

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ
DÖKME DEMİRDE ISIL İŞLEM
PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Fadi HAMMAMI

Ekim, 2019
İZMİR

ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRDE ISIL İŞLEM PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

Fadi HAMMAMI

**Ekim, 2019
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

FADI HAMMAMI, tarafından **DR. ÖĞR. ÜYESİ BAHADIR UYULGAN** yönetiminde hazırlanan “**ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRDE ISIL İŞLEM PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



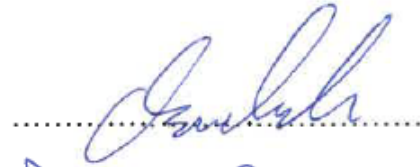
Dr. Öğr. Üyesi Bahadır UYULGAN

Yönetici



Dr. Öğr. Üyesi Funda AK AZEN

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Osman CULHA

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Öncelikle, başarımın direkt sebebi olan ve beni cesaretlendirdiği için danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Bahadır UYULGAN'a teşekkür etmek istiyorum.

Bana bu tezi tamamlama imkânı sağlayan herkese en içten teşekkürlerini iletmek isterim. Dokuz eylül üniversitesi üyeleri Dalyan ÖZKAN'a, Arş. Gör. Dr. Orkut SANCAKOĞLU'na, Arş. Gör. Şükrü KAYA'ya, Arş. Gör. Ramazan DALMIŞ'a Laboratuvarında deneyler yapmaya yardımcı oldukları için özel bir şükran duyuyorum.

Bu tezi sonuçlandırmak için beni cesaretlendiren aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ediyorum.

Fadi HAMMAMI

ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRDE ISIL İŞLEM PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

ÖZ

Bu araştırmada, östemperleme parametrelerin (zaman ve sıcaklık) küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Dikkan Döküm A.Ş. şirketinden temin edilen numunelerin üzerine çekme ve Charpy testleri uygulanmıştır. Araştırmada kullanılan numuneler Alman standardına göre küresel grafitli dökme demir türlerinden GGG 40'tır. Östemperleme sıcaklığı ve zamanına göre, numuneler 10 gruba ayrılmıştır. 9 gruba ısıtıl işlem yapılmış ve bir grup sonuçları karşılaştırmak için bırakılmıştır. 9 gruptaki bütün numuneler 900 °C 'a kadar ısıtılıp sabit sıcaklıkta 2,5 saat bekletilmiştir. İkinci aşamada, yüzde 45 potasyum nitrat ve yüzde 55 sodyum nitrattan oluşan tuz banyosu kullanarak numuneler 3 set olarak 300, 375 ve 450 °C'ye hızla soğutulmuştur. Her sıcaklıktaki gruplar üç değişik zamanla (1, 2 ve 3 saat) tuz banyosunda bekletilmiştir. Son aşamada, numuneler havada soğutulmuştur. Çekme, sertlik ve darbe deneyleri ile numunelerin mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Optik mikroskop vasıtasıyla numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Bu incelemenin amacı, grafitin oranının ve şeklinin, yapıdaki fazların ve matrisin numunelerin mekanik davranışlarına etkilerinin incelemesidir.

Sonuç olarak, östemperleme kullanılırken numunelerin mekanik özelliklerinin iyileştiği gözlenmektedir. Ayrıca, bu işlemin uzamaya etkisi olumsuzdur. Östemperleme sıcaklığı arttığında akma ve çekme dayanımı azalmaktadır. 375 °C 'de östemperleme sıcaklığında en yüksek uzama değerlerine ulaşılmıştır. Yine bu sıcaklık için darbe enerjisi ortalama olarak daha yüksektir. Östemperleme sıcaklığında bekletme süresi 2 saati aştığında küre boyutu ve buna bağlı grafit oranı artmaktadır.

Anahtar kelimeler: Östemperleme, Küresel Grafitli Dökme Demir, GGG 40

OPTIMIZATION OF HEAT TREATMENT PARAMETERS IN AUSTEMPERED SPHEROIDAL GRAPHITE CAST IRON

ABSTRACT

In this research, influences of austempering parameters (time and temperature) on the mechanical properties and microstructure of ductile iron have been studied. The investigation was applied on a set of tensile samples and Charpy samples which were provided from Dikkan Döküm A.Ş. company. The material of samples was GGG 40 which a grade of ductile iron according to German standard. The samples were divided into 10 groups upon austempering temperatures and time so that austempering process was applied on 9 groups and one group was stayed as-cast for comparing the results. All samples of 9 groups were heated to 900 °C for 2.5 hours. This stage was followed by cooling process to 300, 375 and 450 °C using salt bath contained a mixture of sodium nitrate and potassium nitrate with percentages of 55 and 45 respectively, so that every 3 groups were cooled to a temperature. Every group in temperature was held in salt bath for 1, 2 and 3 hours. Then, they were cooled to room temperature by air. Mechanical properties of samples were evaluated by using tensile, impact and hardness tests. The microstructures of samples were obtained by using optical microscope. This test gave ability to predict to reasons of mechanical behavior which are affected by the phases, graphite content and shape.

It was observed that austempering process enhanced the mechanical properties of samples considerably but harmed the elongation. Tensile and yield strength decrease with the increase in austempering temperature. The highest elongation is obtained at 375°C. Impact energy at this temperature is also higher than those of the other temperatures. When the holding time of every austempering temperature is exceeded 2 hours, the nodule size and graphite content increase.

Keywords: Austempering, Spheroidal Graphite Cast Iron, GGG 40

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xii

BÖLÜM BİR-GİRİŞ 1

1.1 Ferro-Malzemeler	2
1.1.1 Metallerin Türleri	2
1.1.1.1 Ferro Alaşımları	3
1.1.1.2 Demir Dışı Alaşımlar	3
1.1.2 Fe-C Faz Diyagramı	3
1.1.3 Ferro Malzemenin Grupları	4
1.1.3.1 Çelik	4
1.1.3.2 Dökme Demir	5
1.1.4 Yapılar.....	5
1.1.4.1 Ferrit	5
1.1.4.2 Perlit	5
1.1.4.3 Östenit	5
1.1.4.4 Sementit	6
1.1.4.5 Martensit	6
1.1.4.6 Bainit	7
1.1.4.6.1 Üst Bainit	7
1.1.4.6.2 Alt Bainit	7
1.2 Dökme Demirin.....	8
1.2.1 Dökme Demirin Türleri	8
1.2.1.1 Gri Dökme Demir	8

1.2.1.2 Beyaz Dökme Demir	9
1.2.1.3 Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD)	10
1.2.1.4 Verimküler Grafitli Dökme Demir	10
1.2.1.5 Temper Dökme Demir	12
1.2.1.5.1 Tanımlama	12
1.2.1.5.2 Sementit / Grafit Dönüşümü	12
1.2.1.5.3 Temper Dökme Demirin Mikroyapıları	13
1.2.1.5.4 Temper Dökme Demirin Sınıflandırılması	14
1.2.1.5.5 Özellikler	15
1.2.1.5.6 Uygulamalar	16
1.3 Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD).....	16
1.3.1 KGDD Tarihi	16
1.3.2 KGDD Mikroyapısı	17
1.3.3 KGDD'in Sınıflandırması	18
1.3.4 KGDD Özellikleri Etkileyen Faktörler	19
1.3.4.1 Grafit Şekiller	19
1.3.4.2 Grafit Miktarı	21
1.3.4.3 Matris Yapısı.....	21
1.3.4.4 Kesit Alanı	22
1.3.5 KGDD Üretimi	22
1.3.5.1 Magnezyum Eklemesinin Aşaması.....	23
1.3.5.1.1 Fischer Yöntemi (Metalik Magnezyum Yöntemi)	23
1.3.5.1.2 Sandviç Yöntemi	23
1.3.5.1.3 Flotret Yöntemi	25
1.3.5.2 Magnezyum İçeriğinin Kontrolü	25
1.3.5.3 Aşılama	26
1.3.6 KGDD'in Isıl İşlemi	26
1.3.6.1 Genel Olarak Isıl İşlem	26
1.3.6.2 KGDD'e Uygulanan Isıl İşlemler	27
1.3.6.2.1 Gerilme Gidermesi	27
1.3.6.2.2 Normalleştirme	27
1.3.6.2.3 Su Verme ve Temperleme.....	27

1.3.6.2.4 Tavlama	27
1.3.6.2.5 Östemperleme	28
1.4 Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir (ÖKGDD)	28
1.4.1 Östemperleme Prosesi	29
1.4.2 Östemperleme İşlemine Etki Eden Faktörler	30
1.4.3 Soğutma Ortamı	30
1.4.4 Mikroyapı	31
1.4.5 Östemperleme Prosesinin Etkileri	31
1.4.5.1 Östemperleme Sıcaklığı Etkisi	31
1.4.5.2 Östemperleme Süresi Etkisi.....	32
1.4.6 Alaşımlama Elementlerinin Etkileri	32
1.4.6.1 Karbon	32
1.4.6.2 Manganez	32
1.4.6.3 Nikel.....	33
1.4.6.4 Molibden	33
1.4.6.5 Titan	33
1.4.6.6 Krom.....	33
1.4.6.7 Niyobyum	34
1.4.7 ÖKGDD Özellikleri	34
1.4.8 ÖKGDD Uygulamaları.....	35
1.5 Literatür	36
BÖLÜM İKİ-DENEYSEL ÇALIŞMA	42
2.1 Malzeme Bileşimi	42
2.2 Östemperleme İşlemi	42
2.3 Malzeme Özellikleri	43
2.3.1 Çekme Testi	43
2.3.2 Sertlik Testi	44
2.3.3 Darbe Testi	44
2.3.4 Metalografik İnceleme	44

BÖLÜM ÜÇ-DENEY SONUÇLARI45

3.1 Metalografik İncelemesinin Sonuçları45

3.2 Çekme Deneyi Sonuçları.....51

3.3 Darbe Deneyi Sonuçları.....54

3.4 Sertlik Deneyi Sonuçları55

BÖLÜM DÖRT-SONUÇLAR VE ÖNERİLER58

KAYNAKLAR60



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Fe-C faz diyagramı	4
Şekil 1.2 Martensit yapıları (a) lamel, (b) levha	6
Şekil 1.3 Bainitin türlerinin oluşumları	7
Şekil 1.4 Gri dökme demirin mikroyapısı	9
Şekil 1.5 Beyaz dökme demirin mikroyapısı	10
Şekil 1.6 Verimküler dökme demirin mikroyapısı	11
Şekil 1.7 Magnezyum oranının grafitin şekline etkisini	12
Şekil 1.8 Temper demirin mikroyapıları: a) perlitik temper demir, b) Martensitik temper demir ve c) Ferritik temper demir	13
Şekil 1.9 Temper dökme demirin mikroyapıları: a) siyah kalplı b) beyaz kalplı temper dökme demir	13
Şekil 1.10 (Mn/S) oranının grafit şekline etkisi	16
Şekil 1.11 KGDD mikroyapıları:(a) ferritik dökme demir (b) perlitik dökme demir...	17
Şekil 1.12 Ferrit ve perlitten oluşan matris içeren KGDD	18
Şekil 1.13 KGDD'in değişen küresellik oranları sahip olan mikroyapıları: a) %99, b)%80 ve c) %50. 36X.	20
Şekil 1.14 KGDD'de grafit küreselliğinin çekme ve akma dayanımlarına etkisi	20
Şekil 1.15 Dayanım ve perlit miktarı ile ilişki. Grafit küreselliğinin oranına bağlı, perlit miktarının a) çekme dayanımına b) akma dayanımına etkisi	22
Şekil 1.16 Fischer dönüştürücüsünün çalışma prensibi. (a) geminin Doldurma pozisyonu. (b) geminin işlem pozisyonu	23
Şekil 1.17 KGDD'in magnezyum arıtımında kullanılan pota ve tandiş	25
Şekil 1.18 ÖKGDD'de östemperleme sıcaklığının a) akma dayanımına ve b) uzamaya etkisi.	35
Şekil 2.1 Araştırmada kullanılan östenitlemenin ve östemperlemenin sıcaklıkları ve süreleri	43
Şekil 2.2 Deneyde kullanılan çekme numunelerin boyutları.	43
Şekil 2.3 Charpy deney numunesinin boyutları	44
Şekil 3.1 Deney numunelerine ait döküm yapısı a) x100 büyütme, b) x200 büyütme, c) x500 büyütme	45

Şekil 3.2 60 dakika östemperleme sonucu x500 büyütmede oluşan mikro yapı görüntüleri a) 300°C, b) 375°C c) 450 °C	46
Şekil 3.3 120 dakika östemperleme sonucu x500 büyütmede oluşan mikro yapı görüntüleri a) 300°C, b) 375°C c) 450 °C	46
Şekil.3.4 180 dakika östemperleme sonucu x500 büyütmede oluşan mikro yapı görüntüleri a) 300°C, b) 375°C c) 450 °C	47
Şekil 3.5 Östemperlenmiş numunelere ait östemperleme süresi ve mm ² 'de küre sayısının değişimi	49
Şekil 3.6 Östemperlenmiş numunelere ait östemperleme süresi ve grafit oranının değişimi.....	50
Şekil 3.7 Östemperlenmiş numunelere ait östemperleme süresi ve küreselliğin değişimi.....	50
Şekil 3.8 Östemperlenmiş numunelere ait numunelere ait östemperleme süresi ve küre boyutunun değişimi.....	51
Şekil 3.9 Östemperlenmiş numunelere ait östemperleme süresi ile akma dayanımının değişimi.....	52
Şekil 3.10 Östemperlenmiş numunelere ait östemperleme süresi ile çekme dayanımının değişimi.....	53
Şekil 3.11 Östemperlenmiş numunelere ait östemperleme süresi ve minimum yükte uzamanın değişimi.....	53
Şekil 3.12 Östemperlenmiş numunelere ait östemperleme süresi ile darbe enerjisinin değişimi.....	55
Şekil 3.13 Östemperlenmiş numunelere ait östemperleme süresi ve sertliğin değişimi.....	57

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 ASTM standardına göre KGDD'in sınıflandırma örnekleri	19
Tablo 1.2 Otomotiv Mühendisleri Derneğine göre (SAE) KGDD'in sınıflandırılması	19
Tablo 1.3 ISO 1083 standardına göre KGDD sınıflandırması	19
Tablo 1.4 KGDD üretiminde kullanılan Mg alaşımları	24
Tablo 1.5 Tuz banyosunda kullanılan tuzların erime ve uygulama sıcaklıkları.....	31
Tablo 2.1 GGG 40 içerdığı kimyasal elementler.	42
Tablo 3.1 Döküm halindeki ve östemperlenmiş numunelere ait mm ² 'de küre sayısı, grafit oranı, küresellik ve küre boyutu tablosu	48
Tablo 3.2 Östemperlenmiş numunelere ait çekme deneyi sonuçları.....	51
Tablo 3.3 Östemperlenmiş numunelere ait darbe enerjisi ve sertlik testi sonuçları...	54
Tablo 3.4 Östemperlenmiş numunelere ait Vickers sertlik test sonuçları.....	56

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Malzeme özelliklerinin incelenmesi, faz dönüşümleri ve elemanların özellikler üzerindeki etkileri, gerekli uygulamalarda kullanılabilecek bir malzeme elde etmek için uygun malzeme veya işlem seçmek için önemlidir. Endüstrinin ihtiyaçları temin etmek amacıyla iki ana malzeme kullanmaya düşünülmektedir. Uygulamalarda en çok uyumlu olan çeliktir. Ayrıca, çeliğin maliyeti yüksek olduğu için dökme demirlere önem verilmiştir.

Dökme, çelik terimi gibi geniş bir demir alaşımları ailesini tanımlar. Dökme demirler çok bileşenli demir alaşımlarıdır. Bunlar esas (demir, karbon, silikon), ikincil ve alaşımlama elementleri içerir. Dökme demir, çelikten daha yüksek karbon ve silikon içeriğine sahiptir. Yüksek karbon içeriği nedeniyle, dökme demirin yapısı çelikten daha zengin bir karbon fazı gösterir. Öncelikle bileşim, soğutma hızı ve ısıtılmasına bağlı olarak dökme demir, kullanılan Fe-Fe₃C sistemine veya kararlı demir-grafit sistemine göre katılaşabilir (Davis, 1996).

Sementit olarak karbon çökmesi durumunda kırılma yüzeylerine açık renkli metalik bir görünüm verir (Beyaz dökme demir), grafit ise gri görünmesini sağlar (gri dökme demir). Diğer karakteristik mikroyapısal özellikler, grafit çökeltilerinden (lamel veya nodüler) ve perlitik veya ferritik matristen oluşan çelik benzeren bir yapıdır. Manganez gibi bazı alaşımlama elementleri eklenerek grafit şekli kontrol edilebilmektedir (Berns ve Theisen, 2008).

Östemperleme, mukavemet ve tokluk arttırmak için demir malzemelere uygulanabilen izotermal bir ısıtılma işlemidir. Bu işlem iki aşamadan oluşmaktadır. Östenitleme, östemperlemenin ilk aşamasını belirten bir terimdir. Malzeme 815-950°C arasında belirli bir sıcaklığa ısıtılır ve belirlenen süre boyunca aynı sıcaklıkta tutulur. İkinci aşama östemperleme olarak adlandırılır ve bu aşamada malzeme 250-400°C arasında belirli bir sıcaklığa soğutulup özel bir ortamda belirli bir sürede tutulur. Sonrasında, bu aşamayı oda sıcaklığına soğutulmaktadır (ASM 1, 1993).

Östempelenmiş küresel grafitli dökme demirde elde edilen mikro yapı, yüksek karbon östenit ve ferrit plakaların bir karışımı olan "ösferrit" olarak adlandırılır. Bu mikroyapı alaşımın mekanik özelliklerini etkili bir şekilde artırır. Bu yüzden ÖKGDD, mükemmel yorulma davranışı ve aşınma direnci ile yüksek mukavemet ve tokluğun iyi bir kombinasyonudur (ASM 1, 1993).

Bu çalışmada, yüksek süneklik ve yüksek sertlik elde etmek için yüksek miktarda ösferrit oluşturmak amacıyla en uygun sıcaklık ve zaman belirlenmektedir. Araştırmada kullanılan malzeme GGG 40'dır. Bu tip Alman standardına göre küresel grafitli dökme demirden bir sınıftır.

1.1 Ferro Malzemeler

Metallerin elektrik akımının yüksek iletkenlik, parlaklık ve pozitif iyonlar dönüşümüne yol açar, kimyasal reaksiyon, sırasında kolaylıkla elektron kaybı dahil olmak üzere çeşitli özelliklere sahip maddeler ifade eder. Bu özellik (elektronları kaybeden) göre, elementler, periyodik tabloda sıralanmıştır.

Fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre sınıflandırılmış birkaç metal türü vardır. Metallerin çoğu cıva hariç katı haldedir. Ek olarak, metaller farklı biçimlerde bükülme ve şekil alma yeteneğine sahiptir. Bu nedenle metaller birçok alet ve makinenin imalatında kullanılır. Metaller oksitlenir ve havaya maruz kaldığında korozyon meydana gelir. Saf metallerin özellikleri ve hayatımızın gereklilikleri nedeniyle, endüstrilerde ve aletlerde kullanılabilecek alaşımları oluşturmak için bazı elementler saf metallere eklenir (ASM 1, 1993).

1.1.1 Metallerin Türleri

Metallerin esasına ve özelliklerine göre iki tip alaşım vardır:

1.1.1.1 Ferro Alaşımları

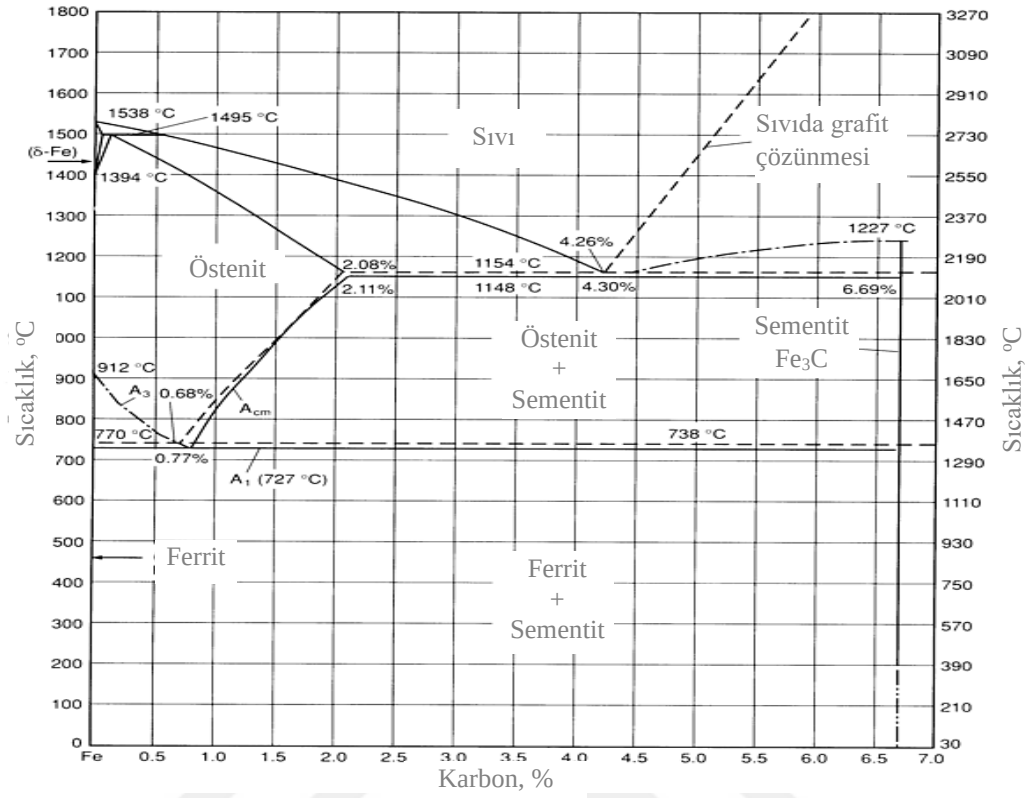
Bu tip alaşımların esasları demir element ve karbon elementtir. Ferro alaşımları yüksek sertlikleri ve çeşitli şekillere şekillendirme kabiliyetleri ile karakterize edilir. Onlar, ısı ve elektrik iyi bir iletkendir. Bu alaşımlar çok g olmaları nedeniyle ağır makina, yapı ve teçhizat imalatında kullanılır. Ağır ağırlıklar ve sert evre koşulları taşıyabilirler. Bununla birlikte, zamanla paslanabilirler ve yüksek sıcaklıklarda eriyebilirler. Bu tipin bir rneği demir, çeliktir (Berns ve Theisen, 2008).

1.1.1.2 Demir Dışı Alaşımlar

Bu metal türü, demir elemanı yerine AL, Cu, ... esas elemanı olarak içerir çünkü demir elemanı bu elemanlardan daha ağırdır. Aynı zamanda daha az aşındırıcı ve daha esnektir; İstenilen herhangi bir formu oluşturabilmek için daha az basınç dayanımı gerektirir, bu metaller ısı ve elektriği iyi verme kabiliyetiyle karakterize edilir ve önceki avantajlar nedeniyle, bu metalleri kullanma talebi günümüzde artmaktadır. Örneğin alüminyum, kurşun ve bakır elementi (Berns ve Theisen, 2008).

1.1.2 Fe-C Faz Diyagramı

Fe-C faz diyagramı farklı karbon oranı ve sıcaklık için yarı kararlı dengede hangi fazların oluşturulacağını gösterir. Belirlenmiş karbon oranı, sıcaklıklar ve soğutma hızında farklı fazlar oluşur. Her faz, diğer fazdan farklı özellikler ve mikroyapılar bulunur. şekil 1.1 demir-karbon faz diyagramındaki fazlar ve dönüşüm sıcaklıklarını gösterir (ASM 1, 1993).



Şekil 1.1 Fe-C faz diyagramı (ASM 1, 1993)

1.1.3 Ferro Malzemenin Grupları

Karbon içeriğine göre iki tip alaşım bulunabilir:

1.1.3.1 Çelik

Çelik, dünyanın en önemli mühendislik ve yapı malzemesidir. Yaklaşık 0,005 ila %2,14 “yüksek karbonlu çelik” değişen miktarlarda karbon içerir. Karbon, çeliğin mikroyapısı ve fazın özelliklerini değiştirir. Karbon içeriği, yüksek tokluk ve yüksek süneklik gibi bazı özellikler gerektiren çelikte düşük tutulur. Düşük karbon içeriği kaynak kabiliyetini artırır. Ancak sertlik, yorulma direnci ve çeliğin mukavemetini olumsuz yönde etkilemektedir (ASM 1, 1993).

1.1.3.2 Dökme Demir

Dökme demirler, karbon içeriği ağırlıkça %2,14'ün üzerinde olan bir demir alaşımları sınıfıdır. Çelik özellikleri ile karşılaştırıldığında dökme demir gevrekliğinin nedeniyle düşük süneklik ve işlenebilirliğe sahiptir. Alaşımlama elementleri ekleme ve ısıt işlemler gibi mekanik özelliklerini geliştirmek için dökme demir üzerine bazı yöntemler uygulanmaktadır (ASM 1, 1993).

1.1.4 Yapılar

1.1.4.1 Ferrit

HMK (hacim merkezli kübik) kristal sahip olan, küçük taneler ve düzensiz tane sınırları kapsayan ve oda sıcaklığında kararlı olan fazdır. Fazın yapıda karbon çözünürlüğü düşüktür (0,006-%0,024C), sünek ama sert değildir (ASM 9, 2004).

1.1.4.2 Perlit

Ferrit ve sementit tabakalarından oluşan ve düşük soğutma hızı ile elde edilen bir yapıdır. Karbon çözünürlüğü %0,8 (ASM 9, 2004).

1.1.4.3 Östenit

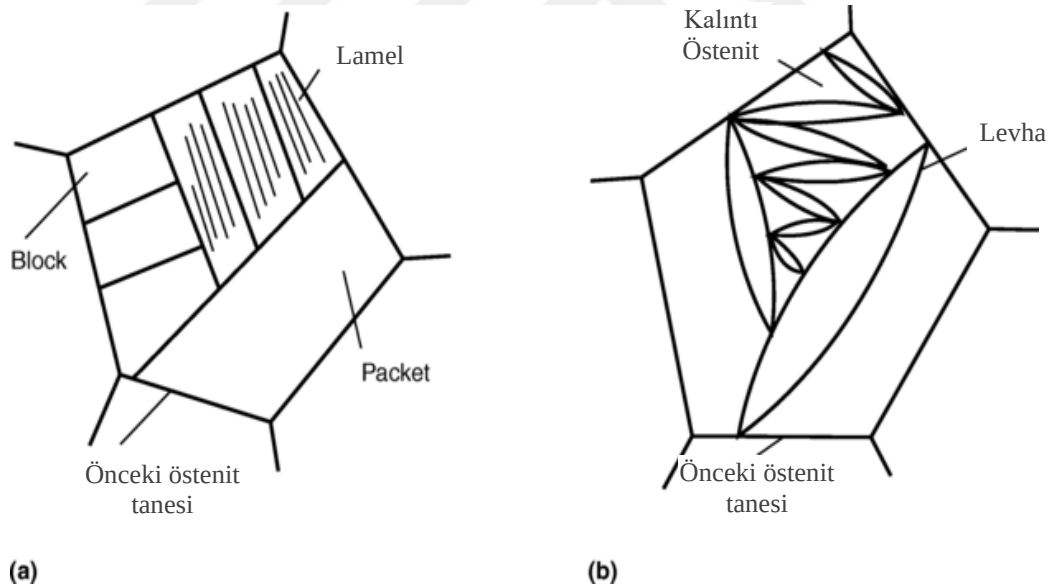
Yüksek sıcaklıklarda kararlı olan, büyük taneler ve düz tane sınırları kapsayan ve YMK (yüzey merkezli kübik) kristal sahip olan fazdır. Östenitte karbonun en yüksek miktarı %2,14'tür. sünek ve şekillendirebilir bir fazdır (ASM 9, 2004).

1.1.4.4 Sementit

Sementit, %6,67 karbon içeren yarı kararlı bir fazdır. Faz diyagramındaki en sert yapıdır ve kristal yapısı ortorombiktir. Gevreklik, düşük çekme dayanımı, ancak yüksek basınç dayanımı ile karakterize edilir (ASM 9, 2004).

1.1.4.5 Martensit

İzotermal olmayan koşullar altında hızlı bir şekilde soğutmak suretiyle oluşan yarı kararlı bir fazdır. Martensitik dönüşüm, soğutma hızına ve sıcaklığına bağlıdır. Martensit oluşumu martensit başlangıç sıcaklığında (M_s) başlar ve martensit bitirme sıcaklığında (M_f) biter ve bazı alaşım elementleri bu sıcaklıkları arttırabilir veya azaltabilir. Ferro martensit mikroyapılarında iki farklı morfoloji vardır: levha martensit ve lamel martensit ve bu tipler Şekil 1.2'de gösterilmiştir (ASM 9, 2004).



Şekil 1.2 Martensit yapıları (a) lamel, (b) levha (ASM 9, 2004)

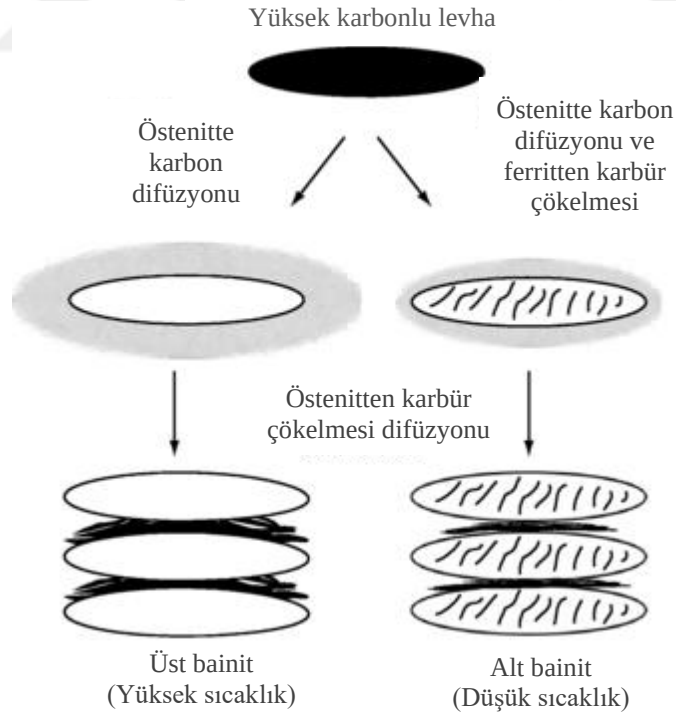
Martensit, yüksek karbon içeriği nedeniyle yüksek sertliği ve düşük süneklik gevrekliği ile karakterize edilir. Sünekliği tavlama ile artırmak mümkündür.

1.1.4.6 Bainit

Östenitin (γ) ferrit (α) ve sementite (Fe_3C) martensitik dönüşümünün üzerindeki ve perlitin altındaki sıcaklık aralığında ayrışmasından kaynaklanan bir fazdır. Bainitin genel morfolojisi, çubuk veya levha şekilleri alan ferrit tanelerinden ve ferrit taneleri içinde veya çubuk arası bölgelerinde çöktürülen karbürlerden oluşur. Sıcaklığa göre, iki tür bainit vardır: üst bainit ve alt bainit. (Şekil 1.3) (ASM 9, 2004).

1.1.4.6.1 Üst Bainit. Yüksek sıcaklıkta karbon ile doymuş bainitik ferrit plakasından çevre bölgeye difüzyonla çıkarıldığında oluşur ve bainitik ferrit iç karbürler içermemektedir (ASM 9, 2004).

1.1.4.6.2 Alt Bainit. Düşük sıcaklıklardaki karbon difüzyonu yavaş ve eksik olduğunda, karbürlerin ferrit taneleri ve çubuk arası bölgelerinde oluşmaktadır (ASM 9, 2004).



Şekil 1.3 Bainitin türlerinin oluşumları (ASM 9, 2004)

1.2 Dökme Demir

Dökme demir, birçok demir ve karbon alaşımları olarak adlandırılan genel bir terimdir. 2 ila %4 karbon artı 4 ila %5 silikon içerir ve belirli özellikleri elde etmek amacıyla krom, manganez veya nikel gibi başka elementler içerebilir, bu nedenle dökme demir yapı, özellikler ve kullanım alanları bakımından çok farklıdır (ASM 1, 1993).

Dökme demirin yüksek akışkanlık ve düşük maliyetle eritilmesi kolaydır, bu nedenle yapılar, üretim makineleri ve yüksek sertlik ve basınç gerilmelerine karşı iyi direnç gerektiren ekipman gibi farklı alanlarda dökme demirlerin kullanılması uygundur (ASM 1, 1993).

1.2.1 Dökme Demirin Türleri

1.2.1.1 Gri Dökme Demir

Gri dökme demir, dökme demir ailesinden en yaygın kullanılanlardan biridir. Sülfür ve manganez gibi bazı elementler ile esas olarak 2,5-%4 karbon içermektedir. Şekil 1.4 gri dökme demirin mikroyapısını göstermektedir (ASM 1, 1993).

Gri dökme demirin mikro yapısı genellikle perlit matrisi içinde dağılan grafit lamellerden oluşur. Grafit ve perlitik matris miktarı nedeniyle, kırılma yüzeyinin rengi gri görünür. Gri demir, grafit şeklinden dolayı çekme yükleri uygularken kırılma bir davranış sergiler ancak süneklik ve dayanım, basma yükleri altında daha yüksektir. Grafit şekli ve matriste dağılımı, bileşim veya ısıl işlemle kontrol edilmektedir (ASM 15, 1992).



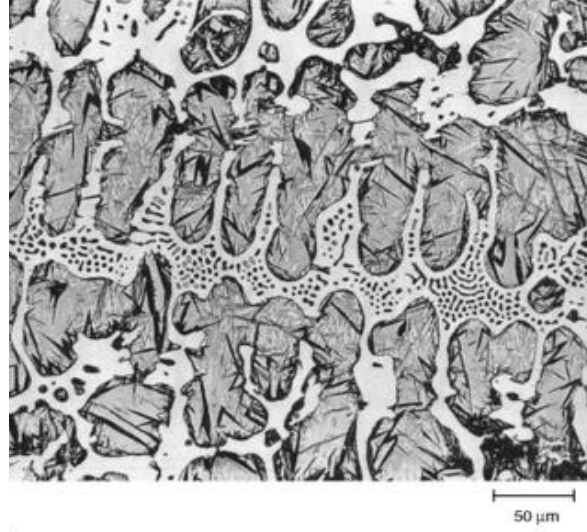
Şekil 1.4 Gri dökme demirin mikroyapısı (ASM 1, 1993)

İstenen yapıya göre, nikel, bakır, krom, manganez ve molibden gibi bazı elementler eriyiğe eklenebilir. Gri dökme demirin dayanımı arttırmak için, alaşım elementlerinin ilave edilmesi veya karbon ve silikon oranlarının azaltılması gibi bazı yollar vardır (ASM 15, 1992).

Isıl işlem kullanıldığında, grafit miktarlarında veya şekillerinde önemli değişiklikler görünmez, ancak matris mikroyapısında ferrit-perlititten temperlenmiş martensite dönüştürülebilen önemli değişiklikler ortaya çıkar. Yüksek sıcaklıklardan su verme, gri dökme demiri sertleştirmenin bir yoludur (ASM 15, 1992).

1.2.1.2 Beyaz Dökme Demir

Beyaz demirin ismi kırılma yüzeylerinin görünümünden alınmaktadır. Mikroyapısı yarı kararlı ve siyah dendrit gibi görünen perlit ve beyaz interdendritik ağ gibi sementit içermektedir (Şekil 1.5). Bu yapı karbonun grafit oluşturmalarını engellemek için eriyiğin hızla soğutulmasından kaynaklanır. Bu karbürlerin oluşmasına ve beyaz dökme demirin sertliğinin ve kırılma dayanımının yüksek olmasının neden olur (ASM 1, 1993).



Şekil 1.5 Beyaz dökme demirin mikroyapısı (ASM 1, 1993)

Yapıdaki sementitin yüksek miktarı ve dağılımının nedeniyle beyaz dökme demir, aşınma direnci ile karakterize edilir, ancak gevreklik ve işlenebilirlik gibi diğer mekanik özelliklerin bulunmaması nedeniyle, kullanımı sınırlıdır. Bu tip kullanım sınırlıdır ve sıkıştırma yükleri altında yüksek aşınma direnci ve yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır (ASM 1, 1993).

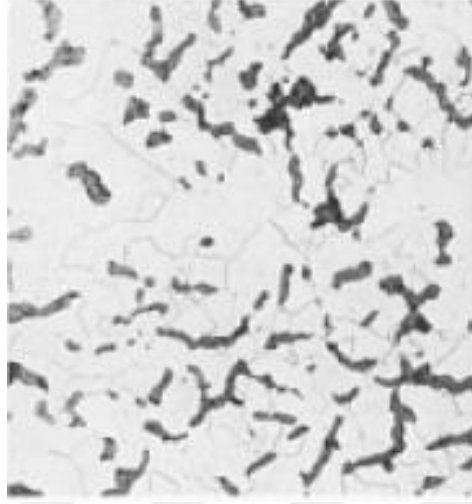
1.2.1.3 Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD)

Sfero veya nodüler dökme demir, bu isim, ferrit, perlit veya ferrit ve perlit karışımı matrisinde dağıtılmış lamel grafit yerine küresel grafit içeren bir dökme demir tipine verilir. Bu grafit şekli dökümlere süneklik kazandırır ve sfero dökümün mekanik özelliklerini iyileştirir. Bu tip için özel bir bölüm tahsis edilmiştir.

1.2.1.4 Verimküler Grafitli Dökme Demir

Bu tip üretime göre dökme demir ailesinin son üyesiydi. Mikro yapısı, ferritik veya perlitik bir matriste dağılmış verimküler şekil sahip olan grafiti birleştirir (şekil 1.6). Grafit şekli, gri dökme demir (lameller) ve KGDD döküm demir (nodüller) arasında orta düzeydedir ve verimküler grafitli dökme demir, %20'den az olan küresel grafit

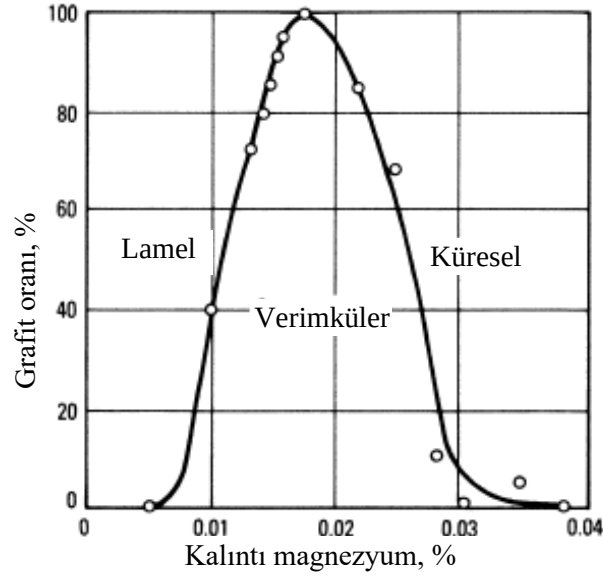
miktarını içerebilir. Sonuç olarak, bu türün özelliklerinin çoğu, gri ve KGDD demir özellikleri arasında yer almaktadır (ASM 15, 1992).



Şekil 1.6 Verimküler dökme demirin mikroyapısı (ASM 1, 1993)

Matrise göre, özellikler değişir. Pearlitic matris içeren yapının sertlik ve çekme dayanımı değerleri ferritik matrisinkinden daha yüksek, ancak ferritik matris sahip olanın uzaması daha düşüktür. veimküler dökme demirin mekanik özelliklerini, alaşım elementleri, ısıtıl işlem ve kesit büyüklüğü gibi bazı işlemlerle değiştirmek mümkündür (ASM 15, 1992).

Magnezyum ve seryum gibi bazı elementler grafitin nodüler bir şekil almaya zorlar ve bazı elementler titanyum ve alüminyum gibi grafitin küreleşmesini önler. Ek olarak, alaşım elementleri matristeki ferrit ve perlit içeriğini etkiler. Şekil 1.7 magnezyum ilavesinin grafitin şekline etkisini göstermektedir (ASM 1, 1993).



Şekil 1.7 Magnezyum oranının grafitin şekline etkisini (ASM 1, 1993)

Isıl işlem, matrisi, şekilleri ve grafit miktarlarını değiştirerek verimküler dökme demirin mekanik özelliklerini etkilemektedir. verimküler grafitli dökme demir, trenler için fren diskleri, volanlar, dizel motor kütleleri ve şanzıman gövdeleri gibi önemli uygulamalarda kullanılır (ASM 15, 1992).

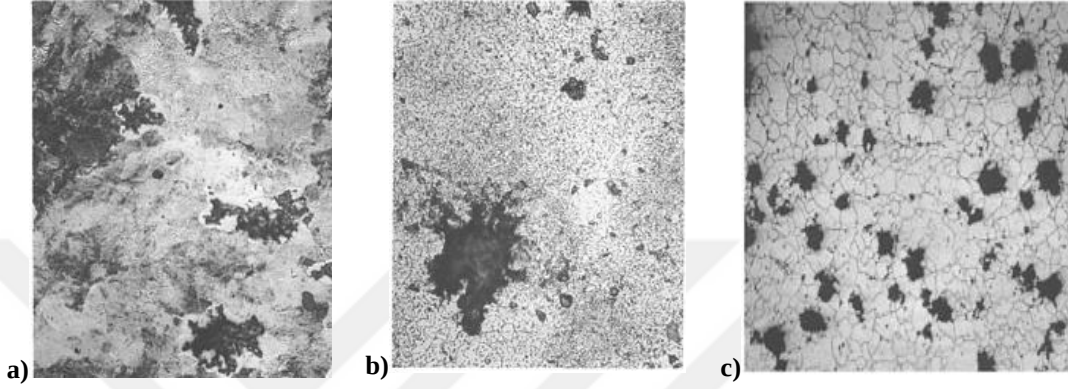
1.2.1.5 Temper Dökme Demir

1.2.1.5.1 Tanımlama. Temper dökme demir, ısıl işlem uygulandıktan sonra beyaz dökme demirden üretilir. Beyaz demir bazı uygulamalar için istenmeyen özelliklere sahiptir. Bu nedenle, demir karbürleri temper karbon denilen düzensiz grafit şekillerine dönüştürmek ve ferrit, ferrit ve perlit, perlit ve martensit olabilen bir matrise dağıtmak için ısıl işlem uygulanır (ASM 1, 1993).

1.2.1.5.2 Sementit / Grafit Dönüşümü. Sementit yüksek seviyede sertlik gösterir ve bu özellik beyaz demirin işlenebilirliğine olumsuz yönde etki eder. Alaşımın işlenebilirliğini sağlamak için *malleablizing* adlandırılan bir işlem kullanılmaktadır. Bu işlemde parçayı birkaç saat boyunca 900-950°C 'ye ısıtarak sementitten grafit'e dönüştürmektedir. Bu aşamanın sırasında yapıdaki karbürler elimine edilir. Bundan sonra parça hızlı bir şekilde 740 °C'ye soğutulur. Bu adımdan sonra, soğutma hızı

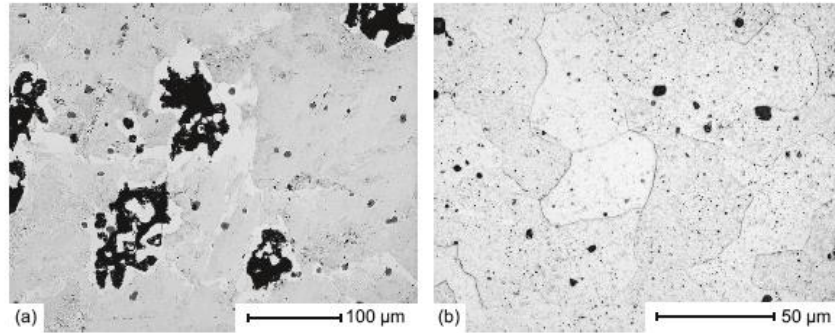
uygun şekilde kontrol edildiğinde tamamen ferritik veya perlitik matris elde edilir (Davis, 1996).

1.2.1.5.3 Temper Dökme Demirin Mikroyapıları. Soğutma hızına göre temper dökme demir matrisi değişir ve ondan üç çeşit vardır (şekil 1.8):



Şekil 1.8 Temper dökme demirin mikroyapıları: a) perlitik temper demir, b) Martensitik temper demir ve c) Ferritik temper demir (ASM 1, 1993)

Ferritik Temper Dökme Demir: Mikroyapı ferritik matris, temper karbonu ve sınırlı miktar ile perlit içermektedir. Mikroyapının görünümüne göre ferritik temper dökme demirin iki türü vardır (şekil 1.9):



Şekil 1.9 Temper dökme demirin mikroyapıları: a) siyah kalpli b) beyaz kalpli Temper demir (ASM 1, 1993)

- a) Beyaz kalpli (beyaz çekirdekli) temper dökme demir: Matristeki karbon içeriği (3,1-%3,4) arasındadır. Ferrit, perlit ve temper karbon içeren çekirdek bölgeler vardır ve bunlar ferritik bir matris ile çevrilidir. (Malleable Cast Iron)

- b) Siyah kalplı (siyah çekirdekli) temper dökme demir: temper karbon bölgeleri ve bunlar ferritik matris ile çevrilidir (Meallable Cast Iron)

Toplam karbon miktarı 2,4-%3 ve silikon içeriği 1,2 ile %1,5 arasındadır. (0,002 ila %0,003) bor ile silikon eklenmesinin amacı karbürlerin ayrışmasını hızlandırmaktır.

Perlitik Temper Dökme Demir: Döküm hızlı bir şekilde soğutulduğunda (soğutma ortamı havadır matristeki karbon. Parçacıklarının hareket etmesi için yeterli zaman yoktur. Bu nedenle, perlitik matris oluşturulmaktadır (ASM 15, 1992).

Martensitik Temper Dökme Demir: Döküm hızlı bir şekilde soğutulularak elde edilir. Oluşturulan mikro yapı, öfke karbon bölgelerini kapsayan martensitik matrisi içerir (ASM 15, 1992).

1.2.1.5.4 Temper Dökme Demirin Sınıflandırılması. ISO 5922'ye göre temper dökme demirin yapının tipine harflerle ve mekanik özelliklere numaralarla belirtilir.

- Beyaz kalp temper dökme demir için W
- Siyah kalp temper dökme demir için B
- Perlitik temper dökme demir için P

Harfin yanındaki iki hane 10 ile bölündükten sonra MPa'daki minimum çekme dayanımını ifade eder ve son iki hane, uzamayı belirtir.

Örnekler:

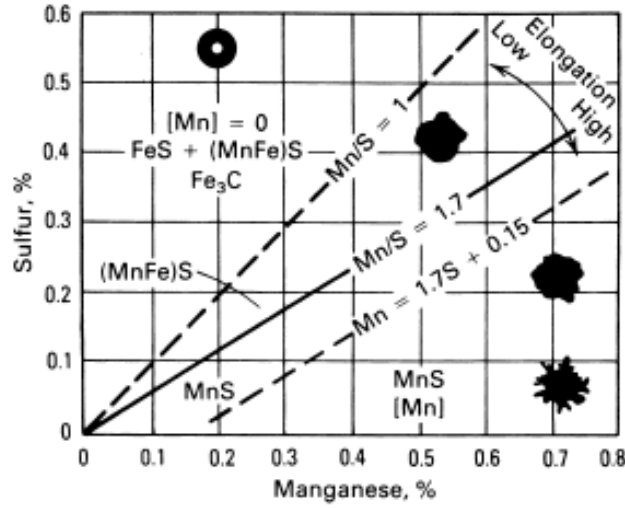
- P 55-04: Bu tip perlitik temper dökme demirdir. Minimum çekme dayanımı 550 MPa, uzama %4'tür.
- W 38-12: minimum çekme dayanımı = 380 MPa ve uzama =%12 olan beyaz kalplı temper dökme demir anlamına gelir. (Meallable Cast Iron)

1.2.1.5.5 Özellikler. Genel olarak temper dökme demir, grafit şekillerinden dolayı küresel grafitli dökme demirdeki gibi mekanik bir davranış sergiler. Temper dökme demir iyi sünekliğe, aşınma direncine, tokluğa ve dayanıklılığa sahiptir. Ayrıca temper dökme demir, iyi manyetik geçirgenlik, mükemmel işlenebilirlik ve korozyona karşı yüksek direnç gösterir (ASM 1, 1993).

Mekanik özellikler matris ve grafitin şekli ve miktarına bağlı olarak farklılık gösterir. Matris soğutma hızı ile kontrol edilir. Martensitik matris yüksek hızlı soğutmadan kaynaklanır, ancak ferritik matris yavaşça soğutularak elde edilir. Perlitik ve martensitik matrisler, yüksek sertlikleri ile karakterize edilir ve bu matrislerin iyi aşınma direncine sahip olmasını sağlar, ancak süneklik seviyelerine ferritik matrisinkinden daha düşüktür. Mangan ve kükürt ilaveleri, yapıdaki grafit şeklini değiştirmede etkilidir ve bu ilaveler bu denklem ile kontrol edilmeli ve hesaplanmalıdır (ASM 1, 1993):

$$Mn=1,7(\%S) +0,15 \quad (1.1)$$

Sülfür ilavesi düşük kaliteli demir için yaygındır ama verimküler demir ve KGDD için istenmez çünkü FeS tane sınırlarında oluşur. Arzu edilen mangan ve kükürt miktarları denklemin verdiği çizgi ile $Mn / S = 1$ çizgisi ve yapı içinde bir MnS ve FeS birleşimi ile belirlenir (Şekil 1.10). Mn / S oranı 1'den düşük olduğunda, demir sülfür içeriği artar ve bu da grafit parçacıklarını sıkıştırır. Bununla birlikte, yapıdaki çözünmemiş sementitin arttırılmasıyla sıkıştırma kuvveti azaltılır ve bu da uzamayı azaltır. Mangan sülfür baskın olduğunda, tamamen Fe_3C içermeyen yapısı nedeniyle uzama artar (ASM 1, 1993).



Şekil 1.10 (Mn/S) oranının grafit şekline etkisi (ASM 1, 1993)

1.2.1.5.6 Uygulamalar. Mükemmel işlenebilirlik, iyi şok direnci, süneklik, akışkanlık ve tokluk gibi temper dökme demir özellikleri, mil yatağının kapakları, şanzıman parçaları, disk fren kalibreleri ve diğer araç parçaları dahil olmak üzere otomotiv uygulamaları için tercih edilmesini sağlamıştır. Temper dökme demir sadece otomotiv uygulamalarında değil, aynı zamanda tarımsal ekipmanlarda kullanılan el aletleri ve süsleme malzemelerinde de kullanılmaktadır (ASM 1, 1993).

1.3 Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD)

Düktül Dökme Demir ve aynı zamanda Küresel Grafitli Dökme Demir ya da Nodüler Dökme Demir olarak da adlandırılan demir döküm grubuna dahil edilmektedir. Isıl işlem ve soğutma hızına göre KGDD mikroyapısı, ferrit, perlit, martenzit veya bainit olarak matris ve matris içinde dağıtılan Küresel grafit içermektedir (ASM 1, 1993).

1.3.1 KGDD Tarihi

1940'ların çoğu boyunca "Keith Millis" adlı bir metalürjisi Uluslararası Nikel Şirketine çalıştı. 1943 yılında Millis, erimiş demirde Mg elementinin kullanılmasının küresel grafit yapı ürettiğini keşfetti. 1948 yılında Henton Morrogh küresel grafit yapı

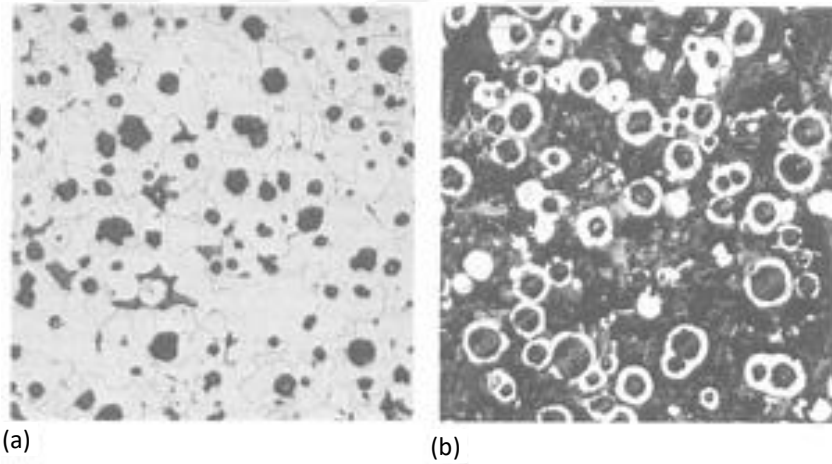
içeren dökme demir üretmek için seryum (Ce) eklemek önerdi. Bir yıl sonra, Mg ile erimiş metal işlemine dayanan düktil dökme demir üretimi üzerine ABD patenti Millis, Albert Gagnebin ve arkadaşı "Norman Pilling"'e verildi. Bundan sonra, Ford ve Chevrolet gibi bazı şirketler küresel grafitli dökme demir üretimi geliştirmeye katkıda bulundu (ASM 1, 1993).

1.3.2 KGDD Mikroyapısı

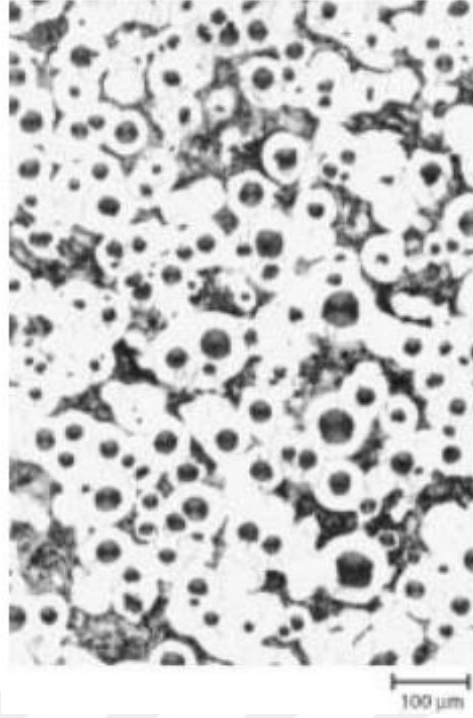
Matrise göre, düktil dökme demirin 2 türü vardır:

- Ferrit ile çevrelenmiş grafit nodülleri içeren perlit matrisi
- Perlit ve ferrit matris ile ferrit çevrili grafit nodülleri.

Sementit, ferrit ve perlit içeren mikroyapı üzerinde tavlama işleminden sonra Matris ferritik elde edilir (Şekiller 1.11 ve 1.12).



Şekil 1.11 KGDD mikroyapıları: (a) ferritik dökme demir. (b) perlitik dökme demir. (ASM 1, 1993)



Şekil 1.12 Ferrit ve perlitten oluşan matris içeren KGDD (ASM 1, 1993)

1.3.3 KGDD'in Sınıflandırması

KGDD'in sınıflandırılması bazı özelliklere dayanır. ASTM sisteminde, KGDD'in derecesi, ksi cinsinden çekme dayanımını, ksi cinsinden akma kuvvetini ve yüzde cinsinden uzamayı gösteren sayıları içerir. Örneğin, sınıf 60-40-18 (çekme dayanımı = 60 ksi, akma dayanımı = 40 ksi, uzama = %18) anlamına gelir. Tablo 1.1 ASTM standarda göre KGDD'in bazı sınıflarını göstermektedir (ASM 1, 1993).

Otomotiv Mühendisleri Derneğinin (SAE) sınıflandırılması mikro yapıya, ksi'deki akma değerine ve yüzde cinsinden uzamaya bağlıdır (Tablo 1.2) (ASM 1, 1993). Örneğin, D4018 (akma dayanımı = 40 ksi ve uzama = %18) anlamına gelir.

ISO'na göre KGDD'in sınıflandırması mekanik özelliklerine de bağlıdır. Sınıf numarası MPa'da çekme dayanımı ve yüzde cinsinden uzama içerir. Örnek, 800-2 (Çekme mukavemeti = 800 MPa, belirleme = %2) (Tablo 1.3) (ASM 1, 1993).

Tablo 1.1 ASTM standardına göre KGDD'in sınıflandırma örnekleri (ASM 1, 1993)

Sınıf	Çekme dayanımı		Akma dayanımı		Uzama	Yapı
	MPa	Ksi	MPa	Ksi	%	
60-40-18	414	60	276	40	18	Ferrit
80-60-03	552	80	414	60	3	Döküm
65-45-12	448	65	310	45	12	Ferrit
80-55-06	552	80	379	55	6	Ferrit ya da perlit
100-70-03	689	100	483	70	3	Perlit

Tablo 1.2 Otomotiv Mühendisleri Derneğine göre (SAE) KGDD'in sınıflandırılması (ASM 1, 1993)

Sınıf	Çekme dayanımı		Akma dayanımı		Uzama	Yapı
	MPa	Ksi	MPa	Ksi	%	
D4512	448	65	310	45	12	Ferrit/perlit
D5506	552	80	379	55	6	Ferrit/perlit
D7003	689	100	483	70	3	Perlit

Tablo 1.3 ISO 1083 standardına göre KGDD sınıflandırması (ASM 1, 1993)

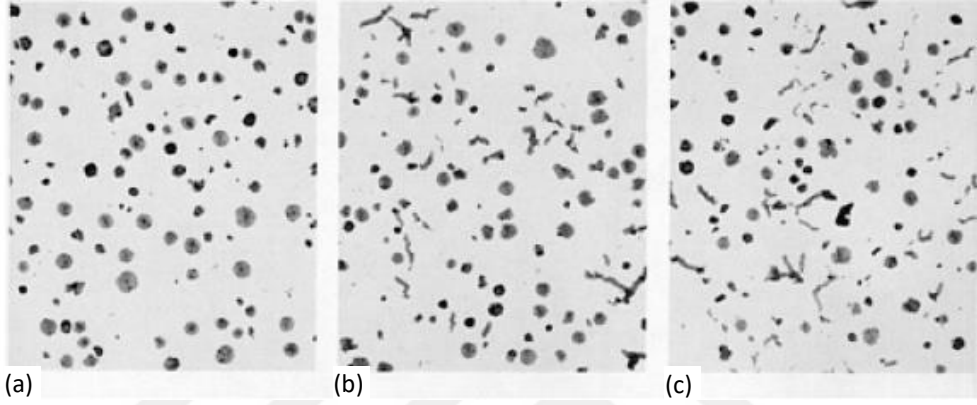
Sınıf	Çekme dayanımı		Akma dayanımı		Uzama	Yapı
	MPa	Ksi	MPa	ksi	%	
800-2	800	116	480	70	2	Perlit
700-2	700	102	420	61	2	Perlit
600-3	600	87	370	54	3	Perlit/ferrit
500-7	500	73	320	46	7	Perlit/ferrit
400-12	400	58	250	36	12	Ferrit
370-17	370	54	230	33	17	Ferrit

1.3.4 KGDD Özellikleri Etkileyen Faktörler

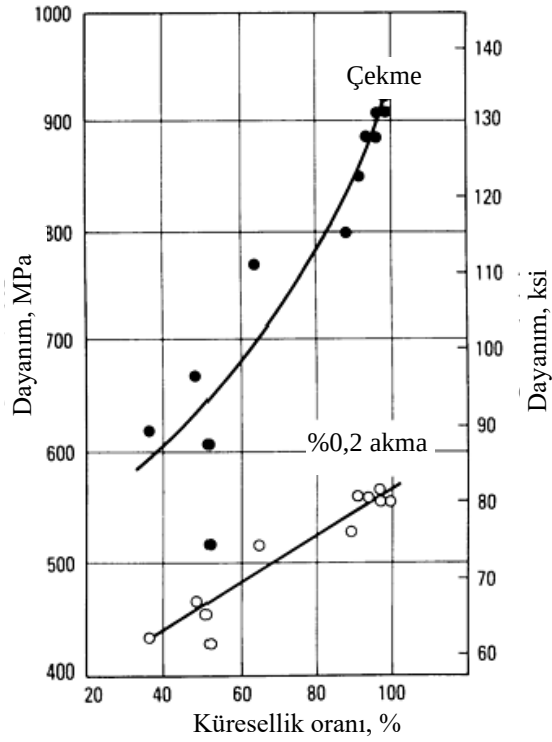
1.3.4.1 Grafit Şekiller

Grafitin kürelerinin şekli ve miktarı, dökme demirin mekanik ve fizik özelliklerinin üzerine etki eder ve bu değişkenler değiştiğinde, özellikler değişir. Bunun nedeni,

grafitin ince lamellerinin, stres konsantrasyon bölgeleri yaratan ve esneklik modülü, darbe enerjisi ve yorulma özellikleri gibi mekanik özelliklere zarar veren keskin kenarlara sahip olmasıdır. Küreselliğin kabul edilebilir yüzdesi %80'den fazladır. Şekil 1.13 sırasıyla %99, 80 ve %50 grafik küreselliği sahip KGDD numunelerinin mikro yapılarını gösterir ve Şekil 1.14 küresellik yüzdesi ile çekme ve akma dayanımları özellikleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir (ASM 1, 1993).



Şekil 1.13 KGDD'in değişen küresellik oranları sahip olan mikroyapıları: a) %99, b) %80 ve c) %50. 36X (ASM 1, 1993)



Şekil 1.14 KGDD'de grafit küreselliğinin çekme ve akma dayanımlarına etkisi (ASM 1, 1993)

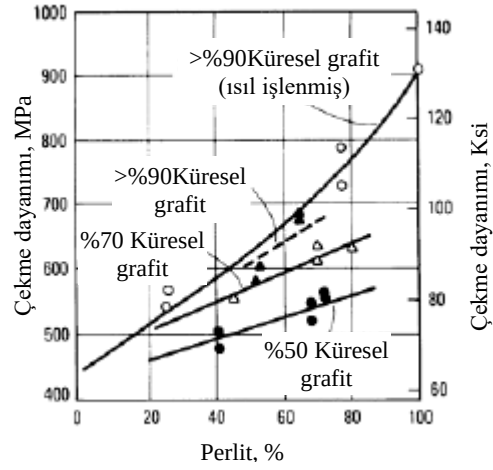
1.3.4.2 Grafit Miktarı

Grafit miktarının artması ile elastik modülü uzama ve dayanıma etkisi negatiftir. Ancak, bu faktör diğer faktörleri karşılaştıran mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir (ASM 1, 1993).

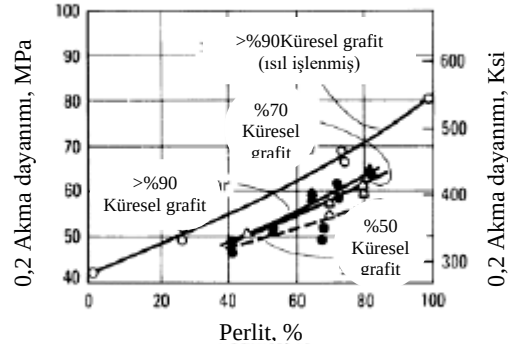
1.3.4.3 Matris Yapısı

KGD demirin mikroyapısına ve özelliklerine etkileyen önemli bir faktördür. Normal koşullarda, mikroyapı perlit veya perlit ile ferritten oluşur. Matristeki perlit miktarının artmasıyla sertlik özellikleri artar ama darbe enerjisi azalmaktadır (ASM 1, 1993).

Isıl işlem kullanarak KGD demir yapısını değiştirmek mümkündür. Tamamen ferritik bir matris üretmek istendiğinde, tavlama işlemleri kullanılabilir. Bununla birlikte normalleştirme, perlitik matris üretmek ve çekme mukavemeti ve uzamasını iyileştirmek için tercih edilen bir işlemdir. Normalleştirme prosesinden üretilen perlitik mikro yapı, dökümden üretilenden daha yüksek süneklik ve çekme dayanımına sahiptir. Şekil 1.15, çekme mukavemeti ve akma dayanımı üzerindeki mikroyapıda ve ısıl işlemdeki perlit miktarının etkilerini göstermektedir (ASM 1, 1993).



(a)



(b)

Şekil 1.15 dayanım ve perlit miktarı ile ilişki. Grafit küreselliğinin oranına bağlı, perlit miktarının a) çekme dayanımına b) akma dayanımına etkisi (ASM 1, 1993)

1.3.4.4 Kesit Alanı

Kesit alanı, KGDD özelliklerini etkiler. Soğutma oranı ve katılaşma, kesit boyutu küçülmesiyle artar. Bu nedenle, ince kesitlerde karbürler oluşturulabilir ve sertliği, gevrekliği arttırmaya ve işlenebilirliği azaltmaya yol açar. Bu problemi önlemek için, ağır inokülasyon nodül grafit sayısını arttırmak için iyi bir çözümdür (ASM 1, 1993).

1.3.5 KGDD Üretimi

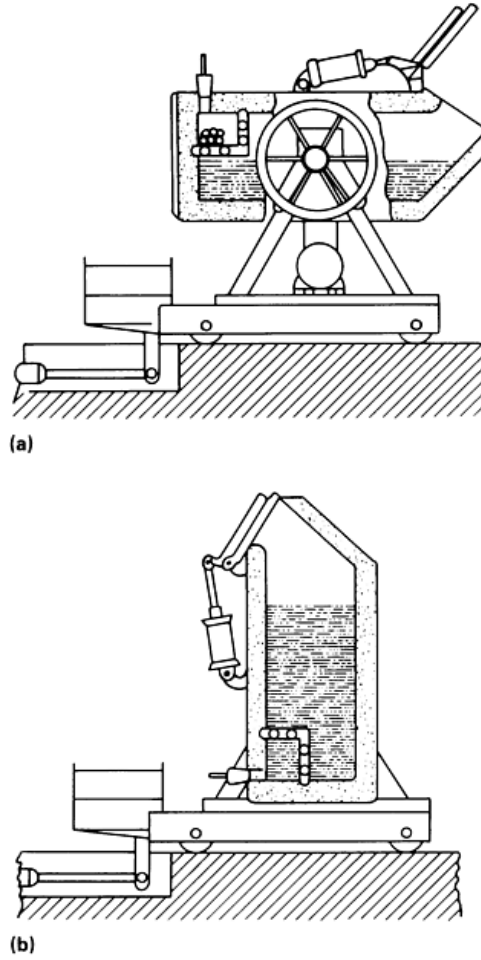
KGDD üretim prosesinin ilk basamağında grafitin küresel bir form almaya zorlamak amacıyla metalik sıvıya magnezyum ilave edilerek üretilmektedir. İkinci

aşamada, bir grafit yapı sağlamak için erimiş halde silikon içeren bir malzeme eklenmektedir (ASM 1, 1993).

1.3.5.1 Magnezyum Eklemesinin Aşaması

Eriyiklere magnezyum eklemek için 1450 ila 1510 °C sıcaklıkta olması gereken birçok yöntem vardır.

1.3.5.1.1 Fischer Yöntemi (Metalik Magnezyum Yöntemi). Metalik magnezyum ve erimiş demir arasındaki reaksiyon şiddetlidir. Bu nedenle, özel bir gemi kullanılır. Bazı işlemlerde, külçe, çubuk veya toz halinde magnezyum, eğilebilir bir geminin tabanına yerleştirilmiş bir dönüştürücüye sokulur. Şekil 1.16 Fischer cihazının çalışma prensibini göstermektedir (ASM 1, 1993).



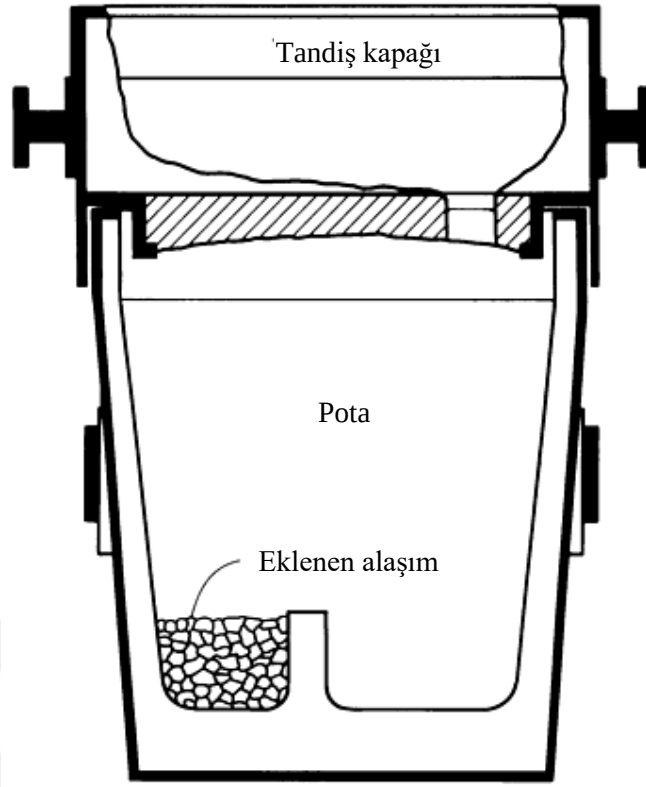
Şekil 1.16 Fischer dönüştürücüsünün çalışma prensibi. (a) geminin Doldurma pozisyonu. (b) geminin işlem pozisyonu (ASM 1, 1993)

Bazı magnezyum alaşımları bu işlemde kullanılabilir ve tablo 1.4’da listelenmiştir:

Tablo 1.4 KGDD üretiminde kullanılan Mg alaşımları (ASM 1, 1993)

Alaşım	Mg miktarı	Özellikler	Dezavantajlar
Nikel alaşımı	14-16%	Alaşım ve eriyik arasındaki reaksiyon şiddetli değil	Maliyet yüksek
Nikel alaşımı	4%	Reaksiyon sakın	
ferrosilikon	3-10%	Reaksiyonun şiddeti Mg içeriğine bağlıdır %10 Mg'de şiddetli %3 Mg'de sakın	

1.3.5.1.2 Sandviç Yöntemi. Bu yöntemde en çok kullanılan alaşım ferrosilikondur. Alaşım potanın tabanındaki çelik tabakası ile kaplanan bir cebin içine yerleştirilir ve erimiş demir alaşımın üzerine dökülmektedir. Herhangi bir alevi, dumanı önlemek amacıyla tandiş kapağı kullanılmaktadır. Şekil 1.17 kullanılan tandiş kapağı ve potayı göstermektedir (ASM 1, 1993).



şekil 1.17 KGDD'in magnezyum artımında kullanılan pota ve tandış (ASM 1, 1993)

1.3.5.1.3 Flotret Yöntemi. Bu yöntem, eriyikler potadan başka bir potaya dökmektedir. Magnezyum alaşımı kapalı bir gemi bir boşluk içine yerleştirilir ve erimeler bir fırından dökülür (ASM 1, 1993).

1.3.5.2 Magnezyum İçeriğinin Kontrolü

Alaşımlama elementlerinin ilavelerinin miktarları önemlidir. Başlangıçtaki kükürt miktarı ve işlem sıcaklığı bilinmelidir çünkü bunlar nihai Mg içeriğini etkiler. Mg kurtarılmış miktarı aşağıdaki denklemde hesaplanır (ASM 1, 1993):

$$Mg \text{ kurtarılmış miktarı (\%)} = \left[\frac{\text{nihai Mg miktarı (\%)}}{Mg' \text{ deneklenen miktarı (\%)} - \frac{3}{4} \text{ Kükürt'ten başlangıç miktarı (\%)}} \right] * 100 \quad (1.2)$$

1.3.5.3 Aşılama

Demir, Mg eklendikten sonra genellikle nihai aşılama tabii tutulur. Aşılama, pota içerisinde 60 ila %80 Si içeren ferrosilikon olabilen granüler bir aşılama kullanılarak gerçekleştirilir. Eklenen aşılama miktarı genellikle yaklaşık 0,25 ila %1,0 arasında değişecektir. Magnezyum ilaveli alaşımda daha yüksek bir silikon yüzdesi daha az aşılama mümkündür. Aşılama maddesi eklendikten sonra karıştırma gerekir ve potanın alt kısmında gözenekli bir ağırlık kullanılarak hava veya azot baloncuklarıyla gerçekleştirilmektedir (ASM 1, 1993).

1.3.6 KGDD'in Isıl İşlemi

1.3.6.1 Genel Olarak Isıl İşlem

Malzemelerin seçimi, imalatta kullanılacak malzemede sağlanması gereken farklı özelliklerin dikkatlice incelenmesini ve analiz edilmesini gerektiren önemli bir süreçtir. Tüm baz malzemeler (seramik, cam, metal malzemeler vb.) Bazı projeler için uygun olan spesifik özelliklere sahiptir, ancak diğer birçok uygulama için arzu edilmezler. Bu nedenle, çalışma ortamına uygun olan ve alaşımlara eleman ekleme veya ısıtılmalara maruz kalma gibi bazı özellikleri değiştirmek için çeşitli yollar kullanılır (ASM 4, 1991).

Isıl işlem, metalin belirli bir sıcaklığa ısıtılmasını ve daha sonra belirli bir süre boyunca o sıcaklıkta kalmasını ve uygun bir hızda soğutulmasını içeren bir işlemdir. Soğutma hızı metalin yapısını belirlemektedir. Isıl işlem yöntemi şu amaçlardan seçilmiştir (ASM 4, 1991):

- Yüksek sertlik ve korozyon direncine sahip bir malzeme elde etmek
- Tokluk ve sünekliği arttırmak
- İşlenebilirliği iyileştirmek
- Sertleşmeyi Geliştirmek
- Malzemenin elektriksel özelliklerinin artırılması

1.3.6.2 KGDD'e Uygulanan Isıl İşlemler

1.3.6.2.1 Gerilme Gidermesi. Genellikle, döküm yöntemiyle oluşturulan parçalar ve aynı parçada farklı kalınlıkları varsa, küçük kesitler büyük kesitlerden daha hızlı soğulur. Gerilme gidermesi soğuk şekillendirmeye maruz kalan parçalara da uygulanabilir. Gerilmeler, parçanın faz dönüşüm sıcaklığından daha düşük bir sıcaklığa (500-600 °C) ısıtılması ve kesit alanına göre (1 inç için 1 saat) belirli bir süre tutulması, 200 °C'ye kadar yavaş soğutulması sonra oda sıcaklığına kadar hava ile soğutulmasıyla uzaklaştırılmaktadır (ASM 4, 1991).

1.3.6.2.2 Normalleştirme. Bu işlem, sertliğin artırılması ve/veya ayrışmanın azaltılması gerektiğinde kullanılır ve perlit taneciklerini inceltmek için parça sertleştirildikten sonra uygulanabilir. Normalleştirme, östenit dönüşüm sıcaklığının üzerindeki (870 ila 940 °C arası) numunenin ısıtılması, bu sıcaklıkta 1 saat tutulması ve daha sonra hava soğutması ile uygulanır. Üretilen mikroyapı tamamen ince perlit olup elde edilen yapının çekme dayanımı 700-900 MPa'dır. Artık gerilmeleri azaltmak için normalleştirme temperleme ile takip edilebilir. Temperleme, parçanın 425 – 650 °C arası olan sıcaklığa yeniden ısıtılması ve kesit alanına bağlı olarak hesaplanan süre boyunca tutulması (inç başına 1 saat) içermektedir (ASM 4, 1991).

1.3.6.2.3 Su Verme ve Temperleme. Yüksek sertlik gerektiğinde, su verme prosesi, 900 °C'ye ısıtıp bu sıcaklıkta 2-4 saat tutarak ve daha sonra yağ veya basınçlı hava kullanarak soğutmak suretiyle martensitik bir yapı elde etmenin uygun bir yoludur. Bu yöntemle üretilen yapı, su verme sırasında oluşan gerilmeler içerebilir. Bu sorunu çözmek için, su verme işleminden sonra temperleme (400 ila 600 °C arasında bir sıcaklığa kadar ısıtma, bu sıcaklıkta tutma ve sonra havayla soğutma) işlemi yapılır ve sonucunda temperlenmiş martensit elde edilmektedir (ASM 4, 1991).

1.3.6.2.4 Tavlama. Tavlama, iyi süneklik ve işlenebilirlik elde etmek için uygun bir yoldur. Oluşturulan yapı ferrittir ve fazla karbon nodüller oluşturmaya zorlanır. Tavlamanın uygulanmasının yolu yapı kombinasyonuna göre değişir (ASM 4, 1991).

- ❖ KGDD karbür içerdiğinde, parça 900 ve 925 °C arasında bir sıcaklığa ısıtılıp bu sıcaklıkta 2 saat veya ağır parçalar için daha uzun süre tutulur. Parça 700 °C'ye kadar 110 °C/saat hız ile fırında soğutarak 2 saat tutulur. Daha sonra, 55 °C/saat hız ile 345 °C'ye kadar fırında soğutulur. Sonrasında hava ile soğutulur (ASM 4, 1991).
- ❖ Karbür içermeyen KGDD için: parça 870 ve 900 °C arasındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılıp 1 saat /inç tutulur. Daha sonra, 55 °C/saat hız ile 345 °C'ye kadar fırında soğutulur. Sonrasında hava ile soğutulur (ASM 4, 1991).
- ❖ Kritik altı tavlama: perlitin ferrite dönüştürülmesi için uygulanır. 702 ile 720°C arasında sıcaklığa kadar ısıtmayı, 1 saat / inç tutmayı, 55°C /saat hız ile 345 °C sıcaklığa soğutmayı ve ardından hava soğutmayı içermektedir (ASM 4, 1991).

1.3.6.2.5 Östemperleme. KGDD' mekanik özellikleri iyileştirmek için kullanılmaktadır. Östemperleme sıcaklığına ve süresine bağlı olarak sertlik ve dayanım değişik değerleri ile yapı elde edilmektedir. Östemperleme, 2 aşama kapsar. Birinci aşamada malzeme 800-927 °C'ye kadar ısıtılıp belirli bir sürede bırakılır. İkinci aşamada malzeme 230-400 °C'ye kadar soğutulup belirli bir sürede bırakılır. Ondan sonra malzeme hava ile soğutulmaktadır (ASM 4, 1991).

1.4 Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir (ÖKGDD)

ÖKGDD, küresel grafitli dökme demir ailesine en son eklenen bir türdür. KGD demire özel bir östemperleme ısıtım işlemi uygulayarak perlitik KGDD'den yaklaşık iki kat daha güçlü olan ÖKGDD üretilmektedir. Östemperleme işlemi yüksek uzama ve tokluğu kaybetmeden aşınma direnci ve yorulma dayanımı iyileştirmektedir (ASM 4, 1991).

1.4.1 Östemperleme Prosesi

1930'larda çeliğin özellikleri iyileştirmek amacıyla östemperlemenin ilk kullanılmasını bulunmuştur. 1950'larda östemperleme işlemi KGDD'in geliştirmesi için kullanılmıştır (ASM 4, 1991).

ÖKGDD düşük maliyet, tasarım esnekliği, iyi işlenebilirlik, yüksek (dayanım / ağırlık) oranı, iyi tokluk, aşınma direnci ve yorulma dayanımı özelliklerinin en iyi kombinasyonunu sunar. KGDD, dövme alüminyum ve çok sayıda dökme ve dövme çelikten daha üstün mekanik özellikler üretmek için östemperleme işlemine tabi tutulur. KGDD ve ÖKGDD özelliklerinin mekanik özellikleri temel olarak metal matrisi ile belirlenir. KGDD'deki matriste perlit ve ferrit karışımı ile kontrol edilir. Östemperleme birkaç adımdan oluşur (ASM 4, 1991):

1. Östenitleme aşaması:

- 800-927°C arasındaki bir sıcaklığa kadar ısıtmak
- Bütün karbonun östenit içine çözünmesi için ısıtıldığı sıcaklıkta belirli bir süre bırakmak

2. Östemperleme aşaması

- Perlit oluşturmamak için tuz banyosu kullanarak 230-400°C arasındaki bir sıcaklığa kadar hızla soğutmak
- Ösferrite izotermal dönüşüm sağlamak için tuz banyosunda belirli bir süre bırakmak
- Hava ile soğutmak

Östenitleme sıcaklığı, ÖKGDD yapısını ve özelliklerini etkileyen östenitin karbon içeriğini kontrol eder. Yüksek östenitleme sıcaklıkları östenitin karbon içeriğini ve sertleşebilirliğini artırır ancak östemperleme sırasında dönüşüm ile sorun olduğu için mekanik özellikleri azalmaktadır. Düşük östenitleme sıcaklıkları genellikle en iyi özelliklere sahip ÖKGDD üretilir ancak silikon içeriğinin kontrolünü gerektirir. Dökümün boyutlarına ve tipine ek olarak östenitleme süresi, kimyasal bileşim, östenitleme sıcaklığı ve nodül sayısından etkilenir (ASM 4, 1991).

1.4.2 Östempereleme İşlemine Etki Eden Faktörler

Östempereleme yalnızca su verme işleminin aparatının soğutma hızı, bileşenin kesit alanı ve sertleştirilebilirliği için yeterli olduğunda etkilidir. Gerekli olan minimum soğutma hızı, sertleştirme sıcaklığına kadar su verme sırasında parçada perlit oluşumunu engellemektir (ASM 4, 1991).

Östempereleme işlemine etkileyen bazı faktörler vardır:

- Östenit ortamından östempereleme ortamına taşıma süresi
- Kullanılan tuz banyosunun soğutma şiddeti
- Östemperelenecek parçanın boyutları ve türü
- Dökümün sertleştirilebilirliği

Uygun bir şekilde su verme şiddetine ve tempereleme sisteminin doğru tasarlanmasının kullanılması, dökümün sertleşebilirlik gereksinimlerini azalır ve bu da alayım maliyetlerinde önemli tasarruflar sağlayabilir (ASM 4, 1991).

1.4.3 Soğutma Ortamı

Östempereleme işlemi, 150-550 °C arasında, yeterli bir süre boyunca uygulanan bir sıcaklık aralığında uygulanır ve bu şartlara yakışan bir ortam kullanılması gerekir. Östempereleme için birkaç uygun medya vardır. En çok kullanılan ortamları kurşun, kalay ve alaşımları ancak Kurşun'un toksik buharları nedeniyle, bu ortamları kullanmak neredeyse terkedilmişti. Bu nedenle tuz banyosu östempereleme için en uygun bir ortamdır. Kabul edilebilir sıcaklığı aştığında tuzların ayrışmasına neden olan tuz banyolarının kullanılmasıyla ilgili bazı dezavantajlar vardır ve yanıcı maddeler bu ayrışmaya neden olabilir. Bu nedenle, tuz banyoları kullanırken güvenlik gerekliliklerine uymak önemlidir. Tablo 1.5 tuz banyosunda kullanılan tuzların miktarları ve özelliklerini göstermektedir (Cantera ve diğer., 2018).

Tablo 1.5 Tuz banyosunda kullanılan tuzların erime ve uygulama sıcaklıkları (Cantera ve diğer., 2018)

Kimyasal kompozison (%)	Erime sıcaklığı (°C)	Uygulama sıcaklığı (°C)
NaNO ₃	308	320-550
KNO ₃	334	350-550
NaNO ₂	284	323-550
KNO ₂	387	-
45% NaNO ₃ + 55% KNO ₃	120	230-550
50% NaNO ₃ + 50% KNO ₂	150	160-550
50% NaNO ₂ + 50% KNO ₃	225	280-550
25% KNO ₃ + 75% NaNO ₃	240	380-540
50% NaNO ₃ + 50% NaNO ₂	205	260-600

1.4.4 Mikroyapı

KGDD sertleştirme ısı işlemine maruz kaldığında önemli bir dönüşüm geçirir. Dökümler önce karbonu çözmek üzere östenitlenir, sonra perlit veya martensit oluşumunu önlemek için hızla östemperleme sıcaklığına getirilir. Döküm, östemperleme sıcaklığında tutulurken çekirdekleşme ve asiküler ferritin büyümesi, karbonun östenit içine reddedilmesiyle birlikte ortaya çıkar. Ösferrite olarak bilinen ortaya çıkan mikro yapı, ÖKGDD'e özel davranışlarını vermektedir. Ösferrit, geleneksel ısı işlemlerle oluşturulan perlitik, ferritik veya martensitik yapılara kıyasla verilen bir süneklik seviyesi için iki kat kuvvet göstermektedir (Liscic ve diğer., 2010).

1.4.5 Östemperleme Prosesinin Etkileri

1.4.5.1 Östemperleme Sıcaklığı Etkisi

Östemperleme prosesi mekanik özellikleri iyileştirmek veya distorsiyonu azaltmak için kullanılmaktadır. Yüksek östemperleme sıcaklığı ile, çekme mukavemeti azalır ve ösferritin iğnelerinin boyutu artmaktadır (Savıćević ve diğer., 2017).

Düşük östemperleme sıcaklık ve düşük sürelerde, karbonun östenite difüzyonu önemsizdir ve kalıntı östenit miktarı yüksektir. Artan zaman ve sıcaklığın artması ile kalıntı östenit azalır ve işlenebilirliği artar, ancak 400°C'yi aştığında perlit oluşur ve işlenebilirliğin azalmasına neden olur (Filho ve diğer., 2016).

1.4.5.2 Östemperleme Süresi Etkisi

Daha kısa östemperleme süresinde martensitik yapı oluşmuştur. Bu nedenle, en kısa östemperleme süresi sahip olan numune en iyi sertliğe ve aşınma direncine sahip, ancak en düşük sünekliğe sahiptir (Benam, 2015).

Östemperleme süresinin azaltılması, daha az kararlı bir östenit oluşturur ve daha yüksek yorulma çatlak başlatma direnci sağlar (Dias ve diğer., 2012).

1.4.6 Alaşımlama Elementlerinin Etkileri

1.4.6.1 Karbon

%3 ila %4 aralığında karbonun artırılması, çekme dayanımı artırır, ancak uzama ve sertlik üzerinde önemsiz bir etkiye sahiptir. Kusursuz bir döküm sağlamak için, karbon 3,6-%3,8 aralığında kontrol edilmelidir (Panda ve diğer., 2011).

1.4.6.2 Manganez

Manganez ucuz bir element ve KGDD'deki güçlü bir sertlik artırıcı olarak bilinir. Manganez hem yararlı hem de zararlı bir elementtir. Sertleşebilirliği şiddetle artırır, ancak katılaşma sırasında karbürleri oluşturduğu tane sınırlarına ayrılır ve sertleşme reaksiyonunu geciktirir. Düşük nodül oranı veya daha büyük kesit alanı olan dökümler için, hücre sınırlarındaki manganez ayrılması, büzülme, karbürler ve dengesiz östenit üretmek için yeterince yüksek olabilir. Bu mikroyapısal kusurlar ve homojen olmamalar işlenebilirliği azaltır ve mekanik özellikleri azaltır (Panda ve diğer., 2011).

Özellikleri geliştirmek ve ÖKGDD'in kesit alanı ve nodül oranına duyarlılığını azaltmak için, ÖKGDD'deki mangan seviyesinin %0,3'ten daha düşük olması tavsiye edilir (Omran ve diğer., 2014)

1.4.6.3 Nikel

ÖKGDD'in sertliği arttırmak amacıyla ilave edilir ama çekme dayanımını azaltırır. Ancak süneklik ve kırılma tokluğunun davranışlarını iyileştirir. Ni, asiküler ferrit mikroyapısını küçültür ve yüksek karbonlu östenit fazı miktarını arttırır (Tokunaga, Era ve Kim, 2019).

1.4.6.4 Molibden

Molibden, ÖKGDD'deki en güçlü sertleşme etkendir ve perlit oluşumunu önlemek için ağır kesitli dökümlerde molibden ilavesi gerekmektedir. Bununla birlikte, molibden içeriği arttıka hem çekme dayanımı hem de süneklik azalır. Bu sorun muhtemelen molibden tane sınırlarına ayrılmasından ve karbür oluşumundan kaynaklanır. Ağır kesitli dökümlerde molibden seviyesi %0,2'den fazla olmamalıdır (Panda ve diğer., 2011).

1.4.6.5 Titan

Penghui Yang'a göre, karbürli ÖKGDD'e %0,1 Ti eklendiğinde, TiC partikülleri oluşmuş ve karbürlerde ve matrislerde dağıtılmıştır. Ti ilavesi, grafit nodüllerini küçültmek ve sertliği arttırmak için bir faktördü. Karbürli ÖKGDD ile karşılaştırırken titanyum alaşımlı ÖKGDD'in darbe enerjisi %14,3 artar ve aşınma kaybı %14,8 daha düşük olmuştur (Yang ve diğer., 2019).

1.4.6.6 Krom

Haiqiang Cheng'in araştırmasının sonuçları, Cr içeriğinin artmasıyla karbürli KGDD'deki grafitin nodül boyutu ve küreselleştirme oranı azalmış, ancak karbür

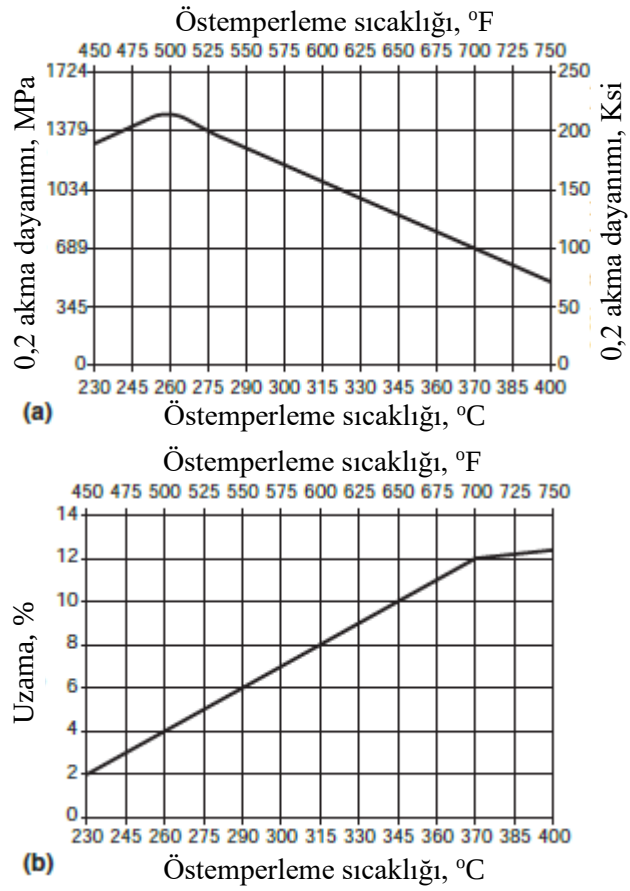
içeriğinin arttığını göstermiştir. Sertlik ve aşınma direncinin maksimum değerleri, Cr içeriği %1,42 olmaktadır. %0,96 Cr ilavesi ile darbe tokluğu ve mekanik özelliklerin en iyi değerleri elde edilmiştir (Cheng ve diğer., 2019).

1.4.6.7 Niyobyum

Nb ilaveleri, öferritik matris içinde niyobyum karbürlerin (NbC) oluşmasına yol açar, uzamayı azaltır ve alaşımın sınırını artırır. Niyobyum ekleyerek, karbon içeriğinin azalmasıyla sağlanan grafit nodüllerin miktarında bir azalma olur (Cantera ve diğer., 2018).

1.4.7 ÖKGDD Özellikleri

ÖKGDD, uygun bir ısıtım işlem seçimi ile geniş bir aralıkta değişebilen mekanik özelliklere sahiptir. Şekil 1.18, östemperleme sıcaklığı ile akma ve uzama özellikleri arasındaki güçlü ilişkiyi göstermektedir. Yüksek austempering sıcaklık, yüksek süneklik ve iyi yorgunluk ve darbe dayanımı ile ÖKGDD üretilir. Daha düşük bir dönüşüm sıcaklığı, çok yüksek akma dayanımı, yüksek sertlik, mükemmel aşınma direnci ve temas yorulma dayanımı ile ÖKGDD ile sonuçlanır (ASM 1, 1993).



Şekil 1.18 ÖKGDD’de östemperleme sıcaklığının a) akma dayanımına ve b) uzamaya etkisi (ASM 1, 1993)

1.4.8 ÖKGDD Uygulamaları

ÖKGDD genellikle yüksek dayanımın gerekli olduğu ve mükemmel aşınma direnci ile yorulma dayanımının gerekli olduğu yerlerde kullanılır. Güvenlilik en önemli olduğu ağır parçaları için uygun şekilde Çelik’in yerine kullanılabilir. Mukavemet gerektiğinde, ÖKGDD özellikle uygun maliyetlidir: çekme ve akma değerleri KGDD’in iki katıdır. Yüksek dayanım /ağırlık oranına sahip olan ÖKGDD, düşük kesit boyutları kabul edilebilir olduğunda bile alüminyumun yerini alabilir (ASM 1, 1993).

1.5 Literatür

P Sellamuthu'nun araştırmasına göre, alaşımlı KGDD'in mekanik özelliklerini ve aşınma değişikliklerini incelemek amacıyla, 30 dakika boyunca 840°C'de östenitleme işlemine tabi tutulmuştur. Sonrasında 30 dakika boyunca 300, 320, 340 ve 360 °C 'de östempereleme işlemi yapılmıştır. Östempereleme işleminden önce, numunelerin mikroyapısı ferritik-perlitik matris içerir. Isıl işlem uygulandıktan sonra, mikroyapı grafitik nodüllerden oluşmakta olup, asiküler ferritten ve karbon bakımından zenginleştirilmiş östenitten oluşan karışım içinde dağılmıştır. Grafitin nodül sayısı azalmış ve nodül boyutu östempereleme sıcaklığındaki artışla artmıştır. Östempereleme sıcaklığı artarken, sertlik, aşınma direnci ve uzama değerleri artmıştır. Artan uzamanın nedeni, yüksek sıcaklıklarda östenit miktarını arttıran yüksek sıcaklıklarda karbon çözünmesidir (Sellamuthu ve diğer., 2018).

2. araştırma, kromdan farklı miktarlar ile ÖKGDD'in kırılma tokluğunu belirlemek için P. Prasad Rao tarafından hazırlanmıştır. Krom dışında, numuneler aynı kimyasal bileşime sahipmiş ve krom içeriğine göre 3 gruba ayrılmıştır. Birinci grup krom içermemiş ve ikinci ve üçüncü gruplar sırasıyla %0,3 ve %0,5 Cr içermiştir. Numunelere 2 saat boyunca 871 °C'de östenitleme işlemi uygulanıp 2 saat boyunca 260, 302, 358 ve 385 °C'de östempereleme işlemi yapılmıştır. Östempereleme sıcaklığının artmasıyla artan ösferit içeriğinin artması ile kırılma tokluğunun azaldığı gözlenmiştir. En iyi kırılma tokluğu 302°C'de elde edilmiştir. Krom içeriği, kırılma tokluğunu iyileştirmek için yararlı bir ilave olmuştur (Putatunda, 2003).

3. araştırmada, %0,45 Cu içeren numuneler kullanarak östemperelemenin sıcaklığı ve süresi ile alaşımlı KGDD'in özellikleri arasındaki ilişkileri incelenmiştir. Östempereleme sıcaklıkları olarak 300, 350 ve 400 °C seçilmiş ve östempereleme süreleri olarak 1, 2, 3 ve 4 saat seçilmiştir. Sonuçlarda östemperelenmiş mikroyapıdaki bainitik ferritin ve kalıntı östenitin miktarlarının uzamaya, dayanıma ve darbe enerjisine etkileri gözlenmiştir. En yüksek miktarlarda bainitik ferrit ve kalıntı östenit ve en iyi özellikler, 2 saat boyunca 350 °C'de kazanılmıştır. Ek olarak, Bakır, uzamayı ve darbe enerjisini iyileştirerek dayanıma zarar vermiştir (Eric ve diğer., 2006).

A. Bedolla-Jacuinde (4. araştırma), kayma aşınması davranışını ve bor alaşımlı KGDD üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu araştırma, numunelerin 900 °C ve 40 dakika ile östenitleme yapılması, 350 °C'ye soğutulması ve %50 KNO₃+%50 NaNO₃ içeren bir tuz banyosunda 1, 20, 60, 120 ve 180 dakika bekletilmesi içermiştir. Daha kısa östemperleme süresinde martensitik yapı oluşmuştur. Bu nedenle, ilk numune en iyi sertliğe ve aşınma direncine sahip, ancak en düşük sünekliğe sahiptir. Bor içeriği arttıkça sürtünme katsayısı artmıştır (Jacuinde ve diğer., 2015).

5. araştırmanın amacı, mikroyapıya ve mekanik özelliklere göre östemperlenmiş numunelerin ve iki aşamalı östemperleme işlemine tabi tutulan numunelerin arasındaki karşılaştırma yapılmasıdır. İşlem uzun süre uygulandığında bile östemperleme işlemine tabi tutulan birinci grubun mikro yapısında hücreler arası alanlar herhangi bir dönüşüm olmadan kalmıştır. İki aşamalı östemperleme uygulandığı zaman bu alanlar kaybolup yerine ince ösferrit parçacıkları ortaya çıkmıştır (Rivera ve diğer., 2011).

6. çalışmada, DDK 70 adı verilen KGDD'den bir sınıfın aşınma özellikleri ve mikroyapısı, farklı östemperleme sıcaklıkları ve süreleri altında incelenmiştir. 250, 300, 350 ve 400 °C östemperleme sıcaklıkları olarak seçilmiştir. %50 NaNO₃ ve %50 KNO₃'tan oluşan karışım tuz banyosu olarak ve 30, 60, 90 ve 120 dakika östemperleme süreleri olarak seçilmiştir. Sertleşme ve aşınma direnci, östemperleme sıcaklığının artması ve östemperleme süresinin azalmasıyla azalır (Karaca, 2016).

7. çalışmada, düşük alaşımlı KGDD'in mekanik özellikleri üzerindeki hem östenitlemenin hem de östemperlemenin sıcaklıklarının etkileri incelenmiştir. Numuneler 8 gruba ayrılmıştır. İlk 4 grup, östenitleme sıcaklığının etkilerini incelemek için 3 saat boyunca 1418 (770), 1436 (780), 1472 (800) ve 1520F (827 °C) 'ye ısıtılıp 3 saatte 680F (360°C)' da östemperlenmiştir. Son 4 grup, östemperleme sıcaklığının özelliklere etkilerini araştırmak için hazırlanmıştır. Bu nedenle, numuneler 3 saat 1520F (827 °C)'de östenitlendikten sonra 3 saat boyunca 725 (385), 680 (360), 600 (315.5) ve 550F (287,8 °C) 'de östemperlenmiştir. Östenitleme sıcaklığının azalması ile mekanik özelliklerin azaldığı, ancak ötektoid ferrit içeriğinin

artması nedeniyle sünekliğin ters davranış görülmüştür. Bainit kombinasyonu ve kalıntı östenit miktarı, östemperleme sıcaklığı düşerek azalmıştır (Panneerselvam ve diğer., 2017).

8. araştırmanın amacı, yuvarlanma temasının yorulma dayanımı ile östemperleme süreleri arasındaki ilişkileri incelemektir. Numuneler bir tuz banyosunda 30 dakika boyunca 900 °C'ye ısıtılıp 15, 30, 45, 60 ve 120 dakika içeren östemperleme süresi aralığı kullanılarak 275 °C 'ye soğutulmuştur. östemperlenmiş numuneler, aynı kimyasal bileşimlere sahip olan ancak su verme ve tavlama işlemlerine tabi tutulan diğer numunelerle karşılaştırılmıştır. Kırılma özelliklerini ve sertliği belirlemek için çift diskli haddelme cihazı ve vickers test cihazı kullanılmıştır. Sertlik, asiküler ferrit miktarının artmasıyla azalmıştır. Ösferrit lamel boyutu, östemperleme süresini artmasıyla daha kaba olmuştur. Düşük östemperleme sürelerinde, yorulma ömrü artmıştır. Östemperlenmiş numuneler, su sertlenmiş ve tavllanmış numunelere kıyasla daha iyi yuvarlanma teması yorulma direncini ifade etmiştir (Wang ve diğer., 2018).

9. araştırmada, Frederico Augusto Pires Fernandes, östemperleme sürecinin ve alaşım elementlerinin ÖKGDD'in mekanik davranışı üzerindeki önemini incelemiştir. Numuneler, alaşımlı elemanlar üzerinde dört gruba ayrılmıştır (grup 1: döküm hali KGDD, grup 2: %0,71Cu-ÖKGDD, grup 3: %0,71Cu + %1,22Ni-ÖKGDD ve grup 4: %0,71Cu + %1,22Ni + %0,25Mo-ÖKGDD). Östemperleme işlemi, numunelerin 890 °C'ye 2 saat süreyle ısıtılması ve 3 saat boyunca 360 °C'ye soğutulmasıyla tuz banyosunda gerçekleştirilmiştir. Mo, östemperleme kabiliyetinin özelliği üzerinde önemli bir etkiye sahip, ancak alaşım elementlerinin ayrışmasına, mukavemet, süneklik ve tokluğun azaltılmasına neden olmuştur. Östemperleme işlemi aşınma direncini arttırmıştır, ancak Cu-ÖKGDD, Cu-Ni-ÖKGDD veya Cu-Ni-Mo-ÖKGDD'den daha yüksek aşınma kütle kayıpları sergilemiştir (Mattar ve diğer., 2011).

10. araştırmada, Melik ÇETİN tarafından östenitleme ve östemperleme parametrelerin östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin aşınma direnci, mikroyapı ve sertliği gibi özelliklerini incelenmiştir. Östenitleme aşamasındaki seçilen

sıcaklıklar 850 ve 900 °C ve bırakma süreleri 30, 60 ve 90 dakikadır ve östempereleme aşaması için 250, 320, 370 ve 400 °C sıcaklıklarda, 60 ve 120 dakika bekleme sürelerinde deney yapılmıştır. Östenitleme parametreleri artması ile ve östempereleme sıcaklığının azalması ile sertlik artmıştır. östenitleme sıcaklığına göre aşınmanın davranışı görülmüştür. 850 °C 'de östenitleme süresinin ve östempereleme sıcaklığının etkileri aşınma davranışına olumsuz ama 900 °C'de olumlu olmuştur (Çetin, 2005).

11. araştırmanın amacı, iki aşamalı östempereleme işlemi ile ÖKGDD'in yorulma davranışının araştırılmasıdır. Kullanılan numuneler iki gruba ayrılmış, bir gruba tek aşamalı östempereleme uygulandı ve diğer gruba iki aşamalı östempereleme işlemine tabi tutulmuştur. İlk grup 927'de 2 saat süresiyle östenitlenip 2 saat boyunca 316, 343, 371 ve 385 °C olarak östempereleme sıcaklıkları belirlenmiştir. İkinci grup aynı östenitleme koşullarına tabi tutulmuş, ancak 5 dakika boyunca 260 °C'ye soğutulup birinci grubun östempereleme sıcaklıklarına ısıtılmıştır. 2 saat sonra, numuneler oda sıcaklığına soğutulmuştur. Tek aşamalı östempereleme işlemine kıyasla, iki aşamalı östempereleme işleminden çıkan numuneler, daha ince ösferritik hücreler ve östenit içindeki daha yüksek karbon miktarı nedeniyle daha yüksek akma ve çekme mukavemeti ve daha yüksek sertliğe sahip olmuştur. Yorulma çatlağı boyutu davranışı ferritik hücre büyüklüğünden, östenit ve matristeki karbon içeriğinden etkilenmiştir. Östempereleme sıcaklığındaki azalmayla birlikte yorulma çatlak boyutunun arttığı, ancak iki aşamalı östemperelenmiş KGDD'in tokluk çatlak büyüme oranının, tek aşamalı östemperelenmiş KGDD'inden daha yüksek olduğu gözlenmiştir (Yang ve Putatunda, 2004).

12. araştırma fikri hem tek aşamalı östempereleme hem de iki aşamalı östempereleme işlemlerini kullanarak 11. araştırmanın fikrini benzer ancak amaç, ÖKGDD'in dayanımı ve tokluk davranışını incelenmiştir. Tüm numuneler 927 °C, 2 saat östenitlenmiştir. Tek aşamalı östempereleme işlemi için 2 saat boyunca 260, 273, 288, 302, 316, 330, 343, 357, 371, 385 ve 400 °C östempereleme sıcaklıkları olarak seçilmiştir. İki aşamalı östempereleme işlemine tabi tutulan numuneler 5 dakikada 260 °C'ye soğutulup 2 saat boyunca 288, 302, 316, 330, 343, 357, 371, 385 veya 400 °C sıcaklıkta tutulmuştur. Bu araştırmanın sonuçları 11. araştırmada elde edilen sonuçları

benzemiştir. İki aşamalı östemperleme işlemi akma dayanımını, çekme dayanımını ve kırılma tokluğunu geliştirmek için yararlı bir işlemdir ancak sünekliği azalmıştır (Yang ve Putatunda, 2003).

Hasan HASIRCI tarafından yapılan 13. araştırmada, bakır, nikel ve östemperleme sürelerinin, ÖKGDD'in mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. 0,6, 0,65 ve %0,7 Cu ilavesi ile ve 0,5, 0,7 ve %1 Ni ilavesi ile numunelere 90 dakika boyunca 900 °C'de östenitleme ve sonra 60, 90, 120, 150, 180 ve 200 dakika içeren farklı zamanlarda 360 °C'de östemperleme işlemleri yapılmıştır. Alaşım elementlerinin ilavesine göre, nikel ve bakır içeriği arttıkça perlit miktarı, sertlik ve mukavemet artmış, ancak alaşım elementlerinin miktarları arttıkça uzama ve darbe dayanımı azalmıştır. ısı işleme göre, ösferrit miktarının alaşım elementlerinden ve östemperleme sürelerinden etkilendiği görülmüştür. Östemperleme süresi arttıkça, yüksek karbonlu östenit miktarı, uzama, darbe dayanımı ve grafit nodül boyutu artmış ancak sertlik, akma dayanımı ve çekme dayanımı azalmıştır. Cu içeriği arttığında darbe enerjisi artmıştır (Hasırcı, 2000).

14. araştırmada, Saranya Panneerselvam tarafından östenitli KGDD'de östenit kararlılığı araştırması uygulanmıştır. Seçilen östenitleme sıcaklığı ve süresi 927 °C ve 2 saattir. Hem üst hem de alt bainitik mikroyapılara sahip olmalarını sağlamak için 260, 288, 371, 385 ve 399 °C olarak östemperleme sıcaklıkları seçilmiştir. Döküm numuneleri ile karşılaştırıldığında, kırılma tokluğunda herhangi bir değişiklik olmadan uzama azalmasıyla birlikte gerilme mukavemeti ve östenitli KGDD'in sertliğinin arttığını göstermiştir. Yüksek östemperleme sıcaklıklarında oluşan östenit, *cryogenic* prosesi kullanılarak martensite dönüştürülen düşük östemperleme sıcaklıklarında oluşturulduğundan daha kararlıdır. (*Cryogenic* prosesi: ortam sıcaklığından -80 ile -155 °C arası sıcaklığa kadar yavaş soğuma) (Panneerselvam ve diğer., 2015).

15. araştırmada, Mahmoud Fouad Hafiz, iki yöntem kullanarak östemperleme sıcaklıklarının KGDD'in mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini göstermiştir. Birinci yöntem, numuneler 60 dakika boyunca 910 °C (1183K) 'ye kadar ısıtmak ve sonra 320 °C (593K) 'ye soğutmak ve 360 (633K), 390 (663K), 420 (693K) ve 460 (723K) °C'ye yeniden ısıtmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. İkinci yöntemde, numuneler ilk

yöntemin aynı koşullarında ostenitlenmiş, ancak 360, 390, 420 ve 460 °C'ye soğutulup 15 dakika boyunca sürekli olarak 320 °C'ye soğutuldu. Sonuç olarak, mekanik özelliklerin büyük etkileri ikinci yöntemle elde edilmiştir. Birinci yöntemle elde edilen numunelerin, sertliğin, akma ve çekme dayanımı daha yüksek olduğu, ancak ikinci yöntemle elde edilene göre daha düşük sünekliliğe sahip olduğu gözlenmiştir. Mekanik özellikler östempereleme sıcaklığının artmasıyla azalmıştır (Hafiz, 2003).



BÖLÜM İKİ

DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1 Malzeme Bileşimi

Dikkan Döküm A.Ş firmasından çekme ve Charpy numuneleri içeren bir set talep edilmiştir. Araştırmada kullanılan numunelerin malzemesi Alman standardı göre GGG 40 küresel grafitli dökme demirlerinden bir sınıftır. Bu malzemenin kimyasal bileşimi tablo 2.1 de rapor edilmiştir.

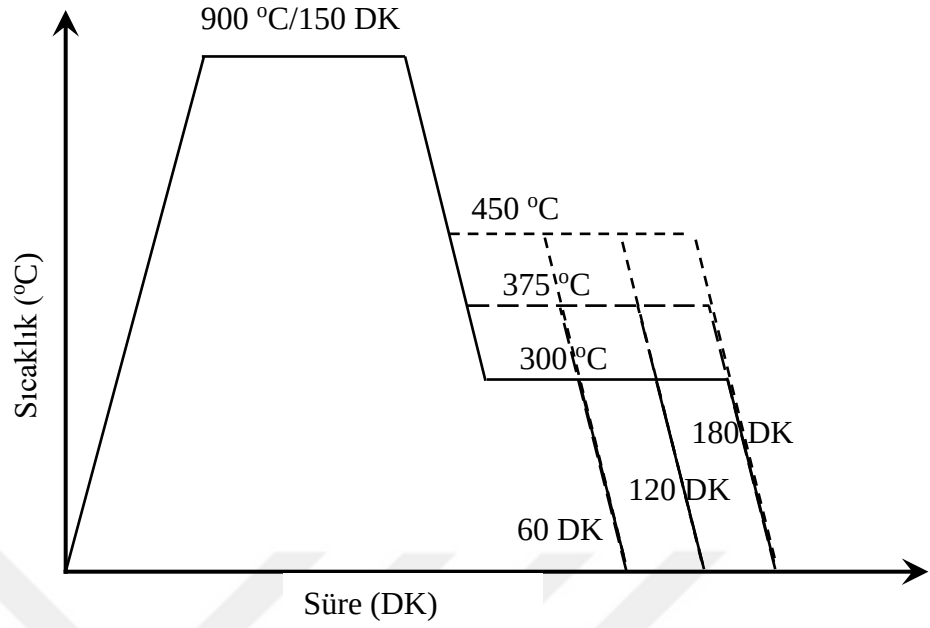
Tablo 2.1 GGG 40 içerdiği kimyasal elementler

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
3,58	0,57	0,152	0,02	0,014	0,024	0,054	<0,002	0,0094
Cu	Co	Ti	Nb	V	W	Pb	Mg	B
0,0086	0,025	0,0094	<0,0025	<0,001	<0,01	0,004	0,035	0,0083
Sn	Zn	As	Bi	Ce	Zr	La	Fe	
0,033	0,012	0,043	<0,0015	<0,003	<0,0015	0,0031	93,4	

2.2 Östemperleme İşlemi

Östemperlemenin süresi ve sıcaklığına göre numune seti 10 gruba (3 sıcaklık * 3 süre + döküm hlinde) ayrılmıştır. Östemperleme işleminin ilk aşamasında (östenitleme) numuneler Protherm PHL 160-15 fırında 150 dakika boyunca 900 °C'ye ısıtılmıştır.

İkinci aşamada (östemperleme) numuneler Ref-San RF 850 koyulmuş ve 300, 375 ve 450 °C'ye kadar soğutulmuştur. Her 3 grup aynı sıcaklıkta 60, 120 ve 180 dakika boyunca soğutulmuştur. Fırındaki soğutma ortamı, sırasıyla %45 ve %55'lik miktar ile bir NaNO₃ ve KNO₃ karışımı içeren bir tuz banyosuydu. Karışımın tamamen erimesini sağlamak için ısıtıl işlem uygulanmadan önce karışım 500 °C'ye ısıtılmıştır. Tuz banyosunda istenen bırakma süresi bittikten sonra hava ile oda sıcaklığına soğutulmuştur. Şekil 2.1 araştırmada östemperlemenin aşamalarını göstermektedir.

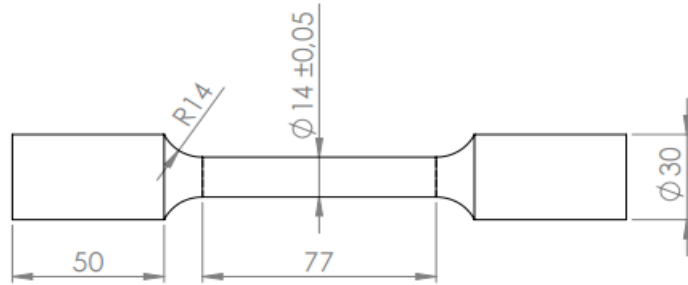


Şekil 2.1 Araştırmada kullanılan östenitlemenin ve östemperlemenin sıcaklıkları ve süreleri

2.3 Malzeme Özellikleri

2.3.1 Çekme Testi

Şirketten sağlanan çekme numuneleri TS EN ISO 6892-1 standardına uyumludur. Döküm hainde numunelerin ve östemperlenmiş numunelerin mekanik özelliklerini elde etmek amacıyla ISO / TR 25679: 2005 standardına göre Shimadzu AG-IS universal çekme test cihazı kullanılmıştır. Şekil 2.2’deki gösterilen çekme numunelerine 1 mm/DK hızla çekme testi uygulanarak uzama, akma dayanımı ve çekme dayanımı değerleri belirlenmiştir.



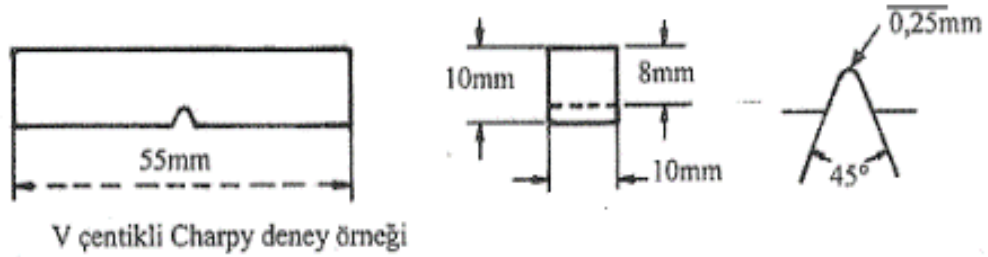
Şekil 2.2 Deneyde kullanılan çekme numunelerin boyutları

2.3.2 Sertlik Testi

ASTM E92-82 standardına göre HSV-30 Vickers sertlik cihazı kullanarak 10 saniye boyunca 98N yük numunelere uygulanmıştır. Her numunenin farklı alanlarına beş kez uygulanıp ortalama değerler alınmıştır.

2.3.3 Darbe Testi

Araştırmada kullanılan charpy numuneler TS EN 10045-1 standardına uyumlu ve şekil 2.3'te gösterilmektedir. Darbe enerjisini belirlemek için her grubun iki örneğine uygulanıp iki değer ortalama alınmıştır.



Şekil 2.3 Charpy deney numunesinin boyutları

2.3.4 Metalografik İnceleme

Darbe testindeki kırılan charpy numunelerinin kırık yüzeyleri üzerinde metalografik incelemesi yapılmıştır. İlk önce kırık yüzeylerine Presi MECAPOL P230 cihazı yardımıyla 80, 240, 400, 800, 1200, 2000 numaralı zımparalama kâğıtları ile zımparalama işlemi yapılmıştır. 6 µm elmas pasta ile parlatma işlemi yapılmıştır. Olympus GX41 optik mikroskopuyla LCmicro programı kullanarak mikroyapıların görüntüleri alınmıştır. Mikroyapıdaki mm²'deki küre sayısı, grafit oranı, küresellik ve küre boyutunu hesaplanmıştır. Sonrasında %2'lik Nital çözeltisi (Nital çözeltisi (%2 HNO ve %98 C₂H₆O)) kullanarak numunelere dağlama işlemi yapılmıştır. Mikroyapı görüntülerini değerlendirmek için aynı mikroskop ile aynı bölge üzerinden 100, 200, 500 büyütme fotoğraflarından üçer adet olmak üzere kaydedilmiştir.

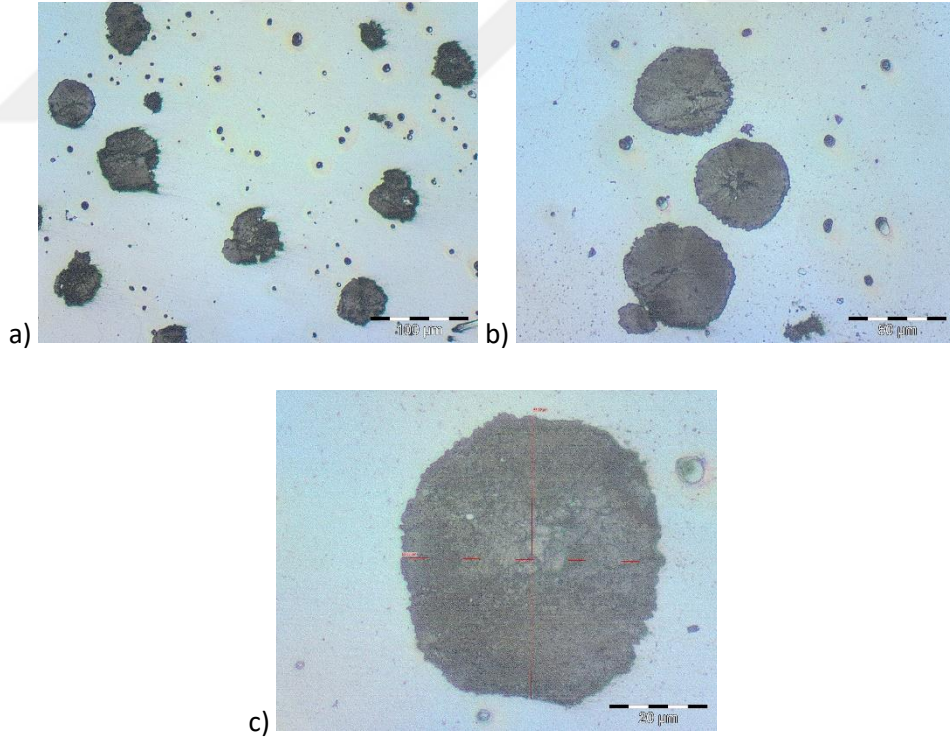
BÖLÜM ÜÇ

DENEY SONUÇLARI

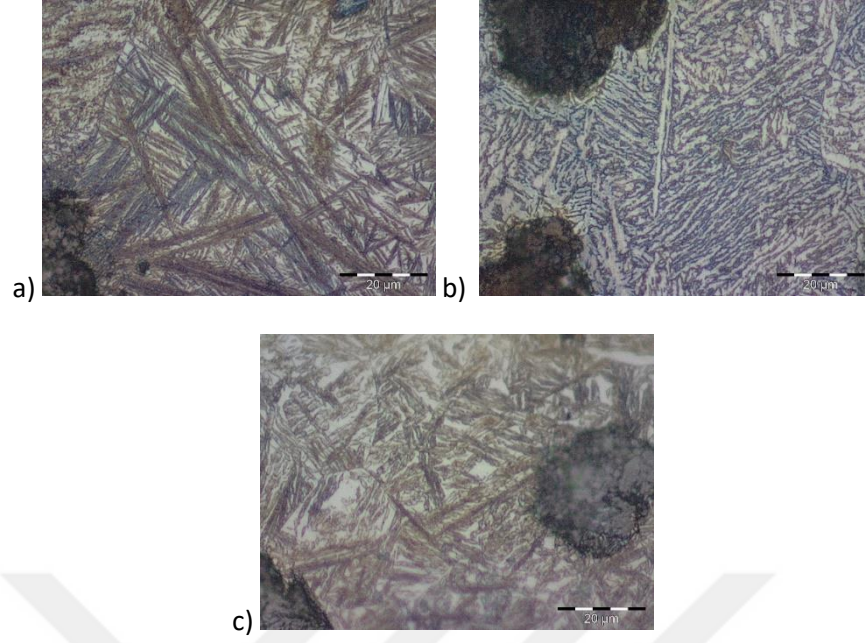
Numunelere östemperleme işlemi uygulandıktan sonra, özelliklerin incelemesinin amacıyla numuneler hazırlanıp yedinci bölümdeki bahsedilen ekipmanlar ile teste tabi tutulmuştur.

3.1 Metalografik İncelemesinin Sonuçları

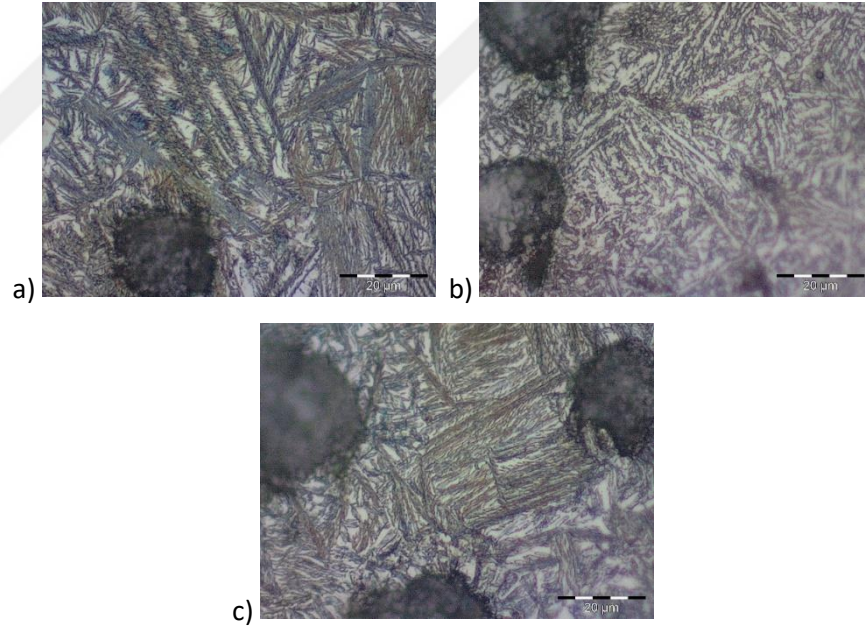
Yapı kombinasyonlarını ve fazlarını incelemek için önemli bir yoldur. Malzemenin mekanik davranışı hakkında tahmin verir ve elde edilen özelliklerin nedenlerini açıklamaktadır. Optik mikroskop ile ve X100, X200 ve X300 büyütme oranı kullanarak östemperlenmiş ve döküm halindeki numunelerin mikroyapıları incelenmiştir.



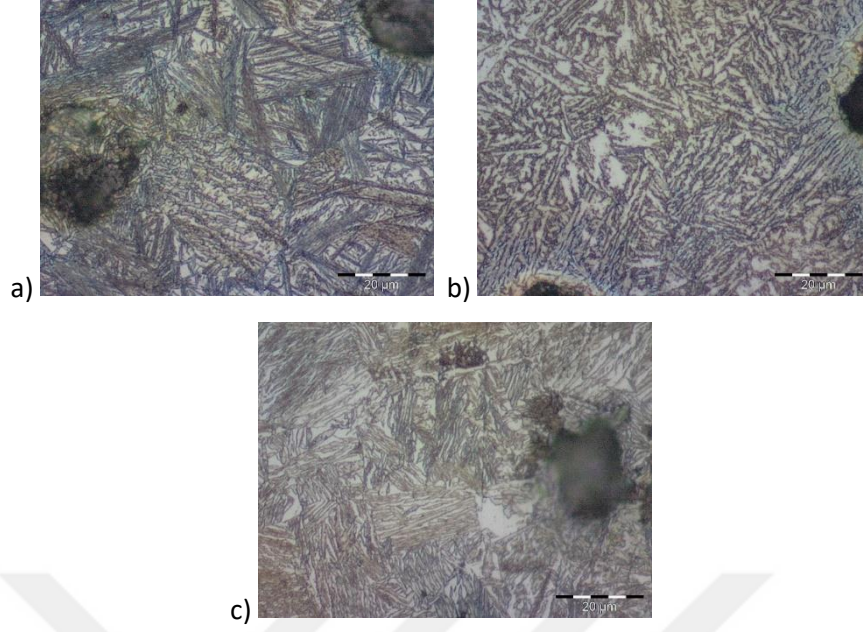
Şekil. 3.1 Deney numunelerine ait döküm yapısı a) x100 büyütme, b) x200 büyütme, c) x500 büyütme



Şekil.3.2 60 dakika östemperleme sonucu x500 büyütmede oluşan mikro yapı görüntüleri a) 300°C, b) 375°C c) 450 °C



Şekil 3.3 120 dakika östemperleme sonucu x500 büyütmede oluşan mikro yapı görüntüleri a) 300°C, b) 375°C c) 450 °C



Şekil 3.4 180 dakika östemperleme sonucu x500 büyütmede oluşan mikro yapı görüntüleri a) 300°C, b) 375°C c) 450 °C

Şekil 3.1, döküm halinde olan ve şekil 3.2, 3.3, 3.4, sıcaklıklara ve östemperleme sürelerine bağlı olarak östemperleme işleminden elde edilen numunelerin mikroyapıları göstermektedir. Her şekil belirli bir östemperleme süresi ile X500 büyütmede 300, 375 ve 450 °C’de oluşan mikroyapıların 3 tane görüntüsü kapsamaktadır. Tüm mikroyapıların iğnesel matrislerini görülmektedir.

Bu iğnelerin 300 boyutları en büyüktür. Ayrıca daha yüksek sıcaklıklarda ve daha uzun östemperleme sürelerinde daha ince iğneler oluşur. Önceki yapılan çalışmalara göre, 1 saat boyunca 300 °C’de matris ösferrit, yüksek karbonlu östenit ve martensitten oluşmaktadır. Ancak, östemperleme süresinin artmasıyla, matris içindeki karbonun zenginliği azalır ve grafit ve martensit oluşturmak için yeterli zaman bulunmaktadır.

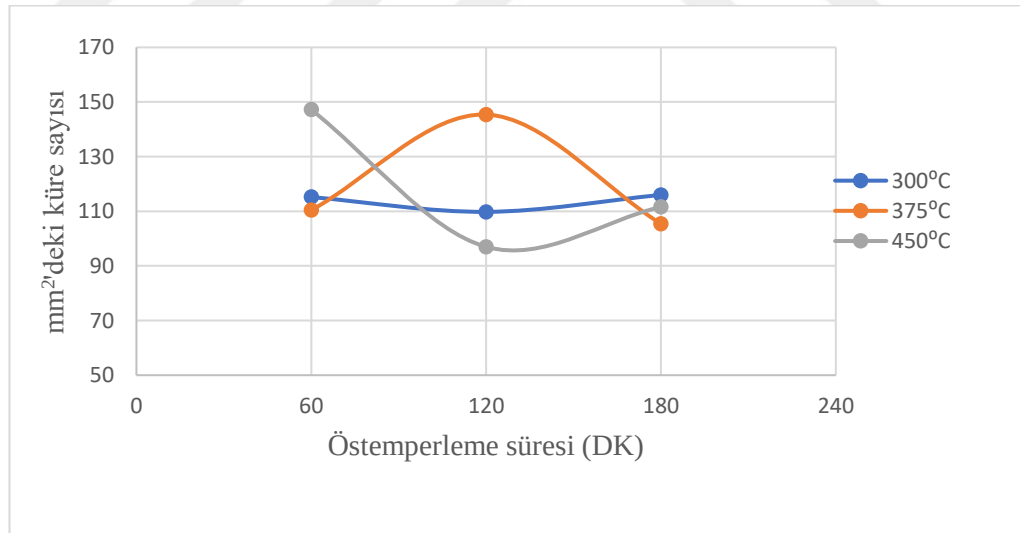
Yapıdaki grafitin şekli ve oranı, küre sayısı ve küresellik oranı gibi bu faktörler mekanik özelliklerine etli ederler ve dolayısıyla farklı alanda beş kez ölçü alarak ortalama değerlerini hesaplanmaktadır. Tablo 3.1 grafitin şekli ve oranının, küre boyutunun, küre sayısının ve küresellik oranının değerlerini göstermektedir.

Tablo 3.1 Döküm halindeki ve östemperlenmiş numunelere ait mm²'de küre sayısı, grafit oranı, küresellik ve küre boyutu tablosu

Östemperleme Sıcaklığı (°C)	Östemperleme Süresi (dk.)	No	mm ² 'de Küre Sayısı	mm ² 'de Küre Sayısının ortalaması	mm ² 'de Küre Sayısı (Standart Sapma)	Grafit Oranı (%)	Grafit Oranı (%) (Ortalama)	Grafit Oranı (%) (Standart Sapma)	Küresellik (%)	Küresellik (%) (Ortalama)	Küresellik (%) (Standart Sapma)	Küre Boyutu (µm)	Küre Boyutunun ortalaması (µm)	Küre Boyutu (µm) (Standart Sapma)
DÖKÜM HALİ		1	182	172,2	6,5	14,3	13,5	0,7	69,5	68,0	2,6	19,3	18,9	1,2
		2	168			13,8			71,9			17,4		
		3	163			13,0			67,9			18,6		
		4	172			12,5			66,0			18,0		
		5	176			13,8			64,5			21,0		
300	60	1	114	115,2	6,1	9,5	9,4	0,6	70,9	72,5	0,9	26,0	26,6	1,4
		2	122			10,0			72,6			27,1		
		3	122			9,0			73,1			25,2		
		4	106			10,1			73,3			29,2		
		5	112			8,6			72,8			25,6		
300	120	1	123	109,8	9,6	7,7	6,1	1,6	69,3	71,4	2,9	23,4	22,0	2,1
		2	109			6,9			67,8			23,6		
		3	118			7,5			70,1			23,9		
		4	101			4,1			74,4			19,3		
		5	98			4,3			75,3			19,6		
300	180	1	92	116,0	13,8	6,1	8,2	1,6	75,7	72,2	2,0	23,6	24,0	1,3
		2	135			11,1			69,4			26,6		
		3	120			8,1			72,0			23,2		
		4	116			7,6			71,4			23,1		
		5	117			8,0			72,3			23,4		
375	60	1	89	110,4	14,9	5,8	6,2	0,6	69,2	76,9	4,4	22,0	19,9	1,2
		2	104			5,7			75,1			19,8		
		3	117			6,8			78,7			19,9		
		4	108			5,4			81,1			18,6		
		5	134			7,1			80,3			19,2		
375	120	1	139	145,4	11,0	5,2	4,4	0,6	75,6	75,2	0,4	18,4	21,9	2,1
		2	157			4,9			75,0			22,5		
		3	151			4,5			74,4			21,6		
		4	127			3,9			75,3			21,9		
		5	153			3,6			75,6			24,9		

Tablo 3.1 devamı

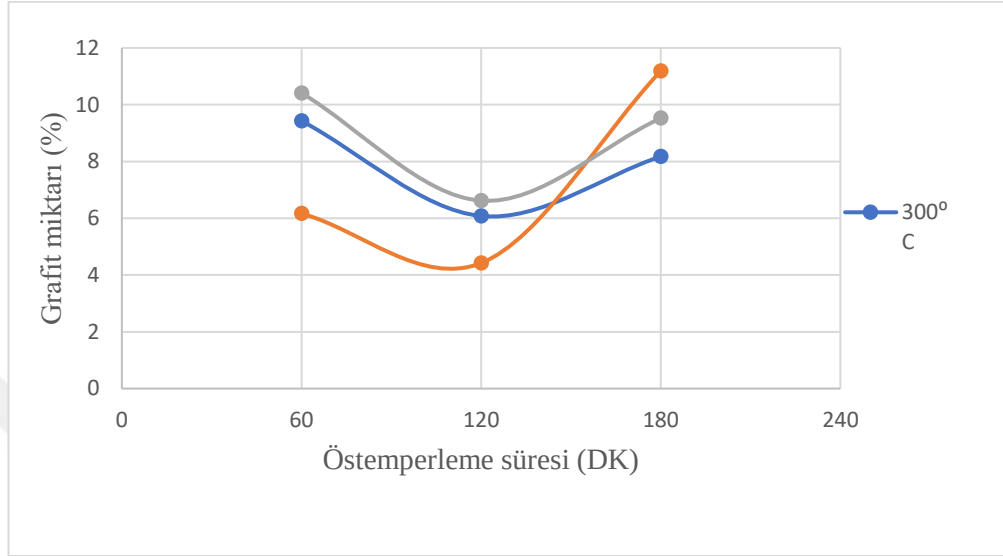
375	180	1	113	105,4	7,0	12,1	11,2	0,6	76,4	77,5	0,5	32,8	32,7	0,7
		2	112			11,3			77,7			31,4		
		3	94			10,1			77,9			33,2		
		4	106			11,4			77,6			33,2		
		5	102			11,1			77,7			32,9		
450	60	1	148	147,2	11,1	10,2	10,4	0,8	60,7	60,6	1,0	26,6	27,0	1,1
		2	158			10,0			61,5			25,5		
		3	142			10,2			59,3			26,7		
		4	159			11,9			61,8			28,3		
		5	129			9,8			59,7			28,1		
450	120	1	86	97,0	11,3	5,3	6,6	0,8	72,4	70,8	2,5	25,1	26,4	1,8
		2	113			7,4			74,1			25,5		
		3	108			6,7			71,5			24,4		
		4	87			6,4			66,9			28,5		
		5	91			7,3			69,2			28,9		
450	180	1	106	111,6	7,6	9,3	9,5	0,5	59,2	69,6	5,4	29,9	29,1	0,8
		2	110			9,4			70,8			28,5		
		3	105			9,3			71,6			30,3		
		4	126			10,5			75,0			28,6		
		5	111			9,2			71,6			28,4		



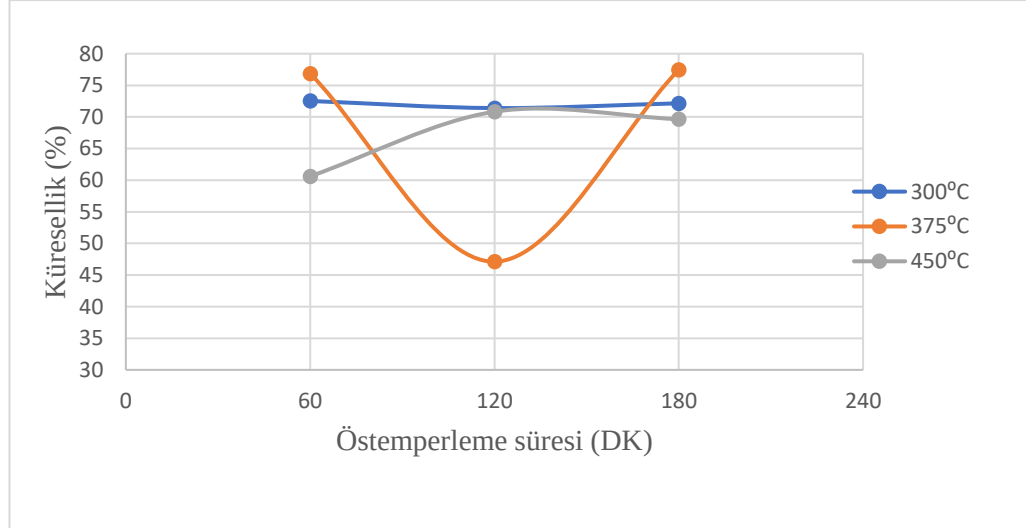
Şekil 3.5 Östempirlenmiş numunelere ait östempirleme süresi ve mm²'de küre sayısının değişimi

Döküm halindeki numuneler ile karşılaştırmada, östempirleme işlemi küresellik oranı iyileştirir ama grafit oranının, küre sayısının azalmaya ve kaba kürelerin oluşumuna neden olur. Şekiller 3.5, 3.6, 3.7, 3.8'de östempirleme sıcaklığı artarsa grafit miktarı, küre boyutu ve küresellik oranı artmaktadır. Ayrıca östempirleme

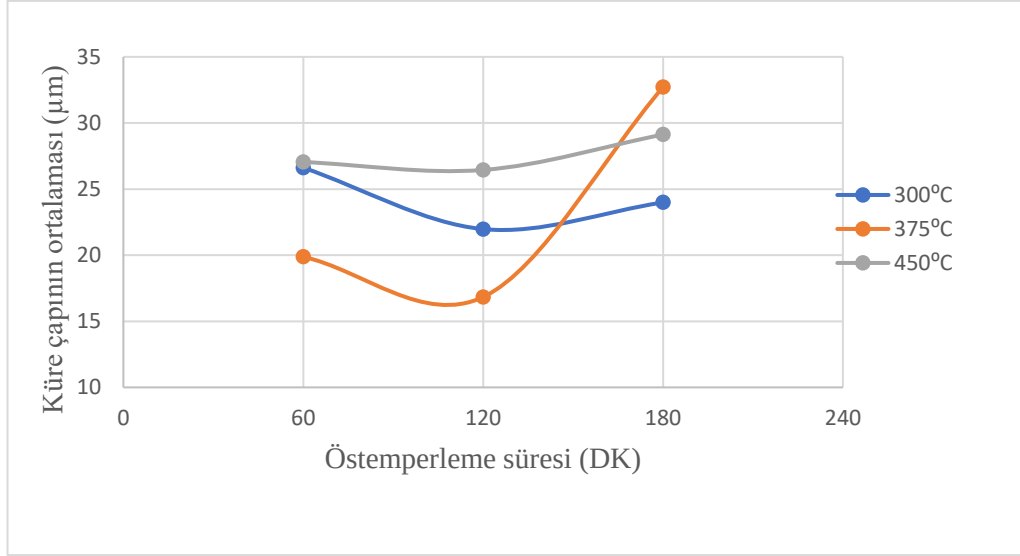
süresinin artmasıyla küre boyutu ve sayısı, grafit ve küresellik oranları artmaktadır. Bunun nedeni karbon yayılmasının ve grafit oluşturmalarının yeterli zamanından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.6 Östempirlenmiş numunelere ait östempirleme süresi ve grafit oranının değişimi



Şekil 3.7 Östempirlenmiş numunelere ait östempirleme süresi ve küreselliğin değişimi



Şekil 3.8 Östemperlenmiş numunelere ait numunelere ait östemperleme süresi ve küre boyutunun değişimi

3.2 Çekme Deney Sonuçları

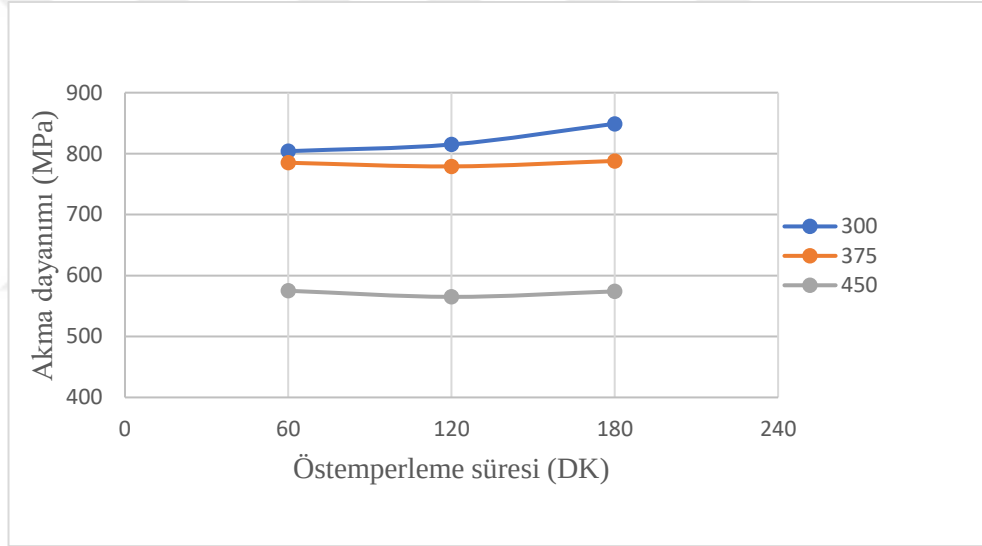
Çekme deneyi, malzemelerin ve parçaların güvenliği hakkında veri sağlar ve üreticilerin nihai ürünlerinin amaca uygunluğunun ve en yüksek kalitede üretilmesinin sağlanmasına yardımcı olur. Deneyden akma ve çekme dayanımı, uzama ve süneklik gibi önemli bilgiler elde edilebilmektedir. Döküm halinde ve östemperlenmiş numunelere çekme deneyi uygulanıp sonuçlar tablo 3.2 düzenlenmiştir ve şekiller 3.9, 3.10, 3.11 çizgi yoluyla karşılaştırma yapılmıştır.

Tablo 3.2 Östemperlenmiş numunelere ait çekme deneyi sonuçları

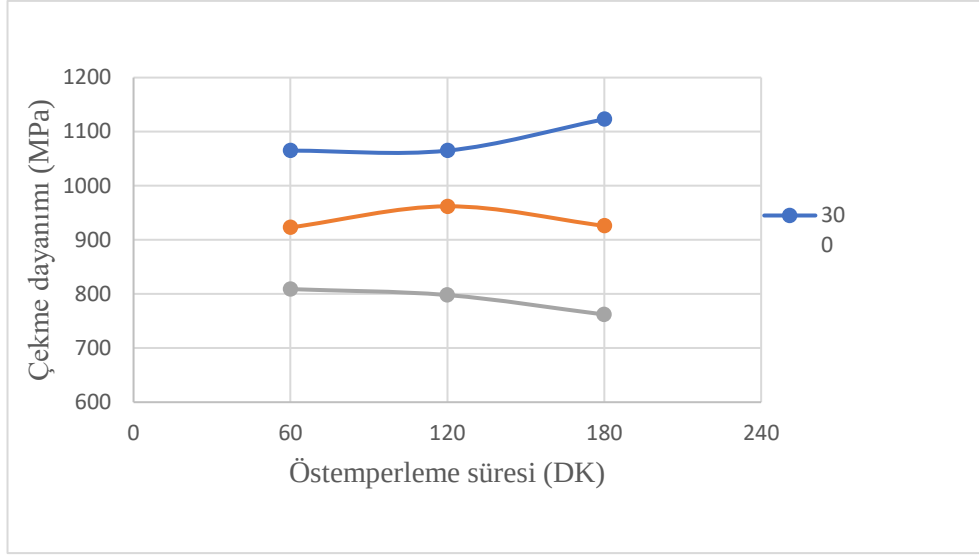
Östemperleme Sıcaklığı (°C)	Östemperleme Süresi (Dk.)	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Maximum Yükte Uzama (%)
DÖKÜM HALİ	-	294	419	18.8
300	60	804	1065	6,9
300	120	815	1065	3.3
300	180	849	1123	7.5

Tablo 3.2 devamı

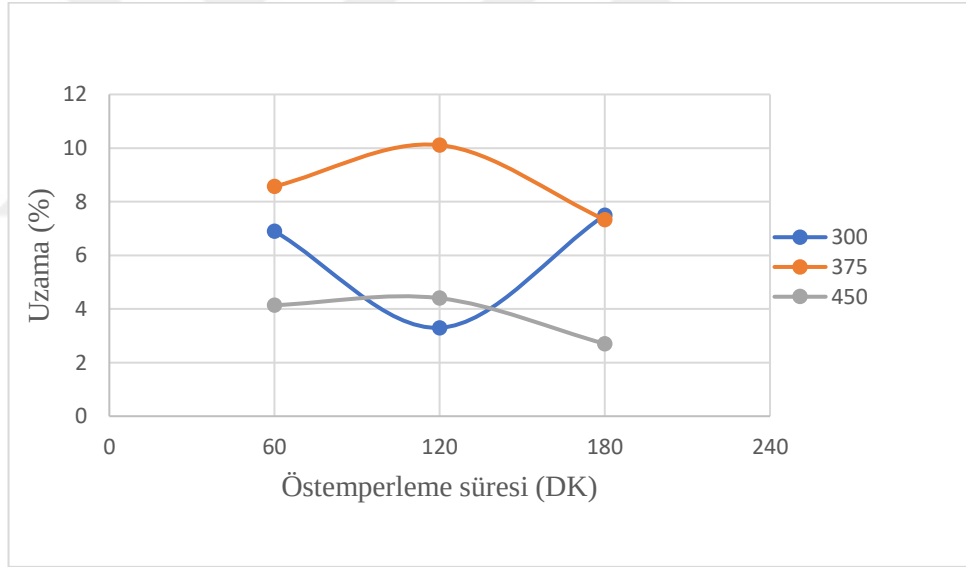
375	60	785	923	8.57
375	120	779	962	10.11
375	180	788	926	7.33
450	60	575	809	4.14
450	120	565	798	4.4
450	180	574	762	2.7



Şekil 3.9 Östempirlenmiş numunelere ait östempirleme süresi ile akma dayanımının değişimi



Şekil 3.10 Östempirlenmiş numunelere ait östempirleme süresi ile çekme dayanımının değişimi



Şekil 3.11 Östempirlenmiş numunelere ait östempirleme süresi ve minimum yükte uzamanın değişimi

Östempirleme işlemi akma mukavemeti ve çekme dayanımı iyileştirir ama süneklik değerinin azaltmasına neden olur. Bunun nedeni, östempirleme sırasında yapıdaki fazlar değişmiştir.

Östempirleme sıcaklığı arttığında akma dayanımı azalmaktadır. Ayrıca östempirleme süresinin ÖKGDD'nin akma dayanımı üzerinde önemli bir etkisi

görülmemektedir. 300°C,180 DK'da östemperlenmi numunenin akma dayanımını (849 Mpa) ve çekme dayanımını (1123 Mpa) en yüksek ve 450°C'de östemperlenen numunelerin akma mukavemetinin ve çekme mukavemetinin değerleri en düşüktür. Bunun nedeni, 300°C'de numunelerde yapı daha ince ve iğnesel bir görünümde ve sıcaklık artmasıyla 375 ve 450°C'de iğnesel görünümünden daha çok kaba bir yapı gözlemlendiği için mukavemet değerleri düşüş göstermiştir.

3.3 Darbe Deneyi Sonuçları

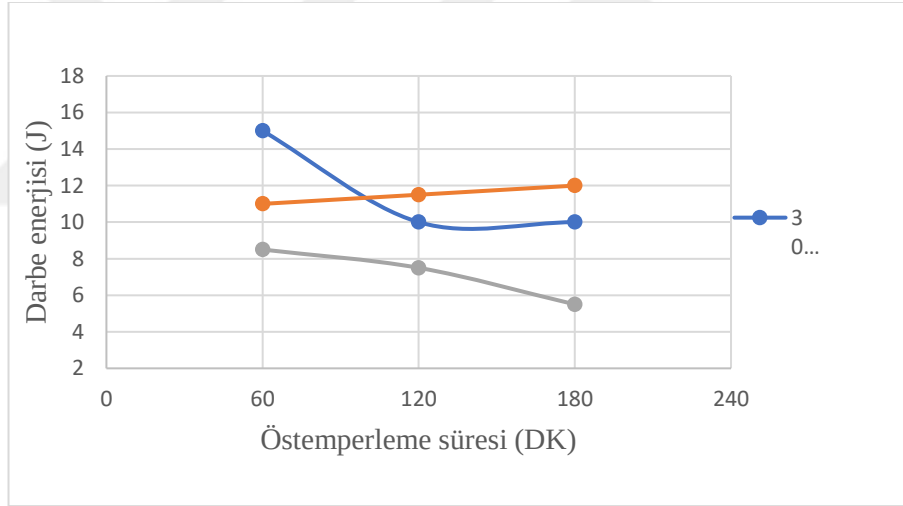
Östempereleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak darbe deneyin sonuçları Tablo 3.3 ve şekil 3.12'de gösterilmektedir. Uygulanan ısı işlemler sonucunda sertlik değerleri döküm haline göre artarken tokluk değerleri düşmüştür. Fakat 300°C de östemperlenen numunelerde en yüksek tokluk değeri elde edilmiştir. Bunun sebebi matris fazı olan ferritin sert olması ve kalıntı östenit miktarının 375°C ve 450°C östemperlenen numunelere göre daha az olmasıdır.

Tablo 3.3 Östemperlenmiş numunelere ait darbe enerjisi sonuçları

Östempereleme Sıcaklığı (°C)	Östempereleme Süresi (dk.)	No	Darbe Enerjisi (J)	Darbe Enerjisi (J) (Ortalama)	Darbe Enerjisi (J) (Standart Sapma)
Döküm hali		1	21,5		
300	60	1	20	15	5
		2	10		
300	120	1	10,5	10	0,5
		2	9,5		
300	180	1	10	10	0
		2	10		
375	60	1	12	11	1
		2	10		

Tablo 3.3 devamı

375	120	1	12	11,5	0,5
		2	11		
375	180	1	12,5	12	0,5
		2	11,5		
450	60	1	9	8,5	0,5
		2	8		
450	120	1	9	7,5	1,5
		2	6		
450	180	1	5	5,5	0,5
		2	4		



Şekil 3.12 Östempirlenmiş numunelere ait östempirme süresi ile darbe enerjisinin değişimi

3.4 Sertlik deneyi sonuçları

Şekil 3.13 ve tablo 3.4, östempirme parametrelerinin ADI'nin sertliği üzerindeki etkisini göstermektedir. Döküm halindeki KGDD'in sertliği ile karşılaştırıldığında, östempirme prosesi sertlik özelliğini iki kat arttırmaktadır, ancak sertlik değeri hem östempirme sıcaklığı hem de zamanındaki artışla azalmaktadır. 375 °C östempirme sıcaklığında numunenin sertliği 258 HV 'a kadar artar, ancak 2 saatten

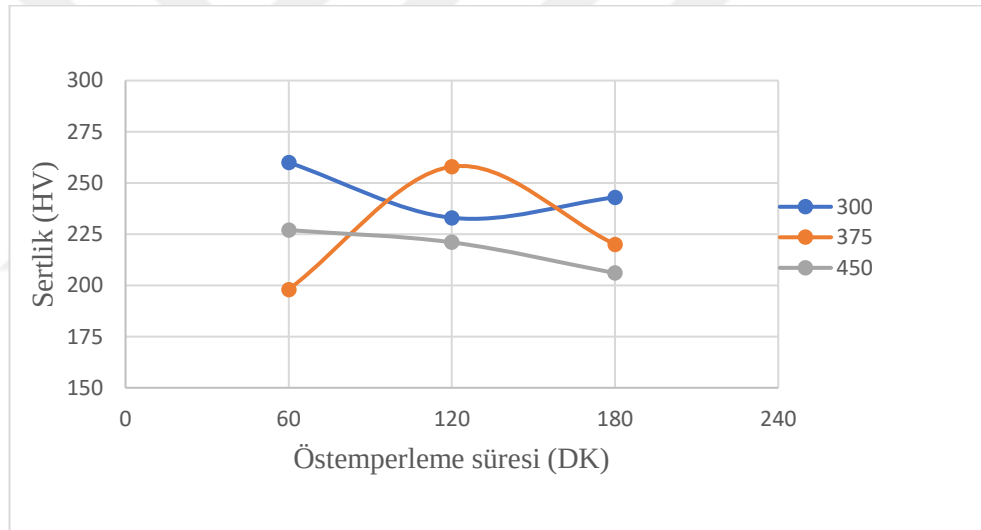
sonra azalmaya döner. En yüksek sertlik değeri, 300 °C sıcaklıkta 60 dakika boyunca 260 HV'dir.

Tablo 3.4 Östemperlenmiş numunelere ait Vickers sertlik test sonuçları

Östemperleme Sıcaklığı (°C)	Östemperleme Süresi (dk.)	No	HV	Sertlik Ortalama (HV)	Standart Sapma
Döküm hali		1	124	125,75	2,8614
		2	128		
		3	122		
		4	129		
300	60	1	274	260	19,61
		2	239		
		3	242		
		4	284		
		5	261		
300	120	1	241	233	7,05
		2	234		
		3	224		
		4	231		
		5	233		
300	180	1	240	243	4,55
		2	243		
		3	251		
		4	240		
		5	242		
375	60	1	192	198	6,11
		2	203		
		3	192		
		4	205		
		5	196		
375	120	1	242	258	11,43
		2	254		
		3	257		
		4	271		
		5	267		
375	180	1	222	220	4,02
		2	220		
		3	216		
		4	226		
		5	217		

Tablo 3.4 devamı

450	60	1	205	227	15,9
		2	249		
		3	225		
		4	233		
		5	225		
450	120	1	213	221	5,55
		2	224		
		3	220		
		4	228		
		5	222		
450	180	1	210	206	6,48
		2	198		
		3	210		
		4	200		
		5	212		



Şekil 3.13 Östempirlenmiş numunelere ait östempirleme süresi ve sertliğin değişimi

BÖLÜM DÖRT

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu araştırmada, küresel grafitli dökme demirden (GGG 40) 10 gruba ayrılmış olan, charpy ve çekme numuneler kullanarak östemperleme süresinin ve sıcaklığının KGDD'in mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Östemperlenmiş ve döküm halinde numunelerin arasındaki mekanik özelliklerinin farklarını değerlendirmek amacıyla çekme testi, darbe testi, Vickers sertlik cihazı ve optik mikroskop yardımıyla aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Östemperleme işleminin uygulanmasıyla numunelerin mikroyapılarındaki ferrit yüksek karbonlu östenit, kalıntı östenit ve ösferrite dönüşmüş ve mikroskop ile iğnesel olarak gözlenmiştir. Aynı süneklik sahip olan yapı ile karşılaştırıldığında ösferritin mukavemeti iki kat daha yüksektir. Döküm halinde numunelerin mikroyapıları ile karşılaştığında östemperleme prosesi grafitin oranı ve kürelerinin boyutları azalmaya neden olur.

300°C'de iğnelerin boyutları en büyüktür. Ayrıca daha yüksek sıcaklıklarda ve daha uzun östemperleme sürelerinde daha ince iğneler oluşmuştur. Ancak, östemperleme süresinin artmasıyla, matris içindeki karbonun zenginliği azalır, karbon yayılmak ve grafit oluşturmak için yeterli zaman bulunmaktadır. Yani sıra, östemperleme işlemi küresellik oranı iyileştirir ama grafit oranının, küre sayısının azalmaya ve kaba kürelerin oluşumuna neden olur.

Östemperleme kullanılırken numunelerin mekanik özelliklerinin iyileştiği gözlenmektedir. Östemperleme işlemi akma mukavemeti ve çekme dayanımı iki katından iyileştirir ama uzama değerinin azaltmasına neden olur. Bunun nedeni, östemperleme sırasında yapıdaki fazlar değişmiştir. Östemperleme sıcaklığı arttığında akma dayanımı azalmaktadır. Ayrıca östemperleme süresinin ÖKGDD'nin akma dayanımı üzerinde önemli bir etkisi görülmemektedir. 300°C, 180 DK'da östemperlenmiş numunenin akma dayanımını (849 Mpa) ve çekme dayanımını (1123 Mpa) en yüksek ve 450°C'de östemperlenen numunelerin akma mukavemetinin ve

çekme mukavemetinin değerleri en düşüktür. Bunun nedeni, 300°C’de numunelerde yapı daha ince ve iğnesel bir görünümde ve sıcaklık artmasıyla 375 ve 450°C’de iğnesel görünümünden daha çok kaba bir yapı gözlemlendiği için mukavemet değerleri düşüş göstermiştir.

Östempereleme sıcaklığının artmasıyla beraber sertlik değerlerinde genel olarak bir düşüş meydana gelirken, Sertlik değerlerindeki bu düşüşün nedeni ısıt işlemler sonucunda mikroyapıda meydana gelen değişikliklerden kaynaklanmaktadır. En yüksek sertlik değeri 300°C 60 dakika süreyle (260 HV) östemperlenen numunelerde gözlemlenmiştir. Bunun sebebi yapının büyük çoğunluğunun iğnesel ferrit tabakalarından oluşması ve kalıntı östenit miktarının diğer sıcaklıklardaki yapılara göre daha düşük olmasıdır.

KAYNAKLAR

ASM Handbook, (1993). *Properties and Selection: Irons Steels and High-Performance Alloys (Vol 1)*, ASM Handbook Committee, ASM International.

ASM Handbook, (1991). *Heat Treating (Vol 4)*, ASM Handbook Committee, ASM International.

ASM Handbook, (2004). *Metallography and Microstructures (Vol 9)*, ASM Handbook Committee, ASM International.

ASM Handbook, (1992). *Casting (Vol 15)*, ASM Handbook Committee, ASM International.

Benam A. S., (2015). Effect of alloying elements on austempered ductile iron (ADI) properties and its process. *China Foundry*, 12 (1), 54-70.

Berns H. ve Theisen W., (2004). *Ferrous Materials: Steel and Cast Iron*, (J. H. Davidson Çev.) 2003 Paris: Genese et interpretation.

Berns H., Theisen W., (2008). *Ferrous Materials: Steel and Cast Iron*, (G. Scheibelein Çev.) Almanya: Le-tex publication service oHG.

Cantera D. H. M., Preti O., Horst D. J., Vieira R.D. A. ve Duvoisin C. A., (2018). Niobium effects on properties of austempered ductile iron-ADI. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 7 (7), 181-193.

Cheng H., Fu H., Lin J. ve Lei Y., (2019). Effect of Cr content on microstructure and mechanical properties of carbidic austempered ductile iron. *International Journal of Materials Research*, 110 (7), 621-635.

Çetin, M. (2005). *Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma Davranışlarının Geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Dias J. F., Ribeiro G. O., Carmo D. J. ve Vilela J. J., (2012). The effect of reducing the austempering time on the fatigue properties of austempered ductile iron, *Materials Science and Engineering A556*, 408–413.

Davis J.R., (1996). *Classification and Basic Metallurgy of Cast Irons*, ASM Handbook Committee, ASM International.

Eric', O., Jovanovic', M., Šidanin, L., Rajnovic', D. ve Zec, S. (2006). The austempering study of alloyed ductile iron. *Materials and Design* 27, 617–622.

Filho A. W., Souza B. V. ve dosSantos C. A., (2016). The Influence of austempering conditions on the machinability of a ductile iron, *Materials and Manufacturing Processes*, 31, 1836–1843.

Hafiz, M. (2003). Influence of heat treatment parameters in a variable austempering temperature process on mechanical properties and fracture of SG-iron. *Transactions of the American Fisheries Society*, (5) 03-035.

Hasırcı, H. (2000). *Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde alaşım elementleri (Cu ve Ni) ve Östemperleme süresinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Jacuinde, A. B., Guerra, F., Rainforth, M., Mejía, I. ve Maldonado, C. (2015). Sliding wear behavior of austempered ductile iron microalloyed with boron. *Wear*, 330-331, 23–31.

Karaca S. (2013). *Östemperlenmiş DDK 70 dökme demirde aşınma özelliklerinin mikroyapı ile gelişiminin güncellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.

Liscic B., Tensi H. M., Canale L. C. F. ve Totten G. E., (2010). *Quenching theory and technology (2nd edition)*. USA: Taylor and Francis Group LLC.

Malleable Cast Iron, (n.d.). 19 Ağustos 2019,
www.keytometals.com/Articles/Art96.htm.

Mattar, A., Heck, S., Neto, A., Fernandes, F., Totten, G. ve Casteletti, L. (2011). Influence of alloying elements Cu, Ni and Mo on mechanical properties and austemperability of austempered ductile iron. *International Heat Treatment and Surface Engineering*, 5 (2), 78-82.

Omran A.M., Abdel-Jaber G. T. ve Ali M. M., (2014). Effect of Cu and Mn on the mechanical properties and microstructure of ductile cast iron, A. M. Omran et al *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 4, 6 (Version 1), 90-96

Panda R. K., Dhal J. P. ve Mishra S. C., (2011). *Austempered ductile iron: processing and mechanical properties*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing.

Panneerselvam, S., Martis, C. J., Putatunda, S. K. ve Boileau, J. M. (2015). An investigation on the stability of austenite in austempered ductile cast iron (ADI). *Materials Science & Engineering*, A626, 237–246.

Panneerselvam, S., Putatunda, S. K., Gundlach, R. ve Boileau, J. (2017). Influence of intercritical austempering on the microstructure and mechanical properties of austempered ductile cast iron (ADI). *Materials Science & Engineering A* 694, 72–80.

Putatunda, S. K. (2003). Investigations on the fracture toughness of austempered ductile iron alloyed with chromium. *Materials Science and Engineering A*, 346, (1-2) 254-265.

- Rivera, J. H., Cambranis, R. C. ve la Garza, A. d. (2011). Study of microstructural evolution and mechanical properties exhibited by non-alloyed ductile iron during conventional and stepped austempering heat treatment. *Materials and Design*, 32, 4756–4762.
- Savićević S., Avdušinović H., Gigović-Gekić A., Jurković Z., Vukčević M. ve Janjić M., (2017). Influence of the austempering temperature on the tensile strength of the austempered ductile iron (ADI) samples. *METABK*, 56 (1-2), 149-152.
- Sellamuthu, P., Samuel, D. H., Dinakaran, D., Premkumar, V., Li, Z. ve Seetharaman, S. (2018). Austempered Ductile Iron (ADI): Influence of Austempering temperature on microstructure, mechanical and wear properties and energy consumption. *Metals*, 8 (1), 53.
- Tokunaga T., Era H. ve Kim Y.-J., (2019). Effect of nickel content on microstructural evolution in austempered solution-strengthened ferritic ductile cast iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28 (7), 4034–4040
- Wang, B., He, M., Barber, G. C., Schall, J. D., Tao, C. ve Sun, X. (2018). Rolling contact fatigue resistance of austempered ductile iron processed at various austempering holding times. *Wear*, 398, 41–46.
- Yang, J. ve Putatunda, S. K. (2004). Near improvement in strength and toughness of austempered ductile cast iron by a novel two-step austempering process. *Materials and Design* 25, 219–230.
- Yang, J. ve Putatunda, S. K. (2005). Threshold fatigue crack growth behavior of austempered ductile cast iron (ADI) processed by a novel two-step austempering process. *Materials Science and Engineering A* 393, 254–268.

Yang P., Fu H., Nan R. ve Guo X., (2019). Effect of Ti modification on microstructures and properties of carbidic austempered ductile iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28 (4), 2335–2347

