



**ÖSTEMPER ISIL İŞLEMİNİN EN GJS650
FERRİTİK SFERO DÖKME DEMİRİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Demet DEMİR

Yüksek Lisans Tezi

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Serdar Osman YILMAZ
2021**

T.C.

TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÖSTEMPER ISIL İŞLEMİNİN EN GJS 650 FERRİTİK SFERO DÖKME
DEMİRİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Demet DEMİR

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Prof. Dr. Serdar Osman YILMAZ

TEKİRDAĞ-2021

Her hakkı saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÖSTEMPER ISIL İŞLEMİNİN EN GJS 650 FERRİTİK SFERO DÖKME DEMİRİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Demet DEMİR

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Serdar Osman YILMAZ

Bu çalışmada amaç çözeltili sertleştirilmesiyle mukavemetlendirilen ferritik küre grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerine östemper ısıl işleminin etkisini araştırmaktır. Numuneler Y-formunda ASTM A571M'ye göre kum döküm ile üretilmiştir. Optik, taramalı mikroskoplar ve XRD yardımıyla malzemelerin mikroyapısı incelenmiştir. Sertlik, darbe ve çekme testleri yardımıyla numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Darbe testi sonrası kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskopu ile incelenmiştir. Östemper ısıl işlemi sonrası yapıda %70 ferrit ve %30 beyrit oluşumunun en yüksek darbe tokluğu, akma mukavemetini verdiği belirlenmiştir. Mikroyapıdaki ösferrit fazı yapının sünekliği, tokluğu ve uzama kabiliyeti üzerinde olumlu etki oluşturmuştur. Numunelerin mekanik özelliklerinin büyük ölçüde yapıdaki ösferrit ve kalıntı östenit oranına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Çözeltili sertleştirilmesiyle mukavemetlendirilen ferritik küre grafitli dökme demirlerin talaşlı imalatlarının kolay olması endüstriyel ölçekte maliyetleri düşürmektedir. Östemper ısıl işlemi bu tip malzemelerin deformasyon esnasında akma mukavemetlerini uzama kabiliyetlerini matriste bulunan ferritik faz yardımıyla artırır. Isıl işlem mukavemeti artırır ve süneklik bir yapıda oluşan beyrit fazı sebebiyle bir miktar düşer. Yapıda yüksek silis konsantrasyonu karbür oluşumunu engeller ancak çözeltili sertleşmesiyle mukavemet artışını da sağlamış olur. Yüksek akma mukavemetinin yanında diğer avantajlar olarak çok iyi talaşlı izlenebilirliği ekleyebiliriz. Mevcut çalışmada çözeltili sertleşmesi ile mukavemetlendirilen ferritik küre grafitli dökme demirlerde östemper ısıl işlem parametrelerinin mikrosertik, tokluk ve çekme mukavemeti üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Ferritik sfero dökme demir, Katı çözeltili sertleşmesi, Östemper ısıl işlem

2021, 72 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF EFFECT OF AUSTEMPERING HEAT TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF EN GJS 650 FERRITIC SPHERICAL CAST IRONS

Demet DEMİR

Tekirdag Namik Kemal University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Serdar Osman YILMAZ

The aim of this study was to investigate the influence of austempering on the mechanical properties of solution-strengthened ferritic cast ductile irons. The mold was formed in a Y-shaped geometry corresponding to ASTM A571M. The microstructural examinations of the samples were conducted using optical microscopy, scanning electron microscopy, and X-ray diffraction. Hardness, impact, and tensile tests were performed to determine the mechanical features. After the impact test, the fracture surface morphology was analyzed with scanning electron microscopy. The austempering results showed that the matrix structure with 70% ferrite and 30% bainite had the highest fracture toughness and yield strength. The ausferrite phase in microstructure played a positive role in ductility, toughness, and strain rates. The mechanical properties were strongly related to the amounts of ausferrite and retained ferrite ratio. Production of SSF-DI at industrial scale leads to price savings owing to decreased machining costs. Austempered SSF-DI materials have a relatively high yield strength and elongation at failure, depending on the matrix of soft ferritic structure. Heat treatments cause an increase in strength, so ductility decreases because of the structure of the bainite. The silicon content in the microstructure restricts the iron carbide formation in as-cast DI, but it increases the solid solution strengthening. In addition to good yield strength, the other advantages can also be aligned as very good machinability. The present study focused on investigating the influence of austempering parameters on microhardness, toughness features and tensile strength of solid solution-strengthened ferritic (SSF)-DI.

Key words: Ferritic spherical cast iron, Solide solution strengthening, Austempering heat treatment.

2021, 72 pages

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGE DİZİNİ.....	v
ŞEKİL DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	viii
TEŞEKKÜR.....	ix
1. GİRİŞ	10
DÖKME DEMİR.....	11
Dökme Demir Sınıflandırılması	13
Gri (Lamel Grafitli) Dökme Demirler	13
Beyaz Dökme Demirler	14
Temper Dökme Demirler.....	15
Küresel Grafitli (Sfero) Dökme Demirler.....	16
Vermiküler (Kompakt) Grafitli Dökme Demirler.....	16
KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR.....	18
KGDD Tarihi	18
KGDD'lerin Sınıflandırılması	18
KGDD'lerin Mikroyapısı.....	20
Ferrit Küresel Grafitli Dökme Demir Yapı.....	21
Perlit Küresel Grafitli Dökme Demir Yapı	22
Ferritik – Perlitik Küresel Grafitli Dökme Demir.....	23
Martenzitik Küresel Grafitli (Sfero) Dökme Demir	23
Beynitik Küresel Grafitli Dökme Demir.....	24
Östenitik Küresel Grafitli Dökme Demir.....	24
Küresel Grafitli (Sfero) Dökme Demir Üretimi	25
Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretiminde Kullanılan Şarj Malzemeleri	26
Küreleştirme İşlemi.....	26
Aşılama	30
Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları.....	30
Küresel Grafitli (Sfero) Dökme Demire Uygulanan Isıl İşlemler	31
Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir	33

Östempereleme Isıl İşlemi	34
Östemperelemiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları.....	35
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	36
Küresel Grafitli Dökme Demir Malzeme	36
Östempereleme İşlemi	36
Malzeme Özellikleri	38
Çekme Testi	38
Sertlik Testi.....	38
Darbe Testi.....	38
Zımparalama ve Yüzey Parlatma.....	39
Dağlama.....	40
Deneysel Sonuçlar	41
Mikroyapı Değerlendirme	41
Mikrosertlik ve Çekme Testi Sonuçları.....	45
Darbe Testi.....	49
3. SONUÇLAR.....	52
KAYNAKLAR.....	53
EKLER	56
ÖZGEÇMİŞ.....	72

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 1.1. Dökme demir türlerinin malzeme özelliklerinin karşılaştırılması	17
Çizelge 1.2. TS 526/1977'e göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	19
Çizelge 1.3. Alman standartları (DIN 1693)	19
Çizelge 1.4. ASTM, A 536-70 standardı	20
Çizelge 1.5. KGDD'lerin çeşitleri ve mikroyapıları.....	20
Çizelge 1.6. Tipik Mg küreselleştirme alaşımları ve kullanılan işlem yöntemleri.....	27
Çizelge 1.7. Dövme çelik, KGDD ve ÖKGDD'in mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.....	34
Çizelge 2.1. Kimyasal bileşim	36
Çizelge 2.2. Çözelti ile güçlendirilmiş ferritik dökme demirin östemperleme parametreleri....	37



ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 1.1. Fe-C diyagramı.....	11
Şekil 1.2. Dökme demir alaşımlarında karbon ve silisyum içerik aralıkları	12
Şekil 1.3. Gri dökme demir mikroyapısı a) Ferritik, x100, b) Perlitik, x500	14
Şekil 1.4. Dendritik desenli beyaz dökme demir, x100.....	15
Şekil 1.5. a) Perlitli temper döküm, x500, b) Menevişli martenzit, x500.....	15
Şekil 1.6. a) Dağlanmış perlitik küresel grafitli (sfero) dökme demir, x100, b) Parlatılmış küresel grafitli (sfero) dökme demir, x100	16
Şekil 1.7. Vermiküler (kompakt) grafitli dökme demir, x250	16
Şekil 1.8. Küresel grafitli (sfero) dökme demir mikroyapılarının şeması.....	21
Şekil 1.9. Ferritik yapı, x200	22
Şekil 1.10. Perlit yapı mikroyapı görüntü, x100.....	22
Şekil 1.11. %50 perlitik %50 ferritik yapı, x100	23
Şekil 1.12. Temper ısıtma işlem görmüş martenzitik küresel grafitli dökme demir, x100.....	24
Şekil 1.13. Östenitik küresel grafitli dökme demir, x100.....	24
Şekil 1.14. Küresel grafitli dökme demirin üretim şeması	25
Şekil 1.15. Küresel grafitli dökme demirin üretiminde açık pota yöntemi	28
Şekil 1.16. Sandviç potası yönteminin gösterilişi	28
Şekil 1.17. Daldırma yönteminin gösterilişi	29
Şekil 1.18. Fischer dönüştürücüsünün çalışma prensibi a) Geminin doldurma pozisyonu, b) Geminin işlem pozisyonu	29
Şekil 1.19. Küresel grafitli (sfero) dökme demirlere uygulanan farklı ısıtma işlemleri	32
Şekil 1.20. Mekanik özelliklerin karşılaştırılması.....	33
Şekil 1.21. Geleneksel östempereleme ısıtma işleminin şematik gösterimi	35
Şekil 2.1. Çekme test cihazı	38
Şekil 2.2. Darbe tokluğu test cihazı	39
Şekil 2.3. Yüzey parlatma makinesi.....	39
Şekil 2.4. Parlatma öncesi (a) ve sonrası numune yüzeyleri (b)	40
Şekil 2.5. S1, S4, S6, S9, S12 numunelerinin farklı sıcaklıklarında östempereleme işlemi sonrası mikroyapıları	41
Şekil 2.6. S1(a), S4(b), S6(c), S9(d), S12(e) numunelerinin SEM mikroyapıları.....	42
Şekil 2.7. Döküm numunesinin XRD şekli	43
Şekil 2.8. S2, S8, S14 numunelerinin XRD şekli.....	44
Şekil 2.9. Östempereleme sıcaklığının östenitik karbon üzerindeki etkisi	44
Şekil 2.10. Test numunelerinin mikrosertlikleri	45
Şekil 2.11. Numunelerin çekme test sonuçları.....	46
Şekil 2.12. Ösferrit sıcaklığı ve % uzama arasındaki ilişki	47
Şekil 2.13 (a) Asiküler ferrit plaka çekirdeklenmesi, (b) Asiküler ferrit-bainit çekirdeklenmenin şematik sunumu.....	49
Şekil 2.14. Numunelerin darbe direncinin +40/-40 °C sıcaklık aralığında değişimi.....	50
Şekil 2.15. Numune 6'nın kırılma yüzey sonuçları (a) +30°C, (b) -30°C.....	51
Şekil 3.1. Isıtma işlemsiz numunenin östempereleme sıcaklıklarında çekme mukavemetleri.....	56
Şekil 3.2. Isıtma işlemsiz numunenin östempereleme sıcaklığında % uzama değerleri	56
Şekil 3.3. 420°C'de SEM kırık yüzey görüntüleri	57
Şekil 3.4. 520°C'de SEM kırık yüzey görüntüleri	57
Şekil 3.5. 620 °C'de SEM kırık yüzey görüntüleri	58

Şekil 3.6. S3 numunesinin optik resim görüntüleri a) 5x, b) 10x, c) 20x, d) 50x, e) 100x, f) 1000x	58
Şekil 3.7. S4 numunesinin optik mikroskop görüntüleri a) 5x, b) 10x, c) 20x, d) 50x, e) 100x	59
Şekil 3.8. S5 numunesinin optik mikroskop görüntüleri a) 5x, b) 10x, c) 20x, d) 50x, e) 100x, f) 1000x	59
Şekil 3.9. S6 numunesinin optik mikroskop görüntüleri a) 5x, b) 10x, c) 20x, d) 50x, e) 100x, f) 1000x	60
Şekil 3.10. S7 numunesinin optik mikroskop görüntüleri a) 5x, b) 10x, c) 20x, d) 50x, e) 100x	60
Şekil 3.11. S8 numunesinin optik mikroskop görüntüleri a) 5x, b) 10x, c) 20x, d) 50x, e) 100x	61
Şekil 3.12. Sreferans numunesinin optik mikroskop görüntüleri a) 5x, b) 10x, c) 20x, d) 50x, e) 100x	61
Şekil 3.13. S3 numunesinin SEM görüntüleri	62
Şekil 3.14. S4 numunesinin SEM görüntüleri	63
Şekil 3.15. S5 numunesinin SEM görüntüleri	64
Şekil 3.16. S6 numunesinin SEM görüntüleri	65
Şekil 3.17. S7 numunesinin SEM görüntüleri	66
Şekil 3.18. S8 numunesinin SEM görüntüleri	67
Şekil 3.19. Sreferans numunesinin SEM görüntüleri	68
Şekil 3.20. Numunelerin sertlik grafiği	69
Şekil 3.21. S1 numunesinin XRD grafiği	70
Şekil 3.22. S4 numunesinin XRD grafiği	70
Şekil 3.23. S6 numunesinin XRD grafiği	71
Şekil 3.24. S7 numunesinin XRD grafiği	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

μm	: Mikrometre
SSF	: Çözelti ile güçlendirilmiş ferritik dökme demir
Fe-C	: Demir-Karbon
Fe ₃ C	: Sementit
Cr	: Krom
Si	: Silisyum
Fe	: Demir
C	: Karbon
Ce	: Seryum
Mg	: Magnezyum
Mn	: Manganez
S	: Kükürt
P	: Fosfor
Cu	: Bakır
ÖKGDD	: Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir
INCO	: Uluslararası Nikel Şirketi
BCIRA	: İngiliz Dökme Demir Araştırma Derneği
TSE	: Türk Standardları Enstitüsü
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
DDK	: Küresel grafitli dökme demir (TSE)
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca desteğini asla esirgemeyen, her türlü konuda bana destek olan saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Serdar Osman YILMAZ'a ve tüm desteği olan Makine Mühendisliği Bölümü ekibine çok teşekkür ederim.

Tez çalışması kapsamında her türlü imkanı sunan SIO Automotive Taşıt Yedek Parça A.Ő. yöneticilerine ve destek veren tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde üzerimde her zaman emeği olan, her koşulda maddi manevi desteklerini esirgemeyen, verdiğim kararlarda arkamda duran aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz, 2021

Demet DEMİR
Makine Mühendisi

1. GİRİŞ

Milattan öncesine dayanan, uzun bir geçmişe sahip olan dökme demirler ülkemizde de uzun zamandır kullanılmaktadır. Dökme demirlerin türleri teknolojinin gelişmesiyle, kalite ve mekanik özellikleri ısıt işlemlerle artmıştır.

Dökme demir çeşidi olan küresel grafitli dökme demirler, çeliğin mühendislik üstünlükleri ile gri dökme demirin üretim kolaylığını birleştirir. Küresel grafitli dökme demirlere uygulanan ısıt işlemler sayesinde; yüksek dayanım, tokluk, süneklik, sıcak işlenebilirlik gibi çeliğe benzer özellikler ayrıca iyi aşınma direnci, iyi akışkanlığı ve çok iyi talaşlı işlenebilirliği ile endüstriyel uygulamalar için vazgeçilmez bir hal almıştır.

Küresel grafitli dökme demirlerin harika mühendisliklerinin sebebi yapısında bulunan küresel şekilli grafitleridir. Alaşımız küresel grafitli (sfero) dökme demirin içerisinde %1.8 ila %2.8 silisyum ve %3-4 karbon oranı gri dökme demir ile aynıdır. En yüksek %0.03 kükürt ve %0.1 fosfor oranı yüksek kaliteli küresel grafitli dökme demir için olmalıdır. Bu kükürt ve fosfor oranı gri dökme demirdeki miktardan on katı daha azdır.

Günümüzde özellikle otomotiv sektöründe küresel grafitli (sfero) dökme demirler tercih edilip, başarıyla kullanılmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle, küresel grafitli (sfero) dökme demirin mekanik özelliklerinde geliştirme yolları aranmıştır. Fakat henüz grafitte küreselden başka bir morfoloji kazandırmanın dışında bir yol olmadığı farkedilince, araştırmacılar mekanik özellikleri, iç yapı modifikasyonu ile geliştirmek için çalışmalara yönlendirmiştir (Akroy, 2007).

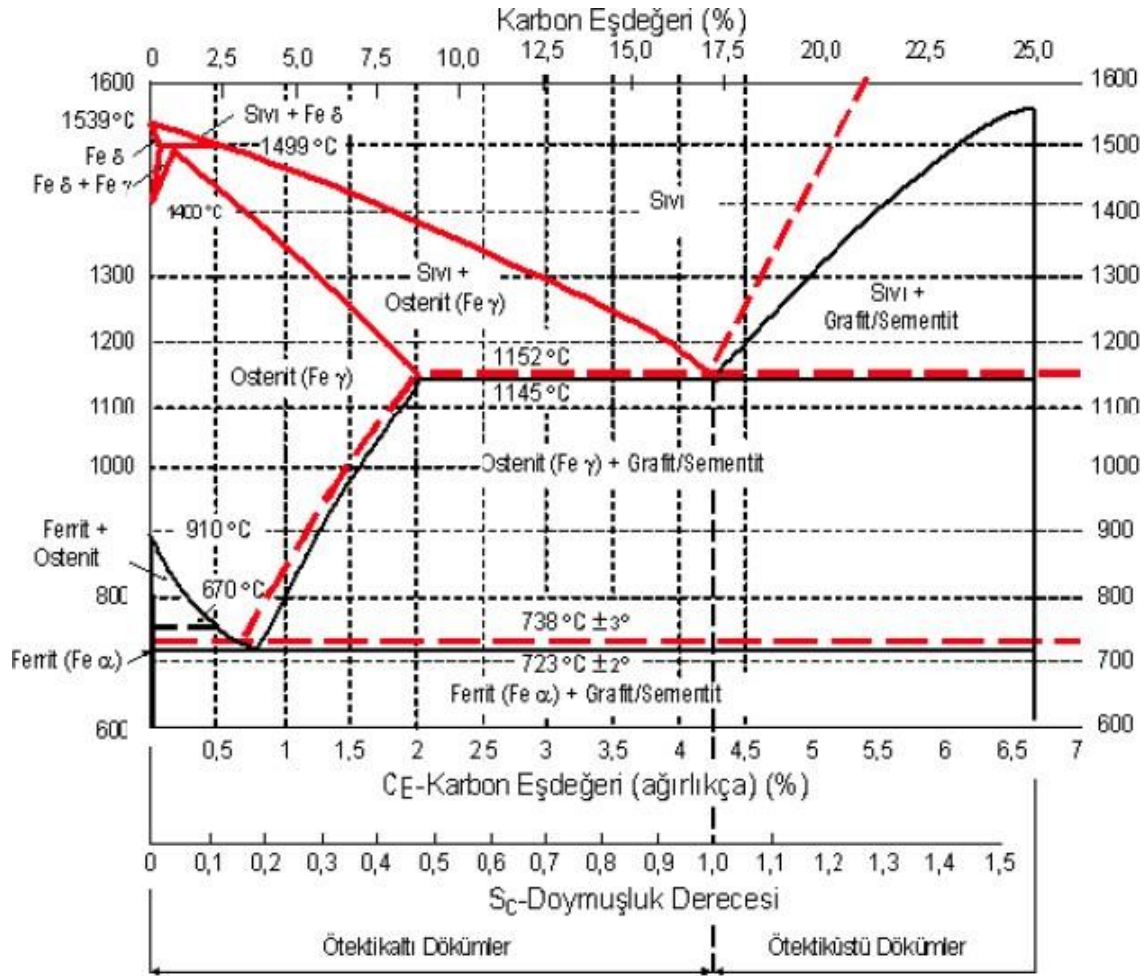
Son dönemlerde üretimi en hızlı artan dökme demir malzeme ısıt işlemin küresel grafitli (sfero) dökme demirlere uygulanması ile beynitik mikroyapı özelliği kazandırılarak birçok alanda kalite çeliklerinin yerine kullanılması mümkün olan östemperlenmiş küresel grafitli (sfero) dökme demirler geliştirilmiştir (Akroy, 2007; Yıldız, 2006).

Küresel grafitli (sfero) dökme demir alaşımlarının kullanım alanları; dişli kutuları, hadde silindirleri, pistonlar, krank milleri, soğuk dökülebilir borular, fırın kapıları, vanalar olarak söylenebilir.

DÖKME DEMİR

Dökme demir, çelik terimi gibi, büyük bir demir alaşımları ailesini tanımlar. Dökme demir, çelikten daha yüksek karbon ve silisyum içeriğine sahiptir. Daha yüksek karbon içeriği nedeniyle, dökme demirin yapısı çeliğe göre daha zengin bir karbon fazı sergiler (ASM Specialty Handbook Cast Iron 1996).

Dökme demirler; geniş aralıkta değişen mukavemetleri, korozyon direnci, sertlik, aşınma dayanıklılığı ve titreşimleri yutma gibi özellikleriyle çok geniş kullanım alanına sahiptirler (Çolak, 2019).



Şekil 1.1. Fe-C diyagramı (Öztürk, 2019)

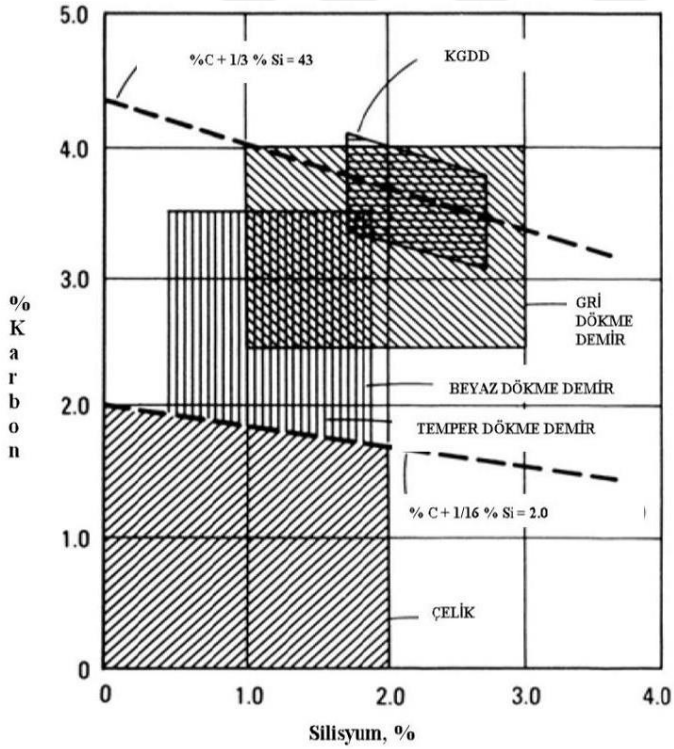
Fe-C diyagramında dökme demirler %2 ile %6.67 aralığında gösterilirler. Fe-C diyagramı Şekil 1.1’de gösterilmiştir (Öztürk, 2019).

Silisyum, karbon ve fosfor gibi elementlerin her biri katılma sıcaklığını ve ötektik bileşimini değiştirir ve bu da dökme demirin mekanik özelliklerini etkiler. Bu etkinin seviyesi karbon eş değeri olarak tanımlanan parametre ile hesaplanabilir (Yürektürk, 2018).

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (1.1)$$

Alaşımın karbon eş değeri ötektik (%4.3), ötektik altı (<%4.3) veya ötektik üstü (>%4.3) bileşiminde olup olmadığı öğrenilir. Optimum kompozisyon aralığı hakkında rehberlik sağladığı için karbon eş değeri döküm davranışı için yararlı bir kılavuzdur. Mekanik özellikler ve dökülebilirlik açısından ötektige yakın olması arzu edilir (Yürektürk, 2018).

Dökme demirlerde en önemli alaşım elementleri olan karbon ve silisyumun önerilen bileşim aralığı ve sınır şartları Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2. Dökme demir alaşımlarında karbon ve silisyum içerik aralıkları (Yürektürk, 2018)

Dökme Demir Sınıflandırılması

Dökme demirlerde katılma sırasında karbon miktarı ayrışır ve mikroyapıda ayrı bir eleman olarak görülür. Karbonun iç yapıda oluşturduğu büyüklük, dağılım ve şekil dökme demirin özelliklerine etki etmektedir. Malzemenin üretim yöntemi, kimyasal kompozisyonu, soğuma hızı, üretimin akabinde uygulanan ısı işlem metodu gibi değişkenler dökme demirlerde değişik grupların oluşumunu sağlar (Çolak, 2019).

Dökme demirler karbonun iç yapıda bulunma şekline göre; gri (lamel grafitli) dökme demir, temper dökme demir, beyaz dökme demir, vermiküler (kompakt grafitli) dökme demir ve küresel grafitli dökme demir olmak üzere beş gruba ayrılabilir.

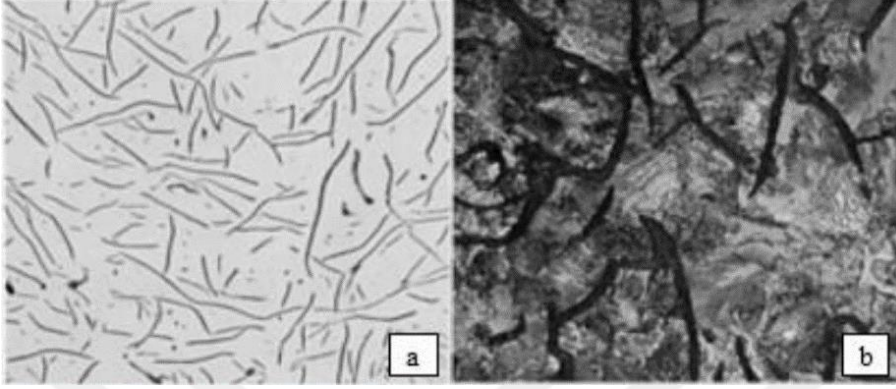
Gri (Lamel Grafitli) Dökme Demirler

Gri (lamel grafitli) dökme demirler en çok kullanılan dökme demir türüdür. Genellikle %2.5-4 C içerirler ve ötektik üstü alaşımlardır. Bileşimindeki karbonun büyük çoğunluğu lamel benzeri grafitlere sahiptir.

Gri dökme demirler, mikroyapılarına (yani ferrit perlit oranı) göre daha da alt kategorilere ayrılabilir. Bununla birlikte, tüm gri dökme demirler lamel benzeri grafitlere sahiptir. Bu grafitler, demir matrisine göre önemli bir gerilme mukavemetine sahip olmadıklarından, mikro boşluklar olarak düşünülebilirler. Çentik etkisi olarak bilinen bu durum malzemeyi kırılgan hale getirir. Bu mekanik kusurlar nedeniyle, gri dökme demirlerin çekme dayanımı, çekme yüklemesinin gerekli olduğu uygulamalar için yeterli değildir. Bununla birlikte, lamel grafitli dökme demirin temel avantajı, yüksek ısı iletkenliği (55 W/m.K) ve grafitlerin titreşim sönümlenme kapasitesinden kaynaklanmaktadır. Motor blokları gibi ısı birikimi olmayan malzeme boyunca düşük termal gradyan gerektiren uygulamalar için lamel grafitli dökme demirler uzun yıllardır en iyi ve ucuz çözümlerden biridir.

Gri dökme demirlerle ilgili bir diğer durum, kimyasal bileşimi değiştirmeden ancak mikroyapısını değiştirmeden ayarlanabilir mukavemet değerlerinin avantajıdır. Bu, eriyik içerisine çok az bakır veya kalay eklenerek veya soğutma oranını hızlandırarak yapılabilir. Döküldükten sonra perlitik mikroyapı elde edilebilir. Şekil 1.3'te gösterilmiştir.

Yaygın olarak bilinen Alman Standartlar Enstitüsü (Deutsches Institut für Normung - DIN) standartları, GG-30, GG-60 gibi gri dökme demir kalitelerini gösterir; burada iki G, malzemelerin gri demir olduğunu ve iki basamaklı sayı, malzemenin minimum gerilme mukavemetini belirtir (Özdemir, 2016).

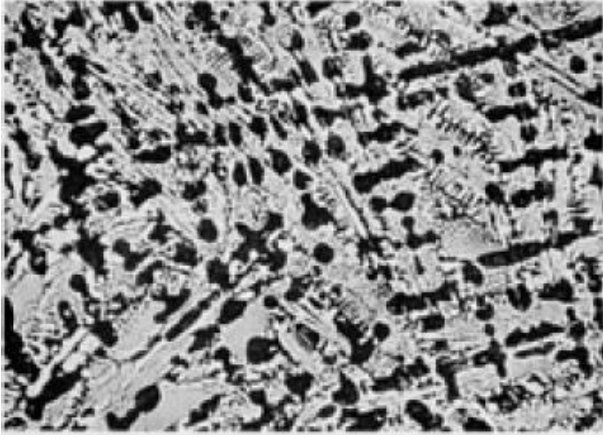


Şekil 1.3. Gri dökme demir mikroyapısı a) Ferritik, x100, b) Perlitik, x500 (Öztürk, 2016)

Beyaz Dökme Demirler

Beyaz dökme demirler, özel beyaz kırılma yüzeylerinin adını almıştır. Renk, kırılmanın meydana geldiği demir karbür plakalardan kaynaklanır. Dökme demir ailesindeki tek grafitik olmayan malzemedir. Beyaz ve gri dökme demir arasındaki fark, esas olarak soğutma oranlarından kaynaklanmaktadır. Beyaz dökme demirin daha hızlı soğuma hızları grafit oluşumuna izin vermez çünkü karbon atomları serbestçe dağılamaz. Şekil 1.4'te gösterilmiştir.

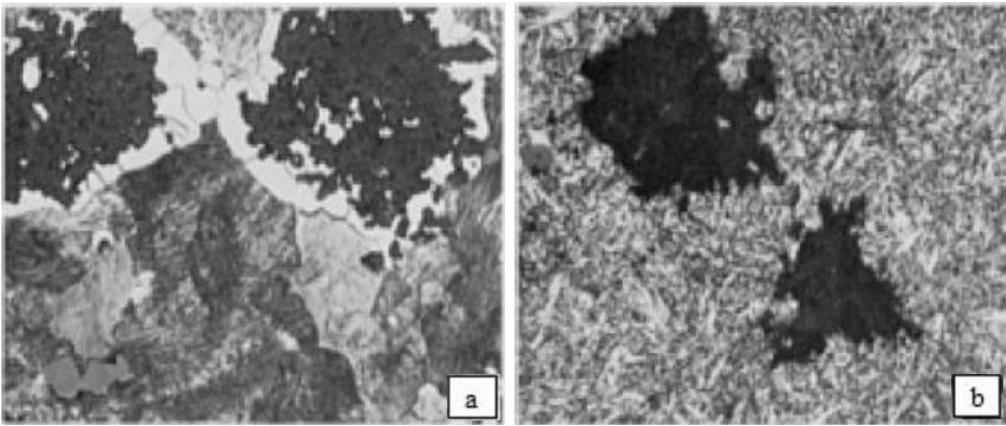
Beyaz dökme demirin temel alaşım elementlerinden biri Cr'dir. Mükemmel bir karbür oluşturunca ve bu nedenle grafit yerine perlit oluşumunu artırır. Öte yandan Si, grafit destekleyici özelliğinden dolayı beyaz demir üretiminde istenmez. Mikroyapı yüksek miktarda demir karbür içerdiğinden, malzemenin sünekliği neredeyse sıfırdır. Bununla birlikte, karbürlerin üstün sertliği sayesinde beyaz dökme demirlerin aşınma direnci mükemmeldir. Cevher öğütme değirmenleri gibi zorlu koşullarda çalışan bazı alaşımlar için krom içeriği %25 kadar yüksek olabilir (Özdemir, 2016). Şekil 1.4'te siyah bölgeler östenit, beyaz bölgeler karbür olan bir dendritik desenli beyaz dökme demiri göstermektedir.



Şekil 1.4. Dendritik desenli beyaz dökme demir, x100 (Özdemir, 2016)

Temper Dökme Demirler

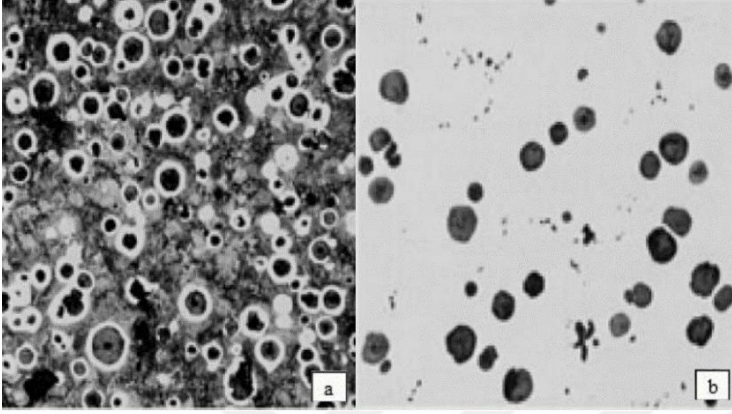
Temper dökme demirler, esasen ısı işlem görmüş beyaz dökme demirlerdir. Malzemenin belirli bir süre boyunca yüksek sıcaklıklarda tavlınması, karbon atomlarının dağılmasına fırsat verir ve grafit oluşturur. Ortaya çıkan malzeme mikroyapısı, düşük karbonlu matris ve bir şekilde düzensiz kör sınırlara sahip yumrulu benzeri grafitlerden oluşur. Şekil 1.5'te gösterilmiştir. Bu özel grafitler genellikle tavlınmış grafitler olarak adlandırılır. Beklendiği gibi sünek bir malzemedir ve mekanik özellikler yumuşak çeliklerle uyumlu olabilir. Plastik şekillendirme yöntemleri ile şekillendirilebilirler (Özdemir, 2016).



Şekil 1.5. a) Perlitli temper döküm, x500, b) Menevişli martenzit, x500 (Özdemir, 2016)

Küresel Grafitli (Sfero) Dökme Demirler

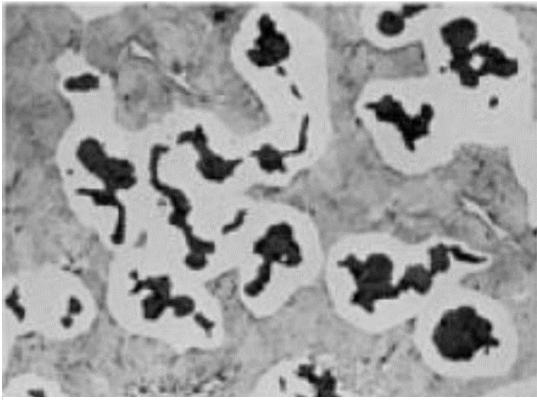
Sfero, nodüler, duktül veya küresel grafitli dökme demir olarak adlandırılan dökme demir grubudur. Soğutma hızı ve ısııl işleme göre KGDD mikroyapısı, ferrit, perlit, martenzit veya bainit olarak matris içinde dağılan lamel grafit yerine küresel grafit içermektedir (Hammamı, 2019). Şekil 1.6'da parlatılmış ve dağlanmış küresel grafitli dökme demir görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 1.6. a) Dağlanmış perlitik küresel grafitli (sfero) dökme demir, x100, b) Parlatılmış küresel grafitli (sfero) dökme demir, x100 (Hammamı, 2019)

Vermiküler (Kompakt) Grafitli Dökme Demirler

Vermiküler (kompakt) grafitli dökme demirler, küresel grafitli (sfero) dökme demirin üretim sırasında yapılan küreselleştirme işlemlerinde aşılama elementi olan manganın az eklenmesi ile grafitler küresel hala gelemeyerek, yapının lamel-küresel bir yapı arasında oluşması ile elde edilmektedir (Sevgi, 2019).



Şekil 1.7. Vermiküler (kompakt) grafitli dökme demir, x250 (Sevgi, 2019)

Mekanik özellikleriyle küresel grafitli (sfero) dökme demirlere yakın, gri dökme demirlere kıyasla daha iyi olan vermiküler grafitli dökme demirlerin ısı iletkenliği gri dökme demir kadar olsa da küresel grafitli dökme demire göre daha yüksektir. Bu nedenle yüksek dayanım ve ısı iletkenliğinin istenmesi durumlarında ısıl şok dayanımları nedeniyle günümüzde üretimleri ve kullanım yerleri giderek artmıştır. Çizelge 1.1’de dökme demir türlerinin karşılaştırılması gösterilmiştir. Egzoz manifoldları, dizel motor silindir kapakları ve hadde merdaneleri gibi pek çok kullanım alanına sahiptir (Sevgi, 2019).

Çizelge 1.1. Dökme demir türlerinin malzeme özelliklerinin karşılaştırılması (Sevgi, 2019)

Özellikler	%0.3 C’lu Çelik Döküm	Gri Dökme Demir	Temper Dökme Demir	Beyaz Dökme Demir	KGDD
Üretim maliyeti	4	1	3	2	2
Titreşim sönümlenme	4	1	2	5	2
Elastisite modülü	1	3	2	-	1
Aşınma direnci	5	3	4	1	2
Dökülebilirlik	5	1	2	3	1
Yüzey sertleştirilebilirliği	3	1	1	-	1
Korozyon direnci	4	1	2	5	1
Dayanım/ağırlık oranı	3	5	4	-	1
Darbe direnci	1	5	3	-	2

1 En iyi	2 →	3 →	4 →	5 En kötü
-------------	--------	--------	--------	--------------

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR

KGDD Tarihi

Nodüler, sfero veya küresel grafitli dökme demir olarak adlandırılan tür dökme demir ailesine yeni bir soluk getirmiş, 1948'de patenti alınmış olarak bilinir. On yıllık yoğun geliştirme çalışmalarından sonra, 1950'ler ve 1960'lı yıllarda sfero döküm mühendislik malzemesi olarak kullanımındaki olağanüstü artışa sahip olup, ticari uygulamalardaki hızlı artışı bugün de devam etmektedir (Sahoo, 2012).

Küresel grafitli dökme demirler ergimiş haldeki demir-karbon-silisyum alaşımına karbonun yaprağımsı lamelden küre şekline dönüşmesini sağlamak için belli miktarlarda magnezyum ya da seryum eklenerek elde edilir. Kontrol edilebilir döküm teknolojisi ve düşük maliyet yüksek mukavemet oranıyla bu dökme demir çeşidinin kullanım oranını arttırmıştır. (Demirlek, 2013; Göksu, 2018)

KGDD'lerin Sınıflandırılması

Küresel grafitli (sfero) dökme demirler iki yöntem ile elde edilmektedir. Bunlar:

1. Uluslararası Nikel Şirketi (International Nickel Company - INCO) yöntemi
2. İngiliz Dökme Demir Araştırma Derneği (British Cast Iron Research Association - BCIRA) yöntemi

Grafitlerin matris içerisinde küre halinde oluşabilmesi için INCO yönteminde sıvı demire magnezyum ilavesi, BCIRA yönteminde ise Ce sıvı demire ilave edilerek yapılır.

Küresel grafitli (sfero) dökme demirler çeşitli normlara göre sınıflandırılmaktadır. Türk Standartları Enstitüsüne (TSE) göre sınıflandırılması Çizelge 1.2'de verilmiştir. Dökme demir küresel grafitli anlamına DDK işareti gelmektedir ve DDK işaretini takip eden sayılar minimum çekme dayanımını gösterir (Akroy, 2007; Yıldız, 2014).

Çizelge 1.2. TS 526/1977'e göre küresel grafitli (sfero) dökme demirlerin sınıflandırılması (Akroy, 2007)

Sınıf	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Sertlik (BSD)	Uzama (%)	Mikroyapı
DDK 40	280	400	140-201	12	Daha çok ferrit
DDK 50	350	500	170-241	7	Ferlit-perlit
DDK 60	400	600	192-269	3	Perlit-ferrit
DDK 70	450	700	2	229-302	Daha çok perlit
DDK 80	500	800	2	248-352	Perlitik
DDK 35.3	220	350	22	-	Ferritik
DDK 40.3	240	400	18	-	Ferritik

Küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması Alman DIN standardında TSE sınıflandırmasına benzemekte ancak işareti GGG olarak Çizelge 1.3'de verilmektedir.

Çizelge 1.3. Alman standartları (DIN 1693) (Akroy, 2007)

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

ASTM, A-536-70 standardında ise minimum çekme dayanımı, minimum akma gerilmesi, MPa olarak ve minimum % uzamayı gösteren rakamlar sınıflandırma işareti olarak kullanılır. Çizelge 1.4'de verilmiştir.

Çizelge 1.4. ASTM, A 536-70 standardı (Yıldız, 2014)

Sınıf	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
60-40-18	400	600	18
GGG-50	450	650	12
GGG-60	550	800	6
GGG-70	700	1000	3
GGG-80	900	1200	2

Çizelge 1.5’de Küresel grafitli (sfero) dökme demirlerin çeşitleri ve bunların mikroyapıları görülmektedir.

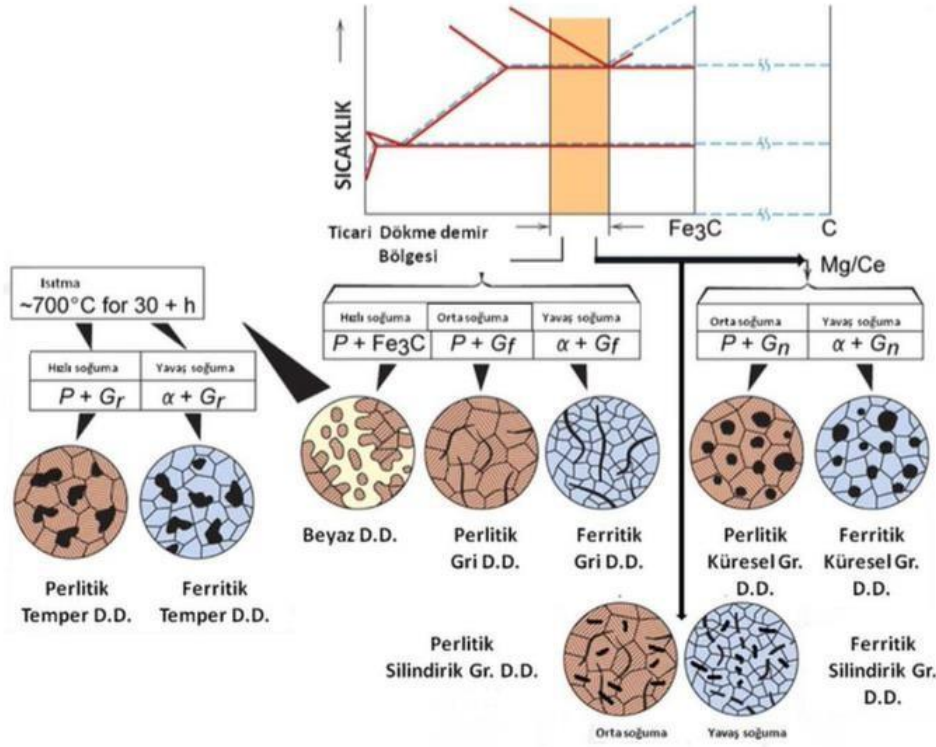
Çizelge 1.5. Sfero dökme demirlerin çeşitleri ve mikroyapıları (Yıldız, 2014)

Malzeme Türü	GGG400	GGG500	GGG60	GGG70	GGG80
Mikroyapı	FERRİTİK	←			PERLİTİK

KGDD’lerin Mikroyapısı

Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri, tamamen ferritik, tamamen perlitik veya ferrit ve perlitin matris içinde sfero grafit ile bir kombinasyonu olabilen mikroyapılarıyla doğrudan ilgilidir. Bu mikroyapısal özellikler, büyük ölçüde, dökümlerin ve alaşım elementlerinin kesit boyutu ile ilgili olan kimyasal bileşime ve katılaşma-soğuma hızına bağlıdır.

Küresel grafitli (sfero) dökme demirlerde hem döküm işlemi hem de sonrasında uygulanan ısı işlemler ile farklı iç yapılarda elde edilmesi sağlanabilir. Küresel grafitli (sfero) dökme demirin mikroyapıları şematik gösterimi Şekil 1.8’de gösterilmektedir (Yürektürk, 2018).



Şekil 1.8. Küresel grafitli (sfero) dökme demir mikroyapılarının şeması (Yürektürk, 2018)

Ferrit Küresel Grafitli Dökme Demir Yapı

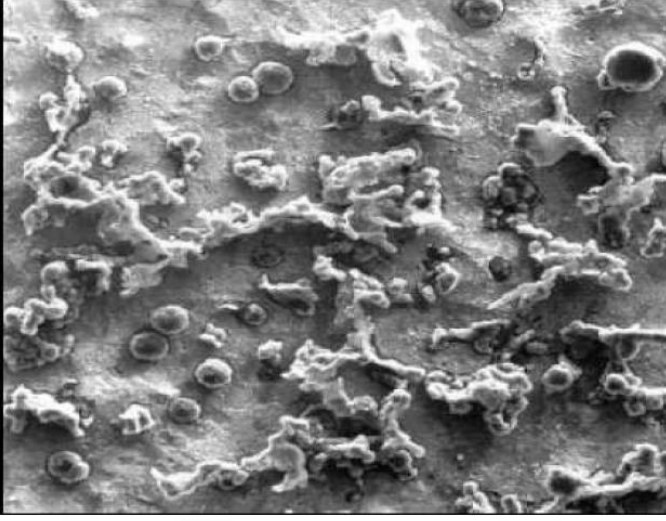
Ferrit faz, az miktarda çözünmüş karbon içeren demirdir. Bu yapı tek başına ele alınıp mekanik değerleri ölçüldüğünde yaklaşık 280 MPa dayanıma ve 80 HB sertliğe sahip, üstün özellikler sergileyen bir faz değildir. Bu nedenle dökme demirin ferritik bir yapıya sahip olması, malzemenin yüksek bir sünekliğe ve tokluğa fakat düşük dayanım ve sertliğe sahip olacağını gösterir (Yılmaz, 2019).

Ferritik küresel grafitli (sfero) dökme demir elde etmenin üç yolu bulunmaktadır.

Bunlar;

- Sıvı dökme demire, uygun miktarda ağırlığına göre Mg alaşımı eklemek
- Perlitik küresel grafitli (sfero) dökme demire ısıtma işlemi uygulamak
- Sıvı küresel grafitli (sfero) dökme demirin katılaşmasını çok yavaş bir şekilde sağlamak (Karamusaoğlu, 2009).

Şekil 1.9’da ferritik küresel grafitli dökme demirlerin yapısı görülmektedir.



Şekil 1.9. Ferritik yapı, x200 (Karamusaoğlu, 2009)

Perlit Küresel Grafitli Dökme Demir Yapı

Perlit fazı içerisinde sementit ve ferritin karışımı olup, bu iki fazın oldukça ince katmanlar halinde sıralanması ile ortaya çıkar. Perlit tek faz olarak değil, iki fazın katmanlı karışımı olarak değerlendirmek gerekir.

Perlit içerisindeki grafit kürecikler, yüksek dayanım, iyi aşınım direnci, darbe direnci ve ortalama süneklik kazandırır. Benzer mekanik özelliklere sahip çeliklere göre işlenebilirliği oldukça iyidir (Yılmaz, 2019). Şekil 1.10’da perlit yapı görülmektedir.



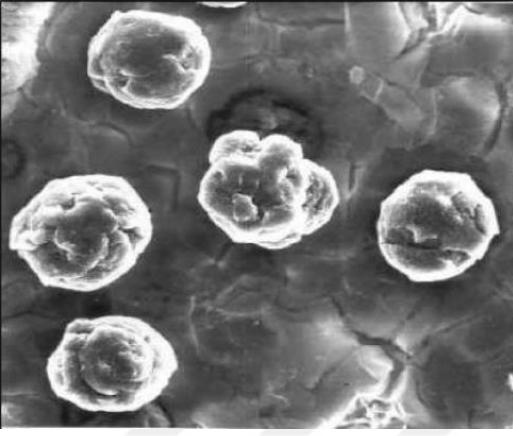
Şekil 1.10. Perlit yapı mikroyapı görüntü, x100 (Karamusaoğlu, 2009)

Ferritik – Perlitik Küresel Grafitli Dökme Demir

En yaygınlaşmış küresel grafitli dökme demir türüdür. Grafit küreler hem ferrit hem de perlit içeren mikro yapı içerisinde dağılmış halde bulunur. Genellikle döküm yoluyla elde edilir.

Mekanik özellikleri ferritik ve perlitik küresel grafitli dökme demirlerin arasındadır (Karamusaoğlu, 2009).

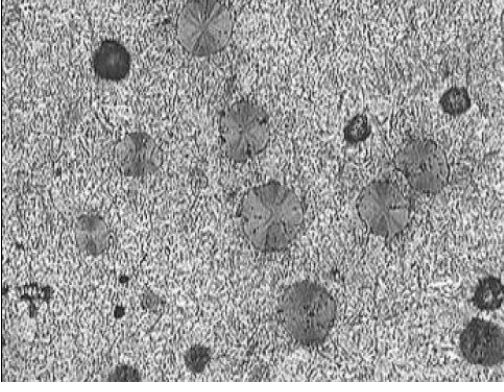
Şekil 1.11’de %50 perlitik ve %50 ferritik yapı görülmektedir.



Şekil 1.11. %50 perlitik %50 ferritik yapı, x100 (Karamusaoğlu, 2009)

Martenzitik Küresel Grafitli (Sfero) Dökme Demir

Bu yapıda yeterince alaşım elementi ilavesi veya su verme ve temperleme ısı işlemi gerçekleştirilerek perlit oluşumu önlenir. Temperlenmiş martenzit yapı düşük süneklik ve tokluk oluşturması ile beraber yüksek statik dayanım ve aşınma direnci oluşmasını sağlar (Çolak, 2019).



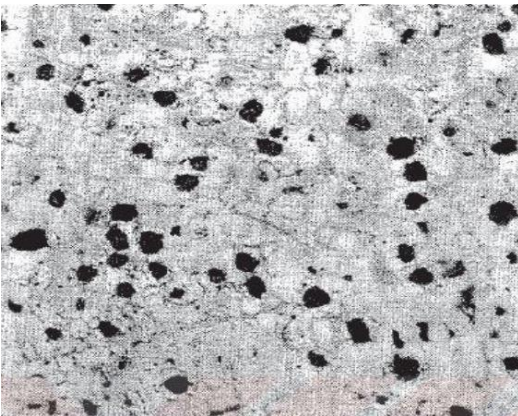
Şekil 1.12. Temper ısıtıl işlem görmüş martenzitik küresel grafitli dökme demir, x100 (Çolak, 2019)

Beynitik Küresel Grafitli Dökme Demir

Küresel grafitli (sfero) dökme demirin bu çeşidi alaşımlama ve/veya ısıtıl işlem uygulanarak elde edilen aşınma dirençli ve sert malzemedir (Çolak, 2019).

Östenitik Küresel Grafitli Dökme Demir

Östenitik matris elde etmek için alaşımlanan bu tür küresel grafitli (sfero) dökme demir, çekme mukavemeti en düşük tür olmasına rağmen statik mukavemet, korozyon ve okidasyon direnci, yüksek sıcaklıklarda boyutsal değişim ve üstün manyetik özelliklerin kararlı olmasını sağlar. Mikroyapısı östenitten ve az miktarda perlitten oluşmaktadır (Çolak, 2019; Karamusağlu, 2009).

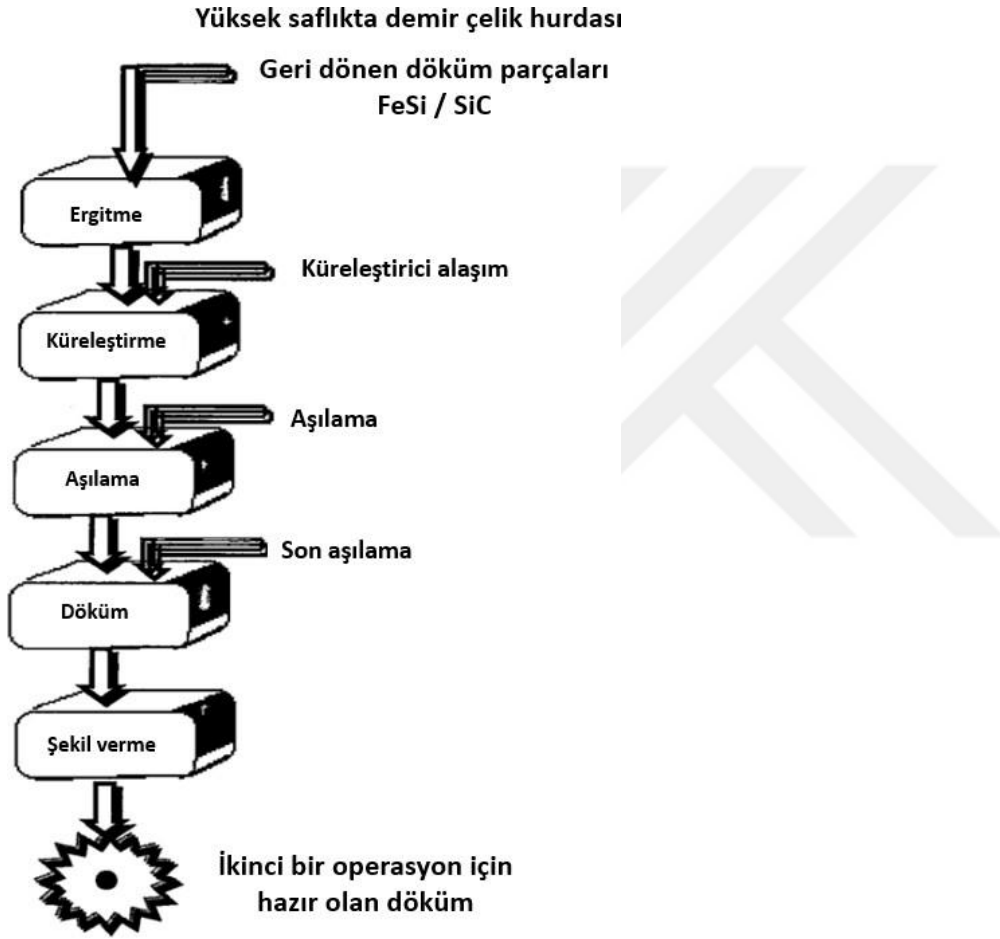


Şekil 1.13. Östenitik küresel grafitli dökme demir, x100 (Çolak, 2019)

Küresel Grafitli (Sfero) Dökme Demir Üretimi

Küresel grafitli (sfero) dökme demir üretiminde akış şeması Şekil 1.14'de gösterilmektedir. Küresel grafitli döküm üretiminin aşamaları:

- Şarj malzemesini seçmek
- Küreselleştirmek
- Aşılama



Şekil 1.14. Küresel grafitli dökme demirin üretim şeması (Öztürk, 2019)

Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretiminde Kullanılan Şarj Malzemeleri

Eriyiğin bileşimini belirleyen; şarj yapmak için kullanılan ham malzemelerdir. Döngü malzemesi (hurda) çekirdeklenme potansiyeline etkisi çok azken şarjın metalik bileşenlerinin önemli bir etkisi vardır. Ergiyikler için; grafit, pik demirler, silisyum karbür ve diğer ferro silisyum ilaveleri çekirdeklenme etkisine sahiptir (Çolak, 2019).

Küresel grafitli dökme demir üretiminde kullanılan metalik şarj malzemeleri:

- Pik - ham demir
- Çelik hurdası
- Ferro alaşımlar
- Silisyum karbür
- Küresel grafitli dökme demir hurdası – döngü malzemesi'dir (Yılmaz, 2019).

Yukarıdaki malzemelerden biri veya birkaçı işletme koşullarına bağlı olarak şarj malzemelerini temsil eder.

Pik-ham demir, aşılama için uygun, yapıda serbest karbür olmayışı, kararlı mikroyapı ve mekanik özellikler sayesinde dökme demirde kalıcı bir etkisi vardır (Bayraktar, 2009).

Çelik hurdası, öncelik iyi kalitede olanının temin edilmesidir. Kimyasal analiz, şekil ve büyüklük özellikleri kaliteyi etkiler (Bayraktar, 2009).

Ferro alaşımlar, kullanımında kimyasal analizinin bilinmesi gerekir. Çünkü ferro alaşımların kullanılması şarj malzemesi ve istenilen analize bağlı değişir.

Silisyum karbür, eriyikte kullanılmasıyla hem karbon hem de silisyum oranının istenilen düzeye gelmesi sağlanır.

Küresel grafitli dökme demir hurdası-döngü malzemesi, en kıymetli şarj malzemeleridir. Özel durumlar hariç küresel grafitli dökme demir hurdası dışında başka döküm hurdası kullanılmamalıdır (Bayraktar, 2009).

Küreleştirme İşlemi

Küresel grafitli dökme demir üretiminde, sıvı alaşımın magnezyum işleminden geçirilmesi ile grafitin küresel bir biçimde çökmesi sağlanır. Böylece grafitin yapraksı şekilde

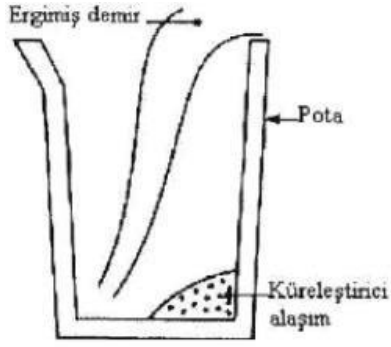
gelişmesine yol açan kükürt ve oksijen miktarlarını azaltmak için uygulanır. Magnezyum demirle herhangi bir tepkime oluşturmaması, kükürt ve oksijenle tepkimeye giren, sıvı içinde kolaylıkla yayılabilen element olduğu için dökümhaneler tarafından tercih edilir (Yılmaz, 2019). Çizelge 1.6’da tipik Mg küreselleştirme alaşımları ve kullanılan işlem yöntemleri gösterilmiştir.

Çizelge 1.6. Tipik magnezyum küreselleştirme alaşımları ve kullanılan işlem yöntemleri (Çolak, 2019)

Alaşımlar	Teknik vasıtalar
NiMg, CuMg	Açık pota
FeSiMg %3/5 FeSiMg %5/7 FeSiMg %8/10 FeMg peletleri %6/10	Sandviç, Kapaklı pota Flotret, Inconod, Kalıp içinde gazal
Mg kaplı tel Mg kok FeSiMg %30-40	Daldırma, dönen pota, Daldırılmış ilaveli pota
Saf Mg çubuk Saf Mg tozu	Konvertör, Basınçlı pota daldırma, Enjeksiyon

Küresel grafitli dökme demir üretimi için kullanılan birçok yöntem vardır. Açık pota işlemi, sandviç yöntemi, devirme pota(konvertör) yöntemi, daldırma yöntemi bunlardan bazılarıdır.

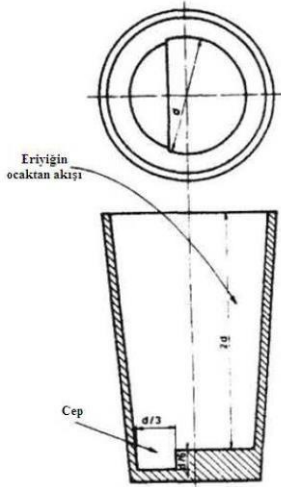
- Açık Pota İşlemi



Şekil 1.15. Küresel grafitli dökme demirin üretiminde açık pota yöntemi (Çolak, 2019)

FeSiMg alaşımı, işlem potasının tabanına yerleştirilir. Şekil 1.15'te gösterilmiştir. İndüksiyon ocağından üzerine sıvı dökme demir eklenir. Alaşım, sıvı dökme demirden hafif olduğu için yüzeye doğru çıkmaya başlar. Bu nedenle bu yöntemle verim miktarı %20-30 civarındadır.

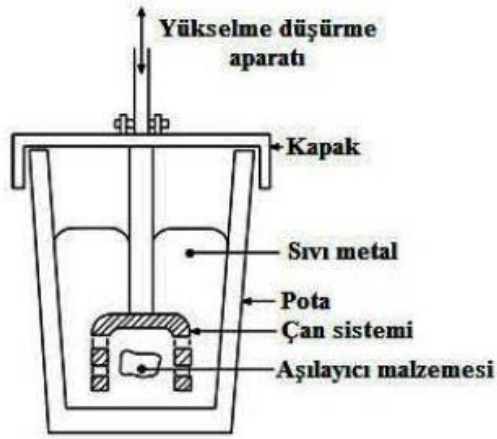
- Sandviç Yöntemi



Şekil 1.16. Sandviç potası yönteminin gösterilişi (Çolak, 2019)

FeSiMg alaşımı, işlem potasının tabanına yerleştirildikten sonra üzerine bir miktar çelik hurda yığarak sıvı metali doldurduktan sonra alaşımın yüzmesi engellenir. Şekil 1.16'da gösterilmiştir. Böylece bu yöntemle verim miktarı %40-45 civarındadır.

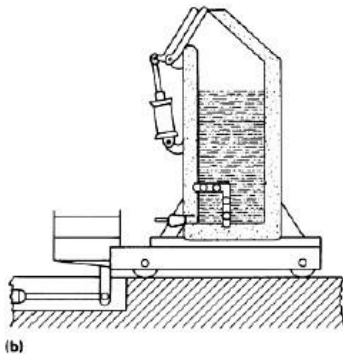
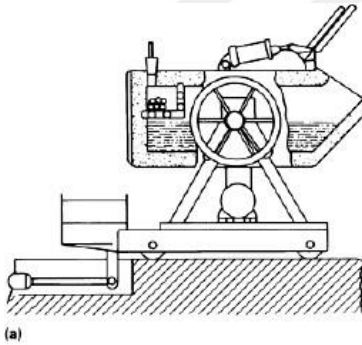
- Daldırma Yöntemi



Şekil 1.17. Daldırma yönteminin gösterilişi (Aytaçoğlu, 2012)

FeSiMg çan şekilli delikli bir kap içine konur. Şekil 1.17’de gösterilmiştir. Bu delik kap sıvı demir potasına daldırılır ve reaksiyonun gerçekleştirilir. %50 verimli olan bu yöntemin dezavantajı açık pota yöntemine göre sıcaklık kaybının daha fazla olmasıdır.

- Devirme Pota (Konvertör) Yöntemi



Şekil 1.18. Fischer dönüştürücüsünün çalışma prensibi a) Geminin doldurma pozisyonu, b) Geminin işlem pozisyonu (Aytaçoğlu, 2012)

Konvertör tabanın köşesine FeSiMg yerleştirilir. Şekil 1.18'de gösterilmiştir. Konvertörün ağzı açılarak içine sıvı metal doldurulu ve kapağı kapatılır. Konvertör pozisyon değiştirilerek karışımı sağlanır. Reaksiyon sonucu ortaya çıkan gazın çıkması önlenir. Böylece %50 oranlarında verimlilik sağlanır.

Konvertör küreselleştirme yöntemi; George Fischer firmasının getirdiği yenilik sebebiyle adını vermiştir ve Fischer konvertörü olarak adlandırılır (Aytaçoğlu, 2012).

Aşılama

Eriyiğin çekirdek ihtiyacının uygun sayıya getirilmesine aşılama işlemi denir. Aynı kristalografik özellikte malzemeler ile yapılan çekirdeklenme işlemine homojen, ayrı bir malzemenin çekirdek yapıcı özelliğine ise heterojen çekirdeklenme denilmektedir (Bayraktar, 2009).

Küresel grafitli dökme demirlerde aşılama küresel grafit kristallerinin oluşumunu sağlayan heterojen çekirdekler oluşturur. Bu sayede karbür oluşumunu etkiler ve önler (Bayraktar, 2009).

Küresel grafitli dökme demirlerde baz eriyiğin Si miktarının, aşılama ile kullanılan Si miktarına oranı çok büyük ise metalurjik kalite düşük, tersi olarak çok yüksekse grafit küre sayısı azalarak döküm anında karbürlere neden olacaktır. Sonuç olarak silisyum miktarının doku özelliklerini önemli derecede etkilemektedir.

Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları

Yeni ve gelişen teknoloji ile birlikte demir döküm sektörü de büyük bir gelişme göstermektedir. Küresel grafitli dökme demirler; kolay işlenebilirlik, korozyon direncinin yüksek oluşu, yüksek çekme ve akma dayanımı gibi olumlu özellikleri ile kullanım alanı geniştir.

- Ziraat sektöründe; traktör parçası, ön tekerlek çatalları, pedal ve transmisyon kutusu gibi alanlarda,
- İnşaat sektöründe; beton karıştırıcılar, kreyn parçası, yol inşaat makinesi gibi alanlarda,

- Bazı makine parçalarında; silindirler, hisrolik pres, krank presi, dişliler, aks, dövme pres kafası ve silindiri gibi alanlarda,
- Maden ve metalurji sektöründe; kırıcı gövdesi, pompa gövdesi, alüminyum ve kurşun ergitme potası, cüruf potası, pres makinesi, sıcak hadde merdanesi olarak,
- Güç aktarımında; uçak konstrüksiyonu, volan, dişli kutusu, dişli selektör çatalları, tekerlek kalıpları, diferansiyel dişli kutuları gibi alanlarda,
- Güç üretiminde; gaz türbin kompresör kutusu, kompresör gövde ve kafası, kontrol halkası, su türbin parçaları, sıcağa dayanıklı fırın malzemeleri gibi alanlarda,
- Kimya sektöründe; valf ve pompalar, plastik ekstrüzyon silindiri, plastik karıştırıcı, kurutma silindiri gibi alanlarda kullanılmak üzere üretilmektedir.

Küresel Grafitli (Sfero) Dökme Demire Uygulanan Isıl İşlemler

Küresel grafitli (sfero) dökme demirler, ısıl işlemlerin yapılması için uygun yapıda malzemelerdir. Yapıdaki C miktarı, ısıl işlemlerle döküm esnasında işlemlerin kontrolü, alaşım eklenmesi gibi durumlar geniş aralıklarda ayarlanabilmektedir. İstenilen özellikleri matris yapısının değiştirilmesiyle tamamen perlit, perlit+ferrit, tamamen ferrit, beynit, martenzit ya da tamamen ostenit olabilmektedir (Bayraktar, 2009).

Gerilim Giderme; döküm sonrası farklı kalınlıklarda olan parçanın soğuma hızlarında da farklılık olmasından kaynaklı iç gerilmeleri azaltmak ya da tamamen gidermek için 500-600 °C sıcaklık aralığında ısıtılıp 1 inç için 1 saat sürede tutulması, ardından 200 °C'ye kadar oda sıcaklığında yavaşça soğutulması ile gerçekleşmektedir (Hammamı, 2019).

Normalleştirme; nunumenin 870-940 °C ısıtılması, 1 saat tutulması ve sonrasında hava soğutması ile uygulanır. Üretilen mikroyapı tamamen ince perlit olup çekme dayanımı 700-900 MPa'dır. Bu ısıl işlemde sonra hızlı soğumaya bağlı artık gerilmeleri giderilmesi amacıyla gerilim giderme ısıl işlemi yapılabilir (Hammamı, 2019; Sevgi, 2019). Dayanım ve sünekli artırmak için uygulanmaktadır.

Su Verme ve Temperleme; martensitik bir yapı elde etmenin yolu olarak yüksek sertlik gerektiğinde 900 °C'ye kadar ısıtıp 2-4 saat tutarak sonrasında basınçlı hava veya yağ kullanarak soğutma ile yapılır. Bu yöntem sonrasında su verme esnasında gerilmeler içerebilir. Bunun için su verme işleminden sonra 400-600 °C arasında kadar ısıtıp, bu sıcaklıkta bekleyip

sonrasında hava ile soğutma (temperleme) işlemi yapılır. Sonuç olarak temperlenmiş martensit elde edilir (Hammamı, 2019). Dayanımı ve sertliği daha da artırmak için uygulanmaktadır.

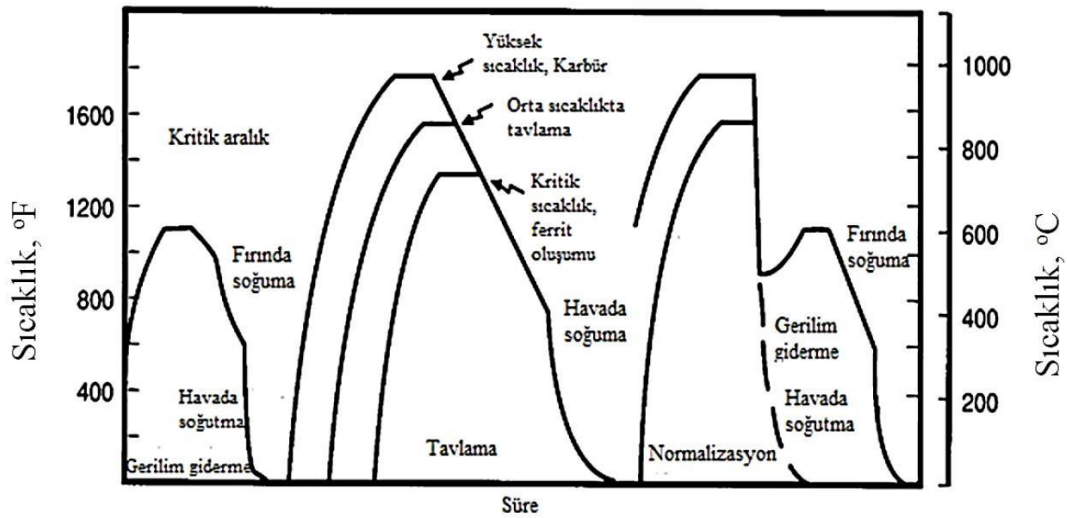
Tavlama; dökme demirin tokluğunu ve sünekliğini iyileştirmek, yapısındaki karbürleri ve sertliğini gidermek için uygulanmaktadır (Öztürk, 2019).

Yüzey sertleştirme; dökme demirin maksimum sertliğe sahip ve bu sertliğin derin olması için, sertleşmeden önce perlitik olması ve bileşimin %1.5-2 Ni eklenmelidir. Yapı perlitikse eğer su vermeden önce parça yüksek sıcaklıkta uzun süre tutup su vermek gereklidir (Bayraktar, 2009).

Östemperleme; bazı sünek ve iyi aşınma direnci ile yüksek dayanımlı bir mikro yapı elde etmek için perlit oluşumunun altında ve martensit oluşumunun üstünde bir sıcaklıkta demir alaşımlarına uygulanan izotermel dönüşümdür (Yürektürk, 2018).

Genellikle küresel grafitli dökme demirlerde ısıl işlemler;

- Dayanım ve aşınma direncini artırmak,
 - Korozyon direncini artırmak,
 - Süneklik ve tokluğu artırmak,
 - Mikroyapıyı kararlı hale getirmek,
 - İşlenebilirliği geliştirmek,
 - Mekanik özellikleri geliştirmek,
- için uygulanmaktadır.



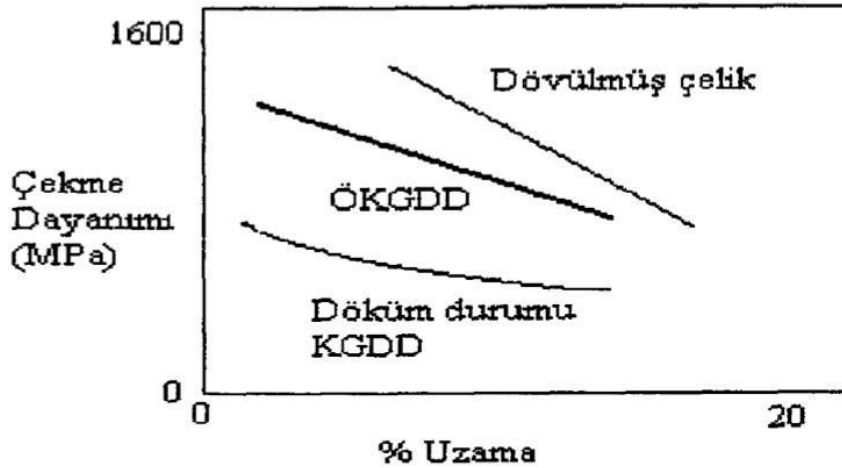
Şekil 1.19. Küresel grafitli (sfero) dökme demirlerde uygulanan farklı ısıl işlemler (Öztürk, 2019)

Küresel grafitli (sfero) dökme demirlerin özelliklerini geliştirmek için uygulanan ısı işlemleri ve süresi Şekil 1.19'da verilmiştir. Bu işlemlerden en yüksek mukavemet ve tokluk özelliklerinin östemperleme ısı işlemi ile sağlanmaktadır (Öztürk, 2019).

Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir

Davenport ve Bain tarafından östemperleme işlemi 1930'larda geliştirilmiş ve çeliğe uygulanmıştır. 1970'lerin ortasında ABD'de General Motors ve Finlandiya'da Kymi Kymmene firmaları çelik malzeme yerine östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir malzemeden üretilen dişliyi kullanarak malzemeye olan talebin artmasına sebep olmuştur. Günümüzde yapılan çalışmalar artarak devam ederken, daha ileri boyutlara taşımaya odaklanmıştır (Toptaş, 2009).

Diğer dökme demir türlerine göre küresel grafitli dökme demir daha iyi mekanik özelliklere sahiptir ve östemperleme ısı işlemi ile tokluk ve mukavemet değerleri artmaktadır. Şekil 1.20'de gösterilmiştir. Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısının ferrit ve yüksek karbonlu östenit içermesi yüksek mekanik özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır (Öztürk, 2019).



Şekil 1.20. Mekanik özelliklerin karşılaştırılması (Öztürk, 2019)

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin özellikle 325-400 °C sıcaklık aralığında geniş mekanik özellikler sunması kullanımını artırmıştır (Öztürk, 2019).

Çizelge 1.7. Dövme çelik, KGDD ve ÖKGDD'in mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Öztürk, 2019)

	ÖKGDD	KGDD	*Dövme Çelik
Çekme Dayanımı (MPa)	1100	690	790
Akma Dayanımı (MPa)	830	480	520
Sertlik (HB)	286	262	262
Darbe Dayanımı (Joule)	165	55	175
Uzama (%)	10	3	10

**mikro alaşımlı orta karbonlu bir çelik*

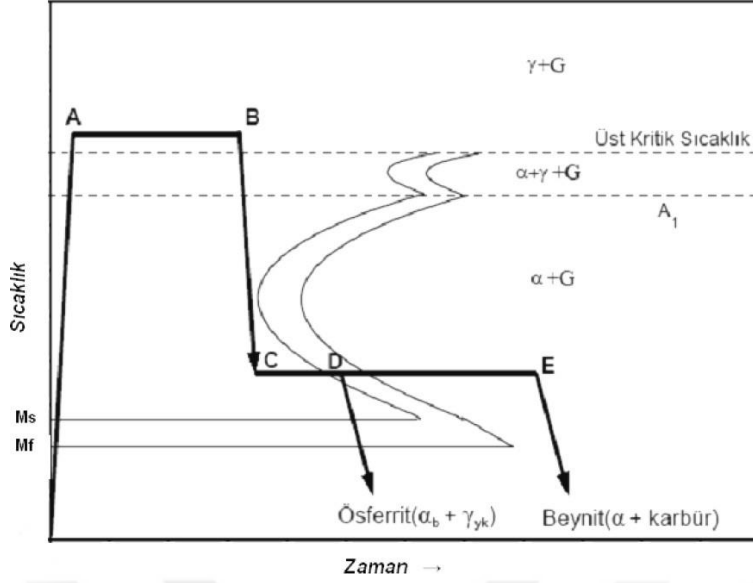
Üretim maliyetleri incelendiğinde östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin daha düşük maliyette olmasıyla dövme çeliklere nazaran daha avantajlıdır. Çizelge 1.7'de görüldüğü gibi uzama ve darbe dayanımları aynı olmasına rağmen östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin çekme ve akma mukavemetleri daha yüksektir (Öztürk, 2019).

Östemperleme Isıl İşlemi

Östemperleme işlemi iki basamaklıdır. İlk aşama östenitlemedir. 20 dakika ile 4 saat arasında 850-950 °C aralığında döküm iç yapısı tamamen östenite dönüştürülür. İkinci aşamada 250-400 °C arasında çabuk soğutma ve 1 ile 4 saat arasında bir sürede bekletilir. İzotermal tuz banyosuna hızlı bir şekilde daldırılarak çabuk soğutma gerçekleştirilir. Çabuk soğutma ferritik ve perlitik dönüşümüne fırsat tanımayacak kadar hızlı olmalıdır. Sonrasında hava ile soğutularak tamamlanır (Akay, 2007).

Küresel grafitli dökme demirin östemperleme ısıl işlemi Şekil 1.21'de görüldüğü gibi üç kademedен oluşmaktadır (Toptaş, 2009).

Östemperleme ve östenitleme işlemlerinin süreleri ve sıcaklıkları, yapının mekanik özelliklerinin etkilemektedir. Özellikle östemperleme sıcaklığının beynitik yapıyı doğrudan etkilediği izlenmiştir (Öztürk, 2019).



Şekil 1.21. Geleneksel östempereleme ısıl işleminin şematik gösterimi (Toptaş, 2009)

A – B —————> Östenitleme (815-927 °C, 1-2 saat)

B – C —————> Hızlı soğutma (perlit oluşumuna izin vermeyecek hız)

C – E —————> Östempereleme (232-450 °C, 0.5-4 saat)

Östemperelemiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları

ÖKGG malzemelerin başlıca kullanım alanları:

Madencilik; dişli çark, zincirler, raylı taşıma plakaları

Otomotiv; kam ve krank milleri, aks pimi, motor süspansiyon

Demiryolu; ray plakaları, ray yatağı ve süspansiyon elemanları

Pompalar ve kompresörleri; pervaneler, valf gövdesi, dişliler ve delme kafaları

Konstrüksiyon-yapı elemanları; ray makarası, hidrolik silindiri, ray ayakları (Gider, 2015)

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Küresel Grafitli Dökme Demir Malzeme

Bu çalışmada üretilen numunelerin kimyasal bileşimi Çizelge 2.1’de verilmiştir. Erime, 1510 °C’de 300 kg’lık bir indüksiyon fırınında sağlanmıştır. Potada sandviç yöntemi ile ferrosilisyum (SNAM MG 6811) ile Magnezyum elde edilmiştir.

Eriyikler daha sonra aşılaiıcı (Foundrisil-75) ile aşılaiılmıştır. Kalıp ASTM A571M’ye karşılık gelen Y şeklinde bir geometride oluşturulmuştur (Riebisch vd.,2018). Hazırlanan eriyikler 1460 °C’de bir döküm potasına aktarılıp, ardından kuru kum kalıplara doldurulmuştur.

Çizelge 2.1. Kimyasal bileşim

Kimyasal Kompozisyon (Ağırlık wt.%)												
Element	Fe	C	Mn	Si	P	Cr	S	Sn	Cu	Mg	Al	Ti
Ağırlık %	Bal.	3.10	0.24	4.30	0.025	0.020	0.025	0.006	0.07	0.048	0.007	0.017

Östemperleme İşlemi

Çözelti ile güçlendirilmiş ferritik dökme demirin östemperleme parametreleri Çizelge 2.2’de listelenmiştir. Östemperleme iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşama numuneler östenitlenip, ikinci aşamada östenitlenmiş numuneler izotermal tavlama ile östemperlenmiştir. Numuneler 900 °C’de 90 dakika östenitlenip, sonra bir tuz banyosuna aktarılmıştır.

Östemperleme için sabit bir sıcaklıkta 3, 6 ve 9 saat tutulduktan sonra östemperleme sürecini tamamlamak için oda sıcaklığına soğutulmuştur.

Numuneler grafit tozuna gömülmüştür. Daha sonra östemperleme 300, 350, 400, 450, 500,550, 600 ve 650 °C gibi farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Tuz banyosu, fırında paslanmaz çelik bir potaya ısıtılarak tuz eklenerek oluşturulmuştur.

Çizelge 2.2. Çözelti ile güçlendirilmiş ferritik dökme demirin östemperleme parametreleri

Numune Numarası	Sıcaklık (°C)	Zaman (h)	Su verme ortamı	Alt kritik difüzyon sıcaklığı (°C)	Alt kritik difüzyon zamanı (h)	Soğutma ortamı
S-Referans	Ham-Döküm	-	-	-	-	-
S1	900	1	Su	-	-	-
S2	900	1	Tuz	300	3	Hava
S3	900	1	Tuz	300	6	Hava
S4	900	1	Tuz	300	9	Hava
S5	900	1	Tuz	350	3	Hava
S6	900	1	Tuz	350	6	Hava
S7	900	1	Tuz	350	9	Hava
S8	900	1	Tuz	400	3	Hava
S9	900	1	Tuz	400	6	Hava
S10	900	1	Tuz	400	9	Hava
S11	900	1	Tuz	450	3	Hava
S12	900	1	Tuz	450	6	Hava
S13	900	1	Tuz	450	9	Hava
S14	900	1	Tuz	500	3	Hava
S15	900	1	Tuz	500	6	Hava
S16	900	1	Tuz	500	9	Hava
S17	900	1	Tuz	550	3	Hava
S18	900	1	Tuz	550	6	Hava
S19	900	1	Tuz	550	9	Hava
S20	900	1	Tuz	600	3	Hava
S21	900	1	Tuz	600	6	Hava
S22	900	1	Tuz	600	9	Hava
S23	900	1	Tuz	650	3	Hava
S24	900	1	Tuz	650	6	Hava
S25	900	1	Tuz	650	9	Hava

Malzeme Özellikleri

Çekme Testi

Çekme test numuneleri ASTM E8M-04 standardına göre hazırlanmış ve testler 100 kN Instron test sistemi ile yapılmıştır (ASTM International, 2004). Şekil 2.1’de çekme test cihazı gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Çekme test cihazı

Sertlik Testi

Bir QNESS Q10M 100 g yük altında HV ölçeği ile mikrosertlik ölçümleri yapmak için test cihazı kullanılmıştır.

Darbe Testi

Charpy darbe testi örnekleri ASTM E23-06 standardına göre hazırlanmış ve testler -40 °C, +40 °C ve oda sıcaklığında Instron cihazı ile gerçekleştirilmiştir (ASTM International, 2006). Şekil 2.2’de darbe tokluğu test cihazı gösterilmiştir.

Darbe testinin ardından, kırılma yüzey morfolojisi SEM ile incelenmiştir.



Şekil 2.2. Darbe tokluğu test cihazı

Zımparalama ve Yüzey Parlatma

Isıl işlem ve soğutma işlemlerinden geçen numuneler daha sonraki aşamalarda iyi şekilde görüntülerinin alınabilmesi için zımpara ve yüzey parlatma ekipmanları kullanılarak numune yüzeyleri pürüzsüz hale getirilmiştir. Yüzey parlatma cihazı Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Yüzey parlatma makinesi

İşlemler için kullanılan ekipmanlar, yüzey parlatma makinesi, zımpara kağıtları (P120, P320, P600, P1000), 3 mikronluk yüzey parlatma pastasıdır. Şekil 2.4’de parlatma öncesi ve sonrası gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Parlatma öncesi (a) ve sonrası numune yüzeyleri (b)

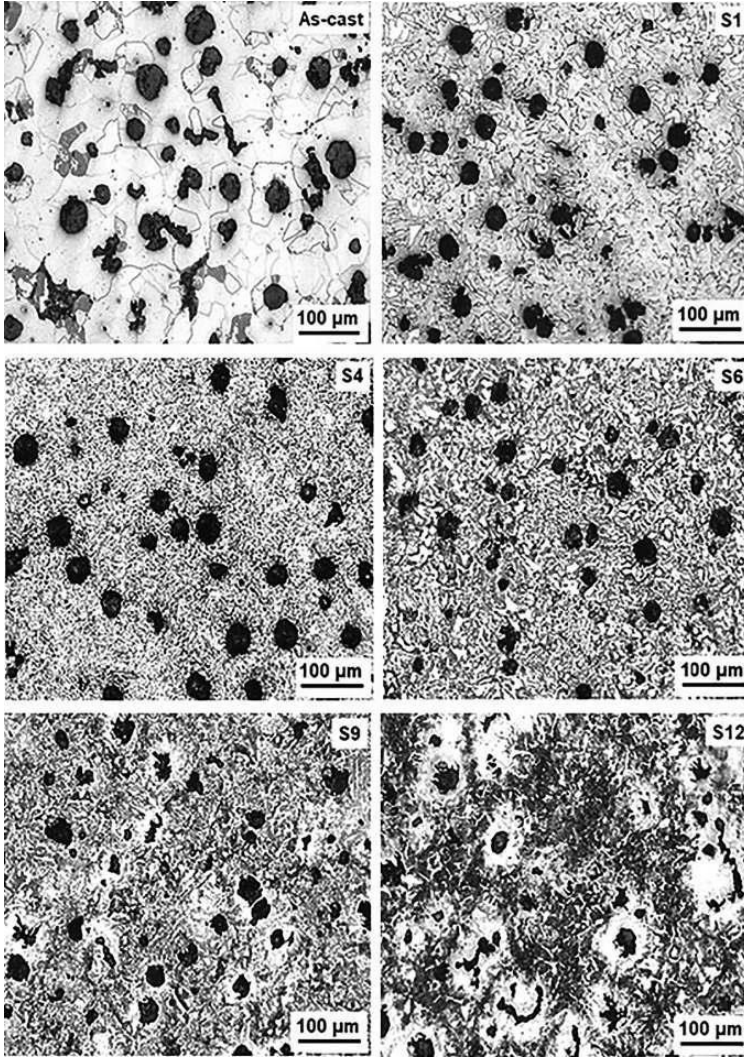
Dağlama

Numuneler ağırlıkça % 98 etil alkol ve ağırlıkça % 2 nitrik asit içeren bir çözelti içinde dağlanmıştır. Numunelerin mikroyapısal incelemeleri optik mikroskopi (OM: LEICA DM750), taramalı elektron mikroskobu (SEM: ZEISS EVO LS10) ve X-ışını kırınımı (XRD: BRUKER) ile yapılmıştır.

Deneysel Sonuçlar

Mikroyapı Değerlendirme

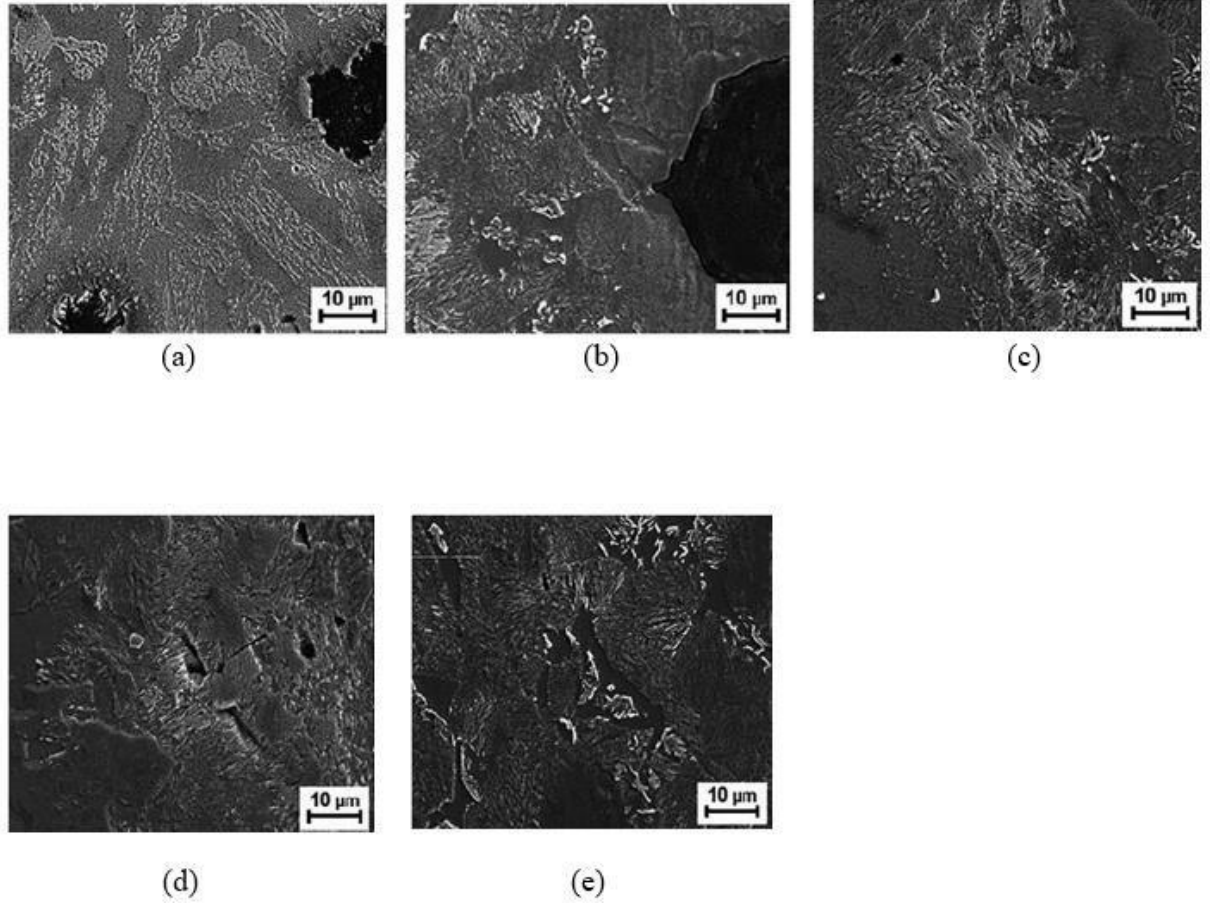
Östempereleme genellikle küresel dökme demir için 250-400 °C yaklaşık sıcaklıklarda uygulanır (ASTM International, 2004 ve 2006). Katı çözeltili ile güçlendirilmiş ferritik dökme demirler, karbon difüzyonunu ve östenizasyon sıcaklığı gibi yönleri etkileyen yüksek bir silisyum içeriğine sahiptir; ayrıca zaman da ferritik bir mikroyapının oluşumu için birincil faktördür (Yang ve Bhadeshia, 1991).



Şekil 2.5. S1, S4, S6, S9, S12 numunelerinin farklı sıcaklıklarında östempereleme işleminin sonrası mikroyapıları

Bu nedenle, SSF dökme demir mikro yapıyı tanımlamak için 3-9 saatlik periyotların geniş bir aralıkta, 300–650 °C östempereleme sıcaklığını araştırılmıştır. Östemperelemiş örneklerin optik ve SEM mikrografları Şekil 2.5 ve Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Ham döküm mikroyapısı, küresel morfolojisinde ferritik bir matris ve grafit göstermiştir.

Nodüllerin miktarı ve yapısı mekanik özellikler üzerinde önemli bir etki göstermiştir (Hiratsuka vd., 2003). Östemper uygulanmış örneklerde asiküler bir beynitik-ferrit formuna sahip spesifik bir alt beynitik yapı oluşmuştur.



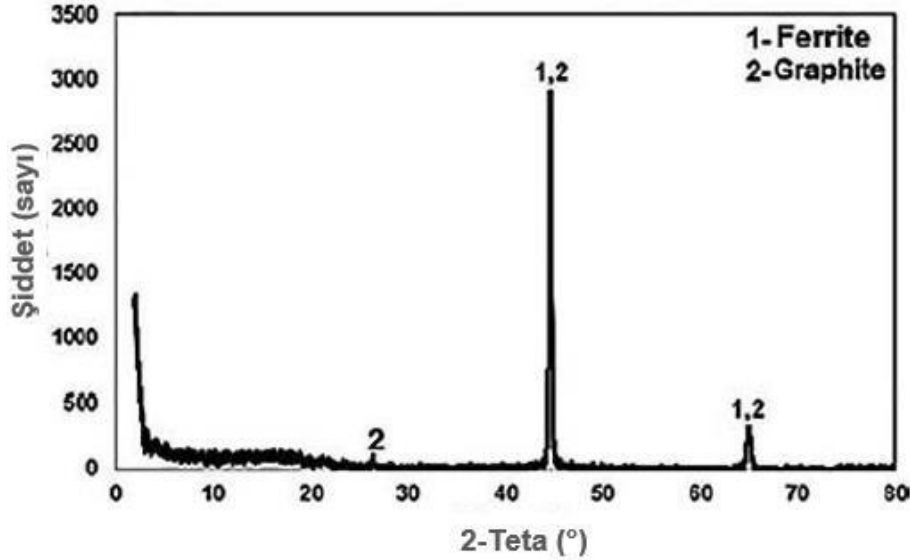
Şekil 2.6. S1(a), S4(b), S6(c), S9(d), S12(e) numunelerinin SEM mikroyapıları

Başka bir deyişle, 300 °C’de östempereleme, korunmuş östenit matrisinde asiküler bir perspektife sahip bir beynitik-ferrit ürettiği Şekil 2.5’te gösterilmiştir. Ferrit ve bainit oranları, ferrit fazlarının yüksek tokluk ve süneklik ile birlikte düşük gerilme mukavemeti ve sertliği gösterdiği ve bainit fazlarının düşük süneklik ile yüksek mukavemet ve sertlik gösterdiği malzeme dayanıklılığını da değiştirmiştir (Krzyńska ve Kochański 2014).

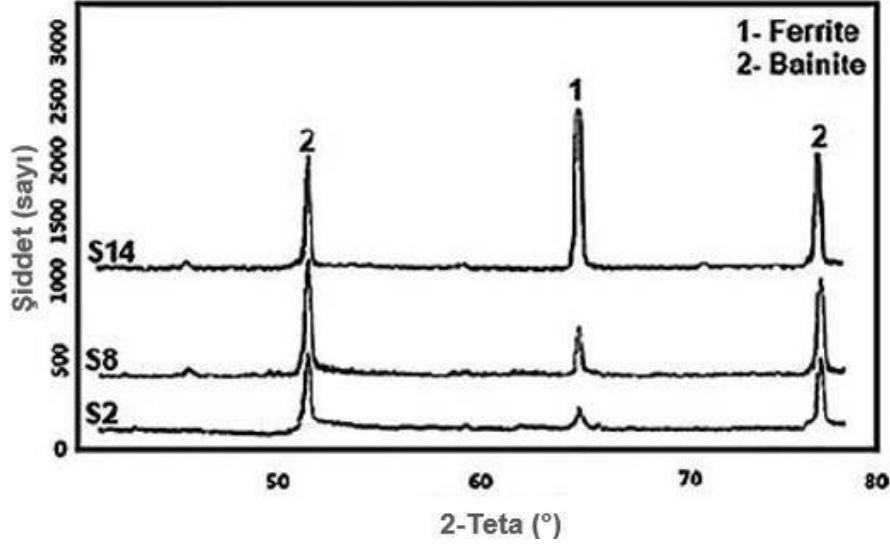
Çizelge 2.1’de görüldüğü üzere dökme demirin mikroyapısı Fe, C, Si, Mn ve P’yi içeriyordu ve östemperleme ısıl işlemlerinden sonra mikro yapılar bozulmuş morfolojide ösferrit, beynit, tutulmuş ferrit ve küresel grafitlerden oluştuğu Şekil 2.5 ve Şekil 2.6’da gösterilmiştir.

Östemperleme sıcaklık giderek artmıştır. Grafitin küresel formu, 500 °C’nin üzerinde östemperlemeden sonra bozulduğu ve özellikle grafitlerin deformasyonu 550 °C’lik bir östemperleme sıcaklığı ile arttığı Şekil 2.5’te gösterilmiştir. Ayrıca, matris bir üst bainitik yapıya sahip ve ferrit iğneleri grafit kürelerin etrafında daha kalın olduğu Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Yüksek östemperleme sıcaklığı nedeniyle, östenit ile birlikte plaka benzeri bir bainitik ferrit morfolojisi oluşmuştur.

Martensitin 1 saatten fazla östemperleme süresinde bulunmadığı ve yapı bainitik ferritten oluşuyordu ve östeniti korudu, çünkü karbon kısa sürede östenit üretmek için yeterli değildi. Bu nedenle, yapı yetersiz bir östemperleme süresi içinde martensit fazlarına dönüşmüştür. Bir katı çözeltili ile güçlendirilmiş dökme demir hafifletilmiş karbür oluşumunda yüksek miktarda silisyum vardır. Silisyum, sabit karbon doymuş östenitin ortaya çıkmasına izin vermiştir (Bhadeshia ve Christian, 1990). Numunelerin X-ışını kırınım desenleri Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’dir.



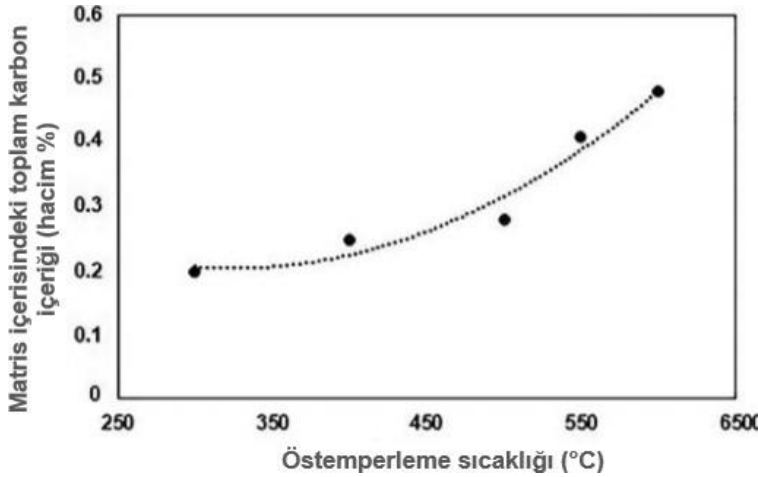
Şekil 2.7. Döküm numunesinin XRD şekli



Şekil 2.8. S2, S8, S14 numunelerinin XRD şekli

Sonuçlar, ferrit grafit fazlarının döküm numunesinde olduğu gibi elde edildiğini Şekil 2.7’de göstermiştir. Öte yandan, östenitleme ısıl işleminden sonra oluşan bainit fazı ve tutulan ferrit konsantrasyonu, östemperleme sıcaklığı ile değiştirildiği Şekil 2.8’de gösterilmiştir.

Östemperleme sıcaklığının matrisin karbon konsantrasyonu üzerindeki etkisi Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Östemperleme sıcaklığı arttıkça, ferrit fazındaki karbon içeriği artar. (Bhadeshia ve Christian, 1990; Gonzaga, 2013)

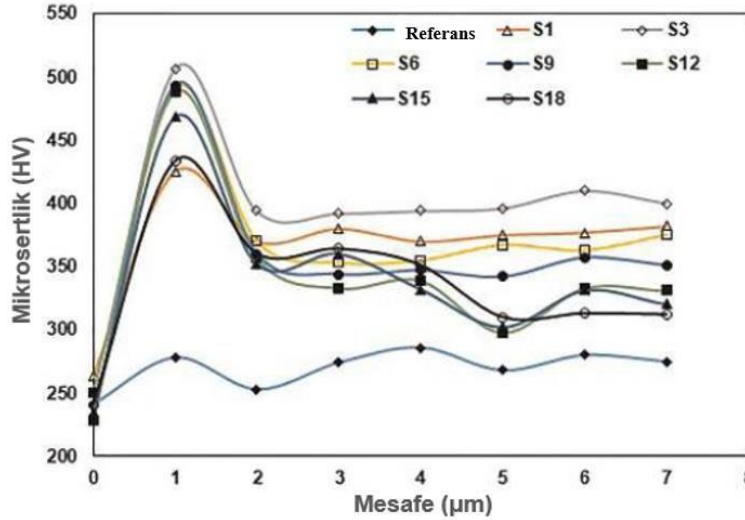


Şekil 2.9. Östemperleme sıcaklığının östenitik karbon üzerindeki etkisi

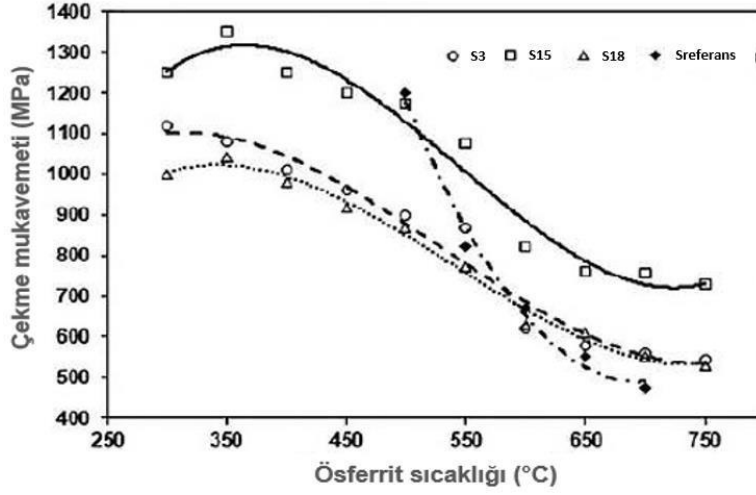
Östempereleme işleminin sırasında, ösferrit iğneleri ferrit fazlarından çekirdeklenmeye başlamıştır. Östempereleme süreci ilerledikçe, ösferrit yapısının bu iğneleri büyüdü ve kalan ferrit, ferrit içindeki karbon içeriğini düşürmüştür. Bainit iğne boyutunun 300 °C östempereleme sıcaklığında 1 saat boyunca yaklaşık 1-5 µm olduğu görülmüştür. Östempereleme süresi 6 saate çıkarılarak iğnelerin uzunluğu yaklaşık 25 µm'ye çıkmıştır. Ösferrit yapısındaki karbon, ferritteki toplam karbon içeriği ile ilişkilidir. Bu şekilde, östempereleme işleminin sıcaklığının, bainit fazının boyutunu etkileyen ösferritin karbon içeriğini artırdığı açıkça görülmüştür. Östempereleme sıcaklığının 300 °C'den 600 °C'ye yükseltilmesi, bainit fazının boyutunu \cong 5'ten 50 µm'ye yükseltmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak hem ösferritin hacim oranı hem de karbon içeriği arttığı için östempereleme sıcaklığındaki artışa bağlı olarak bainit boyutu da artmıştır.

Mikrosertlik ve Çekme Testi Sonuçları

Östemperelemiş SSF dökme demir numunelerinin sertlik testi sonuçları Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Yaklaşık %100 ferrit içeren bir matris mikroyapıya sahip döküm numune, önemli bir sertlik göstermiştir. Silisyum ve manganez oranı, geleneksel küresel dökme demire kıyasla sertlik değerlerinde önemli bir rol oynamıştır. Ağırlıkça %4.3 oranında silisyum varlığı, numunelerin sertliğini ve mukavemetini değiştirdi Şekil 2.10 ve Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Bu, uzama yüzdesi üzerinde çok önemli bir etkiye sahipti.



Şekil 2.10. Test numunelerinin mikrosertlikleri



Şekil 2.11. Numunelerin çekme test sonuçları

Sertlikteki yaklaşık 500 HV'ye artış muhtemelen ösferrit fazının varlığından kaynaklanmıştır. Buna karşılık, ısıl işlemlerden sonra matris mikroyapısında önemli ferrit içeriği vardı. 400 °C'nin üzerinde bir östemperleme ısıl işleminin uygulanması matris sertliğini düşürdü ve sonuç olarak uzama yüzdesi arttı. Dökme demirdeki bainit miktarı da ferrit gibi sertlik ve mekanik mukavemet üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu Şekil 2.10 ve Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Ferrit, matris sertliğini azaltır ama aynı zamanda sünekliliği artırır. Süneklilikteki artış, daha yüksek bir uzama yüzdesi yaratmıştır.

Bu durumda, östemperleme sıcaklığının 400 °C'nin üzerine çıkarılmasının uzamayı arttırdığını ve darbe özelliklerini geliştirdiğini Şekil 2.11'de gösterilmiş olup, bunların dökme demirin ferrit içeriği ile ilgili olduğunu belirtmek önemlidir. Şekil 2.9'da gösterildiği gibi, sertlik, östemperleme sıcaklığındaki bir artışla düşürülmüştür. Ayrıca, sertlik 6 saatlik östemperleme süresinin üzerinde değişmedi. Bainit fazının mikrosertliği, 400 °C'nin üzerindeki östemperleme sıcaklıklarının artmasıyla azaldı, ancak 6 saatlik belirli bir östemperleme süresinden sonra sertlik önemli derecede değişmedi. Kısa östemperleme süreleri ile her östemperleme sıcaklığı için yüksek mikrosertlik değerleri elde edilmiştir (1-3 saat).

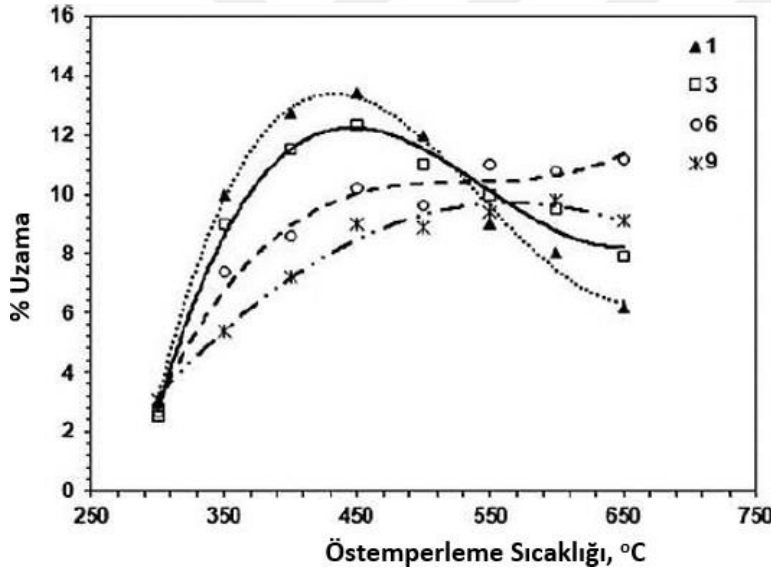
Sreferans, S3, S15 ve S18 örneklerinin çekme testi sonuçları Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da gözlenen bainit fazının şekli çekme mukavemeti üzerinde bir etkiye sahipti olduğu Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Artan bainit konsantrasyonu nedeniyle gerilme

mukavemeti ve uzama yüzdesi etkilendi. Bainite fazının içeriği ve büyüklüğü her iki parametrede de önemli bir rol oynamıştır (Madariaga, Gutierrez ve Bhadeshia, 2001).

En yüksek gerilme mukavemeti Numune S3'te Şekil 2.11'de tespit edilmiştir. Sonuçlar, ösferritin boyut ve dağılımının homojenliğinin gerilme ve akma dayanımını etkilediğini ve numunelerin geliştirilmiş gerilme mukavemetinin ösferrit içeriği ile ilişkili olduğunu Şekil 2.6 ve Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

Şekil 2.12'de, östemperleme sıcaklığı ile uzama yüzdesi arasındaki ilişkiyi gösterir. Uzama ve mukavemet, yüksek östemperleme sıcaklığı ile azalmıştır. SSF malzemelerinin mukavemeti ve tokluğu arasındaki ilişki çeliklerden farklıydı. Daha düşük akma mukavemeti, daha yüksek kırılma tokluğu ile ilişkili değildi.

Bu çalışmada, bainite fazının, aşılандıkları ve mukavemeti kontrol ettikleri gerilme mukavemeti üzerinde en etkili aktör olduğunu düşünmek yararlı olmuştur.



Şekil 2.12. Ösferrit sıcaklığı ve % uzama arasındaki ilişki

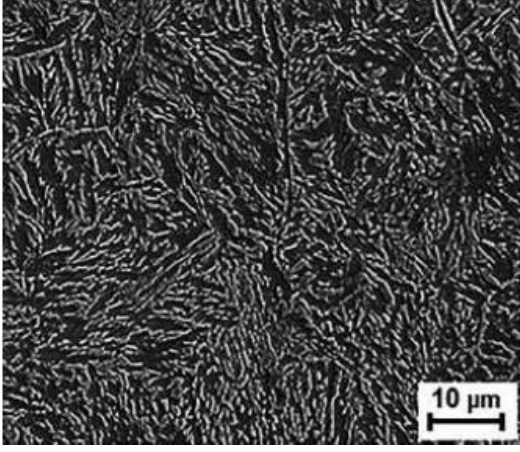
Belirlenen düşük mukavemet değerleri yaklaşık %100 ferrit içeren numune için elde edilmiş, en yüksek gerilme mukavemeti ise mikro yapılarda 60/40 ferrit/bainit oranı olarak bainit ikinci fazın mevcudiyeti ile numune de elde edildiği Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Mikroyapıda silikon ve manganez nedeniyle \cong %90 ösferrit içeren mikroyapıda gerilme

mukavemeti ve kırılma tokluğu artmıştır. Ösferrit taneleri süneklikte önemli bir rol oynamıştır (Alhussein vd., 2014). Sonuç olarak, ösferrit sıcaklığındaki bir artış, ösferrit konsantrasyonunu düşürdü ve bu, süneklikte bir azalmaya neden olduğu Şekil 2.11’de gösterilmiştir.

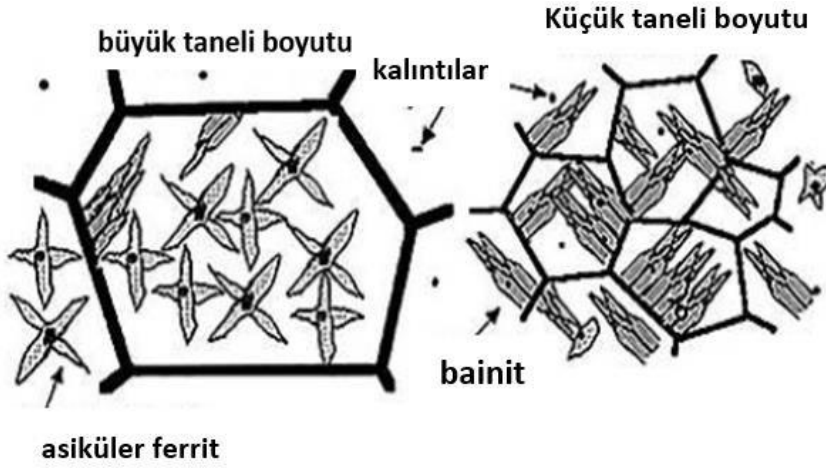
Ösferrit fazında tutulan ferrit, matrisin mekanik özelliklerini de etkiledi. Tutulan ferrit içeriği, östemperleme sıcaklığı ve süresi ile ilişkiliydi. Östemperleme sıcaklığı arttığında, mikroyapıda bainit içeriği azalmış, gerilme mukavemeti azalmıştır. Bu bağlamda, tutulan ferrit içeriği de arttı, bu da matris mukavemetinin azaldığı anlamına gelmektedir. Bazı ösferrit ve tutulan ferrit ile bir asiküler bainit formu, düşük bir östemperleme sıcaklığında yüksek mukavemet üzerinde bir etkiye sahipti.

Şekil 2.13 (a) ve (b)'de bir SEM mikrografı ve asiküler ferrit plakaların şematik bir temsili gösterilmektedir. Asiküler ferrit plakalar, östemperleme sıcaklığındaki artıştan sonra küçük metalik olmayan kalıntılar üzerinde heterojen olarak çekirdeklenmiş olduğu Şekil 2.13’te gösterilmiştir.

Kristalografik ayrıntılar, aynı kapsama üzerinde çekirdeklenmiş son derece yanlış yönlendirilmiş plakalar ortaya çıkardı. Östemperleme sıcaklığı ve süresi, asiküler ferrit oluşumu için en uygun zaman ve sıcaklık parametrelerini bulmak için değiştirildi. Optimum subkritik sıcaklığın 400 °C olduğu ve subkritik difüzyon süresinin 60 dakika olduğu görülmüştür. Bainit fazı bir iğne şeklinde şekillendirilmiş ve sivrilmişliği Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Bununla birlikte, bu aldatıcıydı çünkü gerçek şekil bir merceksi plakanın şekliydi. Sıvı metallerde, güçlü deoksidasyon elementleri ile reaksiyona giren inklüzyonlar oluşabilir. Kalıntılar intragranüler bainit plakasının çekirdeklenmesini destekledi (Madariaga ve Gutiérrez, 1999; Jiang vd., 2011).



(a)



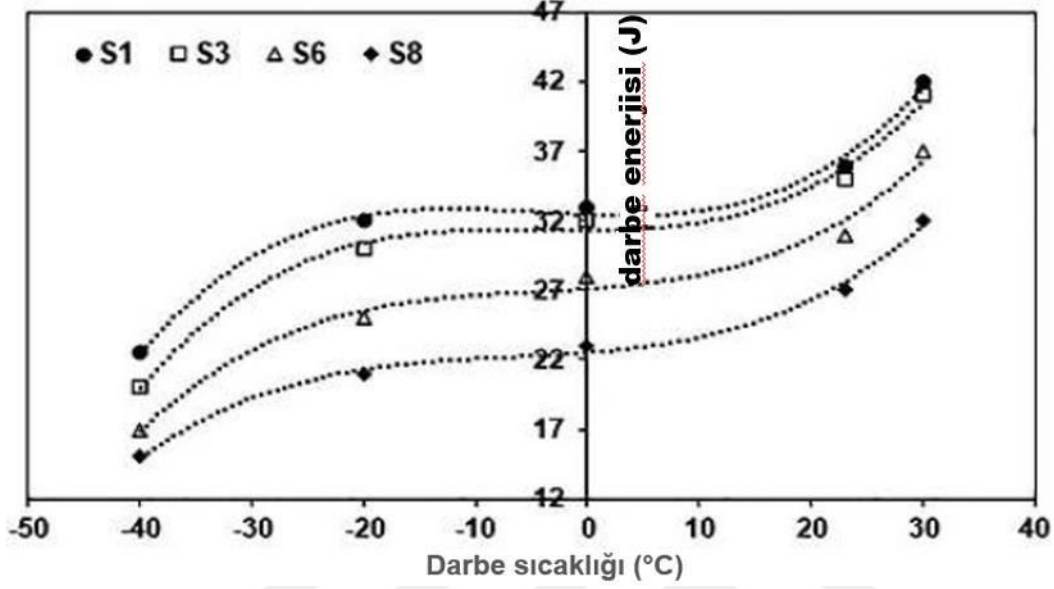
(b)

Şekil 2.13 (a) Asiküler ferrit plaka çekirdeklenmesi, (b) Asiküler ferrit-bainit çekirdeklenmenin şematik sunumu (Yang ve Bhadeshia, 1991)

Darbe Testi

+40/-40 °C test sıcaklığı aralığı için numunelerin darbe enerjisi grafiği Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Şekil 2.14'te görülebileceği gibi ferrit yapısı oda sıcaklığında çok yüksek darbe direncine sahipti, ancak bu performansı düşük sıcaklıklarda koruyamamıştır. Bununla birlikte, ferrit ve bainit birlikte olan matrisin darbe mukavemetinin tamamen ferritik bir matristen daha yüksek olduğu açıktı. Bainit içeriği ve sıcaklığı darbe dayanımı üzerinde önemli bir etkiye

sahipti. Küresel grafit matrisi yaklaşık %70 ösferrit (Numune S3) içerirken, bainit içeriğinden kaynaklanan darbe testi sırasında düşük sıcaklıklarda esneklikte küçük değişiklikler gözlenmiştir.

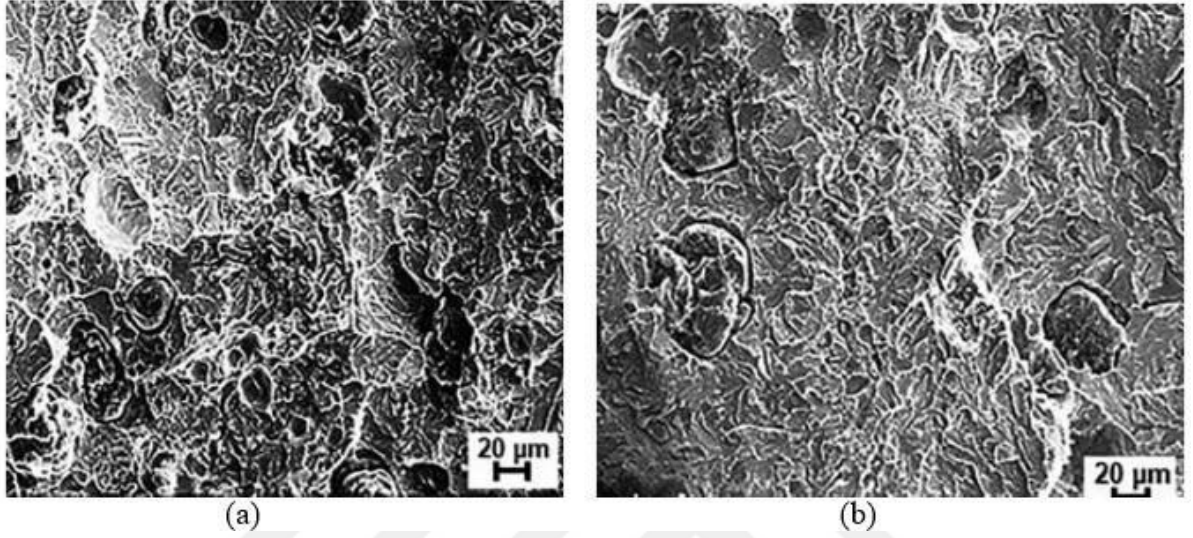


Şekil 2.14. Numunelerin darbe direncinin +40/-40 °C sıcaklık aralığında değişimi

Mikroyapı araştırmalarının bir sonucu olarak, oda sıcaklığında, azalmış ösferrit içeriği ve artan ferrit içeriği, darbe direncini arttırmıştır. Mikroyapıdaki ösferrit miktarı, darbe direncini etkileyen önemli bir parametre olduğu bilinmektedir. Yaklaşık %60 ferrit ve %40 ösferrit içeren mikroyapı, darbe enerjisinde önemli bir artış göstermiştir (Numune S3). Yaklaşık %30 ferrit içeren mikroyapı için tespit edilen en düşük darbe enerjileri, muhtemelen Numune S8 için daha düşük ferrit içeriğinden kaynaklanmış olduğu Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Darbe enerjisi keskin bir şekilde -20 °C'nin altına düştü ve +20 ile -20 °C sıcaklık aralığında yaklaşık olarak stabil olmuştur. Artan bainit içeriğinin neden olduğu düşünülen az miktarda darbe enerjisi azalması belirlenmiştir. Numune S3 için, emilen enerjide yaklaşık 30 J'den 20 J'ye, -20 °C'den / -40 °C'ye ciddi bir değişiklik tespit edildi.

Darbe sıcaklığının tokluk üzerindeki etkisini açıklığa kavuşturmak için fraktografik gözlemler de yapılmıştır. +30 / -30 °C sıcaklık aralığı için östemperlenmiş Numune S3'ün tipik fraktografaları Şekil 2.15'te gösterilmektedir. Şekil 2.15 (a) 'da gösterildiği gibi, numunenin +30 C için kırılma yüzeyi, matris boyunca karışık bir sünek kırılma modu ve ince ve tekdüze

çukurlar göstermiştir. Bununla birlikte, numunenin $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ için kırılma yüzeyi Şekil 2.15 (b) ağırlıklı olarak bölünme yüzüne sahipti ve kırılmanın tipik olarak tanımlanan çatlak başlangıcı ve çatlak yayılmasını içeren bir süreçle meydana geldiği yerde bölünme yüzlerinin çok geniş olduğu kırılgan olgu özellikleri görülmüştür. Bu arada, Şekil 2.15 (b)'de yerel alan içinde bazı hücresel yapı ve küçük çukurlar görülebilmektedir.



Şekil 2.15. Numune 6'nın kırılma yüzey sonuçları (a) $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Numunenin $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altındaki çok düşük darbe enerjisi değerlerinin, öncelikle aktif kayma sistemlerini azaltan ösferrit varlığından kaynaklandığı görülmüştür. Aktif kayma sistemlerindeki azalmanın çarpma enerjisini düşürdüğü açıktı; bu nedenle, çatlak başlangıcı ve yayılma, daha pürüzsüz yüzeyler olarak kolayca meydana gelmiştir (Madariaga ve Gutiérrez, 1999; Madariaga, Gutierrez ve Bhadeshia, 2001).

3. SONUÇLAR

Bu çalışma, östemperlenmiş ve çözelti ile güçlendirilmiş ferritik sfero demirlerin mekanik mukavemetini incelemeyi amaçlamıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Küresel grafitli dökme demirin ısıtılma sıcaklığı, yapıda asiküler ferrit oluşumunu artırmış ve düşük sıcaklık oluşumunu teşvik eden bainit miktarını artırmıştır.

300 °C'lik bir sıcaklıkta östemperleme, nispeten ince ve iğne benzeri bir alt bainit mikroyapısı sağlarken, 550 ve 600 °C'de östemperleme, üst bainit mikroyapısının daha kaba ve lamelli bir morfolojisine yol açtı.

Ferrit fazları düşük mukavemet ve sertlik gösterdi, ancak tokluk ve süneklik nispeten iyiydi ve bainit fazları yüksek mukavemet ve sertlik gösterdi, ancak süneklik iyi değildi. Ferritik bir faza sahip olan matris nispeten yüksek uzamaya sahipti.

Mikroyapıdaki ausferrit fazı, süneklik tokluğu ve uzamada olumlu bir rol oynamıştır. Bainit fazı nedeniyle östemperleme ısıtılma işlemi ile yaklaşık 1200 MPa gerilme mukavemeti yüzde 13 uzama ile elde edildi.

Bainitik ferrit içeriği (%50–60) ve boyutu (%1–5 µm) gerilme mukavemetinin davranışını iyileştirdi.

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler için kritik darbe enerjisi dönüşüm sıcaklığı -20 °C olarak tespit edilmiştir.

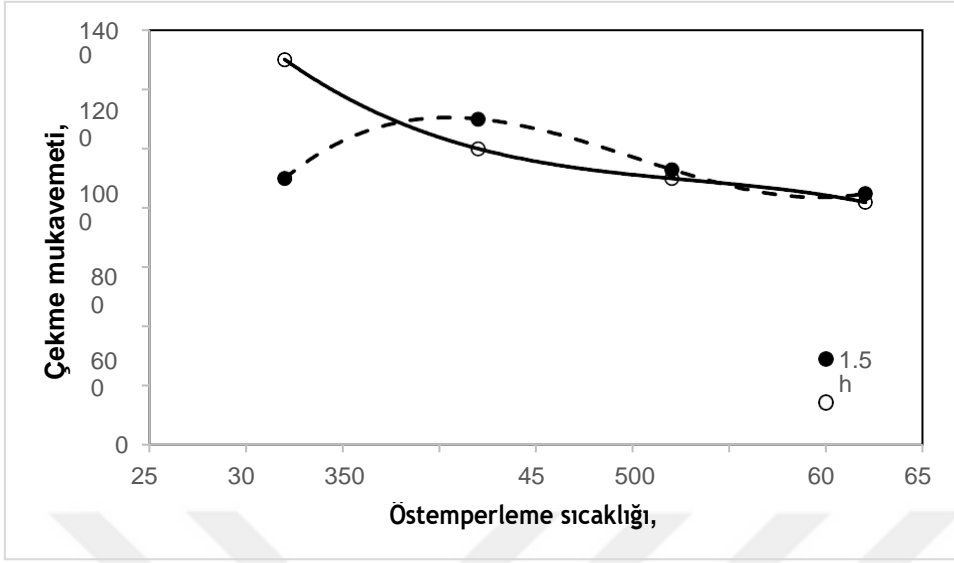
KAYNAKLAR

- Akray, S. İ. (2007). *Küresel grafitli dökme demirlere uygulanan yüzey işlemlerinin aşınma direncine etkisinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Alhussein, A., Riset, M., Bastien A., Chobaut, J.P., Balloy, D., Favergeon J. (2014). Influence of silicon and addition elements on the mechanical behavior of ferritic ductile cast iron. *Materials Science & Engineering A*, 605, 222-228.
- ASM Specialty Handbook Cast Iron 1996.
- Aytaçoğlu, L. C. (2012). *Dökme demirlerde termal analiz ve matematiksel yaklaşım* (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Bayraktar, M. (2009). *Düktül demir dökümlerde küre sayısının tespiti ve mekanik özelliklere etkisi* (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Bhadeshia, H.K.D.H., Christian, J.W. (1990). Bainite in steels. *Metallurgical Transactions A*, 21, 767-797.
- Çolak, O. (2019). *Küresel grafitli dökme demirlerin üretiminde modülün mikro yapı ve mekanik özelliklere etkisi* (Yüksek Lisans Tezi), Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bayburt.
- Demirlek, M. (2013). *Küresel grafitli dökme demirlerin yüksek çevrimli yorulma davranışına silisyum oranının etkisi* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gider, G. (2015). *Farklı oranlarda silisyum içeren küresel grafitli dökme demirlerin mikro yapılarına çift kademeli östemperlemenin etkisi* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gonzaga, R.A. (2013). Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons. *Materials Science & Engineering A*, 567, 1-8.
- Göksu, B. (2018). *Yeni nesil sünek dökme demir malzemenin basamaklı polimerizasyon yöntemi ile hazırlanan epoksi reçinelerle korozyona karşı korunması* (Yüksek Lisans Tezi), Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

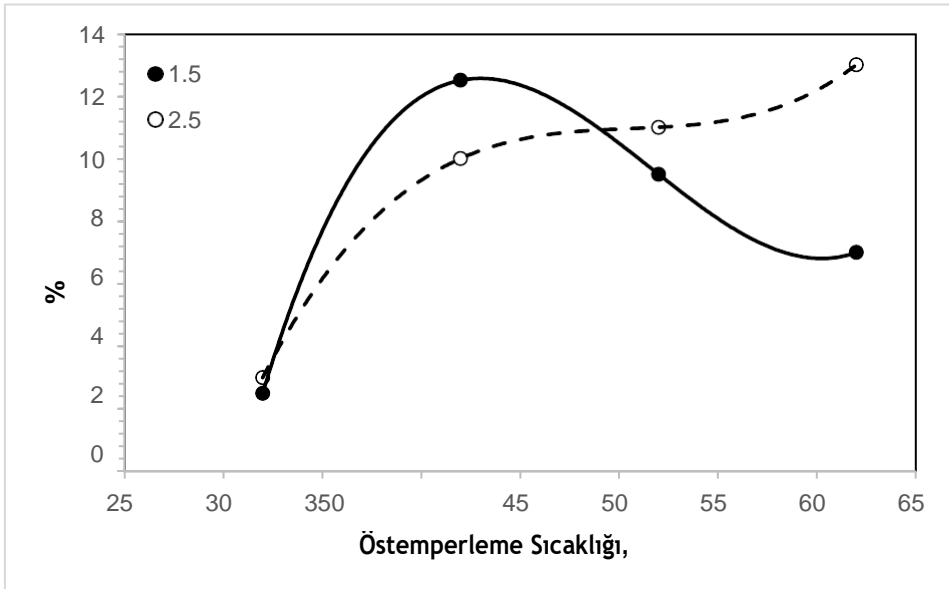
- Hammani, F. (2019). *Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirde ısıtma işlem parametrelerinin optimizasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Hiratsuka, S., Horie, H., Kowata, T., Koike K., Shimizu, K. (2003). Influence of Steel Scrap on Microstructure and Mechanical Properties of Spheroidal Graphite Cast Iron. *Materials Transactions*, 44, No.7, 1419-1424.
- Jiang, Q. L., Li, Y.J., Wang, J., Zhang, L. (2011). Effects of inclusions on formation of acicular ferrite and propagation of crack in high strength low alloy steel weld metal. *Materials Science and Technology*, 27, 1565-1569.
- Karamusaoğlu, H. A. (2009). *Küresel grafitli dökme demirin (GGG-60) işlenmesinde kesici takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi* (Yüksek Lisans Tezi), Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Krzyńska, A., Kochański, A. (2014). Austenitization of ferritic ductile iron. *Archives of Foundry Engineering, ISSN (2299-2944) Volume 14 Issue 4/2014*, 49-54.
- Madariaga, I., Gutiérrez, I. (1999). Role of the particle–matrix interface on the nucleation of acicular ferrite in a medium carbon microalloyed steel. *Acta Materialia*, 47, 951-960.
- Madariaga, I., Gutierrez, I., Bhadeshia, H.K.D.H. (2001). Acicular ferrite morphologies in a medium-carbon microalloyed steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32, 2001–2197.
- Özdemir, A. (2016). *Characterization of austempered ductile and vermicular graphite high silicon and aluminum alloyed cast iron* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Öztürk, E. (2019). *Östemplendirme sıcaklığının küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi* (Yüksek Lisans Tezi), Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Riebisch, M., Weiß, P., Cremer, C., Aboulkhair, I. ve Bührig-Polaczek, A. (2018). Properties and microstructure of copper-alloyed solid solution-strengthened ductile iron. *Materials Science and Technology*, 34, 725–730.
- Sahoo, S. (2012). *A study on the effect of austempering temperature, time and copper addition on the mechanical properties of austempered ductile iron* (Master's thesis), National Institute of Technology, Rourkela, India.

- Sevgi, E. (2019). *Küresel grafitli dökme demirlerin ısıtma işlem şartlarının mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Toptaş, M. (2009). *Farklı ısıtma işlemlerinin küresel grafitli dökme demirin yorulma davranışına etkisi* (Yüksek Lisans Tezi), Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Yang, J.R., Bhadeshia, H.K.D.H., (1991). Acicular ferrite transformation in alloy-steel weld metals Deposits. *Journal of Materials Science*, 26, 839-845
- Yıldız, M. (2014). *Dökme demirlerde nicel faz analiz tekniklerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Yıldız, T. (2006). *Küre grafitli dökme demir alaşımlarının ısıtma özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Yılmaz, A. Y. (2019). *Küresel grafitli dökme demirlerde termal analiz yöntemi ile karbon eşdeğerliğinin tayini, mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Yürektürk, Y. (2018). *Effect of austempering and aluminizing processes on properties of high silicon spheroidal graphite ductile irons* (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

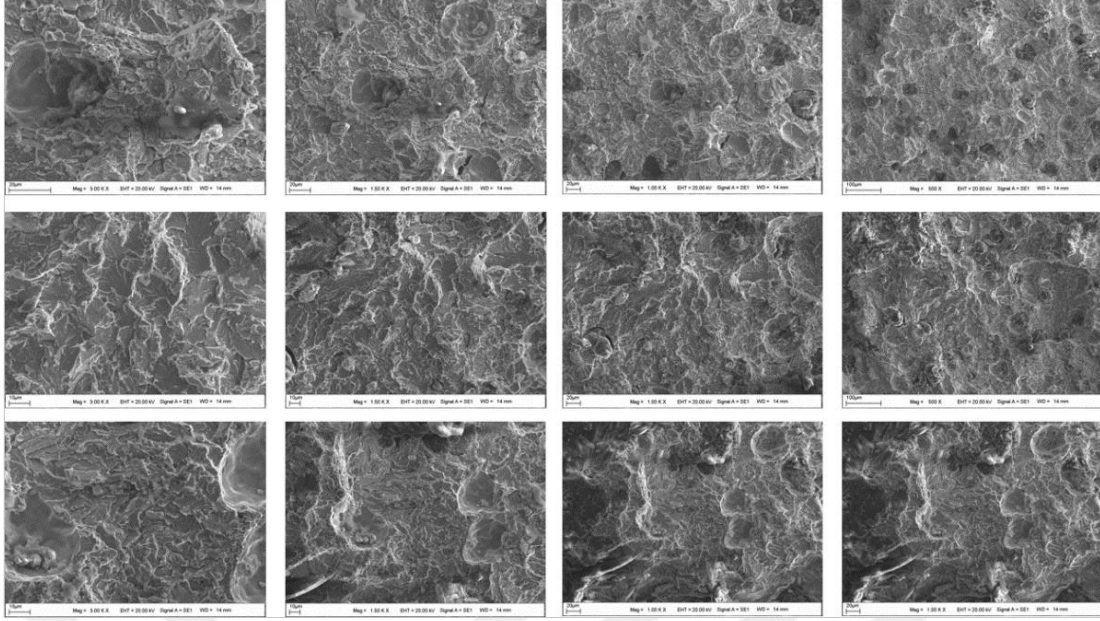
EKLER



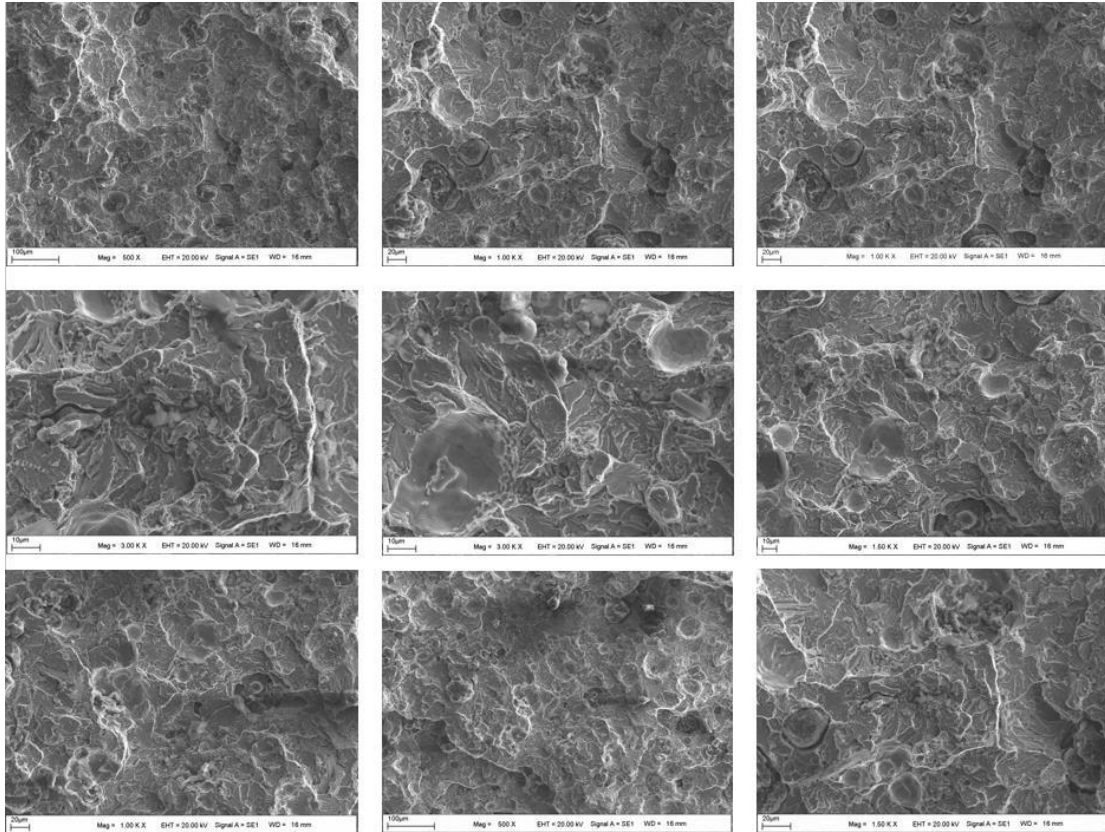
Şekil 3.1. Isıl işlemsiz numunenin östempirleme sıcaklıklarında çekme mukavemetleri



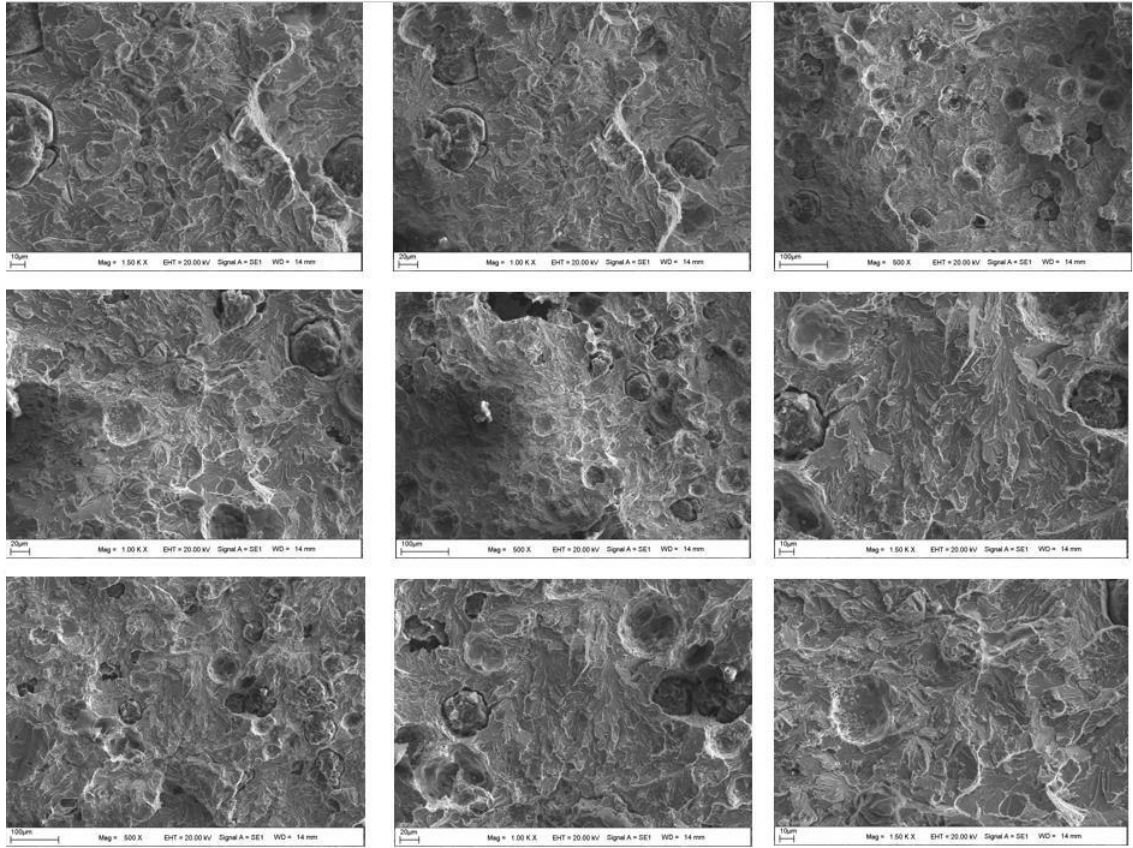
Şekil 3.2. Isıl işlemsiz numunenin östempirleme sıcaklığında % uzama değerleri



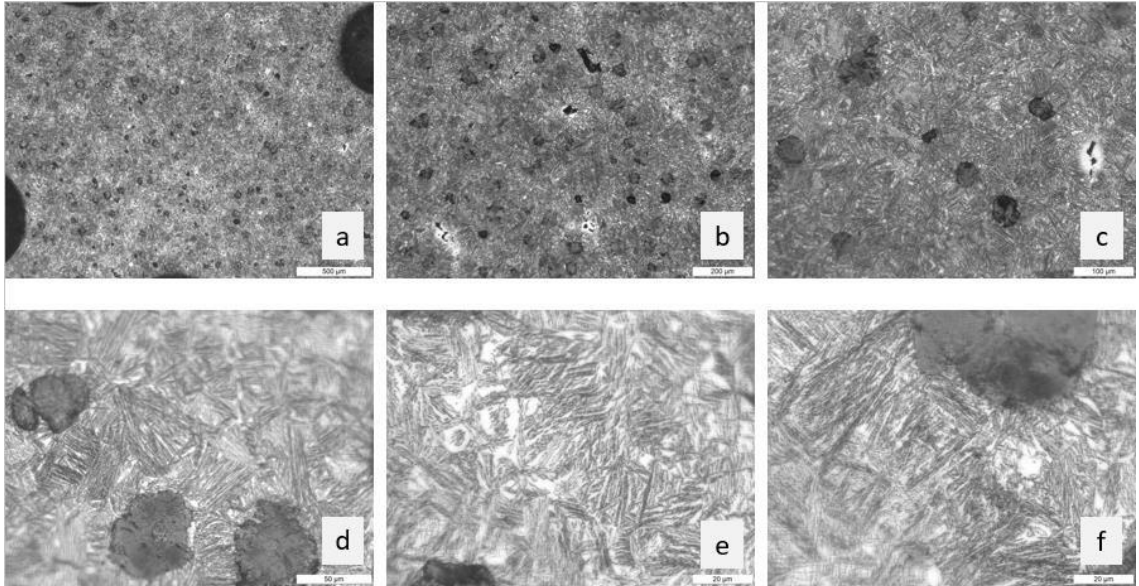
Şekil 3.4. 520°C'de SEM kırık yüzey görüntüleri



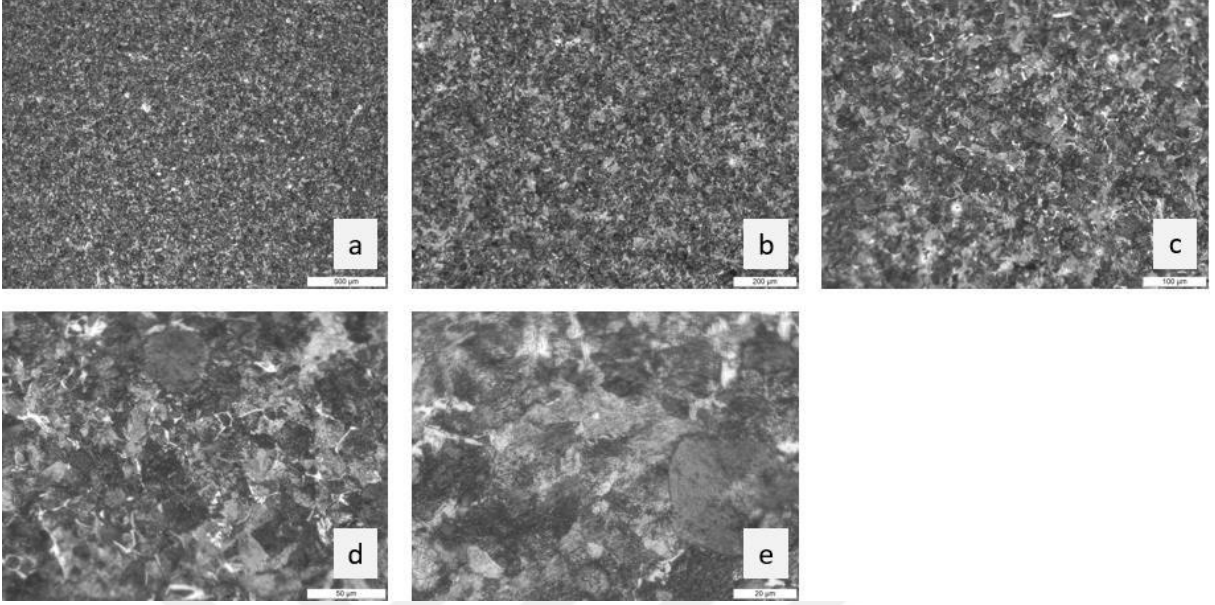
Şekil 3.3. 420°C'de SEM kırık yüzey görüntüleri



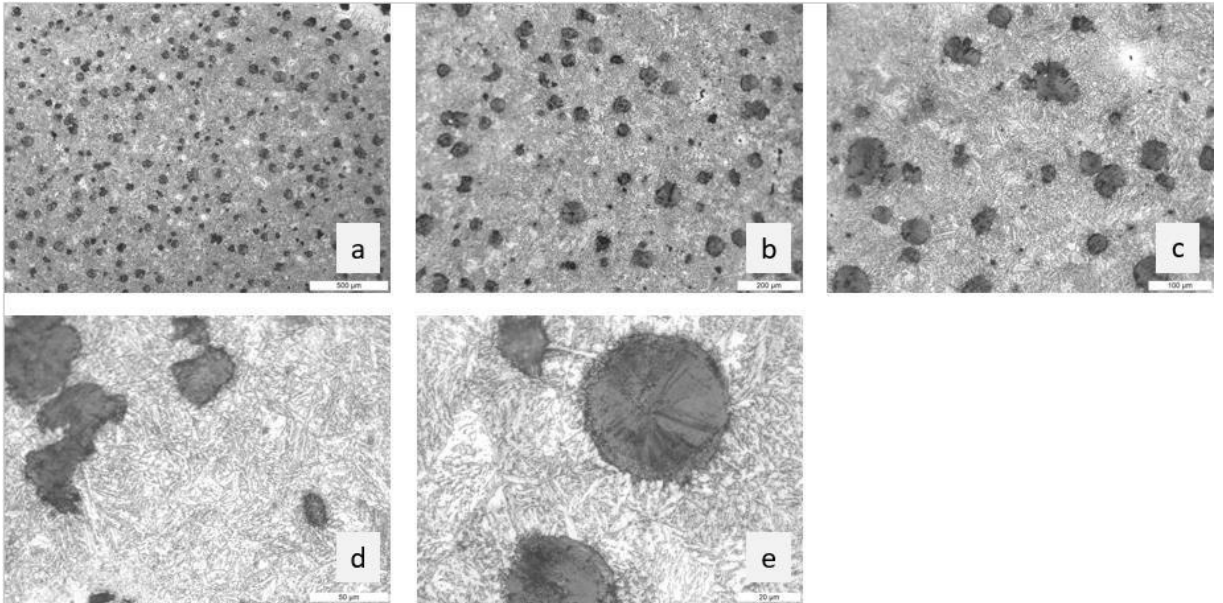
Şekil 3.5. 620 °C'de SEM kırık yüzey görüntüleri



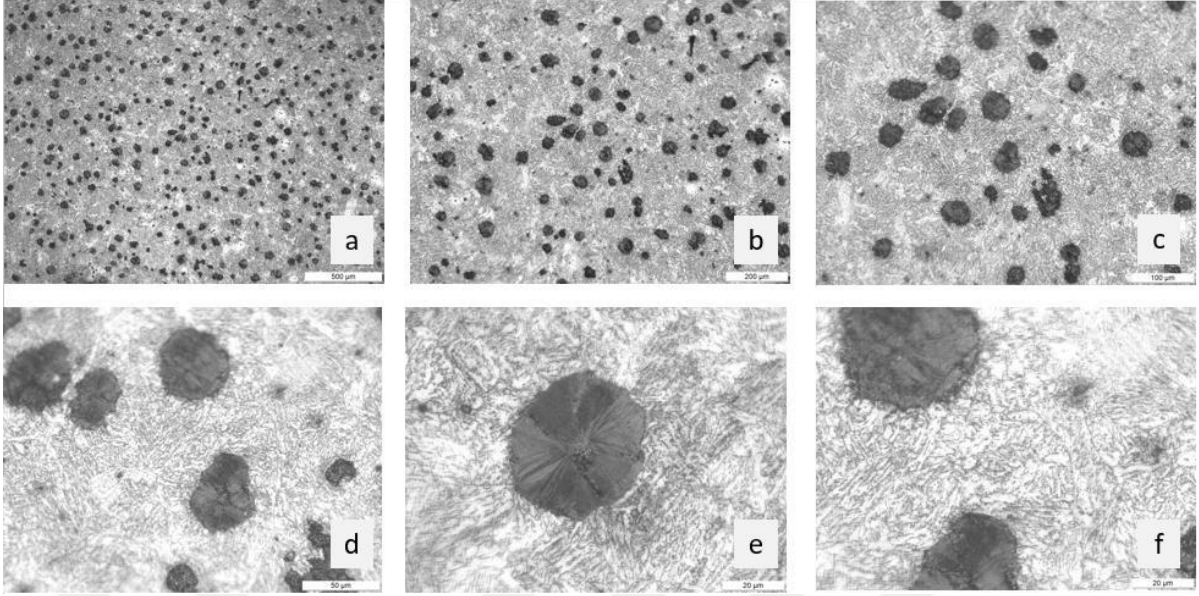
Şekil 3.6. S3 numunesinin optik resim görüntüleri a) 5x, b) 10x, c) 20x, d) 50x, e) 100x, f) 1000x



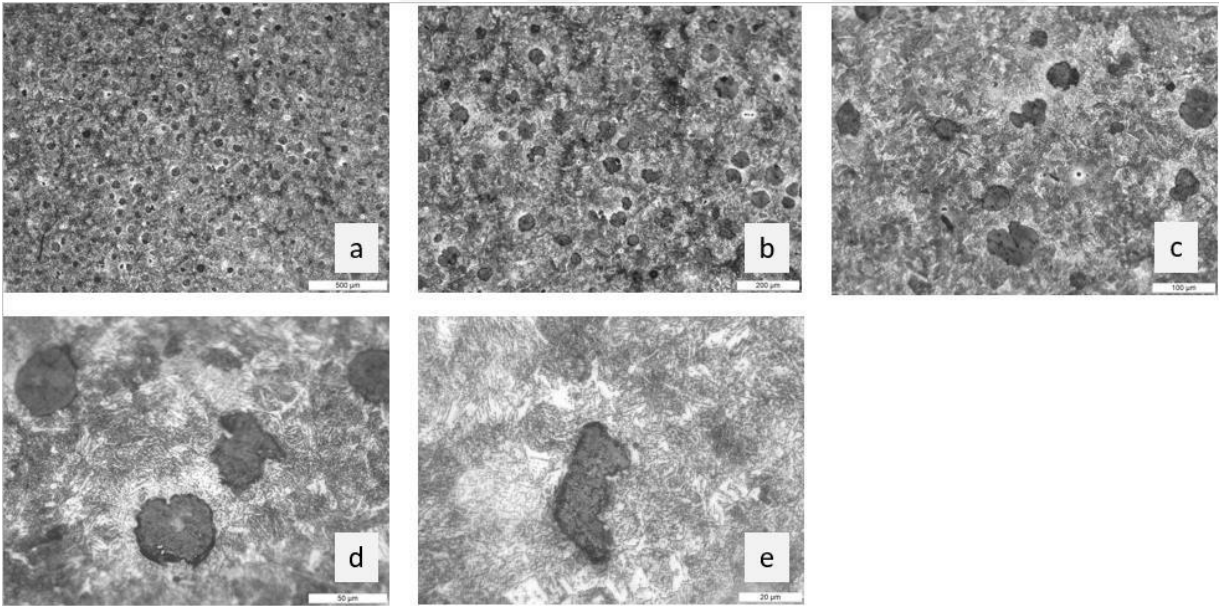
Şekil 3.7. S4 numunesinin optik mikroskop görüntüleri a) 5x, b) 10x, c) 20x, d) 50x, e) 100x



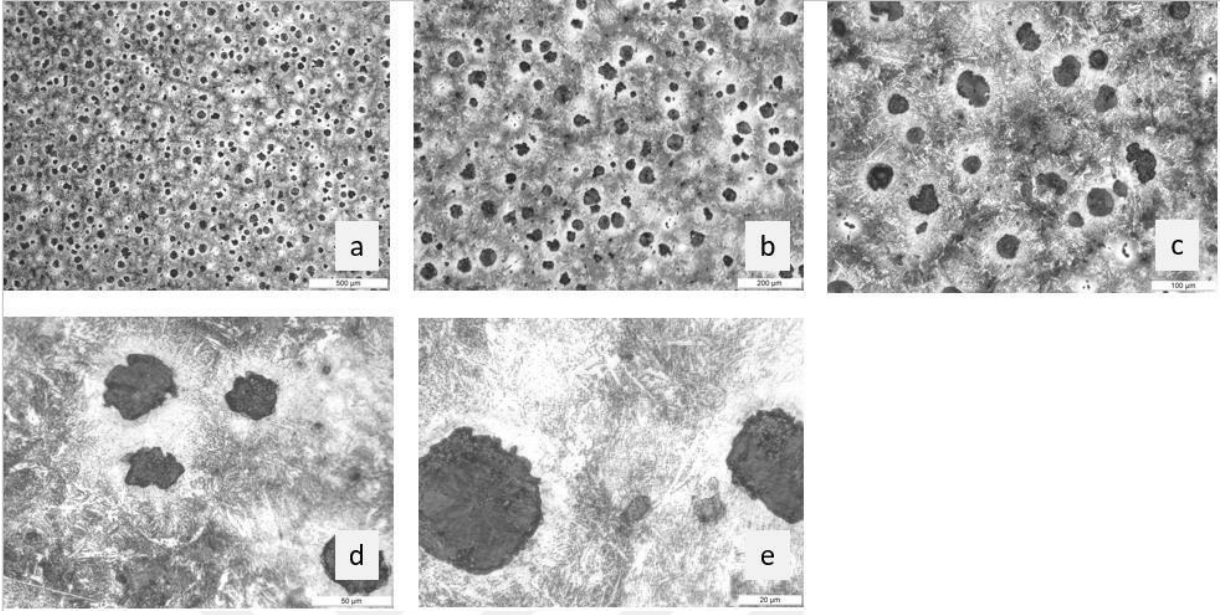
Şekil 3.8. S5 numunesinin optik mikroskop görüntüleri a) 5x, b) 10x, c) 20x, d) 50x, e) 100x, f) 1000x



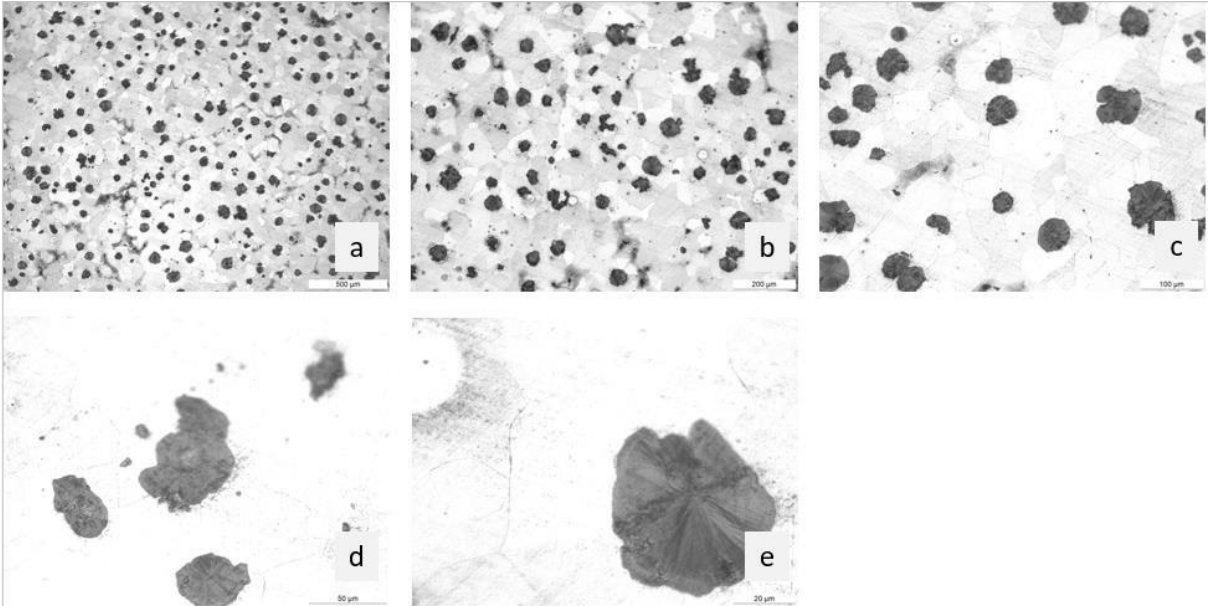
Şekil 3.9. S6 numunesinin optik mikroskop görüntüleri a) 5x, b) 10x, c) 20x, d) 50x, e) 100x, f) 1000x



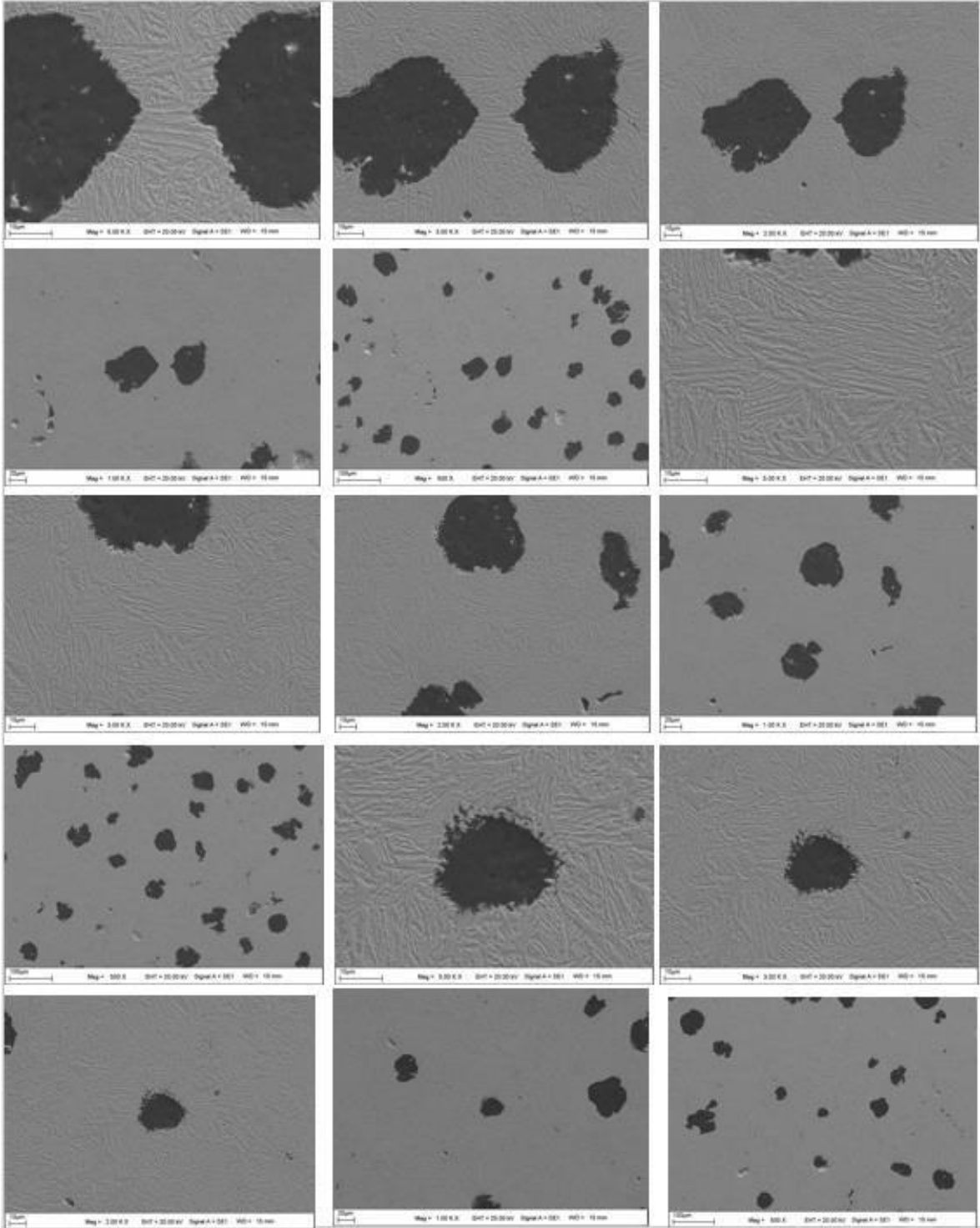
Şekil 3.10. S7 numunesinin optik mikroskop görüntüleri a) 5x, b) 10x, c) 20x, d) 50x, e) 100x



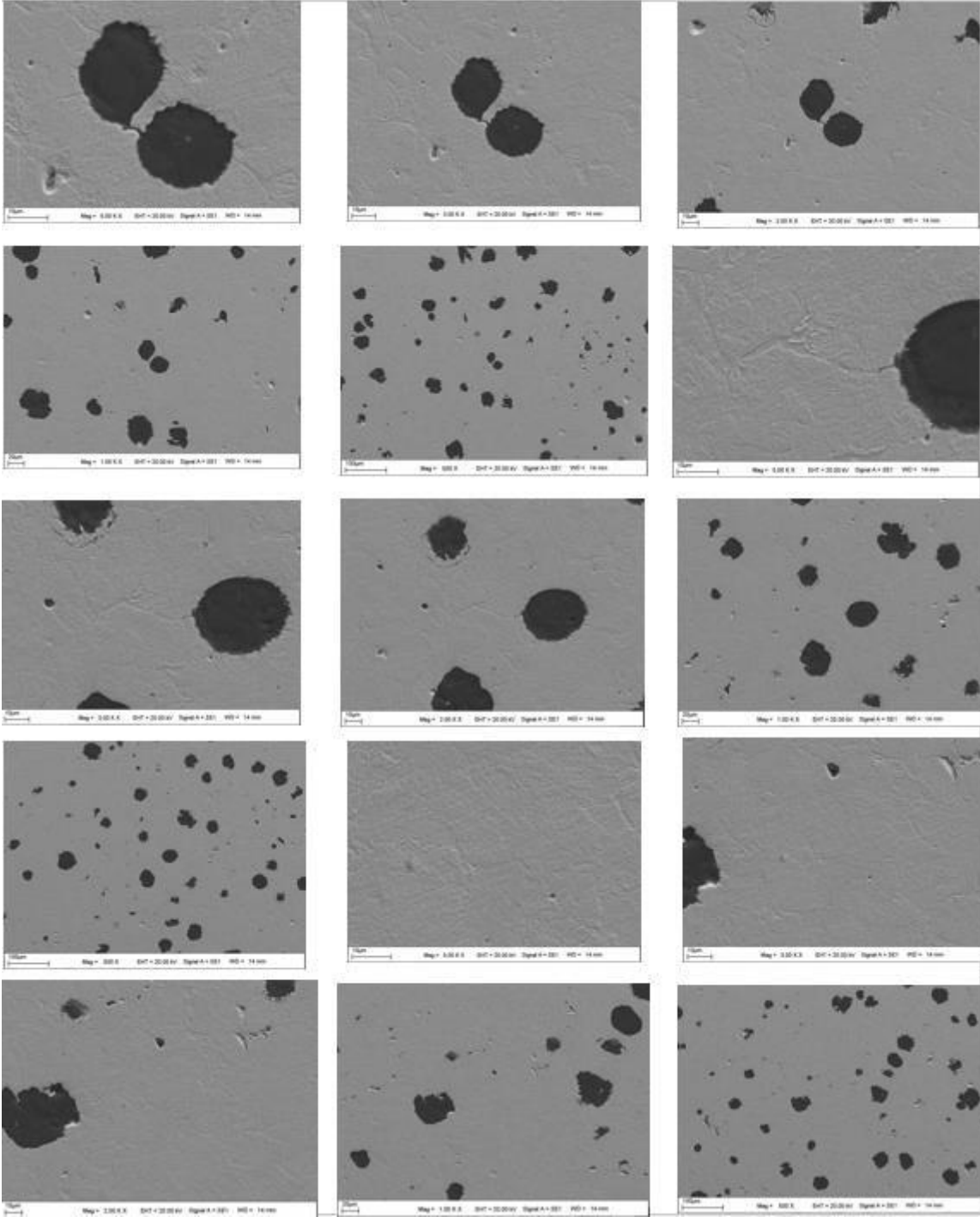
Şekil 3.11. S8 numunesinin optik mikroskop görüntüleri a) 5x, b) 10x, c) 20x, d) 50x, e) 100x



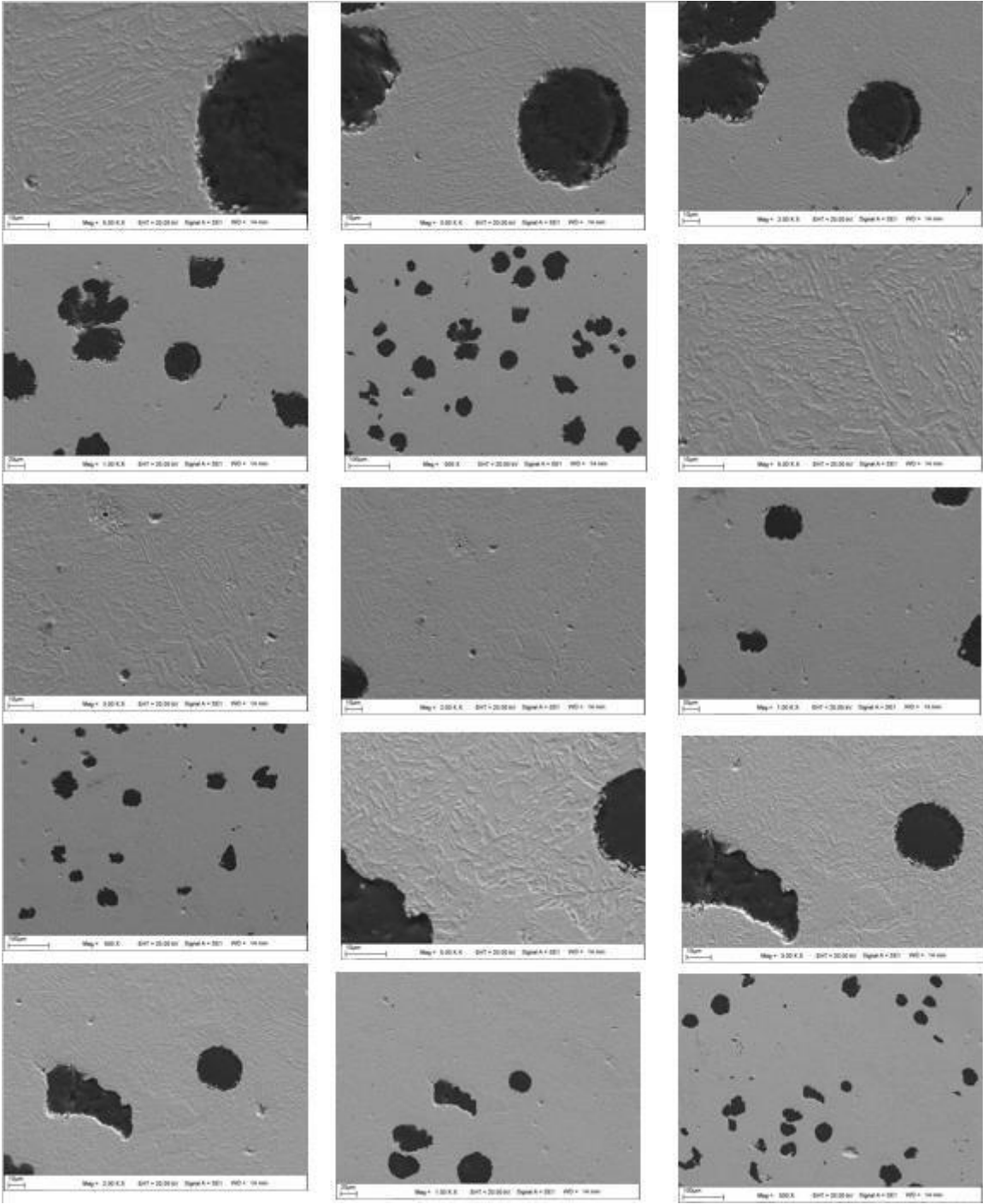
Şekil 3.12. Sreferans numunesinin optik mikroskop görüntüleri a) 5x, b) 10x, c) 20x, d) 50x, e) 100x



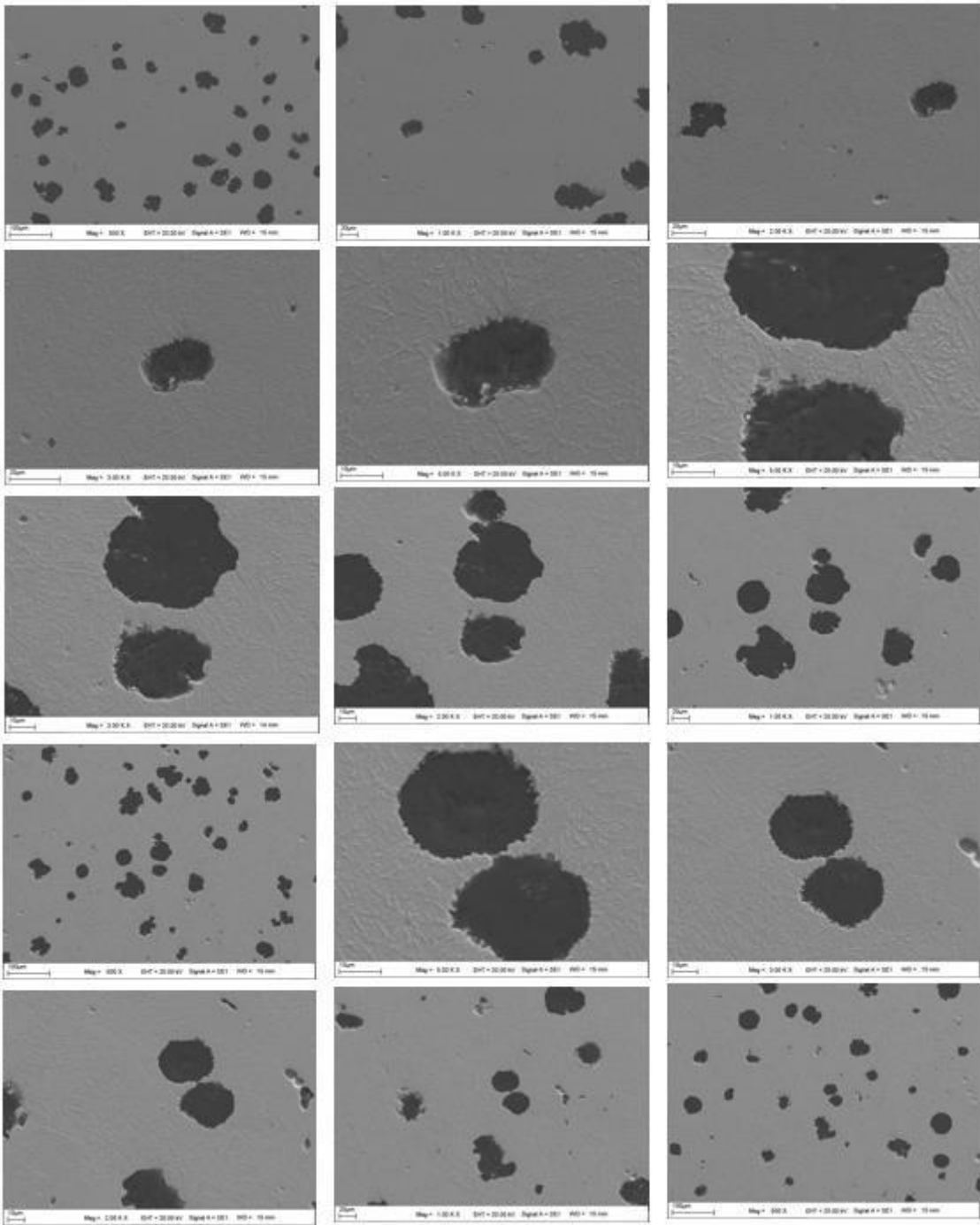
Şekil 3.13. S3 numunesinin SEM görüntüleri



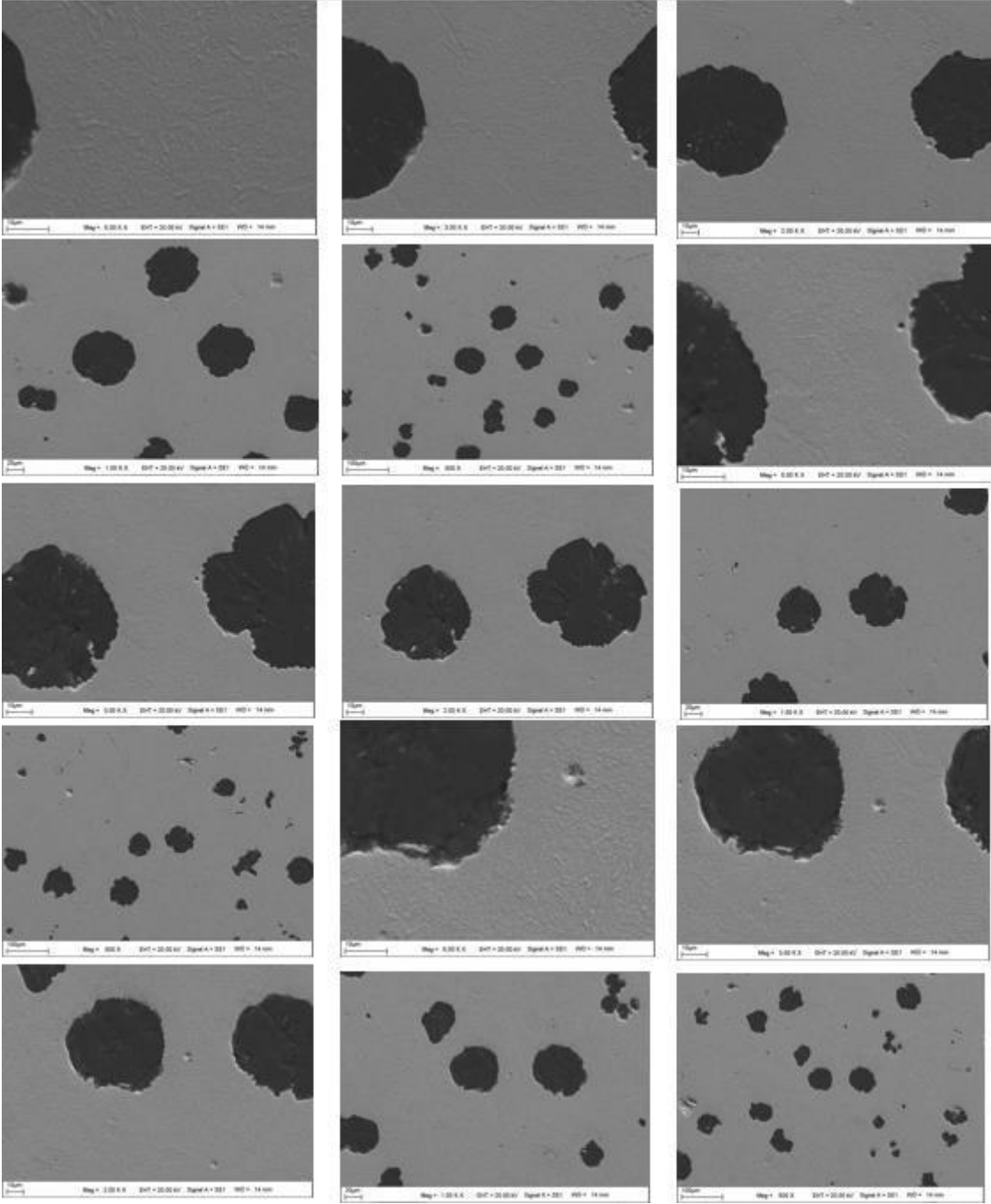
Şekil 3.14. S4 numunesinin SEM görüntüleri



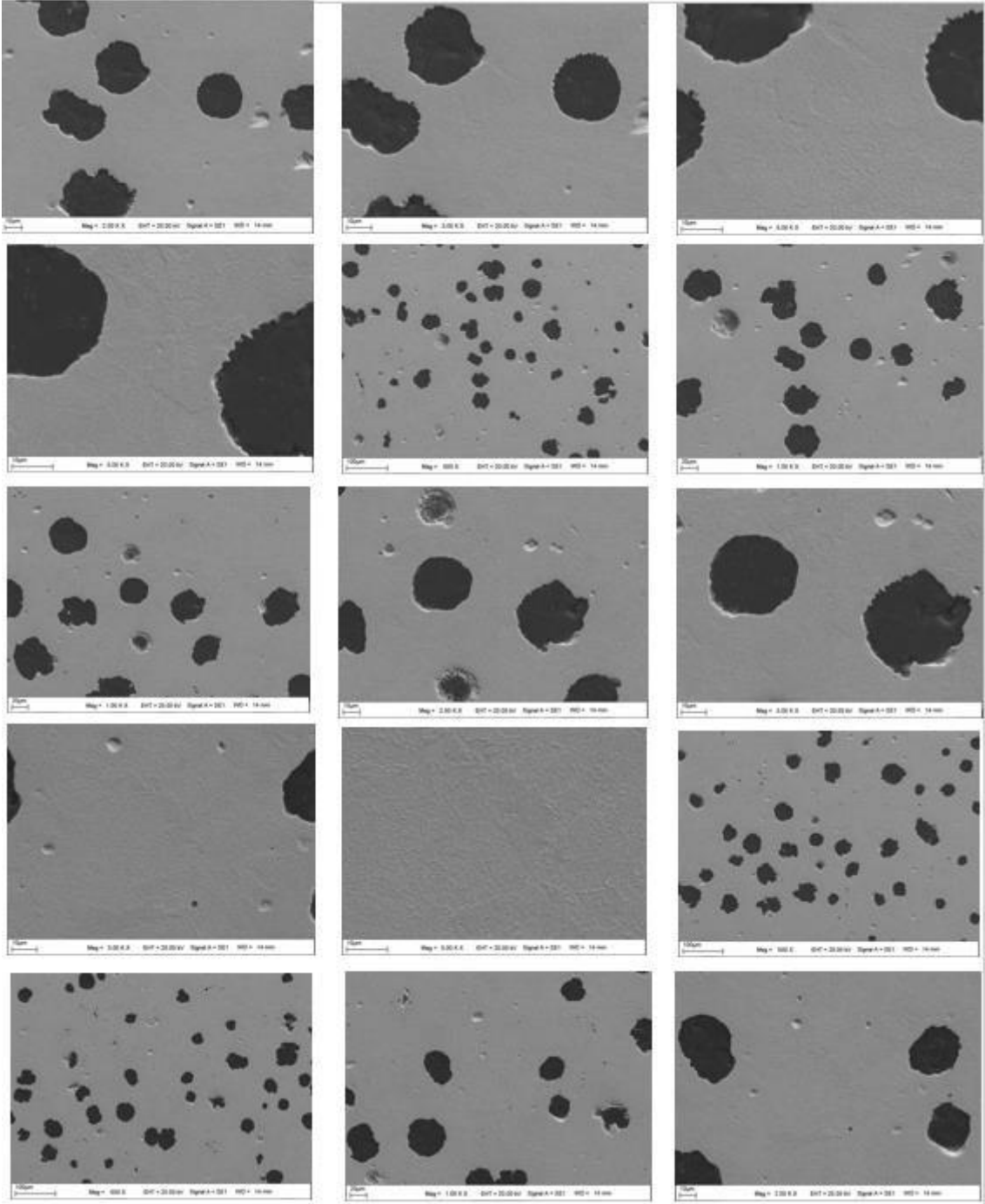
Şekil 3.15. S5 numunesinin SEM görüntüleri



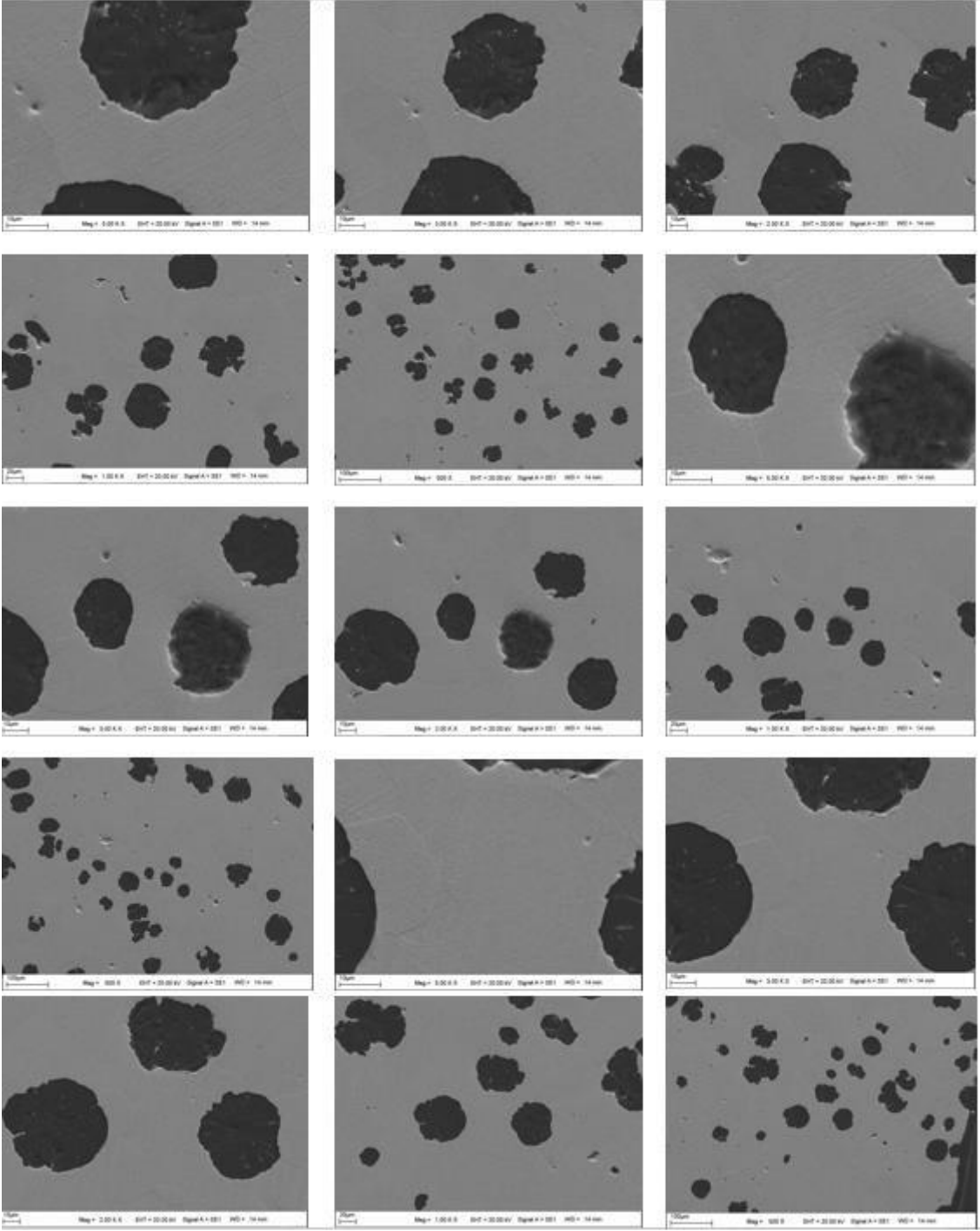
Şekil 3.16. S6 numunesinin SEM görüntüleri



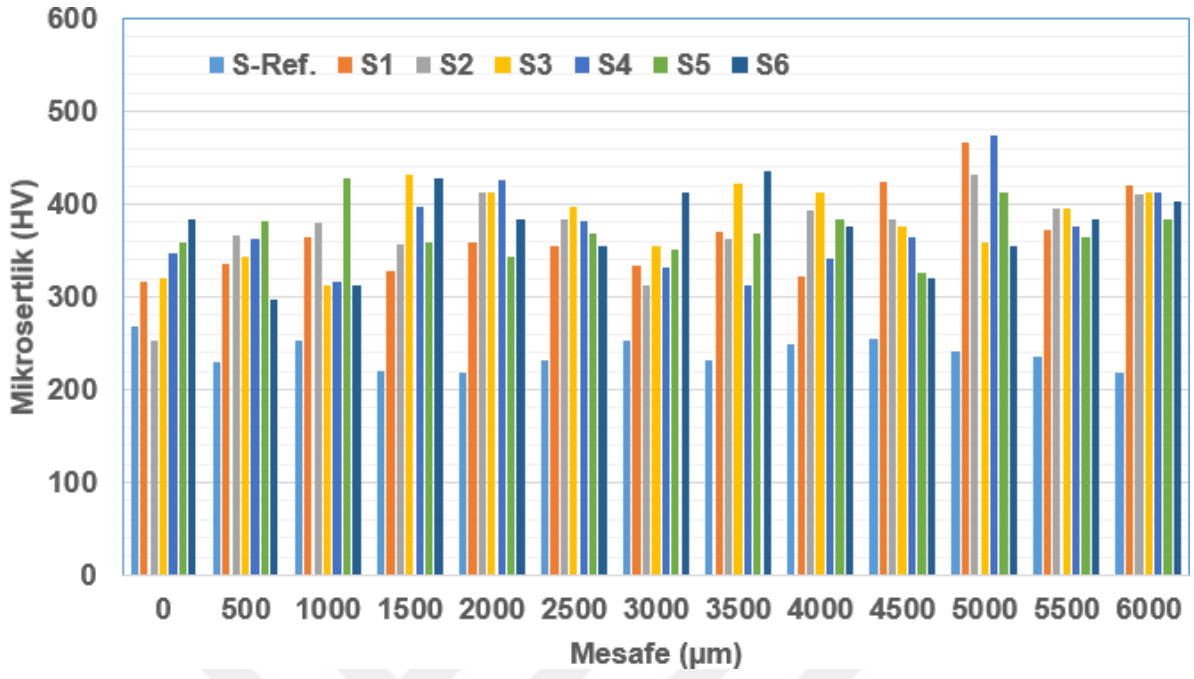
Şekil 3.17. S7 numunesinin SEM görüntüleri



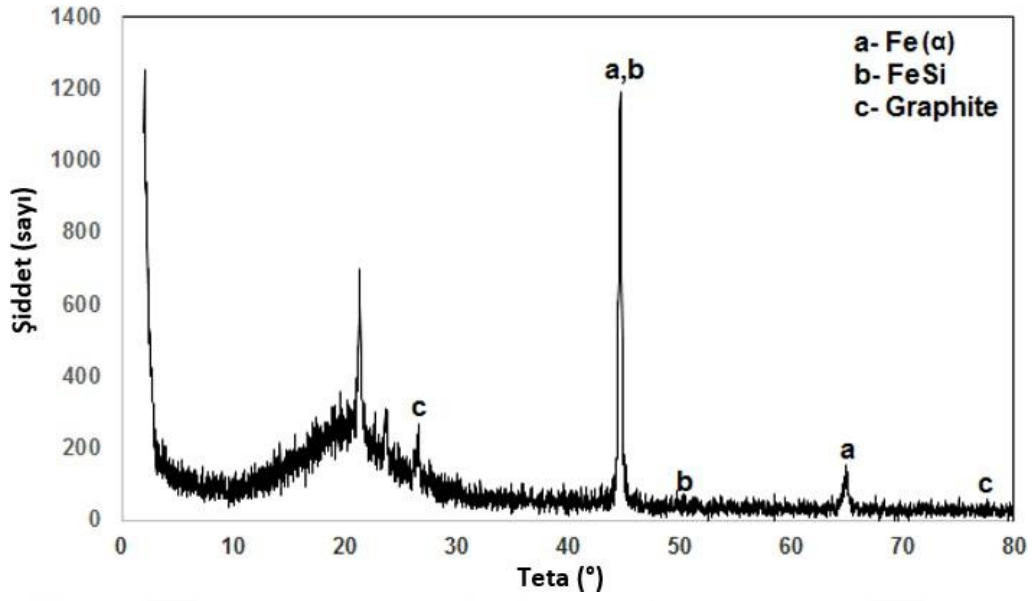
Şekil 3.18. S8 numunesinin SEM görüntüleri



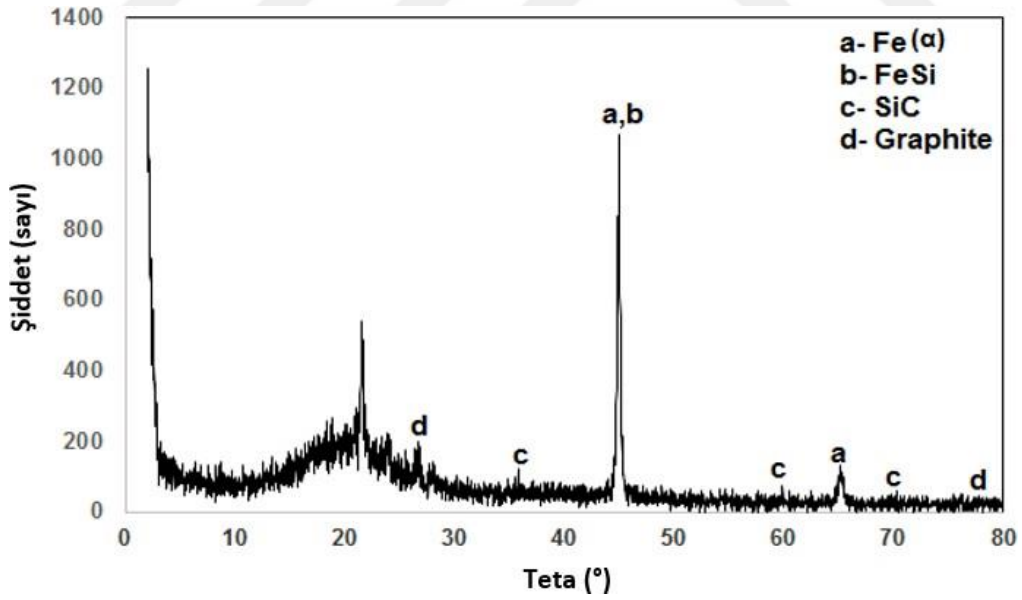
Şekil 3.19. Sreferans numunesinin SEM görüntüleri



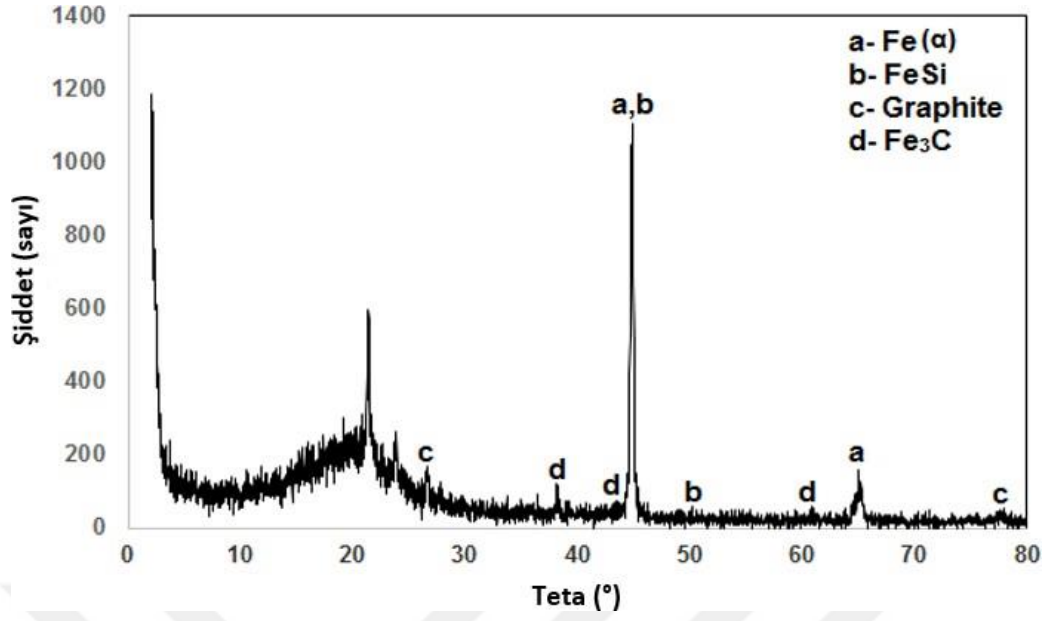
Şekil 3.20. Numunelerin sertlik grafiği



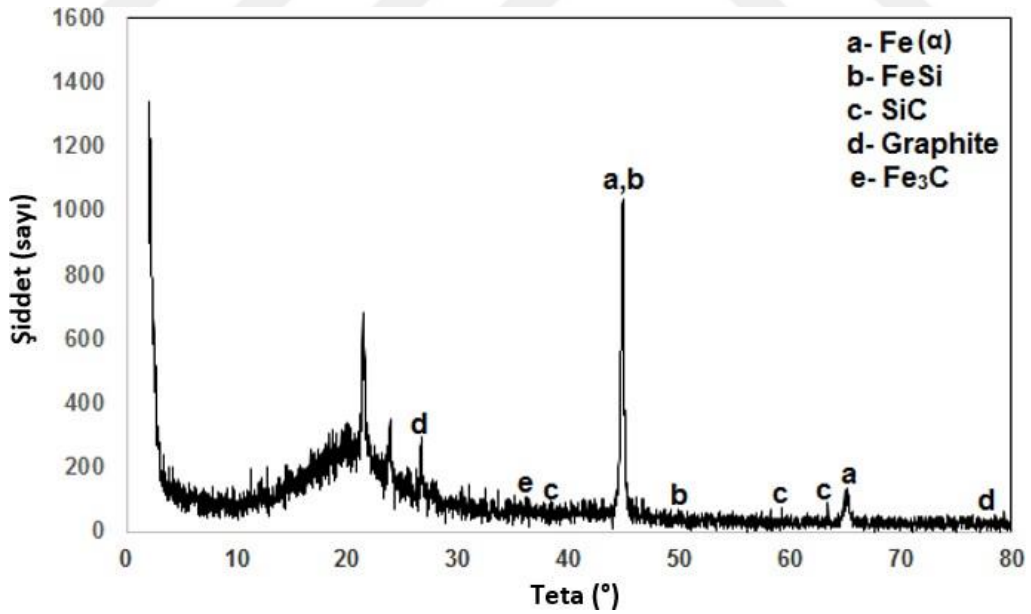
Şekil 3.21. S1 numunesinin XRD grafiği



Şekil 3.22. S4 numunesinin XRD grafiği



Şekil 3.23. S6 numunesinin XRD grafiği



Şekil 3.24. S7 numunesinin XRD grafiği