı faktörler göz ardı edilip ve grafitin gizli erime ısısı 875 cal/gr kabul edildiğinde bir numune için (Quik cup) sıvı fazın 1°C soğuması sonucunda 0.08 gram grafit katılmaktadır. Toplam grafit miktarı ve grafit çökmesinin başladığı zaman mukayese edildiğinde malzemenin ısı iletim katsayısı hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Dolayısıyla grafitin, ısı iletim katsayısı arasındaki ilişki kullanılarak yapıya hakim olan grafit türü saptanabilmektedir.

4.5. Aktif Karbon Eşdeğeri

Termal analiz kullanılmasında diğer bir önemli parametre aktif karbon eşdeğerinin bulunmasıdır. Prosesin kontrolü için termal analizin aktif karbon eşdeğerinin saptanması önemlidir. Teorik olarak hesaplanan karbon eşdeğeri bizi yanıltabilmektedir.

Aynı kimyasal kompozisyona sahip iki malzemenin soğuma eğrisi aynı olmayabilir. Bu durum malzeme içerisindeki karbon içeriğinin yapıda nasıl bulunduğu ve sıvı metal içerisinde bulunan oksijen miktarından kaynaklanmaktadır. Karbon içeriği bir sınıflandırmaya tabi tutulursa, aktif karbon ve pasif karbon gibi iki guruba ayırmak mümkündür.

Aktif Karbon: Kristal formda çökelmiş karbondur. Düşük ötektik sıcaklığından (TE_{low}) solidüs sıcaklığına olan periyotta etkisini sürdürür.

Pasif Karbon: Yapı içerisinde primer karbür olarak bağlanan ve/veya grafitin mikropartiküller şeklinde bulunan çözünmemiş karbondur.

Diğer bir faktör sıvı metal içerisindeki oksijen seviyesidir. Oksijen aktivitesini belirlemede magnezyum arasındaki eşitlikten yararlanır. Oksijen aktivitesi çelikler için 5ppm-500ppm arasında değişirken sferoda oksijen aktivitesi 100ppm değerinden daha düşük seviyelerdedir. Kimyasal kompozisyon değişimi hızlı sıcaklık değişimleriyle oksijen aktivitesi değiştirmektedir. Sfero üretiminde aktif karbon eşdeğeri ayarlanmasında oksijen aktivitesi göz önüne alınmalıdır. Vermiküler grafit üretiminde yüksek Mg içeriğinin oksijen aktivasyonunu düşürdüğünü ve küreselleştirmeyi verimini düşürerek küresel formun vermikülere döndüğü görülmüştür.

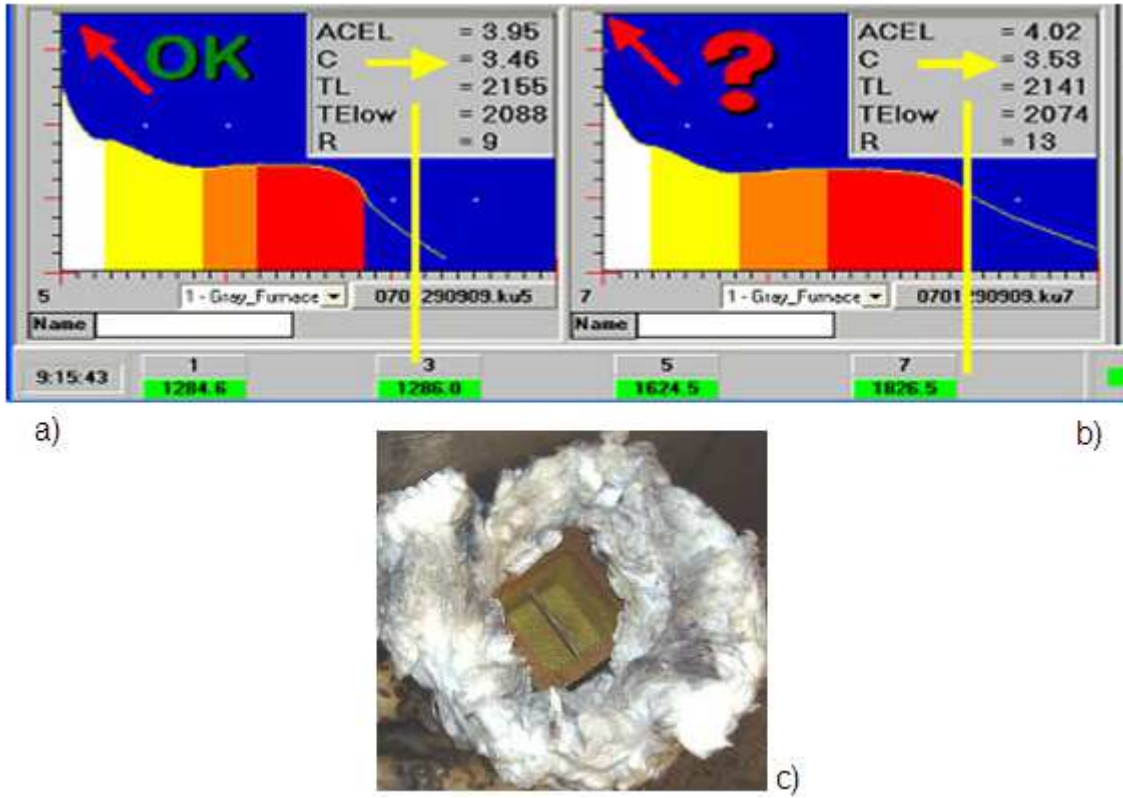
Yüksek oksijen miktarı aktif karbon eşdeğerini düşürmektedir. Yüksek miktarda çelik hurda ilave etmek, fırın veya ocağın kapağının ergitme ve boşaltma sırasında açık durması ve denge sıcaklığında bekletmek oksijen aktivitesini arttırıcı faktörlerden bazılarıdır. Bunlara karşın oksijen aktivitesinin azaltılmasında FeSi, SiC, Al, Mg gibi deoksidanların ilavesi yapılabilmektedir.

Soğuma eğrisinin yorumlanmasında S2 alanın oksidasyon faktörünü belirlemede etkin rol oynadığı ortaya konulmuştur. Formül 4.17'ye bakıldığında S2 alanının, grafit çökmesinin meydana geldiği bölgeyle olan oranı bize oksidasyon faktörünün yüzdesini vermektedir.

$$OXF (\%) = S2 / (S2 + S3) \quad (4.17)$$

Aktif karbon eşdeğerinin değişmesini etkileyen diğer bir faktör dışarıdan müdahale ile soğuma hızını değiştirmektir. Şekil 4.13 te Lamel grafitli dökme demire ait iki tane soğuma eğrisi görülmektedir. Şekil 4.13b de görülen soğuma eğrisi şekil 4.13c ile gösterilmiş olan seramik fiber battaniyeye sarılmış olan bir quik kap ile

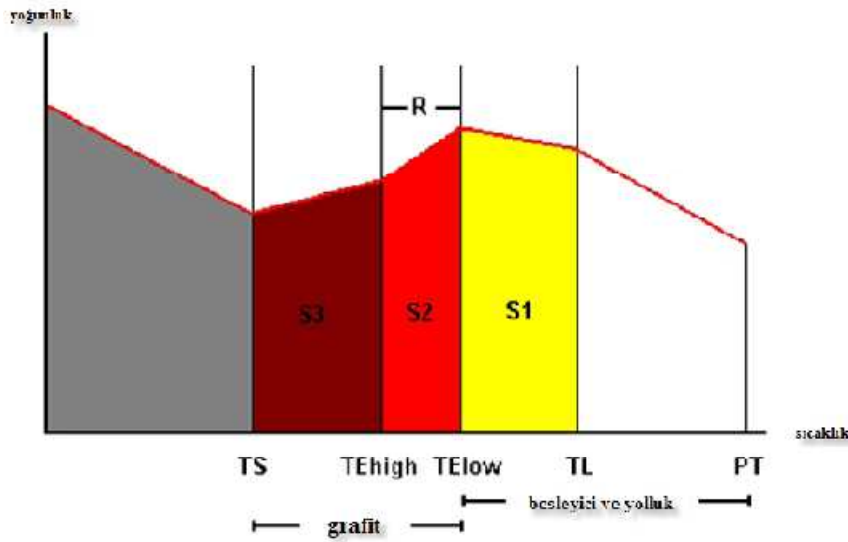
oluşturulmuştur. Soğuma hızının düşürülmesi sonucu quik kabın normal şartlarda sahip olduğu termal modül yaklaşık 0.67cm civarlarındayken bu değer seramik fiber battaniye ile yükseltilmiştir. Soğuma eğrilerini karşılaştırsak termal modülü yüksek olan soğuma eğrisinde aktif karbon eşdeğeri daha yüksek seviyelerdedir. Çünkü karbonun çökmesi için daha fazla zaman sağlanabilmiştir. Katılaşmayı değiştirmenin diğer bir yolu da farklı sıcaklıklarda dökümü gerçekleştirmektir ama metali her zaman aynı sıcaklıkta boşaltmak şiddetle tavsiye edilir. Şekil 4.13ab'de görülen kırmızı oklar soğuma eğrisinin en üst noktasını göstermektedir (2462°F). Bunun üzerindeki döküm sıcaklığının kuvars tüpünü kırma ve yanlış eğri çıkarma olasılığı arttırmaktadır.



Şekil 4.13. Termal modülün aktif karbon eşdeğerine olan etkisinin gösterilişi. a) İşlem görmemiş soğuma eğrisi b) İzole edilerek elde edilen soğuma eğrisi c) Seramik fiber battaniye ile izole edilmiş tellürsüz quik kap

4.6. Döküm Sıcaklığı ve Yoğunluk Arasındaki İlişki

Dökme demirlerin matriksi ferritik, perlitik, martensitik ve bunların kombinasyonundan oluşabilmektedir. Matriksi oluşturacak faz katılma esnasında, hacimsel büzülme gösterirken, grafitler de, çözülmüş karbon daha fazla hacim kapladığından, genleşme meydana gelecektir. Bu yüzden dökme demirlerde, katılma esnasında çelik ve alüminyum gibi metal alaşımlarının dökümünden farklı olarak hacimsel büzülme ve genleşmenin bir arada olduğu karmaşık bir katılma davranışı görülmektedir. Dökme demirlerde sıvı metalin katılmasını etkileyebilen en önemli faktörlerden biri kompozisyon diğeri aşılama işlemleridir.



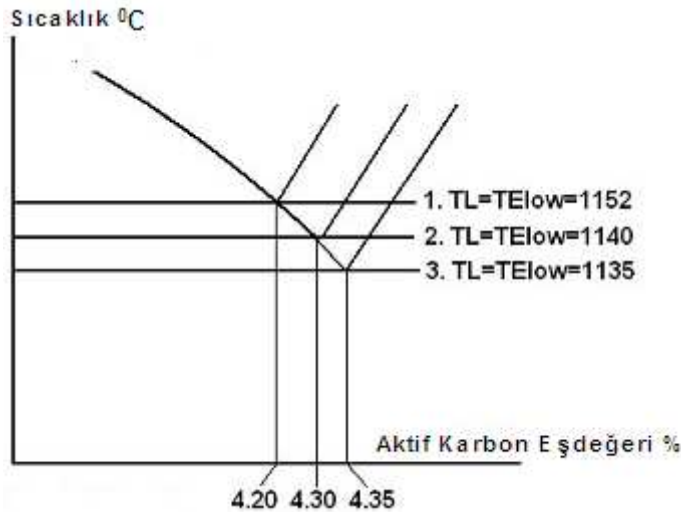
Şekil 4.14. Sıcaklık ve yoğunluk arasındaki ilişkinin gösterilişi

Dökümün sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimi gösteren Şekil 4.14'e bakıldığında döküş sıcaklığının artmasıyla, döküş sıcaklığındaki ve katılmış dökümün yoğunluğu arasındaki farkın artacağı aşikârdır. Bu yoğunluklar arasındaki büyüyen fark daha fazla hacimsel genleşmeye neden olacağından bilinmelidir. Döküm sıcaklığının üst seviyede olması düşük ötektik sıcaklığının (TE_{low}) düşmesine ve dolayısıyla çekirdeklenmenin düşük oranda gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Üretim sırasında akışkanlık ve hacimsel çekme göz önüne alınarak mümkün olduğunca döküş sıcaklığı düşük seviyelerde tutulması önemlidir [28].

4.7. Ötektik Noktanın Termal Analizde Gösterilmesi

Kararlı ortamda elde edilen Fe-C diyagramında ötektik noktanın %4.3 olduğu kabul edilmektedir. Alaşım elementleri ve oksijen aktivitesinin etkisi, ötektik noktanın bulunmasını zorlaştırmakta olup kimyasal analize bakılarak hesaplanan karbon eş değerinin doğru ötektik nokta olmadığı bilinmelidir. Küresel grafitli dökme demirde, primer grafit oluşumunun engellemek ve ötektik soğuma karakteristiğini yakalamak üretimi için çok önemlidir. Termal analizde elde edilebilecek aktif karbon eşdeğeri, bu problemin önüne geçebilmekte ve prosesi kontrol altında tutabilmektedir.

Termal analiz için doğru ötektik noktanın belirlenmesi, primer bir fazının oluşmaması anlamına gelmektedir. Bu şart göz önüne alındığında S1 alanının sıfır, dolayısıyla likidüs sıcaklığının düşük ötektik sıcaklığına eşit olması demektir. Şekil 4.15te görüldüğü üzere aktif karbon eşdeğerinin sadece 4.3 olarak bulunması doğru ötektik noktanın bulunduğu anlamına gelmemektedir. Likidüs sıcaklığı ve düşük ötektik sıcaklığının eşit olduğu aktif karbon eşdeğeri o malzemenin doğru ötektik noktasıdır.

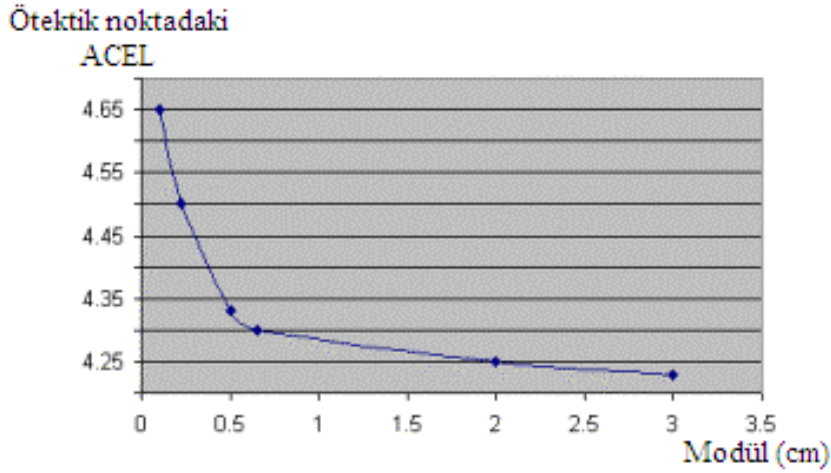


Şekil 4.15. Ötektik noktanın düşük ötektik sıcaklığıyla olan ilişkisinin gösterilişi [29]

Şekil 4.15'te farklı likidüs sıcaklıklarının, düşük ötektik sıcaklığına eşit olabileceğini göstermektedir. Üç durumda likidüs (TL) ve düşük ötektik sıcaklıkları (TE_{low}) sıcaklıkları sırasıyla 1152 °C, 1140 °C, 1135 °C sıcaklıklarına eşittir. [29]

Likidüs sıcaklığı (TL) ve düşük ötektik sıcaklığı (TE_{low}) değişkenlik gösteren iki parametredir. Likidüs sıcaklığı aktif karbon eşdeğerinden etkilenmesine karşın düşük ötektik sıcaklığı aynı kimyasal kompozisyona sahip malzemelerin çekirdeklenme pratiğinden ve soğuma hızından etkilenebilmektedir (Şekil 4.15) [29,30].

Küresel grafitli dökme demir uygulamasında önemli olan doğru ötektik noktada veya ötektik noktaya yakın bir yerde dökmektir. Ancak tanımlanan bu doğru ötektik nokta sabit olan değer değildir. Kimyasal kompozisyon ayarlanabilse bile aşılama ve soğuma hızları bu noktanın bulunmasını zorlaştırmaktadır. Aktif karbon eşdeğerinin modül karşısında nasıl değiştiği Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Aktif karbon eşdeğerinin soğuma zamanı karşısındaki değişimleri

Dökümcüler bu değişken parametreleri göz önüne alarak bazı metotlar ortaya koymuşlardır. Termal modülü düşük olan yani ince kesitli dökümlerde Şekil 4.16 da görüldüğü üzere aktif karbon eşdeğerinin düştüğü ve bu sapmayı dengelemek için %4.3 ten daha düşük karbon eşdeğeri ayarlanarak dökülmesi gerektiği belirtilmiştir. Kalın kesitli dökümlerde ise % 4.3 ten daha yüksek karbon eşdeğeri ayarlanarak dökülmesi gerekmektedir. Bu uygulamalarla doğru ötektiğe en yakın kompozisyonda döküm gerçekleştirilebilmektedir [29,30].

4.8. Tersine Beyaz Katılma

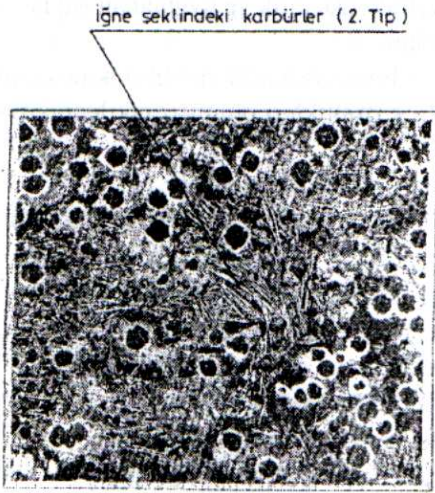
Döküm parçasının termal modülü yüksek olduğu yerde yani katılma en son bölgede karbür oluşumu olarak gözlenen bu şaşırtıcı olgu, faz sınırı teorisi ile kolayca açıklanabilmektedir. Faz sınırı teorisine göre grafit kristalizasyonu ancak bir faz sınırının mevcut olması ile vuku bulmaktadır. Bu faz sınırı, ince gaz boşlukları, çatlaklıklar ve inkluzyonlardır. Bu faz sınırı mevcut değilse, kristalleşme karbür olarak meydana gelmektedir. Böylece pratik olarak gözlenen birçok olgunun açıklanması da mümkün olmaktadır.

Tersine beyaz katılamada, küreselleşme ve aşılama sonrası demir eriyik oksijen miktarı az ise katılma dıştan içe doğru stabil sisteme göre olmakta, parça özünde artık oksijen miktarı azaldığından, bu bölgelerde karbürler meydana gelecektir [15].

Tersine beyaz katılma olgusunu azaltıcı tedbirler olarak şu 3 etken yazılabilir.

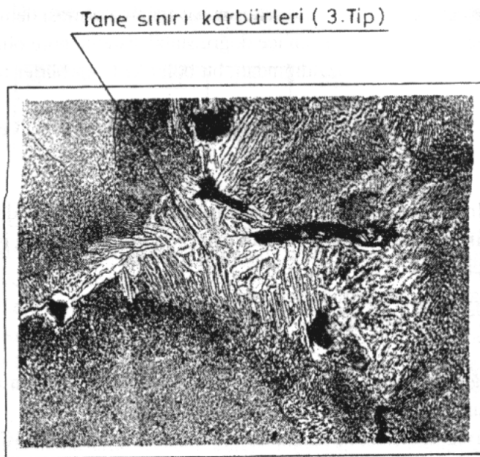
1. Eriyiğin oksijen miktarının artırılması, bunun için $\text{SiO}_2\text{-C}$ denge durumu sıcaklığı üzerinde uzun süre eriyiğin tutulması ve yine uzun ısıtma işlemlerinden kaçınılması gerekir.
2. Optimal küreselleştirme işleminin yapılması.
3. Yeterli bir düzeyde aşılama yapılması.

Parça soğuma nedeniyle metalürjik faktörlerin kontrol altına alınamaması genelde karbür oluşumunu sağlayan ana etkenlerdir. Birbirleriyle kümeleşmiş adacıklar şeklindeki karbürler (Fe_3C), 1. tip karbürler olarak adlandırılırlar. 2. tip karbürler mikroskop altında uzun ince iğneler şeklinde görülür. Meydana geliş nedenleri yüksek miktarlarda küreselleştirici (Magnezyum) elementlerin eriyikte var olmasıdır (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Tipik bir tersine beyaz katılaşma ve 2. tip iğne şeklindeki karbürler 25 X

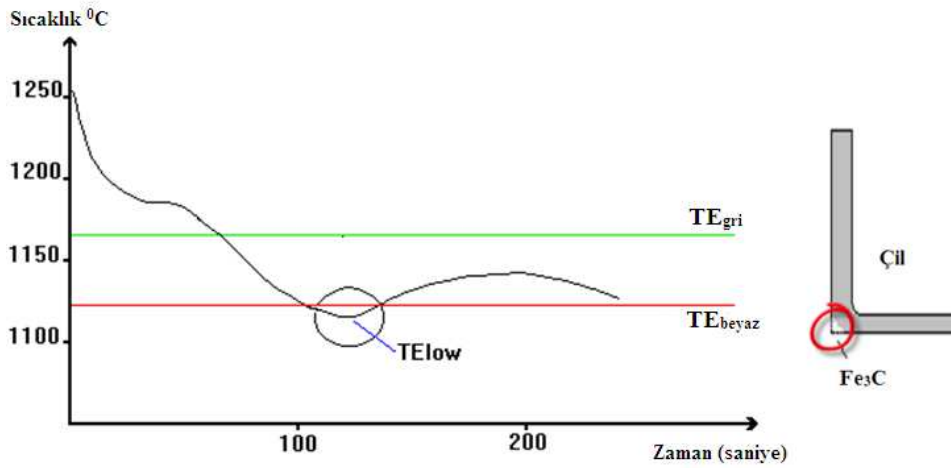
Et kalınlığı fazla olan düktil dökme demir parçalarında, mangan, krom, vanadyum ve molibden gibi elementlerin miktarları yüksek olduğunda, özellikle tane sınırlarında 3. tip karbürler gözlenir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. Yüksek Mn-miktarı ve birikimi nedenli tane sınırı karbürler. 500 X

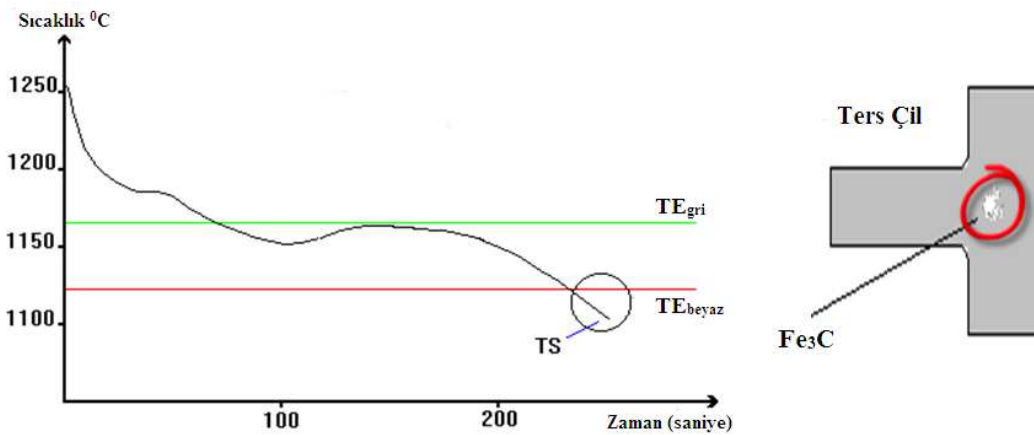
Bilinen diğer bir husus düktil dökme demirlerde kükürt miktarının küreselleştirme öncesi asgari % 0,004 olarak alınması zorunluluğudur. Bu değer in altında karbür oluşumu artmaktadır. Kuvvetli bazik cüruf altında kükürtsüzleştirme sonrası görünen karbürlerin nedeni olarak demirdeki Ca ve Al miktarlarının etkili olabileceği varsayılmaktadır. Karbürlerin mevcut olması, östenitik düktil dökme demirler hariç, mukavemet ve özellikle süneklilik özellikleri olumsuz etkilendiğinden istenmez [15].

Soğuma eğrileri incelendiğinde beyaz ötektik bize çil oluşumu hakkında bize bilgi verir. Gerek çil olsun gerek ters çil olsun soğuma rejiminden oluşup oluşmayacağını saptamak mümkündür. Tellürlü kaplarla elde edilen demir karbür ötektiği, çil oluşma olasılığını bulmayı mümkün kılar.



Şekil 4.19. Çil eğiliminin soğuma eğrisi üzerinde gösterilmesi

Şekil 4.19'da gösterildiği gibi düşük ötektik sıcaklığının beyaz ötektik sıcaklığının (metastabil) aşağısında olması çil eğilimini arttırmaktadır. Katılma hızının yüksek olduğu bu soğuma eğrisinden anlaşılabilir. Çil riskinin ortadan kaldırılması için soğuma eğrisinin beyaz ötektik çizginin üstüne taşınması gerekir. Bunun için kimyasal kompozisyon kontrol edilebilir, aşılama işlemi uygulanabilir ve keskin köşelerden kaçınılabilir.



Şekil 4.20 Ters çil eğiliminin soğuma eğrisi üzerinde gösterilişi

Ters çil eğilimi faz sınırı teorisiyle açıklanmaktadır. Katılaşmanın bittiği nokta yani solidüs sıcaklığı bize ters çil eğilimi hakkında bize bilgi vermektedir. Şekil 4.20'ye bakıldığında solidüs sıcaklığının, beyaz ötektik sıcaklığının aşağısında yer almaktadır. Bu durum ters çil eğilimi arttırmaktadır. Aynı zamanda solidüs sıcaklığının beyaz ötektik sıcaklığı arasındaki fark 25 dereceden fazla oluşu dışarıdan müdahale edilmesi gerektiği anlamına gelmektedir. Bu durum demir hurda atılarak oksijen miktarının artırılması, optimum küreleştirme ve aşılama ile giderilebilir.

4.9. Termal Analizde Sıvı Besleme ve Grafit Genleşmesi

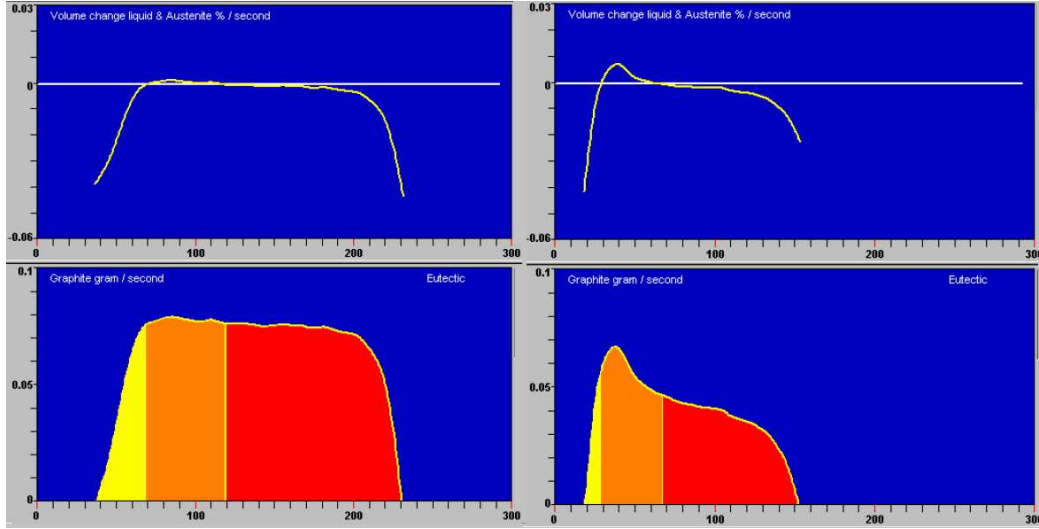
Dökme demirlerin, çeliklerden çok farklı soğuma karakteristiği olmasının nedeni kimyasal kompozisyonunda yüksek oranda karbon ihtiva etmesidir. Karbon ve sıvı metalin arasındaki yoğunluk farkı grafit genleşmesini doğurmaktadır.

Grafitin yoğunluğu 2.2 gr/cm^3 olması ve sıvı metalin yoğunluğu 6.9 gr/cm^3 civarında olması arasındaki yoğunluk farkını gözler önüne sermektedir. Bu durum göz önüne alındığında çökelmiş grafitin, yoğunluğuna ulaşması için hacmini büyütmesi kaçınılmazdır. Ötektik katılaşma başladığında mikro çekintiyi önlemek için kullanılan tek mekanizma budur.

Termal analiz, numunenin soğumada oluşan sıcaklık değişimlerini göstermesinin yanında grafit çökme miktarını katılaşma boyunca saniye saniye aktarabilmektedir. Bu durum ortaya çıkan ısı ile açıklanabilmektedir. Grafit çökmesi oluşmasında 875 cal/gr enerji açığa çıkmasına karşın sıvı demirin 1140°C de 1°C yükselmesi için gerekli ısı $0.2 \text{ cal/gram}^\circ\text{C}$ dir. Numunenin (Quik cup) yaklaşık 350gr olduğu düşünüldüğünde soğuma sırasında oluşan sıcaklık düşüşü, alt soğuma değerleri ve ısı hesaplamaları göz önüne alınarak ekrana yansıtılmaktadır. ATAS (Adaptive Thermal Analysis System) kaybedilen veya kazanılan ısıyı saniye saniye tahmin edebilmekte ve yapıdaki büzülme ve genleşme yüzdelerini ortaya koyabilmektedir

Sıvı beslemesi irdelendiğinde, döküm sıcaklığı (PT) ile düşük ötektik sıcaklığı (TE_{low}) arasında beslenme için gerekli sıvı, metal yolluktan veya besleyici sisteminden sağlanır. Düşük ötektik sıcaklığından (TE_{low}) sonra dışsal besleme

kalkar. Sıvı metal ötektik soğumaya evresine gelmiştir ve ötektik grafitleri meydana gelmeye başlamıştır. Bu noktadan sonra yukarıda bahsedildiği gibi sıvı metali dışarıdan beslemek imkânsızdır. Çünkü sıvı içinde yüksek miktarda katı faz mevcuttur ve sıvı akışı durmuştur.



Şekil 4.21. Sürekli (sol) ve süreksiz (sağ) grafit genleşmesinin gösterilişi

İdeal olan hacim genişlemesi, östenit büzülmesine eşit olmalı ve mikro çekintiyi elimine edebilmelidir. Bunun için Şekil 4.21’de görüldüğü gibi yeterli ötektik grafit olması, sıvı faz büzülmesi gösteren S1 evresinin mümkün olduğunca küçük olması ve solidüs sıcaklığına gelene kadar (S2 ve S3 periyotları) grafit genleşmesinin devam etmesi gerekir.

Oluşan grafitten doğan hacim genişmesi yukarıda bahsedilen östenit büzülmesine eşit olmayıp fazla miktarda grafit çökelirse rekolasens değeri yüksek olur. Bunun sonucunda rijit olmayan kum çeperlerini genişletir ve besleyici tarafından karşılanamayacak kalıp boşluğu ortaya çıkar. Bu durum makro ölçekli çekintiye sebep olmaktadır. Ötektik grafit miktarının tam tersine düşük olması durumunda; grafit genleşmesinin östenit büzülmesini karşılamadığından mikro çekintiyi sebep olacaktır.

Soğuma eğrisinde primer östenit yüzdesi S1 alanın S1, S2 ve S3 alanına oranı ile bulunur. Formül 4.18’de gösterilmiştir.

$$\text{Primer Östenit \%} = S1 / (S1+S2+S3)$$

(4.18)

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada farklı ortam koşullarında üretilen 14 numune incelenmiştir. Kaliteli dökme demir üretimi için gerekli olan, ülkemizde yaygın kullanımı bulunmayan termal analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

Deneyler 4 dökümden oluşmaktadır. Uygulanan ortam koşullarının ilkinde GG25 normundaki lamel grafitli dökme demir kullanılmıştır. Bu yapıdaki dökme demirin aşılama miktarındaki değişimin soğuma eğrisine etkisine bakılmış ve optik mikroskop görüntüleriyle grafit yapısı incelenmiştir. İkinci ortam koşullarında GGG60 normundaki küresel grafitli dökme demir kullanılmıştır. İki farklı küreselleştirme uygulamasında titanyum ilavesinin soğuma eğrisine etkisi ve grafit yapısındaki değişim incelenmiştir. Üçüncü ortam koşullarında GGG50 normundaki küresel grafitli dökme demir kullanılmıştır. Numune kabına uygulanan dış etkilerle termal modül değiştirilmiş, ortaya çıkan soğuma eğrisi değerlendirilmiştir. Dördüncü ortamda GGG70 normunda küresel grafitli dökme demir kullanılmıştır. İlave edilen kükürt (S) ve titanyum (Ti) ilavesinin soğuma eğrisine etkisi incelenmiştir.

5.1. Deneysel Numuneler

Deneysel numunelerin hazırlanması ve verilerin alınmasında dört farklı döküm üretimi gerçekleştirilmiştir.

5.1.1. Bir nolu dökümün hazırlanması

Bir nolu deneysel çalışma İntuğ Döküm Sanayi ve Ticaret Limited şirketinde yapılmıştır. Ergitme işlemi 350KW Eges marka yüksek frekanslı 500kg'lık devirmeli indüksiyon ocağında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan malzemelerin oranları Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Bir nolu dökümün sarj malzemeleri ve yüzdeleri

	Miktarları (kg)	Yüzde oranı (%)
H2 normal piki	170	30
Pik Hurda	200	36
Döngü Malzemesi	180	33
Karbon (%99)	1	0,18
Silis (FeSi %75)	2	0,36

Üretim için hazırlanan hatalı parça ve yolluk ve besleyicilerin tekrar üretime katılmasıyla % 33 oranında döngü malzemesi kullanılmıştır. Ergiyik sıvı metal 1450 °C ye ısıtılmış ve curuf yapıcı ve temizleyici malzeme (perlit) kullanılarak curuf oluşumu sağlanmış, numunelerin içine curuf girmesi önlenmiştir.

Kullanılan H2 pikinin kimyasal kompozisyonu Tablo 5.5'te yer almaktadır. Döküm sıcaklığı özel daldırılmalı termokupul yardımıyla ölçülmüştür. Numune kepçesi kullanılarak ocaktan alınan sıvı metal quik kaplara 1380 °C de dökülmüştür.

Aşılama malzemesi olarak Ultraseed FeSi %75 kullanılmıştır. Aşılama işlemi quik kabın içerisinde gerçekleşmiştir. Aşılama işlemi tane boyut dağılımı ve kimyasal analizi Tablo 5.2'de gösterilmiştir [33].

Tablo 5.2. Aşılama işleminde kullanılan Ultraseed aşılama malzemesinin tane boyut dağılımı ve malzemenin kimyasal bileşimi

	Kimyasal bileşim				Tane Boyutu						
	Si	Ca	Ba	Al	3-5mm	+2,5mm	+2mm	+1mm	+0,7mm	+0,5mm	-0,5mm
Min	72,0	1,0	2,0	0,8	0,0	-	20,0	20,0	-	0,0	-
Max	77,0	2,0	3,0	1,5	10,0	-	60,0	60,0	-	20,0	-

Farklı Ultraseed miktarlarıyla aşılama işlemleri yapılmıştır. Toplamda 4 numune alınan deneyde 1. Numunede aşılama işlemi uygulanmamıştır, 2. Numuneye 0.95gr FeSi ilavesi sonucu %0,2 aşılama uygulanmıştır. 3. Numunede 2,37gr FeSi ilavesiyle %0,5 aşılama uygulanmıştır. 4. Numunede 9,5gr FeSi ilavesi yapılarak %2 aşılama işlemi gerçekleştirilmiştir. Numune ve aşılama miktarları Tablo 5.3'teki gibidir.

Tablo 5.3. Birinci dökümde elde edilen numunelerin aşılmalı miktarları ve yüzdeleri

	Aşılmalı Miktarı (gr)	Aşılama Yüzdesi (%)
Numune 1.1	-	-
Numune 1.2	0,95	0,2
Numune 1.3	2,37	0,5
Numune 1.4	9,5	2

5.1.2. İki nolu dökümün hazırlanması

İki nolu deneysel çalışma İntuğ Döküm Sanayi ve Ticaret Limited şirketinde yapılmıştır. Ergitme işlemi 350KW Eges marka yüksek frekanslı 500kg'lık devirmeli indüksiyon ocağında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan malzemelerin oranları Tablo 5.4'de gösterilmiştir.

Tablo 5.4. İkinci dökümün sarj malzemeleri ve yüzdeleri

	Miktarları (kg)	Yüzde oranı (%)
Sorel Piki	100	18,38
Çelik Hurda	360	66,17
Döngü Malzemesi	50	9,19
Karbon (%99)	14,3	2,62
Silis (FeSi %75)	7,78	1,4
Magnezyum (FeSiMg)	12	2,2

Sıvı metalin aşılama işlemine girmeden önceki Si içeriği %1.4 tür. Sıvı metal 1600 °C kadar ısıtılmış perlit ile sıvı metalin curufu temizlenmiştir. Dökümde kullanılan sorel pik ve çelik hurdanın kimyasal analizi Tablo 5.5 ve Tablo 5.6'da gösterilmiştir.

Tablo 5.5. Kullanılan Sorel ve H2 piklerinin kimyasal analizi

Sfero Sorel Piki					H2 normal Piki				
%C	%Si	%Mn	%S	%P	%C	%Si	%Mn	%S	%P
4,25	0,28	0,016	0,01	0,02	3,5-4,5	1,4-1,7	0,6-1,2	max 0,06	max 0,2

Tablo 5.6. Sfero dökümünde kullanılan çelik hurdanın kimyasal analizi

Çelik Hurda				
%C	%Si	%Mn	%S	%P
0,15	0,1	0,4	0,08	0,05

Küreselleştirme işlemi verimi %45 olarak belirlenen sandviç tipi yöntemle gerçekleştirilmiştir. Ocak içindeki sıvı metal 2 ye bölünerek 2 kez küreselleştirme işlemi uygulanmıştır. Her küreselleştirme işleminde 2 adet olmak üzere toplamda 4

adet numune alınmıştır. Aşılama uygulamaları quik kap içinde gerçekleştirilmiştir. Numuneler aşılama ve ilave edilen titanyum miktarları Tablo 5.7’de gösterilmektedir.

Tablo 5.7. İkinci dökümde elde edilen numunelerin aşılama ve titanyum miktarları

		Aşılama Miktarı (gr)	Aşılama Yüzdesi (%)	Ti miktarı (gr)	Ti yüzdesi (%)
1. Reaksiyon	2.1 Numune	0,7	2,5	-	-
	2.2 Numune	0,7	2,5	0,79	0,219
2. Reaksiyon	2.3 Numune	1,16	2,6	-	
	2.4 Numune	1,16	2,6	0,428	0,118

Tablo 5.8. İki nolu dökümde üretilen numunelerin kimyasal analizi

2. Nolu Döküm Kimyasal Analizi								
	%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cu	%Ti	%Mg
2.1 Numune	3,63	2,56	0,15	0,002	0,05	0,48	0,20	0,048
2.2 Numune	3,58	2,51	0,16	0,003	0,06	0,45	0,19	0,048
2.3 Numune	3,50	2,71	0,15	0,002	0,08	0,46	0,002	0,042
2.4 Numune	3,48	2,69	0,15	0,004	0,05	0,49	0,12	0,041

5.1.3. Üç nolu dökümün hazırlanması

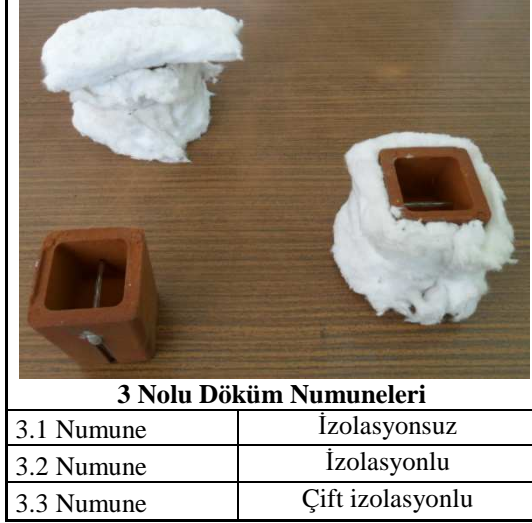
Üç nolu deneysel çalışma Kırtek Döküm Ticaret ve Sanayi Limited şirketinde gerçekleştirilmiştir. Ergitme işlemi 350KW 5M marka yüksek frekanslı 750kg’lık devirmeli indüksiyon ocağında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan malzemelerin oranları Tablo 5.9’da gösterilmiştir.

Tablo 5.9. Üçüncü dökümün sarj malzemeleri ve yüzdeleri

	Miktarları (kg)	Yüzde oranı (%)
Sorel Piki	400	53,333
Çelik Hurda	25	3,3333
Döngü Malzemesi	300	40
Karbon (%99)	1,5	0,2
Silis (FeSi %75)	4,5	0,6
Magnezyum (FeSiMg)	11	1,4667
Bakır	1,5	0,2

Sıvı metal 1600 °C kadar ısıtılmış perlit ile sıvı metalin curufu temizlenmiştir. Küreselleştirme işlemi verimi %45 olarak belirlenen sandviç tipi yöntemle

gerçekleştirilmiştir. Ocak içindeki sıvı metal 3'e bölünerek 3 kez küreselleştirme işlemi uygulanmıştır. Dökümde toplam 3 adet numune alınmıştır. Şekil 5.1'de görüldüğü üzere alınacak numunelerin biri hariç diğer ikisine termal modülünü yükseltmek için cam yünü sarılmış olup yalıtım yapılanlardan birinin üstü kapatılmıştır. Üç nolu dökümün kimyasal analizi Tablo 5.10'da yer almaktadır.



Şekil 5.1. Üç nolu dökümde kullanılan quik kapların gösterilişi

Tablo 5.10. Üç nolu dökümün kimyasal analizi

3. Nolu Döküm Kimyasal Analzi						
%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cu	%Mg
3,54	2,35	0,085	0,02	0,07	0,27	0,051

5.1.4. Dört nolu dökümün hazırlanması

Dört nolu deneysel çalışma Kırtek Döküm Ticaret ve Sanayi Limited şirketinde gerçekleştirilmiştir. Ergitme işlemi 350KW 5M marka yüksek frekanslı 750kg'lık devirmeli indüksiyon ocağında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan malzemelerin oranları Tablo 5.11'de gösterilmiştir.

Tablo 5.11. Dört nolu dökümün sarj malzemeleri ve yüzdeleri

	Miktarları (kg)	Yüzde oran (%)
Sorel Piki	350	46,66
Çelik Hurda	50	6,66
Döngü Malzemesi	350	46,66
Karbon (%99)	2	0,26
Silis (FeSi %75)	7	0,93
Magnezyum (FeSiMg)	12	1,6
Bakır	3,5	0,46
Superseed(FeSi %75)	1,4	0,18

Dört nolu dökümden 3 adet numune alınmıştır. Alınan quik kap numunelerine bir tanesine %45 kükürt içeren FeS₂ cevherinden 1,2gr kükürt ilave edilmiş(4.2 numune) olup diğer bir quik kap numunesine %99 saflıkta 1,6 gr titanyum(4.3 numune) ilave edilmiştir. Alınan üçüncü quik kabın içerisine ilave yapılmamıştır(4.1 numune) ve kimyasal analizi Tablo 5.12'deki gibidir.

Tablo 5.12. Dört nolu dökümün kimyasal analizi

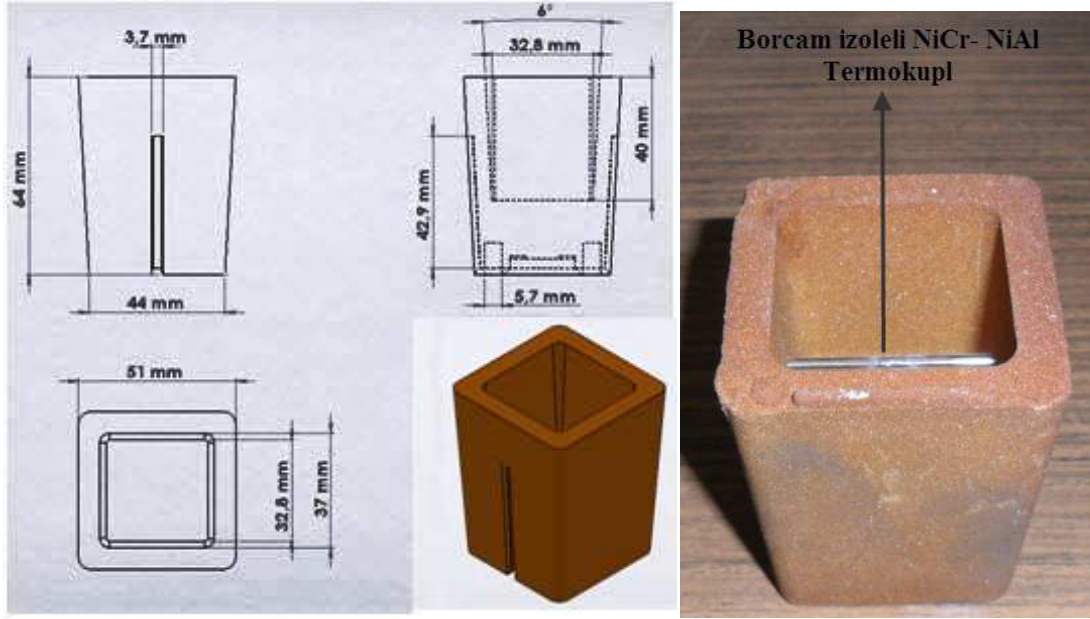
4 Nolu Döküm Kimyasal Analzi						
%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cu	%Mg
3,55	2,38	0,011	0,003	0,07	0,69	0,050

5.2. Deneyleerde Kullanılan Cihazlar

5.2.1. Termal analiz

Numuneler “Quik cup” adı verilen standart bir kaba dökülmüştür. Numune kaplarında, sıvı metalin doldurulacağı hazne yaklaşık olarak 364gr dökme demir alacak kapasitededir. Bu kapların üst yüzeyinden 19mm aşağısında bir cam boru içinde K tipi termokupl mevcuttur. K tipi termokupl nikel krom (%90 nikel, %10 krom) ve nikel alüminyum (%90 nikel %2 mangan %2 alüminyum %1 silisyum) çiftinden oluşmaktadır. 1350⁰C'ye kadar sorunsuz çalışabilmektedir [32].

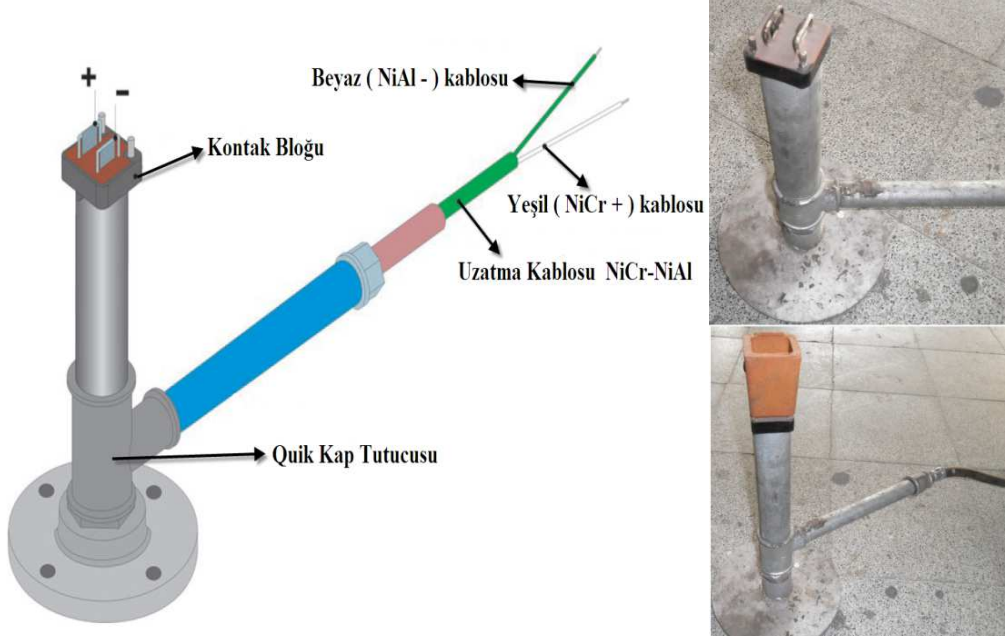
Termokupulun quik kap içindeki konumu önem arz etmektedir. Deneyleerde, quik kabın içinde bulunan sıvı metalin son katılaştığı yer (sıcak nokta) referans olarak kabul edilerek bu noktadan gelen datalar yorumlanmıştır. Uygulanan deneyleerde oluşabilecek sorunlara karşı quik kaplar gözle muayene edilmiştir. Şekil 5.2'de quik kapların çizimi ve fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 5.2. Quik kap çizimi ve fotoğrafının gösterilişi

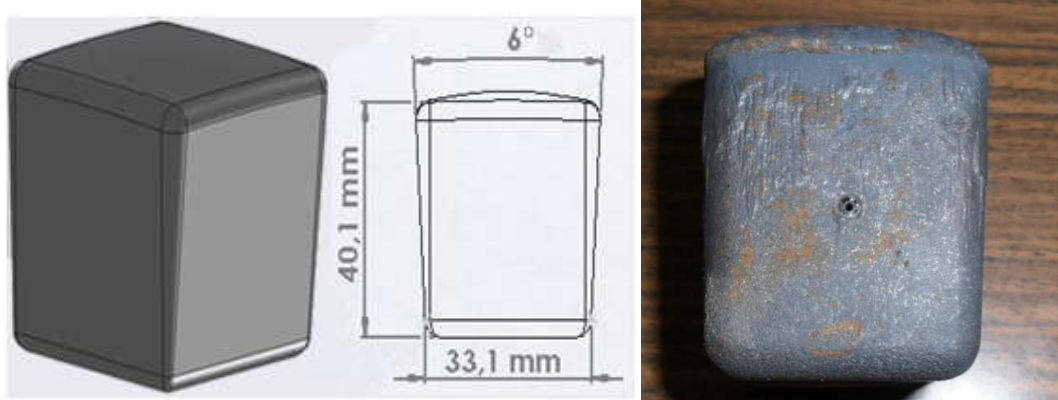
Deneylerde tellüriyum içeren ve tellüriyum içermeyen 2 çeşit quik kap kullanılmıştır. Sıvı metalin beyaz katılaşması şartlarının incelenmesi için tellürlü quik kap kullanılırken termal modülü yaklaşık 0.64cm olan sıvı metalin sıcaklık davranışı incelenmesi için tellürsüz quik kap kullanılmıştır.

Deneye başlamadan önce, oluşacak iletkenlik hatalarının önüne geçmek için oksitlenebilecek quik kapların yuvaları kalın zımpara ile zımparalanmıştır. Şekil 5.3 'te quik kap ve quik kap yuvaları görülmektedir.



Şekil 5.3. Quik Kap Tutucusunun gösterilişi

Quik kabın içerisine dökülmesi sonucu elde edilen numuneler soğuma dataları bitene kadar quik kap ayaklarından çıkartılmamıştır. Numunelerin hacimleri $47,547 \text{ cm}^3$ dir. Numune boydan boya konikliğe sahiptir. Ağırlığı yaklaşık olarak 356,6 gr civarındadır. Numune boyutları fotoğrafı Şekil 5.4'te gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Numune boyutları ve fotoğrafı

Termal analiz için kullanılan yazılım ve sıcaklık verilerini alan cihaz Şekil 5.5'te gösterilmektedir. Termal analiz yazılımı olarak Novacast şirketinin ATAS (Adaptive Thermal Analysis System) yazılımını kullanılmıştır.



Şekil 5.5. Atas cihazının gösterilişi

5.2.2. Kesme cihazı

Döküm parçaların kesimleri için Şekil 5.6'daki cihaz kullanılmıştır. Numunenin mümkün olabildiğince sıcak noktasına yakın yerden alınmaya çalışılmıştır. Yapının etkilenmemesi için sulu kesme yapılmıştır.



Şekil 5.6. Disk kesme cihazının gösterilişi

5.2.3. Zımparalama ve parlatma Cihazı

Kesilen numuneler sırasıyla 180-400-600-1000 ve 1200 meşh sırasını takip eden SiC zımpara kâğıdı ile sulu olarak zımparalanmıştır. Her bir zımparalama diskinde sadece önceki zımparalardan oluşan çizikleri gidermek için gerekli olan zaman kadar işleme tabi tutulmuştur. Parlatma işlemi alümina ile çuha üzerinde en ufak çizik kalmayacak şekilde parlatılmıştır. Kullanılan cihaz Şekil 5.7’de gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Metalografik parlatma cihazı

5.2.4. Optik mikroskop cihazı

Hazırlanan numuneler Şekil 5.8’de gözükten optik mikroskopta çekilmiş olup bağlı olduğu PC de Clemex Vision yazılımıyla image analiz sonuçları elde edilmiştir. Her numuneden 50X ve 100X büyütmede mikroyapı fotoğrafları alınmıştır.



Şekil 5.8. Optik mikroskopun görüntüsü

5.2.5. Sertlik cihazı

Numunelerin sertliklerinin ölçümünde Şekil 5.9'da gösterilen sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Numunelere Brinel Sertlik testi uygulanmıştır. Sertlik değerleri Brinell sertlik standartlarına uygun 2.5 mm bilya ucu ve 187.5kg yük ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sertliklerinde bir yanılığa düşmemek için en az 6 farklı noktadan alınmıştır. Kaydedilen değerlerin ortalaması kullanılmıştır.



Şekil 5.9. Sertlik test cihazının görüntüsü

BÖLÜM 6. DENEYSEL VERİLER VE MATEMATİKSEL YAKLAŞIM

6.1 Dökümlerde Elde Edilen Termal Analiz Verileri

6.1.1. Bir nolu dökümde elde edilen sonuçlar

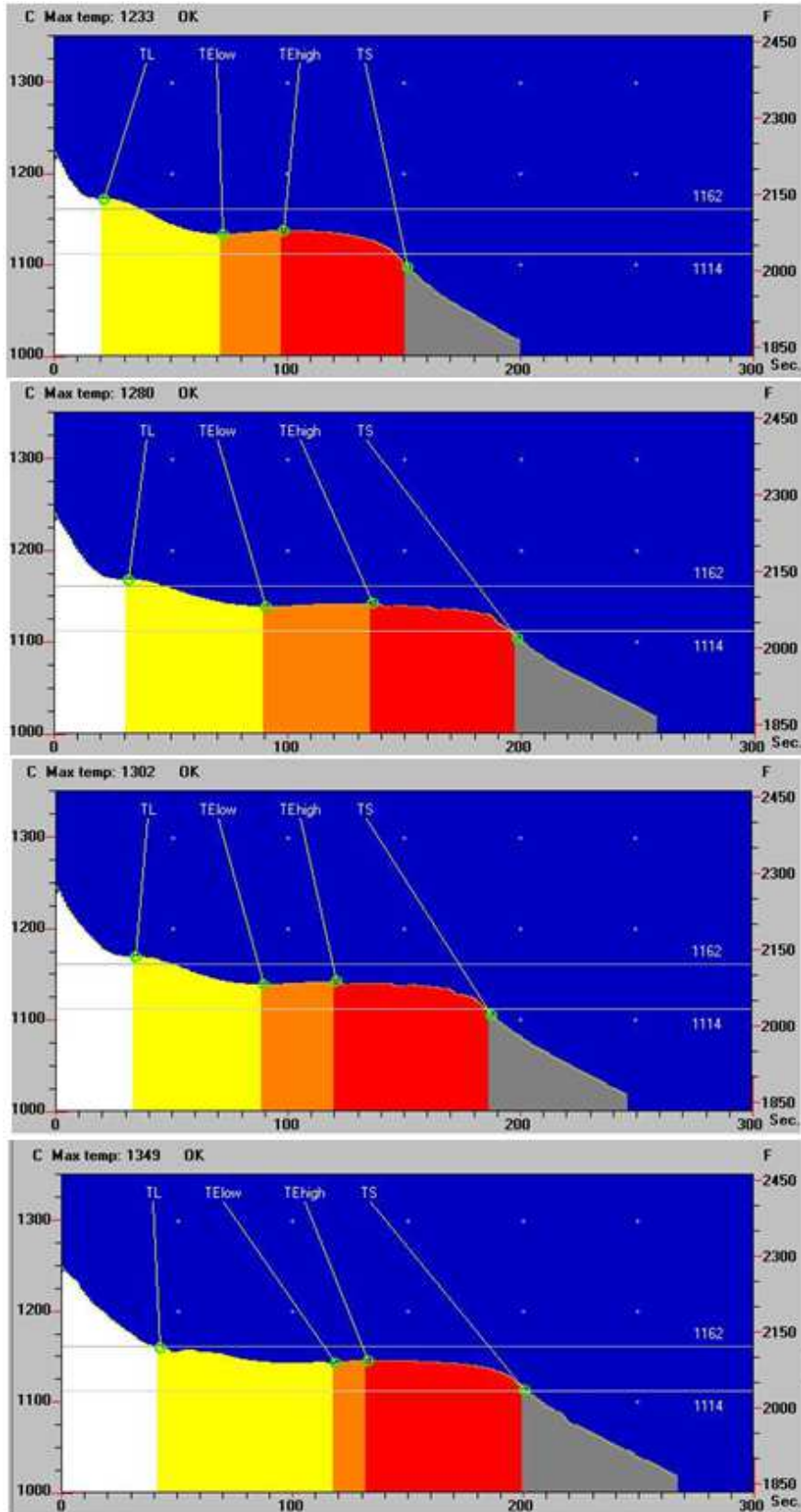
Bir nolu dökümde üretilen GG25 normundaki lamel grafitli dökme demirin termal analizinden elde edilen sayısal değerler Tablo 6.1'de soğuma eğrileri Şekil 6.1 (a,b,c,d)'de ve soğuma hızı eğrileri Şekil 6.2 (a,b,c,d)'de verilmiştir.

Tablo 6.1. Bir nolu dökümde elde edilen termal analiz dataları

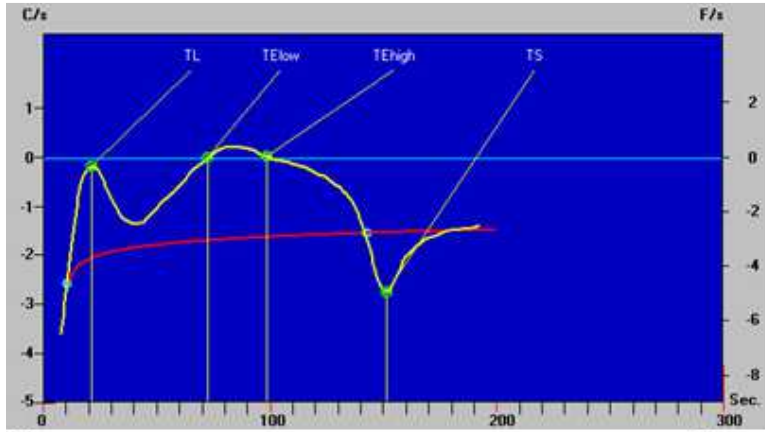
Numune	TL	Telow	TEhigh	R	Dif TL-Telow	TS	GRF1	GRF2
1.1	1173,0	1134,50	1138,8	4,30	38,50	1099,80	69	51
1.2	1169,1	1139,70	1143,7	4,00	29,40	1105,10	62	67
1.3	1170,0	1140,00	1143,5	3,50	30,00	1107,30	74	53
1.4	1160,8	1143,00	1147,0	3,50	17,20	1114,10	95	66

Numune	S1	S2	S3	Ox. Factor	Undercooling	dT/dETS	ACEL	C
1.1	40	20	40	33	26,10	-2,72	4,01	3,40
1.2	36	28	36	44	20,80	-2,32	4,05	3,46
1.3	36	21	43	33	20,60	-2,45	4,04	3,42
1.4	48	9	43	17	17,00	-2,14	4,12	3,37

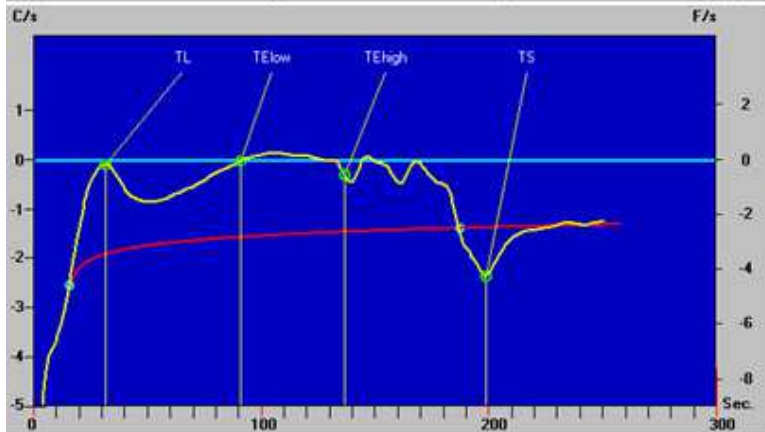
Numune	UTS	Grafite	Proeutectic	Eutectic 1	Eutectic 2
1.1	225,00	4,60	30,80	33,70	35,50
1.2	218,00	5,60	33,70	37,50	28,80
1.3	219,00	5,40	33,30	28,60	38,10
1.4	202,00	5,20	51,90	12,60	35,50

a)
Numune 1.1b)
Numune 1.2c)
Numune 1.3d)
Numune 1.4

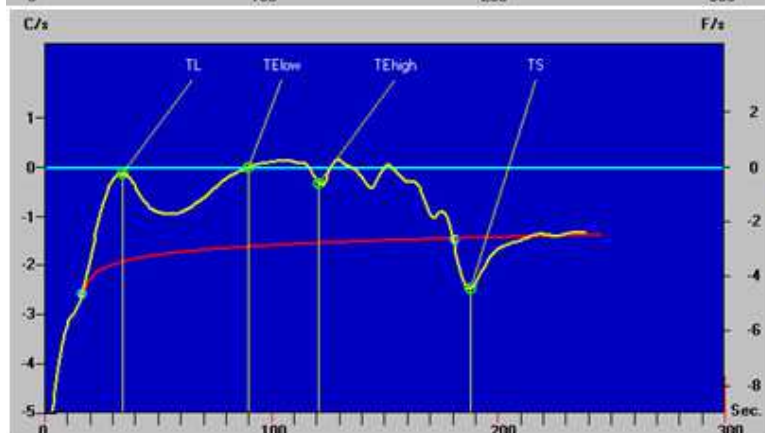
Şekil 6.1. Bir nolu dökümde elde edilen soğuma eğrileri



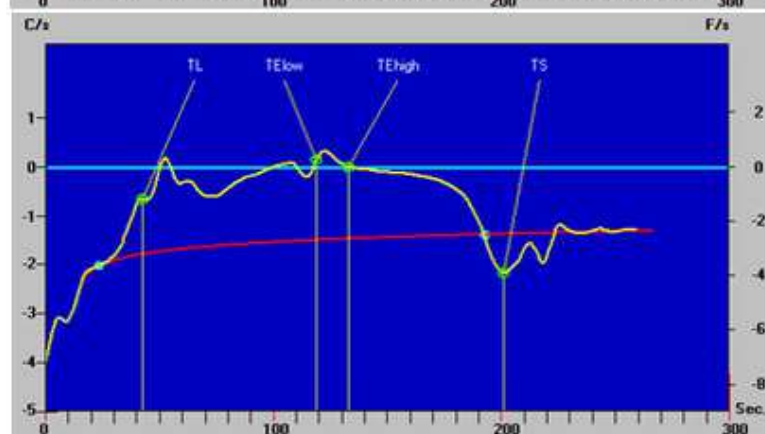
a)
Numune 1.1



b)
Numune 1.2



c)
Numune 1.3



d)
Numune 1.4

Şekil 6.2. Bir nolu dökümde elde edilen soğuma hızı eğrileri

6.1.2. İki nolu dökümde elde edilen sonuçlar

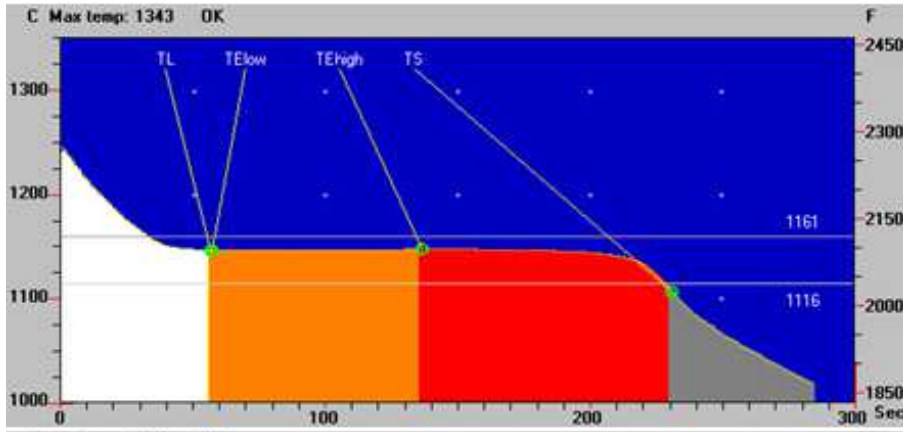
İki nolu dökümde üretilen GGG60 normundaki küresel grafitli dökme demirin termal analizinden elde edilen sayısal değerler Tablo 6.2’de soğuma eğrileri Şekil 6.3 (a,b,c,d)’de ve soğuma hızı eğrileri Şekil 6.4 (a,b,c,d)’de verilmiştir.

Tablo 6.2. İki nolu dökümde elde edilen termal analiz dataları

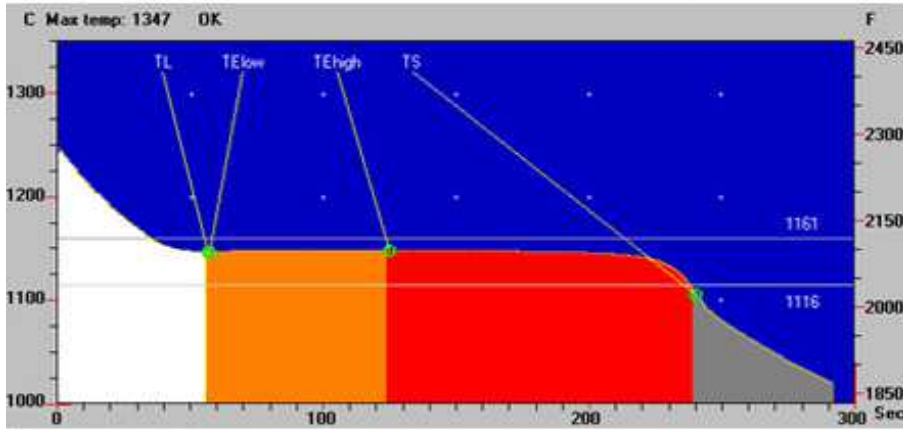
Numune	TL	Telow	TEhigh	R	Dif TL-Telow	TS	GRF1	GRF2
2.1	1148,3	1148,3	1148,7	0,4	0,00	1107,9	63	43
2.2	1148,0	1148,0	1149,4	1,4	0,00	1109,1	75	33
2.3	1154,9	1147,9	1150,0	2,1	7,00	1104,7	75	53
2.4	1154,8	1146,0	1148,8	2,8	8,80	1100,8	71	77

Numune	S1	S2	S3	Ox. Factor	Undercooling	dT/dETS	ACEL	C
2.1	1	45	54	45	13,70	-2,99	4,25-4,35	3,63
2.2	1	37	62	37	14,00	-3,39	4,25-4,35	3,60
2.3	23	26	51	34	14,10	-2,74	4,17	3,50
2.4	22	26	52	33	16,00	-2,33	4,17	3,50

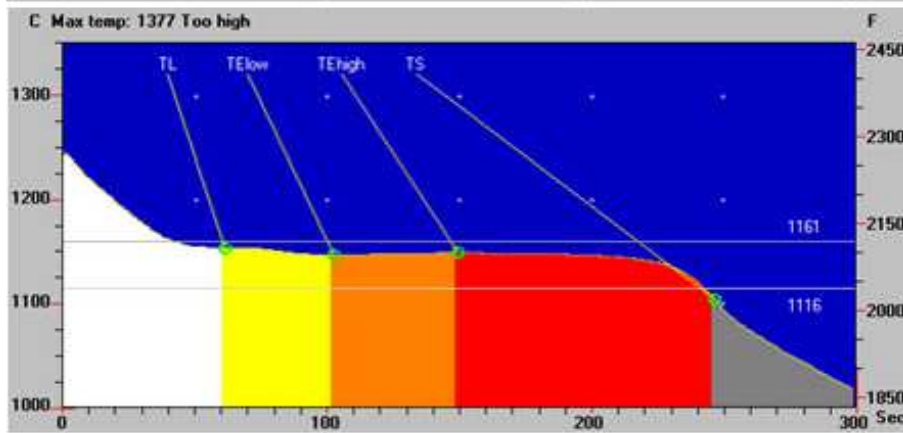
Numune	UTS	Grafite	Proeutectic	Eutectic 1	Eutectic 2
2.1	NA	6,20	12,70	47,50	39,80
2.2	NA	6,20	10,40	40,00	49,60
2.3	NA	5,80	31,20	29,00	39,80
2.4	NA	5,80	29,70	30,20	40,00



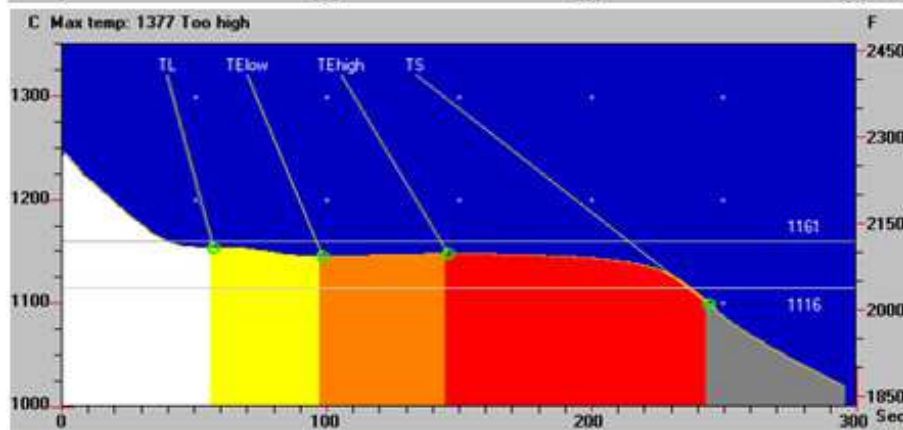
a)
Numune 2.1



b)
Numune 2.2

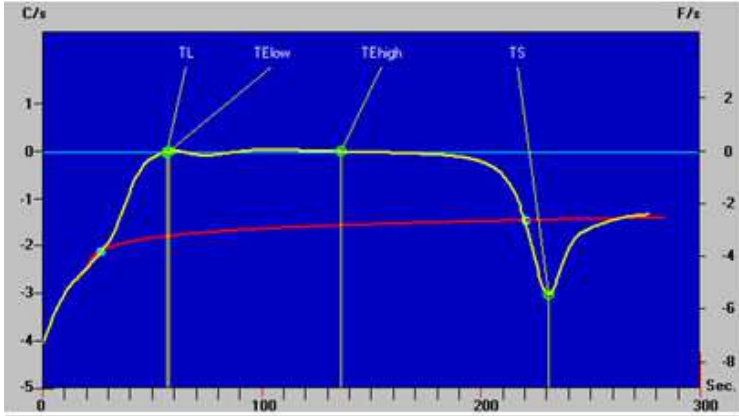


c)
Numune 2.3

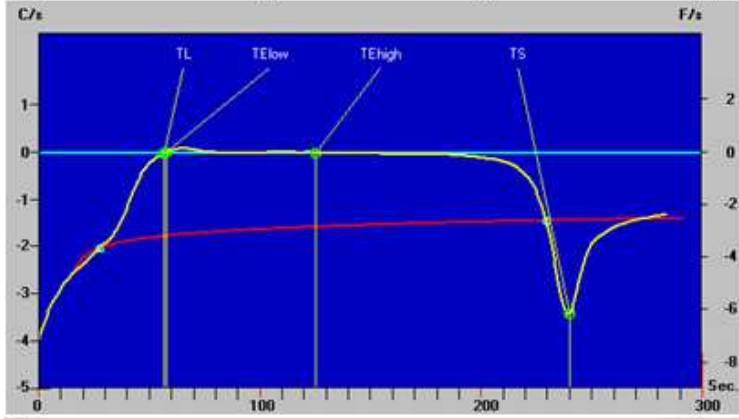


d)
Numune 2.4

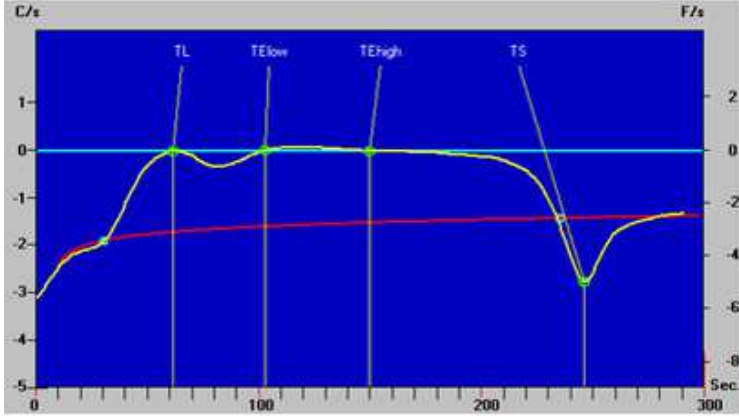
Şekil 6.3. İki nolu dökümde elde edilen soğuma eğrileri



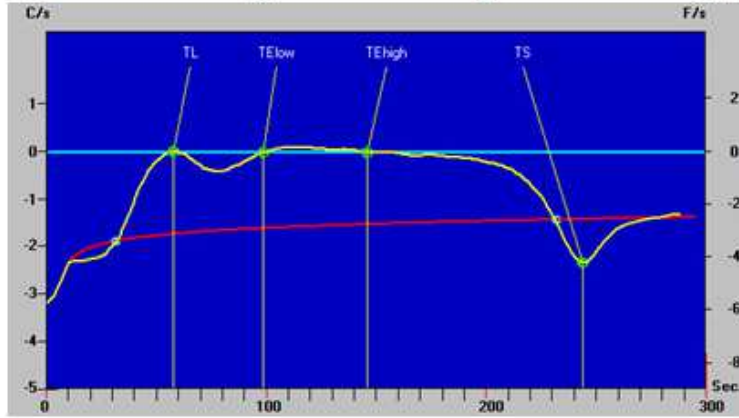
a)
Numune 2.1



b)
Numune 2.2



c)
Numune 2.3



d)
Numune 2.4

Şekil 6.4. İki nolu dökümde elde edilen soğuma hızı eğrileri

6.1.3. Üç nolu dökümde elde edilen sonuçlar

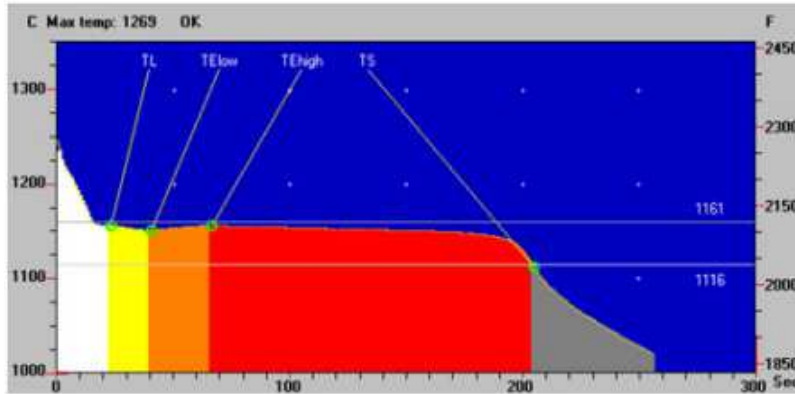
Üç nolu dökümde üretilen GGG50 normundaki küresel grafitli dökme demirin termal analizinden elde edilen sayısal değerler Tablo 6.3’de soğuma eğrileri Şekil 6.5 (a,b) de ve soğuma hızı eğrileri Şekil 6.6 (a,b)’de verilmiştir

Tablo 6.3. Üç nolu dökümde elde edilen termal analiz dataları

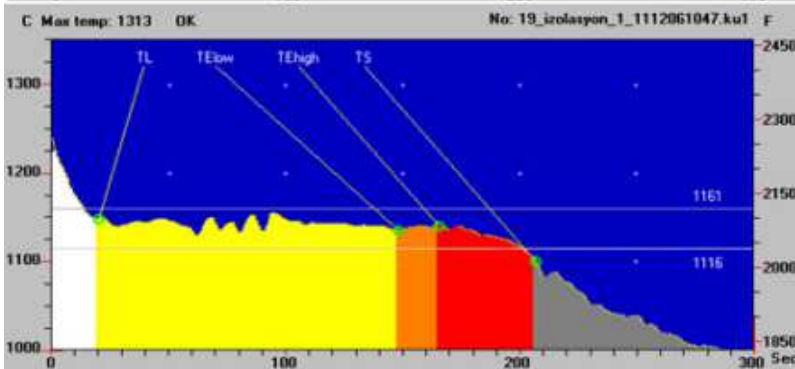
Numune	TL	Telow	TEhigh	R	Dif TL-Telow	TS	GRF1	GRF2
3.1	1156,8	1152,2	1156,7	4,5	4,60	1114,3	101	32
3.2	1149,2	1136,3	1141,7	5,5	12,90	1102,9	63	27

Numune	S1	S2	S3	Ox. Factor	Undercooling	dT/dETS	ACEL	C
3.1	10	15	75	17	9,10	-3,56	4,15	3,48
3.2	68	10	22	31	25,00	-3,55	4,22	3,36

Numune	UTS	Grafite	Proeutectic	Eutectic 1	Eutectic 2
3.1	NA	5,70	12,90	18,90	68,20
3.2	NA	0,90	51,80	38,70	9,60

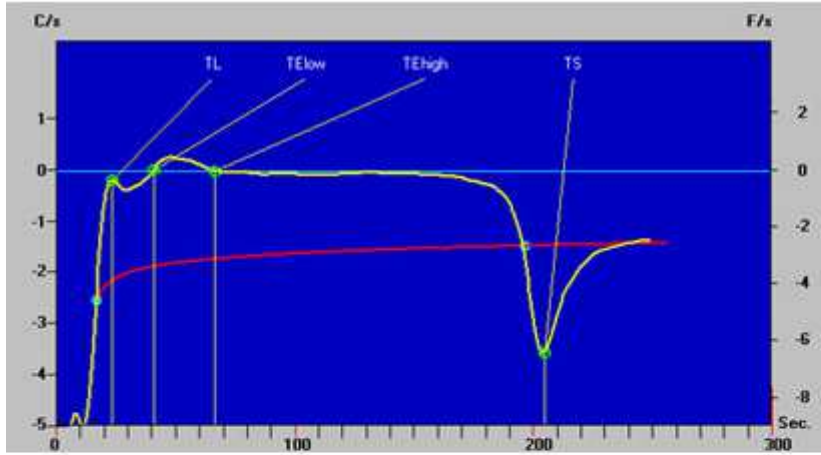


a)
Numune 3.1

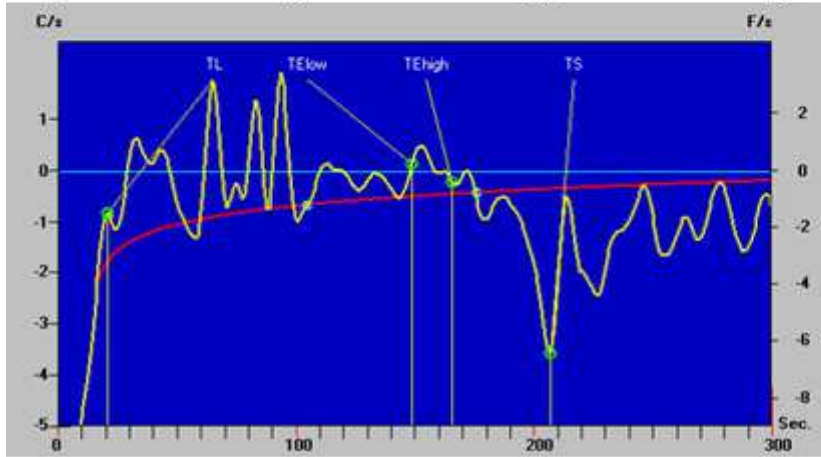


b)
Numune 3.2

Şekil 6.5. Üç nolu dökümde elde edilen soğuma eğrileri



a)
Numune 3.1



b)
Numune 3.2

Şekil 6.6. Üç nolu dökümde elde edilen soğuma hızı eğrileri

6.1.4. Dört nolu dökümde elde edilen sonuçlar

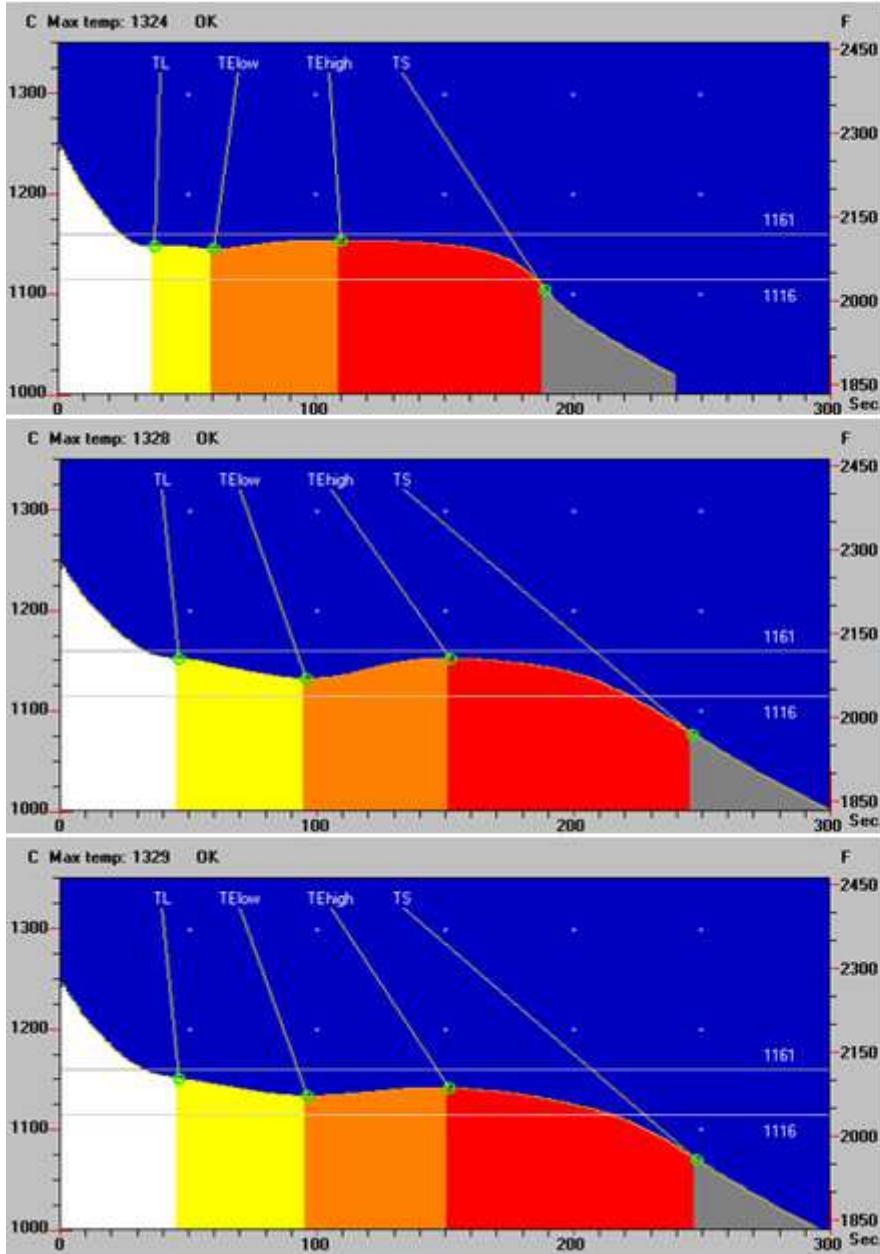
Dört nolu dökümde üretilen GGG70 normundaki küresel grafitli dökme demirin termal analizinden elde edilen sayısal değerler Tablo 6.4 de soğuma eğrileri Şekil 6.7 (a,b,c)'de ve soğuma hızı eğrileri Şekil 6.6 (a,b,c)'de verilmiştir

Tablo 6.4. Dört nolu dökümde elde edilen termal analiz dataları

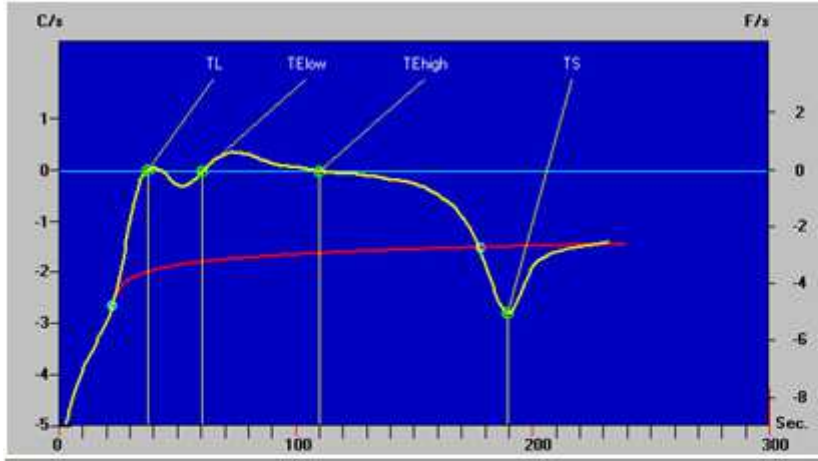
Numune	TL	Telow	TEhigh	R	Dif TL- Telow	TS	GRF1	GRF2
4.1	1149,20	1146,20	1155,20	8,90	2,90	1104,40	62	53
4.2	1153,20	1133,50	1153,70	20,20	19,70	1078,20	42	171
4.3	1151,9	1134,9	1142,8	7,9	17	1071,8	40	159

Numune	S1	S2	S3	Ox. Factor	Undercooling	dT/dETS	ACEL	C
4.1	16	33	51	39	15,00	-2,78	4,22	3,53
4.2	25	29	46	39	27,70	-1,61	4,19	3,49
4.3	25	28	47	37	26,3	-1,64	4,2	3,48

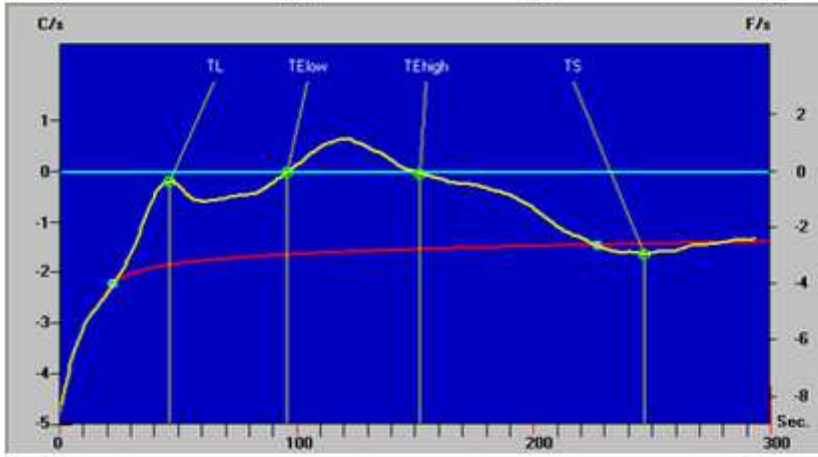
Numune	UTS	Grafite	Proeutectic	Eutectic 1	Eutectic 2
4.1	180,00	5,80	22,60	41,10	36,30
4.2	187,00	5,70	27,30	45,70	27,00
4.3	185	5,7	29,7	40,3	30



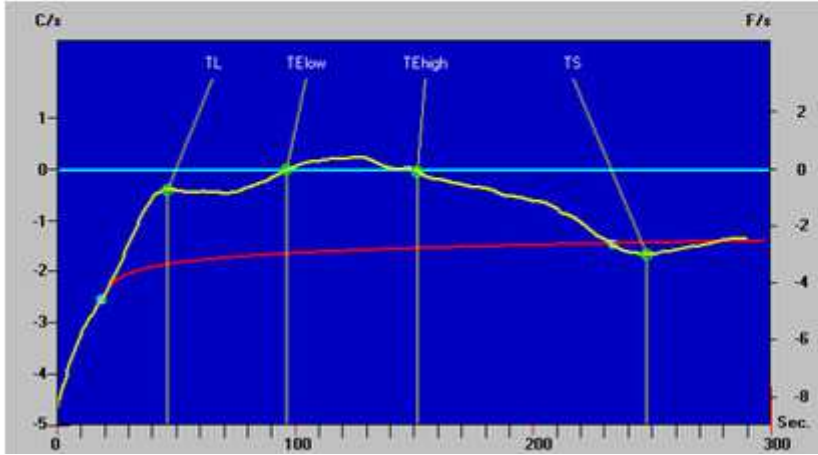
Şekil 6.7. Dört nolu dökümde elde edilen soğuma eğrileri



a)
Numune 4.1



b)
Numune 4.2



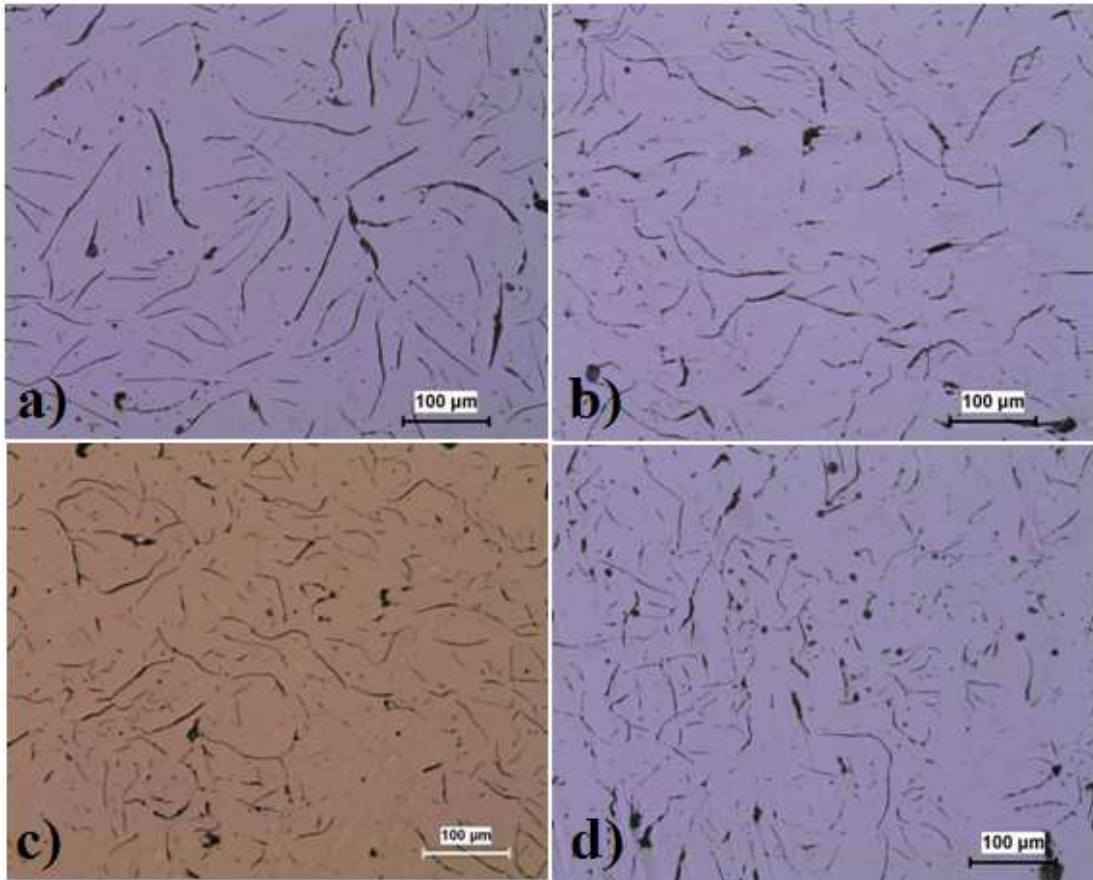
c)
Numune 4.3

Şekil 6.8. Dört nolu dökümdede elde edilen soğuma hızı eğrileri

6.2. Metalografik Sonuçlar

6.2.1. Bir nolu döküm numunelerinin mikroyapı fotoğrafları ve image analizi

Bir nolu dökümde üretilen GG25 normundaki lamel grafitli dökme demirin termal analizi sonu elde edilen mikroyapı görüntüleri Şekil 6.9 (a,b,c,d)'de, image analiz sonuçları Tablo 6.5'te verilmektedir.



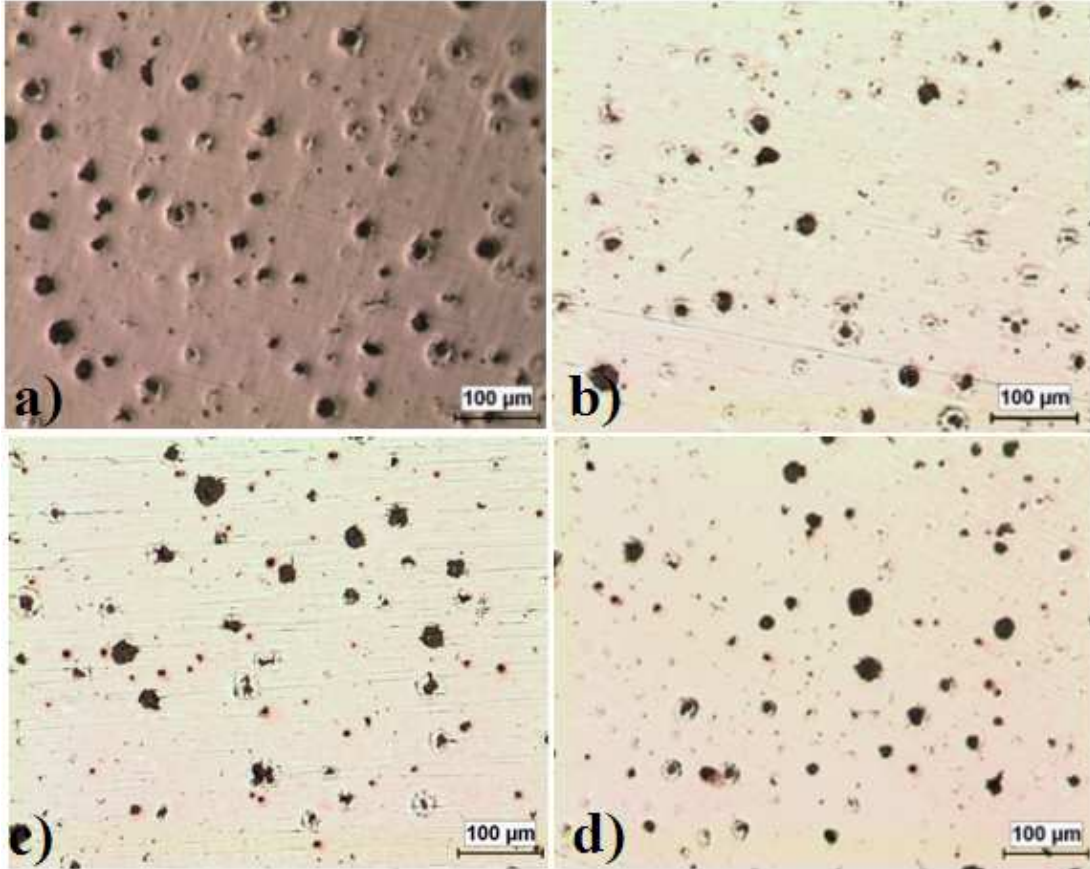
Şekil 6.9. Bir nolu dökümden elde edilen, sırasıyla Numune 1.1, Numune 1.2, Numune 1.3, Numune 1.4'ün mikroyapı görüntüleri

Tablo 6.5. Birinci dökümde üretilen numunelerin görüntü analizi

Numune	Poz No	Toplam Alan μm^2	Grafit Alan μm^2	Lamel Sayısı	Grafit Faktör	Grafit Alan/Toplam Alan	Ortalama Grafit Faktör
1.1	1	285660,64687	12960,92	115	7,379661	0,045372	6,70342
	2	286305,47903	7023,773	87	6,285026	0,024532	
	3	285660,64687	10218,35	115	6,702974	0,035771	
	4	286305,47903	7165,595	97	6,446027	0,025028	
1.2	1	286305,47903	4862,769	87	5,11917	0,016985	5,29301
	2	286305,47903	4827,058	86	5,165234	0,016860	
	3	286305,47903	6570,758	101	5,565205	0,022950	
	4	284370,98255	6648,301	138	5,322441	0,023379	
1.3	1	286305,47903	9044,995	98	5,919292	0,031592	5,23788
	2	285660,64687	9062,341	96	5,532797	0,031724	
	3	286305,47903	9124,579	143	5,284900	0,031870	
	4	285660,64687	9566,371	143	5,402506	0,033489	
	5	286305,47903	8151,209	129	5,041356	0,028470	
	6	286950,31119	9160,29	168	4,831728	0,031923	
	7	286305,47903	13485,36	143	4,856858	0,047101	
	8	286950,31119	12162,02	132	4,929144	0,042384	
	9	285015,81471	12460,97	167	5,342343	0,043720	
1.4	1	286305,47903	2772,166	67	4,712298	0,009683	5,14852
	2	281791,65391	7162,534	125	5,623974	0,025418	
	3	285660,64687	6836,037	143	5,109276	0,023931	

6.2.2. İki nolu döküm numunelerinin mikroyapı fotoğrafları ve image analizi

İki nolu dökümde üretilen GGG60 normundaki küresel grafitli dökme demirin termal analizi sonu elde edilen mikroyapı görüntüleri Şekil 6.10 (a,b,c,d)'de, image analiz sonuçları Tablo 6.6'da verilmektedir.



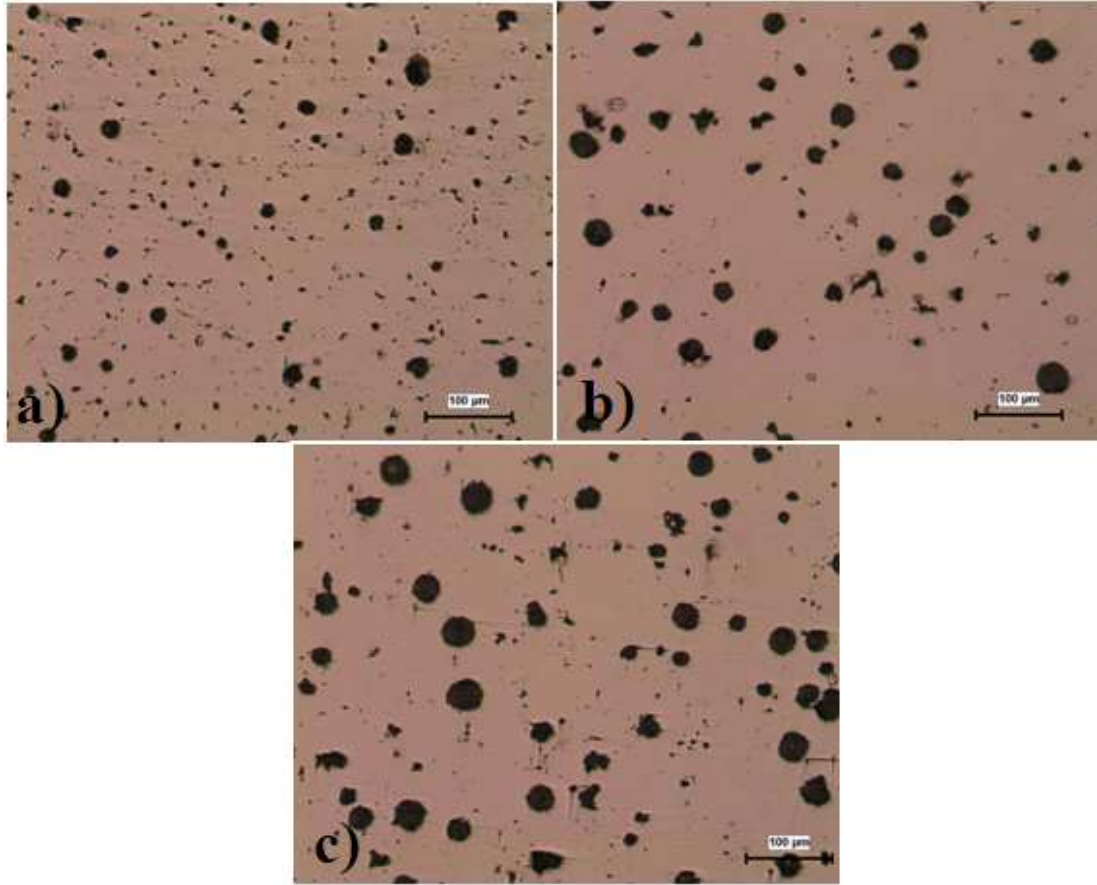
Şekil 6.10. İki nolu dökümden elde edilen, sırasıyla Numune 2.1, Numune 2.2, Numune 2.3, Numune 2.4'ün mikroyapı görüntüleri

Tablo 6.6. İkinci dökümde üretilen numunelerin görüntü analizi

Numune	Zoom	Poz No	Toplam Alan μm^2	Grafit Alan μm^2	Nodul Sayısı	Küresellik	Grafit Faktör	Grafit Alan/Toplam Alan	Ortalama Küresellik	Ortalama Grafit Faktör
2.1	100x	1	343552,159	13001,3	79	0,494551	1,399614	0,03784374	0,6331125	1,333512625
		2	343552,159	7978,193	90	0,842419	1,272399	0,02322265		
		3	343552,159	12143,38	93	0,63959	1,36501	0,0353465		
		4	343552,159	11388,45	71	0,617014	1,341107	0,03314911		
		5	343552,159	10149,75	63	0,6255	1,329934	0,02954354		
	50x	1	1364828,40	60618,01	137	0,661775	1,312354	0,04441438		
		2	1364828,40	64622,75	176	0,531015	1,330875	0,04734862		
		3	1364828,40	81760,95	201	0,653036	1,316808	0,05990566		
	2.2	100x	1	343552,159	6042,031	40	0,512584	1,316263		
2			343552,159	7118,147	43	0,470558	1,318999	0,02071926		
3			343552,159	6911,609	49	0,490493	1,345841	0,02011807		
4			343552,159	4957,177	37	0,451954	1,33755	0,01442918		
5			343552,159	6261,809	33	0,521894	1,3045	0,01822666		
6			343552,159	5091,427	36	0,588012	1,326126	0,01481995		
50x		1	1364828,40	49221,3	126	0,452485	1,35599	0,03606409		
		2	1364828,40	55171,07	176	0,487849	1,376811	0,04042344		
		3	1364828,40	40371,33	139	0,58192	1,352424	0,02957978		
2.3	100x	1	343552,159	10066,08	45	0,594037	1,297054	0,02930000	0,6686984	1,325400667
		2	343552,159	10744,48	199	0,856153	1,295246	0,03127466		
		3	343552,159	8643,351	68	0,655661	1,325382	0,02515877		
		4	343552,159	8482,887	46	0,663682	1,321053	0,0246917		
		5	343552,159	7058,569	54	0,639846	1,289842	0,02054584		
		6	343552,159	8885,901	76	0,594391	1,374633	0,02586478		
	50x	1	1364828,40	36480,21	129	0,70218	1,344665	0,02672878		
		2	1364828,40	48710,06	153	0,654963	1,342951	0,03568951		
		3	1364828,40	51504,01	152	0,657373	1,33778	0,03773661		
2.4	100x	1	343552,159	10985,97	77	0,590348	1,391264	0,03197759	0,6410960	1,361500333
		2	343552,159	11504,17	77	0,651144	1,376088	0,03348594		
		3	343552,159	10268,12	64	0,5996412	1,334697	0,02988809		
		4	343552,159	12807,2	68	0,63867	1,3454	0,03727876		
		5	343552,159	7647,997	59	0,65656	1,359957	0,02226153		
		6	343552,159	9347,169	52	0,561585	1,346493	0,02720742		
	50x	1	1364828,40	53227,09	169	0,69272	1,349812	0,03899910		
		2	1364828,40	87579,22	233	0,69107	1,390556	0,06416866		
		3	1364828,40	48197,76	174	0,688126	1,359236	0,03531415		

6.2.3. Üç nolu döküm numunelerinin mikroyapı fotoğrafları ve image analizi

Üç nolu dökümde üretilen GGG50 normundaki küresel grafitli dökme demirin termal analizi sonu elde edilen mikroyapı görüntüleri Şekil 6.11 (a,b,c) de, image analiz sonuçları Tablo 6.7’de verilmektedir.



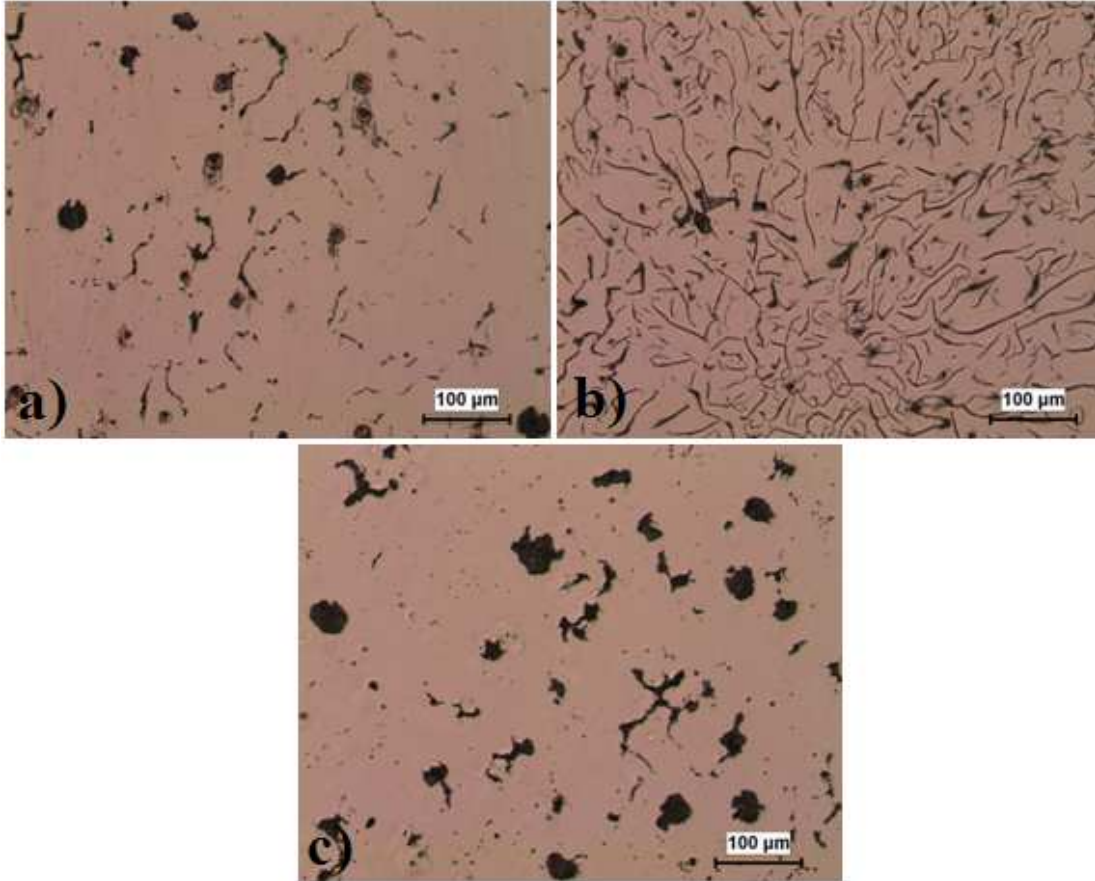
Şekil 6.11. Üç nolu dökümden elde edilen, sırasıyla Numune 3.1, Numune 3.2, Numune 3.3'ün mikroyapı görüntüleri

Tablo 6.7. Üçüncü dökümde üretilen numunelerin görüntü analizi

Numune	Zoom	Poz No	Toplam Alan μm^2	Grafit Alan μm^2	Nodul Sayısı	Küresellik	Grafit Faktör	Grafit Alan/Toplam Alan	Ortalama Grafit Faktör	Ortalama grafit oranı
3.1	100x	1	343552,159	14192,87	153	0,809154	1,45079	0,041312126	1,45140275	0,049646324
		2	343552,159	13759,14	124	0,78559	1,50076	0,040049639		
		3	343552,159	16342,19	144	0,77611	1,46387	0,047568294		
		4	343552,159	16591,62	110	0,659867	1,47791	0,048294326		
		5	343552,159	13058,5	176	0,76025	1,56303	0,03801024		
	50x	1	1364828,40	74991,72	294	0,881492	1,36241	0,054945896		
		2	1364828,40	72574,36	272	0,864633	1,38579	0,053174714		
		3	1364828,40	100745,3	274	0,821648	1,40662	0,07381536		
3.2	100x	1	343552,159	17264,46	54	0,674405	1,48450	0,050252806	1,381507375	0,054692505
		2	343552,159	17383,62	75	0,651119	1,37187	0,050599653		
		3	343552,159	18796,81	53	0,715589	1,28154	0,054713118		
		4	343552,159	8770,187	58	0,702139	1,51367	0,025527964		
		5	343552,159	13874,85	51	0,686222	1,32214	0,040386444		
	50x	1	1364828,40	106914,9	241	0,774409	1,34508	0,078335782		
		2	1364828,40	99324,1	201	0,76538	1,35864	0,072774057		
		3	1364828,40	88645,9	208	0,79811	1,37458	0,064950216		
3.3	100x	1	343552,159	22490,93	103	0,878565	1,40021	0,065465838	1,41384325	0,060410813
		2	343552,159	21931,69	74	0,726815	1,43363	0,063838021		
		3	343552,159	19358,7	62	0,6493	1,45706	0,056348649		
		4	343552,159	17485,56	55	0,695337	1,39127	0,050896376		
		5	343552,159	1922,71	57	0,668876	1,45712	0,005596559		
	50x	1	1364828,40	104300,9	247	0,794391	1,42659	0,076420523		
		2	1364828,40	92835,77	201	0,785226	1,33135	0,068020104		
		3	1364828,40	131979,5	260	0,792239	1,41347	0,096700435		

6.2.4. Dört nolu döküm numunelerinin mikroyapı fotoğrafları ve image analizi

Dört nolu dökümde üretilen GGG70 normundaki küresel grafitli dökme demirin termal analizi sonu elde edilen mikroyapı görüntüleri Şekil 6.12 (a,b,c)'de, image analiz sonuçları Tablo 6.8'de verilmektedir.



Şekil 6.12. Dört nolu dökümden elde edilen, sırasıyla Numune 4.1, Numune 4.2, Numune 4.3'ün mikroyapı görüntüleri

Tablo 6.8. Dördüncü dökümde üretilen numunelerin görüntü analizi

Numune	Zoom	Poz No	Toplam Alan μm^2	Grafit Alan μm^2	Nodul Sayısı	Küresellik	Grafit Faktör	Grafit Alan/Toplam Alan	Ortalama Küresellik	Ortalama Grafit Faktör
4.1	100x	1	343552,159	13433,71	217	0,713531	1,89465	0,0391023	0,689955	1,98142
		2	343552,159	13557,1	162	0,65953	1,86233	0,0394615		
		3	343552,159	13097,42	236	0,662399	2,08916	0,0381235		
		4	343552,159	13074,12	240	0,734502	1,90542	0,0380557		
		5	343552,159	16422,69	173	0,49361	2,53806	0,0478026		
	50x	1	1364828,402	70330,57	542	0,767084	1,83009	0,0515307		
		2	1364828,402	65573,7	460	0,742865	1,84181	0,0480453		
		3	1364828,402	63236,29	449	0,746125	1,88984	0,0463327		
4.2	100x	1	343552,159	31383,72	534	0,419086	3,2517	0,0913506	0,505195	2,81310
		2	343552,159	43268,66	653	0,463198	3,17202	0,1259449		
		3	343552,159	37975,99	1289	0,688563	2,26923	0,1105392		
		4	343552,159	31497,31	780	0,681544	2,42608	0,0916813		
		5	343552,159	30372,47	484	0,546974	3,15525	0,0884071		
	50x	1	1364828,402	158959,6	976	0,444747	2,74633	0,1164685		
		2	1364828,402	214146,5	1431	0,387478	2,55434	0,1569036		
		3	1364828,402	163501,9	1056	0,409972	2,92987	0,1197966		
4.3	100x	1	343552,159	23509,32	82	0,517024	1,86167	0,0684301	0,572116	1,80715
		2	343552,159	22209,99	91	0,598511	1,79617	0,0646480		
		3	343552,159	16785,19	89	0,579037	1,87074	0,0488577		
		4	343552,159	13654,28	82	0,576646	1,95228	0,0397444		
		5	343552,159	15232,71	66	0,560275	1,91283	0,0443388		
	50x	1	1364828,402	91203,16	163	0,593413	1,62684	0,0668239		
		2	1364828,402	77989,74	146	0,553961	1,80421	0,0571425		
		3	1364828,402	88843,66	172	0,598067	1,63245	0,0650951		

6.3. Numunelerin Sertlik Değerleri

Tablo 6.9. Bir nolu döküm numunelerinin sertlik değerleri

	Sertlik (BSD) 1	Sertlik (BSD) 2	Sertlik (BSD) 3	Sertlik (BSD) 4	Sertlik (BSD) 5	Sertlik (BSD) 6	Ort. Sertlik
1.1 Numune	208	210	218	211	211	213	211,83 HB
1.2 Numune	201	200	198	208	200	202	201,50 HB
1.3 Numune	210	215	190	211	206	203	205,83 HB
1.4 Numune	199	205	189	200	198	201	198,67 HB

Tablo 6.10. İki nolu döküm numunelerinin sertlik değerleri

	Sertlik (BSD) 1	Sertlik (BSD) 2	Sertlik (BSD) 3	Sertlik (BSD) 4	Sertlik (BSD) 5	Sertlik (BSD) 6	Ort. Sertlik
2.1 Numune	290	287	292	289	290	290	289,6 HB
2.2 Numune	282	280	278	283	280	281	280,6 HB
2.3 Numune	282	280	287	282	283	284	283,0 HB
2.4 Numune	280	281	279	278	277	280	279,1 HB

Tablo 6.11. Üç nolu döküm numunelerinin sertlik değerleri

	Sertlik (BSD) 1	Sertlik (BSD) 2	Sertlik (BSD) 3	Sertlik (BSD) 4	Sertlik (BSD) 5	Sertlik (BSD) 6	Ort. Sertlik
3.1 Numune	150	159	161	159	160	155	157,33 HB
3.2 Numune	165	170	161	165	160	168	164,83 HB
3.3 Numune	180	180	185	184	181	187	182,83 HB

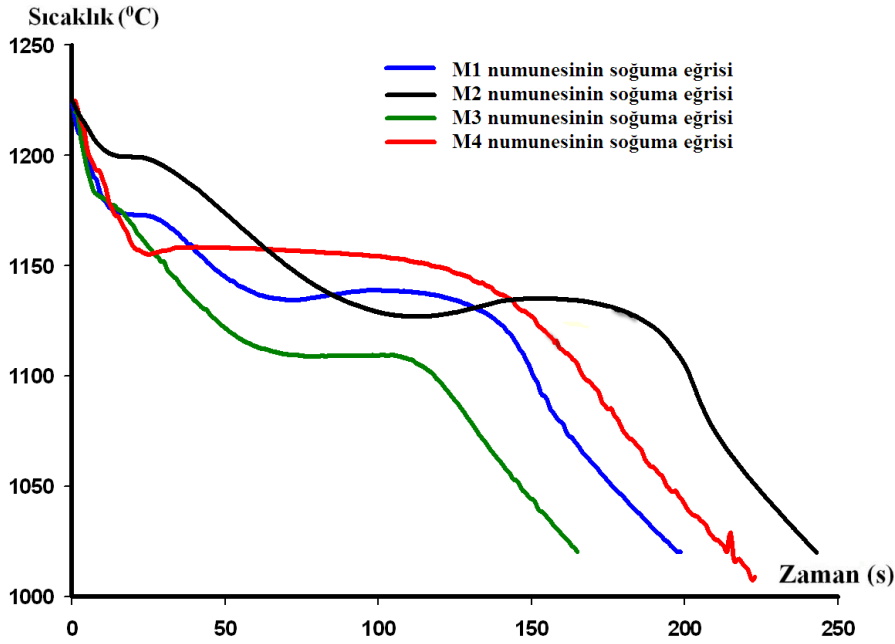
Tablo 6.12. Dört nolu döküm numunelerinin sertlik değerleri

	Sertlik (BSD) 1	Sertlik (BSD) 2	Sertlik (BSD) 3	Sertlik (BSD) 4	Sertlik (BSD) 5	Sertlik (BSD) 6	Ort. Sertlik
4.1 Numune	251	260	250	247	260	249	252,83 HB
4.2 Numune	193	189	200	200	198	199	196,50 HB
4.3 Numune	205	205	208	210	205	207	206,67 HB

6.4. Termal Analizin Matematiksel Yaklaşımı

Dökme demirin karakteristiğini yansıtan soğuma eğrileri, hassas bir biçimde, en fazla bir saniye aralıklarla alınan sıcaklık değerleri ile çizilir. Uygulanan matematiksel işlemler ile termal analiz yorumları yapılabilmektedir. Bu bölümde mevcut termal analizde elde edilen soğuma eğrileri ile yazılımla elde edilen soğuma eğrileri matematiksel hesaplamalar yolu ile karşılaştırma yapılması hedeflenmiştir.

Uygulamalar dört numune üzerinden gerçekleştirilmiş ve soğuma eğrileri elde edilmiştir. Bunlardan M1 ve M2 numunesi farklı bileşime sahip lamel grafitli dökme demir, M3 tellürlü kap numunesidir. M4 numunesi ise küresel grafitli dökme demirdir. 4 numuneye ait soğuma eğrileri Şekil 6.13'te gösterilmektedir.



Şekil 6.13. M1,M2,M3,M4 numunelere ait soğuma eğrileri

Çalışmada elde edilen verilerden soğuma eğrisi oluşturulmuş ve bu eğrilerin 9. dereceden denklemi matematiksel yöntem ile elde edilmiştir. eşitlik 6.1-6.2-6.3-6.4 de eğrilerinin fonksiyonları gösterilmiştir. 6.1 M1 numunesinin, 6.2 M2 numunesinin 6.3 M3 numunesinin 6.4 M4 numunesine ait fonksiyonlardır.

$$y = - (6.6022112 \cdot 10^{(-16)}) \cdot x^9 + (6.0588168 \cdot 10^{(-13)}) \cdot x^8 - (2.3633849 \cdot 10^{(-10)}) \cdot x^7 + (5.109354 \cdot 10^{(-8)}) \cdot x^6 - (6.6678307 \cdot 10^{(-6)}) \cdot x^5 + (5.3334943 \cdot 10^{(-4)}) \cdot x^4 - 0.0252893 \cdot x^3 + 0.6596854 \cdot x^2 - 9.1133536 \cdot x + 1227.7262221 \quad (6.1)$$

$$y = (1.3590396 \cdot 10^{(-15)}) \cdot x^8 - (1.6245608 \cdot 10^{(-12)}) \cdot x^7 + (8.6564519 \cdot 10^{(-10)}) \cdot x^6 - (2.606993 \cdot 10^{(-7)}) \cdot x^5 + (4.624418 \cdot 10^{(-5)}) \cdot x^4 - 0.0046973 \cdot x^3 + 0.2573866 \cdot x^2 - 7.7014913 \cdot x + 1299.6876927 \quad (6.2)$$

$$y = - (2.5495077 \cdot 10^{(-15)}) \cdot x^9 + (2.0516979 \cdot 10^{(-12)}) \cdot x^8 - (7.0433296 \cdot 10^{(-10)}) \cdot x^7 + (1.3481657 \cdot 10^{(-7)}) \cdot x^6 - (1.5743609 \cdot 10^{(-5)}) \cdot x^5 + 0.0011479 \cdot x^4 - 0.0511783 \cdot x^3 + 1.3196925 \cdot x^2 - 19.1484353 \cdot x + 1296.5807143 \quad (6.3)$$

$$y = - (1.390115 \cdot 10^{(-14)}) \cdot x^8 + (1.2994881 \cdot 10^{(-11)}) \cdot x^7 - (4.9017494 \cdot 10^{(-9)}) \cdot x^6 + (9.4986959 \cdot 10^{(-7)}) \cdot x^5 - (9.8357002 \cdot 10^{(-5)}) \cdot x^4 + 0.0048223 \cdot x^3 - 0.0337496 \cdot x^2 - 5.4094584 \cdot x + 1290.8164436 \quad (6.4)$$

Dökme demirlerin karakteristiğini yansıtan parametrelerin (likidüs sıcaklığı TL, Ötektik başlangıç sıcaklığı TES, recelance R, düşük ötektik sıcaklığı TE_{low} , yüksek ötektik sıcaklığı TE_{high} ve solidüs sıcaklığı TS) ortaya çıkartılmasındaki en büyük yardımcı faktör sistemden gizli ısının ortaya çıkması durumudur. Faz dönüşümleri sırasında ortaya çıkan ısının, sıcaklık değişimine etkisi bize yukarıdaki bahsi geçen parametrelerin belirlenmesine sebep olmaktadır. Bu kadar hassas oluşumun sıcaklık ($^{\circ}C$) zaman (s) grafiğinde değilde birim zamandaki sıcaklık artışı ($^{\circ}C/s$) ve zaman (s) grafiğinde incelenmesi bize daha net ve sağlıklı sonuçlar ortaya koymamızı sağlayacaktır.

Bu bağlamda düşünülecek olursa soğuma eğrisinin zamana bağımlı olarak elde edilmesi, sıvı metalin soğuma hızı eğrisi oluşturmamızı sağlayacaktır. İncelediğimiz soğuma eğrisi fonksiyonlarının $\frac{dT}{dt}$ işlemi eşitlik 6.5- 6.6- 6.7- 6.8 de yer almaktadır.

6.5 M1 numunesinin, 6.6 M2 numunesinin 6.7 M3 numunesinin 6.8 M4 numunesine ait fonksiyonlardır.

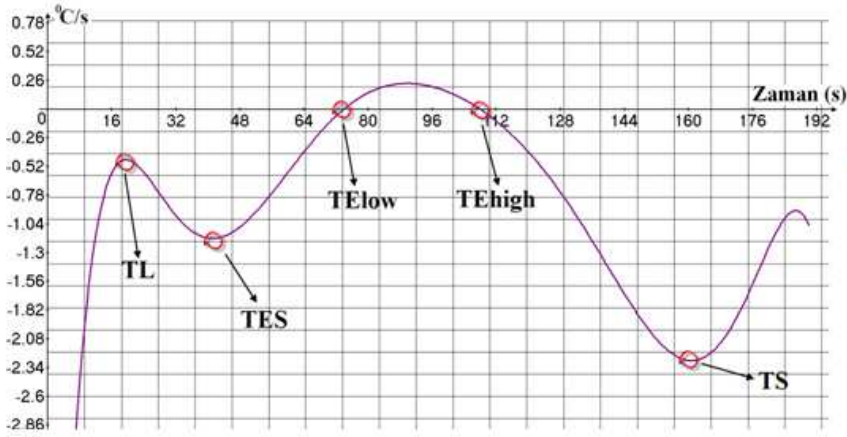
$$y' = -(6.6022112 \cdot 10^{-16}) \cdot 9 \cdot x^8 + (6.0588168 \cdot 10^{-13}) \cdot 8 \cdot x^7 - (2.3633849 \cdot 10^{-10}) \cdot 7 \cdot x^6 + (5.109354 \cdot 10^{-8}) \cdot 6 \cdot x^5 - (6.6678307 \cdot 10^{-6}) \cdot 5 \cdot x^4 + (5.3334943 \cdot 10^{-4}) \cdot 4 \cdot x^3 - 0.0252893 \cdot 3 \cdot x^2 + 0.6596854 \cdot 2 \cdot x - 9.1133536 \quad (6.5)$$

$$y' = (1.3590396 \cdot 10^{-15}) \cdot 8 \cdot x^7 - (1.6245608 \cdot 10^{-12}) \cdot 7 \cdot x^6 + (8.6564519 \cdot 10^{-10}) \cdot 6 \cdot x^5 - (2.606993 \cdot 10^{-7}) \cdot 5 \cdot x^4 + (4.624418 \cdot 10^{-5}) \cdot 4 \cdot x^3 - 0.0046973 \cdot 3 \cdot x^2 + 0.2573866 \cdot 2 \cdot x - 7.7014913 \quad (6.6)$$

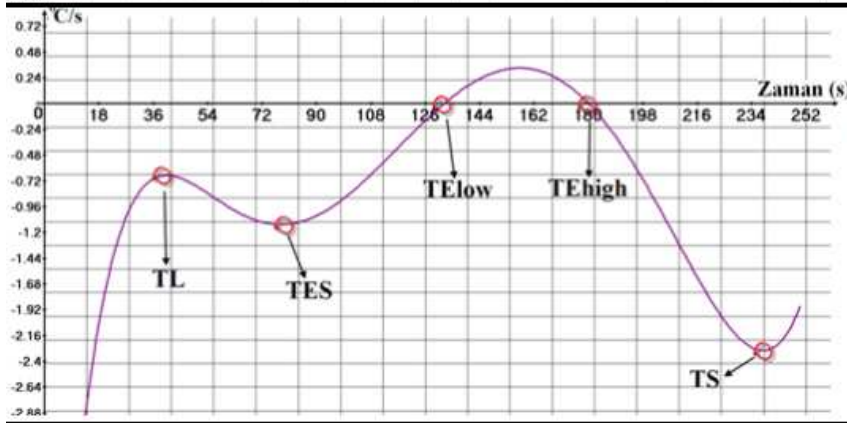
$$y' = -(2.5495077 \cdot 10^{-15}) \cdot 9 \cdot x^8 + (2.0516979 \cdot 10^{-12}) \cdot 8 \cdot x^7 - (7.0433296 \cdot 10^{-10}) \cdot 7 \cdot x^6 + (1.3481657 \cdot 10^{-7}) \cdot 6 \cdot x^5 - (1.5743609 \cdot 10^{-5}) \cdot 5 \cdot x^4 + 0.0011479 \cdot 4 \cdot x^3 - 0.0511783 \cdot 3 \cdot x^2 + 1.3196925 \cdot 2 \cdot x - 19.1484353 \quad (6.7)$$

$$y' = -(1.390115 \cdot 10^{-14}) \cdot 8 \cdot x^7 + (1.2994881 \cdot 10^{-11}) \cdot 7 \cdot x^6 - (4.9017494 \cdot 10^{-9}) \cdot 6 \cdot x^5 + (9.4986959 \cdot 10^{-7}) \cdot 5 \cdot x^4 - (9.8357002 \cdot 10^{-5}) \cdot 4 \cdot x^3 + 0.0048223 \cdot 3 \cdot x^2 - 0.0337496 \cdot 2 \cdot x - 5.4094584 \quad (6.8)$$

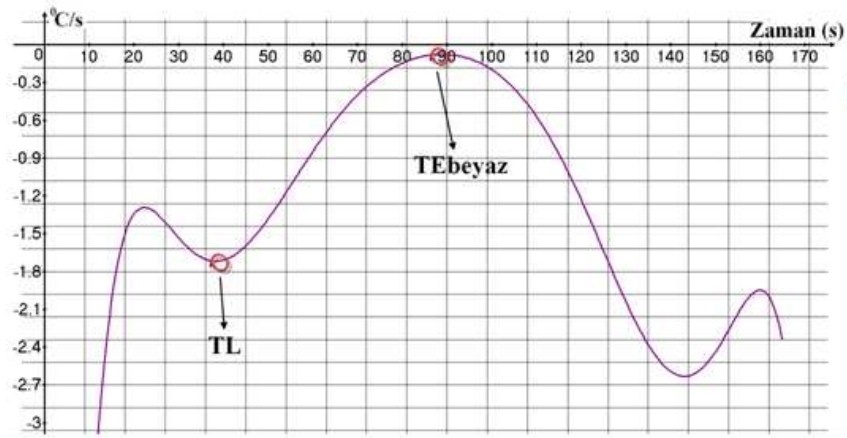
$\frac{dT}{dt}$ eşitlikleri kullanılarak çizilen soğuma hızı eğrileri Şekil 6.14 te yer almaktadır.



M1 numunesine ait

 $\frac{dT}{dt}$ eğrisi

M2 numunesine ait

 $\frac{dT}{dt}$ eğrisi

M3 numunesine ait

 $\frac{dT}{dt}$ eğrisi

M4 numunesine ait

 $\frac{dT}{dt}$ eğrisi

Şekil 6.14. M1, M2, M3, M4 numunelerinin soğuma hızı eğrileri

Faz değişimleri ve grafitin açığa çıkarttığı gizli ısılar soğuma hızına yansımaktadır. Soğuma hızı eğrisinin, ısı transferinin sıfır olduğu kabul edildiği 0 çizgisiyle oluşturduğu kesişim noktaları TE_{low} ve TE_{high} sıcaklıklarının belirlenmesi için önemlidir. Bununla beraber soğuma hızı eğrisi $y < 0$ bölgesinde oluşturduğu yerel maksimum ve yerel minimum noktaları TL ve TS sıcaklıklarının temsil etmektedir.

Soğuma eğrisinin karakteristiğini yansıtan parametrelerden bazıları soğuma eğrisinde kalan alandan çıkartılır. Bu bölgeler S1, S2, S3 olarak tanımlanır. Hypo ötektik kompozisyona sahip dökme demirin primer ostenit miktarının yüzdesi soğuma eğrisi altında kalan alanlarla ilişkilendirilir. (Formül 4.18) Aynı şekilde oksidasyon faktörü S2 ve S3 alanlarının bir fonksiyonudur. (Formül 4.17) Soğuma eğrisinin belli sınırlar içerisinde adlandırılan S1, S2, S3 alanı, soğuma eğrisinin integrasyonu sonucu belirlenebilmektedir. M1 numunesine ait soğuma eğrisi altındaki S1, S2, S3 alanların hesaplanması için uygulanan eşitlik 6.9- 6.10- 6.11de yer almaktadır.

$$S1 = \int_{22}^{70} [-(6.6022112 \cdot 10^{-16}) \cdot x^9 + (6.0588168 \cdot 10^{-13}) \cdot x^8 - (2.3633849 \cdot 10^{-10}) \cdot x^7 + (5.109354 \cdot 10^{-8}) \cdot x^6 - (6.6678307 \cdot 10^{-6}) \cdot x^5 + (5.3334943 \cdot 10^{-4}) \cdot x^4 - 0.0252893 \cdot x^3 + 0.6596854 \cdot x^2 - 9.1133536 \cdot x + 1227.7262221] dx \quad (6.9)$$

$$S2 = \int_{76}^{96} [-(6.6022112 \cdot 10^{-16}) \cdot x^9 + (6.0588168 \cdot 10^{-13}) \cdot x^8 - (2.3633849 \cdot 10^{-10}) \cdot x^7 + (5.109354 \cdot 10^{-8}) \cdot x^6 - (6.6678307 \cdot 10^{-6}) \cdot x^5 + (5.3334943 \cdot 10^{-4}) \cdot x^4 - 0.0252893 \cdot x^3 + 0.6596854 \cdot x^2 - 9.1133536 \cdot x + 1227.7262221] dx \quad (6.10)$$

$$S3 = \int_{96}^{152} [-(6.6022112 \cdot 10^{-16}) \cdot x^9 + (6.0588168 \cdot 10^{-13}) \cdot x^8 - (2.3633849 \cdot 10^{-10}) \cdot x^7 + (5.109354 \cdot 10^{-8}) \cdot x^6 - (6.6678307 \cdot 10^{-6}) \cdot x^5 + (5.3334943 \cdot 10^{-4}) \cdot x^4 - 0.0252893 \cdot x^3 + 0.6596854 \cdot x^2 - 9.1133536 \cdot x + 1227.7262221] dx \quad (6.11)$$

M2 numunesine ait soğuma eğrisi altındaki S1, S2, S3 alanların hesaplanması için uygulanan eşitlik 6.12- 6.13- 6.14 de yer almaktadır.

$$S1 = \int_{39,5}^{132} \left[(1.3590396 \cdot 10^{(-15)}) \cdot x^8 - (1.6245608 \cdot 10^{(-12)}) \cdot x^7 + (8.6564519 \cdot 10^{(-10)}) \cdot x^6 - (2.606993 \cdot 10^{(-7)}) \cdot x^5 + (4.624418 \cdot 10^{(-5)}) \cdot x^4 - 0.0046973 \cdot x^3 + 0.2573866 \cdot x^2 - 7.7014913 \cdot x + 1299.6876927 \right] dx \quad (6.12)$$

$$S2 = \int_{132}^{180} \left[(1.3590396 \cdot 10^{(-15)}) \cdot x^8 - (1.6245608 \cdot 10^{(-12)}) \cdot x^7 + (8.6564519 \cdot 10^{(-10)}) \cdot x^6 - (2.606993 \cdot 10^{(-7)}) \cdot x^5 + (4.624418 \cdot 10^{(-5)}) \cdot x^4 - 0.0046973 \cdot x^3 + 0.2573866 \cdot x^2 - 7.7014913 \cdot x + 1299.6876927 \right] dx \quad (6.13)$$

$$S3 = \int_{180}^{237,5} \left[(1.3590396 \cdot 10^{(-15)}) \cdot x^8 - (1.6245608 \cdot 10^{(-12)}) \cdot x^7 + (8.6564519 \cdot 10^{(-10)}) \cdot x^6 - (2.606993 \cdot 10^{(-7)}) \cdot x^5 + (4.624418 \cdot 10^{(-5)}) \cdot x^4 - 0.0046973 \cdot x^3 + 0.2573866 \cdot x^2 - 7.7014913 \cdot x + 1299.6876927 \right] dx \quad (6.14)$$

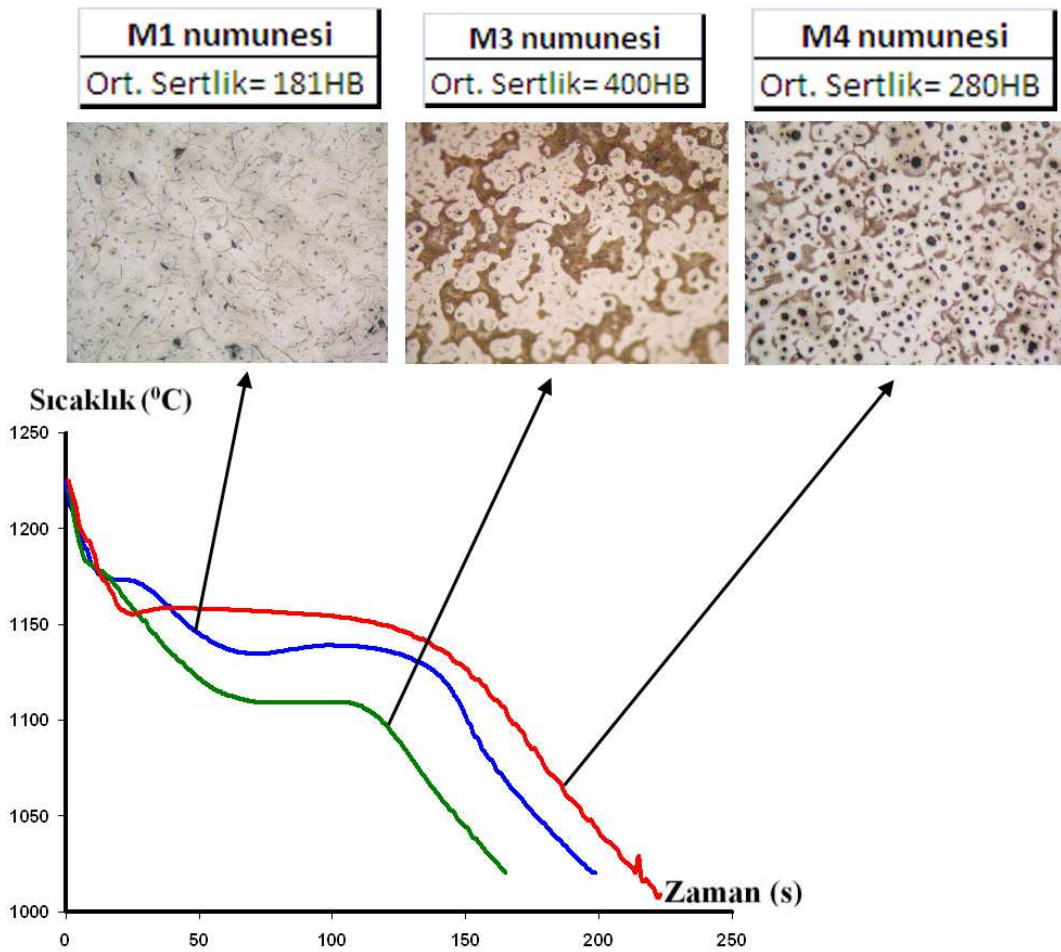
M4 numunesine ait soğuma eğrisinin altındaki alanların bulunması için uygulanan eşitlik 6.15- 6.16 yer almaktadır.

$$S2 = \int_{49,504}^{80,92} \left[- (1.390115 \cdot 10^{(-14)}) \cdot x^8 + (1.2994881 \cdot 10^{(-11)}) \cdot x^7 - (4.9017494 \cdot 10^{(-9)}) \cdot x^6 + (9.4986959 \cdot 10^{(-7)}) \cdot x^5 - (9.8357002 \cdot 10^{(-5)}) \cdot x^4 + 0.0048223 \cdot x^3 - 0.0337496 \cdot x^2 - 5.4094584 \cdot x + 1290.8164436 \right] dx \quad (6.15)$$

$$S3 = \int_{80,92}^{188,972} \left[- (1.390115 \cdot 10^{(-14)}) \cdot x^8 + (1.2994881 \cdot 10^{(-11)}) \cdot x^7 - (4.9017494 \cdot 10^{(-9)}) \cdot x^6 + (9.4986959 \cdot 10^{(-7)}) \cdot x^5 - (9.8357002 \cdot 10^{(-5)}) \cdot x^4 + 0.0048223 \cdot x^3 - 0.0337496 \cdot x^2 - 5.4094584 \cdot x + 1290.8164436 \right] dx \quad (6.16)$$

Aktif karbon eşdeğerinin (ACEL) 4.3 olması durumunda katılaşma ötektik kompozisyonunda gerçekleşeceği anlamında gelmektedir. Likidüs sıcaklığının (TL), düşük ötektik sıcaklığına (TElow) eşit olması bunun bir göstergesidir. Ötektik

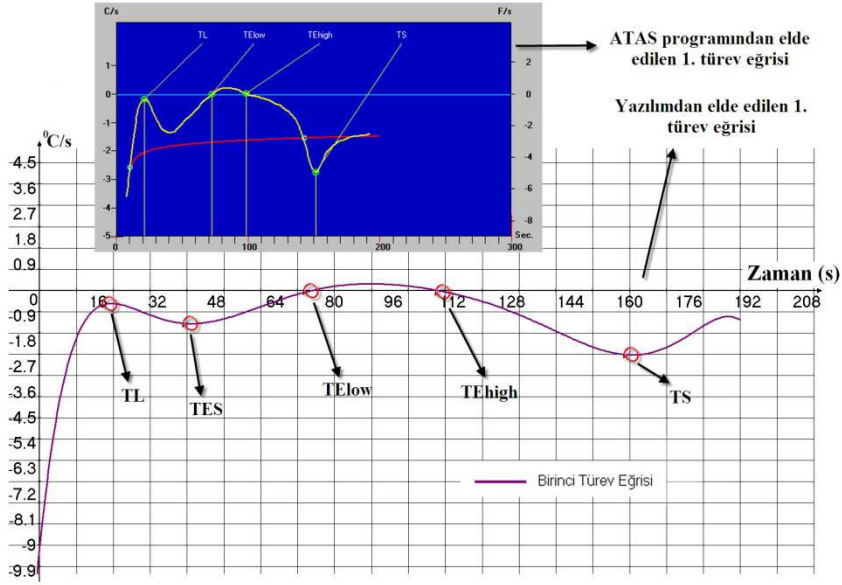
katılaşmalarda sıvı fazın iki farklı katıya dönüşmesi primer ostenit fazının oluşmamasına dolayısıyla S1 alanını görünmemesine neden olacaktır. M3 numunesi tellürlü quik kapta üretilen bir numunedir. Katılaşma hızlı meydana gelir ve ötektik reaksiyon metastabl ötektik çizgisinde oluşur. Yavaş katılaşma oluşmadığı için S1, S2, S3 alanı gösterilemez.



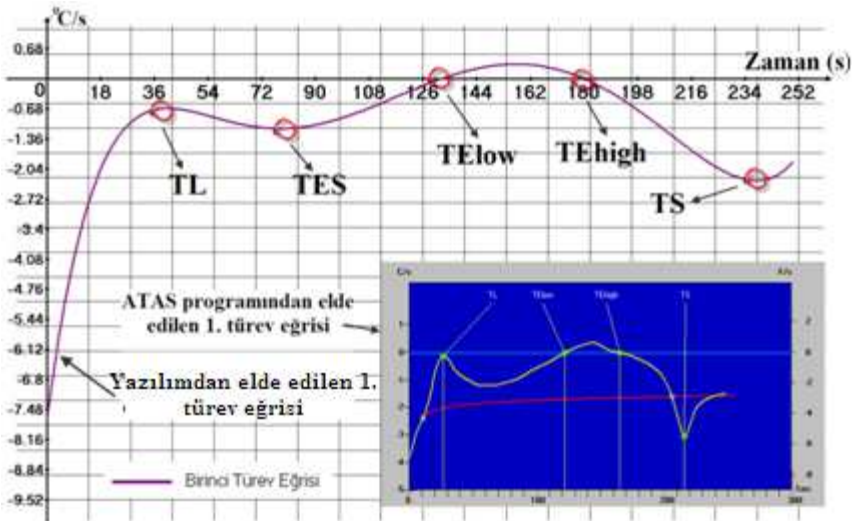
Şekil 6.15. M1,M3ve M4 numunelerine ait soğuma eğrilerinin, mikroyapı fotoğraflarıyla beraber gösterilmesi

6.5. Sonuçların ATAS Verileri ile Karşılaştırılması

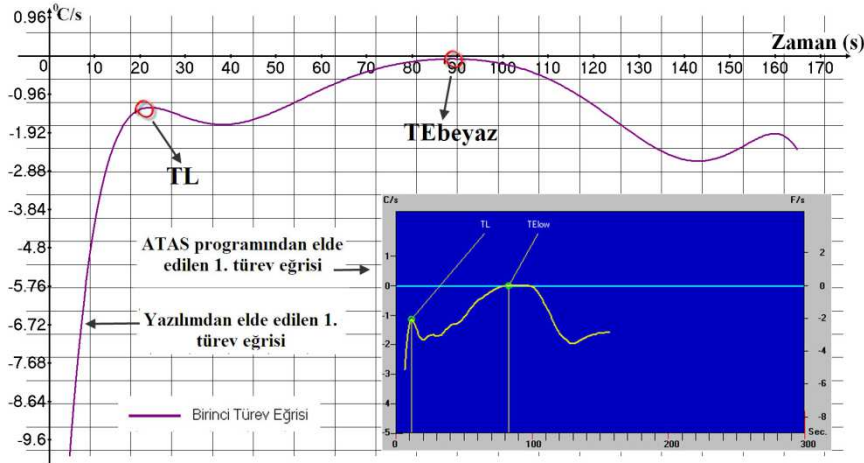
Elde edilen termal analiz verileri mevcut bir ticari yazılım olan Novacast -ATAS sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Numunelere ait soğuma hızı eğrileri Şekil 6.16, Şekil 6.17, Şekil 6.18, Şekil 6.19'da gösterilmektedir.



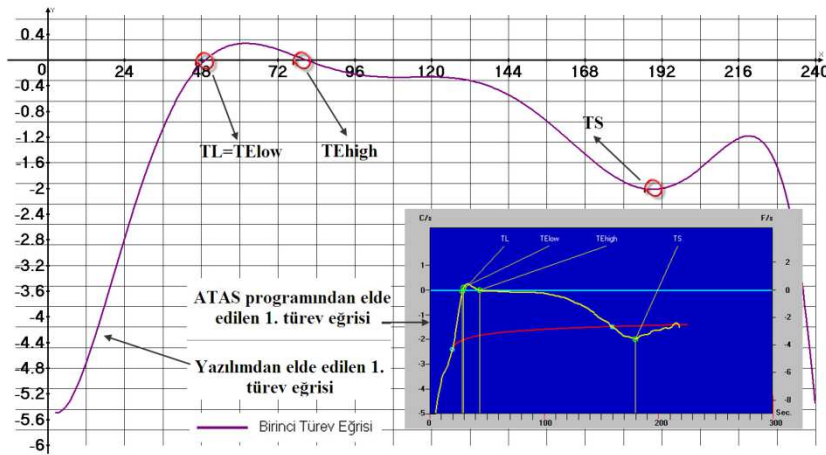
Şekil 6.16. M1 numunesine ait ATAS programındaki soğuma hızı eğrisinin, $\frac{dT}{dt}$ fonksiyonundan elde edilen eğrinin birlikte gösterilmesi



Şekil 6.17. M2 numunesine ait ATAS programındaki soğuma hızı eğrisinin, $\frac{dT}{dt}$ fonksiyonundan elde edilen eğrinin birlikte gösterilmesi

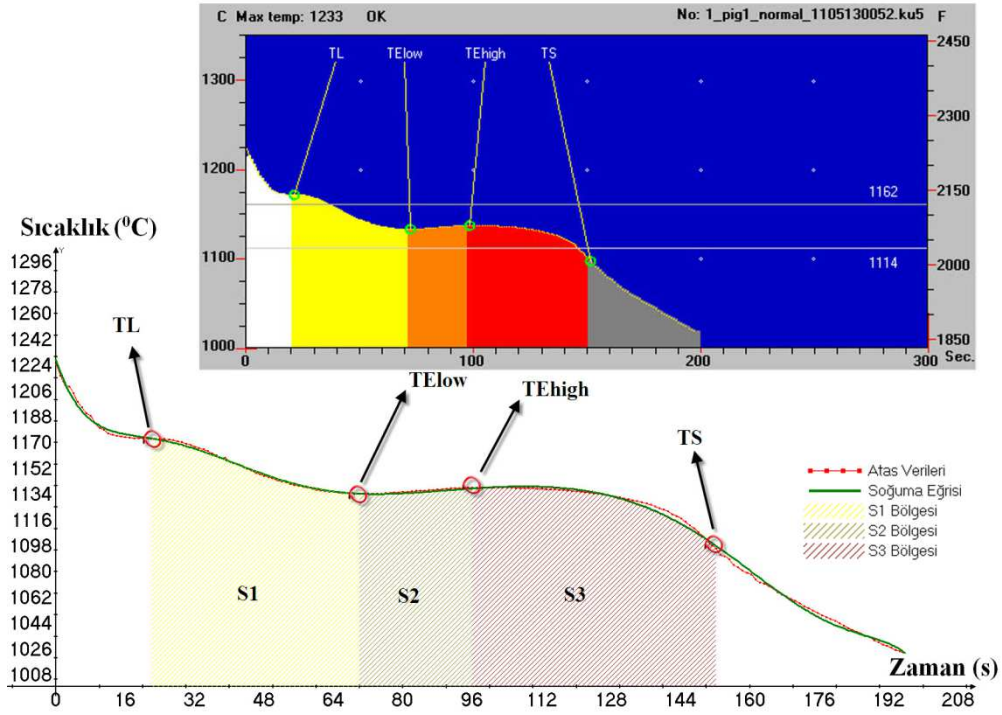


Şekil 6.18. M3 numunesine ait ATAS programındaki soğuma hızı eğrisinin, $\frac{dT}{dt}$ fonksiyonundan elde edilen eğrinin birlikte gösterilmesi

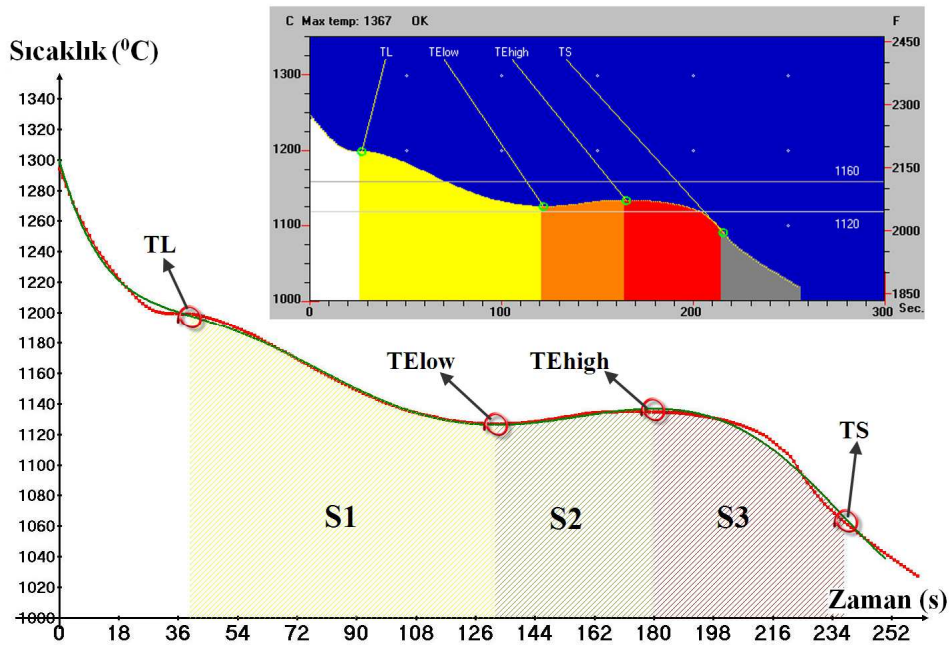


Şekil 6.19. M4 numunesine ait ATAS programındaki soğuma hızı eğrisinin, $\frac{dT}{dt}$ fonksiyonundan elde edilen eğrinin birlikte gösterilmesi

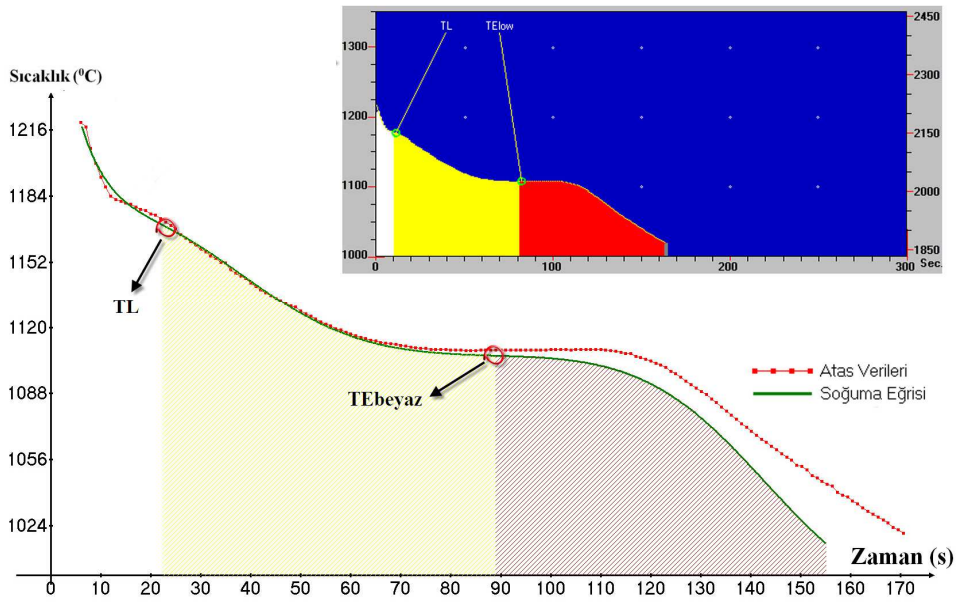
Yapılan çalışmalarda yazılımla elde edilen soğuma eğrileri, ATAS programından elde edilen soğuma eğrileriyle karşılaştırılmış olup, Şekil 6.20, Şekil 6.21, Şekil 6.22, Şekil 6.23'te gösterilmiştir.



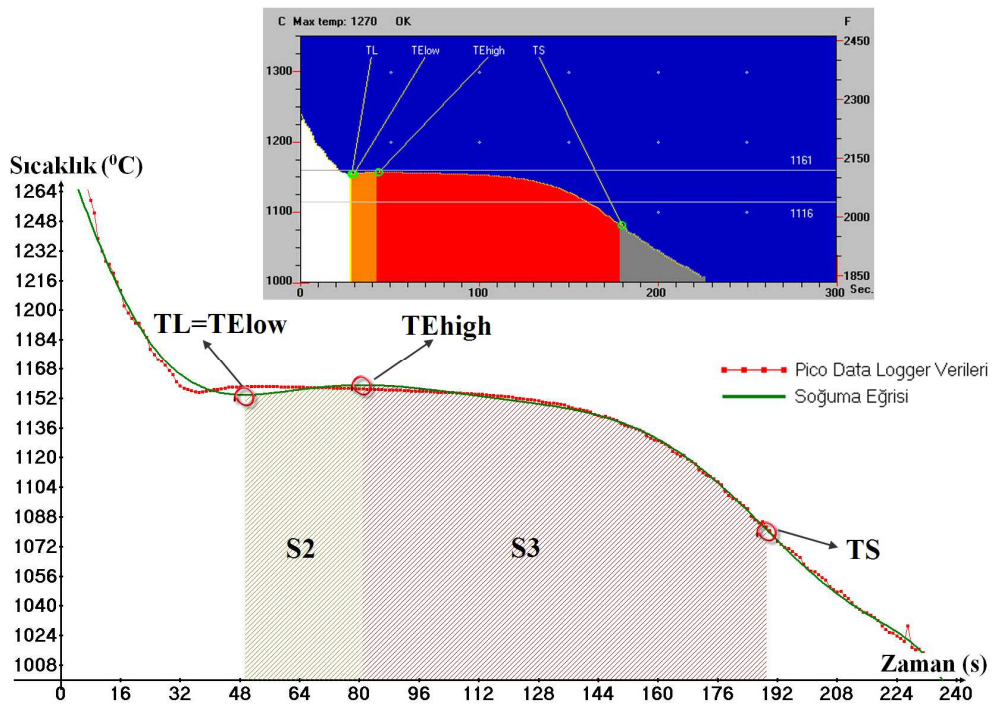
Şekil 6.20. M1 numunesine ait soğuma eğrisinin ATAS programıyla birlikte gösterilmesi



Şekil 6.21. M2 numunesine ait soğuma eğrisinin ATAS programıyla birlikte gösterilmesi



Şekil 6.22. M3 numunesine ait soğuma eğrisinin ATAS programıyla birlikte gösterilmesi



Şekil 6.23. M4 numunesine ait soğuma eğrisinin ATAS programıyla birlikte gösterilmesi

İncelenen 4 farklı numuneye ait sayısal veriler, her iki yöntem ile elde edilmiştir. Numunelerin matematiksel olarak incelenip, bölüm dördte gösterilen metotlar uygulandığında ortaya çıkan sonuçlar Tablo 6.13, Tablo 6.14, Tablo 6.15, Tablo 6.16'da yer almaktadır.

Tablo 6.13. M1 numunesinin sayısal verilerinin ATAS'ın sayısal verileriyle beraber gösterilişi

	S1(br ²)	S2(br ²)	S3(br ²)	%S1	%S2	%S3	%Primer Ostenit
ATAS sonuçları	NA	NA	NA	40	20	40	40
Yazılım sonuçları	55279,52	29525,85	63261,55	37,33	19,94	42,72	37,33

	ACEL	%C	TL (°C)	TElow (°C)	TEhigh (°C)	TS (°C)	R (°C)
ATAS sonuçları	4,01	3,4	1173,00	1134,50	1138,80	1099,80	4,30
Yazılım sonuçları	3,999	2,754946	1174,18	1134,53	1138,38	1074,61	3,85

	Dif. TL-Telow (°C)	DT/dt TL (°C/s)	Max R rate (°C/s)	DT/dt TS (°C/s)	DT/dt TES (°C/s)
ATAS sonuçları	38,5	0,16	0,21	-2,72	-1,34
Yazılım sonuçları	39,65	-0,45	0,23	-2,27	-1,17061

Tablo 6.14. M2 numunesinin sayısal verilerinin ATAS'ın sayısal verileriyle beraber gösterilişi

	S1 (br ²)	S2 (br ²)	S3 (br ²)	%S1	%S2	%S3	%Primer Ostenit
ATAS sonuçları	NA	NA	NA	51	23	26	51
Yazılım sonuçları	107040,06	54306,93	64043,84	47,49	24,09	28,41	47,49086

	ACEL	%C	TL (°C)	TElow (°C)	TEhigh (°C)	TS (°C)	R(°C)
ATAS sonuçları	3,83	3,37	1199,3	1126,9	1135	1091,6	8,1
Yazılım sonuçları	3,780	NA	1198,8	1126,29	1136,764	1067,28	10,474

	Dif. TL-Telow (°C)	DT/dt TL (°C/s)	Max R rate (°C/s)	DT/dt TS (°C/s)	DT/dt TES (°C/s)
ATAS sonuçları	72,4	-0,11	0,27	-3,03	-1,19
Yazılım sonuçları	72,51	0,67	0,332	-2,3	-1,1262

Tablo 6.15. M3 numunesinin sayısal verilerinin ATAS'ın sayısal verileriyle beraber gösterilişi

	Soğuma Eğrisi			Soğuma Hızı Eğrisi	
	TL (°C)	TEbeyaz (°C)	ACEL	DT/dt TL (°C/s)	DT/dt TEbeyaz (°C/s)
ATAS sonuçları	1177,8	1109	3,97	-1,01	-0,04
Yazılım sonuçları	1170,27	1106,2903	4,034597	-1,2912	-0,076

Tablo 6.16. M4 numunesinin sayısal verilerinin ATAS'ın sayısal verileriyle beraber gösterilişi

	S1 (br ²)	S2 (br ²)	S3 (br ²)	%S1	%S2	%S3	%Primer Ostenit
ATAS sonuçları	NA	NA	NA	1	10	89	1
Yazılım sonuçları	NA	36340,72	123009,38	1	22,57	76,42	1

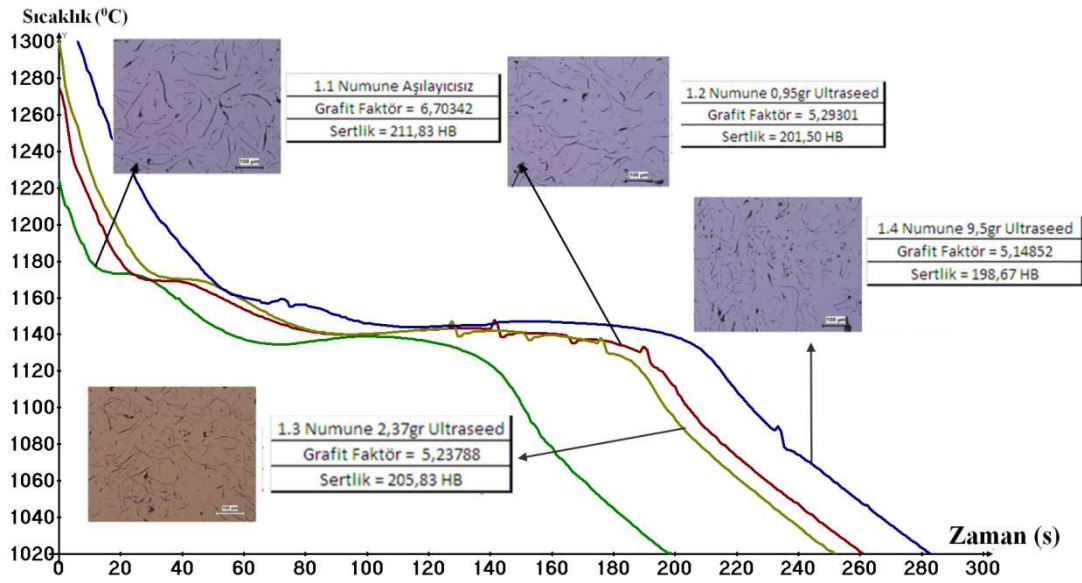
	ACEL	%C	TL (°C)	TElow (°C)	TEhigh (°C)	TS (°C)	R(°C)
ATAS sonuçları	4,17	3,42	1155,6	1155,8	1158,3	1083,2	2,5
Yazılım sonuçları	4,136	3,04	1153,9	1153,87	1159,15	1081,4	5,2849

	Dif. TL-Telow (°C)	DT/dt TL (°C/s)	Max R rate (°C/s)	DT/dt TS (°C/s)	DT/dt TES (°C/s)
ATAS sonuçları	0	0	0,27	-1,95	0
Yazılım sonuçları	0	0	0,2606293	-2,01365	0

BÖLÜM 7. SONUÇLARIN İRDELENMESİ VE ÖNERİLER

7.1. Bir Numaralı Dökümde Elde Edilen Sonuçlar

Bir nolu dökümde GG15 normundaki lamel grafitli dökme demirin aşılansıyla soğuma eğrisindeki değişimler incelenmiş ve oluşan farklılıklar optik mikroskop görüntüleri, sertlik ve görüntü analiziyle birlikte değerlendirilmiştir. Şekil 7.1’de bir nolu dökümde elde edilen soğuma eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Bir nolu dökümde elde edilen soğuma eğrilerinin, mikroyapılarla beraber gösterilişi

1) Aşılaysıcı olarak FeSi(%75) kullanılmıştır. Karbon eşdeğerleri göz önüne alındığında aşılama ilavesiyle ötektik kompozisyona yaklaşılmış olup likidüs sıcaklıkları termal analizde gösterilmiştir. 1.1 numaralı numunede 1173 °C olarak gözükken likidüs sıcaklığı aşılamanın artmasıyla, sırasıyla 1169,1°C, 1170°C ve 1160,8 °C olarak ölçülmüştür.

2) Eşitlik 4.5 de görüldüğü üzere likidüs sıcaklığı ile ilişkilendirilen aktif karbon eşdeğeri sırasıyla 4.01, 4.05, 4.04 ve 4.12 olmuştur. Buna göre ACEL katsayısının ilave edilen aşılama miktarının artırılmasıyla aktif karbon eşdeğerini %2,7 oranında arttırdığı anlaşılmaktadır.

3) Alt soğuma değerleri aşılamanın etkisiyle değişebilmektedir. Ortaya çıkan sonuçlarda TE_{low} değerinin teorik TE_{gri} ötektik sıcaklığına yaklaşması, aşılamanın bir etkisinin ve heterojen çekirdeklenmenin bir kanıtı olduğunu göstermektedir. 1.1 nolu numune aşılama işlemi yapılmadığında gösterilen TE_{low} sıcaklığı $1134,5^{\circ}C$ iken aşılama etkisinin artması ile bu değer sırası ile TE_{gri} ötektik noktaya yaklaşarak, $1139,7^{\circ}C$, $1140,0^{\circ}C$, $1143,0^{\circ}C$ sıcaklığına yükseldiği görülmektedir. Dolayısıyla alt soğuma değerleri düşmüştür.

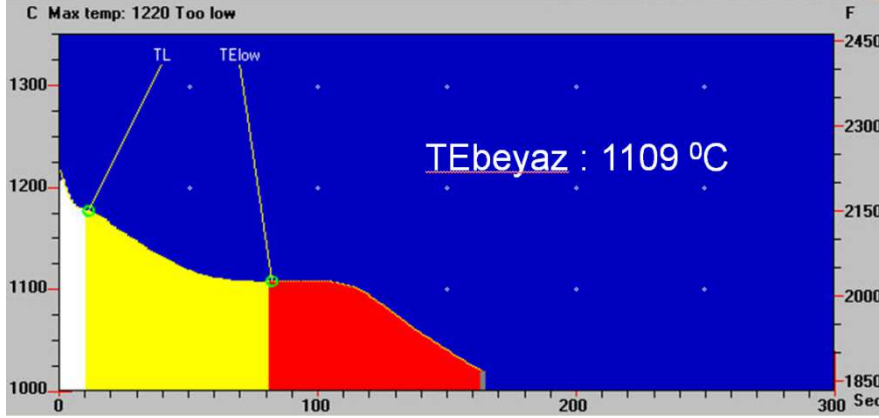
4) Yapıda karbon eşdeğeri (CE) katsayısının artması serbest grafit miktarını arttırmıştır ve dolayısıyla gizli ısının son serbest kaldığı nokta olarak ifade edilen TE_{high} sıcaklığı yükselmiştir. Numune 1.1 de TE_{high} sıcaklığı $1138,8^{\circ}C$ iken %0,72 artış ile bu sıcaklık sırasıyla $1143,7^{\circ}C$, $1143,5^{\circ}C$ ve $1147^{\circ}C$ sıcaklığına yükselmiştir.

5) Bir nolu dökümün döküm sıcaklıkları $1380^{\circ}C$ dir. Döküm sıcaklığı ve aşılama ile değişkenlik gösteren recalcence değeri soğuma eğrisinde grafit kuma hızını göstermektedir. Uygulanan döküm sıcaklığı sabit kabul edildiğinde eklenen FeSi miktarı soğuma hızını ve grafit kuma hızını yavaşlatmaktadır. Dökümlerde lamel grafitli dökümler için $8^{\circ}C$ 'nin aşağısında istenen bu değer, numune 1.1 de $4,3^{\circ}C$ dir. Aşılamanın soğuma hızını azaltmasıyla bu değer sırasıyla $4,0^{\circ}C$, $3,5^{\circ}C$ ve $3,5^{\circ}C$ seviyelerine indirilmiştir.

6) Solidüs sıcaklığı Si, Cu ve Al gibi elementlerin etkisiyle yükselir. Artan aşılama miktarının etkisi ile solidüs sıcaklıkları numune 1.1 de $1099,8^{\circ}C$ iken bu sıcaklık sırasıyla $1105,1^{\circ}C$, $1107,3^{\circ}C$ ve $1114,1^{\circ}C$ sıcaklığına ulaşmıştır. Solidüs sıcaklığındaki bu artış ters çil eğilimini düşürmektedir.

7) Şekil 7.2'de 1.1 nolu numunenin tellürlü kapta elde edilen soğuma eğrisi mevcuttur. Oluşan hızlı katılaşmada beyaz ötektik sıcaklığı $1109^{\circ}C$ olarak

bulunmuştur. Teorik TE_{beyaz} sıcaklığı formül 4.16 ya göre artan aşılama miktarına göre azalmaktadır.



Şekil 7.2. Numune 1.1'in tellürlü kapta oluşturduğu soğuma eğrisi

TE_{low} sıcaklıklarının, TE_{beyaz} sıcaklıklarının altında olması çil oluşumunu başlatan en büyük etkidir. Bir nolu dökümde TE_{low} sıcaklıkları TE_{beyaz} sıcaklıklarının üstünde seyretmesi çil etkisini minimuma çekecektir.

8) Grafit çökeltme miktarı heterojen çekirdeklenmenin artması ile artmaktadır. Termal analizde bu durum GRF1 faktörü olarak gösterilir. Uygulanan aşılamanın etkisi ile çekirdeklenme potansiyeli numune 1.1'de 69 da iken bu değer %37,6 artışla numune 1.4 ü 95 seviyelerine çıkartmıştır.

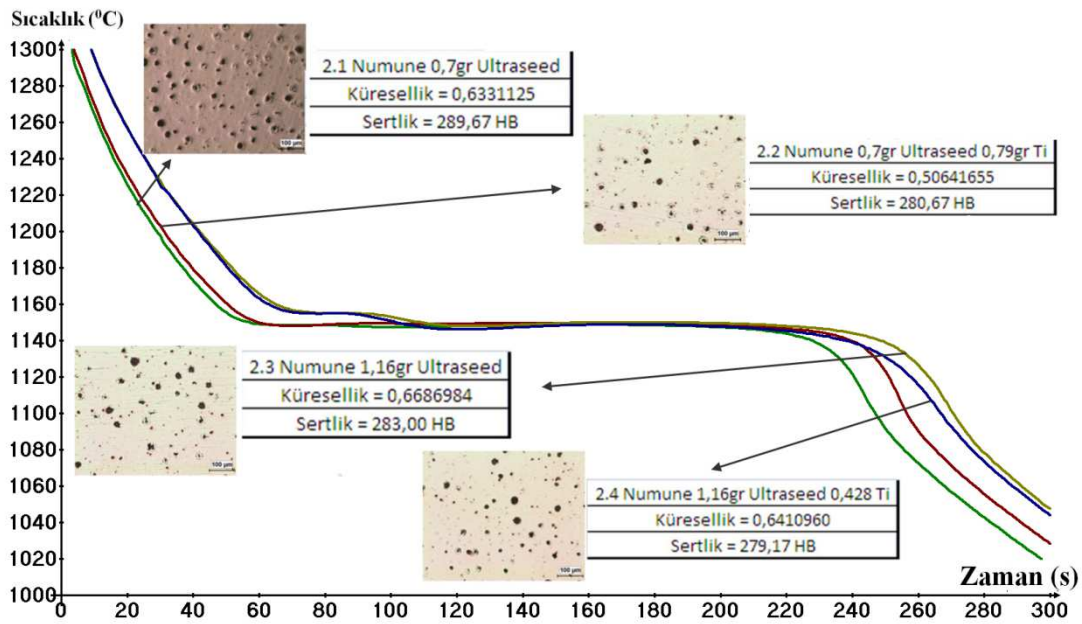
9) Aşılamanın etkisiyle soğuma hızı azalmaktadır. Soğuma hızı eğrisine bakıldığında TS değerinin aşılamanın artmasıyla arttığı anlaşılmaktadır. Numune 1.1'de bu değer -2.72 civarlarındayken aşılamanın etkisiyle TS değeri sırası ile -2.32, -2.45 ve -2.14 seviyesine yükselmiştir (Şekil 6.1).

10) Aşılamanın en önemli avantajlarından bir tanesi yapıda karbür oluşumunu önlemesidir, sertlik değerlerini düşürmesidir. Tablo 6.9 ve Tablo 6.1'e bakıldığında ve sertlik değerleri aşılama miktarının artmasıyla azalmaktadır. Sertlik değeri numune 1.1'de 211 HB iken bu değer sırası ile 201, 205 ve 198HB olarak ölçülmüştür.

11) Her numune görüntü analiz testlerine tabi tutulmuştur. İncelemeler sonucunda aşılama yapılmayan numunede lamel grafitler kalın ve uzun iken aşılama uygulaması yapılan numunelerde lameller kısa ve ince forma dönüşmüşlerdir. Lamel grafitlerde grafit faktör oranı, numune 1.1'de 6,7 iken bu değer aşılama artışı ile beraber sırasıyla 5.29, 5.23 ve 5.14 oranlarına düşmüştür.

7.2. İki Numaralı Dökümde Elde Edilen Sonuçlar

İki nolu dökümde GGG60 normundaki küresel grafitli dökme demirin aşılama ve Titanyum ilavesi sonucu oluşan soğuma eğrisindeki farklılıklar incelenmiş ve oluşan farklılıklar, optik mikroskop görüntüleri, sertlik değerleri ve görüntü analizi verileri ile değerlendirilmiştir. Şekil 7.3'te 2 nolu dökümde elde edilen soğuma eğrileri mikroyapılarıyla beraber gösterilmiştir.



Şekil 7.3. İki nolu dökümde elde edilen soğuma eğrilerinin, mikroyapılarıyla beraber gösterilişi

1) K.G.D.D. üretiminde ötektik kompozisyonun yakalanması önemlidir. Yapılan çalışmalarda iki farklı küreselleştirme işlemi uygulanması sonucu oluşan iki farklı sıvı metal incelenmiştir. 2.1 ve 2.2 nolu numunelerin aktif karbon eşdeğeri 4,3 kompozisyonunda iken 2.3 ve 2.4 nolu numuneler ötektik altı kompozisyonunda ve aktif karbon eşdeğeri 4.17 seviyelerindedir.

2) Ötektik kompozisyona sahip alaşımlarda TL ve TE_{low} sıcaklıkları birbirine eşit olduğu için 2.1 ve 2.2 nolu numunelerde S1 alanı görülmemektedir. 2.3 ve 2.4 nolu numunelerde ise ötektik altı katılama gösterilmiş olup S1 %23 seviyelerindedir (Şekil 6.3).

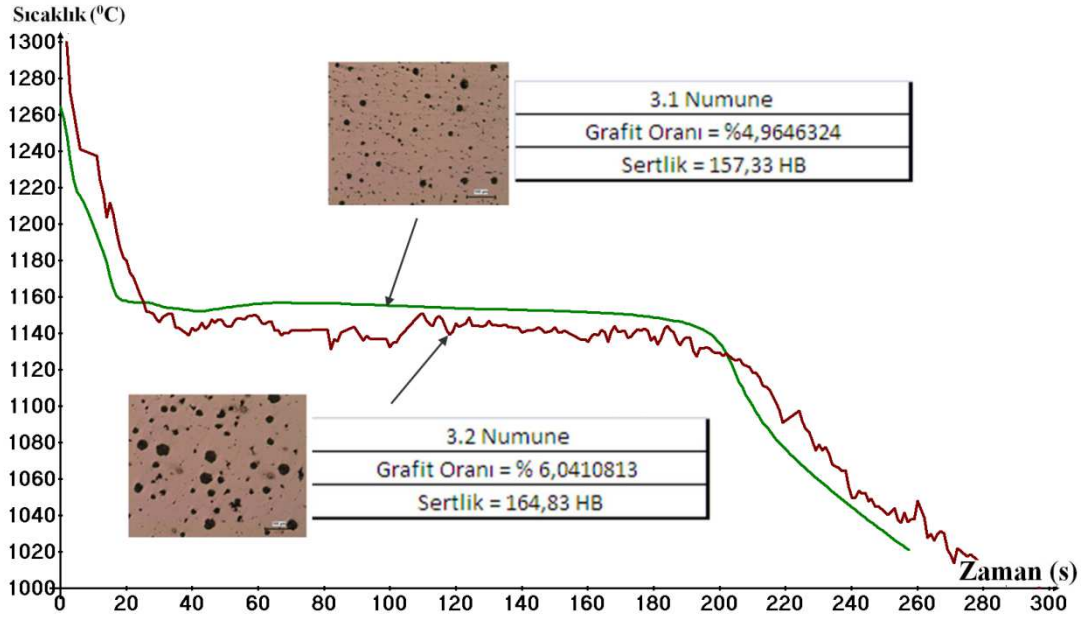
3) Ötektik noktaya yaklaşıldığında primer ostenit oranı azalmakta, serbest grafit miktarı artmaktadır. Tablo 6.2’de gösterildiği gibi Numune 2.1-2.2’de grafit miktarı 6.20 seviyesindeyken bu değer numune 2.3- 2.4 de 5.80 civarındadır.

4) Grafit formunu vermikülere dönüştüren titanyum elementi Numune 2.2 ve 2.4 e farklı miktarlarda ilave edilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri değerlendirildiğinde ortalama %0,6 civarında ilave edilen titanyumun küreselleştirme faktörlerinde düşüşe sebep olmuştur. Numune 2.2’de küresellik 2.1’e göre 0,633’ten %20,6 azalarak 0,506 değerine inmiştir. Numune 2.4’te ise küresellik 2.3’e göre 0,668’ten %4,04 azalarak 0,6410 değerine düştüğü anlaşılmaktadır.

7.3. Üç Numaralı Dökümde Elde Edilen Sonuçlar

Üç nolu dökümde GGG50 normundaki küresel grafitli dökme demirin katılama zamanına karşı soğuma eğrisindeki farklılıklar gözlenmiştir. Meydana gelen farklılıklar, optik mikroskop görüntüleri, sertlik değerleri ve görüntü analizleriyle değerlendirilmiştir. Şekil 7.4’te üç nolu dökümde elde edilen soğuma eğrileri, mikroyapı görüntüleriyle beraber gösterilmektedir.

1) Aktif ve pasif olarak sınıflandırılan karbon, aktif karbon eşdeğerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Malzemenin bünyesinde yer alan serbest grafit, sıvı metalin hangi kompozisyonda katılacağına belirlemektedir. Bu denli belirleyici bir faktör olan grafit, izolasyonsuz olarak dökülen numunede aktif karbon eşdeğerini 4.15 seviyesinde tutarken izolasyonlu olan 3.2 numunesinde bu değer 4.22 dir. Bu farklılığın temel sebebi grafitin serbest halde kalmasıdır. Buda Şekil 7.4’deki mikroyapı görüntüsünden rahatça anlaşılabilir.



Şekil 7.4. Üç nolu dökümde elde edilen soğuma eğrilerinin, mikroyapılarla beraber gösterilişi

2) Deneyde elde edilen soğuma eğrileri karşılaştırıldığında numune 3.1'in likidüs sıcaklığından solidüs sıcaklığına düşme zamanı 183 saniye iken bu değer izolasyon yapılan 3.2 numunesinde 190 saniyeye yükselmiştir. Buna göre izolasyon yapılan 3.2 numunesi daha geç katılaşmıştır.

3) Sıvı metalin erime sıcaklığı altındaki bir sıcaklıkta katılaşması, sıvı içerisinde katı-sıvı arayüzeyi oluşturabilmesi için gerekli enerji ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Bu durumun diğer ismi alt soğumadır. Numune 3.2'deki izolasyonun oluşturulması, sıvı metalin sıcaklığını dışarı atamamasına dolayısıyla katı-sıvı arayüzey oluşturması için $1152,2^{\circ}\text{C}$ den $1136,3^{\circ}\text{C}$ 'ye inmesine sebep olmuştur. Tablo 6.3'e bakıldığında numune 3.1'in alt soğuma değeri $9,1^{\circ}\text{C}$ iken bu değer %174 oranında artış göstererek numune 3.2 de 25°C seviyelerine yükselmiştir.

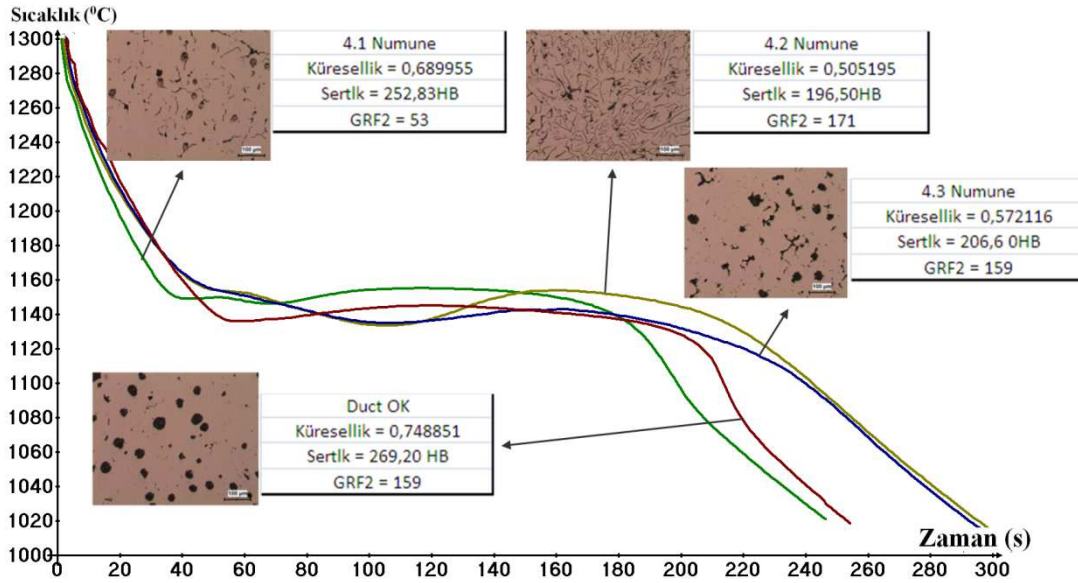
4) Numune 3.2'de alt soğuma değerinin $1152,2^{\circ}\text{C}$ 'den $1136,3^{\circ}\text{C}$ 'ye inmesi grafitin katılaşma isteğini güçlendirmiş. Dolayısıyla gizli ısı 875cal/gr olan karbon elementinin ortama verdiği ısı miktarının birim zamanda artmasına sebep olmuştur. Grafit çökme hızı olarak kabul edilen recalescence değeri numune 3.1 de $4,5^{\circ}\text{C}$ iken bu değer $5,5^{\circ}\text{C}$ seviyesine yükselmiştir.

5) Tablo 6.3'e bakıldığında primer östenit fazı, numune 3.2 de %68 civarlarındayken numune 3.1 de primer ostenit fazı %10 seviyesindedir. Numune 3.2 de oluşturulan izolasyon ötektik başlangıç zamanını ötelemiştir. Numune 3.1'de likidüs sıcaklığından 6 saniye sonra başlayan ötektik reaksiyon, numune 3.2 de 37 saniye sonrasında başlamıştır. Uygulanan izolasyon S1 periyodunu 18 saniyeden 125 saniyeye çıkartmıştır. Östenit fazının %6 çektiği düşünüldüğünde yüksek oranda sıvı çekmeye maruz kalacağı bilinmelidir.

6) Şekil 6.11'de gösterilen mikroyapılara bakıldığında numune 3.1 de ortalama grafit oranı %4,964 seviyelerindeyken izolasyon grafit büyümesine imkan sağlayarak numune 3.3'te bu değeri %6,041 değerine yükseltmiştir. Dolayısıyla nodul sayısı numune 3.1'de 193 iken %31,6 oranında düşerek numune 3.3'te 132 olarak bulunmuştur.

7.4. Dört Numaralı Dökümde Elde Edilen Sonuçlar

Dört nolu dökümde GGG70 normundaki küresel grafitli dökme demirin Mg etkisini bozarak lamel grafitte dönüşümüne neden olan titanyum ve kükürt elementlerinin soğuma eğrisine etkisi araştırılmıştır. Meydana gelen farklılıklar, optik mikroskop görüntüleri, sertlik değerleri ve görüntü analizleriyle değerlendirilmiştir. Şekil 7.5'te dört nolu dökümde elde edilen soğuma eğrileri, mikroyapı görüntüleriyle beraber gösterilmiştir



Şekil 7.5. Dört nolu dökümde elde edilen soğuma eğrilerinin, mikroyapularla beraber gösterilişi

1) Aktif karbon eşdeğerinin belirlenmesinde önemli rol oynayan serbest grafit, kükürt ve titanyum gibi elementlerin ilavesiyle azalmıştır. Kükürt ve titanyum elementi karbonun aktif durumdan pasif duruma geçmesine neden olmuştur. Numune 4.1 de ACEL değeri 4.22 iken ilave edilen kükürtle bu değer 4.2 numunesinde 4.19 seviyesine inmiştir.

2) Termal analizde grafitlerin formlarını belirlemede kullanılan bir önemli parametre GRF2 faktörüdür. Isı iletim katsayısı hesaplanarak bulunan bu parametre, dördüncü dökümde açıkça gözükmemektedir. Numune 4.1 de GRF2 faktör 55 değerindeyken bu değer ilave edilen kükürt ve titanyum etkisiyle küresellikten uzaklaşarak numune 4.2 de GRF2 faktör 171 numune 4.3 te GRF2 faktör 159 seviyelerine gerilemiştir.

3) Küresel grafitli dökme demirden, lamel grafitli dökme değere dönüşürken sertlik değerleri düşmektedir. Numune 4.1'de küresellik 0,69 seviyelerinde iken sertlik değeri 252,83HB dir. Kürelerin lamel dönüşmesi ile numune 4.2'de küresellik 0,50 seviyesine gerilemiş sertlik değeri de %22,2 oranında düşerek 196,5 HB sertliğine düşmüştür.

7.5. Öneriler

Yapılan çalışmada mevcut termal analiz yazılımı ve matematiksel hesaplamaların ortaya koyduğu sonuçlar karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Buna göre şu önerilere yer verilmiştir.

- 1) Sıcaklık zaman grafikleri verilerinin saniye bazında alınması sonuçların hassasiyetini azalmaktadır. Bu oluşturulan soğuma eğrilerinin milisaniye bazında programa aktarılması daha net sonuçların bulunmasına sağlayacaktır.
- 2) Termal analizde kullanılan parametrelerin bazıları açıklanamamıştır. Bunun için daha hassas deney sonuçları ortaya koymak gerekmektedir. Bu konuda daha detaylı çalışmalar yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] ALBAYRAK Ö., Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Porozite Oluşumunun Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs 2001
- [2] EKİNCİ E., Düktil Demirlerde Aşıl原因ının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2009
- [3] KUMRUOĞLU L.C., Lamel Grafitli ve Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Karbon Eşdeğerinin Mekanik Özellikler ve Mikroyapıya Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2003
- [4] ÖZTÜRK Ş., Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağustos 2004
- [5] ELMABROUK O., An Investigation of Compacted Graphite Iron Production by Means of Thermal Analysis Technique and Other Process Control Windows, Doktora Tezi, ODTÜ, Ocak 2007
- [6] ASA Elkem, Graphite Structures in Cast Iron, Norway (2004)
- [7] ASA Elkem, Common Metallurgical Defects in Grey Iron, Norway (2004)
- [8] ASA Elkem, Common Metallurgical Defects in Ductile Iron, Norway (2004)
- [9] VARİNLİOĞLU S., Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi, Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Haziran 2004
- [10] ÇELİK O.N., Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Cu, Ni ve Mo Alaşım Elementlerinin Ostemperleme Sonucu Beynit Oluşumuna Etkisinin İncelenmesi ve Sinirsel Ağ Modeli ile Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs 1996
- [11] MAVİ A., Vermiküler Grafitli Dökme Demirlerde İşlenebilirliğinin Deneysel Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ekim 2008

- [12] TOPTAŞ M., Farklı Isıl İşlemlerin Küresel Grafitli Dökme Demirin Yorulma Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2009
- [13] <http://www.belgeler.com/blg/lid9/17-gri-lamel-grafitli-dokme-demir>, erişim tarihi: Şubat 2010
- [14] <http://www.belgeler.com/blg/lidb/19-kuresel-grafitli-dokme-demir>, erişim tarihi: Şubat 2010
- [15] CEVHER Ö., Dökme Demirlerde Sert Faz Oluşumunun Önlenmesi ve Giderilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağustos 2006
- [16] AVCI Y., Kompakt Grafitli Dökme Demirlerin Döküm Yöntemlerinin Tanımlanması, Metalografik ve Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aralık 2005
- [17] SAĞLAM D., Dökme Demirlerin Aşınma Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağustos 2009
- [18] BAZDAR M., ABBASI H.R., YAGHTIN A.H., RASSIZADEHGHANI J., "Effect of Sulfur on Graphite Aspect Ratio and Tensile Properties in Compacted Graphite Irons, Elsevier Journal of materials Processing Technology, 2009, syf.1701-1705
- [19] ECOB C.M., HARTUNG C., An Alternative Route for the Production of Compacted Graphite Irons, Elkem Foundry Products, ASA, Norway, 2008
- [20] Foseco Ferrous Foundryman's Handbook, syf 36-87, 2000
- [21] MYINT A. M. M. T. Z., LWIN B. K. T., Study on the Effect of Weight Percentage Variation and Size Variation of Magnesium Ferrosilicon Added, Gating System Design and Reaction Chamber Design on Inmold Process, Proceeding of World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 36, syf. 2070-3740, December 2008
- [22] JIYANG Z., Colour Metallography of Cast Iron, China Foundry Vol. 7 No 1 Chapter 3, 2009
- [23] CHISAMERA M., RIPOSAN I., STAN S., ALBU C.B., BREZEANU C., Comparison of Oxy-sulfide Alloy Tablets and Ca-bearing FeSi75 for Late Inoculation of Low Sulfur Grey Irons, American Foundry Society, 2007,
- [24] Heraeus Electro-Nite, Thermal Analysis of Cast Iron, 2006

- [25] UDROIU A., The Use of Thermal Analysis for Process Control of Ductile Iron, Seminarium NovaCast, 2002
- [26] MAMPAEY F., HABETS D., PLESSERS J., SEUTENS F., On line Oxygen Activity Measurements to Determine Optimal Graphite Form During Compact Graphite Iron Production, American Foundry Society, International Journal of Metalcasting, 2010
- [27] ASM Metals Handbook Vol. 15 Casting, 9th Edition syf 1462-1496, 1992
- [28] ÖZEL A., ERTÜRK S.Ö., YALDIZ E., AYDIN C., KUMRUOĞLU L.C., Dökme Demirlerde Termal Analiz Yöntemiyle Besleyicisiz Döküm Limitlerinin Belirlenmesi, 13th International Materials Symposium, 2010
- [29] SILLEN R., Finding the True Eutectic Point (TEP) Essential Task for Efficient Process Control of Ductile Iron, NovaCast Foundry Solutions AB
- [30] SILLEN R., Why Primary Graphite is Bad” CEO, NovaCast Foundry Solutions AB
- [31] SKALAND T., Understanding Ductile Iron Solidification by The Use of Thermal Analysis, Vestas Wind System A/S Windcast Group Kristiansand, Aalen Germany, 2005
- [32] Dataforth Corporation, Practical Termocouple Temperature Measurement, 2000
- [33] GÜL F., ÇETİN M., Küresel Grafitli Dökme Demirin Adhesif Aşınma Davranışı ve Sürtünme Kuvveti Üzerine Borlama Süresine Etkisi, 6th International Advanced Technologies Symposium, 2011

ÖZGEÇMİŞ

Lütfü Cihan AYTAÇOĞLU, 1986 Kocaeli doğumludur. İlköğretimi Yahya Kaptan ilköğretim okulunda, ortaöğretimi Atafen Kolejinde okuduktan sonra 2005 yılında SAÜ Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde eğitimine başlayarak, 2009'da Metalurji ve Malzeme Mühendisi olarak mezun olmuştur. 2009 yılında SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliğinden yüksek lisansa başlamıştır. 2010-2011 yılları arası İntuğ Döküm Sanayi ve Ticaret Limited Sirketine çalışmıştır (Sakarya). Halen SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliğinde yüksek lisans öğrencisidir.