

**YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERDE Nb, Ti, V, Mg
ELEMENTLERİNİN MİKROYAPI, AŞINMA VE DARBE DİRENCİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Şükran MUTLU

**DOKTORA TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AĞUSTOS 2012
ANKARA**

Şükran MUTLU tarafından hazırlanan “YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERDE Ti, Nb, V, Mg ELEMENTLERİNİN MİKROYAPI, AŞINMA VE DARBE DİRENCİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Kadir KOCATEPE

Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Burhanettin İNEM

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Böl.



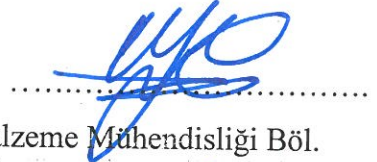
Prof. Dr. Kadir KOCATEPE

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Böl.



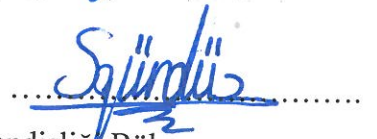
Prof. Dr. Mehmet ERDOĞAN

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Böl.



Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Böl.



Doç. Dr. Ramazan KAYIKÇI

Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Böl



Tarih: 31 / 08 / 2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



TEZ BİDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Şükran MUTLU

**YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERDE Nb, Ti, V, Mg
ELEMENTLERİNİN MİKROYAPI AŞINMA VE DARBE DİRENCİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)**

Şükran MUTLU

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ağustos 2012**

ÖZET

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler mükemmel aşınma ve korozyon dirençleri nedeniyle en yaygın döküm alaşımlarından biridir. Bu alaşımların uygulamaları, kesici barlar, darbeli kırıcıların dövücü blokları, hammadde kırıcı parçaları, haddehane parçaları, astarlar, tarım makineleri parçaları, pistonlar ve dişliler, konveyör, buldozer dişleri, pompa parçaları, diskler, tuğla kalıpları, segmanlar ve barlar, maden sondaj ekipmanları çeşitli, madencilik ve mineral sanayi parçalarından oluşmaktadır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin mikroyapılarının önemli bir bölümü mükemmel aşınma direnci sağlayan sert M_7C_3 türü karbürleri içerir. Bununla birlikte, mikroyapıda bulunan keskin köşeli sert ve kaba M_7C_3 türü karbürleri uzun hizmet ömrü için önemli olan tokluğu azaltır.

Titanyum, niobyum, tungsten, vanadyum ve magnezyum gibi bazı elementlerin ilavesi yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin mekanik özelliklerini geliştirdiği rapor edilmiştir.

Bu ilave elementler yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin mikroyapısında bulunan $(Cr,Fe)_7C_3$ karbürlerin boyutunda, morfolojisinde ve dağılımında ve TiC , NbC ve VC gibi sert fazların oluşumunda önemli rol oynar.

Bu çalışmada, %3,26 C, ve %28 Cr içeren döküm halinde ve 1080°C sıcaklıkta 14 saat ve 540 °C sıcaklıkta 4 saat ısıtma işlemi görmüş yüksek kromlu beyaz dökme demire %0,5, 1,0, 1,5 ve 2 Ti, Nb ve V ve %0,05 ve 0,1 Mg'un mikroyapı özellikleri, sertlik, aşınma ve tokluk dayanımına etkisi incelenmiştir.

Mikroyapısal inceleme için metalografik, kantitatif ve X-ışını kırınım teknikleri kullanılmıştır. Bu elementlerin yüksek kromlu beyaz dökme demirin aşınma direnci, sertlik ve kırılma tokluğuna olan etkileri ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- 1- Alaşımda Ti, Nb, V ve Mg miktarının artırılması ile birincil M_7C_3 ve ötektik karbürlerin boyutu önemli ölçüde azaltılmıştır. Alaşımdaki %0,1 Mg ve %2 Ti, Nb ve V içeriği ortalama karbür çaplarını yaklaşık % 230 azaltmıştır.
- 2- Alaşımda %0.05 ve 0.1 Mg içeriği küresel şekilli karbürler oluşturmuştur.
- 3- Alaşımda Ti, Nb ve V içeriği arttıkça sertlik artarken, Mg ilavesi ile sertlik bir miktar azalmıştır.
- 4- Alaşımdaki Ti, Nb, V ve Mg içeriği arttıkça darbe dayanımı artmıştır.
- 5- Alaşımdaki Ti, Nb, V ve Mg içeriğinin artması ile 20N yük altındaki aşınma dayanımı artmıştır. Bununla birlikte sadece %1,5 ve %2 Ti, Nb ve V 40N yük altındaki aşınma dayanımını arttırmakta etkili olmuştur.

Bilim Kodu : 710.1.092

Anahtar Kelimeler :Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demir, Aşınmaya Dayanıklı Alaşımlar

Sayfa Adedi : 156

Tez Yöneticileri : Prof. Dr. Kadir KOCATEPE

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF Ti, Nb, V and Mg ELEMENTS ON
MICROSTRUCTURE, WEAR AND IMPACT RESISTANCE OF HIGH
CHROMIUM WHITE CAST IRON**

(Ph. D. Thesis)

Şükran MUTLU

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

August 2012

ABSTRACT

High chromium white cast irons are one of the most common foundry alloys due to their excellent wear and corrosion resistance. Applications of these alloys have included breaker bars, impact crushers impact blocks, raw material crusher parts, rolling mill parts, liners, agricultural machinery parts, pistons and gears, conveyors, bulldozers teeth, pump parts, discs, bracket moulds, segments and bars, several types of mine drilling equipment, parts for the mining and mineral industry parts. Microstructures of high chromium white cast irons contain a significant proportion of a hard M_7C_3 type carbides provides excellent wear resistance. However, hard and coarse M_7C_3 type carbides with sharp corners and tips in the microstructure decreases toughness which must also be a consideration for longer service life.

It has been reported that the addition of some elements such as titanium, niobium, tungsten, vanadium and magnesium improves the mechanical properties of high chromium white cast irons. Those addition elements plays an important role in the size, morphology and distribution of $(Cr,Fe)_7C_3$ carbides and forming of hard phases such as TiC , NbC and VC in in the microstructure of high chromium white cast irons.

In this study, the influence of 0,5, 1,0, 1,5 and 2 wt.% of Ti, Nb and V, and 0,05 and 0,1 wt.% Mg on the microstructural characteristics, hardness, wear resistance and impact toughness of high chromium white cast iron containing 3,26wt.%C and 28wt.%Cr was examined in both as cast condition and after heat treatment at 1080°C temperature for 14 hours and 540°C temperature for 4 hours. Metallographic, quantitative and X-ray diffraction techniques were carried out for microstructural examination. The effect of these elements on the wear resistance, hardness and fracture toughness of high chromium white cast iron were also evaluated individually.

The results obtained show the following;

- 1- By increasing the content of Ti, Nb, V and Mg in the alloy, the size of M_7C_3 primary and eutectic carbides was considerably reduced. The content of 0.1wt.%Mg and 2wt.% Ti, Nb and V in the alloy decreased average carbide diameters approximately 230%.
- 2- The content of 0.05 and 0.1 wt.% Mg in the alloy produced spheoridal shape carbides.
- 3- By increasing the content of Ti, Nb and V in the alloy, increases hardness while addition of Mg decreases slightly.
- 4- Additions of Ti, Nb, V and Mg in the alloy increased impact resistance as increases their content.
- 5- By increasing the content of Ti, Nb, V and Mg in the alloy, increases abrasive wear resistance under 20N load. However, only 1.5 and 2 wt% of Ti, Nb and V are effective in increasing of abrasive wear resistance under 40N load.

Science Code : 710.1.092

Keywords : High Chromium White Cast Iron, Wear Resistant Iron

Page Number : 156

Advisers : Prof. Dr. Kadir KOCATEPE

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım sayın Prof. Dr. Kadir KOCATEPE teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesi toplantılarındaki değerli katkı ve değerlendirmelerinden dolayı tez izleme komitesi üyesi Prof. Dr. Burhanettin İNEM'e, Prof. Dr. Mehmet ERDOĞAN'a Doç. Dr. Ramazan KAYIKÇI'ya Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ' e teşekkür ederim.

Döküm alaşım malzemelerinin temini, kalıpların, dökümlerin ve ısıtma işlemlerin yapılması konusunda verilen destek ve katkıları için başta M. Şerif GARİBAĞAOĞLU olmak üzere Ergenekon Çelik San. ve Tic. Aş.'ne, döküm aşamasındaki yardımlarından dolayı Sabri BAYRAKTAR'a en derin teşekkürlerimi arz ederim. Aşınma testlerinin yapılması konusunda verilen destek ve katkıları için Prof. Dr. Yusuf ŞAHİN'e XRD çalışmalarında desteğinden dolayı Havva KAZDAL ZEYTİN' e darbe numunelerinin hazırlanması konusunda yardımlarından dolayı Dr. Rıdvan KARAAĞAÇ' a ve değerli katkılarından dolayı Yrd. Doç. Volkan KILIÇLI, ya teşekkürlerimi arz ederim.

Son olarak bu tezi hazırlama sürecinde; sabır ve anlayışla beni sürekli destekleyen çok kıymetli eşim Erkal MUTLU ve NAKİLCİOĞLU ailesine sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xviii
RESİMLERİN LİSTESİ	xxiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxv
1. GİRİŞ	1
2. DÖKME DEMİRLER.....	4
2.1. Dökme Demirlerin Tanımı	4
2.2. Dökme Demirlerin Bileşiminde Bulunan Elementler	5
2.2.1. Karbon	6
2.2.2. Mangan.....	6
2.2.3. Silisyum.....	7
2.2.4. Kükürt.....	7
2.3. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması.....	8
2.3.1. Beyaz dökme demir.....	9
2.3.2. Gri dökme demir.....	10
2.3.3. Temper dökme demir.....	10
2.3.4. Küresel grafitli dökme demir.....	11
2.3.5. Hızlı soğutulmuş (çil uygulanmış) dökme demir.....	11
2.3.6. Özel dökme demir	11

Sayfa

3. ALAŞIMLI DÖKME DEMİRLER.....	13
3.1. Alaşım Elementleri.....	13
3.1.1. Krom.....	13
3.1.2. Bakır.....	14
3.1.3. Molibden.....	14
3.1.4. Vanadyum.....	14
3.1.5. Nikel.....	14
4. YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLER	17
4.1. Özellikler.....	17
4.2. Mikroyapı.....	21
4.2.1. Ana malzeme	24
4.2.2. Karbürler.....	28
4.3. Isı Direnci.....	32
4.4. Çekme Dayanımı.....	33
4.5. Darbe Dayanımı.....	34
4.6. Alaşım Elementlerinin Özelliklere Etkisi.....	35
4.6.1. Karbon.....	37
4.6.2. Krom.....	39
4.6.3. Molibden.....	41
4.6.4. Silisyum.....	44
4.6.5. Bakır.....	45
4.6.6. Fosfor.....	46

Sayfa

4.6.7. Kükürt.....	46
4.6.8. Mangan.....	46
4.6.9. Nikel.....	46
4.6.10. Bor.....	47
4.6.11. Niobyum.....	50
4.6.12. Vanadyum.....	51
4.6.13. Titanyum.....	52
4.6.14. Nadir toprak elementleri.....	54
4.7. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Isıl İşlemi.....	55
4.7.1. Destabilizasyon (Östenitleme) ısıl işlemi	56
4.7.2. Kritik sıcaklık altı veya temperleme ısıl işlemi.....	61
4.7.3. Sıfırlatı soğutma işlemleri.....	65
4.7.4. Gerilme giderme ısıl işlemleri.....	65
4.8. Uygulama Alanları	68
5. YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERDE AŞINMA DİRENCİ	70
5.1. Aşınmanın Tanımı.....	70
5.2. Aşınmaya Etki Eden Faktörler	78
5.3. Aşınma Mekanizmaları	79
5.3.1. Adhesiv aşınma	79
5.3.2. Abrasiv aşınma	81
5.3.3. Yüzey yorulma	84
5.3.4. Eroziv aşınma.....	85

Sayfa

5.3.5. Kavitasyon aşınması.....	86
5.3.6. Öğütmeli aşınma	87
5.3.7. Oyuklanma ve kalkma aşınması.....	88
5.3.8. Kazımalı aşınma.....	89
5.3.9. Korozi aşınma	90
5.3.10. Pin on disk.....	92
5.4. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerde Abrasiv Aşınmayı Etkileyen Faktörler.....	93
5.4.1. Karbür yapısının abrasiv aşınmaya etkisi	94
5.4.2. Matris yapısının abrasiv aşınmaya etkisi	94
5.5. Aşınma Deneylerinde Ölçüm Yöntemleri ve Kullanılan Aşınma Deney Cihazları	95
5.5.1. Ağırlık farkı.....	96
5.5.2. Kalınlık farkı	98
5.5.3. İz değişimi	98
5.5.4. Radyoizotop	99
5.5.5. Bilgisayar destekli.....	99
5.6. Tribosistemler	100
5.6.1. Tribotestlerin sınıflandırılması.....	100
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	102
6.1. Malzeme.....	102
6.2. Model ve Kalıp.....	102
6.3. Ergitme ve Döküm	104

	Sayfa
6.4. Metalografik Çalışmalar.....	107
6.5. X Işınlari Radyografisi	107
6.6. Ortalama Karbür Çapının Ölçümü	108
6.7. Isıl İşlemler	108
6.7. 1. Sertleştirme ısıl işlemi.....	108
6.7.2. Temperleme ısıl işlemi	109
6.8. Mekanik Testler	109
6.8.1. Sertlik testi	109
6.8.2. Aşınma testi.....	109
6.8.3. Darbe testi	110
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	112
7.1. Mikroyapı Karakterizasyonu.....	112
7.1.1. Ti, Nb, V ve Mg ilavelerinin mikroyapıya etkisi	113
7.1.2. Isıl işlem sonrası numunelerin mikroyapıları.....	119
7.2. Ortalama Karbür Çapının Ölçüm Sonuçları.....	128
7.3. Mekanik Testler.....	130
7.3.1. Sertlik testi sonuçları.....	130
7.3.2. Aşınma testi sonuçları	137
7.3.2. Darbe testi sonuçları.....	141
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	146
8.1. Sonuçlar	146
8.2. Öneriler	147

Sayfa

KAYNAKLAR.....	148
ÖZGEÇMİŞ	156
.	

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Dökme demir türleri ile çelik döküm arasındaki çeşitli özelliklerin karşılaştırılması	5
Çizelge 2.2. Bazı alaşımsız dökme demirlerin kimyasal bileşim aralıkları	9
Çizelge 3.1. Değişik dökme demir türlerinin brinell sertlikleri	15
Çizelge 4.1. Aşınmaya dirençli yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin Bileşimleri	18
Çizelge 4.2. Düşük karbonlu ve martensitik nikel-kromlu beyaz dökme demirlerin fiziksel özellikler	18
Çizelge 4.3. 25 – 32 mm kesitli yüksek krom – molibdenli beyaz dökme demirlerin mekanik özellikleri	19
Çizelge 4.4. Krom içeriğinin ötektik dönüşüm sıcaklığına etkisi	21
Çizelge 4.5. Farklı C içeriğine sahip yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin faz dönüşüm sıcaklıkları.....	21
Çizelge 4.6. Çeşitli minerallerin, karbürlerin ve matrislerin sertlikleri	22
Çizelge 4.7. Isıl işlem ve mikroyapılar	23
Çizelge 4.8. Vickers sertlik değerleri	24
Çizelge 4.9. Geleneksel döküm ve yarı-katı döküm yöntemi ile elde edilen yüksek kromlu beyaz dökme demire uygulanan ısıl işlemlerin mikroyapı üzerine etkileri.....	24
Çizelge 4.10. Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerde matris yapısının aşınma kaybına etkisi	27
Çizelge 4.11. Katılama hızı ve matris yapının aşınma üzerindeki etkileri.....	28
Çizelge 4.12. Yüksek krom–molibdenli beyaz dökme demirlerde mikroyapıda bulunan karbürlerin sertlikleri.....	28
Çizelge 4.13. Ana metal ve kaplama malzemelerinin kimyasal kompozisyonları...	31
Çizelge 4.14. Beyaz dökme demirin kimyasal kompozisyonu	32

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.15. Yüksek kromlu beyaz dökme demirde farklı Cr oranlarında çekme dayanım değerleri.....	33
Çizelge 4.16. Ana metal ve kaplama malzemelerinin kimyasal kompozisyonları...	38
Çizelge 4.17. %20, %27 ve %36 Cr içeren beyaz dökme demirlerin kimyasal bileşimleri.....	41
Çizelge 4.18. %1,62 B, %0,32 C, %0,46 Si, %0,61 Mn, %10,85 Cr, %0,21Cu içerikli beyaz dökme demirin mekanik özellikleri	49
Çizelge 4.19. Alaşımların kimyasal kompozisyonları ve yüzeyden 1.00mm altındaki karbürlerin ortalama çapları	50
Çizelge 4.20. Farklı C içerikli yüksek kromlu dökme demirlerin faz dönüşüm sıcaklıkları	61
Çizelge 4.21. Östempereleme ısı işlemleri ve mekanik özellikler.....	61
Çizelge 4.22. Kritik sıcaklık altı ısı işlemleri uygulanmış %2,6 C-%20 Cr-%2,5 Mo alaşımına ait sertlik değerleri	62
Çizelge 4.23. Beyaz dökme demire ait kimyasal kompozisyon.....	63
Çizelge 4.24. %2.35 C %18.23 Cr içeren beyaz dökme demire uygulanan ısı işlemler elde edilen mikroyapı ve sertlik değerleri	67
Çizelge 4.25. %3.1 C ve %24.5 Cr içeren beyaz dökme demire uygulanan ısı işlemler ve oluşan matris-karbürler	67
Çizelge 5.1. Çeşitli malzemelerin öğütme ve oyuklayıcı aşınma altındaki performansları	73
Çizelge 5.2. 5 Farklı kimyasal kompozisyona sahip beyaz dökme demir ve çökelen karbür tipleri.....	74
Çizelge 5.3. 5 Farklı kimyasal kompozisyona sahip beyaz dökme demir	76
Çizelge 6.1. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin kimyasal bileşimi.....	102
Çizelge 6.2. Değişik oranlarda (%) Ti, Nb, V ve Mg ilavesi ile üretilen yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin kimyasal bileşimi.....	106

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.1. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin ilavesiz ve değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilavesi edilmiş dökümlerin sertleştirme ısıtma işlemi ve takiben temperleme ısıtma işlemi sonrası ortalama karbür çapları değerleri	129
Çizelge 7.2. Değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş yüksek kromlu beyaz dökme demirin döküm halinde sertlik değerleri	132
Çizelge 7.3. Değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş yüksek kromlu beyaz dökme demirin sertleştirme ısıtma işlemi sonrası sertlik değerleri	133
Çizelge 7.4. Değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş yüksek kromlu beyaz dökme demirin sertleştirme ve takiben temperleme ısıtma işlemi sonrası sertlik değerleri	134
Çizelge 7.5. Yüksek kromlu beyaz dökme demirde meydana gelen karbürlerin sertlik değerleri.....	135
Çizelge 7.6. Değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirde, sertleştirme ve temperleme ısıtma işlemi sonrası, 20N yük altında aşınma değerleri	138
Çizelge 7.7. Değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirde, sertleştirme ve temperleme ısıtma işlemi sonrası, 40N yük altında aşınma değerleri	139
Çizelge 7.8. Değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş yüksek kromlu beyaz dökme demirin döküm halinde darbe dayanımları	143
Çizelge 7.9. Değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş yüksek kromlu beyaz dökme demirin sertleştirme ve temperleme ısıtma işlemi sonrası elde edile darbe dayanımları	144

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Değişik tipteki dökme demirlerin karbon ve silisyum miktarları	8
Şekil 3.1. Scaheffler diyagramı	16
Şekil 4.1. a)% 1, b)%2, c)%3, d)%4, e)%5, f)%6 C içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirin SEM görüntüleri	23
Şekil 4.2. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde (a)Östenit ve (b)Martenzit ...	25
Şekil 4.3. Kalıntı östenit yüzdesi ile aşınma direnci arasındaki ilişki	26
Şekil 4.4. Yüksek krom – molibdenli beyaz dökme demirlerde matris mikro sertliğinin (HV-50) aşınma direncine etkisi	26
Şekil 4.5. Krom/Karbon oranı arasındaki ilişki	29
Şekil 4.6. Karbür oranının abrasif aşınma kaybına etkisi	29
Şekil 4.7. Fe-Cr-C Denge diyagramı	30
Şekil 4.8. Fe-Cr-C kaplama a)%C: 3.73 b)%C:4.21 c)%C: 4.85	31
Şekil 4.9. Karbür oryantasyonu a) boylamsal b) çapraz	32
Şekil 4.10. 17-18 % Cr içeren demirlerde karbon oranının yüksek sıcaklıklarda çekme dayanımına olan etkisi.....	33
Şekil 4.11. Bazı karbürlerin sertlik ve kırılma toklukları arasındaki ilişki	35
Şekil 4.12. Çeşitli karbür yapıcı elementlerin çil derinliğine olan etkisi	36
Şekil 4.13. Grafit ve karbür ötektik sıcaklıkları üzerine alaşım elementlerinin etkisi	36
Şekil 4.14. Düşük karbonlu beyaz dökme demirin sertliğine karbonun etkisi	37
Şekil 4.15. Karbon oranı ve aşınma direnci arasındaki ilişki.....	38
Şekil 4.16. Farklı C içeriğine sahip Fe-Cr-C kaplamalarına ait sertlik değerleri.....	39

Şekil	Sayfa
Şekil 4.17. Sertlik ölçümünün yeri ve Cr miktarına bağlı olarak sertlikteki değişim	40
Şekil 4.18. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin sertlik değerleri.....	41
Şekil 4.19. Molibdenin beyaz dökme demirin sertleşebilirliğine olan etkisi.....	42
Şekil 4.20. Molibdenin beyaz dökme demirin çekme dayanımı üzerindeki etkisi	43
Şekil 4.21. Farklı Cr ve Mo içerikleri ve sertlik değerleri	43
Şekil 4.22. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde Si' un aşınma direncine etkisi	44
Şekil 4.23. Bor miktarının çil derinliğine etkisi	48
Şekil 4.24. %16 Cr içeren beyaz dökme demirin bor ilaveli ve bor ilavesiz mikroyapılar	49
Şekil 4.25. Östenitik ve martenzitik dökme demirin kırılma tokluğu ve aşınma dayanımı arasındaki ilişki	51
Şekil 4.26. %25Cr, %4C içeren beyaz dökme demirin farklı miktarlardaki Ti ilavesinin sertlik ve aşınma kayıpları arasındaki ilişki	53
Şekil 4.27. %25 Cr ve %4 C içeren beyaz dökme demirde %Ti ilavesinin mikroyapıya etkisi a) %0 Ti, b)%1 Ti, c) %2 Ti, d) %6 Ti	53
Şekil 4.28. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin bileşime göre mikroyapıları a)Ötektik altı, b)Ötektik, c)Ötektik üstü	55
Şekil 4.29. %16 Cr içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirde çözeltiye alma sıcaklığı, kalıntı östenit miktarı ve su verme sonrası sertlik arasındaki ilişki	57
Şekil 4.30. Çözeltiye alma sıcaklığı, kesit kalınlığı, kalıntı östenit miktarı arasındaki ilişki	58
Şekil 4.31. 15Cr-3Mo beyaz dökme demir alaşımının;a) döküm halinde, b) 1000°C, c)1100°C' de 2 saat destablizasyon işlemi sonrası mikroyapıları.....	59

Şekil	Sayfa
Şekil 4.32. %3 ve %0.03Mo içeren alaşımlarda temperleme işleminden sonra sertlik ve kalıntı östenit miktarı ilişkisi.....	63
Şekil 4.33. Havada soğutma ve kriyojenik işlem yapılan numunelerin sıcaklık sertlik değerleri	64
Şekil 4.34. Havada soğutma ve kriyojenik işlem yapılan numunelerin sıcaklık abrasiv ağırlık kayıp değerleri	64
Şekil 4.35. 15Cr-3Mo alaşımlı beyaz dökme demir alaşımının optik mikroyapıları, 1100 °C’de yapılan destabilizasyon işlemini takiben a) 25°C, b)95°C, c)196°C’ soğutulan numuneler	65
Şekil 4.36. Döküm hali ve çeşitli ısıtıl işlem görmüş numunelerin mikroyapıları a)A, b)T, c)D, d)DT, e)DCT, f)DTC γ :östenit, α :martenzit, M_7C_3 : ötektik karbür, SC: İkincil karbür	68
Şekil 5.1. Uygulanan yük ve ağırlık kaybı arasındaki ilişki	77
Şekil 5.2. Metal-Metal sürtünmesi esnasında yüzeyden parça kopması.....	81
Şekil 5.3. Adhesiv aşınma örneği (Yapışma Aşınması).....	81
Şekil 5.4. Abrasiv aşınma mekanizması	82
Şekil 5.5. Abrasiv aşınma örneği	82
Şekil 5.6. Yorulma aşınması oluşum mekanizması	85
Şekil 5.7. Eroziv aşınmanın şematik görünüşü	86
Şekil 5.8. Eroziv aşınma örneği	86
Şekil 5.9. Bir kemirici uçta meydana gelen kendi kendine bilenmenin oluşum mekanizması.....	87
Şekil 5.10. Öğütmeli aşınma örneği.....	88
Şekil 5.11. Oymalı aşınma örneği.....	89
Şekil 5.12. Kazımalı aşınma örneği	90
Şekil 5.13. Korozif aşınma mekanizması.....	90
Şekil 5.14. Korozif aşınma örneği.....	91

Şekil	Sayfa
Şekil 5.15. Torna tezgahı ve pin-on-disk deney düzeneği	92
Şekil 5.16. Abrasiv aşınma deneylerinde kullanılan yöntemler.....	97
Şekil 5.17. Tribosistemlerin şematik gösterimi.....	101
Şekil 6.1. Döküm parçadan mikroyapı numunesi alınma prensibi	107
Şekil 6.2. Döküm parçadan darbe numunelerinin alınış prensibi	
a) Döküm parça	
b) Döküm parçadan 4 adet darbe numunesinin alınması	
c) Çentiksiz darbe numunesi.....	111
Şekil 7.1. Cr/C ve karbür tipi ilişkisi	113
Şekil 7.2. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde deneysel olarak elde edilen faz diyagramı.....	115
Şekil 7.3. Alaşımsız numuneye ait XRD analiz sonuçları	120
Şekil 7.4. % 2Ti içeren numuneye ait XRD analiz sonuçları.....	122
Şekil 7.5. %2 Nb içeren numuneye ait XRD analiz sonuçları	124
Şekil 7.6. %2 V içeren numuneye ait XRD analiz sonuçları	126
Şekil 7.7. Yüksek kromlu beyaz dökme demirde sertleştirme ısıtma işlemi ve takiben temperleme ısıtma işlemi sonrası ortalama karbür çaplarının Ti, Nb, V ve Mg'un oranlarına bağlı olarak değişimi.....	130
Şekil 7.8. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin döküm halinde sertliğin % Ti, Nb, V ve Mg oranına bağlı olarak değişimi.....	132
Şekil 7.9. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin sertleştirme ısıtma işlemi sonrası sertliğin % Ti, Nb, V ve Mg oranına bağlı olarak değişimi.....	133
Şekil 7.10. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin sertleştirme ve temperleme ısıtma işlemi sonrası sertliğin % Ti, Nb, V ve Mg oranına bağlı olarak değişimi	134
Şekil 7.11. Krom/Karbon oranı arasındaki ilişki	136

Şekil	Sayfa
Şekil 7.12. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin , sertleştirme ve temperleme ısı işlemi sonrası 20N yük altında aşınma davranışının % Ti, Nb, V ve Mg oranına bağlı olarak değişimi	138
Şekil 7.13. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin, sertleştirme ve temperleme ısı işlemi sonrası 40N yük altında aşınma davranışının % Ti, Nb, V ve Mg oranına bağlı olarak değişimi	139
Şekil 7.14. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin döküm halinde darbe dayanımlarının % Ti, Nb, V ve Mg oranına bağlı olarak değişimi	143
Şekil 7.15. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin sertleştirme ve temperleme ısı işlemi sonrası darbe dayanımlarının % Ti, Nb, V ve Mg oranına bağlı olarak değişimi	144

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Pin-on-disk düzeneği	93
Resim 6.1. Dökümlerin üretimi için kullanılan ahşap plak model.....	103
Resim 6.2. Alfaset Reçine bağlayıcılı silis kumu ile üretilen kalıplar	103
Resim 6.3. Kalıpların döküme hazır görünümü	104
Resim 6.4. Dökümlerde kullanılan pota.....	105
Resim 6.5. Döküm işlemi görünümü	105
Resim 7.1. Alaşım elementi ilave edilmemiş (Nb, Ti, V, Mg) yüksek kromlu beyaz dökme demirin mikroyapısı. a) X100, b)X200.....	112
Resim 7.2. %0,5 Ti, %1 Ti, %1,5 Ti ve %2 Ti alaşım elementi içeren yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin mikroyapısı X100, X200 büyütme.....	116
Resim 7.3. %0,5 Nb, %1 Nb, %1,5 Nb ve %2 Nb alaşım elementi içeren yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin mikroyapısı X100, X200 büyütme.....	117
Resim 7.4. %0,5 V, %1 V, %1,5 V ve %2 V alaşım elementi içeren yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin mikroyapısı X100, X200 büyütme.....	118
Resim 7.5. %0,05 Mg ve %0,1 Mg alaşım elementi içeren yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin mikroyapısı X100, X200 büyütme.....	119
Resim 7.6. Alaşım elementi ilave edilmemiş (Nb, Ti, V, Mg) sertleştirme ve temperleme ısı işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demirin mikroyapısı.....	120
Resim 7.7. Alaşım elementi ilave edilmemiş (Nb, Ti, V, Mg) sertleştirme ve temperleme ısı işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demir a) X100, b)X200 büyütme.....	121

Resim**Sayfa**

- Resim 7.8. % 2 Ti ilave edilmiş sertleştirme ve temperleme ısıl işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demirin mikroyapısı 122
- Resim 7.9. %0,5Ti, %1 Ti, %1,5 Ti ve %2 Ti alaşım elementi içeren sertleştirme ve temperleme ısıl işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin mikroyapısı X100, X200 büyütme.....123
- Resim 7.10. %2 Nb ilave edilmiş sertleştirme ve temperleme ısıl işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demirin mikroyapısı.....124
- Resim 7.11. %0,5 Nb, %1 Nb, %1,5 Nb ve %2 Nb alaşım elementi içeren sertleştirme ve temperleme ısıl işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin mikroyapısı X100, X200 büyütme.....125
- Resim 7.12. %2 V ilave edilmiş sertleştirme ve temperleme ısıl işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demirin mikroyapısı 126
- Resim 7.13. %0,5 V, %1 V, %1,5 V ve %2 V alaşım elementi içeren sertleştirme ve temperleme ısıl işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin mikroyapısı X100, X200 büyütme.....127
- Resim 7.14. %0,05 Mg ve %0,1 Mg alaşım elementi içeren sertleştirme ve temperleme ısıl işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin mikroyapısı X100, X200 büyütme.....128

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda verilmiştir.

Simgeler

Açıklamalar

γ

Östenit

α

Ferrit

Kısaltmalar

Açıklamalar

HB

Brinell Sertlik

HRC

Rockwell Sertlik

HV

Vickers Sertlik

M

Martensit

NbC

Niobyum Karbür

TiC

Titanyum Karbür

VC

Vanadyum Karbür

YKBDD

Yüksek kromlu beyaz dökme demir

1. GİRİŞ

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler iyi aşınma direnci ve tokluk özellikleri gösterirler. Bu nedenle geniş kullanım alanına sahiptirler. Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirler üzerine hedeflenen amaçlar uzun yıllar üç faktöre bağlı kalmıştır:

- 1) Kırılma dayanımının artırılması,
- 2) Aşınma dayanımının artırılması,
- 3) Bu hedeflerin kabul edilebilir maliyetlerle elde edilebilmesi.

Bugün dökümhaneler tarafından üretilen yüksek alaşımlı beyaz dökme demirler 30 yıl önce düşünülmemeyecek darbe şartları altında çalışmaktadır. Aşınma oranlarındaki azalma ve uzun servis ömürleri kırma ve öğütme operasyonlarındaki bakım maliyetlerini önemli derecede azaltmıştır [1, 2, 3].

Beyaz dökme demirlerin üretim ve alaşımlandırma işlemlerinin geliştirilmesiyle uygulama alanları da artmıştır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin yapısındaki sert krom karbürlerin malzemenin mekanik özellikleri ile aşınma direncini arttırdığı bilinmektedir [4, 5, 6].

Yüksek kromlu dökme demirler 1915 yılında The Electro Metallurgical Company'nin Niagara Şelaleleri Araştırma Laboratuvarlarında bir İngiliz metalurjisti olan Frederick Becket tarafından yapılan araştırmalarda keşfedildi. Bu metalurjistin amacı krom ağırlıklı yeni takım çelikleri geliştirmekle birlikte I.Dünya Savaşı sırasında takım çeliklerinin üretiminde ortaya çıkabilecek muhtemel ferro alaşım sıkıntılarına karşı alternatifler bulmaktı. Becket ilk yüksek alaşımlı dökme demiri 1916 yılında keşfetti ve bu alaşımın özellikleri ile uygulama alanlarını 1.245.552 numaralı ABD patentinde açıkladı. Becket'in bu araştırmasında üretilen yüksek C ve yüksek Cr'lu alaşımların alaşımsız beyaz dökme demirlerden daha az kırılğan, olağanüstü aşınma dayanımlı, ısı ve korozyona karşı mükemmel dayanıma sahip oldukları tespit edilmiştir.

%25-30 Cr'lu dökme demir alaşımların gelişmesi ve yaygınlaşması dökme demir teknolojisindeki en önemli aşamalardan biri olmuştur. Bu gelişme birkaç yıl sonra INCO tarafından aşınma dayanımlı dökme demirlerde nikel için uygulama alanı bulmayı amaçlayan bir araştırma programını da harekete geçirmiştir [1].

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin karakteristiklerine bağlı olarak, kimyasal kompozisyonu kontrol altına alınır ve uygun ısıtma işlem uygulanırsa, yüksek aşınma direnci ve sertlik değerlerine ulaşılabilir. Daha önce yapılan çalışmalarda aşınma direncinin öncelikle sert karbür içeren alaşımlar ile doğrudan ilgili olduğu tespit edilmiştir. Sert karbür içeren alaşımlarının aşınma özelliklerini de karbür bileşimi, birincil karbür yapısı ve ötektik karbür oryantasyonu belirler. Karbürleri destekleyen matris yapısı da farklı alaşım elementleri seçimiyle geniş bir alanda değişim gösterir [7, 8, 9].

Yüksek alaşımlı ve özellikle de yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirler cevher kırıcıları, öğütücü değirmen bilyeleri, çeşitli astarlar, tarım alet ve makineleri, pistonlar ve dişlileri, çeşitli konveyörler, greyder bıçakları, çeşitli pompalar, pabuçlar, diskler, tuğla kalıpları, segmanlar ve barlar, madencilik ve mineral sanayi gibi yüksek abrasif aşınma direnci gerektiren yerlerde kullanılmaktadırlar. Bu alanlarda kullanılan malzemelerin hızlı aşınması maddi zararlara ve iş kayıplarına sebep olmaktadır. Bundan dolayı daha sert, aşınmaya daha dayanıklı ve darbeye karşı daha dirençli malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirler bu amaca en uygun malzeme gruplarından biridir [5, 10-12].

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler, karbür yapıcı elementlerin ilave edilmesi ve uygulanan ısıtma işlemleri maliyeti arttırmasına rağmen aşınma direncinin halen ticari olarak kullanılan geleneksel malzemelere göre %50 daha fazla olması sebebiyle kullanım alanını arttırmaktadırlar [10].

Bu çalışmada yüksek kromlu beyaz dökme demirlere farklı oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilaveleri ile sertlik, aşınma direnci ve tokluğun artırılması hedeflenmiştir. İlavelerin, mikroyapı üzerindeki etkisi için metalografik ve XRD incelemeleri

yapılmıştır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirde karbürlerde meydana gelen incelmenin aşınma dayanımı, sertlik ve tokluk üzerine olan etkisi araştırılmıştır.

2. DÖKME DEMİRLER

Dökme demirler, demir alaşımı olmakla beraber özellikleri çok farklıdır ve bunların isimleri bu malzemelerin arzulan şekillere katı durumda şekillendirilmeden farklı olarak dökümle getirildiğini belirtmektedir. %2'den genellikle de %1'den az karbon içeren çeliklerden farklı olarak dökme demirler genel olarak yaklaşık %2-4 C ve %0,5-3 Si içerirler. Belirli özellikleri kontrol etmek ve değiştirmek için alaşım elementleri ilave edilir. Dökme demirler, çelikler gibi temelde Fe ve C' un alaşımıdır. Demir içindeki C oranı %2 değerinin üzerine çıktığında malzeme dökme demir, bu oranın altına düştüğünde çelik olarak isimlendirilir. Buna göre Fe-C denge diyagramına baktığımızda dökme demirlerin, %2' den % 6,67' ye C içerdiği görülür. Ancak yüksek C oranı malzemeyi aşırı kırılgan yapar. Bu sebeple pratikte bu dökme demirler %4' e kadar C, %3,5' e kadar Si içerirler [13-16].

2.1. Dökme Demirlerin Tanımı

Dökme demirler, tipik olarak %2-4 C ve %0,5-3 Si içeren ve katılaşma sırasında ötektik reaksiyona uğrayan Demir-Karbon-Silisyum alaşımlarıdır [9, 14].

Dökme demirler çelik dökümlere göre daha kırılgan ve daha düşük mekanik özellikler sergilerler. Ancak maliyetleri daha düşük ve daha iyi döküm özelliklerine sahiptirler. Bunların yanı sıra, karbon ve silisyum oranları arasındaki denge değiştirilerek, çeşitli metalik ve metalik olmayan elementler ile alaşımlandırma yapılarak, ergitme, döküm ve ısıtma işlem pratikleri değiştirilerek mukavemet, sertlik, işlenebilirlik, aşınma ve korozyon direnci vb. özellikleri istenen değerlere getirilebilir [9,10]. Çizelge 2.1'de dökme demir türleri ile çelik döküm arasında çeşitli özelliklerin mukayesesi verilmiştir [15].

Ötektikçe yakın bileşimler düşük ergime sıcaklığına (1150–1250 °C) ve dar katılaşma aralığına sahiptirler. Karbonun grafit olarak teşekkül etmesi hacimsel genişlemeye dolaylı malzemenin hacimsel çekmesini düşürür (~%1). Dökme demirin elde edilmesinde başlangıç malzemesi olarak genellikle yüksek fırın piki ve çelik hurdası

kullanılır [10]. Dökme demir içinde karbon ve silisyumdan başka mangan, fosfor ve kükürt de bulunur. Özel hallerde nikel, krom, molibden, titanyum, alüminyum, bakır vb. elementlerden biri veya birkaçı da bulunabilir [9].

Çizelge 2.1. Dökme demir türleri ile çelik döküm arasındaki çeşitli özelliklerin karşılaştırılması [15]

Özellik	Gri Dökme Demir	Beyaz Dökme Demir	Temper Dökme Demir	Küresel Grafitli Dökme Demir	Çelik Döküm
Dökülebilirlik	1	3	2	1	4
İşlenebilirlik	1	-	2	2	3
Güvenilirlik	5	4	3	1	2
Titreşim Söndürme Kabiliyeti	1	4	2	2	4
Yüzey Sertleşebilirliği	1	-	1	1	3
Elastisite Modülü	3	-	2	1	1
Darbe Direnci	5	-	3	2	1
Aşınma Direnci	3	1	4	2	5
Korozyon Direnci	1	2	2	1	4
Mukavemet/Ağırlık Oranı	5	-	4	1	3
Üretim Maliyeti	1	1	3	2	4

1 → En İyi 5 → En Kötü

2.2. Dökme Demirlerin Bileşiminde Bulunan Elementler

Dökme demirlerin bileşiminde bulunan elementler oldukça önemlidir. Dökme demirin ana yapısı olan demirin dışında karbon, silisyum, mangan, fosfor ve kükürt de alaşım yapısında bulunur. Kükürt, dökme demirin özelliklerinde zararlı etki gösterdiğinden, bileşimde bulunmaması veya çok az miktarda bulunması gerekir. Fosfor da dökme demirin içinde belirli sınırlar dahilinde bulunmalıdır. Dökme demirin bileşiminde bulunan bu elementler, dökme demirin ana yapısına ve özelliklerine oldukça etki ederler. Bu elementlerin dışında dökme demirde istenen özelliklere göre bakır, nikel, krom, molibden, bor gibi alaşım elementleri ilave

edilebilir. Bu tip dökme demirlere özel dökme demir veya alaşımlı dökme demir adı verilir [2].

2.2.1. Karbon

Dökme demirin bileşiminde bulunan karbon %2-4 arasındadır. Karbon dökme demirin ergime sıcaklığını düşürür ve akıcılığını artırır. Karbon, dökme demirin bileşimine ve soğuma hızına bağlı olarak serbest karbon veya bileşik karbon (karbür) halinde bulunur. Bileşimde serbest karbon bulunması, alaşımın grafitli olduğunu veya grafitleşmeyi artırıcı elementlerin ve yavaş soğuma şartlarının bulunduğunu; bileşik karbon bulunması ise, alaşımın sementit olduğunu veya karbürleşmeyi artırıcı elementlerin ve hızlı soğuma şartlarının bulunduğunu gösterir [2, 16].

Dökme demir sıvı halde iken, bileşimindeki karbon, demirle bileşik halde (demir karbür – Fe_3C) bulunur. Katılaştırma esnasında ve katılaştırmadan sonra karbonun östenit içinde tam olarak yayındığını kabul edersek, dökme demirin katılaştırılması ve yapısı basit demir-karbon ikili denge diyagramı vasıtasıyla kalitatif olarak anlaşılabilir. Soğuma anında demir bileşiği ayrışır ve karbonun bir kısmı grafit olarak serbest hale geçer. Bir kısmı da demirle bileşik halinde kalır. Soğuma hızı artırılırsa, karbonun büyük bir kısmı demirle bileşik olarak kalır ve serbest hale geçemez. Bileşimindeki karbonun büyük bir kısmı serbest karbon (grafit) halinde ayrışan dökme demirler yumuşak olur. Karbonun bileşik halinde kaldığı dökme demirler ise çok sert ve kırılgandır [3].

2.2.2. Mangan

Dökme demir içinde mangan genel olarak %0,50-1,00 arasında bulunur. Bileşimdeki karbonun demirle bileşik halinde bulunmasına yardım ederek, dökme demirin sert ve kırılgan olmasına sebep olur. Dökme demirlerde manganez ile kükürdü birlikte ele almak gerekir. Çünkü mangan, kükürdün kötü etkilerini engelleyen bir elementtir. Kükürt ile birleşir ve mangansülfür (MnS) halinde cürufa karışır. Çok az miktarı yapı içinde kalır. Manganez miktarı, bileşimdeki kükürdün kötü etkilerini gidermek için

gerekli miktardan daha fazla olmamalıdır, kısaca manganın miktarı bileşimdeki kükürt miktarına bağlıdır [2, 16].

2.2.3. Silisyum

Dökme demirin bileşimindeki silisyum genellikle %0,50-3,50 arasında değişir. Dökme demirin katılaşmasında karbonun bileşik halden, grafit halinde ayrılmasına yardım eder. Silisyumun dökme demirin bileşiminde %3,50 ile sınırlandırılması istenir. Çünkü bu değerden fazla bulunan silisyum alaşımın sert ve kırılgan olmasına sebep olur. Dökme demirden istenilen özelliklerin sağlanabilmesi için silisyum miktarının doğru ayarlanması gerekir. Silisyumun karbon üzerindeki etkisi nedeniyle, ince kesitli veya küçük parçalar silisyum miktarı fazla dökme demirden, kalın kesitli parçalar silisyum miktarı az dökme demirden dökülürler. Bunun sebebi, ince kesitli parçalar hızlı soğuduklarından bileşimdeki karbon bileşik halinde kalır. Dökülen parçalar sert ve kırılgan olur. Bu tip parçalarda silisyum oranı %2-3' dür. Kalın kesitli parçalarda durum, bunun tam tersidir. Silisyum miktarı %1 ile sınırlandırılır [2, 14].

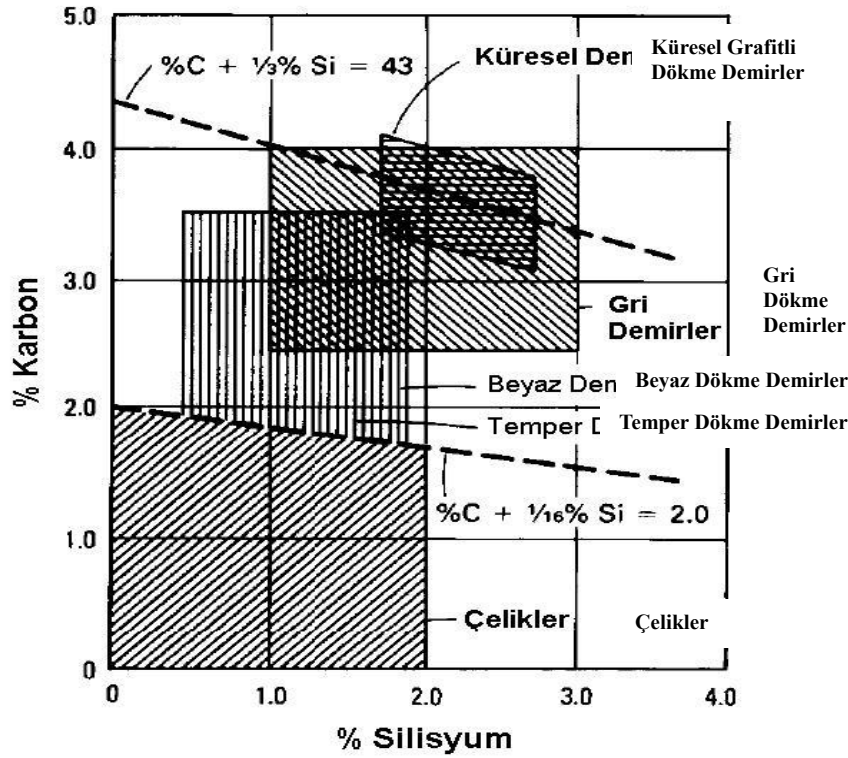
2.2.4. Kükürt

Karbonun grafit halinde ayrışmasını güçleştirir. Dökme demirin bileşiminde, demirle birleşmiş olarak demir-sülfür ve manganla birleşmiş olarak mangan sülfür halinde bulunur. Kükürt dökme demire ham demirden (pik) karışır. Bunun sebebi demir filizleri ve ham demirin yapımında kullanılan yakacaklardır.

Kalın kesitli parçalarda kükürt %1,0' dan, ince kesitli parçalarda ise %0,08' den az olduğu durumlarda, dökme demirin özelliklerini fazla etkilemez. Fakat bileşimde bu miktarlardan daha fazla kükürt olması dökme demirin sertliğini artırır ve akıcılığını azaltır. Bunu sonucu olarak parçada gaz boşlukları oluşabilir [2, 16].

2.3. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Demirin özellikleri ve kullanışı üzerine kimyasal bileşimin etkisi başlıca iki elemana bağlıdır: karbon ve silisyum. Dökme demirlerde karbon ve silisyum içerikleri mikroyapı özelliklerini değiştirir [3, 16]. Şekil 2.1’de değişik tipteki dökme demirlerdeki karbon ve silisyum miktarları görülmektedir.



Şekil 2.1. Değişik tipteki dökme demirlerin karbon ve silisyum miktarları [16]

Dökme demirlerde karbon ve silisyumun değişik oranları, çeşitli metalik ve metalik olmayan elementler ile alaşımlandırma, değişik ergitme, döküm ve ısıtma işlemleri uygulamaları ile mukavemet, sertlik, işlenebilirlik, aşınma ve korozyon direnci değişik değerlere getirilebilir. Dökme demirler kimyasal bileşim, üretim sırasındaki soğuma hızı, üretim yöntemi ve ısıtma işlemine bağlı olarak çeşitli sınıflara ayrılırlar [16]. Çizelge 2.2’de bazı alaşımsız dökme demirlerin kimyasal bileşim aralıkları görülmektedir

Çizelge 2.2. Bazı alaşımsız dökme demirlerin kimyasal bileşim aralıkları [16]

Element	Gri Dökme Demir	Beyaz Dökme Demir	Temper Dökme Demir	Küresel grafitli Dökme Demir
Karbon	2,5-4,0	1,3-3,6	2,00-2,60	3,0-4,0
Silisyum	1,0-3,0	0,5-1,9	1,10-1,60	1,8-2,8
Mangan	0,25-1,0	0,25-0,80	0,20-1,00	0,10-1,00
Kükürt	0,02-0,25	0,06-0,20	0,04-0,18	0,03 maksimum
Fosfor	0,05-1,0	0,06-0,18	0,18 maksimum	0,10 maksimum

Karbon dökme demirlerde demir karbür (sementit - Fe_3C) halinde bulunursa bileşik karbonu, serbest olarak bulunursa grafitleri oluşturur. Dökme demirlerde grafitin oluşması için bileşimde %2'den fazla karbon olması gerekir. Demir karbürü daha az kararlı hale getiren silisyum grafit oluşumunu teşvik eder [17].

2.3.1. Beyaz dökme demir

Beyaz dökme demir, alaşım katılaştığında, bileşimindeki karbon, sementit (Fe_3C) halinde olan dökme demirdir. Beyaz dökme demirler katılma sıcaklığından hızlı soğuma ile elde edilen ötektik altı alaşımlarıdır. Mikro yapıları sementit ve perlitten meydana gelir. Yapı içerisinde bulunan sementitten dolayı sert ve aşınmaya karşı dirençlidir. Aşınma direncinin önemli olduğu ve sünekliğin istenmediği yerlerde kullanılır. Alaşımsız beyaz dökme demirler genellikle ince perlitik matrise sahiptir. Nikel, krom veya molibden gibi alaşım elementleri ilave edilerek matris martensit (veya beynit) veya östenite dönüştürülür. Beyaz dökme demirler adından da anlaşılacağı gibi kırıldığında beyaz kristalin bir yüzey gösteren bir dökme demir grubudur. Beyaz dökme demirde eriyikteki karbon demirle birleşerek sert, gevrek bileşik olan demir karbür veya sementit olarak kalır. Beyaz dökme demir bu nedenle sert ve kırılgandır ve 'beyaz' kristal kopma yüzeyi sergiler. Beyaz dökme demirler ihtiva ettikleri karbürlerden dolayı işlenebilirlikleri çok zayıftır. Beyaz dökme demir

yüksek sertlik ve mükemmel aşınma özelliğine sahiptir. Bu özellikleriyle cevher kırıcıları, öğütücü değirmen bilyeleri, çeşitli astarlar, tarım alet ve makinaları, pistonlar ve dişlileri, çeşitli konveyörler, greyder bıçakları, pompalar, diskler, tuğla kalıpları, segmanlar ve çubuklar, madencilik ve mineral sanayi gibi yüksek abrasif aşınma direnci gerektiren yerlerde kullanılırlar [2, 9, 15-18].

2.3.2. Gri dökme demir

Gri dökme demir, dökme demirlerin en yaygın olanıdır. Gri dökme demirlerdeki lamel grafitler üstün aşınma direnci sağlayan sertlik seviyesinde mükemmel işlenebilirlik, sınırlı yağlamalı sürtünme direnci ve titreşimi söndürme özelliği sağlar. Gri dökme demirler, sahip oldukları bu özelliklerden dolayı mühendislik alanında birçok uygulama sahası bulmuştur. [14-16].

Gri dökme demirdeki Ce içeriğinin artması ile yapının beyaz dökme demire dönüştüğü belirtilmiştir [19].

2.3.3. Temper dökme demir

Temper dökme demir; alaşımsız beyaz dökme demirin ısıtılması ile üretilir. Temperleme ısıtılması işlemi esnasında, katılaşma sırasında oluşmuş sementit bozularak, grafit yığınları veya nodüller üretilir. Nodüller veya temper karbon, genellikle patlamış mısıra benzer. Yuvarlanmış grafit şekli, temper dökme demirin iyi bir dayanım ve sünekliğe sahip olmasını sağlar. Temper dökme demirler belirli uygulamalar için arzu edilen dökülebilirlik, işlenebilirlik, tokluk ve süneklik, korozyon direnci, yeterli dayanım ve ısıtılması işlemlerinden dolayı da ünlümlüğe sahip olduğu için önemli bir mühendislik malzemesidir. Temper dökme demir terimi- ferritik (veya standart) veya perlitik temper dökme demiri içermektedir. Yüksek dayanımlı perlitik temper dökme demirler perlitik değil temperlenmiş martensitik yapıya sahiptir [14, 16, 17, 20].

2.3.4. Küresel grafitli dökme demir

Karbonun grafit küreler halinde bulunduğu dökme demir grubudur. Aynı zamanda nodüler dökme demir, sfero dökme demir olarak da adlandırılır. Karbonun lamel yerine küre şeklinde oluşumunu sağlamak için sıvı dökme demir dökümünden önce aşılama işlemine tabi tutulur. Grafit şeklinin lamel yerine küre şeklinde olması dökme demire süneklik ve mukavemet kazandırır. Genel olarak lamel grafitli dökme demir ile küresel grafitli demir arasında bileşimleri açısından önemli bir fark yoktur. Fakat özellikleri, kullanım alanları ve amaçları bakımından büyük farklılıklar içerir.

Küresel grafitli dökme demirler, lamel grafitli dökme demirlerin başlıca avantajları olan düşük ergime derecesi, iyi akışkanlık ve iyi işlenebilirlik özelliklerine sahip olmasının yanı sıra çeliğin mühendislik açısından avantajı olan yüksek mukavemet, süneklik ve tokluk gibi özelliklere de sahip olmaları dökme demirler grubu içerisinde en çok tercih edilmelerine neden olmaktadır [16, 17, 20, 21].

2.3.5. Hızlı soğutulmuş (çil uygulanmış) dökme demir

Bazı amaçlar için sert, yüzey katmanını aşınma dirençli ve iç kısmı tok dökme demir üretmek istenir. Döküm parçalar olarak yüzeyi sert beyaz dökme demir ve iç kısmı yumuşak gri dökme demir olarak üretilir. Beyaz dökme demir genellikle katılaştan dökme demirler hızlı soğuma sağlayan soğuk metal ve grafit üzerine ergiyik metalin dökülmesiyle elde edilir. Hızlı soğuma beyaz dökme demir yapısı oluşturmayı teşvik ederken yavaş soğuma grafitleşmenin oluşumuna izin vererek gri dökme demir yapısı oluşturur. Bu dökme demirler, soğutma kullanarak bu yapı oluşturulduğundan çil dökme demir olarak adlandırılır [16].

2.3.6. Özel dökme demir

Özel dökme demir, bileşiminde silisyum, mangan, fosfor ve kükürtten başka özel olarak alaşım elementleri ilave edilmiş olan dökme demir çeşididir. Alaşım dökme

demirlerde alaşım elementleri %5'den az ise az alaşımlı fazla ise yüksek alaşımlı dökme demir olarak adlandırılmaktadır [9].

3. ALAŞIMLI DÖKME DEMİRLER

Yüksek alaşımlı dökme demirler yüksek alaşımlı beyaz dökme demirler, yüksek oranda alaşımlandırılmış küresel grafitli dökme demirler ve gri dökme demirleri içerir. Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerin bulunmasından önce pulluklardan hadde merdanelerine kadar sayısız uygulama alanlarında aşınmaya dayanıklı malzeme olarak düşük alaşımlı kokil veya perlitik beyaz dökme demirler kullanılmıştır.

Alaşımlı dökme demirler aşınma, ısı ve korozyon dirençleri gibi belirli özellikleri alaşımsız ve az alaşımlı diğer dökme demirlerden oldukça farklı olduğu için ayrı olarak gruplandırılmıştır. Alaşımlı dökme demirler genellikle kimyasal kompozisyonlarıyla tanımlanırlar ancak bu tanımlamalar mekanik özellikleri de içerebilir. Yüksek oranda krom ve molibden içeren beyaz dökme demirler çamur pompalarında, tuğla kalıplarında, çeşitli mineral delme, tesviye, işleme millerinde, sert kayaların işlenmesi için gerekli ekipmanlarda vb. alanlarda kullanılmaktadırlar [1, 10, 16].

3.1. Alaşım Elementleri

Alaşımlı dökme demirlerde Cr, Cu, Mo, V ve Ni başlıca kullanılan alaşım elementleridir;

3.1.1. Krom

Krom, demirde karbür halinde bulunur, soğuma sırasında beyaz demir oluşması ve karbonun katı halde birleşik karbon kalması eğilimini artırır. Bu durum demirin aşınma direncini artırır ve yüksek sıcaklıklarda genleşme ve oksidasyonu geciktirir. Krom, demir karbüre nispeten daha kararlı olan demir-krom karbürleri oluşturarak bileşik karbon miktarını artırır. Az miktarda krom ilavesi bile mukavemet, sertlik, çil, aşınma mukavemeti ve ısı direncini artırır fakat işlenebilirliği azaltır. Özel amaçlar için gerektiğinde % 35'e kadar Cr kullanılabilir [1].

3.1.2. Bakır

Bakır daha ince perlit oluşmasını sağlayarak demirin dayanım ve sertliğini yükseltir. Ferrit oluşma eğilimini azaltır. Kullanılabilecek bakır oranı, silisyumun da bulunması durumunda çözünebilirliği oranında sınırlandırılır. Bakır grafitleşmeyi artırır fakat silisyumun ancak 1/5' i kadar etkilidir. Ayrıca ana matrisi de kuvvetlendirir. Alaşımlama maksadıyla kullanılma oranı genellikle % 0,25-2,5 seviyesindedir.

3.1.3. Molibden

Molibden demirin dayanımını artıran mükemmel bir alaşım elementidir. Alaşımli dökme demirlerde % 0,25 – 1,25 Mo ilavesi ile çelikteki etkiye benzer bir şekilde mekanik özellikler gelişir. Yorulma mukavemetini, çekme mukavemetini, ısı direncini ve sertliği artırır. Mo daima diğer alaşım elementleriyle birlikte kullanılmalıdır.

3.1.4. Vanadyum

Vanadyum çok aktif bir karbür yapıcıdır, gri dökümde çok küçük miktarlarda grafit büyüklüğünü düzenlemek için kullanılır. Çok güçlü bir karbür yapıcı olduğundan dolayı grafitleşmeyi engeller. %0,1-0,15 oranında ilave edilmesi çekme mukavemetini, sertliği ve çil derinliğini artırır.

3.1.5. Nikel

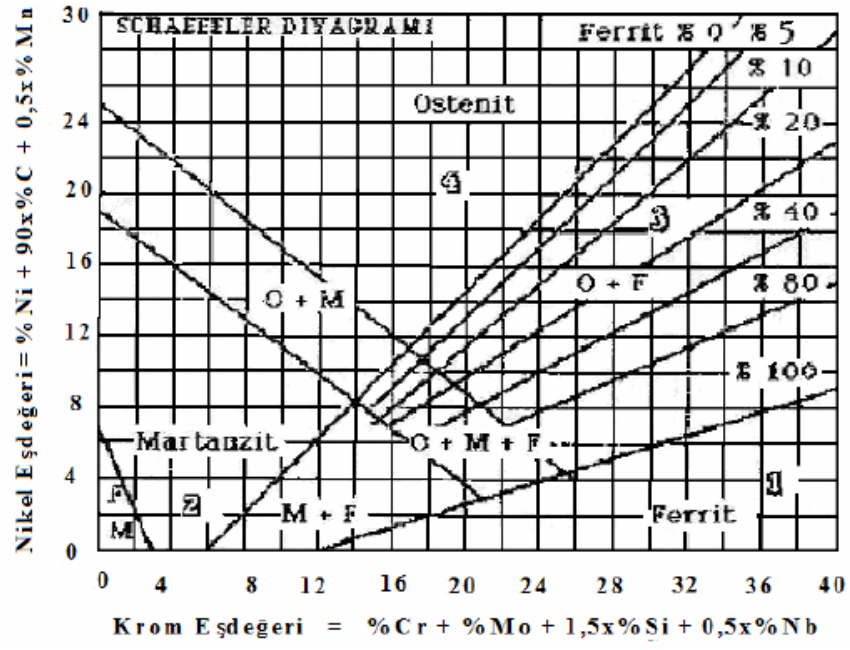
Nikel çok yaygın olarak kullanılır, çünkü istenmeyen etkisi yoktur. Nikel perlitin kararlılığını ve incelmesini artırıp dayanımı yükseltirken öncül karbür kararlılığını düşürür. Nikel de bir grafitleştiricidir ve silisyumun 1/2'si kadar etkilidir. Düşük nikel ihtiva eden dökme demir grafit, perlit ve az miktarda da ferrit içerir. Düşük miktardaki Ni yaklaşık %1 Mo ile birlikte kullanıldığında 385 BHM sertlik değerine sahip beynitik ana yapı üretir [10].

Yaklaşık % 4 Ni ile % 1,5 Cr ilavesi ile elde edilen beyaz dökme demir son derece iyi aşınma mukavemeti gösterir. Östenit martensite dönüşür ve daha sonra demir karbürlerin de bu martensit yapıda yer almasıyla çok yüksek sertlikler (600-750 BHN), mukavemet ve tokluk kazanılır. Buradaki sertlik değerinin yüksekliği, diğer dökme demir türlerinin mikroyapılarına göre sınıflandırılmış sertlik değerlerine bakıldığında daha net bir şekilde ortaya çıkar (Çizelge 3.1.) [10].

Çizelge 3.1. Değişik dökme demir türlerinin brinell sertlikleri [10]

DÖKME DEMİR	SERTLİK BHN
Ferritik gri dökme demir	110-140
Östenitik demirler	140-160
Yumuşak gri demirler	140-160
Perlitik demirler	160-220
Düşük alaşım içeren perlitik demir	200-250
Temperlenmiş martensitik demir	260-350
Martensitik demir	350-450
Beyaz dökme demirler	280-500
Alaşımlı beyaz dökme demir	450-500
Martensitik beyaz dökme demir	550-700
Nitrülenmiş demir (sadece yüzey)	900-1000

Alaşım elementlerinin miktarlarını dikkate alarak nikel ve krom eşdeğerini hesapladıktan sonra mikroyapıda oluşacak fazları Schaeffler diyagramından tespit edebiliriz. Bu da istenilen mekanik özelliklerin sağlanabilmesi için kolaylık sağlamaktadır. İstenilen mekanik özellikleri sağlayacak mikroyapı tayin edildikten sonra bu mikroyapıyı oluşturacak alaşım elementi miktarları Schaeffler diyagramından tespit edilebilir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Schaeffler diyagramı

4. YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLER

4.1. Özellikler

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler, bazı uygulamalarda büyük darbe direnci yanında tokluk ve aşınma direncinde elde edilebilecek en iyi kombinasyonu sağlamaktadırlar. Yüksek Kromlu demirlerde, karbürlerin sertliği ve kararlılığı, yüksek sıcaklıklarda mükemmel mekanik özellikler verir. Krom aralığı ile kullanım amaçlarına göre 3 gruba ayrılabilirler.

- (a) 15- 17 % Cr Isı ve aşınma direnci için
- (b) 26-28 % Cr Aşınma direnci için
- (c) 30-35 % Cr Isı ve korozyon direnci için

Artan karbon miktarı sonucu özgül ağırlıklarında düşme görülen beyaz dökme demirlerde yapıda kalıntı östenit artarsa özgül ağırlık da artar. Genellikle özgül ağırlık $7,5-7,8 \text{ g/cm}^3$ tür. Isıl genleşme katsayıları $20 - 425^\circ \text{C}$ aralığı için $13,5 - 18 \mu\text{m/m}^\circ\text{C}$ mertebelerindedir. Elektrik direnci $0,5 \mu\text{Wm}$, ısıl iletkenlikleri ise 22 w/moK civarındadır [2, 3, 10, 15, 21].

Beyaz dökme demirler yüksek aşınma dirençlerinin yanında, kritik sıcaklığa yakın (650°C) yüksek sıcaklık uygulamalarında da başarı ile kullanılabilir [9, 17]. Çizelge 4.2’de düşük karbonlu ve martensitik nikel-kromlu beyaz dökme demirlerin fiziksel özellikleri görülmektedir. Çizelge 4.3’ de $25 - 32 \text{ mm}$ kesitli yüksek krom – molibdenli beyaz dökme demirlerin çeşitli mekanik özellikleri verilmiştir.

Aşınmaya dirençli yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin sınıfları ASTM A 532’ye göre Çizelge 4.1’de verilmektedir [22].

Çizelge 4.1. Aşınmaya dirençli yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin bileşimleri [22]

Sınıf	Tip	Sembol	Kimyasal Bileşim (%)					
			C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
I	A	Ni-Cr-HC	3,0-3,60	1,30 max	0,80 max	3,30-5,0	1,40-4,0	1,0 max(a)
I	B	Ni-Cr-LC	2,50-3,0	1,30 max	0,80 max	3,30-5,0	1,4-.4,0	1,0 max(a)
I	C	Ni-Cr-GB	2,90-3,70	1,30 max	0,80 max	2,70-4,0	1,10-1,50	1,0 max(a)
I	D	Ni-HiCr	2,5-3,60	1,30 max	1,0-2,20	5,0-7,0	7,0-11,0	1,0 max(b)
II	A	%12Cr	2,80	0,50-1,50	1,0 max	11,0	14,0	0,50-1,0(c)
II	B	%15Cr-Mo-LC	2,40-2,80	0,50-1,50	1,0 max	0,50max	14,0-18,0	1,0-3,0(c)
II	C	%15Cr-Mo-HC	2,80-3,60	0,50-1,50	1,0 max	0,50max	14,8-18,0	2,30-3,50(c)
II	D	%20Cr-Mo-LC	2,0-2,60	0,50-1,50	1,0 max	1,50max	18,0-23,0	1,5max(c)
II	E	%20Cr-Mo-LC	2,60-3,20	0,50-1,50	1,0 max	1,50max	18,0-23,0	1,0-2,0(c)
III	A	%25Cr	2,30-3,0	0,50-1,50	1,0 max	1,50max	23,0-28,0	1,50max(c)

(a) : Max. % 0,30 P, % 0,15 S

LC : Düşük karbonlu

(b) : Max. % 0,10 P, % 0,06 S, % 1,2 Cu

HiCr : Yüksek kromlu

(c) : Max. % 0,10 P, % 0,06 S, % 1,2 Cu

HC : Yüksek karbonlu

Çizelge 4.2. Düşük karbonlu ve martensitik nikel-kromlu beyaz dökme demirlerin fiziksel özellikleri [21]

Tanım	Yoğunluk (g/cm ³)	Termal genleşme katsayısı (μm/m.°C)	Elektrik direnci (μΩ.m)	Termal iletkenlik (W/m.K)
Düşük karbonlu beyaz dökme demir	7,6-7,8	12	0,53	22
Martensitik Nikel-Krom Dökme demir	7,6-7,8	8-9	0,80	30

Çizelge 4.3'deki değerler çeşitli ısı ve mekanik işlemler sırasında oluşabilen çatlaklar sebebiyle geniş sapmalar gösterebilir. Bununla beraber bu değerler pratikteki verilerle uygunluk sağlamaktadır [1].

Çizelge 4.3. 25 – 32 mm kesitli yüksek krom – molibdenli beyaz dökme mekanik özellikleri [1]

KOŞULLAR (MATRİS)	SINIF	%C	SERTLİK			ÇEKME ÖZELLİKLERİ		BASMA ÖZELLİKLERİ		TERMAL GEN. KATSAYISI	
			HB	DPH	HRC	Muk. (N/mm ²)	Modül (N/mm ²)	Muk. (N/mm ²)	Modül (N/mm ²)	29-90°C	20-425°C
Su ver. Temp. (MO)	15-3LC	2,51	716	782	61,7	100	25,9	305	183	12,7	14,9
(MO)	15-3HC	3,68	712	813	62,8	48,5	23,2	317	122	-	-
	15-2-1	3,32	760	-	64,6	62,3	23,7	310	226	11,5	14,3
	20-2-1	2,89	757	824	63,8	68,5	22,6	286	187	11,1	13,6
(O)	15-3LC	2,51	426	497	47,1	61,5	22	203	75	14,4	17,9
%66 (M+O)%34P	15-3HC	3,6	-	-	-	50,8	23,4	164	68,9	-	-
%71 (M+O)%29P	15-3HC	3,6	564	681	56,4	58	23	232	131	10,5	13,6
%96O%4P	15-2-1	3,32	564	508	46,3	45,6	22,5	183	70	13,4	17,6
M+O	20-2-1	2,89	444	530	-	54,5	23,8	197	83,4	-	-
Fırın Soğ.(P)	15-3HC	3,6	451	455	41,8	69	24,3	158	48,2	11,1	13,6

Normalde yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde mekanik testler sertlik testleri ile sınırlıdır. Sert ve kırılğan malzemeler için çekme testi numunesi hazırlanması zor ve pahalıdır. Numune elde edilmesi esnasında kırılmaya sebep olacak küçük çatlakların oluşma ihtimali bir hayli fazladır. Eğme testleri basittir ancak numunelerden elde edilecek sonuç ile gerçek döküm sonuçları arasında büyük farklılıklar oluşabilir [10].

%15-35 Cr içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirler 1000-1100°C sıcaklıklarda mükemmel oksitlenme dayanımı gösterir. Termal şok dirençleri iyi olan yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde tokluk düşük kromlu alaşımlardan daha yüksektir. Tokluk özellikle kırma ve öğütme işlemlerinde kazaları önleyici bir faktör olduğundan çok önemlidir. Çentikli ve çentiksiz numunelere yapılan darbe deneyleri yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin düşük kromlu beyaz dökme demirlerden daha tok olduğunu göstermiştir. Örneğin, 30mm'lik çentikli izod deneyi çubukları kullanılarak yapılan testlerde düşük alaşımlı beyaz dökme demir 42-58 joule darbe enerjisi verirken yüksek alaşımlı beyaz dökme demir 52-87 joule darbe enerjisi vermiştir. Karbon miktarı artışı darbe direncini düşürür. Son yıllarda yüksek kromlu

beyaz dökme demirlerde kırılma tokluğu başarılı bir şekilde artırılmıştır. Karbon artışı ile martensitik beyaz dökme demirlerin kırılma tokluğu azalır [1, 23].

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler max. %3,50 Mo içerir. Maksimum aşınma direnci için, ya östenitik veya östenitik-martensitik matris ya da ısıtılma işlemi ile martensitik yapı elde edilmelidir. Söz konusu beyaz dökme demir grubu dökme demirlerin en sert grubudur. Bu dökme demirler mikro yapısında bulunan ötektik karbürlerden (M_7C_3) dolayı düşük alaşımlı nikel kromlu beyaz dökme demirlere göre daha serttir. ASTM A 532 III Sınıf grubu yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin en eski grubudur. Bu grupta %25 Cr veya %28Cr'lu beyaz dökme demirler olarak adlandırılır. Ayrıca bileşimde yer alan %1,5 Mo perlit oluşumunu engellemek ve maksimum sertliğe ulaşmak için ilave edilmektedir. Bileşiminde Cu ve Ni %1'e kadar bulunabilir [3, 22].

Bu tür malzemelerin mekanik özellikleri sertlik testi dışındaki diğer mekanik testlerle belirlenmemektedir. Krom, demir - karbon alaşımlarında karbür yapıcı ve östenit fazını bastırıcı element olarak bilinir. Yüksek karbon yüzdeleri krom açısından zengin karbürler oluşturur ve östenitin kararlı olduğu alanları azaltır ya da tamamen yok eder [10].

DSC yöntemi kullanılarak %2-2,7 C, %12-18 Cr, %0,10-0,40 Mo, %1-1,5 Ni kimyasal bileşime sahip yüksek kromlu beyaz dökme demirin ötektik sıcaklığı yaklaşık 1234°C olarak ölçülmüştür. Farklı karbon ve krom oranları kullanılarak faz diyagramları incelenmesinde, krom içeriği arttıkça ötektik reaksiyon sıcaklığının arttığı, ötektik karbon içeriğinin ve östenitik faz aralığının azaldığı belirtilmiştir. Farklı krom içeriğinin ötektik dönüşüm sıcaklığına etkisi Çizelge 4.4'de verilmiştir [24].

Çizelge 4.4. Krom içeriğinin ötektik dönüşüm sıcaklığına etkisi [24]

%Cr	Ötektik dönüşüm sıcaklığı (°C)
10	1210
15	1250
20	1270
25	1280

Farklı karbon içeriğinin Likidüs, ötektik ve solidüs sıcaklıklarına etkisi çizelge 4.5’de verilmiştir [24].

Çizelge 4.5. Farklı C içeriğine sahip yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin faz dönüşüm sıcaklıkları [24]

%C	Likidüs sıcaklığı (°C)	Ötektik sıcaklığı (°C)	Solidus sıcaklığı (°C)
2,0	1375	1280	1270
2,5	1340	1270	1265
3,0	1290	1270	1260
3,5	1270	1265	1255

4.2. Mikroyapı

Yüksek Kromlu beyaz dökme demirlerde döküm sonrası mikroyapı yumuşak matris östenitik ve matris içerisinde büyük ötektik ve/veya proötektik karbürlerden (M_7C_3) oluşur. Daha sonra ikincil karbürler matris içinde çöker. Mükemmel aşınma dirençleri, içerdikleri yüksek orandaki sert karbür hacim oranlarından kaynaklanmaktadır [25-27]. Bununla beraber, matristeki yüksek bağlantılı yüksek karbür hacim oranı bu alaşımları kırılganlaştırmaktadır [28]. Artan sertlikle aşınma direnci artmaktadır. Mikroskobik ölçekte birçok aşınma prosesi, aşındırıcı tanelerinden birinin, metalin yüzeyine girmesi, deformasyon ve aşınma çizikleri oluşturması ve yüzeyden parçalar koparması şeklinde gerçekleşir. Aşınma prosesinde, aşınma parçacıkları talaşlı işlemde meydana gelen talaşlara benzer şekildedir. Bu mekanizmanın gerçekleşebilmesi için aşındırıcı partikülün metalden sert olması gerekir. Partikül metalden yumuşak ise proses, korozyon veya oksidasyona benzer ve sadece önemsiz bir miktarda aşınma oluşur [1, 3, 9, 10].

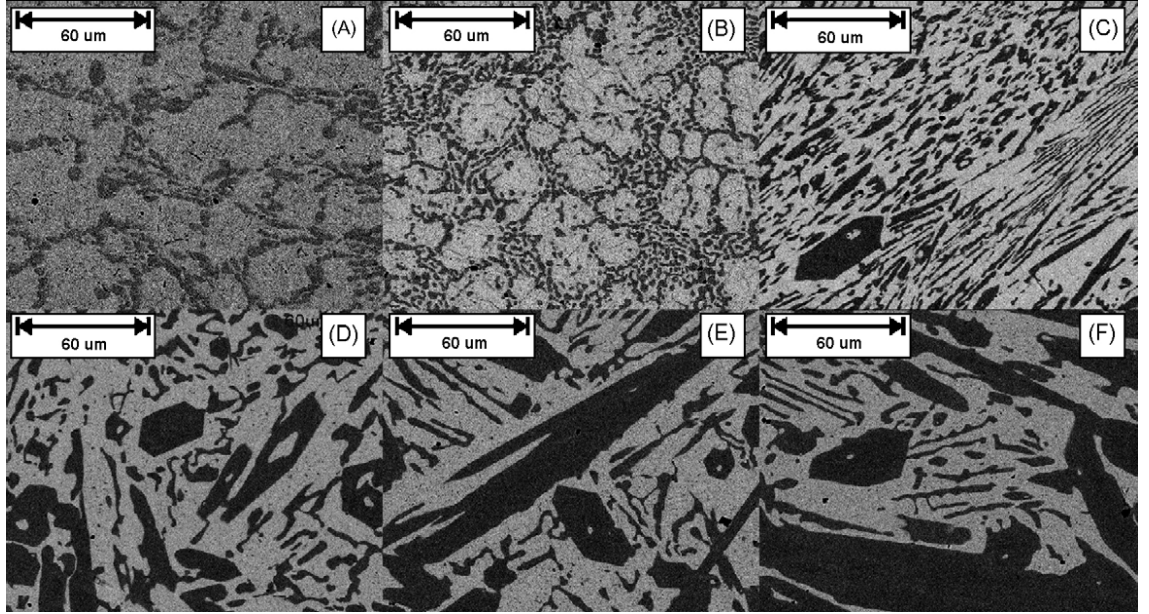
Çizelge 4.6’da çeşitli minerallerin, karbürlerin ve matrislerin sertlikleri gösterilmektedir. Çoğu aşındırıcı minerallerde ana bileşen olan kuvarsın bütün demir

esaslı alaşımların matris yapılarından daha sert olduğunu ve bunları kolayca aşındırabileceğini göstermektedir [3, 10].

Çizelge 4.6. Çeşitli minerallerin, karbürlerin ve matrislerin sertlikleri [10, 15]

Mineral malzeme veya faz	Sertlik		Mineral malzeme veya faz	Sertlik	
	Knoop	HV		Knoop	HV
Talk	20	-	Silisyum karbür	2585	2600
Karbon	35	-	Elmas	7575	10000
Gibsiyum	40	36	Ferit	235	70-200
Kalsit	130	140	Perlit (alaşımsız)	-	250-320
Florit	175	190	Perlit (alaşımli)	-	300-460
Aparit	335	540	Ostenit (%12Mn)	305	170-230
Cam	455	500	Ostenit az alaşımli)	-	250-350
Feldspad	550	600-750	Ostenit (yüksek Cr)	-	300-600
Manyetit	575	-	Martensit	500-800	500-1010
Ortoglas	620	-	Sementit	1025	840-1100
Filint	820	950	Krom Karbür	1735	1200-1600
Kuartz	840	900-1280	Molibden Karbür	1800	1500
Topaz	1330	1430	Tungsten Karbür	1800	2400
Garnet	1360	-	Vanadyum Karbür	2660	2800
Zımpara	1400	-	Titanyum Karbür	2470	3200
Korund	2020	1800	Bor Karbür	2800	3700

% 30 Cr, % 1-6 C, % 2 Mn, % 0,5 Si kimyasal kompozisyona sahip yüksek kromlu beyaz dökme demirde karbon miktarlarının mikroyapıya etkisi Şekil 4.1’de verilmiştir [29].



Şekil 4.1. A)% 1, B)%2, C)%3, D)%4, E)%5, F)%6 C içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirin SEM görüntüleri [29]

Pintaude ve arkadaşları [30] 52100 ve 1070 çeliği, küresel dökme demir ve beyaz dökme demire uygulanan ısıt işlemlerin mikroyapı ve sertlik üzerine etkilerini inceledikleri araştırmada 1070 çeliğinin en yüksek sertlik değerini verdiğini belirtmişlerdir (Çizelge 4.7, Çizelge 4.8).

Çizelge 4.7. Isıl işlem ve mikroyapılar [30]

Malzeme	Isıl İşlem	Mikroyapı
52100 çeliği	900°C'de minimum 60 dakika tutulduktan sonra yağda soğutma, 500°C'de 24 saat temperleme	Temperlenmiş martensit+M ₃ C karbür
1070 çeliği	860°C'de minimum 60 dakika tutulduktan sonra suda soğutma, 250°C'de minimum 50 dakika temperleme	Temperlenmiş martensit
Küresel dökme demir	860°C'de minimum 60 dakika tutulduktan sonra yağda soğutma, 370°C'de minimum 90 dakika+minimum 60 dakika çift temperleme ve sıfır altı işlem, minimum 120 dakika sıvı nitrojende muhafaza etmek	Temperlenmiş martensit+grafit küreler
Beyaz dökme demir	700° C'de 8 saat tavlama 1000°C'de minimum 40 dakika tutulduktan sonra havada soğutma 550° C'de minimum 180 dakika çift temper	Perlit+M ₇ C ₃ karbür

Çizelge 4.8. Vickers sertlik değerleri [30]

Malzeme	Sertlik	Mikro sertlik
52100 çeliği	415±3	387±3
1070 çeliği	626±8	640±10
Küresel dökme demir	507±3	650±10
Beyaz dökme demir	470±20	331±7

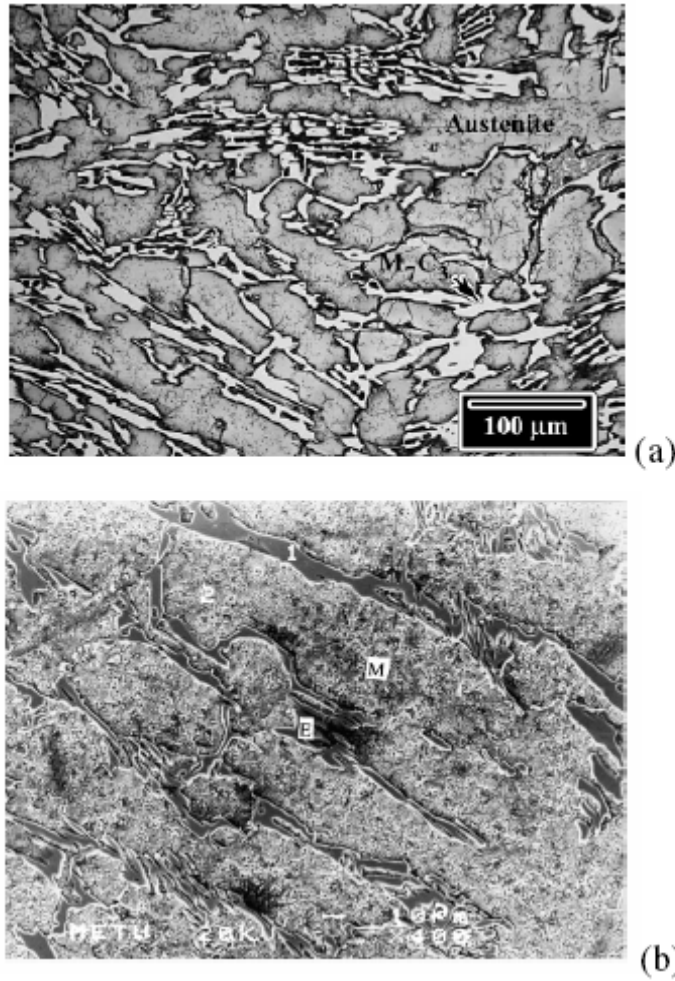
Diğer bir araştırmada [31] geleneksel döküm ve yarı-katı döküm yöntemi ile elde edilen yüksek kromlu beyaz dökme demire (%2,92 C, %26,96 Cr, %0,35 Si, %0,94 Mn, %0,26 Ni) uygulanan ısıt işlemlerin mikroyapı üzerine etkileri araştırılmıştır, (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. Geleneksel döküm ve yarı-katı döküm yöntemi ile elde edilen yüksek kromlu beyaz dökme demire uygulanan ısıt işlemlerin mikroyapı üzerine etkileri [31]

Uygulanan Isıl İşlem	Mikroyapı
Geleneksel döküm –Döküm hali	Ötektik karbürler, östenit, martensit
Yarı-katı döküm- Döküm hali	Ötektik karbürler, östenit, martensit
Yarı-katı döküm, 500°C de 2 saat temperleme ve havada soğutma	Ötektik karbürler, östenit, martensit
Yarı-katı döküm, 1075°C de 2 saat destabilizasyon ve havada soğutma	Ötektik karbürler, kalıntı östenit, martensit, ikincil karbürler
Yarı-katı döküm, 1075°C de 2 saat destabilizasyon ve havada soğutma, 500°C de 2 saat temperleme ve havada soğutma	Ötektik karbürler, kalıntı östenit, temperlenmiş martensit, ikincil karbürler

4.2.1. Ana malzeme

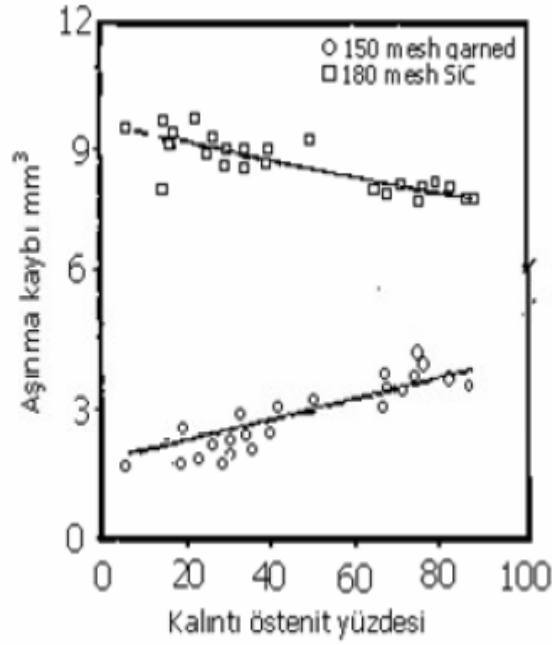
Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde aşınma direnci ve tokluğun yüksek olabilmesi için mikroyapıda uygun karbür ve matrisin bulunması gereklidir. Matris için yapılabilecek optimum seçim sertleştirilmiş yüksek karbonlu martensittir. Diğer bir alternatif ise ısıt işlemlerle sertleştirilebilen kararsız östenittir. Şekil 4.2’de martensit ve östenit matrisli mikro yapılar verilmiştir [1, 3, 10].



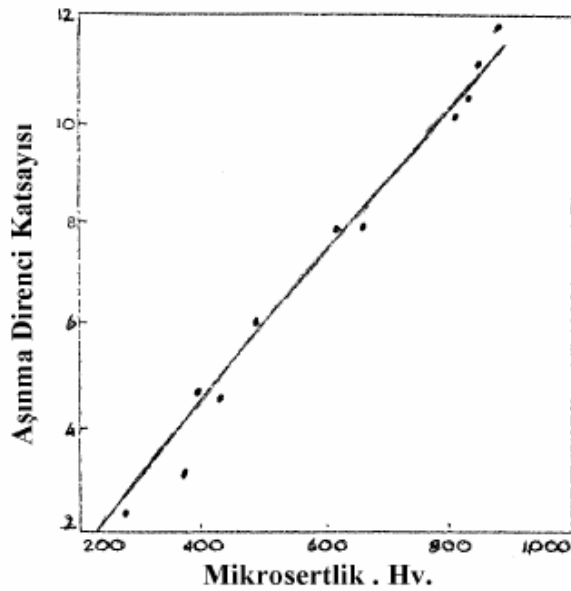
Şekil 4.2. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde (a) östenit ve (b) martensit matris [10]

Karbon artışı ile birlikte martensitin aşınma direnci artar. Isıl işlem sonucu martensitik matrise dağılan ikincil karbürler aşınma direncinde artışa sebep olurlar. Temperleme ile aşınma direnci düşmektedir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbürler matris içinde dağılmışlardır. Matris yumuşak olduğunda hızlı aşınır ve karbürler matristen kopar. Bu durumda karbürlerin aşınma dirençlerinin yalnızca bir kısmından yararlanılmış olunur. Şekil 4.3' de kalıntı östenit miktarı ile aşınma direnci arasındaki ilişki verilmiştir. Matrisin önemi Şekil 4.4'da açıkça görülebilir. Matris yumuşak olursa karbürlerin kırılma eğilimi yüksek ve aşınma direnci daha düşük olur. Yumuşadıkça akma noktası düşen matris sürtünme sırasında oluşan mekanik gerilmelere karşı karbürlere gerekli desteği sağlayamaz ve karbürlerin kısa sürede matristen ayrılmasına ve kırılmasına neden olur. Bu sebeple

mikroyapıdaki perlit varlığı da önemlidir. Ancak beyaz dökme demirlerin aşınma direnci mikro yapıda perlit miktarı % 10'u aştığı zaman düşer [3,10].



Şekil 4.3. Kalıntı östenit yüzdesi ile aşınma direnci arasındaki ilişki [3]



Şekil 4.4. Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerde matris mikro sertliğinin (HV-50) aşınma direncine etkisi [10]

Östenitik yapıya sahip yüksek krom–molibdenli beyaz dökme demirler, % 12 Mn içeren Hadfield çeliğinde olduğu gibi aşınma esnasında oluşan gerilmelerin etkisiyle deformasyon sertleşmesine uğrayabilir. Ancak mekanik gerilmelerle sertleşebilen östenitik matrisin, martensitik matris kadar aşınmaya dirençli olmadığı Çizelge 4.10’da görülebilir [3, 10].

Çizelge 4.10. Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerde matris yapısının aşınma kaybına etkisi [1]

Matris	Oyma Aşınması Kaybı (g)	Öğütme Aşınması Kaybı (g)	HB
Perlit	0,41	0,14	406
Östenit	0,09	0,08	564
Martensit	0,04	0,04	840

Çizelge 4.10’daki yapılan sıralama endüstriyel olarak birçok kırma ve öğütme operasyonundaki pratik bilgilerle doğrulanmaktadır.

Mekanik gerilmeler etkisiyle martensitik dönüşüme uğrayan östenitik veya kısmi östenitik matrisin bir dezavantajı da sıcaklık artışıyla matrisin tekrar kararsız hale gelmesidir. Bu faz dönüşümleri sonucu oluşan hacim değişikliği parçanın kırılmasına veya yüzeyde mikro çatlaklar oluşmasına yol açar. Bununla birlikte Turenne, Lavellee ve Masounave isimli araştırmacılar östenitik matrise sahip yüksek kromlu beyaz dökme demirin aşınma sırasında oluşan deformasyon sertleşmesi nedeniyle martensitik matrise sahip beyaz dökme demirden daha iyi aşınma direncine sahip olduğunu iddia etmişlerdir [3, 10].

% 3,32 C, %1,9 Cr, %4,15 Ni, %0,7 Mn, % 0,95 Si, %0,4 Mo içeren beyaz dökme demirde matris yapının abrasiv aşınma direnci üzerindeki etkisinin incelendiği diğer bir araştırmada, Cr/C oranı 5 den büyük olduğunda östenitik matrisin, martensitik matrisden daha iyi aşınma direnci gösterdiği sonucuna varılmıştır. Katılma hızı ve matris yapının aşınma üzerindeki etkileri Çizelge 4.11’de verilmiştir [32].

Çizelge 4.11. Katılaşma hızı ve matris yapının aşınma üzerindeki etkileri [32]

Malzeme	Katılaşma hızı (°C/s)	Abrasiv ebatı (µm)	Ağırlık kaybı (mg)
Östenitik matris	1,5	23,6	2,9±0,1
	15	23,6	2,9±0,1
Martensitik matris	1,5	23,6	2,9±0,1
	15	23,6	2,9±0,1
Östenitik matris	1,5	36,0	3,7±0,1
	15	36,0	3,7±0,3
Martensitik matris	1,5	36,0	3,8±0,1
	15	36,0	3,7±0,2
Östenitik matris	1,5	66,0	4,1±0,2
	15	66,0	4,1±0,1
Martensitik matris	1,5	66,0	4,8±0,2
	15	66,0	4,4±0,1
Östenitik matris	1,5	93,0	4,5±0,2
	15	93,0	4,5±0,1
Martensitik matris	1,5	93,0	5,3±0,2
	15	93,0	4,9±0,1

4.2.2.Karbürler

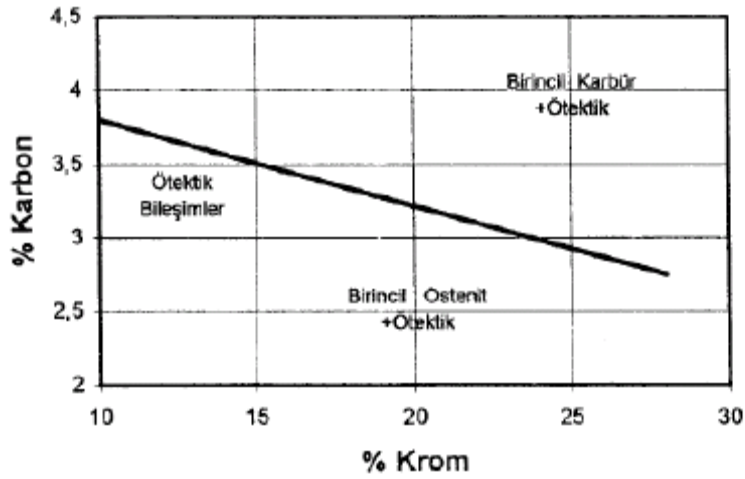
Yüksek kromlu beyaz dökme demirler yapıda bulunan krom karbürlerin etkisiyle çok yüksek sertliğe ve aşınma direncine sahiptirler. Mikroyapıda genellikle iki çeşit karbür bulunur; süreksiz ötektik karbürler ve ikincil karbürler. Çizelge 4.12’de sertlikleri bileşime göre değişen karbürlerin sertlikleri verilmiştir [3, 9, 10].

Çizelge 4.12. Yüksek krom–molibdenli beyaz dökme demirlerde mikroyapıda bulunan karbürlerin sertlikleri [3, 10]

KARBÜR TİPİ	SEERTLİK (HV)
M ₃ C	840-1100
M ₇ C ₃	1200-1800
Mo ₂ C	1500

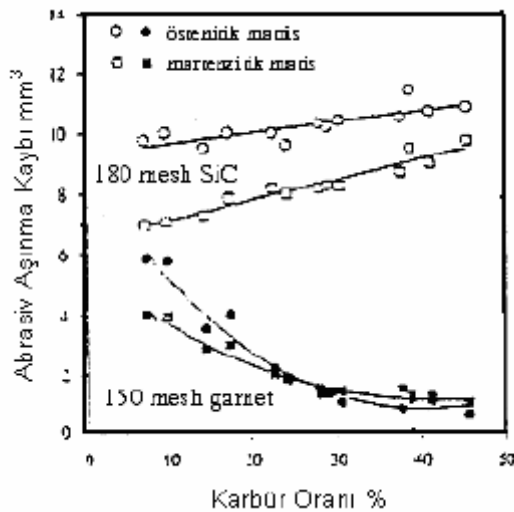
Karbürler mikroyapıda hacimce % 40-50 oranında bulunur, bunun dışında kalan kısım matristir. Oluşan bu karbürler demirdeki krom/karbon oranı ile belirlenir. Şekil

4.5’de krom/karbon oranının yapıdaki karbürlerle ilişkisi verilmiştir. Yapıdaki yüksek krom içeriği karbürleri kararlı hale getirir. Karbür oranı ile sertlik arasında doğru orantılı bir ilişki vardır. Karbür miktarındaki artış ile sertliğin arttığı görülmüştür [17].



Şekil 4.5. Krom/Karbon oranı arasındaki ilişki [1]

Karbür oranı azaldıkça ağırlık kaybı artar. Ancak burada aşındırıcı parçacıkların büyüklüğü ile matrisin yapısı çok önemli bir etkidir [1]. Karbür oranının abrasiv aşınma kaybına etkisi Şekil 4.6’da görülmektedir.

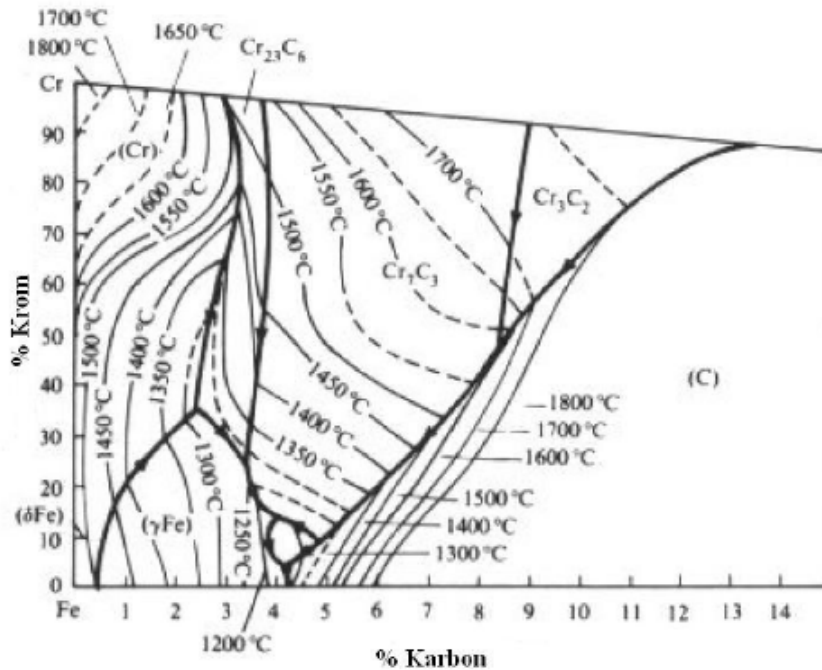


Şekil 4.6. Karbür oranının abrasif aşınma kaybına etkisi [3].

Alaşımlı beyaz dökme demirlerin mükemmel aşınma dirençleri içerdikleri sert karbürlerden kaynaklanmaktadır. Bu alaşımların aşınma dirençleri ve kırılma tokluğu

sert karbürlerin hacim oranları, dağılım, boyut, tip ve morfolojisi ile dentritik ve ötektik matris yapısına bağlıdır. Aşınma direnci için kullanılan dökme demirlerin çoğunluğu ötektikaltı ve birincil östenit fazında bulunurlar. Katılaşmaları birincil östenitin çekirdeklenmesi ve büyümesini takiben östenit ve karbürli ötektik yapıya dönüşmesi şeklinde gerçekleşir [9].

Ötektik karbür, % 6 krom içeriğinin altında, sürekli ledebürit ötektik olarak büyüyen M_3C den oluşur. Ötektik M_3C karbürler sürekli yapıları nedeniyle sınırlı kırılma dayanımına sahiptirler. Bu yüzden sadece darbe içermeyen, düşük kuvvetli mekanik aşınma uygulamalarında tercih edilirler. Krom miktarı % 8-10 arasındaki dökme demirlerde daha az sürekli dubleks ötektik karbürler oluşur. Bu karbürler M_3C karbür katmanları tarafından çevrelenmiş M_7C_3 yapısındadır. Bu sayede aşınma dayanımı artar. Yapıda daha az irilikte ve lifli M_7C_3 karbürlerin meydana gelmesi için krom miktarı % 12'nin üzerinde olmalıdır. M_7C_3 'ün daha yüksek sertliği ve süreksiz olan yapısı nedeniyle yüksek kromlu alaşımlarda daha fazla aşınma ve darbe direnci sağlanır [1]. Fe-Cr-C denge diyagramı Şekil 4.7'de verilmiştir.



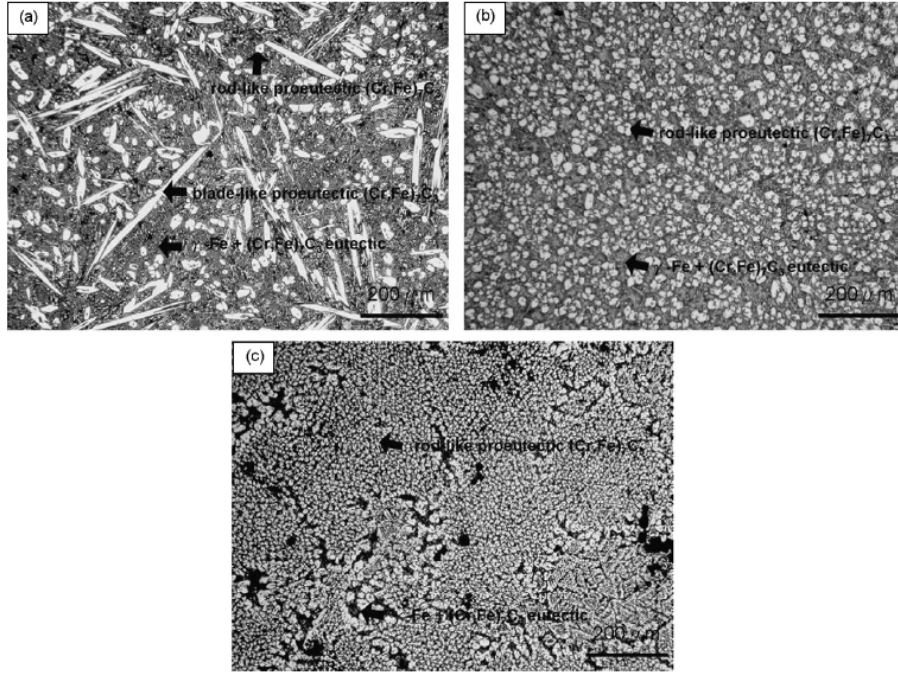
Şekil 4.7. Fe-Cr-C denge diyagramı [1]

Çizelge 4.13'de kimyasal kompozisyonu verilen ASTM 36 çelik plakanın yüzeyi 3

farklı karbon içeriğine sahip Fe-Cr-C kaplama malzemeleri ile kaplanarak karbonun mikroyapı üzerindeki etkileri incelenmiştir [4]. Yüksek alt soğumanın neden olduğu birincil faz oluşumundan dolayı karbon içeriği arttıkça $(Cr,Fe)_7C_3$ karbürlerinin arttığı ve yüksek alt soğuma ile artan çekirdeklenme hızından kaynaklanan karbür boyutlarında azalma saptanmıştır. Artan karbon içeriğiyle uzun sütunsal karbürlerin Şekil 4.8’de görüldüğü üzere yuvarlağımsı karbürlere dönüştüğü ve %4,85 C oranında aşınma dayanımının en yüksek olduğu belirtilmiştir. Aşınma dayanımındaki bu gelişmenin yuvarlağımsı şekildeki karbürlerin sahip olduğu yüksek sertlikten kaynaklandığı düşünülmüştür [4, 33].

Çizelge 4.13. Ana metal ve kaplama malzemelerinin kimyasal kompozisyonları [4]

	%C	%Si	%Mn	%Cr
Ana metal	0,18	0,15	0,55	0,09
Kaplama A	3,73	2,28	2,33	26,70
Kaplama B	4,21	2,00	2,26	27,08
Kaplama C	4,85	1,96	2,28	27,31



Şekil 4.8. Fe-Cr-C kaplama a)%C: 3,73 b)%C: 4,21 c) %C: 4,85 [33]

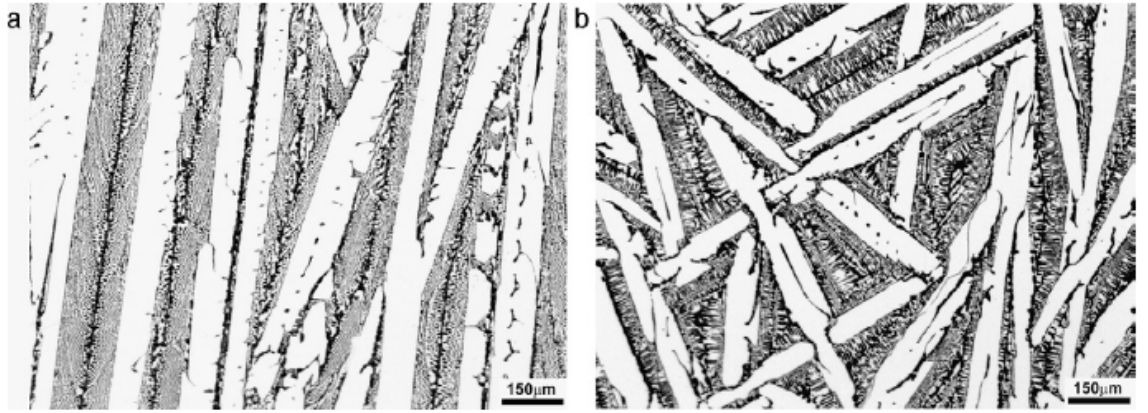
Araştırmacıların, ASTM A532-87 sınıf M yüksek kromlu beyaz dökme demirin tek

yönlü katılaşma şartları altında (ergime sıcaklık gradyanı 0,45-0,9°C/mm ve katılaşma sıcaklık gradyanı 4,3-6,2 °C/mm) matris ve M_7C_3 karbürünün gelişme karakteristliğinin incelenmesi üzerine yaptıkları çalışmada, çil bölgesinden uzaklaştıkça birincil karbürlerin daha kaba yapıya sahip olduklarını ve ötektik karbür grupları arasındaki mesafenin arttığını tespit etmişlerdir [34].

Kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.14’de verilen beyaz dökme demirde karbür oryantasyonu ve uygulanan yükün aşınma dayanımı üzerindeki etkilerinin incelendiği diğer bir çalışmada, çapraz ve boyuna yönlenmiş karbürlerin kırılma tokluk özelliklerinin birbirine benzer olduğu vurgulanmıştır (Şekil 4.9) [35].

Çizelge 4.14. Beyaz dökme demirin kimyasal kompozisyonu [35]

%C	%Cr	%Si	%Mn	%S
5,13	7,39	0,22	0,47	0,008



Şekil 4.9. Karbür oryantasyonu a) boylamsal b) çapraz [35]

4.3. Isı Direnci

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin mükemmel ısı direnci, yüzeyde oluşan ve oksitlenmenin ilerlemesini azaltan oksit tabakası ve demir-krom karbürlerin yüksek sıcaklıklarda bile bozulmayan kararlılığından kaynaklanmaktadır. Araştırmacılar, yüksek kromlu beyaz dökme demir döküm parçalarda krom miktarı arttıkça çalışma sıcaklığının da arttığını belirtmişlerdir; %12 Cr 840 - 850 °C, %15-17 Cr 900 °C,

%25 Cr 980 °C ve %33 Cr 1050 °C sıcaklıkta çalışma imkanı vermektedir [3, 10].

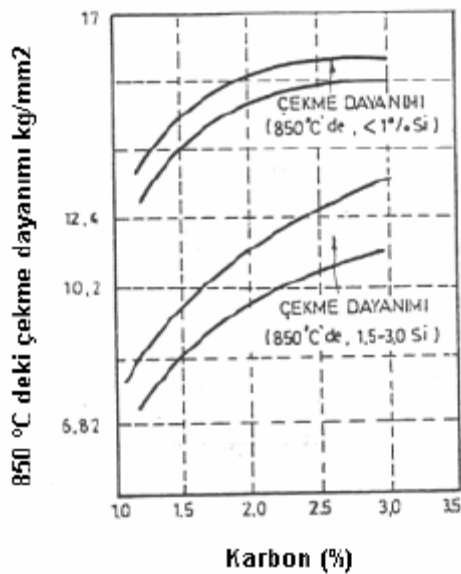
4.4. Çekme Dayanımı

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin çekme dayanımı içerdikleri krom ve karbon miktarına göre değişmektedir, Çizelge 4.15 ve Şekil 4.10. Krom ve karbon miktarı arttıkça çekme dayanımı artar. Çünkü krom ve karbon miktarındaki artış aynı zamanda karbür hacim oranını artıracaktır. Bununla birlikte yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbür inceltme işlemi çekme dayanımını iyileştirir [10].

Çizelge 4.15. Yüksek kromlu beyaz dökme demirde farklı Cr oranlarında çekme dayanım değerleri [10]

Cr oranı (%)	Çekme Dayanımı (MPa)
17	160-260
25	140-230
33	180-210

%30 Cr içeren alaşım döküm halinde 230MPa çekme dayanımı sergilerken inceltme işlemi ile 28 kg/mm²'ye kadar çıkmıştır [10].



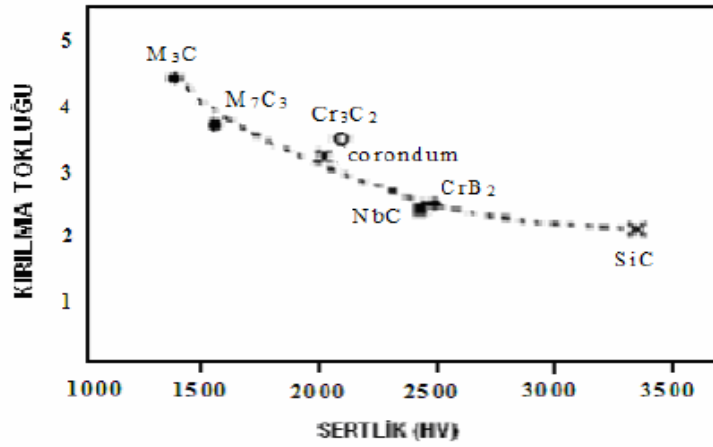
Şekil 4.10. %17-18 Cr içeren demirlerde karbon oranının yüksek sıcaklıklarda çekme dayanımına olan etkisi [10]

4.5. Darbe Dayanımı

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde darbe dayanımı esas olarak karbürlerin hacim oranları, boyut, morfoloji, yönlenme, dağılım ve karbürler arasındaki mesafe vb. parametrelere bağlıdır. Diğer taraftan yüksek aşınma direnci için karbür hacim oranlarının artırılması gerekir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde darbe dayanımının iyileştirilmesi için yapılan çalışmalar daha çok yapıdaki karbür oranı ve boyutunun azaltılması, karbürler arası mesafenin artırılması ve karbür şeklinin yuvarlaklaştırılması üzerine odaklanmıştır.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde darbe testi çok şey ifade etmemektedir. Çünkü darbe enerjisi sürtünme ve kırılma esnasındaki parçaların ayrılması ile açığa çıkan enerjiye eşdeğerdir. Ancak Amerika dökümcüler birliği özel demir komitesi, hazırladıkları büyük boyuttaki (50x50x180mm) (5-D) darbe çubuklarının darbe direncinin tayininde başarılı sonuçlar verdiğini ve bu çubuklar kullanılarak farklı ısıtma işlemli, farklı karbür yüzdesine sahip ve farklı matristeki dökme demirlerin darbe dirençlerini iyi bir şekilde tespit edildiğini savunmuşlardır [10].

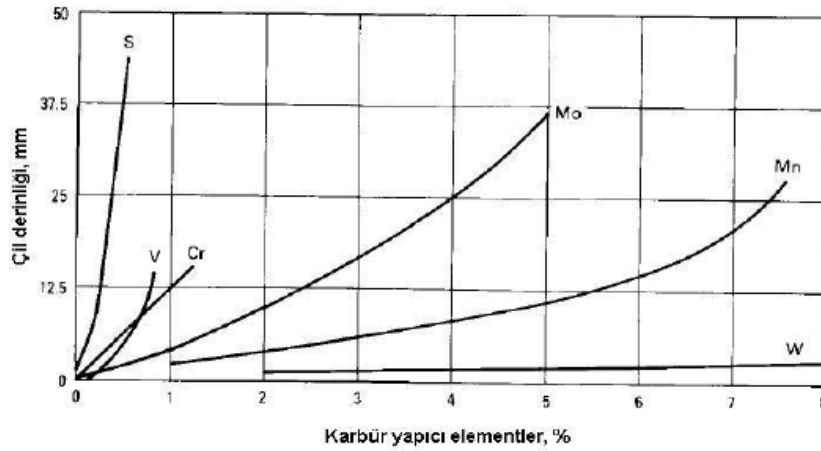
Tokluk özellikle kırma ve öğütme işlemlerinde kazaları önleyici bir faktör olduğundan çok önemlidir. Son yıllarda kırılma tokluğu ölçümü yüksek kromlu beyaz dökme demirlere başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Karbon artışı ile martensitik beyaz dökme demirlerin kırılma tokluğu azalır. Ayrıca yapı içerisindeki karbür çeşidi de kırılma tokluğuna etki eden faktörlerden biridir. Sertlik ve kırılma tokluğu arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Sekil 4.11’de bazı karbür çeşitlerinin sertliğe bağlı kırılma toklukları verilmiştir.



Şekil 4.11. Bazı karbürlerin sertlik ve kırılma toklukları arasındaki ilişki [10]

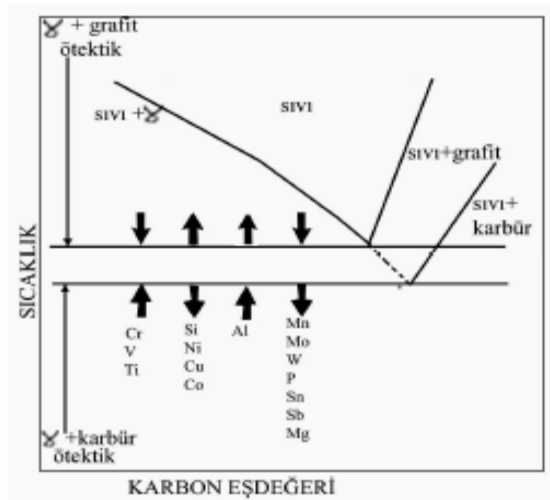
4.6. Alaşım Elementlerinin Özelliklere Etkisi

Birçok dökme demir tipinde alaşım elementlerinin özelliklere etkisi oldukça fazladır. Özellikle grafit ve karbürlerin miktar ve şekilleri alaşım elementleri ile doğrudan ilgilidir. C:Cr oranı sertleşebilirlik için çok önemlidir. Mo, Ni ve/veya Cu ilavesi sertleşebilirliği artırır. Mn düşük maliyetle sertleşebilirliği artırmakta ancak farklı kesitlere sahip döküm parçalarda düzensiz sertlik dağılımlarına ve kalıntı östenit oluşumuna neden olmaktadır. Kalın kesitli parçaların üretiminde, dökümlerin havada soğutma şartlarında iyi bir sertleşebilirlik sağlamak amacıyla Cu, Ni ve Mo gibi ek alaşım elementleri ilavelerine ihtiyaç duyulur. Genel olarak çok düşük miktarlarda alaşım elementi ilavesi ile çil derinliğinin arttırılması daha yüksek sertlik ve mukavemet için yeterlidir. Şekil 4.12'de çeşitli karbür yapıcı elementlerin çil derinliğine olan etkisi görülmektedir [1, 9, 32].



Şekil 4.12. Çeşitli karbür yapıcı elementlerin çil derinliğine olan etkisi [2]

Alaşım elementleri grafitin ve karbürlerin şekil ve hacim oranını önemli derecede etkiler [2]. Çil derinliği ve dökme demirin beyazlaşma eğiliminin büyük oranda karbon eşdeğeri ve karbon – silisyum oranına bağlı olarak değişmesi verilebilecek en iyi örneklerden birisidir. Mn, Cr, Mo, Ni ve V gibi alaşım elementleri ise temel eğilimi yönlendirmek için ilave edilmektedir (Şekil 4.13). Beyaz dökme demirlerde optimum kimyasal bileşim ayarlaması malzemeden beklenen özellikler, maliyet, ısıl işlem, parça boyutu ve kompleksliği gibi parametreler dikkate alınarak yapılır. Beyaz dökme demirlerde istenen mikro yapı ve aşınma direncini sağlayabilmek için C, Mn, Si, Cr, Mo, Ni ve V gibi alaşım elementleri uygun kombinasyonlar şeklinde ilave edilirler [9, 10].



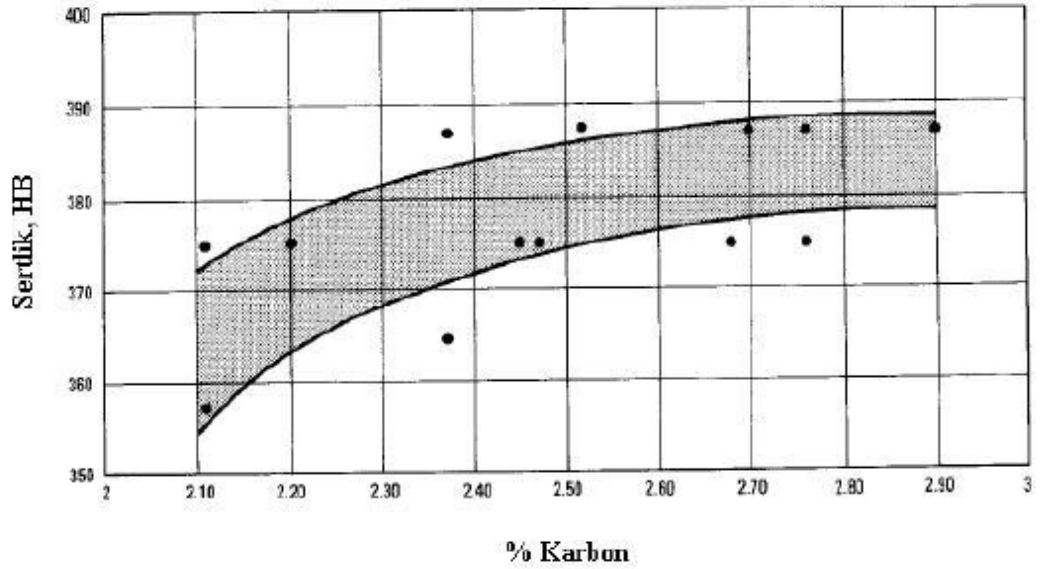
Şekil 4.13. Grafit ve karbür ötektik sıcaklıkları üzerine alaşım elementlerinin etkisi [1, 10]

Cr, V ve Ti' un miktarındaki artış ile karbür ötektiği yukarı, grafit ötektiği aşağı doğru hareket eder. Böylece Cr, V ve Ti alaşım elementlerinin ilavesi karbür oluşumunu teşvik eder fakat grafit oluşumunu engeller (Şekil 4.13).

4.6.1. Karbon

Karbon beyaz dökme demirin sertliğini artırır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbür oluşumu en önemli etkindir. Beyaz dökme demirde karbon artışı kırılganlığı artırır ve özellikle mukavemeti düşürür. Diğer alaşım elementlerinin sabit tutulduğu alaşımda karbon artışı, sertliği arttırdığı için aşınma direncini de arttırmaktadır [10].

Değişen karbon içeriğinin düşük karbonlu beyaz dökme demirin sertliğine etkisi Şekil 4.14'de gösterilmiştir. Buna göre düşük karbonlu ($\sim 2,5$ C) beyaz dökme demirlerin sertliği yaklaşık 375 HB (40 HRC) iken yüksek karbonlu ($> 3,5$ C) beyaz dökme demirlerin sertliği yaklaşık 600 HB (57 HRC) dir [2].

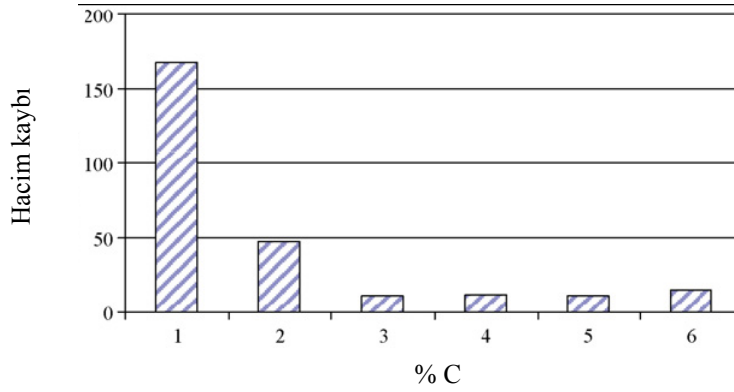


Şekil 4.14. Düşük karbonlu beyaz dökme demirin sertliğine karbonun etkisi [2]

Beyaz dökme demirde karbon, kırılganlığı artırır. Eğer silisyum içeriği yüksek ise karbon katılaşma sırasında grafit oluşum eğilimini artırır. Bu nedenle yüksek

karbonlu beyaz dökme demirlerde silisyum içeriğini % 1'in altında tutmak çok önemlidir [2].

% 30 Cr, % 1-6 C, % 2 Mn, % 0,5 Si kimyasal kompozisyona sahip yüksek kromlu beyaz dökme demirin aşınma dayanımı üzerine yapılan araştırmada, farklı karbon içeriklerinin abrasiv aşınma dayanımına etkisi Şekil 4.15'de özetlenmiştir [33].

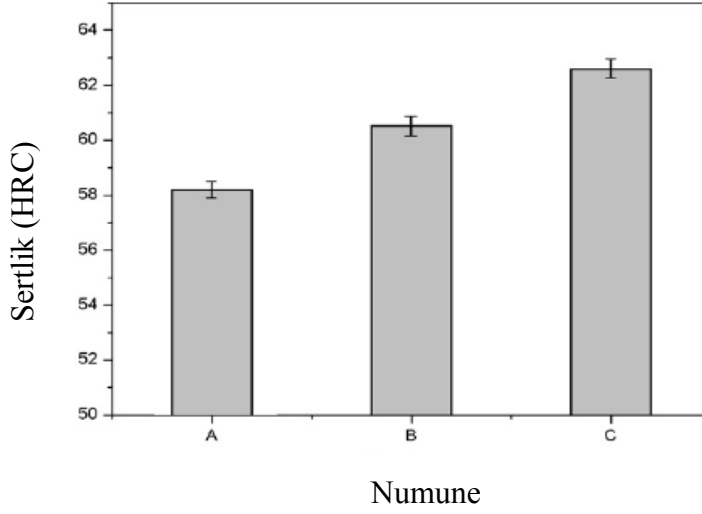


Şekil 4.15. Karbon oranı ve aşınma direnci arasındaki ilişki [33]

Çizelge 4.16'da kimyasal kompozisyonu verilen metalin üzerine 3 farklı kaplama malzemesi kullanılarak karbonun sertlik üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 4.16'da kaplama metalindeki karbon içeriği arttıkça sertliğin arttığı gözlenmektedir [4].

Çizelge 4.16. Ana metal ve kaplama malzemelerinin kimyasal kompozisyonları [4]

	%C	%Si	%Mn	%Cr
Ana metal	0,18	0,15	0,55	0,09
Kaplama A	3,73	2,28	2,33	26,70
Kaplama B	4,21	2,00	2,26	27,08
Kaplama C	4,85	1,96	2,28	27,31



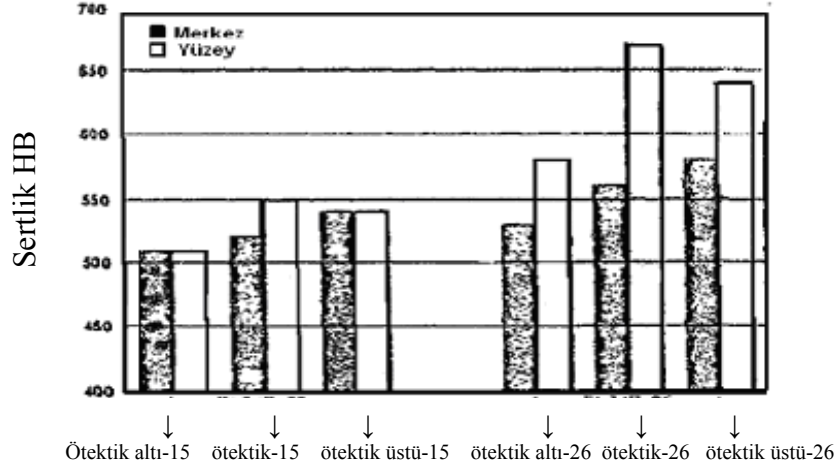
Şekil 4.16. Farklı C içeriğine sahip Fe-Cr-C kaplamalarına ait sertlik değerleri [4]

4.6.2. Krom

Kromun dökme demirlerde üç ana kullanım amacı vardır;

1. Karbür yapıcı olarak
 2. Korozyon direnci sağlamak için
 3. Yüksek sıcaklık uygulamalarında yapıyı kararlı hale getirmek için
- Düşük seviyelerdeki krom ilavesinin (% 2- % 3) sertleştirme etkisi çok azdır ya da hiç yoktur. Bunun sebebi kromun büyük çoğunluğunun karbürler içinde bağlanmasıdır. Düşük krom miktarlarında, matris de M_3C karbürleri oluşur. Beyaz dökme demirde yüksek krom miktarı ($> \% 10$) yapıda kararlı M_7C_3 karbürleri oluşturur. Katılaşma karakteristikleri sebebiyle M_7C_3 karbürleri içeren ötektik altı demirler, M_3C karbürleri içeren demirlere oranla daha yüksek mukavemetli ve daha tokurlar [2, 37].

Krom aynı zamanda beyaz dökme demirin korozyon direncini de artırır. % 12 – 22 Cr içeren beyaz dökme demirlerin martensitik yapıda en iyi aşınma direncini gösteren alaşım olduğu bilinmektedir. Cr miktarındaki artış ile sertliğin de arttığı Şekil 4.17’ de görülmektedir. En büyük sertlik farkını (yaklaşık 110HB) %26 Cr içeren ötektik yapıli beyaz dökme demir sergilemiştir [3, 10].



Şekil 4.17. Sertlik ölçümünün yeri ve Cr miktarına bağlı olarak sertlikteki değişim [10]

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde krom yalnız başına kullanıldığında perlit oluşumunu önleyemediğinden, yeterli sertleşebilirliği sağlayabilmek için Mn, Ni, Mo gibi elementler ile birlikte kullanılır.

Yüksek karbonlu (%2,75 C, %17,75 Cr) beyaz dökme demirin yüksek krom karbür hacim oranı ile yüksek dayanım ve düşük akışkanlık gösterdiği, ayrıca yüksek karbonlu beyaz dökme demirin, düşük karbonlu (%1,40 C, %12,50 Cr) beyaz dökme demire göre daha fazla aşınma direnci gösterdiği belirtilmiştir. Düşük karbonlu ve özel yüksek karbonlu beyaz dökme demir 500 ve 600°C sıcaklıkta oksitlenmektedirler. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin oksitlenmeye karşı gösterdikleri mükemmel direnç içerdikleri yüksek kromdan kaynaklanmaktadır [5].

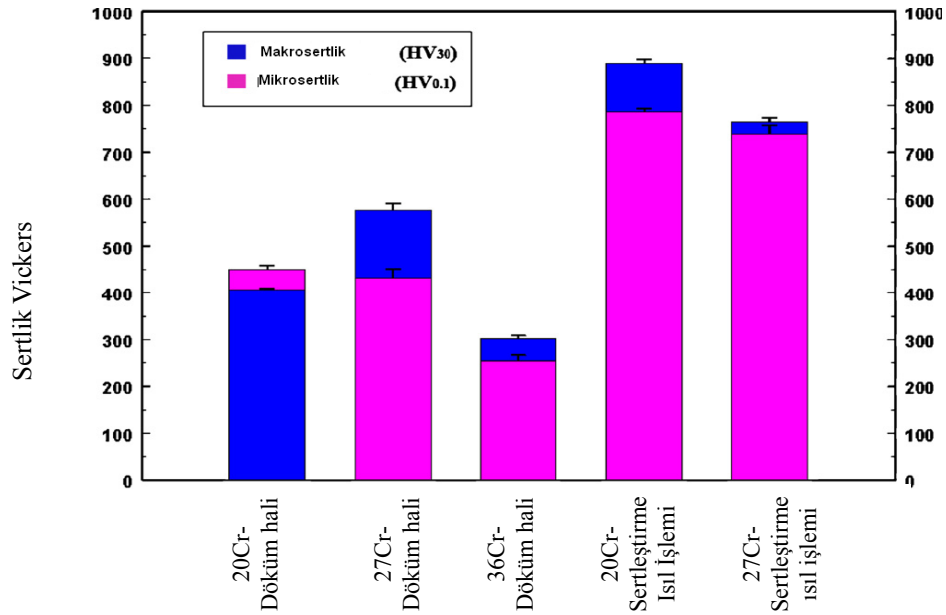
Ribeiroa ve arkadaşları [38], %13 ve % 19 Cr ihtiva eden 2 farklı yüksek kromlu beyaz dökme demir ve %0,6 Cr içeren sfero dökme demirin aşınma davranışlarının incelenmesi üzerine yaptıkları çalışmada, kromca zengin ve sert karbür hacim oranına sahip mikroyapıdan dolayı en iyi aşınma direncine %19 Cr içeren beyaz dökme demirin sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Sfero dökme demirin, çil bölgelerinde iyi aşınma performansları nedeniyle korozyonun önemli olmadığı aşınma dayanımı gereken uygulamalarda maliyet dikkate alınarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir [38].

Wiengmoon ve arkadaşları, Çizelge 4.17’de kimyasal bileşimleri verilen %20, %27 ve %36 Cr içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde mikroyapı, sertlik ve korozyon direnci arasındaki ilişkileri incelemişlerdir. Çalışmalarında, %36 krom içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirin en iyi korozyon direnci gösterdiğini tespit etmişlerdir [39].

Çizelge 4.17. %20, %27 ve %36 Cr içeren beyaz dökme demirlerin kimyasal bileşimleri [39]

Alaşımlar	%C	%Cr	%Si	%Mn	%S	%P	%Ni	%Cu	Cr/C oranı
20Cr	3	20,40	0,66	0,26	0,034	0,047	0,15	0,23	6,80
27Cr	2,72	26,60	0,78	0,25	0,025	0,043	0,16	0,22	9,78
36Cr	2,13	36	0,75	0,14	0,022	0,041	0,17	0,20	16,90

Şekil 4.18’de %20, %27 ve %36 Cr içeren beyaz dökme demirlerin sertlik değerleri verilmiştir.



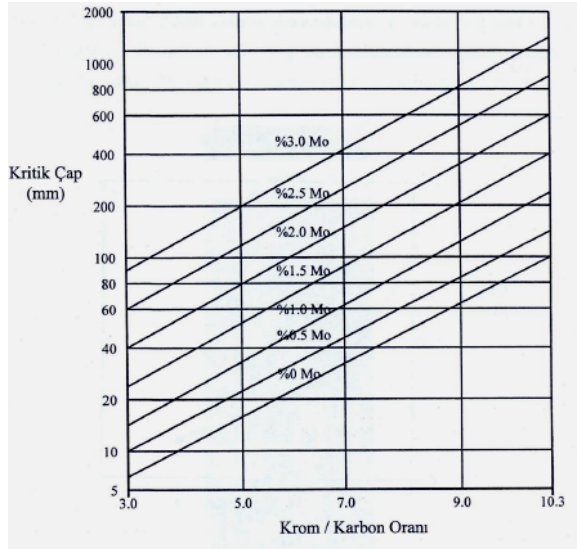
Şekil 4.18. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin sertlik değerleri [39]

4.6.3. Molibden

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlere molibdenin %3,5’a kadar ilave edilmesi aşınma direncini iyileştirir. Molibdenin diğer bir avantajı ise östenitleme sıcaklığını

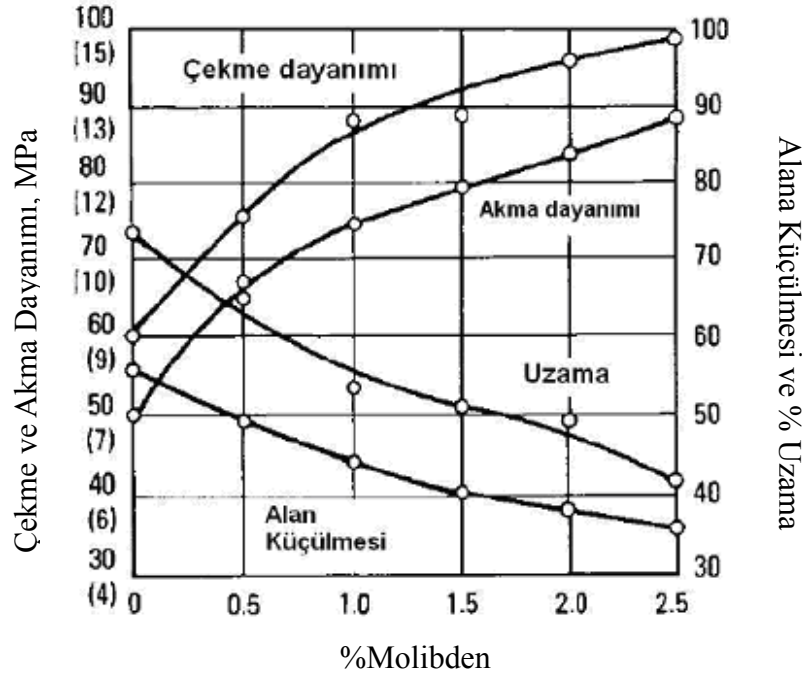
düşürerek ısı işlemleri daha da kolaylaştırmasıdır. Martensitik beyaz dökme demirlerde %0,5 – 3 Mo perlit oluşumunu engeller. %12 – 18 Cr'lu beyaz dökme demirlerde, %1–4 Mo kullanımı yavaş soğuyan kalın kesitlerde dahi perlit oluşumunu önleyebilmektedir. % 0,5 – 3 Mo ile birlikte Cu, Ni, Cr veya Ni ve Cr'un birlikte ilavesi diğer yüksek sıcaklık dönüşümlerine müsaade etmez.

Molibdenin Cu, Ni ve Mn'a göre üstün olan en önemli özelliği ise kalıntı östenite neden olmadan sertleşebilirliği arttırmasıdır. Mo, aynı zamanda beyaz dökme demirin aşınma direncini de arttırmaktadır. Şekil 4.19'da farklı miktarlarda molibdenin yüksek-kromlu beyaz dökme demirlerin sertleşebilirliğine olan etkisi görülmektedir. Bu sertleşebilirlik havada sertleştirme için kritik çap olarak ölçülmüştür. [2, 9, 12]



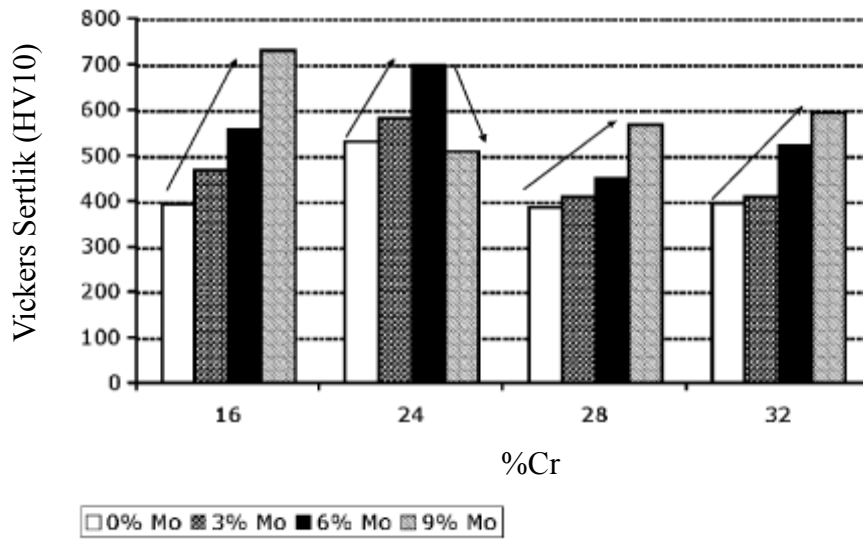
Şekil 4.19. Molibdenin beyaz dökme demirin sertleşebilirliğine olan etkisi [9]

Molibdenin perlit oluşumunu engelleyici özelliği sayesinde yüksek kromlu dökme demirlerde büyük avantaj sağlar. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde (%12 - %18 Cr) aşınma direncini arttırmak için kullanılır. %1-4 molibden ilavesi, dökümler yavaş soğutulsa dahi perlit oluşumunu engellemede çok etkilidir. Şekil 4.20'de molibdenin çekme özelliklerine etkisi verilmiştir [2].



Şekil 4.20. Molibdenin beyaz dökme demirin çekme dayanımı üzerindeki etkisi [2]

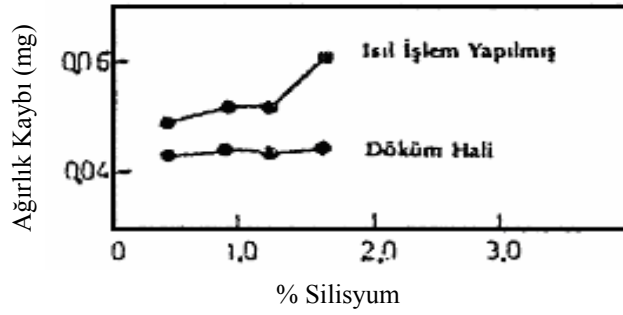
Scandian ve arkadaşlarının [40] molibden ve kromun yüksek kromlu beyaz dökme demirin mikroyapı ve aşınma davranışları üzerindeki etkisini araştırdıkları çalışmada, %16-32 aralığında krom ötektik M_7C_3 karbürlerin, %3 ten fazla Mo ilavesi ise yeni karbürlerin (M_2C , M_6C) oluşumlarını sağladığını belirtmişlerdir. Farklı Mo ilavelerinin sertlik üzerindeki etkisini Şekil 4.21'de göstermişlerdir [40].



Şekil 4.21. Farklı Cr ve Mo içerikleri ve sertlik değerleri [40]

4.6.4. Silisyum

Silisyum yüksek kromlu dökme demirlere %1 ile %3 arasında değişen oranlarda ilave edilir. Silisyum miktarı, demirin uygulama alanı ile silisyumun temel etkisi göz önünde bulundurularak hesaplanır. Silisyum yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin sertleşebilirliğinde olumsuz rol oynar. Silisyum oranı arttıkça ısıtılma işlem görmüş beyaz dökme demirin aşınma direnci azalır (Şekil 4.22) [2, 10].



Şekil 4.22. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde Si' un aşınma direncine etkisi [10]

Mikro yapıda yeterli oranda Mn, Ni, Mo ve Cr gibi perlit oluşumunu önleyen elementler mevcut ise silisyum artışı ile Ms sıcaklığı yükselir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde mikro yapıda karbür yapısını değiştiren silisyum içeriği %0,4 – 0,9 arasında olmalıdır. Silisyum mikro yapıda karbür çekirdeklerini artırarak süreksiz ince taneli bloklar veya çubuklar haline karbürlerin oluşmasını sağlar. Bunun sonucunda karbürler arası mesafenin azalması matrisi aşınmadan koruyarak aşınma direncini artırır. Yeterli derecede silisyum içeriği tokluğu %30 arttırır. Ancak fazla miktarda silisyum ilavesi perlit oluşma ihtimalini yükseltip matrisi zayıflatır. Bundan dolayı darbe direnci ile birlikte aşınma direnci de düşer [2].

Zhi ve arkadaşları [41], %20 Cr içeren beyaz dökme demire Fe-Si ve alüminyum gibi elementlerin ilavesi ve yüzeyde çil uygulaması ile ince karbür miktarında artışın elde edildiğini belirtmişlerdir.

Diğer bir araştırmada [42] farklı oranlarda Si (%0,723-4,5) ve Cr (%2,0-8,0) elementlerinin Cr-Si-Mn beyaz dökme demirin mikroyapı ve özelliklerine etkisi

incelenmiştir. Araştırmacılar, Si ve Cr miktarının artması ile mikroyapıda örgü yapısındaki karbürlerin, yüksek kromlu dökme demirlerdeki karbürlerde görülen kasımpatı şeklini aldığı ve karbür oranının arttığını belirtmişlerdir. Si ve Cr içeriğinin artması ile karbür ve matris sertliğinde meydana gelen artışın martensit ve beynit içeren matris yapıdan kaynaklandığını vurgulamışlardır.

4.6.5. Bakır

Bakır yüksek kromlu beyaz dökme demirlere perlit oluşumunun önlenmesi için ilave edilir. Bakırın östenit fazında çözünürlüğü kısıtlı olduğundan, kullanımı %2,5 ile sınırlandırılır. Bakır genelde molibden ile birlikte kullanılır. Maksimum %1,2 veya daha az bakır %0,5 – 2 molibden ile birlikte kullanıldığında perlit oluşumunu önler. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde %2 molibden ile birlikte %1 bakır ilavesinin sağladığı sertleşebilirlik, sadece %3 molibden ilavesi ile elde edilen sertleşebilirlikten daha fazladır [1, 2, 10].

Martensitik yüksek kromlu dökme demirlerde bakır miktarı %1,2 ile sınırlandırılmıştır, daha yüksek oranda bakır ilavesi kalıntı östenit oluşumuna neden olabilir. Bakır, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılacak bazı özel yüksek nikelli gri dökme demirlerde %3-10 arasında ilave edilir. Bakır bu tip malzemelerde korozyon direncini özellikle oksidasyona olan direnci artırır [2].

Bakırın döküm halinde ve destabilizasyon uygulanmış Cr-Mn beyaz dökme demirde korozyon direncine etkisini araştıran Chakrabarty [39] mükemmel aşınma direncine sahip Ni-Cr veya yüksek kromlu beyaz dökme demirlere yakın alaşım elde etmeyi planlanmıştır. %2,8 C, %1,7 Si ve %6 Cr içeren döküm halindeki beyaz dökme demire %5 Mn ve %3 Cu ilavesinin çoğunlukla östenitik matrisi geliştirdiği ve destabilizasyon işlemine maruz kalmış Cr-Mn beyaz dökme demire bakır ilavesinin korozyon direncini arttırdığı açıklanmıştır [43].

Döküm şartlarında kromlu beyaz dökme demirlerin aşınma dayanım performansına bağlı olarak kimyasal kompozisyonun optimize edilmesi ve bakır ilavesinin aşınma

dayanımı üzerindeki etkisinin incelendiği bir araştırmada, %5,5 Cr, %2 Si, %3 Mn ve %2 Cu kimyasal kompozisyona sahip beyaz dökme demirin en iyi aşınma dayanım değerleri ürettiği belirtilmiştir [44].

4.6.6. Fosfor

Fosfor yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin tokluğunu düşürür. Ayrıca fosfor özellikle kalın kesitli dökümlerde molibdenin sertleştirici etkisini elimine edebilmektedir. Bu sebeple yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde fosfor içeriği % 0,3'ün altında olmalıdır [2, 3, 10].

4.6.7. Kükürt

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde optimum aşınma direnci istendiği için kükürt miktarı maksimum %0,03 olmalıdır. Bu değer üzerinde mikroyapıda yer alan kükürt aşınma direncini olumsuz etkiler [3, 10].

4.6.8. Mangan

Mangan perlit oluşumunu önlemek için ilave edilir. Mn içeriği %0,7'nin altında olmalıdır. Beyaz dökme demirlerde Mn içeriği %1,5'i aştığı zaman tokluk, mukavemet ve aşınma direnci düşer [2].

4.6.9. Nikel

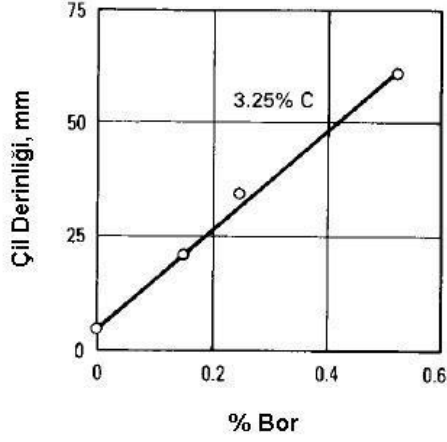
Aşınma dirençli demirlerde, nikel östeniti kararlı hale getirici etkisinden dolayı minimuma indirilebilir, fakat ısı dirençli demirlerde tokluğu iyileştirmek için ilave edilebilir [3, 10].

Nikel yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde (%12-28 Cr) perlit oluşumunun önlenmesi için ilave edilir. Nikel, molibden ile birlikte genellikle %0,2-1,5 arasında ilave edilir. Bu miktardan fazla nikel ilavesi aşırı östenit kararlaştırmaya meyilli bir

durum yaratır ki bu da kalıntı östenite yol açabilir. Büyük döküm parçalarında yavaş soğuma sebebi ile, martensitik yapının elde edilmesi için kimyasal bileşimin kontrolü çok önemlidir. Ticari Ni-Hard sınıfı dökme demirlerden biri olan Ni-Hard IV, (%1,0-2,2 Si, %5-7 Ni ve %7-11 Cr) döküm halinde, M_7C_3 ötektik karbürleri içeren bir martensitik yapıya sahiptir. Eğer yapıda kalıntı östenit bulunursa, alaşımın martensit miktarı ve sertliği, soğutma işlemleri veya havada yeniden östenitleme işlemi ile artırılabilir. Ni-Hard IV tipi dökme demirler iyi mukavemetleri, toklukları ve aşınma dirençleri sebebiyle genellikle pompa ve çimento hazırlama ekipmanlarında kullanılırlar [2].

4.6.10. Bor

Dökme demirlere bor ilavesinde ferro-bor master alaşımı kullanılır. Bor da silisyum gibi mikro yapıda karbür morfolojisi üzerinde etkilidir, ancak silisyumdan farklı olarak %0,02-0,1 arasındaki içeriklerde grafitleşmeyi önler. Bor mikro yapıda karbürleri inceltir ve sürekli iğneler şekline getirir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde %0,12 – 0,3 arasında bor içeriği karbürleri modife ederek aşınma direncini yaklaşık %20 artırır. Bu limitler arasında bor ilavesi ile darbe direnci de artar. Bor miktarının artması birincil karbürlerin oluşumunu teşvik ettiğinden bor ilavesi %0,57 oranıyla sınırlıdır. %28 Cr'lu beyaz dökme demirlerde bor ilavesi karbür miktarını arttırır, karbürleri daha sert yapar ve kabalaştırır ve döküm halinde martensit oluşumunu ilerleterek alaşımın tokluğunu düşürür [9,10,45,46]. Şekil 4.23'de bor miktarının % 3.25 karbonlu beyaz dökme demirin çil derinliğine olan etkisi görülmektedir [10].



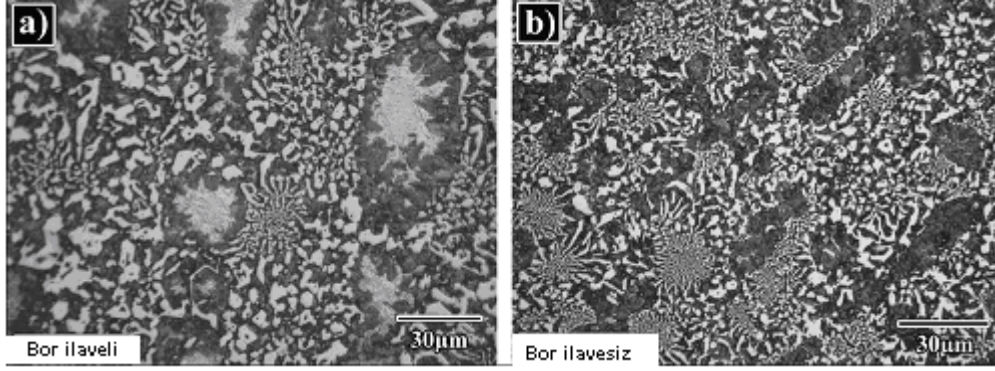
Şekil 4.23. Bor miktarının çil derinliğine etkisi [9].

%13 krom ve %2,3 karbon içeren beyaz dökme demire, %0,26, %0,39 ve %0,59 oranlarında bor ilave edilerek yapıdaki değişimlerin gözlemlendiği bir çalışmada [1, 9], her bir bor ihtivasında, alaşımın yapısında ötektik karbür hacminin arttığı ve aynı zamanda birincil faz hacminin azaldığı tespit edilmiştir. İlave olarak birincil fazda daha az dendrit oluşumu gözlemlendiği ve ötektik karbürlerin kabalaştığı vurgulanmıştır.

Li ve arkadaşları [47], beyaz dökme demire bor ilavesinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi üzerine yaptıkları araştırmada aşağıda verilen sonuçları elde etmişlerdir; Mikroyapıda oluşan boritler sayesinde aşınma dayanımı yüksek farklı türde beyaz dökme demir meydana gelmiştir. Ötektik borit morfolojisi yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde oluşan karbürlere benzerdir ancak boritlerin sertliği karbürlerden daha yüksektir. Döküm halinde martensit ve perlit olan matris östenitleme ve suda soğutma işlemlerinden sonra çoğunlukla “çita” tip martensite dönüşmüş fakat kalıntı ötektik boritler değişmemiştir. Bor takviyeli beyaz dökme demirin sertlik ve tokluğu beyaz dökme demir ve Ni-Hard beyaz dökme demirden daha iyidir.

%16Cr içeren beyaz dökme demire 195ppm bor ilavesinin mikroyapı ve aşınma davranışlarına etkisinin incelendiği diğer bir araştırmada [48], bor ilavesi ile mikroyapıda incelme (Şekil 4.24) ve aşınma direncinde %40 artış sağlandığı, matrisin östenitten martensite ve ikincil karbüre dönüşmesi ile aşınma direncinin

%20 arttığı, ve yüzeye paralel karbür yönlenmesinden dolayı matrisin karbür kırılmalarını geciktirdiği belirtilmiştir [48].



Şekil 4.24. %16 Cr içeren beyaz dökme demirin bor ilaveli ve bor ilavesiz mikroyapılar [48]

Zhongli Liu ve arkadaşları [49], %1,62 B, %0,32 C, %0,46 Si, %0,61 Mn, %10,85 Cr, %0,21 Cu içerikli beyaz dökme demirde mikroyapı ve mekanik özellikleri araştırmışlardır. Araştırmacılar, yüksek kromlu beyaz dökme demirin matris yapısından dolayı tokluk özelliğinin çok düşük ve bu nedenle kırılgan bir yapıya sahip olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek borlu beyaz dökme demirlerin sertliklerinin yüksek kromlu beyaz dökme demirlere eşdeğer olmakla birlikte çok daha iyi tokluk özellikleri sergiledikleri açıklanmıştır. Bu iki alaşımın farklı tokluk dayanımlarının yüksek kromlu beyaz dökme demirde yüksek karbonlu martensit matrisin, yüksek borlu beyaz dökme demirde ise düşük karbonlu martensit matrisin teşekkül etmelerinden kaynaklandığını düşünmüşlerdir. Bor ilaveli alaşımın mekanik özellikleri Çizelge 4.18’de verilmiştir.

Çizelge 4.18. %1,62 B, %0,32 C, %0,46 Si, %0,61 Mn, %10,85 Cr, %0,21Cu içerikli beyaz dökme demirin mekanik özellikleri [49]

Özellik	Mekanik değerler
Döküm –hali ile sertlik /HRC	54,5
Isıl işlem sonrası sertlik /HRC	50,5
Isıl işlem sonrası darbe tokluk dayanımı ($\text{MPa m}^{1/2}$)	12,5
Isıl işlem sonrası çatlak tokluk dayanımı (J cm^{-2})	32,1
Isıl işlem sonrası çekme dayanımı (MPa)	412

4.6.11. Niobyum

Nb dökme demirlerde kuvvetli bir karbür yapıcı elementtir. %0,01 – 0,5 oranında Nb'un dökme demirlerin mekanik özelliklerini ve aşınma direncini arttırdığı bilinmektedir. %15,6 – 27,7 Cr ve %2,9 – 3,2 C içeren dökme demirlere %3'e kadar Nb ilavesi aşınma direncini arttırabilir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbür inceltme etkisine de sahip olan Nb denge diyagramında ötektik noktayı sağa doğru kaydırır. Böylece ötektik veya ötektiğe yakın ötektik üstü alaşım ötektik altı alaşım formunda katılaşır ve bu sebeple yapı gevrek kaba taneli birincil karbür içermeksizin daha fazla karbon içerebilir [10].

Zhi ve arkadaşları [45], yaklaşık %4 C ve %20 Cr içeren yüksek kromlu beyaz dökme demire Nb ilavesinin, niobyum karbürlerini (NbC) oluşturduğunu ve M_7C_3 karbürlerinin boyutlarını incelterek izotropik şekil almalarını sağladığını belirtilmiştir. Ayrıca niobyum elementinin mikroyapıda inceltme etkisini nicelik olarak belirlemek için ortalama karbür çapları ölçülmüştür ve elde edilen değerler Çizelge 4.19'da verilmiştir.

Çizelge 4.19. Alaşımların kimyasal kompozisyonları ve yüzeyden 1.00mm altındaki karbürlerin ortalama çapları [45]

Numune	C	Cr	Nb	D(um)
1	4,0	20,0	0,0	10,5
2	3,97	19,87	0,5	9,3
3	3,97	19,70	1,0	8,6
4	3,90	19,50	1,5	5,8

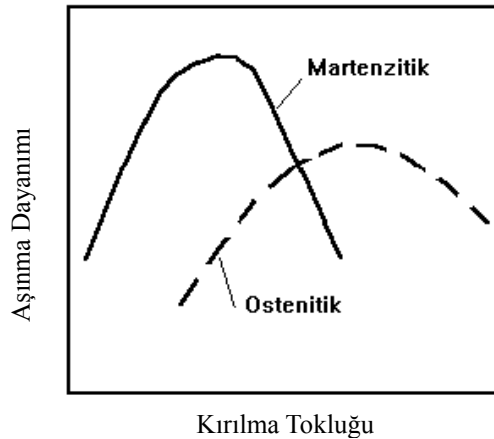
Yüksek borlu %15 Cr ve %2 Mo içeren beyaz dökme demirlerde mikroyapı ve mekanik özelliklerin incelendiği diğer bir araştırmada [50], kontrolü katılaşma ve %2 Nb ilavesi ile darbe dayanımında %114,3, aşınma dayanımında ise %28,8 artış sağlandığı belirtilmiştir. 260°C gibi düşük sıcaklıklarda yapılan temperleme ısıl işlemi ile elde edilen darbe ve aşınma değerlerinin, 500°C sıcaklıklardaki alt kritik temperleme ısıl işleminde elde edilen değerlerden daha iyi olduğu vurgulanmıştır.

4.6.12. Vanadyum

Vanadyum, mikro yapıda karbür oluşturunca element olarak yer alır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlere düşük miktarlarda (yaklaşık %0,5) vanadyum ilavesi vanadyumun krom karbürlerde yoğun olarak çözünüp krom karbürlerin gevrekliğini arttırmasından dolayı aşınma direncini düşürür. Vanadyumun %3'e kadar artması durumunda, vanadyum karbürlerin (VC) oluşması sebebiyle aşınma direncinde kısmi bir artış olabilir [2].

Vanadyum alaşımlı yüksek kromlu beyaz dökme demirin katılaşmasının incelendiği bir araştırmada [51], vanadyumun ötektik M_7C_3 karbür ve matris arasında dağıldığı. vanadyumum artışı ile likidus sıcaklığının düştüğü, ötektik sıcaklığının yükseldiği ve katılaşma sıcaklık aralığının azaldığı tespit edilmiştir. İlave olarak, faz hacim oranı değişerek birincil γ faz oranının düştüğü ve M_7C_3 karbür miktarının arttığı açıklanmıştır.

%15 Cr ve %1 Mo içeriğine sahip beyaz dökme demire %5 V ilavesi ile ısıtıl işlem uygulanan dökme demirlerin sahip olduğu yapıya benzer yapılar ve sertlik değerleri elde edilebilmektedir. V kalıpta soğuma sırasında ikincil vanadyum karbürlerinin çökmesini ve tokluğun yükselmesini sağlamaktadır. Farklı karbür oranına sahip östenitik ve martensitik dökme demirin kırılma tokluğu ve aşınma dayanımı Şekil 4.25'de verilmiştir [52].



Şekil 4.25. Östenitik ve martensitik dökme demirin kırılma tokluğu ve aşınma dayanımı arasındaki ilişki [52]

Fe-Cr-C sisteminde M_3C , M_3C_7 ve $M_{23}C_6$ karbürleri bulunur. Karbür yapıcı Mn, Mo ve V gibi elementler hem M_3C hemde M_3C_7 karbürleri içinde çözünebildiği gibi başka karbürlerin oluşmasına da neden olur [52].

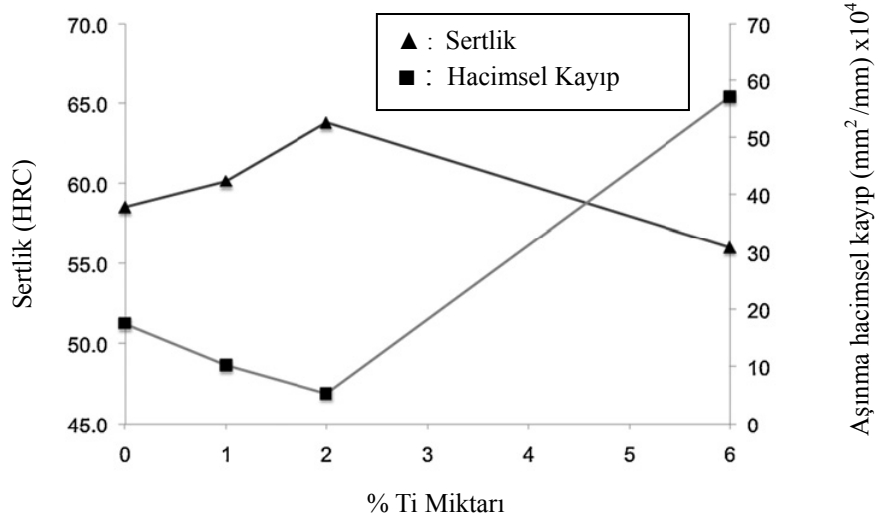
4.6.13. Titanyum

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde %0,03–0,3 arasındaki oranlarında titanyum ilavesi yapıdaki birincil ve ötektik karbürleri incelterek küreselleştirme eğilimi gösterir. Ti oranının artırılması ile yapıda TiC miktarı da artar. Yüksek sıcaklıklarda birincil ve ötektik karbürler olarak çekirdeklenmiş birçok ince TiC partikülü çökeler. Çekirdeklenme hızındaki artış serbest dentritik, çubuğumsu veya taç yaprağı şeklinde karbür büyümesini bastırarak mekanik özelliklerde, özellikle de toklukta iyileşme sağlar. Ti oranının artması ile ötektik karbür oranı düşer ve matrisin mikro sertliği ile dökümlerin yüzey sertliği artar [10, 21].

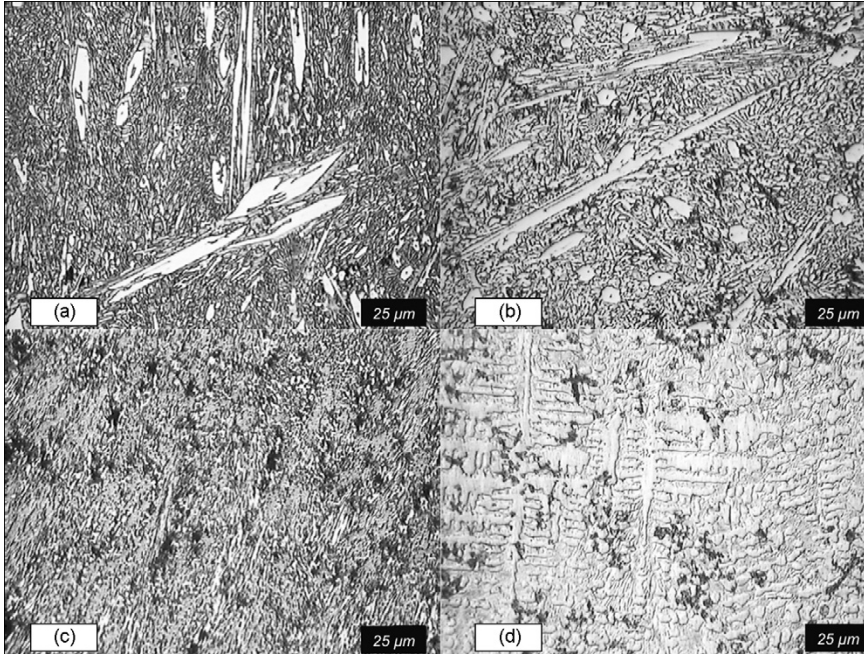
Bedolla ve arkadaşları [46], %16 Cr, %2,5 C içeren beyaz dökme demirde Ti ilavesi ile meydana gelen birincil TiC çökeltilerinin pro-ötektik östenit için çekirdeklenme etkisi göstererek mikroyapıda incelme sağladıklarını, sert ve küçük TiC partiküllerinin matriste bulunmasından dolayı mikro ve makro sertliğin ve aşınma direncinin arttığını ancak kırılma tokluğunun Ti miktarının artmasından çok fazla etkilenmediğini belirtmişlerdir.

Bedolla ve arkadaşlarının [53], %25 Cr ve %4 C içeren beyaz dökme demire % 1, 2, 6 oranlarında Ti ilavesinin mikroyapı ve aşınma direncine etkisi üzerine gerçekleştirdikleri araştırmada, %2 Ti ilavesinde ötektik mikroyapının incelendiğini, dağılmış titanyum karbürlerin (TiC) oluştuğunu, yüksek sertlik ve düşük aşınma kayıplarının meydana geldiğini vurgulamışlardır.

Şekil 4.26'da %25 Cr ve %4 C içeren beyaz dökme demirde farklı miktarlardaki Ti ilavesi, sertlik ve aşınma kayıpları arasındaki ilişki, Şekil 4.27'de ise Ti ilavesinin mikroyapıya etkisi verilmiştir [53].



Şekil 4.26. %25 Cr ve %4 C içeren beyaz dökme demirde farklı miktarlardaki Ti ilavesi, sertlik ve aşınma kayıpları arasındaki ilişki [53]



Şekil 4.27. %25 Cr ve %4 C içeren beyaz dökme demirde %Ti ilavesinin mikroyapıya etkisi a) %0 Ti, b) %1 Ti, c) %2 Ti, d) %6 Ti [53].

4.6.14. Nadir toprak elementleri

Seryum, lantan ve neodim gibi nadir toprak elementleri; %18 Cr içeren beyaz dökme demirlerin mikro yapı karakteristiklerini değiştirebilmekte ve mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Optimum (%0,13 – 0,26) seryum, lantan ve neodim içeren yüksek

kromlu beyaz dökme demirlerin aşınma direnci, nadir toprak elementi içermeyen temel alaşıma göre %10 daha iyidir. Ancak bu elementlerin ilavesi kırılma tokluğunda herhangi bir gelişme sağlamamıştır [10, 21].

Ötektik üstü beyaz dökme demirlere Ce ilavesi M_7C_3 birincil karbürlerini inceltmek küreselleştirir ve Ce_2O_2 birincil karbürlerinin oluşumunu sağlar [54].

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlere azot (%0,2) ilavesinin tane inceltme etkisi gösterdiği araştırmacılar tarafından doğrulanmıştır [10, 21].

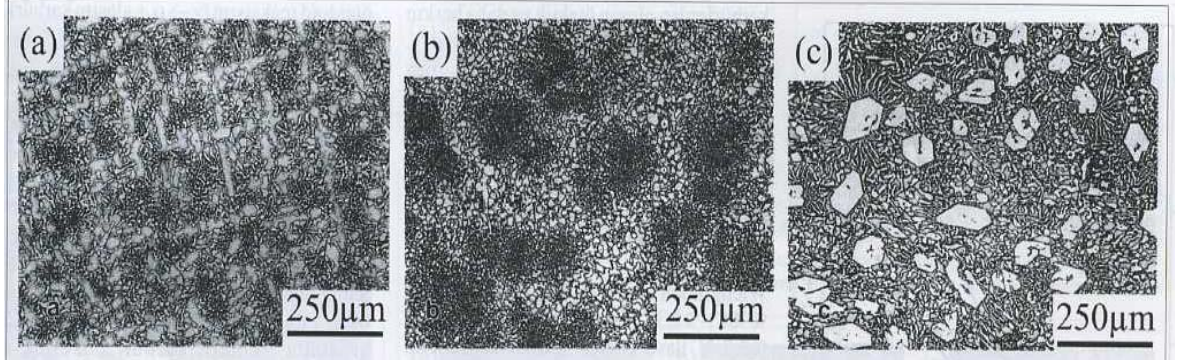
Li ve arkadaşlarının [55,56] WC-TiC-Co parikül takviyeli yüksek kromlu (%20 Cr) beyaz dökme demir kompozitlerin fabrikasyonu ve arayüzey özellikleri üzerine yaptıkları çalışmada partiküllerin, kompozit malzemedeki arayüzey bölgelerinde homojen şekilde dağıldığını ve 2000-3000 HV sertlik değerine sahip WC partiküllerinin sıvı metal tarafından ıslatabilirliğinin oldukça iyi olduğunu belirtmişlerdir.

%2,2 C, %20,2 Cr, %1,2 Mo, %0,8 Cu, %0,6 Si, %0,3 Ni, %0,5 Mn, %0,02 S, %0,02 P kimyasal kompozisyona sahip, WC takviyeli ve WC takviyesiz yüksek kromlu beyaz dökme demirden üretilmiş 9cm et kalınlığına sahip döküm parçaların servis şartlarında 4-5 ay süre ile aşınma davranışının incelendiği bir araştırmada, WC takviyeli dökümlerin et kalınlığında herhangi bir değişimin olmadığı ancak WC takviyesiz dökümlerde ise et kalınlığının aşınmadan dolayı 4cm azaldığı sonucuna varılmıştır [57].

4.7. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Isıl İşlemi

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde teşekkül eden M_7C_3 ötektik karbürleri düşük krom içerikli alaşımlı dökme demirlerde oluşan M_3C ötektik karbürlerine göre oldukça sert, kırılgan, aşınma dirençli ve düzensiz dağılıma sahiptir. Kromlu beyaz dökme demirlerde tokluk genel olarak karbon içeriğinin düşürülmesi, metal matris hacim oranının artırılması ile sağlanırken aşınma direnci karbür miktarının artırılması

ile iyileştirilmektedir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbon içeriğinin karbür fazının dağılımına ve şekline olan etkisi Şekil 4.28’de görülmektedir.



Şekil 4.28. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin bileşime göre mikroyapıları
a) Ötektik altı, b)Ötektik, c)Ötektik üstü [21]

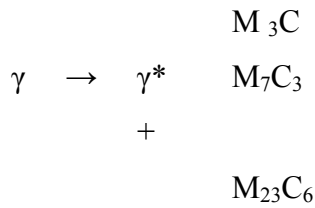
Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin özellikleri, alaşım kimyasal bileşimi yanında uygulanan ısıtma işlemlere de bağlı olarak şekillenmektedir. Kimyasal kompozisyon aynı kaldığı halde, farklı ısıtma işlemler, farklı özellikler sergilemektedir. Isıtma işlemlerin ilk amacı, yapıdaki östeniti destabilize etmektir. Böylece soğutma sırasında matris , martensite dönüşmektedir. Kritik sıcaklık altı ve sıfırlı soğutma işlemleri, matrisdeki östenit miktarını azaltmak amacıyla yapılmaktadır. Destabilizasyon ısıtma işlemi gibi yüksek sıcaklık işlemini takiben su verme ya da havada soğutma, dökümde kalıntı gerilmelerin oluşumuna neden olabilmektedir. Gerilme giderme ısıtma işlemini takiben hızlı soğutma; dökümde yeni gerilmeler oluşturabileceğinden yavaş soğutma tercih edilmektedir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbürler için küreselleştirme işlemi uygulanarak kırılma tokluğu artırılabilir [7].

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin ısıtma işlemi esnasında kırılma riskini ortadan kaldırmak için ısıtmanın ve soğutmanın kontrollü bir şekilde yapılması gerekir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlere uygulanan temel ısıtma işlemler destabilizasyon, kritik sıcaklık altı veya temperleme, sıfır altı soğutma işlemleri, küreselleştirme ve gerilme giderme ısıtma işlemlerinden oluşmaktadır [3].

4.7.1. Destabilizasyon (Östenitleme) ısı işlemi

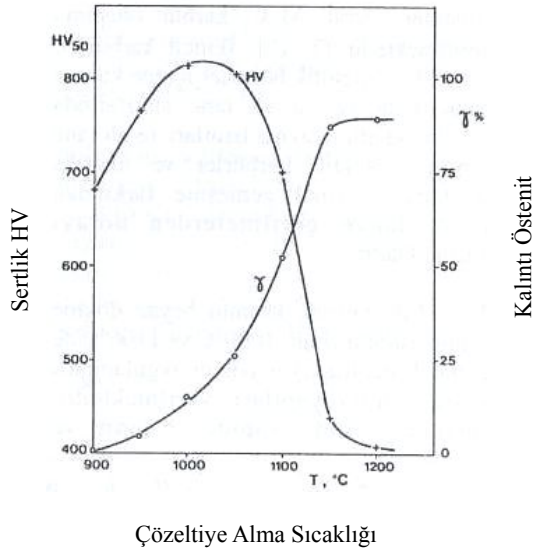
Destabilizasyon ısı işlemi, 920-1060°C sıcaklık aralığında 1-6 saat bekletme işlemidir. Sertleştirme ısı işleminde maksimum sertliği elde etmek için, östenitleme sıcaklığı kimyasal bileşime göre belirlenmelidir. ASTM A 532'ye göre %12-20 Cr içeren 2. sınıf beyaz dökme demirler 855-1010°C'da, %23-28 Cr içeren 3.sınıf beyaz dökme demirler, 1010-1095°C'da östenitlenirler. Kalın kesitli dökümlerin östenitleme işlemi genellikle sıcaklık aralığının üst noktasına yakın sıcaklıklarda yapılır. Döküm parçalar, krom-karbürlerin çözülmesi ve karbonun dengeli dağılımıyla yeterli sertliği vermesi için, östenitleme sıcaklığında yeterli sürede (en az 4 saat) tutulmalıdır. Kalın kesitli parçalar için 1saat/25,4 mm oranı yeterlidir. Yapısı tamamen perlitik olan dökümlerde ısı işlem süresi azaltılabilir. Östenitleme işleminde ikincil karbürler matrisde çökelmekte, matris alaşım içeriği ve karbon miktarı azalmaktadır. Östenitik matrisdeki alaşım içeriğinin düşmesi, martensit oluşum başlangıç sıcaklığını (Ms) artırmakta ve oda sıcaklığına soğutma işlemiyle matris martensite dönüşebilmektedir. Döküm parçaların destabilizasyon sıcaklığından havada soğutma işlemi ile su verme çatlakları önlenirken, genellikle yeterli miktarda martensit yapı elde edilmektedir. Düşük kromlu alaşımlara yağda su verilebilmektedir.

Isıl işlem esnasında oluşan destabilizasyon reaksiyonu:

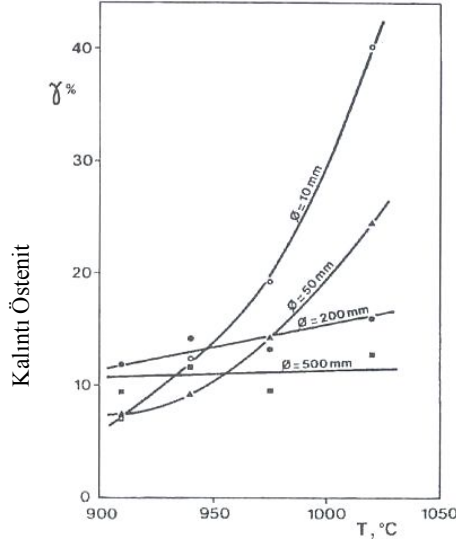


γ^* , Orijinal östenit matristen (γ) daha az alaşım içeren östenit'tir. Oluşan ikincil karbürlerin tipleri (M_3C , M_7C_3 , $M_{23}C_6$), matris bileşimine ve destabilizasyon sıcaklığına bağlıdır. Destabilizasyon işleminden sonra martensitçe zengin matris oluşmasına rağmen, %35 kadar östenit matriste kalabilmektedir. Destabilizasyon işleminden sonra kalıntı östenit miktarı alaşımın bileşimine, destabilizasyon sıcaklığına, zamana, döküm parçanın kesitine ve matris karbon içeriğine bağlıdır. Yüksek sıcaklıklarda yapılan destabilizasyon işleminde, östenitteki yüksek karbon çözünürlüğü karbür çökelmesinin itici gücünü azaltmaktadır. Yüksek karbonlu matris ile Ms sıcaklığı düşmekte, havada soğutulmuş yapıda büyük miktarda kalıntı östenit

oluşmaktadır. Düşük sıcaklıklarda yapılan destabilizasyon ısıl işleminde matrisin karbon içeriği belirgin bir şekilde düşmekte ve karbür çökmesi artmaktadır. Soğutmada oluşan düşük karbonlu martensit nispeten düşük sertliğe sahiptir. Isıl işlemde kalıntı östenit miktarı, çözeltiye alma sıcaklığı, kesit boyutu ve sertlik arasındaki ilişki Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Destabilizasyon işlemini takiben oluşan mikroyapı işlem sıcaklığına bağlı olarak değişebilmektedir. Destabilizasyon sıcaklığı etkisinin büyük kesitlerde azaldığı Şekil 4.30'da görülmektedir. Büyük kesitli parçaların yavaş soğutulmasıyla ilave ikincil karbür çökmesi oluşabilmektedir. Çok düşük soğutma hızları, perlit oluşumuna ve düşük sertliğe sebep olmaktadır.



Şekil 4.29. %16 Cr içeren Yüksek kromlu beyaz dökme demirde çözeltiye alma sıcaklığı, kalıntı östenit miktarı ve su verme sonrası sertlik arasındaki ilişki [21]



Çözeltiye Alma Sıcaklığı

Şekil 4.30. Çözeltiye alma sıcaklığı, kesit kalınlığı, kalıntı östenit miktarı arasındaki ilişki [7]

Destabilizasyon sıcaklığında bekletme süresi, genelde 1-6 saat arasında değişmektedir. Her 25 mm kesit kalınlığı için, 1 saat+15 dakika bekleme süresi bir kural olarak uygulanmaktadır. Destabilizasyon sıcaklığında optimum bekletme süresi alaşım kompozisyonuna, döküm parça kesit boyutuna ve döküm yapısına bağlıdır. Yüksek nikel ve bakırlı alaşımlarda ısıtım işlemi sırasında bu elementlerin matriste kalması için 6 saatlik süre ile bekletme işlemi gerekmektedir. Fazla miktarda ikincil karbür çökmesi için Ms sıcaklığı yeterli seviyede yükseltilir. Dökümlerde perlitik yapılar östenitik yapılardan daha az destabilizasyon süresine ihtiyaç duymaktadır. Perlitik yapıların destabilizasyon işleminde östenitik yapıların destabilizasyon işlemine göre daha yüksek sertlikler elde edilir. Destabilizasyon ısıtım işleminde matrisden ayrılan alaşım elementleri ikincil karbürler şeklinde çökmektedir. Çökelen karbürlerin tipleri alaşımın bileşimine ve destabilizasyon sıcaklığına bağlıdır. %15-20 kromlu alaşımlarda aglomere çubuklar ve levhalar şeklinde M_7C_3 karbürünün çökeldiği görülürken yüksek krom içerikli alaşımlarda bağlantılı ince çubuklar $M_{23}C_6$ karbürleri meydana gelmektedir. İkincil karbürler genellikle östenitik bölgeler içinde kayma bantlarında ya da alt tane sınırlarında çökmektedir. Kayma bantları ve alt tane sınırları, ötektik karbürler ve matris arasındaki termal genleşme farkından kaynaklanan gerilmelerden dolayı oluşmaktadır [3, 21].

Fe-4,0 C-18,0 Cr-1,0 Mo-1,0 Ti (% ağırlıkça) içeren ötektik üstü yüksek kromlu beyaz dökme demirde ısıtım sıcaklığının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi üzerine yapılan bir çalışmada [58]; a)döküm halindeki mikroyapıda başlıca incelmış hekzagonal şekilli birincil M_7C_3 karbürleri, östenit, perlit ve az miktarda martensit ve TiC partiküllerinin bulunduğu b)ısıtım sıcaklığının artması ile M_3C karbürlerinin M_7C_3 karbürlerine dönüştüğü ve kalıntı östenit içeriğinin arttığı, c)ısıtım sıcaklığının artması ile matris mikro sertliğinin de arttığı, 1000°C sıcaklıkta 64,6 HRC ve 850 HV pik değerlere ulaştığı ancak 1050°C sıcaklıkta bu değerlerin düştüğü, d)alaşımın darbe dayanımlarının 6,1-6,9 J/cm² değerleri arasında bulunduğu ve ısıtım sıcaklığı arttıkça bu değerlerin önemli ölçüde değişmediği açıklanmıştır. Şekil 4.31’de yüksek kromlu beyaz dökme demirin a)döküm halinde, b)1000°C ve c)1100°C sıcaklığında 2 saat süre ile destabilizasyon işlemi sonrası mikroyapıları verilmektedir.



Şekil 4.31.15Cr-3Mo beyaz dökme demir alaşımlarının; a) döküm halinde, b) 1000°C, c)1100°C’ de 2 saat destabilizasyon işlemi sonrası mikroyapıları [21]

Döküm halinde yapıda, östenit ve karbürlerden oluşan ötektik ve daha baskın olan östenit dendritleri mevcuttur. Destabilizasyon işleminden sonra östenitin bir kısmının perlit ve martensite dönüştüğü matrisin martensit-östenit karışımından teşekkül ettiği, ötektik karbürlerin değişmeden kaldığı ve ikincil karbürlerin matrisde çökeldiği görülmektedir.

%30 Cr-%2,3 C içeren dökme demire %1,5-3,7 V ilavesinin mikroyapı üzerinde etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, vanadyum ilave edilmeyen alaşımda 900-1100°C de 2-8 saat süre ile destabilizasyon ısıtım işlemi sonrası $M_{23}C_6$ karbür çökeltilerinin dendritik bölge içinde olduğu görülmüştür. $M_{23}C_6$ karbürleri çubuksu

şeklinde ve birbirleri ile ağ yapısı oluşturma eğilimindedirler. M_7C_3 ötektik karbürleri destabilizasyon ısısal işlemi esnasında kısmen $M_{23}C_6$ karbürüne dönüşmüşlerdir. Alaşıma %1,5 – 3,7 V ilavesi ferritik matris ve hacimce %20-26 oranına ulaşan ince ötektik karbürürlü bir yapı meydana gelmiştir.

%2,0 C-%15,0 Cr-%0,20 Mo-%1,0 Ni içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirde alaşım elementlerinin faz diyagramı üzerindeki etkilerinin araştırıldığı diğer bir çalışmada [20], ötektik sıcaklık yaklaşık 1234°C olduğu, yüksek sertlikteki M_7C_3 karbürlerinin meydana geldiği ve 900°C sıcaklıktan hızlı soğutma ile daha çok karbür ve daha az kalıntı östenitin oluşacağı belirtilmiştir. İlave olarak, değişik C ve Cr içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ötektik dönüşüm sıcaklığının ötektik karbon içeriği azaldıkça arttığı ve östenit faz aralığının Cr içeriği arttıkça azaldığı gözlenmiştir, Çizelge 4.20. Sabit krom içeriğinde, C içeriğinin ötektik karbondan daha aşağıda olması gerektiği aksi takdirde kalın birincil karbürün mikroyapıda teşekkül edebileceği açıklanmıştır [20].

Çizelge 4.20. Farklı C içerikli yüksek kromlu dökme demirlerin faz dönüşüm sıcaklıkları [20]

%C	Katılaşma Sıcaklığı / °C	Ötektik Sıcaklık / °C	Sıvılaşma Sıcaklığı / °C	Sıvı Katı ara Faz Sıcaklığı / °C
2,0	1375	1280	1270	105
2,5	1340	1270	1265	75
3,0	1290	1270	1260	30
3,5	1270	1265	1255	15

Wang ve arkadaşlarının [59] %16 Cr, %1 Mo ve %1 Cu içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirde yüksek sıcaklık ve kriyojenik işlemlerinin mikroyapı ve aşınma direnci üzerine etkilerini inceledikleri çalışmada, destabilizasyon ısısal işleminden sonra uygulanan kriyojenik işleminin kalıntı östeniti azalttığı ancak kalıntı östeniti tamamen yok edemediği tespit edilmiştir. Destabilizasyon ısısal işleminden sonra uygulanan kriyojenik işleminin, $M_{23}C_6$ ikincil karbür oluşumunu havada soğutma şartlarına göre daha fazla artırarak alaşımın sertliğini ve aşınma direncini yükselttiği

belirtilmiştir [59].

%3,11 C, %13,65 Cr, %1,19 Si, %0,77 Mn, %0,073 Ni, %0,18 Mo, % 0,042 P, %0,011 S kimyasal bileşime sahip yüksek kromlu beyaz dökme demire önce östenitleme ısısal işlemi daha sonra 563-623 °K sıcaklıklar aralığında östempereleme ısısal işleminin uygulandığı diğer bir araştırmada, en yüksek sertlik, darbe dayanımı ve abrasiv aşınma dayanımı Çizelge 4.21’de gösterildiği üzere 593 °K sıcaklıkta östempereleme işlemi ile elde edilmiştir [60].

Çizelge 4.21. Östempereleme ısısal işlemleri ve mekanik özellikler [60]

Mekanik Özellikler	Östempereleme Sıcaklığı		
	563 K	593 K	623 K
Sertlik (HRC)	65,7	63,2	60,8
Darbe Dayanımı (J cm ⁻²)	7,01	8,44	6,76
Aşınma Oranı (mg min ⁻¹ cm ⁻²)	0,45	0,31	0,35

4.7.2. Kritik sıcaklık altı veya temperleme ısısal işlemi

Yüksek kromlu beyaz dökme demirde destabilizasyon ısısal işlemi sonrasında mikroyapı baskın olan martensitik yapı ile birlikte %35’e kadar östenit içerebilmektedir. Düşük miktarda kalıntı östenit için kritik sıcaklık altı ısısal işlemler uygulanmaktadır.

Kritik sıcaklık altı veya temperleme ısısal işlemi 200 ve 600 °C sıcaklıkları arasında 2-6 saat süre ile bekletme işlemini içermektedir. Temperleme ısısal işlemi esnasında ikincil karbür çökmesi (M₂₃C₆ karbür), ötektoit reaksiyon ($\gamma \rightarrow \alpha$ + alaşım karbür) ve perlit oluşumu (α + M₃C) meydana gelir. Genellikle ikincil karbür çökmesi neden olan reaksiyon tercih edilmektedir. Soğutma esnasında martensit üreten herhangi bir kalıntı östenit, destabilize olabilmektedir. Oluşan reaksiyonlar malzeme bileşimine bağlı olduğu kadar işlem sıcaklığı ve süresine de bağlıdır.

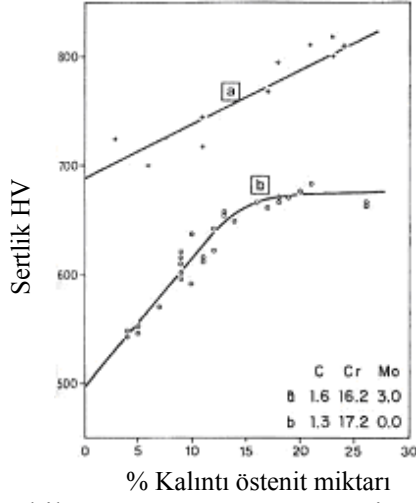
400°C sıcaklığa kadar yapılan temperleme işlemi martensitin temperlenmesini gerçekleştirerek sertliği biraz düşürebilmektedir. İkincil karbür çökmesi ve östenit

miktarının düşmesi ile sertliğin artması 400-500 °C sıcaklıklar arasında meydana gelmektedir. 600°C'den yüksek sıcaklıklar perlit oluşumuna veya östenit bozunumuna (ferrit ve alaşım karbürü olarak) neden olmaktadır. Bu işlem östenit miktarının azalmasına rağmen genellikle aşınma direncini ve sertliği düşürdüğü için tercih edilmez. %2,6 C – %20 Cr – %2,5 Mo alaşımının kritik sıcaklık altı ısıtılmasından sonra gösterdiği sertlik değerleri çizelge 4.10' da verilmiştir.

Çizelge 4.22. Kritik sıcaklık altı ısıtılmasından sonra uygulanan %2,6 C – %20 Cr – %2,5 Mo alaşımına ait sertlik değerleri [7]

Kritik Sıcaklık altı Isıl İşlemi		Sertlik (HV30)	
Sıcaklık (°C)	Zaman (saat)	%0.54 Si içeren döküm	%1.13 Si içeren döküm
Döküm Hali	-	630	640
205	4	610	631
	8	606	631
	16	602	626
290	4	615	657
	8	601	636
	16	601	651
450	4	620	685
	8	618	693
	16	633	676
500	4	668	728
	8	683	723
	16	677	691
550	4	629	646
	8	625	602
	16	620	582

Temperleme işleminde molibdenin etkisi Şekil 4.32'de görüleceği üzere, molibden içeren alaşım temperleme işleminden sonra %25 kalıntı östenit içermekle birlikte 800HV'nin üzerinde sertliğe sahipken, eser miktarda molibden içeren alaşım 700 HV'den daha düşük sertliğe sahiptir. Östenit miktarının %10'a kadar azaltılması için temperleme sıcaklığında 8 saat bekletme süresinin gerekli olduğu belirtilmektedir [21].



Şekil 4.32. %3 ve %0,03 Mo içeren alaşımlarda temperleme işleminden sonra sertlik ve kalıntı östenit miktarı ilişkisi [21]

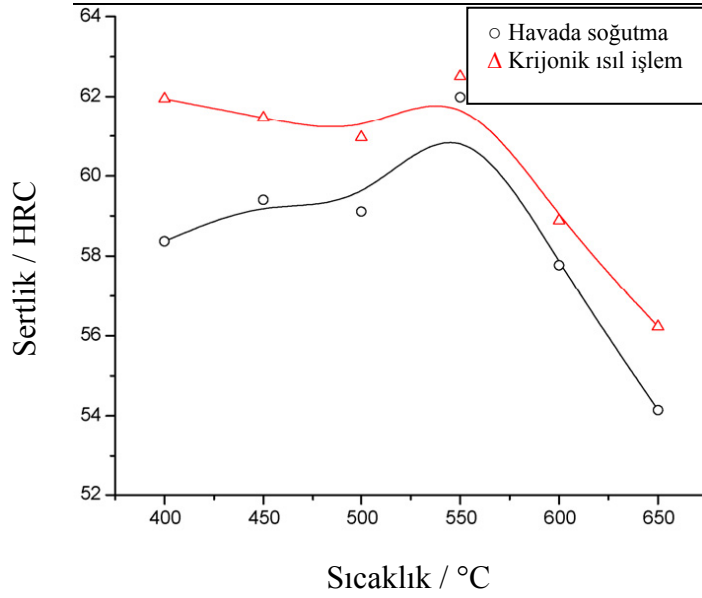
%5-10 Mn ve %17-19 Cr içeren yüksek kromlu beyaz dökme demir alaşımında 960°C sıcaklığında 4 saat süre ile bekletme, oda sıcaklığına yağda soğutma ve daha sonra 200 °C sıcaklığında 30 dakika temperleme ve havada soğutma işlemlerinin erozyon ve aşınma özellikleri üzerine olan etkilerinin incelendiği araştırmada sertlik ve aşınma direncinin ısı işlem görmüş numunelerde ısı işlem görmemiş numunelere göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Sertlik ve aşınma direncinde meydana gelen artışın ısı işlem ile küreselleşen karbürlerden kaynaklandığı vurgulanmıştır [61].

Bazı araştırmacılar [62], yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde kriyojenik işlemlerden sonra yapıda her zaman kalıntı östenitin mevcut olduğunu belirtmişlerdir. Çizelge 4.23’de verilen kimyasal analize sahip beyaz dökme demir alaşımında alt kritik sıcaklık altı ısı işlemi sonrası havada soğutma ve kriyojenik işlemlerinde sıcaklık ve sertlik arasındaki ilişki Şekil 4.33’de verilmiştir.

Çizelge 4.23. Beyaz dökme demire ait kimyasal kompozisyon [62]

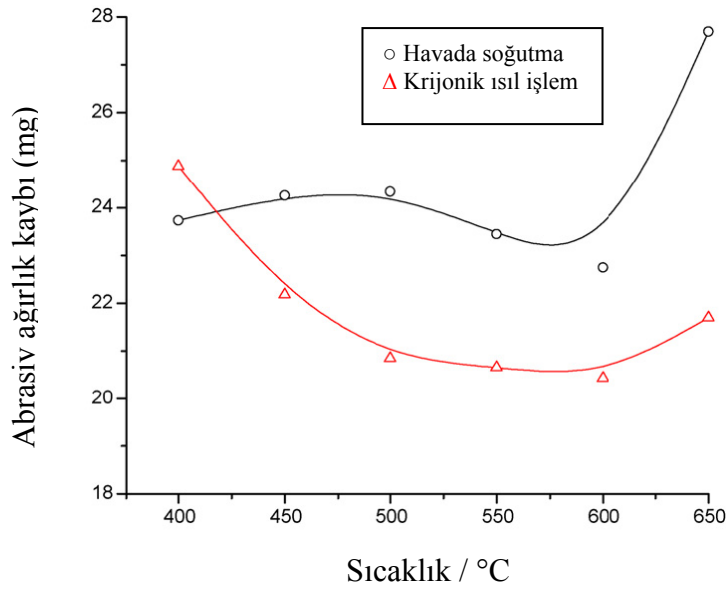
Element	%
C	2,92
Si	0,82
Mn	3,66
Cr	13,86
P	0,06
S	0,05
B	0,5

Alt kritik işlemden sonra havada soğutma ve kriyojenik işlem yapılan numunelerin sıcaklık sertlik değerleri Şekil 4.33’de verilmiştir.



Şekil 4.33. Havada soğutma ve kriyojenik işlem yapılan numunelerin sıcaklık sertlik değerleri [62]

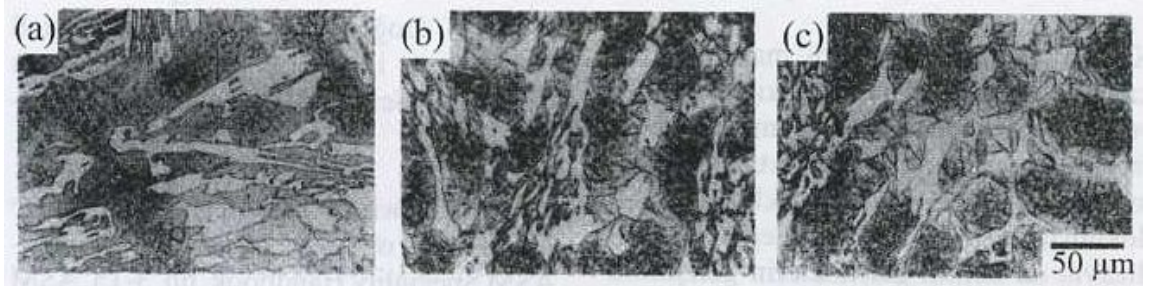
Alt kritik işlemden sonra havada soğutma ve kriyojenik işlem yapılan numunelerin sıcaklık abrasiv ağırlık kayıp değerleri Şekil 4.34’de verilmiştir [62].



Şekil 4.34. Havada soğutma ve kriyojenik işlem yapılan numunelerin sıcaklık abrasiv ağırlık kayıp değerleri [62]

4.7.3. Sıfırlı soğutma işlemleri

Matris yapısında kalıntı östenitin dönüşümü, destabilizasyon ısı işlemini takiben sıfırlı soğutma işlemleri ile yapılmaktadır. Sıfırlı soğutma işlemleriyle ilgilenilmesinin bir başka nedeni ise yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin üretiminde destabilizasyon ısı işlemini çıkartmaktır. İkincil karbür çökmesiyle beraber düşünülen destabilizasyon ısı işlemi beyaz dökme demir alaşımlarının kırılma tokluğunu olumsuz yönde etkileyebilmekte ve ısı işlem esnasında uygulanan sıcaklık gradyanları istenmeyen kalıntı gerilmeler oluşturabilmektedir. Sıfırlı soğutma işlemleri uygulanmış %15Cr-%3Mo beyaz dökme demirin mikroyapısı martensit-östenit karışımı matriste ötektik ve ikincil karbürlerden oluşmaktadır, Şekil 4.35. Uygulanan sıcaklık azaldıkça matriste martensit miktarının arttığı ve daha az aşınma kaybı olduğu belirtilmiştir [21].



Şekil 4.35. 15Cr-3Mo alaşımlı beyaz dökme demir alaşımının optik mikroyapıları, 1100 °C’de yapılan destabilizasyon işlemini takiben a) 25°C, b)95°C, c)196°C’ soğutulan numuneler [21]

4.7.4. Gerilme giderme ısı işlemleri

Kalıntı gerilmeler döküm malzemelerde katılaşma ve destabilizasyon ısı işlemi sırasında kalın ve ince kesitlerde veya yüzey ve iç bölgelerde soğuma hızlarının farklılığından kaynaklanmaktadır. Kalıp malzemesinin karakteristikleri kadar döküm malzemesinin özellikleri ve döküm dizaynı da kalıntı gerilmelerin oluşumu üzerinde etkili olabilmektedir. Destabilizasyon ısı işlemi gibi yüksek sıcaklık işlemini takiben soğutma işleminde döküm parça üzerinde sıcaklık farklılıklarının artması kalıntı gerilmenin artmasına neden olabilmektedir. Kalıntı gerilmeler, dökümlerin kalıp

içinde yavaş, üniform ve yönlü soğutulmasıyla azaltılabilmektedir. Pearce [44], beyaz dökme demir alaşımlarında gerilme giderme ısıtma işlemi için 600-700°C sıcaklık aralıklarının kullanılması önermektedir.

%10, %16, %20 ve %26 Cr içeren ötektik ve ötektikaltı dökme demirlere ısıtma işlemlerin uygulanması üzerine yapılan çalışmada [11] aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir;

Sertleştirme ısıtma işlemlerinde;

1- Makro sertliğin sabit krom içeriğinde farklı karbon oranlarında çok fazla değişmediği,

2- Kalıntı östenit hacminin sabit krom içeriğinde östenitleme sıcaklığı yükseldikçe arttığı,

3- Yapıda, ötektik γ ve M_7C_3 karbürün bulunması durumunda, Cr/C oranı arttıkça kalıntı östenit hacminin azaldığı ve aynı Cr/C oranlarında yüksek östenitleme sıcaklıklarında daha fazla kalıntı östenit hacminin gözlemlendiği,

4- Sertliğin kalıntı östenit hacmi ve ötektik karbürün tipine göre değiştiği ve maksimum sertlik değeri olan 800HV'nin %20 kalıntı östenit hacmi içeriğinde gerçekleştiği belirtilmiştir.

Temperleme işlemlerinde ;

1- Sertliğin kalıntı östenit hacmine bağlı olduğu ve 800HV maksimum sertlik değerinin %20 kalıntı östenit hacminde sağlandığı,

2- Temperleme sıcaklığına bağlı olmaksızın Cr/C oranı arttıkça sertliğin azaldığı açıklanmıştır. [11].

Diğer bir araştırmada [63], %2,35 C, %18,23 Cr içeren beyaz dökme demire Çizelge 4.24'de belirtilen ısıtma işlemler uygulanmış ve mikroyapılar elde edilmiştir

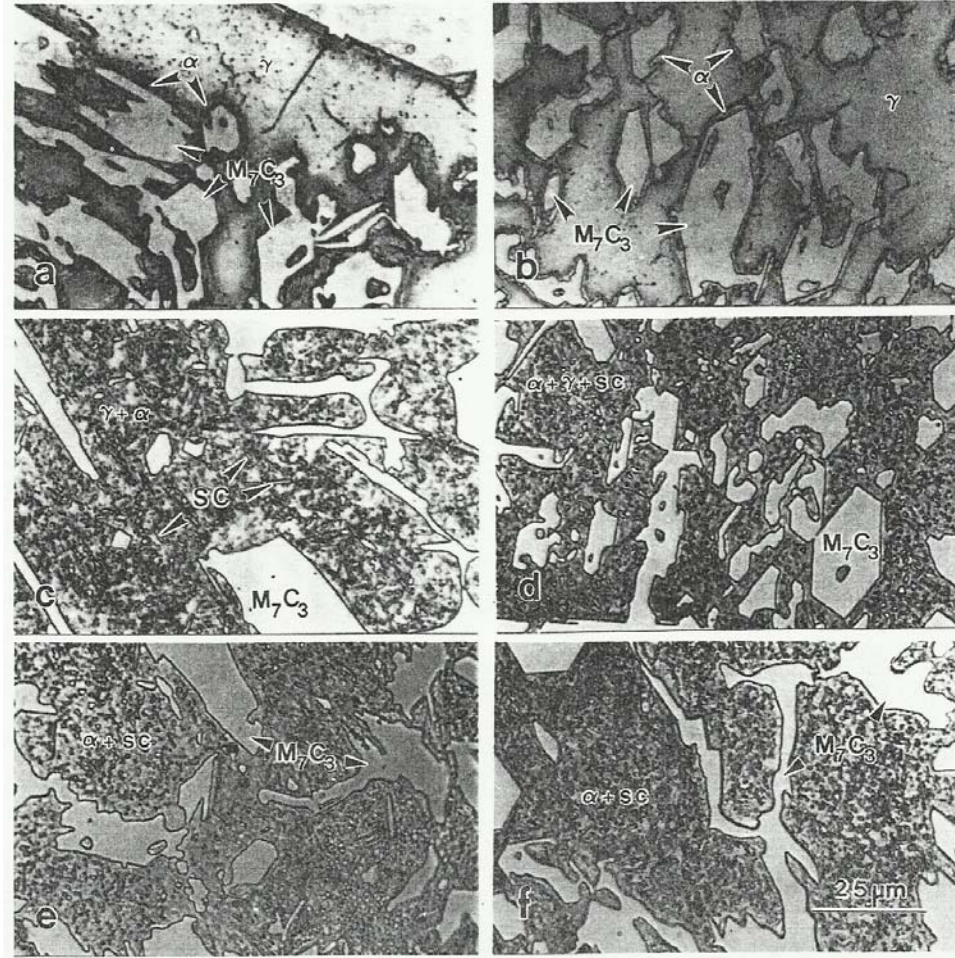
Çizelge 4.24. %2,35 C %18,23 Cr içeren beyaz dökme demire uygulanan ısıt işlemler, elde edilen mikroyapı ve sertlik değerleri [63]

Isıl işlem No	Uygulanan Isıl İşlem	Mikroyapı	Sertlik
Döküm hali	-	Γ -dendritleri, ötektik M_7C_3/γ , martensit tabakaları	50 $\pm$ 3
1	970°C 2,5 saat, havada soğutma	Martensit, birincil M_7C_3 , kübik ikincil $M_{23}C_6$, perlit	66 $\pm$ 3
2	970°C 2,5 saat, havada soğutma 600°C 13 saat, havada soğutma	Perlit, birincil M_7C_3 , kaba/küresel M_7C_3 , orta boyutlu kübik $M_{23}C_6$, ince taneli karbür partiküller	55 $\pm$ 4
3	600°C 13 saat, havada soğutma	Perlit, α -ferrit, küresel MxC_3 partiküller (x yaklaşık >7)	43 $\pm$ 5
4	600°C 13 saat, havada soğutma 970°C 2,5 saat, havada soğutma	Martensit, birincil M_7C_3 , kübik ikincil $M_{23}C_6$, kalıntı γ	62 $\pm$ 4

%3.1 C ve %24.5 Cr içeren beyaz dökme demire çizelge 4.25’de verilen ısıt işlemlerin uygulanmasıyla oluşan matris yapı ve karbürlerin mikroyapı görüntüleri Şekil 4.36’da verilmiştir [64].

Çizelge 4.25. %3,1 C ve %24,5 Cr içeren beyaz dökme demire uygulanan ısıt işlemler ve oluşan matris-karbürler [64]

Numune	Isıl işlem	Matris	Karbürler
A	Döküm hali	%71.7 Östenit %28.3 Martensit	Ötektik karbürler (M_7C_3)
T	538°C de 2 saat temperleme, havada soğutma	%75.9 Östenit %24.1 Martensit	Ötektik karbürler (M_7C_3)
D	1000°C’de 4 saat östenitleme ve havada soğutma	%33.5 Östenit %66.5 Martensit	Ötektik karbürler (M_7C_3), ikincil karbürler
DT	1000°C’de 4 saat östenitleme ve havada soğutma, 482°C’de 8 saat alt kritik ısıt işlem ve havada soğutma	%4.8 Östenit %95.2 Martensit	Ötektik karbürler (M_7C_3), ikincil karbürler
DCT	1000°C’de 4 saat östenitleme ve oda sıcaklığına kadar havada soğutma, sıvı nitrojen içinde kriyonik ısıt işlem, 482°C’de 8 saat temperleme ve havada soğutma	%1 Östenit %99 Martensit	Ötektik karbürler (M_7C_3), ikincil karbürler
DTC	1000°C’de 4 saat östenitleme ve oda sıcaklığına kadar havada soğutma, 482°C’de 8 saat alt kritik ısıt işlem ve havada soğutma, sıvı nitrojen içinde kriyonik ısıt işlem	%100 Martensit	Ötektik karbürler (M_7C_3), ikincil karbürler



Şekil 4.36. Döküm hali ve çeşitli ısıtım işlem görmüş numunelerin mikroyapıları
a)A, b)T, c)D, d)DT, e)DCT, f)DTC γ :östenit, α :martensit, M_7C_3 : ötektik
karbür, SC: İkincil karbür [64]

4.8. Uygulama Alanları

Yüksek krom içeren beyaz dökme demirlerdeki üstün aşınma direnci ve tokluk, bu malzemelerin aşınmaya maruz birçok uygulamada kullanılmasının nedenidir. Cevher hazırlama, cam, porselen, toprak ve kimya sanayinde aşındırıcı maddeleri öğütme, nakletme, püskürtme, kırma ve karıştırmak için kullanılan makinaların aşınmaya maruz parçalar döküm yöntemi ile yüksek kromlu beyaz dökme demirden imal edilmektedir. Yüksek krom içeren beyaz dökme demirler sıvıların nakledildiği pompalarda, tuğla kalıplarında, yüzey temizleme ekipmanlarında, kaya madenciliğinde kullanılmaktadır [21, 36, 65].

En başarılı uygulamalarının biri darbe çubukları ve darbeli kırıcıların dövücü bloklarıdır. Darbeli kırıcılarda serbest düşen şarj malzemesi 250-500m/sn'lik hızla hareket eden darbe çubukları ile dövülüp ezilmektedir. Parçalar daha fazla parçalanması için dövücü bloğa doğru fırlatılmaktadır. Ledeburitik beyaz dökme demir Bu şartlara en iyi direnci yüksek kromlu beyaz dökme demirler göstermektedir. Bu tür uygulanma için 15-3HC sınıfı en iyi malzemedir. Özellikle sert kayaları kırmak için bu tür beyaz dökme demirler ekonomiktir. Yüksek krom beyaz dökme demirler için aynı aşındırma şartlarında başarılı uygulamalar; çeşitli şahmerdanlar, bazı çekiçler ve küçük çeneli kırıcılar için aşındırma plakalarıdır. Dövücü parçalar çok yüksek aşınma etkileri altında çatlamakta ve genellikle en iyi sonuçlar martensitik yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde elde edilmektedir [3].

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler çimento değirmenlerinde astar olarak başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca cevher öğütmek için bilyalı ve otojen değirmenler de kullanılmaktadır. Burada yüksek kromlu beyaz dökme demirler, östenitik Mn çeliklerinin veya su verilip temperlenmiş az alaşımlı çeliklerin yerini birçok alanda devralmışlardır. Aşınmaya dirençli pompa üretiminde yüksek kromlu beyaz dökme demirler artan ölçülerde kullanılmaktadır. Bu alanda yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin az alaşımlı beyaz dökme demirlere göre üstünlüğü sadece daha yüksek tokluk ve aşınma direncine sahip olmalarından değil, aynı zamanda daha iyi işlenebilirliğinden kaynaklanmaktadır [3, 10, 66].

Maden ve mineral endüstrisi dışında yüksek krom molibdenli beyaz dökme demirler merdaneli değirmenlerde önemli bir uygulama alanı bulmuştur. Şeritli değirmenler için ilsem merdanelerinde, profil, çubuk ve tel üretiminde yüksek krom – molibdenli beyaz dökme demirler artan oranda kullanılmakta ve konvansiyonel merdane malzemelerinden daha iyi bir performans göstermektedir.

Genellikle bu grup dökme demirler çamur pompalarında, çeşitli mineral delme, tesviye, işleme millerinde, sert kayaların işlenmesi için gerekli ekipmanlarında vb. alanlarda kullanılmaktadır. [3, 5]

5. YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERDE AŞINMA DİRENCİ

5.1. Aşınmanın Tanımı

Dünyadaki hammadde ve enerji kaynaklarının sınırlı oluşu, enerji ve malzeme tasarrufu sağlamaya yönelik yapılan çalışmaların önemini artırmaktadır. Bu yüzden eş güdümlü çalışan sistemlerde sürtünme ve aşınmanın kontrol altına alınmasıyla ilgili çalışmalar her geçen gün önem kazanmaktadır [67].

Aşınma, endüstrinin bütün bölümlerinde oldukça önem arz eden ve tedbir alınmadığı sürece, büyük maddi kayıplara neden olan bir sorundur. Günlük ihtiyaçlarımızda kullandığımız değişik malzemelerden yapılmış araç ve gereçlerin çalışması sırasında iki yüzey birbiri ile temas halinde ve bir hareket söz konusu ise araçlardan birinde veya her ikisinde belli bir süre sonra aşınmanın olduğunu görmek mümkündür [68].

DIN 50320 ve ASTM G40-93 standartlarına göre aşınma; "Kullanılan malzemelerinin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması" şeklinde tanımlanmaktadır [69, 70]. Katı yüzeylerden mekanik etkinin (rölatif hareketin) bir sonucu olarak, malzeme kaybı yada yer değiştirme olarak tanımlanabilen aşınma prosesinde malzeme kaybı oldukça küçüktür. Bu yüzden sıradan muayene ile aşınma pek incelenemez [3, 15, 21, 54].

Bir aşınma sisteminde; ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük ve hareket aşınmanın temel unsurlarını oluşturur. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem teknikte "Tribolojik Sistem" olarak adlandırılır. Bir aşınma sistemindeki önemli etkenlerden biri de çevre şartlarıdır. Sistem elemanlarının nem veya koroziv etkiler ile karşı karşıya kalması aşınmayı hızlandırır [15, 38, 70, 71].

Yukarıdaki tanımların yanı sıra, teknik anlamda aşınma terimi; Cisimlerden mekanik etkenlerle mikro taneciklerin kopmasıyla meydana gelen, istenmeyen yüzey değişikliklerini tanımlar. Bu tarifteki “mekanik etkenler” deyimini aşınma ile “ elektro kimyasal etkenler”in söz konusu olduğu korozyonu ayırmak için kullanılmıştır.

“Mikro taneciklerin kopması” deyimi, örneğin dövme veya sıkışma ile meydana gelecek yüzey değişikliklerinin kırılma veya büyük parça kopmasının aşınma sayılamayacağını göstermektedir. “İstenmeyen” deyimi aynı fiziksel kanunlara dayansa bile, örneğin yüzey işleme veya parlatma işleminin aşınma kapsamının dışında kalacağını belirtmektedir. “Yüzey değişiklikleri” deyimi ise, aşınmanın malzemenin hacimsel özellikleriyle değil, yüzeysel özellikleriyle ilişkileriyle ilgili olduğunu açıklamaktadır [3, 72].

Aşınma deneyleri, geleneksel olarak mühendisler ve bilim adamları tarafından, verilen bir uygulama için optimum malzeme seçimi ve geliştirilmesi amacıyla yönelik olarak, aşınma direncine göre malzemeleri sıralamak için yapılır. Günümüzde, parametreler üzerinde çeşitli faktörlerin etkisini saptamak ve performansı etkileyecek aşınma parametrelerini incelemek için daha karmaşık aşınma deneyleri malzeme mühendislerince gerçekleştirilmektedir [8, 15, 21].

Aşınma ve korozyon direnci gibi yüzey özellikleri gerektiren malzemelerin, takımların ve makine parçalarının üretiminde yüzey mühendisliği önemli bir alandır. Korozyon, sürtünme, aşınma, ısı, radyasyon gibi yüzeyde meydana gelen hareketler nedeniyle malzeme yüzeyinin korunması ve malzemenin bu olaylara karşı direncinin artırılması büyük öneme sahiptir.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler, yüksek aşınma dayanımlarından dolayı geniş kullanım alanına sahiptirler. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlere mekanik dayanım ve aşınma direnci sağlayan en önemli faktörün yapıda bulunan krom karbürler olduğu bilinmektedir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde matris yapı, sert ötektik M_7C_3 tipi karbürleri aşınma esnasında yerinde tutar. Matris aşındığında desteksiz kalan karbürler, gerilmeler altında kırılır. Kırılan karbürler bazı durumlarda yumuşak matrise gömülerek sert bir yüzey tabakası oluşturur. Bu durum özellikle ferritik matriste etkili olmaktadır. Perlitik matris düşük aşınma direncine sahip olduğu için, beyaz dökme demirlerde perlitik yapı istenmez. Yapıdaki karbon oranı arttıkça sertlik ve buna bağlı olarak aşınma direnci de artar. Ancak düşük gerilmeli aşınma ortamlarında, sertlik belirli bir değere geldikten sonra mikro sertlik artışı

aşınma direncini etkilemez.

Aşınmaya neden olan gerilmeler yüksek olursa martensitik yapı, östenitik yapıya göre, iki üç kat daha iyi aşınma direnci gösterir. Martensitik yapı östenitleme işlemi ile sağlandığı için bu işlem esnasındaki reaksiyonlar martensitin yapısı için önemlidir. Martensit oluşumu başlangıç sıcaklığı ile beraber, bitiş sıcaklığını da düşüreceği için mikroyapıdaki kalıntı östenit miktarı, hacimsel genleşmelerin oluşmasına ve bunun sonucu oluşan gerilmeler nedeni ile mikro çatlaklara neden olur. Aşınma direnci ve tokluğun yüksek olabilmesi için beyaz dökme demirin mikroyapısında uygun karbür ve matrisin bulunması gereklidir. Matris için yapılabilecek optimum seçim, ikincil karbürlerle sertleştirilmiş yüksek karbonlu sert martensittir. Diğer bir alternatif ısıtıl işlemle sertleştirilebilen östenittir. Karbon artışı ile birlikte martensitin aşınma direnci artar. Isıl işlem sonucu martensitik matrise dağılan ikincil karbürler aşınma direncinde artışa neden olur. Temperleme ile aşınma direnci düşmektedir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbürler matris içerisinde dağılmıştır. Matris yumuşak olduğunda aşınır ve karbürler matristen kopar. Bu durumda karbürlerin aşınma dirençlerinin yalnızca bir kısmından yararlanılabilmiş olunur. Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirler mikroyapıda bulunan krom karbürlerin etkisi ile mikroyapısında sementit içeren dökme demirlerden daha serttir ve aşınmaya daha dirençlidir. Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerin mikroyapılarında süresiz ötektik karbürler ve ikincil karbürler olmak üzere iki çeşit karbür bulunmaktadır. Çizelge 5.1’de çeşitli malzemelerin öğütme ve oyuklayıcı aşınma altındaki performansları, tokluklarına dayanılarak verilmektedir [10].

Çizelge 5.1. Çeşitli malzemelerin öğütme ve oyuklayıcı aşınma altındaki performansları [10]

MALZEME	TOKLUK SIRASI	BAĞIL AŞINMA KAYBI	
		OYMA AŞINMASI	ÖĞÜTME AŞINMASI
Östenitik Mn Çeliği (%12 Mn)	1	0,34-0,19	138-142
Martensitik az Alaşımlı Çelik (%0,3-0,6 C)	2	0,28-0,15	126-114
Östenitik Mn Çeliği (%6 Mn)	3	0,25-0,17	114-120
Cr/Mo Çeliği (%0,7 C), Suverilmiş+Temperlenmiş	4	-	126-130
Martensitik 6 Cr / 1 Mo Çeliği (%1C)	5	0,1	102-97
Martensitik Yüksek Cr / Mo'lu Beyaz Dökme Demir	6	0,08-0,035	85-90
Martensitik 26 Cr'lu Beyaz Dökme Demir	7	0,17-0,09	96-100
Martensitik Az Alaşımlı Cr / Ni Dökme Demir	8	-	105-116
Perlitik Çil Uygulanmış Dökme Demir	9	~ 0,4	185-200

Mikro yapıdaki karbürlerin hacim oranı ve morfolojisi aşınma direnci açısından çok önemlidir. Genellikle mikro yapıdaki karbür oranı arttıkça aşınma direnci artmaktadır. Bununla birlikte karbürlerin aşınma direncini iyileştirebilmeleri için matrisin, çatlayan ve deforme olan karbürleri yeterli kuvvetle yerinde tutması gerekir.

Beyaz dökme demirlerin aşınmasında çeşitli mekanizmalar rol oynayabilir. Bu mekanizmaları aşağıda verildiği şekilde sıralamak mümkündür [10].

1. Sadece matris ya da matrisle birlikte karbürlerin de kesme ile aşınması,
2. Matrisin yorulma sonucu aşınması,
3. Matrisin plastik deformasyon sonucunda aşınması,
4. Karbürlerde kesme ya da plastik deformasyon sonucu mikro çatlaklar oluşması ve çatlayan karbürlerin kopması,
5. Karbürlerin yorulma nedeniyle çatlayıp kopması.

Araştırmacılar [73], 5 farklı kimyasal kompozisyona sahip beyaz dökme demirlerde teşekkül eden karbür çeşitleri, Çizelge 5.2, ve matris yapılarının aşınma dayanımı üzerine etkilerini inceledikleri çalışmada,

Çizelge 5.2. 5 Farklı kimyasal kompozisyona sahip beyaz dökme demir ve çökelen karbür tipleri [73]

NO	ALAŞIM ELEMENTLERİ					Karbürler
	% C	%Cr	%V	%Mo	%W	
1	3,0	5,0	5,0	5,0	5,0	MC, M ₂ C, M ₇ C ₃
2	3,0	5,0	0	2,5	12,5	M ₆ C, M ₇ C ₃
3	3,0	10,0	10,0	0	0	MC, M ₇ C ₃
4	3,0	0	5,0	2,5	12,5	MC, M ₆ C
5	3,0	17,0	0	3,0	0	M ₇ C ₃

alaşımli beyaz dökme demirlerde en yüksek aşınma dayanımlarını havada sertleştirilmiş numunelerde, daha düşük aşınma değerlerini temperlenmiş numunelerde, en düşük değerleri ise döküm halindeki numunelerde elde etmişlerdir [73]. Döküm halinde incelenen numunelerden en iyi aşınma değerlerini 1 nolu numune, daha sonra sırasıyla 4, 3, 2 no'lu numunelerin verdiğini belirtmişlerdir. Tipik yüksek kromlu beyaz dökme demirin (5no'lu numune) aşınma değeri 1 no'lu ve 3 no'lu numunelerin değerleri arasında olduğu, ısıtım işlem görmüş numunelerde en yüksek aşınma direncini sırasıyla 3, 1, 4, 5 ve 2 no'lu numunelerin gösterdiğini açıklamışlardır [73].

%0-2,02 Ti ilave edilmiş %16 Cr içeren beyaz dökme demirin 50-250 N aralığı yük altında kayma aşınma şartlarında aşınma davranışının analiz edildiği bir araştırmada [74] aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir; 1) alaşım elementi olan titanyumdan dolayı, sert ve küçük Ti karbürlerin çökmesi ile matris incelmış, sertliği artmış ve en iyi aşınma davranışını %2,02 Ti içeren alaşım göstermiştir, 2) özellikle yüksek yüklemelerde aşınma mekanizması oksitlenmedir. Oksit tabaka kalınlığı yüklerle artmıştır, 3) düşük yüklerde oksit tabakası başlıca Fe₂O₃ ve küçük miktarda Fe₃O₄ den oluşmakta fakat yük arttıkça Fe₃O₄ miktarı artmıştır, 4) deformasyon derinliği

yükle doğru orantılı iken Ti içeriği ile ters orantıya sahiptir, 5) deformasyon derinliği ve aşınma oranı arasında doğrusal bir ilişki vardır.

Yüksek krom–molibdenli beyaz dökme demirlerde mikroyapıdaki sert ötektik karbürler çok iyi aşınma direncinin nedenidir. Molibden ise perlit oluşumunu önleyerek ve sertleşebilirliği artırarak aşınma direncine katkıda bulunur.

Kumlama makinelerinde kullanılan türbin paletleri için 5 farklı kimyasal bileşime sahip yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde, SiC abrasiv aşındırıcıda 200dev/dak sabit hızda, 10, 25 ve 40 N'luk yüklerde, 60, 90 ve 120m'lik yollarda aşınma davranışlarının araştırıldığı deneysel çalışmada[24], 58 Hrc sertlik değerinde %3,3 C, %15,1 Cr ve %2,5 Mo içeren alaşımın en az, 60 Hrc sertlik değerinde %2,94 C, %16,7 Cr ve %1,2 Mo içeren alaşımda ise en fazla aşınma olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar, aynı şartlarda Al₂O₃ abrasiv aşındırıcının kullanıldığı diğer bir çalışmada[75] ise, yük artışı ve aşındırma mesafesine bağlı olarak %3,3 C, %15,1 Cr ve %2,5 Mo içeren numune ile %3,3 C, %18,5 Cr ve %1,5 Mo içeren numunenin en az aşındığı, buna karşın en fazla aşınmanın %2,94 C, 16,7 Cr ve 1,2 Mo içeren numunede gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir.

Çizelge 5.3'de analizleri verilen yüksek kromlu beyaz dökme demir numuneleri sırasıyla 960°C sıcaklıkta 4 saat süre ile bekletme, oda sıcaklığına yağda soğutma, 200 °C sıcaklıkta 30 dakika süre ile temperleme ve havada soğutma işlemlerinden sonra erezyon ve aşınma özelliklerinin incelendiği diğer bir araştırmada [61], %5 Mn içeren alaşımların aşınma direnci ve sertlik değerlerinin %10 Mn içeren alaşımlara göre daha iyi olduğu ve en yüksek sertlik ve aşınma direncinin matriste karbür hacminin fazla olduğu numunede gözlemlendiği tespit edilmiştir.

Çizelge 5.3. 5 Farklı kimyasal kompozisyona sahip beyaz dökme demir [61]

No	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	P	S
1	2,36	4,5	18,58	0,91	1,87	2,69	0,080	0,046
2	2,39	4,6	18,62	0,92	1,82	2,78	0,090	0,044
3	2,55	4,8	17,90	0,81	1,90	2,10	0,075	0,057
4	2,32	9,7	17,65	0,80	1,85	1,90	0,090	0,040
5	2,35	9,7	17,60	0,82	1,80	1,85	0,085	0,040

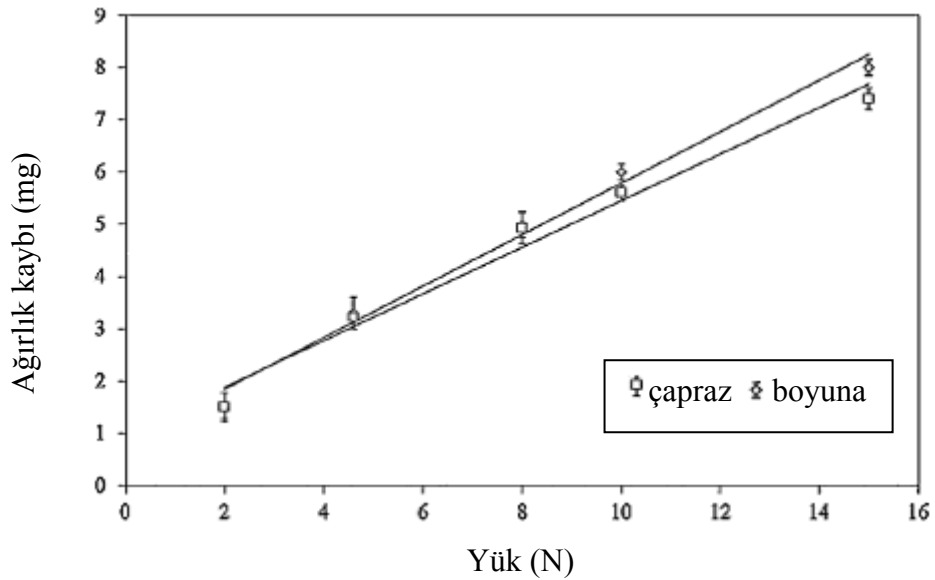
Kumlama makinaların da kullanılan yüksek kromlu beyaz dökme demirden üretilmiş türbin paletlerinin Al_2O_3 abrasiv aşındırıcı kağıdı karşısındaki aşınma davranışları incelenmiştir. Kimyasal bileşimleri farklı olan 5 farklı türbin paletlerinden elde edilen numuneler; 200dev/dak sabit hızda, 10, 25 ve 40 N'luk yüklerde, 60, 90 ve 120m'lik yollarda aşındırılmış ve aşınma davranışları belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda yük artışı ve aşındırma mesafesine bağlı olarak %3,3 C, %15,1 Cr ve %2,5 Mo içeren numune ile %3,3 C, %18,5 Cr %1,5 Mo içeren numunenin en az aşındığı, buna karşın en fazla aşınmanın %2,94 C, 16,7 Cr ve 1,2 Mo içeren numunede olduğu gözlenmiştir. İncelenen 5 farklı kimyasal bileşime sahip numunelerden en fazla aşınan numunenin, Cr/C oranının en yüksek değerde olduğu görülmüştür [75].

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlere Nb, B, Ce, La, Nd gibi elementler alaşımlayıcı olarak katıldıklarında, dökme demirin aşınma davranışını önemli derecede etkilerler. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlere (%15 Cr) niyobyum ilavesi son derece sert NbC karbür oluşturarak matris sertliğini arttırmışından dolayı aşınma direncini artırır. NbC' ün morfolojisi blok-çengel seklindedir. Bu şekildeki karbürler matris içinde sıkıca tutunabilirler. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlere (%28Cr) bor ilavesi sert karbürlerin oluşumunu sağlar, karbürlerin hacim oranını artırır, döküm halinde karbürleri kalınlaştırır ve martensit oluşumunu iletir. %0,2 B ilavesi, 1050°C sıcaklıktan havada su verme şartlarında iki elemanlı abrasif aşınma durumunda aşınma direncini önemli derecede iyileştirir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlere %0,3'e kadar titanyum ilavesi yapıdaki VC ve NbC' lerin şeklini

değiştirir. Yüksek sıcaklıklarda birincil ve ötektik karbürler olarak çekirdeklenmiş birçok ince TiC çökelir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde Ce, La ve Nd elementlerinin içeriği arttırıldığında, M_7C_3 karbürlerinin hacim oranı azalmasına rağmen, bu elementlerin içeriği %0,26' yı aşmamak şartıyla aşınma direncini artırır [10].

Coronado'nun %5,13 C, %7,39 Cr, %0,22 Si, %0,47 Mn, %0,008 S içeren beyaz dökme demirde karbür oryantasyonu ve uygulanan yükün aşınma dayanımı üzerindeki etkilerini incelediği çalışmada[35], çapraz ve boyuna yönlenmiş karbürlere sahip beyaz dökme demirde uygulanan yükün artması ile ağırlık kaybının arttığı, 10N ve daha fazla yük uygulamalarında çapraz M_3C karbürlere sahip beyaz dökme demirin aşınma direncinin boyuna M_3C karbürlere sahip beyaz dökme demirden daha yüksek olduğunu açıklamışlardır, Şekil 5.1.

Çapraz ve boyuna yönlenmiş karbürlere sahip beyaz dökme demirde uygulanan yükün artması ile ağırlık kaybının arttığı 10N ve daha fazla yük uygulamalarında çapraz M_3C karbürlere sahip beyaz dökme demirin aşınma direncinin boyuna M_3C karbürlere sahip beyaz dökme demirden daha yüksek olduğu Şekil 5.1'de görülmektedir [35].



Şekil 5.1. Uygulanan yük ve ağırlık kaybı arasındaki ilişki [35]

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin aşınma dayanımlarını artırmak için aşınma yüzeylerine WC takviye elemanlı komposit tabakaların kullanıldığı ve WC-demir ara yüzeylerin SEM, EDX ve XRD analizleri ile incelendiği araştırmada, inklüzyon, çatlak, gaz boşluğu gibi hataların olmadığı, WC partiküllerinin homojen şekilde komposit tabakaya dağıldığı ve demir matris ile sıkı bir bağ kurduğu tespit edilmiştir [76].

A35 gri dökme demir ve beyaz dökme demirin sürtünme ve aşınma davranışlarının incelendiği bir çalışmada, beyaz dökme demir sertliğinin yüksek olmasından dolayı daha az aşınma oranının görüldüğü ve gri dökme demirin yüzeyinde oluşan grafit lamellerinden dolayı düşük sürtünme katsayısının elde edildiği belirtilmiştir [77].

5.2. Aşınmaya Etki Eden Faktörler

Aşınmayı etkileyen çeşitli faktörler sistemin durumuna ve kullanılan yere göre değişik şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu faktörler aşağıda dört farklı ana grup halinde verilmektedir [15].

1. Ana malzemeye bağlı faktörler.

- Malzemenin kristal yapısı,
- Malzemenin sertliği,
- Elastisite modülü,
- Deformasyon davranışı,
- Yüzey pürüzlülüğü,
- Malzemenin boyutu.

2. Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi.

3.Ortaman etkisi.

- Sıcaklık,
- Nem,
- Atmosfer.

4. Servis koşulları.

- Basınç,
- Hız,

- Kayma yolu.

5.3. Aşınma Mekanizmaları

Aşınma olayını meydana getiren unsurların farklı durumlarına göre değişik kombinasyonları değişik aşınma tiplerinin ortaya çıkmasına neden olur. Aşınma, malzemelerin cinsi, yağlayıcı tipi, sıcaklık, yük, malzemenin işlenme şekli ve sertlik gibi parametrelerin değiştirilmesinden etkilenmektedir [71].

Aşınmanın oluşması ve sürekliliği için gerekli faktörlerin tribolojik sistem içerisinde yaptığı kimyasal ve fiziksel etkilerin iletilmesine göre on çeşit aşınma mekanizması vardır[3];

- 1-Adhesiv aşınma
- 2-Abrasiv aşınma
- 3-Yüzey yorulma aşınması
- 4-Eroziv aşınma
- 5-Kavitasyon aşınması
- 6-Öğütmeli aşınma
- 7-Oyuklanma kalkma aşınması
- 8-Kazımalı aşınma
- 9-Korozif aşınma
- 10-Pin on disk aşınma

5.3.1. Adhesiv aşınma

Adhesiv aşınma en çok karşılaşılan aşınma türüdür. Bu aşınmada, birbiriyle temas halinde bulunan iki metalin yüzeyleri arasında, yüksek basınç ve sıcaklık yükselmesinden dolayı, bir kaynama meydana gelir. Çalışma esnasında bu kaynaklar birbirlerinden ayrılırken yüzeylerinden ufak parçacıklar kopar. Bu şekilde oluşan aşınma adhesiv aşınmadır.

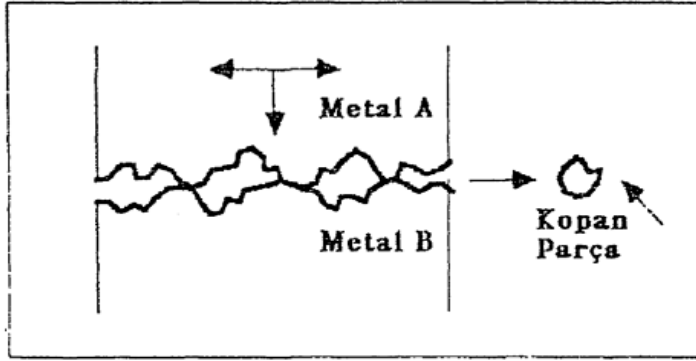
Adhesiv aşınma en çok benzer kristal kafes yapılı malzemelerde görülür. Benzer kristal yapısına sahip metallerin, hareket ve sürtünme sonucu sıcaklığın artmasıyla birlikte yüzeylerinde kaynama daha kolaydır. Buradaki kaynama, yüksek sıcaklıklarda meydana gelen bir birleşmedir. Adhesiv aşınma durumunda temas bölgelerindeki sıcaklıklar düşük olabilir.

Birbirleriyle temas halinde bulunan metaller, yüzeylerindeki pürüzler vasıtasıyla etkileşirler. Çok düzgün yüzeylerde bile bu durum söz konusudur. Metalin ağırlığında veya herhangi bir yükleme durumunda, pürüz tepelerinde meydana gelen gerilme sonucu plastik deformasyon oluşur. Malzemenin deforme edilebilirliği kolay ise temas alanı artarak bütün yüzeye dağılır. Bu durumda yüzeylerde bulunan absorbe olmuş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanarak, malzeme moleküllerinin direk temas etmelerine imkan verir. Böylece temas noktalarında soğuk kaynak bölgeleri oluşur. Bu bölgeler izafi hareket durumunda, sürtünme kuvvetinin etkisiyle kırılarak yüzeyler arasında taşınır. Sürtünme esnasında malzemelerin yüzeylerinde meydana gelen kaynak bağlarının kırılması, tam temas yüzeyinde meydana gelirse, malzeme kaybı olmaz. Fakat kırılmanın temas yüzeyinin uzağında, herhangi birinin içinde olması durumunda, kırılan parçacıklar bir yüzeyden diğer yüzeye geçerek malzeme transferi oluşturur [3. 67, 70, 72, 78].

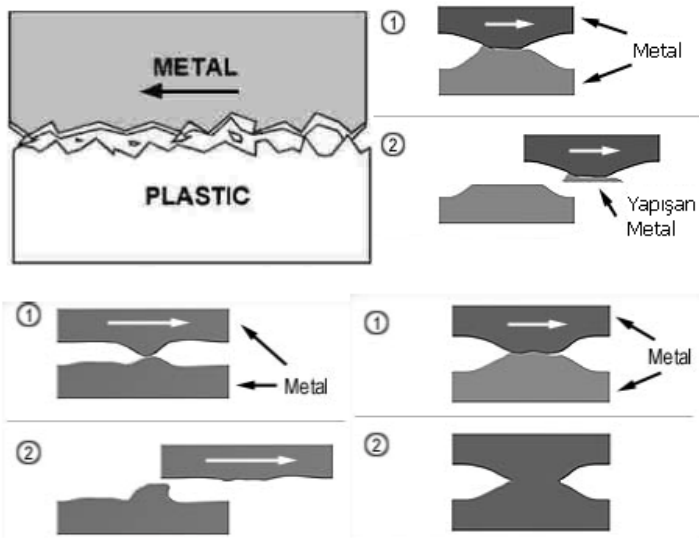
Yapılan çalışmalar [15, 70] adhesiv aşınmanın bazı genel özelliklerinin belirlenmesinde faydalı olmuştur. Bu özellikler;

- 1-Aşınma miktarı normal yükle orantılıdır.
- 2-Aşınma miktarı kayma mesafesi ile orantılıdır.
- 3-Aşınma miktarı aşınan yüzeyin sertliği ile orantılıdır.

Bu çalışmalar, gösterilen parametrelerin değiştirilmesine bağlı olarak, bir çok aşınma probleminin çözülebileceğini göstermektedir. Metalografik çalışmalar sonucunda belirlenen başlıca özelliklerden biri de malzeme taşınımının yumuşak metal yüzeyinden sert olan metal yüzeyine doğru olmasıdır. İki metalin sürtünmesi esnasında yüzeyden parça kopması ve adhesiv aşınma örneği Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de görülmektedir.



Şekil 5.2. Metal-Metal sürtünmesi esnasında yüzeyden parça kopması [15]



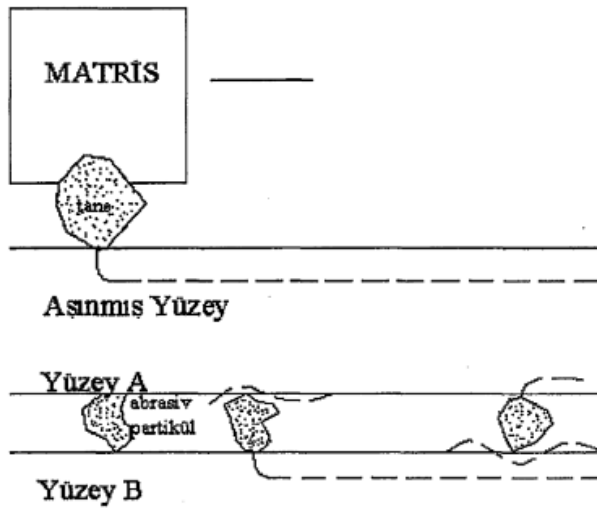
Şekil 5.3. Adhesiv aşınma örneği (Yapışma Aşınması) [15]

Adhesiv bağın oluşumu yüzey sertliği tarafından etkilenir. Yüzey sertliği azaldıkça yük altındaki deformasyon artacak, yüzey film tabakası daha kolay hasar görecektir. Bu sonuç ise yüzeyler arasındaki adhesiv bağın güçlenmesine yol açacaktır [3.72].

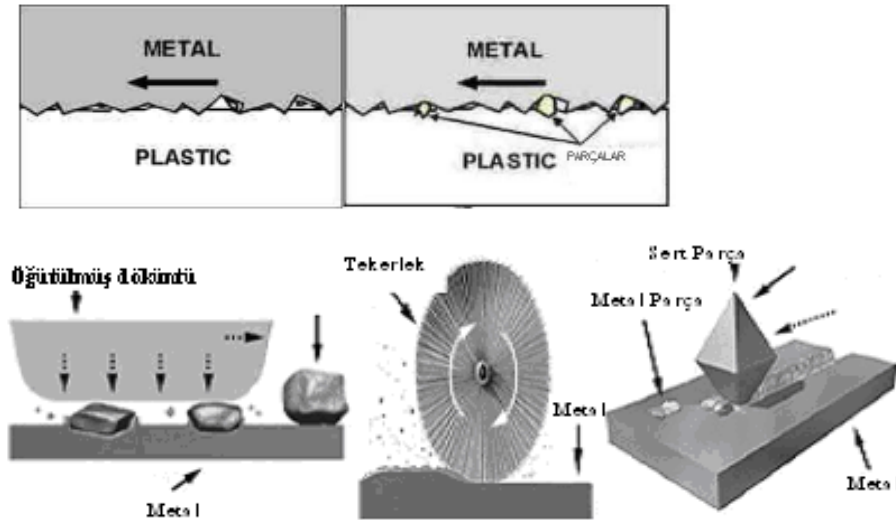
5.3.2. Abrasiv aşınma

Abrasiv aşınma, sürtünme çiftlerinden daha sert olanının karşı sürtünme elemanı içerisine yüzey pürüzlülüğü mertebesinde girerek, izafi hareket esnasında çizmesi ve mikro talaşlar kaldırması olayıdır. Aynı etkiler karşı sürtünme elemanı yerine daha önce elemanlardan ayrılan aşınma parçacıkları tarafından da yapılabilir. Bu

bakımdan, çoğu zaman soğuk deformasyon sonucu sertleşmiş aşınma parçacıkları uzaklaştırılmayan ya da metalik veya seramik çevre tozlarından korunmayan teknik sistemlerde çok yüksek bir aşınma beklenmektedir. Abrasiv aşınma mekanizmasının diğer aşınma mekanizmalarından farkı, kısa sürtünme süreçlerinde bile kendisini göstermesidir[67, 71, 72, 78]. Abrasiv aşınma mekanizması ve örneği Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de verilmiştir.



Şekil 5.4. Abrasiv aşınma mekanizması [15]



Şekil 5.5. Abrasiv aşınma örneği [5]

Abrasiv aşınma iki cisimli ve üç cisimli abrasiv aşınma olmak üzere iki şekilde meydana gelir. İki cisimli abrasiv aşınma, sert ve pürüzlü bir yüzeyin, kendinden daha yumuşak bir malzeme ile temas ettiği durumda , kuvvet ve meydana gelen

basıncın etkisiyle, yumuşak malzeme yüzeyinde oluşan çizilme ve küçük parçacıkların kaldırılması suretiyle meydana gelen deformasyondur. İki cisimli abrasiv aşınmaya kazı makinelerini, toprak işleme aletlerini, eğeleme ve zımparalama işlemini örnek olarak verilebilir [3, 71].

Üç cisimli abrasiv aşınma, metal-metal sürtünmesi durumunda adhesiv veya iki cisimli abrasiv aşınma olarak devam eder. Bu aşınmada iki metal arasına sert tanecikler girerek, malzeme yüzeylerinde çizikler oluşturarak aşınmayı meydana getirir. Araya giren tanecikler toz, kum, mikro talaşlar ve parçalanmış oksit parçaları v.b. olabilir. Üç cisimli abrasiv aşınmanın aşınmayı hızlandırdığı tespit edilmiştir. Bu nedenle sert taneciklerin araya girmesine engel olunmalıdır [3].

Abrasiv aşınma direnci

1. Artan sertlik
2. Azalan deformasyon sertleşme hızı
3. Ana fazdan daha sert, tok, elastik modülü yüksek ve iri boyutlu partiküller aşınma direncini arttırır.
4. Yabancı partiküller aşınma direncini arttırabilir [70].

Kumlama makinelerin da kullanılan yüksek kromlu beyaz dökme demirden üretilmiş türbin paletlerinin SiC ve Al_2O_3 abrasiv aşındırıcı kağıdı karşısındaki aşınma davranışları incelenmiştir. Kimyasal bileşimleri farklı olan 5 farklı türbin paletlerinden elde edilen numuneler 10, 25 ve 40 N'luk yüklerde, 60, 90 ve 120m'lik yollarda aşındırılmış ve aşınma davranışları belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda kullanılan aşındırıcının ikisinde de %3,3 C, %15,1 Cr ve %2,5 Mo içeren numunenin en az aşındığı, buna karşın en fazla aşınmanın %2,94 C, 16,7 Cr ve 1,2 Mo içeren numunede olduğu gözlenmiştir. İncelenen 5 farklı kimyasal bileşime sahip numunelerden en fazla aşınan numunenin, Cr/C oranının en yüksek değerinde olduğu görülmüştür [79].

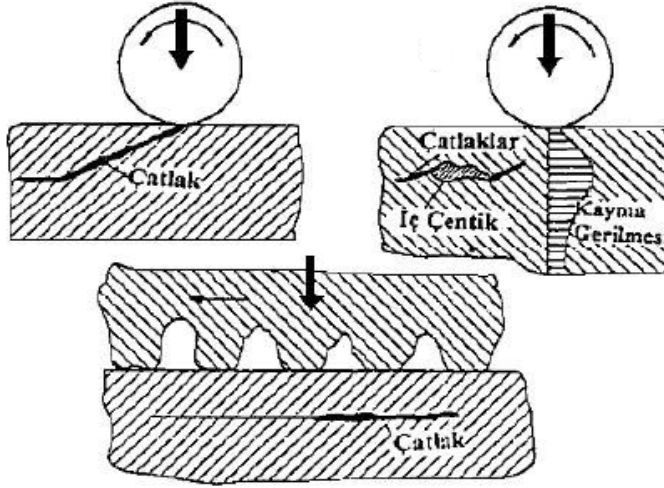
Ball-cratering test yöntemi kullanılarak sade çelik ve %27 Cr içeren beyaz dökme demirlerin üç boyutlu aşınma dayanımları araştırılmıştır. 200 mikrondan daha büyük cam boncuklar, silis kumu, kuvars ve alümina aşındırıcı parçacıklar kullanılmıştır. Tüm aşındırıcı parçacıkları ile yapılan testlerde, %27 Cr içeren beyaz dökme demirin aşınma oranları kayma zamanı ile sabit iken sade çeliğin aşınma oranları kayma zamanı ile arttığı bulunmuştur. Silika kum miktarının artması ile aşınma numunesinin sertliği arttığı ve mikroyapıdaki karbürlerin boyutlarının düştüğü tespit edilmiştir. Küçük boyuttaki silika kum partikülleri, büyük boyutlu silika kum partiküllerinden daha az aşınmaya neden olmuştur. Aynı boyutlarda silika kum ve kuartz partikülleri kullanıldığında açılı kuartz partikülleri, yuvarlak silika kum partiküllerinden daha çok aşındığı gözlenmiştir [80].

5.3.3. Yüzey yorulma

Yüzey yorulması; yüksek basınç altında çalışan parçalarda fazla sayıda yük tekrarlarının ardından, ya yüzey altında gelişen çatlakların yüzeye doğru büyümesi ya da yüzeydeki çatlakların gelişip yüzey altındaki çatlaklarla birleşmesi sonucu yüzeyden malzeme parçacığının kopup ayrılması ile oluşan bir aşınma şeklidir. Yetersiz yağlama nedeni ile ortaya çıkan aşınma hasarlarından farklıdır. İyi yağlama şartlarında bile görülebilir [70].

Benzer bir aşınma şekli de iri parçalar halinde kırılan gevşek malzemelerde görülür. Olay özellikle rulmanlar, dişli çarklar, kam mekanizmaları gibi makine elemanlarının da, yani yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde çıkar ve esas olarak bir malzeme yorulması sonucudur. Bu elemanlarda temas alanları küçük olduğundan yüzeylerde Hertz yüzey basınçları meydana gelir. Bu çeşit basınçların etkisi altında yüzeylerin hemen altında kayma gerilmeleri oluşur. Değişken zorlanma nedeniyle malzemenin yüzeyinde bir yorulma olayı başlar. Maksimum kayma gerilemelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına da bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Zamanla bu boşluklar yüzeye doğru hareket etmekte, büyümekte ve yüzeyde küçük çukurcuklar meydana getirmektedir. Tekrarlı gerilmeler genelde elastik sahada değiştiğinden bu tür yorulma uzun ömürlü

yorulmadır. Yorulma aşınmasına pitting te denilmektedir. Genellikle dişli çark mekanizmaları, araçların kam mili mekanizmaları, rulmanlı yataklarda, demir yolu raylarında, soğuk ve sıcak haddelemede, sirkülasyon pompaları gibi makine elemanlarında görülmektedir. Şekil 5.6.'da yorulma aşınması oluşum mekanizması görülmektedir [3,15, 67, 70].

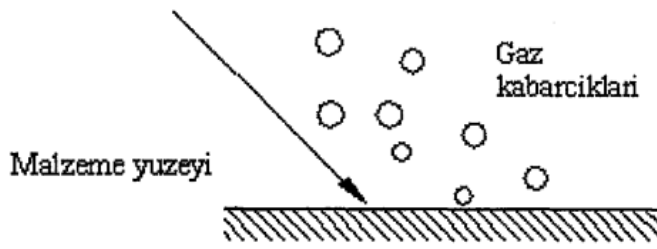


Şekil 5.6. Yorulma aşınması oluşum mekanizması [70].

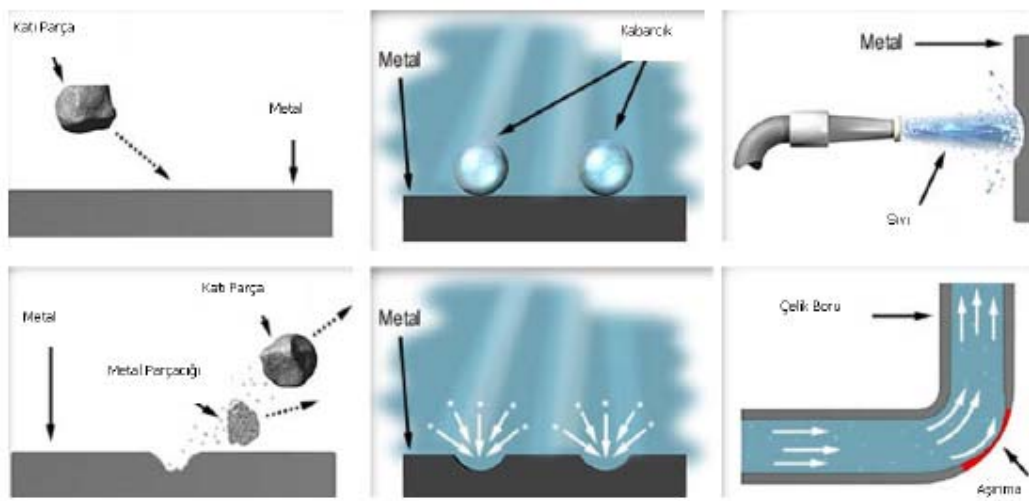
5.3.4. Eroziv aşınma

Eroziv aşınma, ortam ile malzeme yüzeyi arasındaki hızın çok yüksek olması nedeniyle meydana gelen bozunma olayı olarak tarif edilmektedir. Gaz veya sıvı ortamında taşınan abrasiv tanelerin yüzeye belirli bir açıda çarpmasıyla oluşan enerji, katı cismin basınç mukavemetini aştığı zaman cismin yüzeyinde plastik deformasyon meydana getirerek yüzeyde kırılmalara sebep olur. Bunun sonucu yüzey aşınır. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya erozyon aşınması denir. Aşındırıcı parçaların büyüklüğü, hızı şekli, sertliği ve çarpma açısının değeri erozyon aşınma mekanizmasını etkileyen önemli faktörlerdir [3, 71]

Bu aşınma türü pompalarda, gemi pervanelerinde, fanlarda, nozullar da, boruların ve tüplerin dirsek veya keskin kıvrımlarında ve bunlara benzer koşullarda çalışan proseslerde yaygın olarak meydana gelir. Sıcaklık ve akış hızı arttıkça, aşınma hızlanır [15, 69]



Şekil 5.7. Eroziv aşınmanın şematik gösterilişi [15]



Şekil 5.8. Eroziv aşınma örneği [15]

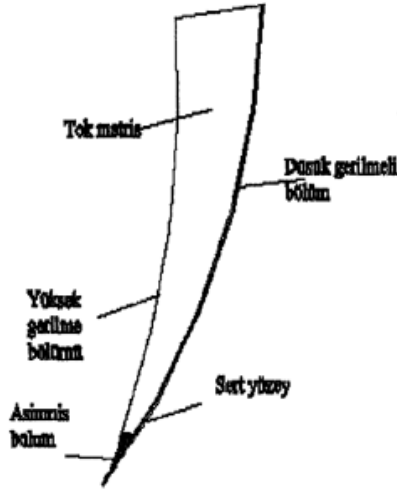
5.3.5. Kaviteasyon aşınması

Kaviteasyon aşınması, izafi hareket halinde bulunan bir sıvı ile katı bir cisim arasında meydana gelir. Sıvı içinde bulunan zerreciklerin basıncı, buharlaşma basıncından daha düşük bir ortamdan geçerken, zerreciklerin çarpması sonucu kaviteasyon meydana gelir. İç ve dış yüzeyler arasındaki basınç farkı ve yüzey enerjisi, sıvı içinde bulunan zerreciklerin kararlılığını etkilediğinden bu değerlerin mümkün olduğu kadar düşük olması istenir, katı cismin yüzeyinde meydana gelen bozunum bu sayede azalmış olur [3].

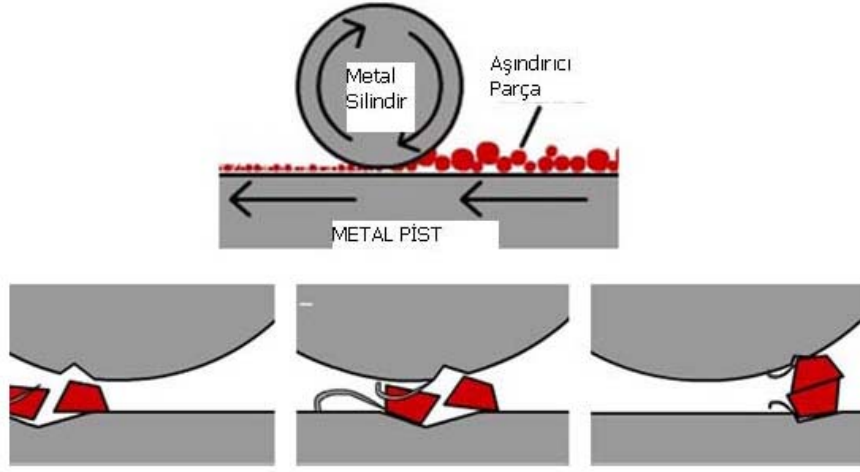
Bu tür aşınmanın görüldüğü yerler genel olarak; su türbini çark kanatlarında, deniz taşıtı pervanelerinde, pompa çarklarında, boru dirseklerinde, su ve kalorifer borularında vs. gibi yerlerde görülür [15, 70].

5.3.6. Öğütmeli aşınma

Öğütmeli aşınma, yüksek basınçlar altındaki partiküllerin metal yüzeyleri ile düşük hızlarda karşılaşmaları sonucunda, metal yüzeyinden parçacıkların kesilerek veya çok sayıda ufak çizikler açılarak kopartılması ile meydana gelir. Bu yüksek basınç ve düşük hız kombinasyonu, genellikle hafriyat çalışmalarında kullanılan buldozer ve kepçe gibi ağır iş makinelerinin çalışma koşullarında meydana geldiği için, bu araçların kesici uç yüzeylerinde bu hasar türü gelir. Kepçelerde kullanılan kesici ve batıcı uçların, öğütmeli aşınma sonucunda şekil değişimi meydana gelerek körlenme oluşur. Öğütmeli aşınmaya diğer bir örnek ise, bilyeli değirmenler olarak gösterilebilir. Şekilde görüldüğü gibi, kemirici takım malzemesinin düşük gerilmeli yüzeyine sert metal takviyesi yapılarak aşınma hızı azaltılmıştır. Diğer yüzeyde ise hem malzeme sertliğinin düşük olması, hem de yüksek gerilme etkisinde kalması nedeniyle aşınma hızı, diğer yüzeye göre daha fazladır. Meydana getirilen bu farklı aşınma hızları nedeniyle, malzeme kendi kendine keskinleşir [15, 69].



Şekil 5.9. Bir kemirici uçta meydana gelen kendi kendine bilenmenin oluşum mekanizması [15]

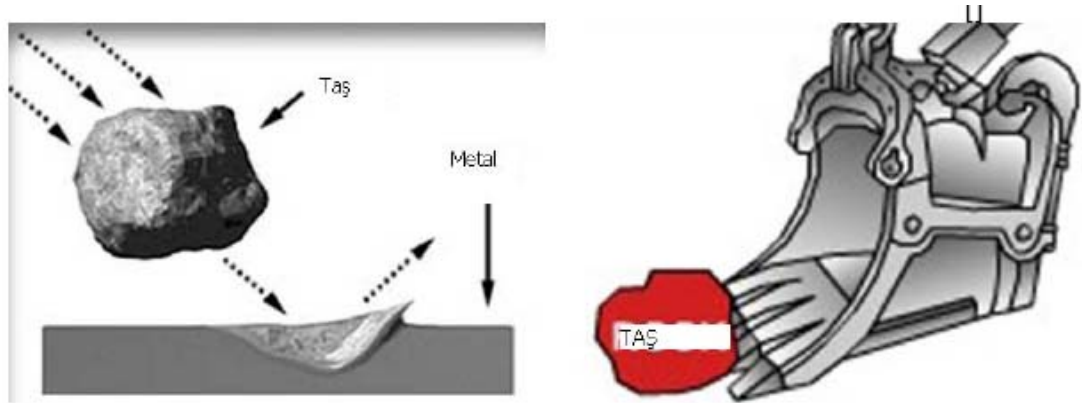


Şekil 5.10. Öğütmeli aşınma örneği [15]

5.3.7. Oyuklanma ve kalkma aşınması

Oyuklanma bir aşınma mekanizması olarak düşünülmektedir ve metal yüzeyinin yorulması sonucu ortaya çıkan bir hasardır. Oldukça düşük gerilmeler altında yapılan hızlı uygulamalarda metal yüzeyinde oyuklara benzer bir çok boşluk meydana gelebilir. Yüzeyin yorulma kusurunun karakteristiği normal yorulmadan bazı farklılıklar içermektedir. Birinci farklılık, yüzey yorulması kütleli yorulma dayanım sınırını göstermez. Çatlaklar yüzeyin hemen altında, maksimum Hertz gerilmesine ulaşıldığı, zaman, yüzeyin altında bulunan bir inklüzyon köşesiyle birleşerek gerçekleşmektedir. Son teknolojik gelişmelere bağlı olarak çok temiz malzemelerin üretilmesiyle malzemedeki inklüzyon sayısı düşürülebilmektedir. Çalışmalar inklüzyon dokusunun, segregasyonun, bant teşekkülünün ve kalıntı östenit miktarının oyuklaşmayı etkilediğini göstermiştir.

Yuvarlanma veya kayma şeklinde yüzey hareketinin yüzeyde oluşacak çatlağın yüzeyde mi, yoksa yüzeyin hemen altından mı başlayacağı hakkında bize bilgi vermektedir. Yalnızca yuvarlanma, yüzeyin hemen altında maksimum kayma gerilmesi ortaya çıkartmaktadır. Buna ilaveten yüzeye kayma işleminin uygulanması yüzeyde maksimum kayma gerilmesinin oluşumuna yol açmaktadır [15, 69]

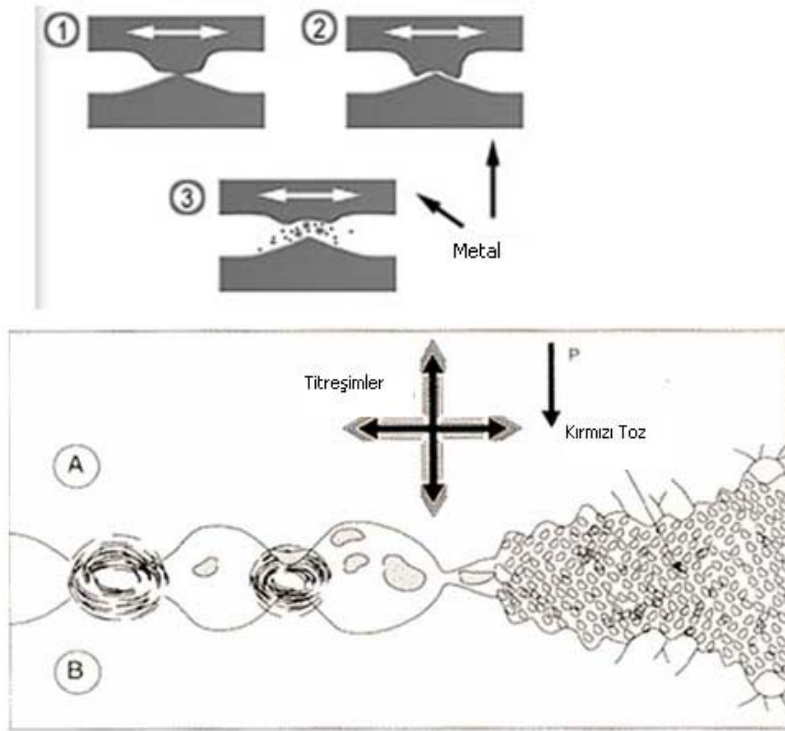


Şekil 5.11. Oymalı aşınma örneği [15]

5.3.8. Kazımalı aşınma

Kazımalı aşınma, karşılaşılan yüzeylerde mikro kaynaşmanın meydana geldiği adhesiv aşınmaya bir miktar benzemektedir. Aralarındaki fark ise, şu şekilde açıklanabilir: Adhesiv aşınma, birbirleri üzerinde kayan yüzeylerde meydana gelirken, kazımalı aşınma birbirlerine göre hareket etmeyen yüzeylerde meydana gelir. Ancak kazımalı aşınma, çok düşük genlik hareketlerin (vibrasyon) meydana geldiği sistemlerde, mikro kaynaşmanın oluşmasıyla meydana gelir.

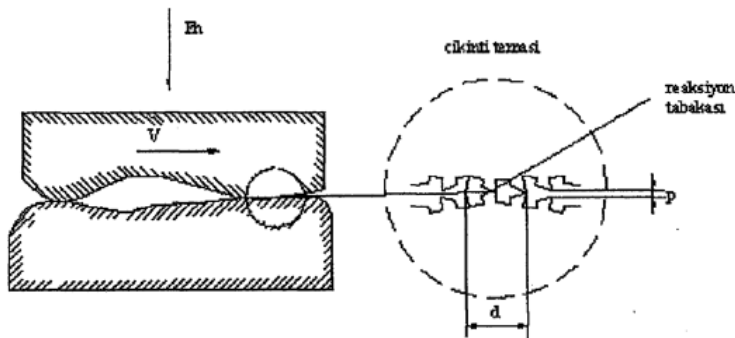
Kazımalı aşınma vibrasyonlu ortamlarda çalışan somun, perçin gibi bağlantı elemanlarıyla birleştirilmiş sistemlerde, otomobil şaftlarının birleşme noktalarında ve yataklara en yaygın olarak rastlanılan hasar oluşum mekanizmasıdır. Kazımalı aşınma, temas yüzeylerinde yorulma çatlağının başladığı şaft gibi parçalarda önemli bir problemdir. Şekil 5.12'de, bir otomobil şaftında meydana gelen kazımalı aşınma görülebilir. Gerçekte, şaftlarda meydana gelen yorulma kırılmalarının sebebini kazımalı aşınma meydana getirmektedir.



Şekil 5.12. Kazımalı aşınma örneği [15]

5.3.9. Korozyif aşınma

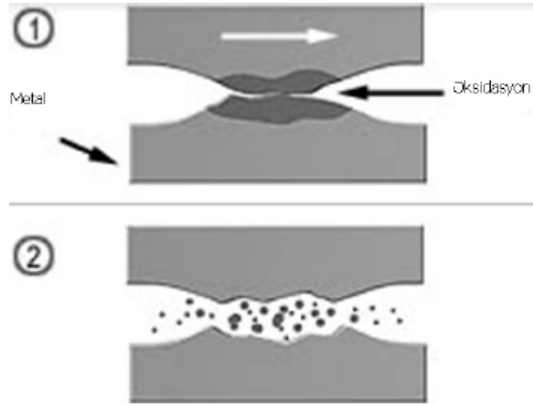
Kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan ve özellikle metallerde etkili olan bir aşınma türüdür. Korozyon diğer aşınma mekanizmalarından farklı olarak, kimyasal korozyon, elektrokimyasal korozyon ve sürtünme oksidasyonu gibi farklı şekillerde karşımıza çıkmaktadır. Korozyif aşınma genellikle aşınmanın hafif bir şeklidir, fakat yüksek sıcaklıklarda ve nemli ortam içersinde aşırı bir hal alabilir. Korozyif aşınmada, aşınma olayı iki kademedeyi gerçekleştirmektedir. Bu durum Şekil 5.12'de belirtilmiştir [15, 71].



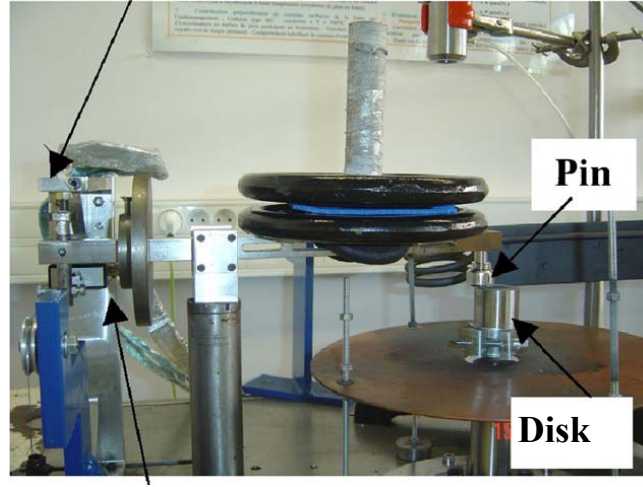
Şekil 5.13. Korozyif aşınma mekanizması [15]

- 1) Temas halindeki yüzeyler ortamla reaksiyona girerler ve yüzeyde reaksiyon ürünlerinden oluşan bir tabaka meydana gelir.
- 2) Daha sonra, temas noktasında çatlak oluşumu ve/veya abrasiv etkilerden dolayı reaksiyon tabakası hasara uğrar.

Tribo oksidasyon aşınması adı da verilen koroziif aşınma durumunda, ana malzeme ile karşı malzeme arasındaki tribolojik zorlanmalardan dolayı meydana gelen kimyasal reaksiyon etkindir. Malzeme yüzeylerinin hava ile reaksiyona girerek oluşturduğu yüzey tabakaları (oksit tabakası) aşınmayı azaltmasına rağmen, bu yüzey tabakalarının tribo oksidasyon sonucu özelliklerinin değişmesi, aşınmayı hızlandırmaktadır. Yağ gibi kimyasal maddeler bulunan ortamda çalışan makine parçalarının yüzeylerinde oluşan yüzey tabakalarının bir kısmının tribolojik zorlamalarla kırılması ve aşındırıcı parçacıklar oluşturması aşınmayı artırır. Tribooksidasyon aşınması özellikle metalik malzeme yüzeylerinde görülür. Neticede yüzeyinde çatlaklar oluşur. Bu durum ise, yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur. Bu tür aşınma çoğunlukla taş kırma makinelerinde görülür [3]. Özellikle ambalajlanmış bir şekilde uzun süre bekleyen makinelerin rulmanlı yataklarında ve mil-göbek gibi geçme olan yerlerinde, nakliyat sırasında meydana gelecek küçük sarsıntı ve titreşimler sürtünme oksidasyonunun oluşmasına neden olabilirler [71].



Şekil 5.14. Koroziif aşınma örneği [15]



Resim 5.1. Pin-on-disk düzeneği [6].

Kamyon frenlerinde kullanılan malzemelerin aşınma deneylerinde temas geometrilerinin aşınmaya olan etkisini araştırmak üzere üç değişik cihaz kullanılmıştır. İlk deneyde pin on disk aşınma deney cihazı kullanılmış ancak pin olarak kare bir parça kullanılmıştır. İkinci deneyde radyüslü bir pim kullanılmıştır. Üçüncü deneyde ise block on disk deneyi yapılmıştır [81].

Farklı miktarlarda Polyester Al_2O_3 kompozit malzemelerin aşınma dayanımlarını belirlemek için aşındırıcı olarak 400 numara ($30\mu m$) alüminyum oksit zımparanın kullanıldığı ve aşındırıcı disk kendi eksenini etrafında dönerken aynı zamanda numune tutucuda belirlenen dönme hızında kendi eksenini etrafında döndüğü Pin on disk aşınma deneyinde, saf polyestere katılan Al_2O_3 partiküllerinin katılma oranı ile doğru orantılı olarak aşınma dayanımlarının arttığı görülmüştür [70].

5.4. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerde Abrasiv Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin abrasiv aşınma özelliklerini başlıca iki faktör etkiler. Bunlar beyaz dökme demirin matris yapısı ve bu matriste yer alan karbürlerin yapısıdır [3].

5.4.1. Karbür yapısının abrasiv aşınmaya etkisi

Karbür miktarı arttıkça, darbe şartları olmadığı durumda aşınma direnci de artar. Aşındırıcının sertliği de karbür etkisi bakımından önemlidir. M_7C_3 karbürlerinin sertliğinden (1200-1800 HV) daha düşük aşındırıcılar kullanılırsa en yüksek aşınma mukavemeti %40-50 karbür oranında elde edilir. Fakat aşındırıcılar daha sert olursa bu oran %30 civarına düşer.

Birbirine yakın yerleşmiş karbürler, matrisin desteklenmesi ve matrisin plastik deformasyon kabiliyetini azaltması nedeniyle abrasiv aşınma direnci üzerine faydalı bir etkiye sahiptir. Örneğin, karbürlerin aşındırıcılara direnç gösterecek kadar sert olduğunu düşünürsek ve aşındırıcıların komşu iki karbür arasındaki matris fazına batacak kadar küçük, sert ve keskin olduğu kabul edilirse malzemenin aşınma mekanizması, büyük oranda matris fazı ile kontrol edilecektir. Eğer matris fazı kolayca abrasiv aşınmaya maruz kalıyorsa ve karbür/matris ara yüzeyindeki bağ zayıf ise karbürlere destek azalacaktır. Diğer bir deyişle karbür/matris bağları zayıfsa ve ara yüzeyde yerel gerilmeler çatlak başlangıcına sebep olursa, partikül kopması kaçınılmaz olur [3, 10]

5.4.2. Matris yapısının abrasiv aşınmaya etkisi

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde matris, sert ötektik M_7C_3 tipi karbürleri yerinde tutar. Matris aşınırsa desteksiz kalan karbürler gerilmeler altında kırılır. Kırılan karbürler bazı durumlarda yumuşak matrise gömülerek sert bir yüzey tabakası oluşturur. Bu durum özellikle ferritik matriste etkin olmaktadır. Perlitik matris en düşük aşınma direncine sahip olduğu için beyaz dökme demirlerde perlitik yapı istenmez.

Matrisin aşınma direnci, aşınma sırasındaki gerilmelere bağlıdır. Matrisin bileşimindeki karbon arttıkça mikrosertlik ve buna bağlı olarak aşınma direnci artar. Ancak, düşük gerilmeli aşınma ortamlarında sertlik belli bir değere geldikten sonra mikro sertlik artışı aşınma direncini etkilemez.

Aşınmaya sebep olan gerilmeler yüksek olursa martensitik yapı östenitik yapıya göre iki üç kat daha iyi aşınma direnci gösterir. Martensitik yapı östenitleme işlemi ile sağlandığı için bu işlem sırasındaki reaksiyonlar martensitin yapısı açısından önemlidir [3, 10].

%3,1 C ve %24,5 Cr içeren beyaz dökme demirde matris yapı östenit ve martensit olduğu zaman en mükemmel abrasiv aşınma dayanımının elde edildiği, matris tamamen martensit olduğunda ise aşınmanın hızlı olduğu, aşınma yüzeyindeki plastik deformasyon ve kırılmaların yaygın olduğu belirtilmiştir. Ötektik karbür yönlenmelerinin, yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin aşınma yüzeyindeki aşınma direncinde başlıca rol oynadığı vurgulanmıştır. Uzun eksenli karbürlerin aşınma yüzeyine paralel veya karbürler eş eksenli ve rastgele dağıldıkları zaman elde edilen aşınma direncinin uzun eksenli karbürlerin aşınma yüzeyine dik oldukları durumdan daha fazla olduğu tespit edilmiştir [64].

Ms sıcaklığını aşırı yükseltecek bir işlem martensit karbonunu azaltıp sertliğini düşüreceği gibi aşınma direncini de düşürür. Ms sıcaklığı ile beraber Mf sıcaklığı da düşeceği için mikroyapıdaki kalıntı östenit miktarı artar ve sertlik düşer. Yüksek gerilmeler altında östenit martensite dönüşerek hacimsel genleşmelerin oluşmasına ve bunun sonucu oluşan gerilmeler sebebiyle mikro çatlaklara yol açar [3, 10].

5.5. Aşınma Deneylerinde Ölçüm Yöntemleri ve Kullanılan Aşınma Deney Cihazları

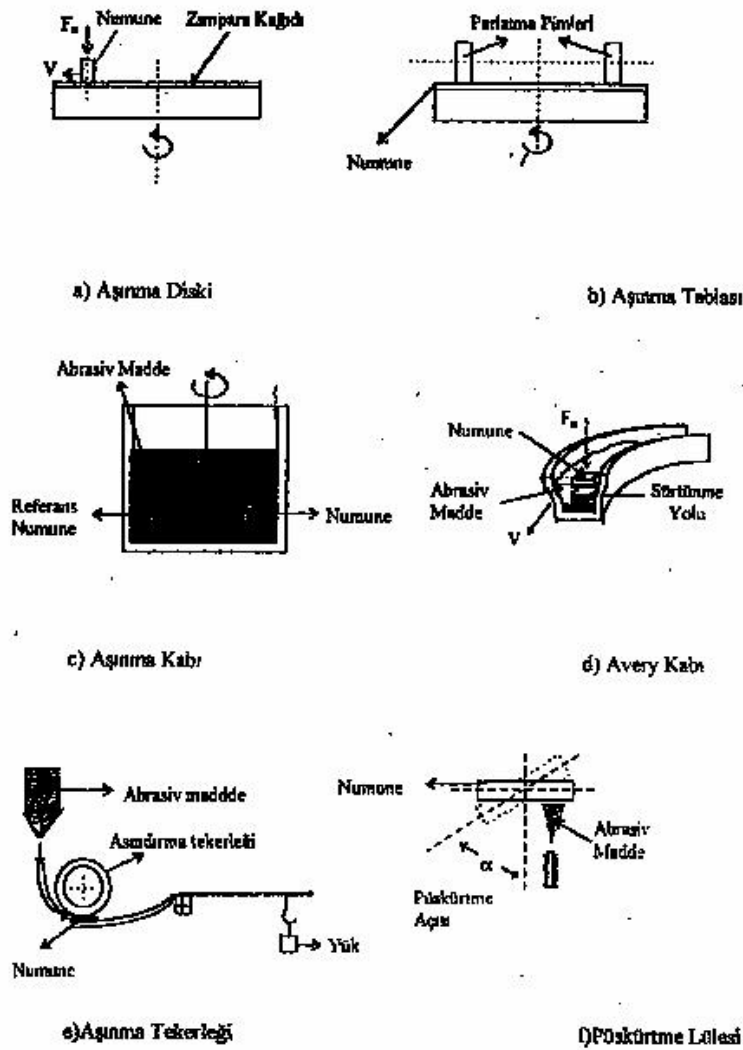
Endüstride kullanılan alet ve ekipmanlarda aranılan en önemli özelliklerden birisi kullanım ömrüdür. Makine parçalarının çabuk aşınması makinenin ömrünü kısaltarak maliyetini artırdığı gibi, onarım için geçen sürede üretimin önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple, makine imalatında aşınmaya maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmaktadır. Malzeme özelliklerinin tespiti için birçok laboratuvar deneylerinin yapılması gereklidir. Laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde, ana malzemenin bir modeli ile çalışılır. Bu model,

basit geometrik şekle sahip olup, fazla bir masrafa gerek kalmadan üretilebilir ve bir deney cihazında standartlara göre her türlü aşınma direncinin tespit edilebilir özelliğini taşıması gerekir [15, 69]. Aşınma deney sistemlerinden en çok kabul göreni abrasiv aşınma için pin-on-disk sistemidir. Aşınma deneylerinde aşınmanın ölçüm yöntemleri olarak bilinen ağırlık farkı, kalınlık farkı, iz değişim ve radyoizotop metotları aşağıda sırasıyla açıklanmıştır [15].

5.5.1. Ağırlık farkı

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesi dahilinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Deney numunelerinin her ölçümü için numunenin yerinden çıkartılıp ölçüm yapılması, diğer bir ifade ile cihaz üzerinde bulunan numune üzerinden ölçü alınamaması, bu yöntemin dezavantajıdır.

Ağırlık kaybının ölçülmesi 104 veya 105 g hassasiyetinde oldukça duyarlı bir terazi ile yapılır. Aşınma miktarı gram veya miligram cinsinden ifade edilirse, metre veya kilometre olarak tespit edilen sürtünme yoluna göre, birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı, (g/km)s (mg/m) ile ifade edilebilir. Ağırlık kaybı, birim alan için hesap edilecekse, (g/cm²) gibi bir birim kullanılabilir. Ağırlık kaybı hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde, yine ağırlık kaybından hareketle, kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığı hesaba katılmak suretiyle birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından gidilerek bulunur. Bu tanımlamalar ışığı altında en çok kullanılan ölçüm metotlarından bir tanesidir [3, 6, 72-74].



Şekil 5.16. Abrasiv aşınma deneylerinde kullanılan yöntemler [69].

Aşınma deneylerinde kullanılan tanımlamalar ışığı altında, en çok kullanılan ağırlık kaybı esasına göre yapılan aşınma deneylerinde kullanılan bağıntılar sırasıyla;

$$W_a = AG/d.M.S \text{ (mm}^3/\text{Km)},$$

$$W_a: \text{Aşınma oranı (mm}^3/\text{N,m)}$$

$$AG: \text{Ağırlık kaybı (mg)}$$

$$M: \text{Yüklemeye ağırlığı (N)}$$

$$S: \text{Aşınma yolu (m)}$$

$$d: \text{Yoğunluk (g/cm}^3\text{)}$$

olarak verilmiştir. Aşınma oranının (W_a) ters değeri de aşınma direnci (W_r) olarak gösterilir.

$$W_r = 4/W_a \text{ (N.m/ mm}^3\text{)},$$

Başka bir bağıntı olarak da, bir kilometre kayma yoluna tekabül eden yükseklik kaybı bağıntısı vardır ki genellikle iki elemanlı abrasiv aşınmanın hesaplanmasında kullanılır.

$$V_s = 104/F.P.S \text{ (}\mu\text{m/km)}$$

V_s : Bir km aşınma yoluna tekabül eden yükseklik kaybı (μm)

AG: Ağırlık kaybı (mg)

F : Aşınma yüzeyi (cm^2)

s :Kayma yolu (km)

olarak alınır. Deney malzemesi yükseklik kaybının, mukayese malzemesinin (örneğin Fe 37 çeliği) yükseklik kaybına oranı, aşınma oranı sayısı (W_s) verir.

$$W_s = V_s \text{ (deney numunesi)} / V_s \text{ (Fe 37 çeliği)}$$

Bu orantı sayısının ters değeri de bağıl aşınma direnci (R) olarak kullanılır.

$$R = 17W_s$$

5.5.2. Kalınlık farkı

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeri ile karşılaştırılması suretiyle elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek, hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır. Kalınlık, hassas ölçme aletleri yardımıyla $\pm 1 \mu\text{m}$ duyarlılıkta ölçülmelidir [3, 15, 69-71].

5.5.3. İz değişimi

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile, geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Deney boyunca bu iz karakteristیک bir boyutunun (çapının) değişimi ölçülür. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet HV veya HB sertlik

ölçme ucudur. Elmas piramit veya bilyenin bıraktığı iz boyutlarındaki değişme mikroskop vasıtasıyla ölçülerek belirlenir [3, 15, 69-71].

5.5.4. Radyoizotop

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya alfa parçacıklarıyla bombardıman edilerek, radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınmanın büyük hassasiyetlerle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarının değiştirmeden ölçü alınabilmesi yöntemin avantajıdır fakat ekonomik olmaması nedeniyle ancak özel amaçlarla kullanılabilir. Özel problemlerin çözümü dışında yaygın olarak kullanılan bir metot değildir [3, 15, 69-71]

5.5.5. Bilgisayar destekli

Bu yöntemlerde aşınma ve aşınma değişkenlerine ait veriler, esas itibarı ile pim disk aşınma test mekanizmasına ilave edilen uygun sensörler vasıtası ile belirlenmektedir. Aşınma kayıpları ve sürtünme katsayısı verileri bilgisayara A/D-D/A kartlar üzerinden aktararak işlenir. Bu veriler, bir paket programla grafik formlara dönüştürülebilir, istatistiksel analizlere tabi tutulabilir ve diğer hesaplamalarda kullanılabilir. Sistemin duyarlılığı, kullanılan sensörlerin ve kontrol kartının voltaj değerindeki lineer sapmaya bağlıdır [70].

Aşınma deneylerinde kullanılan aşınma deney cihazlarından bazıları şunlardır;

- Düzlem üzeri çubuk deney cihazı
- Dört top deney aparatı
- Düzlem üzeri bilye aşınma deney cihazı
- Disk üzeri bilye deney cihazı
- Levha- kayış deney cihazı
- Silindir üstü çubuk deney cihazı
- Çapraz silindir deney cihazı
- Plint TE 97 sürtünme ve aşınma deney cihazı [70].

%26 Cr ve %2,76-3,66 C içeren beyaz dökme demirlerin aşınma davranışlarının incelenmesinde üç ayrı yöntem kullanılmıştır. Düşük stresli aşınma ortamında kuru kum disk testi, yüksek stresli aşınma ortamında Pin aşınma testi ve darbe-aşınma ortamında Silindir üstü çubuk darbe aşınma testi kullanılmıştır [82].

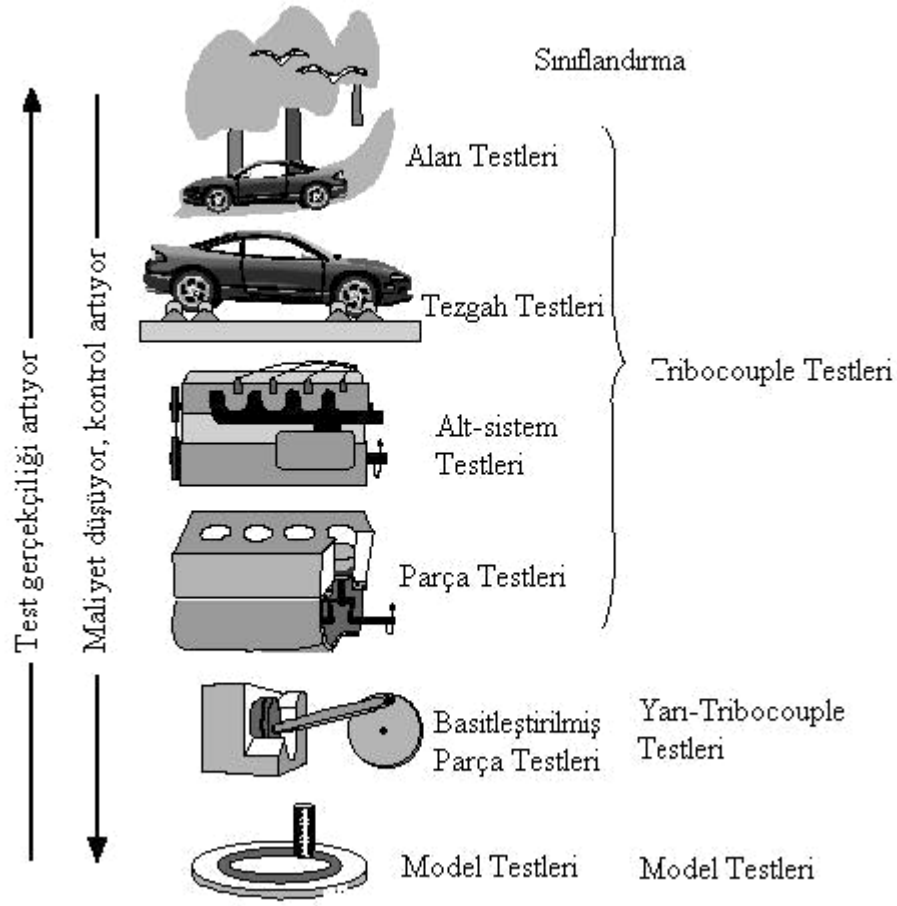
5.6. Tribosistemler

Tribolojinin sözlük anlamı birbiri ile temas eden yüzeyler arasındaki etkileşimi inceleyen bilim ve teknoloji olarak tanımlanmaktadır. Tribolojik araştırmaların amacı yüzey sürtünmelerinin ve aşınmadan kaynaklanan kayıpları azaltmak ve gidermektir. Aşınma tiplerinin çok çeşitli olması ve birçok farklı durumda aşınma probleminin ortaya çıkması, çok sayıda tribotestin gelişmesine neden olmuştur. Genel olarak aşınma araştırmaları şu amaçlarla yapılır;

- a. Sistemlerin ya da sistem elemanlarının verimliliği, ömrü, güvenilirliği, performansı, fonksiyonu, bakım yapılabilirliğinin değerlendirilmesi
- b. Sistem elemanlarının kalite kontrolü
- c. Malzemelerin ve yağlayıcıların tribolojik davranışlarının karakterize edilmesi
- d. Aşınmanın neden olduğu malzeme kayıplarının araştırılması [70].

5.6.1. Tribotestlerin sınıflandırılması

Tribotestler birçok şekilde gerçekleşebilir. Tribolojik test metodlarının en uygun sınıflandırması geçerlilik derecesine göre yapılır. Genellikle testlerde yüksek derecede bir gerçekçilik amaçlanır. Maliyet, test zamanı ve test koşullarının kontrolünün hassasiyeti veya bilimsel çalışmalardan beklenen performansta dikkate alınmalıdır. Birçok değerlendirmede, bir uygulamanın simülasyonu yüksek önceliğe sahip değildir [74].



Şekil 5.17. Tribosistemlerin şematik gösterimi [26].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Malzeme

Deneysel çalışmada kimyasal bileşimi Çizelge 6.1’de verilen ve Ergenekon Çelik San. ve Tic. A.Ş.’den temin edilen yüksek kromlu (yaklaşık olarak %28 Cr) beyaz dökme demir kullanılmıştır. Alaşımın üretimi, 430 paslanmaz çelik hurda şarjıyla elde edilen sıvıya alaşım elementlerinin ferro alaşım şeklinde ilave edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Kimyasal bileşimin belirlenmesinde ARL 3460 model optik emisyon spektrometresi kullanılarak 3 farklı noktadan alınan değerlerin ortalaması alınmıştır. Deneysel çalışmada Çizelge 6.1’de verilen oranların korunmasına özellikle dikkat edilmiştir.

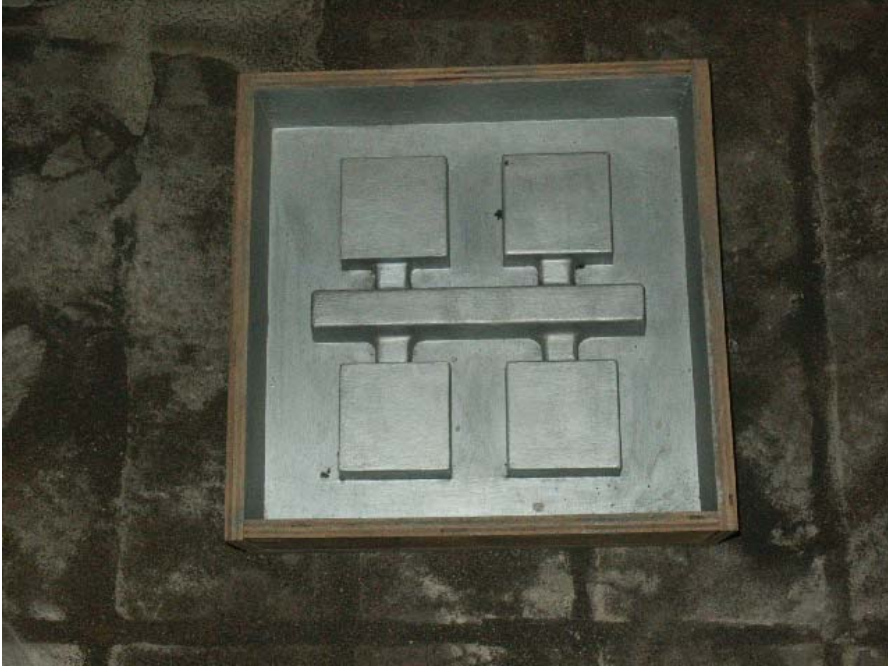
Çizelge 6.1. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin kimyasal bileşimi

Ti, Nb, V, Mg İlave Edilmemiş Numune 1.	Alaşım Elementleri (%)										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Ti
	3,26	0,947	0,561	0,026	0,0011	0,312	28,217	1,45	0,629	0,034	0,006

6.2. Model ve Kalıp

Çalışmada gerekli dökümlerin üretimi için, Ergenekon Çelik San. ve Tic. A.Ş modelhane bölümünde imal edilen 60x60x20mm ölçülerine sahip 4 adet modelin ahşap plakaya bağlandığı plak model kullanılmıştır. Model ölçülerinin ve miktarının belirlenmesinde aşınma ve tokluk özellikleri ve metalografik incelemeler için gerekli numune ölçüleri dikkate alınmıştır. Kullanılan ahşap plak model yolluk sistemi ile birlikte Resim 6.1’de verilmiştir.

Resim 6.2 ve Resim 6.3’de verilen kalıpların üretimi plak modelin “Alfaset Reçine” bağlayıcılı silis kumu ile kalıplanmasıyla gerçekleştirilmiştir.



Resim 6.1. Dökümlerin üretimi için kullanılan ahşap plak model.



Resim 6.2. Alfaset Reçine bağlayıcılı silis kumu ile üretilen kalıplar.



Resim 6.3. Kalıpların döküme hazır görünümü

6.3. Ergitme ve Döküm

Deneysel çalışmalarda kullanılan yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin dökümü Ergenekon Çelik San. ve Tic. A.Ş.'de yapılmıştır. Ergitme işlemi 250 kg kapasiteli INDUCTOTHERM marka indüksiyon ocağında gerçekleştirilmiştir. 430 paslanmaz çelik hurda şarjıyla başlayan ergitme işleminde alaşım elementleri ferro alaşım şeklinde ilave edilmiştir. Sıcaklık kontrollü bir şekilde artırılarak, thermocouple ile döküm sıcaklığı sürekli ölçülmüştür. Kullanılan bilgisayar programı ile hedef kimyasal bileşime ait ergime sıcaklığı 1260°C olarak tespit edilmiştir. Ocaktaki sıcaklığı 1570 °C'ye ulaşan sıvı metal kimyasal analiz sonrası potaya alınmış ve kum kalıplara dökülerek soğumaya bırakılmıştır. Kullanılan potalar paslanmaz çelikten hazırlanmış ve pota refrakter malzemesi olarak Kellundite 85 ras alüminalı astar tercih edilmiştir (Resim 6.4-Resim6.5). Daha sonra soğuyan parçalar yolluklarından ayrılmış ve yüzey temizleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Yüksek kromlu beyaz dökme demirde Ti, Nb, V ve Mg alaşım elementlerinin mikroyapı, mekanik özellikler, aşınma ve darbe direnci üzerine etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada, ergitme işleminden sonra Çizelge 6.1'de kimyasal bileşimi verilen sıvı alaşıma Ti, Nb, ve V %0,5, 1, 1,5 ve 2 oranlarında ve Mg %0,05 ve %0,1 oranlarında

ferro alaşımı şeklinde ilave edilerek toplam 14 ayrı döküm parça üretilmiştir. Elde edilen dökümlerin kimyasal bileşimi Çizelge 6.2’de verilmiştir.



Resim 6.4. Dökümlerde kullanılan pota



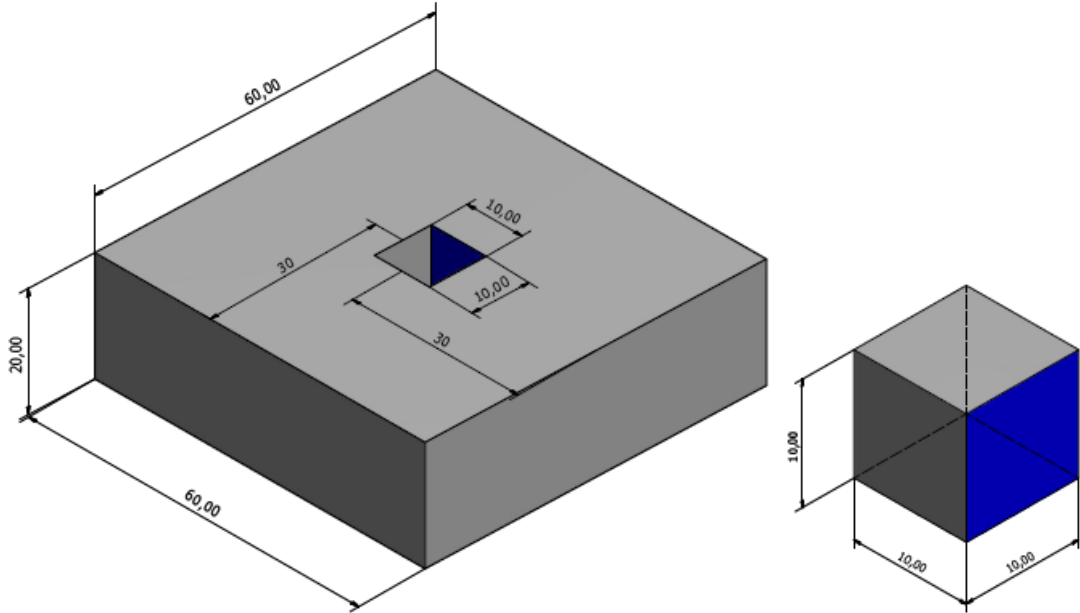
Resim 6.5. Döküm işlemi görünümü.

Çizelge 6.2. Değişik oranlarda (%) Ti, Nb, V ve Mg ilavesi ile üretilen yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin kimyasal bileşimi

İlave Edilmemiş. Numune 1.	Alaşım Elementleri (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	Al	Ti
	3,260	0,947	0,561	0,026	0,0011	0,312	28,217	1,450	0,629	0,010	0,034	0,006
%0,5 Ti ilavesi. Numune 2.	Alaşım Elementleri (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	Al	Ti
	3,262	0,943	0,560	0,026	0,0010	0,315	28,112	1,456	0,628	0,010	0,032	0,513
%1 Ti ilavesi. Numune 3.	Alaşım Elementleri (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	Al	Ti
	3,258	0,949	0,560	0,026	0,0011	0,318	28,100	1,453	0,629	0,010	0,031	0,971
%1,5 Ti ilavesi. Numune 4.	Alaşım Elementleri (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	Al	Ti
	3,259	0,951	0,564	0,025	0,0010	0,315	28,126	1,450	0,628	0,011	0,036	1,519
%2 Ti ilavesi. Numune 5.	Alaşım Elementleri (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	Al	Ti
	3,259	0,955	0,562	0,025	0,0010	0,317	28,206	1,458	0,628	0,011	0,034	2,021
%0,5 Nb ilavesi. Numune 6.	Alaşım Elementleri (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	Al	Nb
	3,261	0,946	0,565	0,025	0,0011	0,315	28,181	1,452	0,626	0,011	0,032	0,522
%1 Nb ilavesi. Numune 7.	Alaşım Elementleri (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	Al	Nb
	3,261	0,952	0,561	0,025	0,0011	0,315	28,114	1,452	0,626	0,011	0,036	1,023
%1,5 Nb ilavesi. Numune 8.	Alaşım Elementleri (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	Al	Nb
	3,257	0,946	0,561	0,025	0,0011	0,315	28,004	1,454	0,624	0,010	0,034	1,510
%2 Nb ilavesi. Numune 9.	Alaşım Elementleri (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	Al	Nb
	3,261	0,952	0,561	0,025	0,0011	0,315	28,145	1,454	0,626	0,011	0,036	1,921
%0,5 V ilavesi. Numune 10.	Alaşım Elementleri (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	Al	V
	3,261	0,944	0,564	0,025	0,0010	0,312	28,211	1,450	0,626	0,011	0,036	0,506
%1 V ilavesi. Numune 11.	Alaşım Elementleri (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	Al	V
	3,257	0,953	0,560	0,024	0,0011	0,312	28,176	1,452	0,624	0,011	0,032	1,074
%1,5 V ilavesi. Numune 12.	Alaşım Elementleri (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	Al	V
	3,261	0,944	0,564	0,025	0,0010	0,312	28,128	1,450	0,626	0,011	0,036	1,506
%2 V ilavesi. Numune 13.	Alaşım Elementleri (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	Al	V
	3,260	0,952	0,562	0,025	0,0010	0,314	28,107	1,450	0,626	0,010	0,038	1,982
%0,05 Mg ilavesi. Numune 14.	Alaşım Elementleri (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	Al	Mg
	3,267	0,947	0,561	0,024	0,0010	0,314	28,206	1,453	0,623	0,011	0,034	~0,05
%0,1 Mg ilavesi. Numune 15.	Alaşım Elementleri (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	Al	Mg
	3,263	0,902	0,564	0,025	0,0010	0,315	28,136	1,450	0,622	0,010	0,037	~0,1

6.4. Metalografik Çalışmalar

Üretilen dökümlerden Şekil 6.1’de verildiği şekilde 10x10x10mm ölçülerinde tel erezyon cihazı kullanılarak mikroyapı numuneleri çıkarılmıştır. Mikroyapı numuneleri sırasıyla 220, 400, 800 ve 1200 mesh su zımparaları ile zımparalamanın ardından 6µm ve 3µm elmas pasta süspansiyonları kullanılarak parlatma işlemi ile metalografik inceleme için hazırlanmıştır. Dağlama işleminde dağlayıcı olarak %4 Nital çözeltisi kullanılmıştır. Mikroyapı karakterizasyon çalışmaları, optik mikroskop aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Mikroyapıların görüntülenmesinde Lecia DFC 320 dijital kamera bağlantılı Lecia DM 4000 M model optik mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 6.1. Döküm parçadan mikroyapı numunesi alınma prensibi

6.5. X Işınları Radyografisi

Mikroyapıda bulunan karbür ve matris yapı tayini X Işınları Radyografi incelemeleri ile TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezinde Shimadzu XRD-6000 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

6.6. Ortalama Karbür Çapının Ölçümü

Deneysel çalışmada kullanılan yüksek kromlu beyaz dökme demirin ilavesiz ve değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş dökümlerin sertleştirme ısı işlemi ve takiben temperleme ısı işlemi sonrası ortalama karbür çapları ölçümü yapılmıştır. Ortalama karbür çapları ölçümü, metalografik inceleme için hazırlanan her bir numuneden optik mikroskopta x100 büyütme kullanılarak 10 ayrı bölgesinden resimler alınmış ve alınan her bir resim üzerinden Lecia Q550 MW görüntü analiz yazılımı kullanılarak aşağıda verilen eşitlik ile belirlenmiştir [45].

$$D = 2\sqrt{\frac{A}{N\pi}}$$

D= Ortalama Karbür Çapı

A= Karbürlerin Alanı

N= Ölçümü Yapılan Mikroyapıdaki Karbür Sayısı

6.7. Isıl İşlemler

6.7.1. Sertleştirme ısı işlemi

Her bir döküm parçadan çıkarılan numuneler, sertleştirme ısı işlemi için atmosfer kontrolsüz ısı işlem fırınında saatte 50°C sıcaklık hızı ile elde edilen 700°C sıcaklıkta toplam 14 saat süre ile bekletme işlemi sonrasında sıcaklık 75°C hız ile 1080°C'ye çıkarılmış ve bu sıcaklıkta 5 saat süre ile bekletilmiştir. Daha sonra numuneler havaya alınıp, lazer ısı ölçer ile numune sıcaklıkları kontrol edilmiş ve numune sıcaklıkları 700°C'nin altına düşene kadar fanla soğutulmuştur.

6.7.2. Temperleme ısıl işlemi

Temperleme ısıl işlemi, numunelerin atmosfer kontrolsüz ısıl işlem fırınında saatte 50°C sıcaklık hızı ile ulaşılan 540°C sıcaklıkta toplam 4 saat süre ile bekletme ve daha sonra havada soğutma işlemleri ile gerçekleştirilmiştir.

6.8. Mekanik Testler

6.8.1. Sertlik testi

Numunelerin döküm halinde, sertleştirme ısıl işlemi ve temperleme ısıl işlemi sonrası sertliklerini belirlemek için Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri Instron-Wolpert marka Diatestor 7551 model sertlik ölçüm cihazında 5 kgf yükte 136° elmas piramit uç kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümlerinde numunelerin döküm yüzeylerinden 3mm aşağı inilerek ölçümler yapılmıştır. Her bir numunenin 5 farklı noktasından sertlik ölçümü yapılarak bu değerlerin ortalaması alınmıştır.

6.8.2. Aşınma testi

Yüksek kromlu beyaz dökme demirin ilavesiz ve değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş, sertleştirme ısıl işlemi ve takiben temperleme ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin aşınma deneyleri Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim Anabilim Dalı'nda yapılmıştır. Aşınma deneylerinde pin-on-disk prensibine dayalı devir kontrollü aşınma cihazı kullanılmıştır. Aşınma numuneleri tel erozyon yöntemi ile döküm numuneden kesilerek elde edilmiştir.

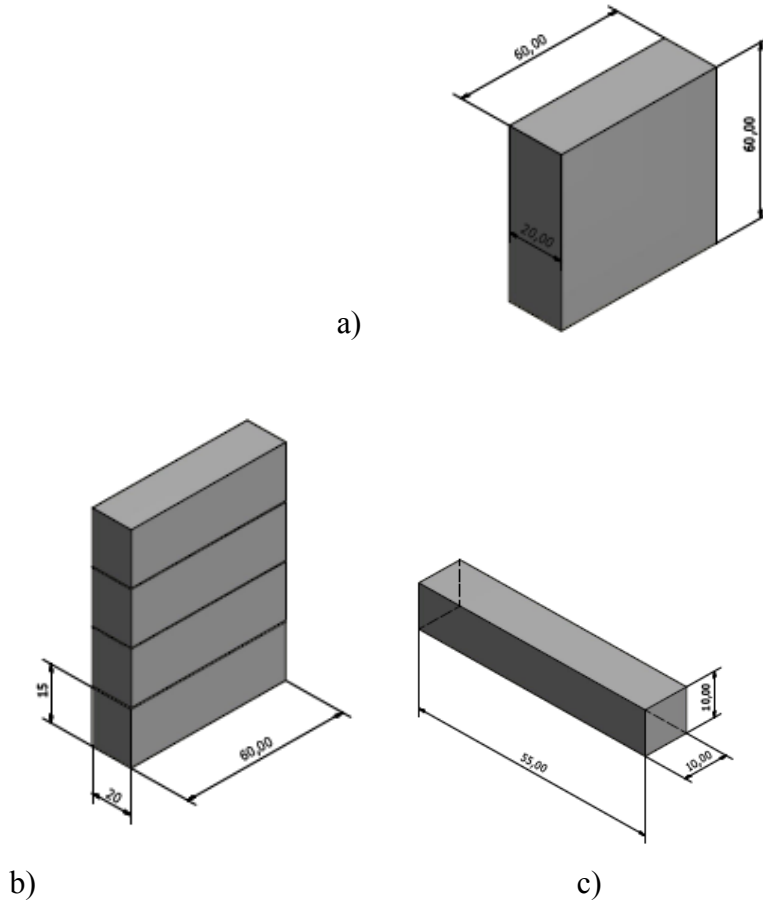
Zımpara kağıdı metoduna göre yapılan deneylerde, abrasiv aşındırıcı olarak 80 numara Al_2O_3 zımpara kağıtları kullanılmıştır. Deneylerde numune, abrasiv aşındırıcı üzerinde aynı noktadan bir kez geçecek şekilde bir yol takip etmiş ve aynı yolları kat etmiştir. Deneyler yükün aşınma davranışına etkisini tespit etmek amacı ile 20N ve 40N olacak şekilde iki ayrı yük altında gerçekleştirilmiştir. Her numune için en az 3

deney yapılmış olup her aşınma testinde ayrı abrasiv aşındırıcı zımpara kağıdı kullanılmıştır.

Ağırlık farkı yöntemi ile numunelerdeki aşınma ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler her aşınma deneyi sonucunda tartılarak aşınma kayıpları ağırlık cinsinden ölçülmüş ve ortalama değerler alınmıştır. Numune 360 devir / dakika hızla dönerken, tablaya monteli aparat üzerindeki abrasiv aşındırıcı 0,8m / saniye sabit hızla ilerlemiştir. Aşınma numuneleri 4 dakika süreyle aşınma testine tabii tutulmuştur.

6.8.3. Darbe testi

Darbe testleri Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümünde, 150 J çekice sahip, Instron Wolpert marka, PW 30 model charpy darbe test cihazında oda sıcaklığında yapılmıştır. Darbe numuneleri Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim Anabilim Dalında tel erozyon yöntemi ile Şekil 6.2’de gösterildiği gibi döküm parçadan kesilerek elde edilmiştir. Her döküm parçadan toplam 4 adet darbe numunesi kesildikten sonra yüzey pürüzlülüğünü gidermek için taşlanmış ve 10x10x55 mm boyutlarında çentiksiz darbe test numuneleri test edilmiştir.



Şekil 6.2. Döküm parçadan darbe numunelerinin alınış prensibi

- a) Döküm parça
- b) Döküm parçadan 4 adet darbe numunesinin alınması
- c) Çentiksiz darbe numunesi

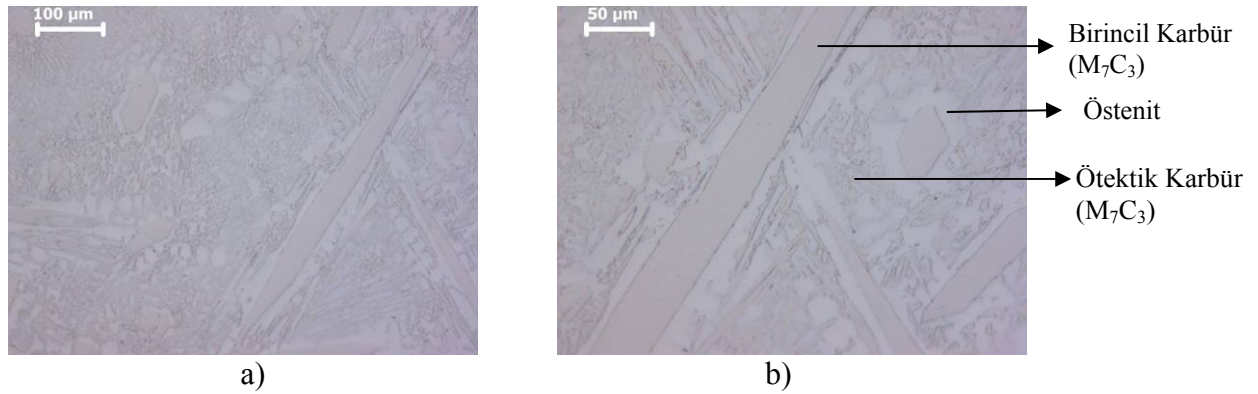
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. Mikroyapı Karakterizasyonu

Döküm halinde, değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş ve ısıtıl işlem görmüş yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin mikroyapıları optik mikroskop ve XRD ile karakterize edilmiştir.

7.1.1. Ti, Nb, V ve Mg ilavelerinin mikroyapıya etkisi

Yüksek kromlu beyaz dökme demirin döküm halinde mikroyapısı ötektik östenit matris ve östenit matris içinde dağılmış M_7C_3 birincil ve ötektik karbürlerden meydana gelmiştir, Resim 7.1. Mikroyapıda oluşan birincil karbürlerin süreksiz, keskin köşeli, kaba ve uzun plaka şeklinde, ötektik karbürlerin ise birincil karbüre göre daha ince ve düzensiz şekilli yapıya sahip oldukları gözlemlenmiştir.

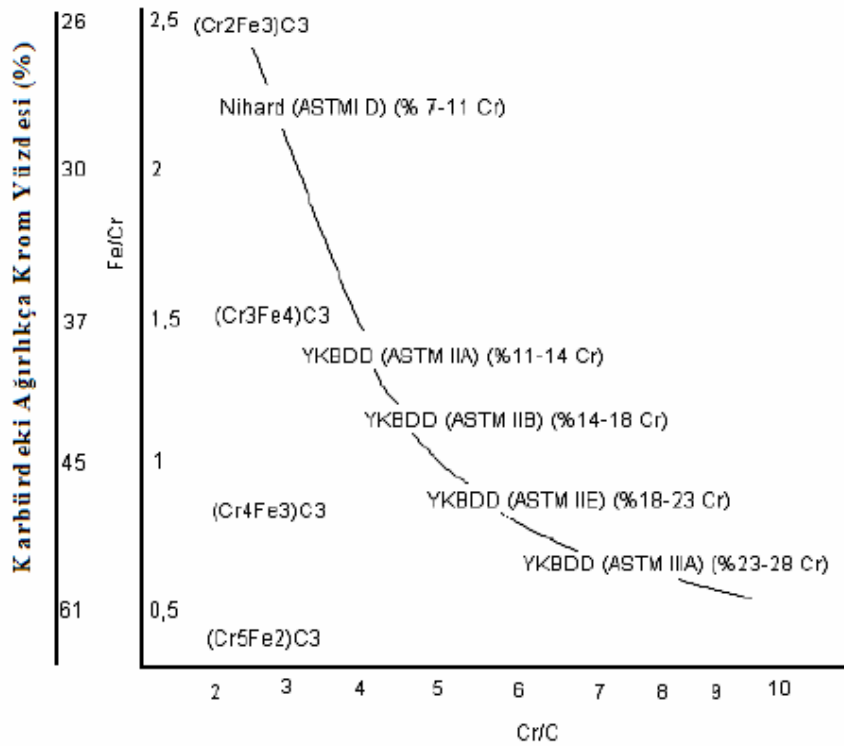


Resim 7.1. Alaşım elementi ilave edilmemiş (Nb, Ti, V, Mg) yüksek kromlu beyaz dökme demirin mikroyapısı. a) X100, b) X200

Deneysel çalışmada kullanılan alaşımın kimyasal bileşim (%28,21 Cr-%3,2 C-%0,56 Mn- %0,94 Si-%0,31 Ni- %1,45 Mo), Şekil 3.1’de verilen Scafeffler diyagramına göre hesaplanan Cr eşdeğeri 31,07 ve Ni eşdeğeri 96,59 ve Şekil 4.5’de verilen Krom/Karbon oranı arasındaki ilişkiye göre ötektik üstü bileşime sahiptir. Bu nedenle alaşımın katılaşması öncelikle birincil M_7C_3 karbürlerin çekirdeklenmesiyle başlar. Birincil karbürlerin oluşmasını ötektik reaksiyon ile ötektik M_7C_3 karbürleri

ve ötektik östenitin katılaşması takip eder. Katılaşmadan sonra mikroyapının birincil karbür, ötektik östenit matris ve ötektik karbürlerden oluşması gerekir.

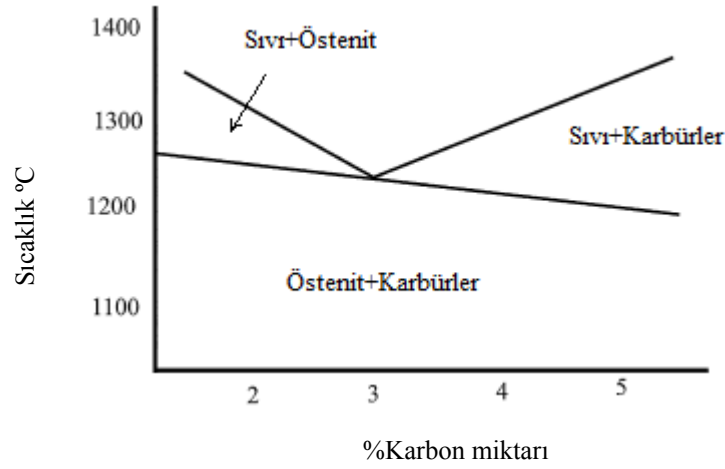
Mikroyapıdaki karbür ve matris içindeki Cr/C ve Fe/Cr oranları yapıdaki karbürlerin tipini belirlemede kullanılır [12]. Şekil 7.1’de verilen Cr/C ve Fe/Cr oranları dikkate alındığında, mikroyapıda ötektik karbürlerin $(Cr_3Fe_4)C_3$ karbürleri olduğu görülmektedir. Şekil 7.1’de belirtildiği gibi, Cr konsantrasyonunun artması ile yapıdaki karbürler $(Cr_4Fe_3)C_3$ ve $(Cr_5Fe_2)C_3$ formunu alırlar. Cr konsantrasyonundaki bu artış ile birlikte oluşan yapının serbest enerjisinin de arttığı literatür bilgilerinde verilmektedir [1,4].



Şekil 7.1. Cr/C ve karbür tipi ilişkisi [12]

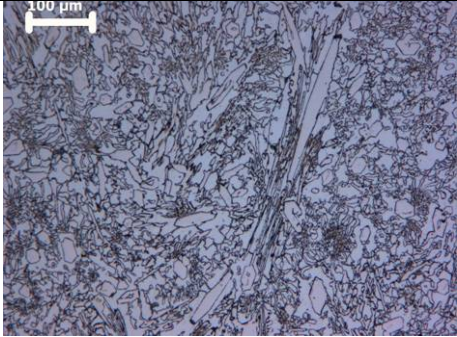
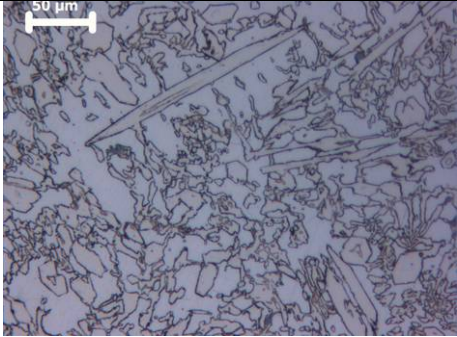
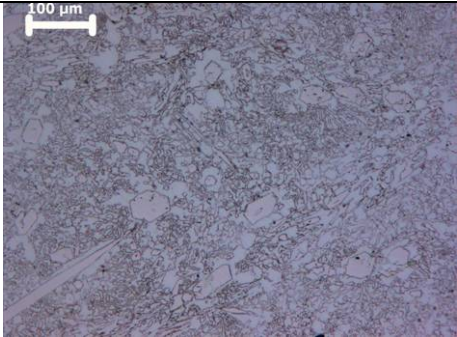
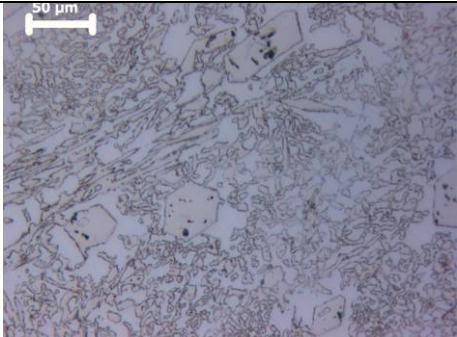
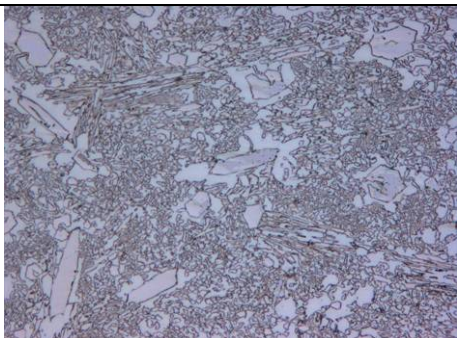
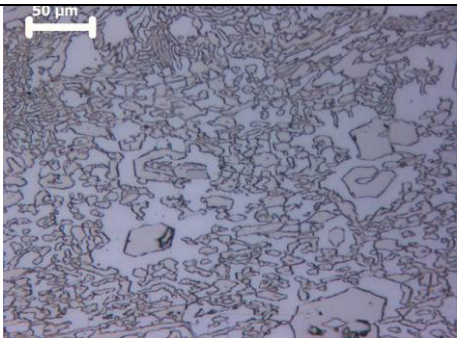
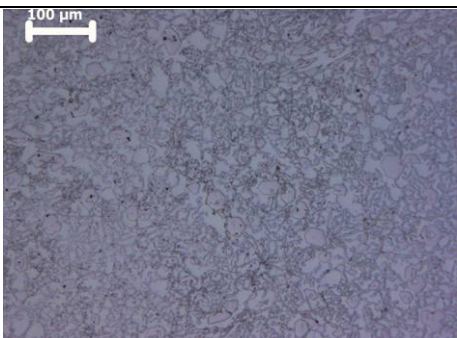
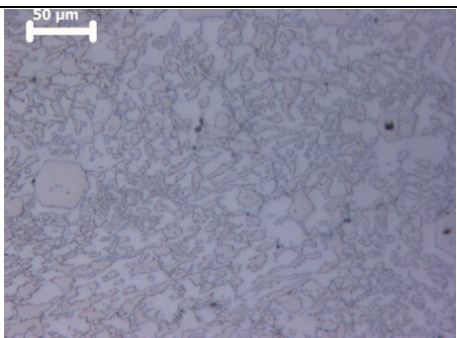
Hinckley ve arkadaşları [83], %25 Cr-%3,1 C-%2,0 Mn-%0,7 Si kimyasal bileşime sahip yüksek kromlu beyaz dökme demirin ötektiğe yakın ötektik üstü alaşım olduğunu ve döküm halinde mikroyapısının östenit matris içinde ötektik karbür ve çok az M_7C_3 birincil karbürden teşekkül ettiğini ve östenit-birincil karbür arayüzeyinde plaka tipi martensit bulunduğunu belirtmişlerdir.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirde %0,5, %1, %1,5 ve %2 Ti, Nb ve V içeriklerinin mikroyapıya etkisi sırasıyla Resim 7.2-4'de görüleceği üzere içerik miktarları arttıkça birincil ve ötektik karbür incelmıştır. İlavesiz mikroyapıda bulunan uzun ve plaka şeklinde olan keskin köşeli kaba birincil karbürler %2 içeriklerde önemli derecede incelererek altıgene yakın morfolojiye dönüştükleri ve dağılımlarının daha homojen olduğu görülmektedir. Ötektik karbürün morfolojisi plaka şeklinden daha ziyade fiber şeklinde teşekkül etmiştir. Alaşıma ilave edilen Ti, Nb ve V çok güçlü karbür yapıcılarıdır. Alaşımda Ti, Nb ve V içeriği arttıkça birincil karbür oluşumundan önce daha fazla TiC, NbC ve VC teşekkül edecektir. Bunun sonucu olarak matrisin karbon konsantrasyonu azalacak ve alaşımın kimyasal bileşimi ötektik üstünden ötektiğe veya ötektik altına doğru kayacaktır, Şekil 7.2. İmkanların kısıtlı olmasından dolayı deneysel çalışmada karbürlerin ve östenit matrisin hacim oranları ölçülememiştir. Ancak aşağıda verilen denge diyagramına göre mikro yapılarda Ti, Nb ve V içeriği arttıkça birincil ve ötektik karbürlerin hacim oranının azalması gerektiği söylenebilir. Karbon ile karbür oluşturma kabiliyeti yüksek olan bu elementler aynı zamanda birincil karbürlerin büyüme oranını da düşürecektir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirde Ti, Nb ve V içerikleri katılaşmanın başlamasıyla oluşan TiC, NbC ve VC'lerinin birincil M_7C_3 karbür için çekirdek görevi yapacağı düşünülebilir. Zira, Youping ve arkadaşlarının [86] yüksek kromlu (30wt.%Cr) beyaz dökme demirde Ti, V, Nb ve Mo ilavesinin mikroyapı üzerine etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, yalnız TiC ve NbC'lerinin M_7C_3 karbürleri için heterojen çekirdeklenme yapacağı ve ötektik karbürlerin merkezinde vanadyumca zengin bölge olduğunu belirtmişlerdir. Ancak, Ti, Nb ve V içerikleri arttıkça alaşımın kimyasal bileşimi daha fazla sola kayacak ve ötektik üstü bileşimden daha ziyade ötektik veya ötektik altı bileşim söz konusu olacaktır. Bu sebeple alaşıma Ti, Nb ve V ilavelerinin birincil karbür için çekirdeklenme etkisi daha detaylı araştırılmalıdır [46,53,58,74,83,84].

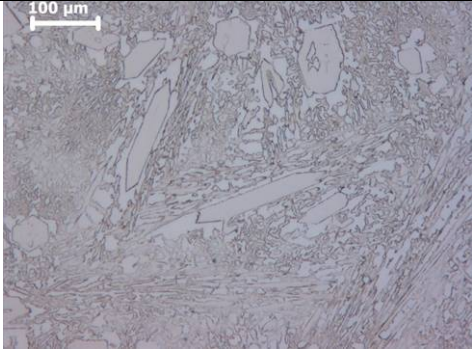
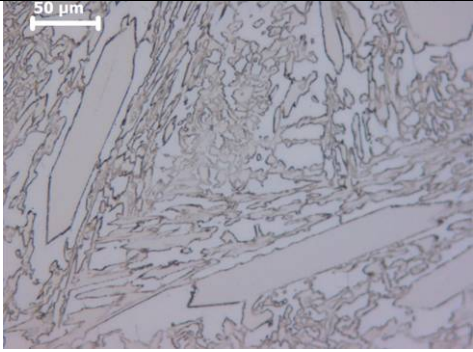
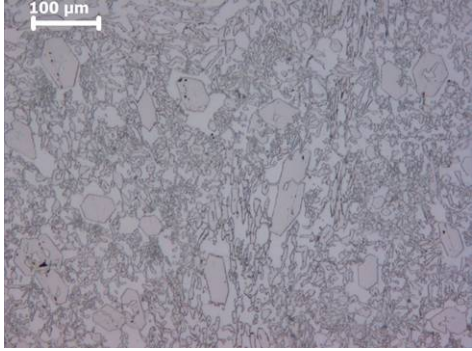
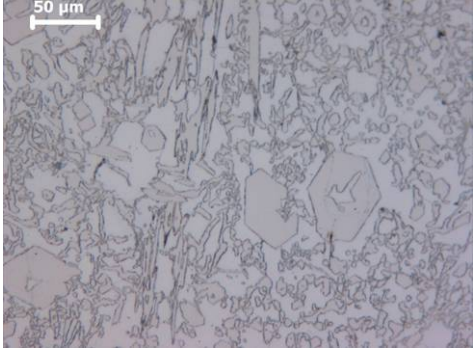
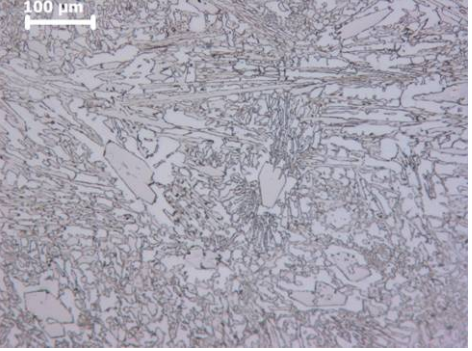
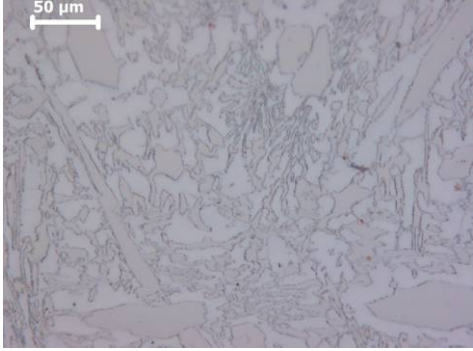
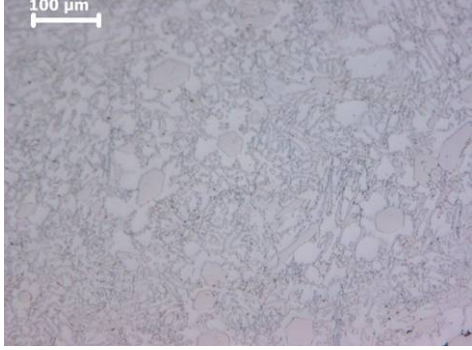
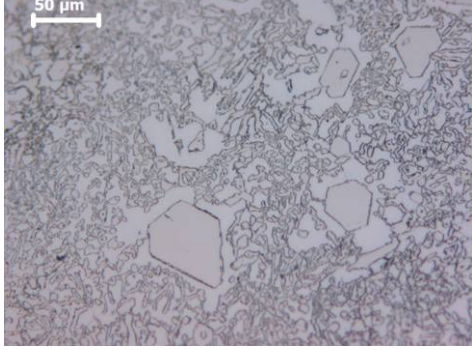


Şekil 7.2. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde deneysel olarak elde edilen faz diyagramı [53].

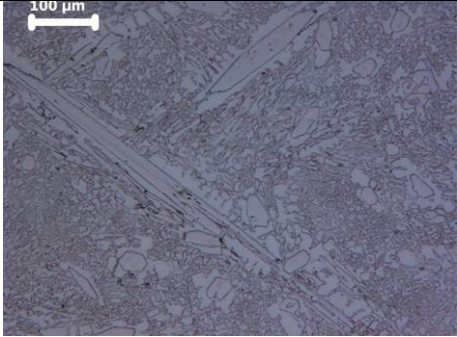
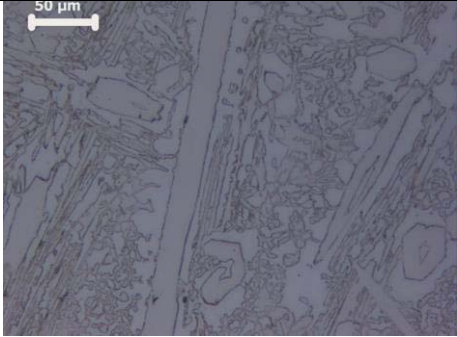
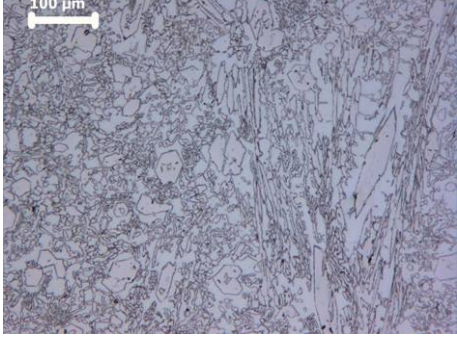
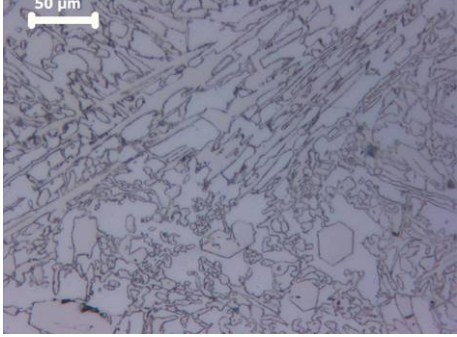
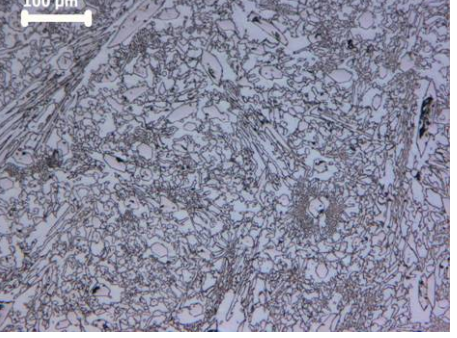
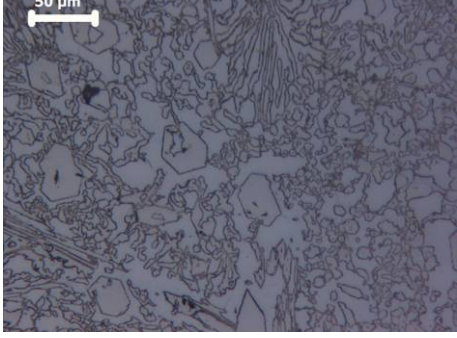
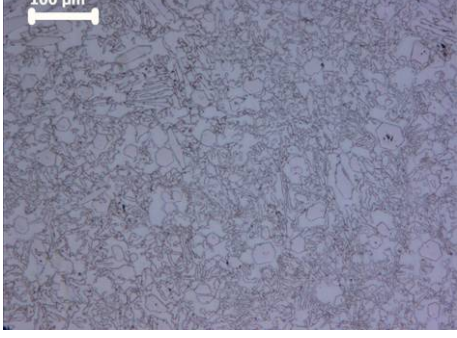
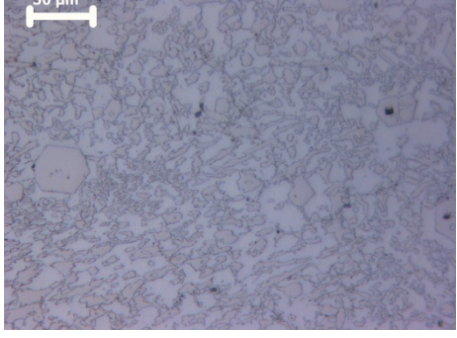
Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde Ti, Nb ve V elementlerinin plaka şeklindeki birincil ve ötektik karbürleri incelterek modife ettiği ve izotropik birincil karbür dağılımı sağladığı birçok araştırmacı tarafından belirtilmiştir [46,51,53,58,74,83,84]. Kuyucak ve arkadaşları [84] titanyum karbürlerin niyobyum karbürlerden daha küçük olduğunu vurgulamışlardır.

% Oran	Büyütme	
	X100	X200
%0,5Ti		
%1Ti		
%1,5Ti		
%2Ti		

Resim 7.2. %0,5 Ti, %1 Ti, %1,5 Ti ve %2 Ti alaşım elementi içeren yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin mikroyapısı X100, X200 büyütme

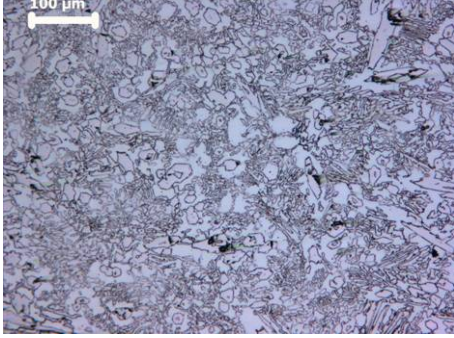
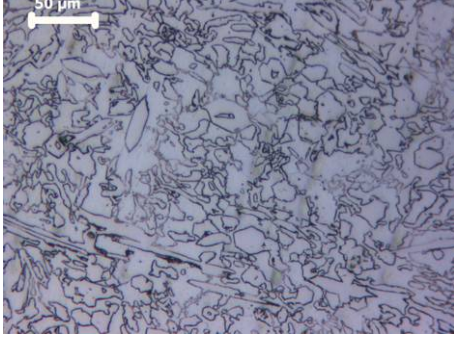
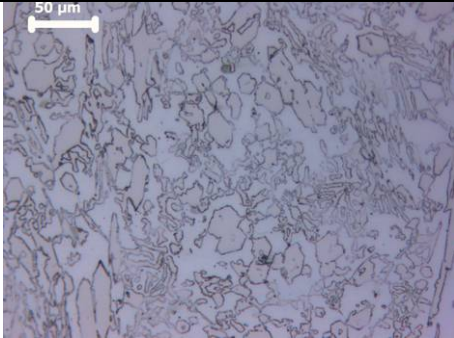
% Oran	Büyütme	
	X100	X200
%0,5Nb		
%1Nb		
%1,5Nb		
%2Nb		

Resim 7.3. %0,5 Nb, %1 Nb, %1,5 Nb ve %2 Nb alaşım elementi içeren yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin mikroyapısı X100, X200 büyütme

% Oran	Büyütme	
	X100	X200
%0,5V		
%1V		
%1,5V		
%2V		

Resim 7.4. %0,5 V, %1 V, %1,5 V ve %2 V alaşım elementi içeren yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin mikroyapısı X100, X200 büyütme

Yüksek kromlu beyaz dökme demirde %0,05 ve %0,1 Mg içeriği plaka şeklindeki birincil ve ötektik karbürleri incelterek modife etmiştir, Resim 7.5. Alaşımda Mg içeriği birincil M_7C_3 karbürleri altıgene yakın morfolojiye dönüştürmüştür ve ötektik M_7C_3 karbürlerinde hafif küreselleşme eğilimi sağlamıştır. Ancak Mg'un mikroyapıda bu değişimi meydana getirme mekanizması hakkında yorum yapılamamıştır. Yapılan literatür çalışmasında yüksek kromlu beyaz dökme demirlere Mg ilavesi içeren bir yayına rastlanılmamıştır. Bu konuda detaylı deneysel çalışmaya ihtiyaç olduğu düşünülmektedir.

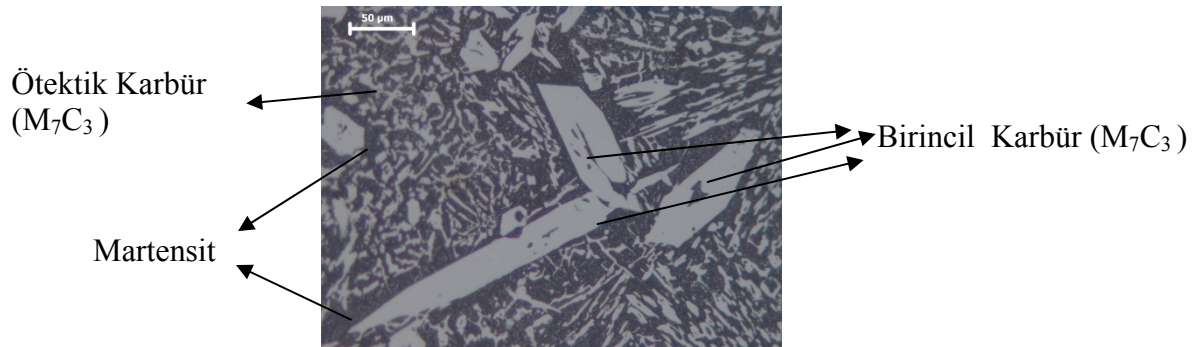
% Oran	Büyütme	
	X100	X200
%0,05 Mg		
%0,1Mg		

Resim 7.5. %0,05 Mg ve %0,1 Mg alaşım elementi içeren yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin mikroyapısı X100, X200 büyütme

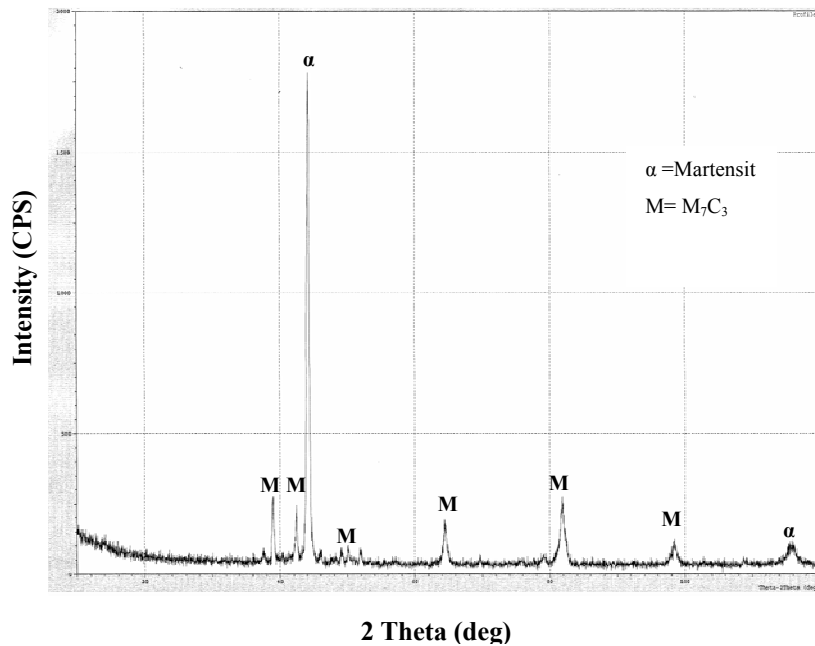
7.1.2. Isıl işlem sonrası numunelerin mikroyapıları

Resim 7.6. ve Şekil 7.3'de verilen XRD de görüleceği üzere ilavesiz alaşımın sertleştirme ısı işlemi ve takiben uygulanan temperleme ısı işlemleri sonrası mikroyapı görüntülerinde birincil ve ötektik M_7C_3 karbürleri, ikincil karbürler ve martensit matris yapısı bulunmaktadır. Isıl işlem ile ötektik karbürler hafif küreselleşme eğilimi göstermiştir. Düşük miktarda M_7C_3 ikincil karbürlerin çökeldiği

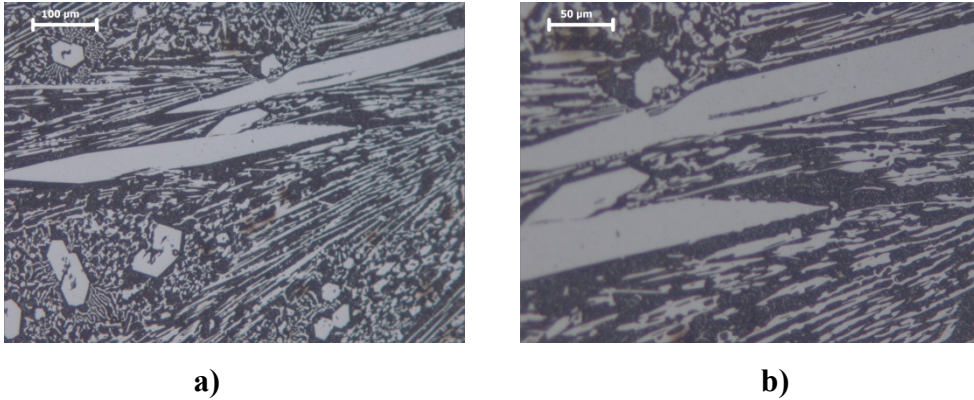
ise literatürden [21, 58] anlaşılmaktadır. Çünkü, sertleştirme ve temperleme ısıl işleminde, yüzey merkezli kübik yapıya sahip östenit matris C ve Cr'ca aşırı doymuştur. Bu sebeple, sertleştirme ısıl işleminde matristen ötektik karbürler çökelmiştir. Sonuç olarak demir matris karbon ve kromca azalmıştır. Bu yüzden östenit matrisin hemen hemen tamamı martenzite dönüşmüştür. Diğer taraftan, yüzey merkezli kübik yapıya sahip östenitin hacim merkezli kübik martensite dönüşümünde martensit hacimce genişler. Fakat martensit plakalarının arasında bulunan bölge hacimce genişlemediği için martensite dönüşmez. Bu yüzden mikroyapıda bir miktar kalıcı östenitin mevcut olduğu düşünülmektedir.



Resim 7.6. Alaşım elementi ilave edilmemiş (Nb, Ti, V, Mg) sertleştirme ve temperleme ısıl işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demirin mikroyapısı



Şekil 7.3. Alaşımsız numuneye ait XRD analiz sonuçları



a) **b)**
Resim 7.7. Alaşım elementi (Nb, Ti, V, Mg) ilave edilmemiş sertleştirme ve temperleme ısı işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demir a) X100, b)X200 büyütme.

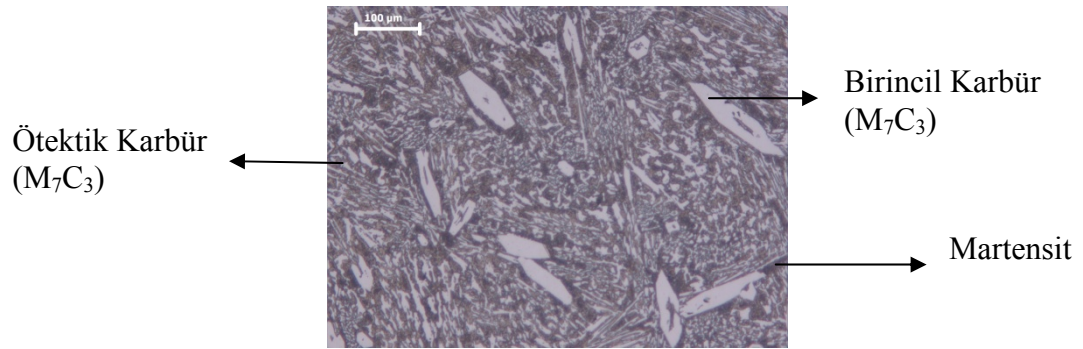
Araştırmacılar [61], %3,1 C ve %24,5 Cr içeren yüksek kromlu beyaz dökme demire 1000°C’de 4 saat östenitleme ve oda sıcaklığına kadar havada soğutma, 482°C’de 8 saat alt kritik ısı işlem ve havada soğutma işlemi sonrası mikroyapının ötektik karbürler (M_7C_3), ikincil karbürler ve martensitik matristen oluştuğunu açıklamışlardır.

Hinckley ve arkadaşları [83], %25 Cr-%3,1 C-%2,0 Mn-%0,7 Si kimyasal bileşime sahip yüksek kromlu beyaz dökme demirin 1200°C sıcaklıkta 1 saat süre ile bekletme ve oda sıcaklığına suda soğutma işlemleri sonrası mikroyapıda birincil ve ötektik M_7C_3 karbürleri, ikincil karbürler ve martensit matrisin teşekkül ettiğini belirtmişler ve mikroyapıda az miktarda kalıcı östenitin bulunduğunu vurgulamışlardır.

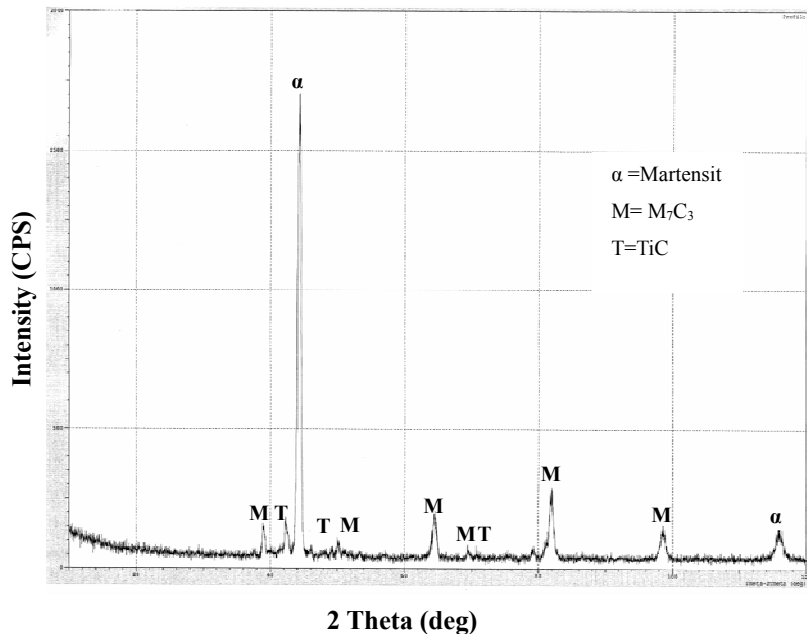
Diğer bir araştırmada ise [58], %4 C, %18 Cr, %1 Mo ve %1 Ti içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirin sertleştirme ısı işleminde sıcaklık arttıkça mikroyapıda kalıcı östenitin arttığını tespit etmişlerdir.

%0,5, %1, %1,5, %2 Nb, Ti, V ilave edilmiş numunelerin sertleştirme ısı işlemi ve takiben uygulanan temperleme ısı işlemleri sonrası XRD ve mikroyapı incelemelerinde (Resim 7.8-13, Şekil 7.4-6) birincil ve ötektik M_7C_3 karbürleri, ikincil karbürler ve martensit matris yapısı bulunmaktadır. Elektron tarama mikroskop çalışması yapılamadığı için TiC, NbC ve VC’lerin mikroyapıda varlığından literatüre dayanarak söz etmek mümkündür. Bu grupta bulunan ve Mg

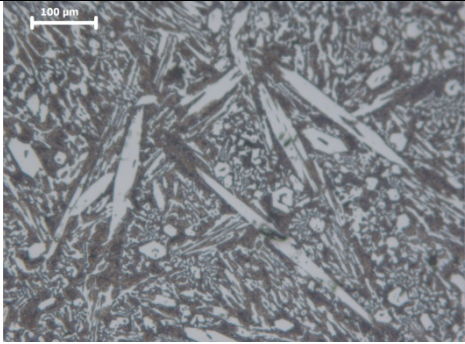
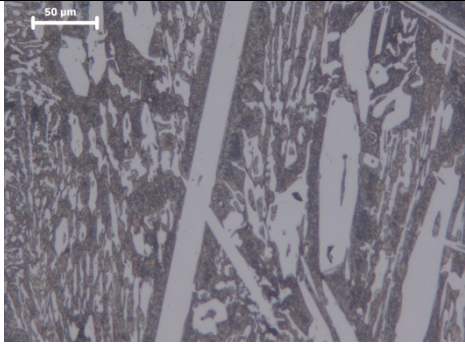
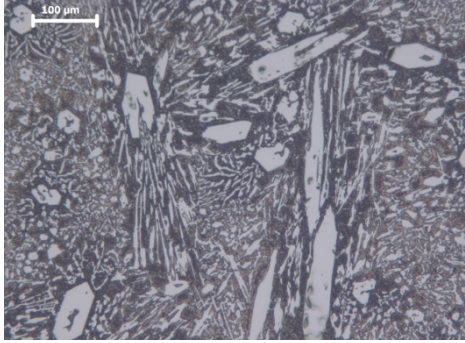
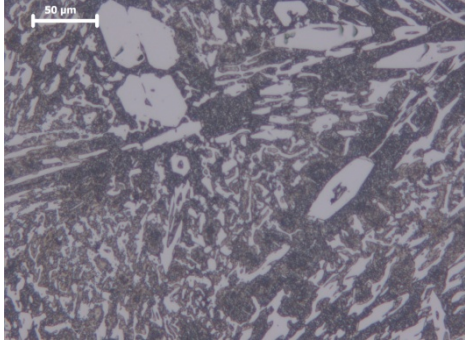
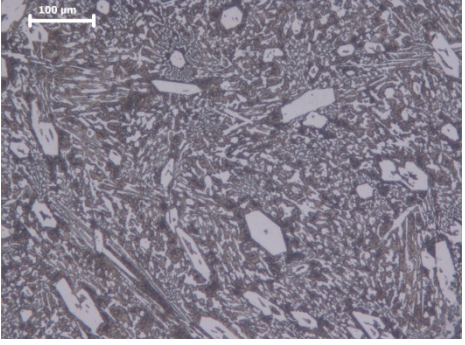
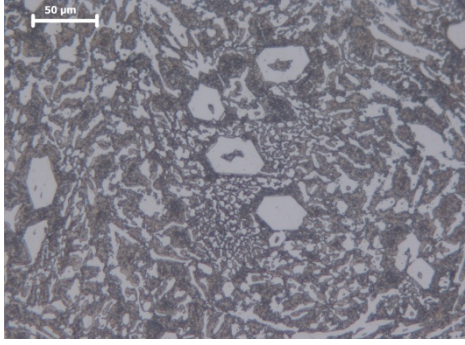
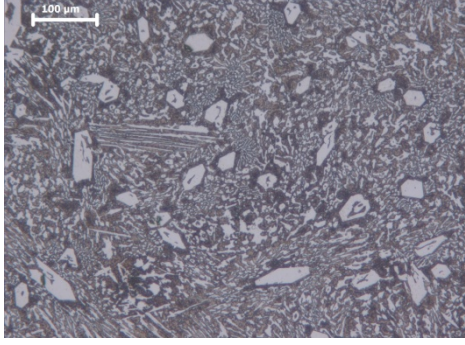
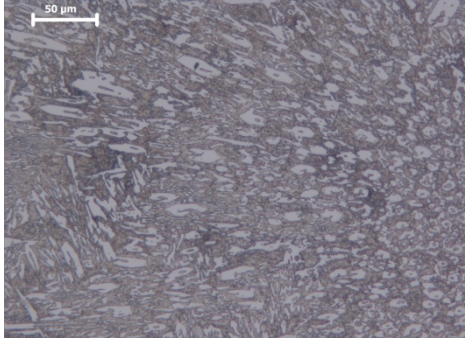
ilaveli ısıtıl işlem görmüş numunelerde, birincil ve ötektik karbürlerin çok az küreselleşme eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Ti, Nb ve V elementlerinin östenit içinde katı eriyebilirlik kabiliyetlerinin yüksek olması sebebiyle ısıtıl işlem sonrası oldukça küçük ve çok sayıda ikincil karbürlerin (TiC, NbC ve VC) martensit matris içinde çökelebileceği düşünülmektedir [5,12,18,21,27,40,45,46, 53,58,60,74,85].



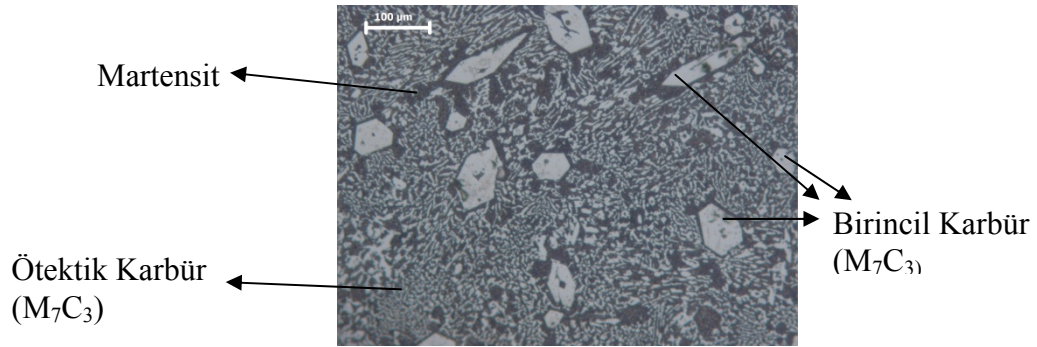
Resim 7.8. % 2 Ti ilave edilmiş sertleştirme ve temperleme ısıtıl işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demirin mikroyapısı



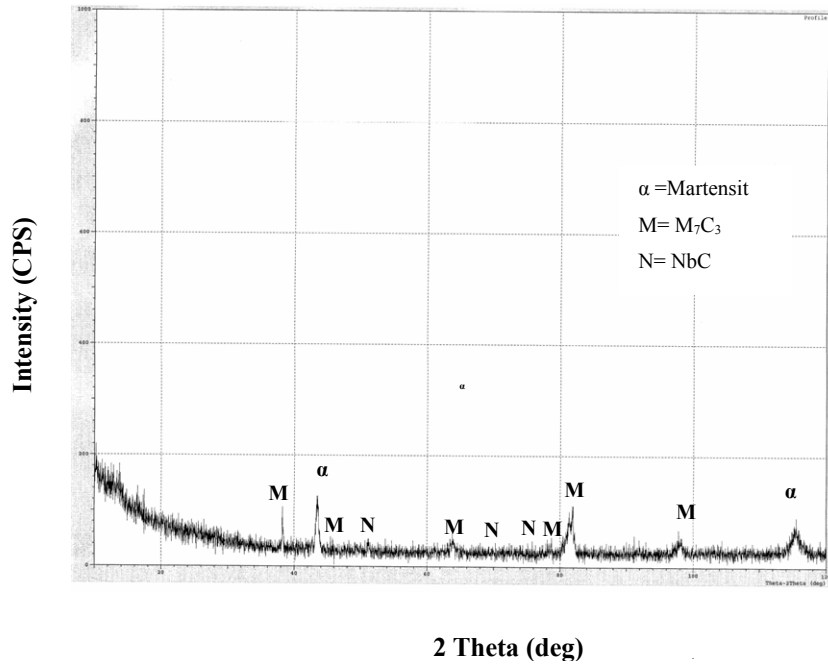
Şekil 7.4. % 2Ti içeren numuneye ait XRD analiz sonuçları

% Oran	Büyütme	
	X100	X200
%0,5Ti		
%1Ti		
%1,5Ti		
%2Ti		

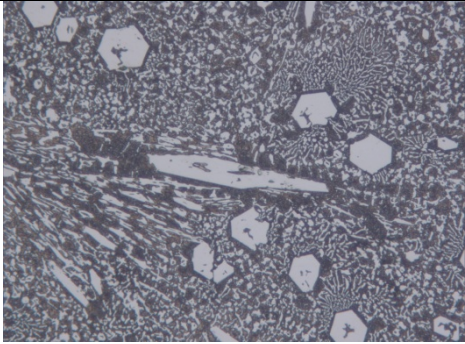
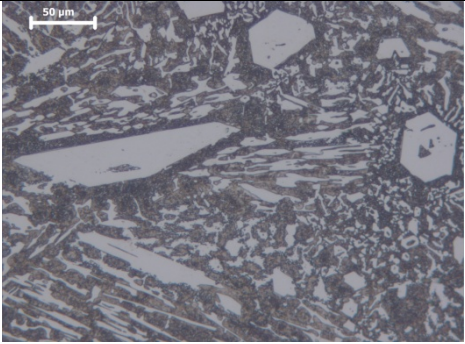
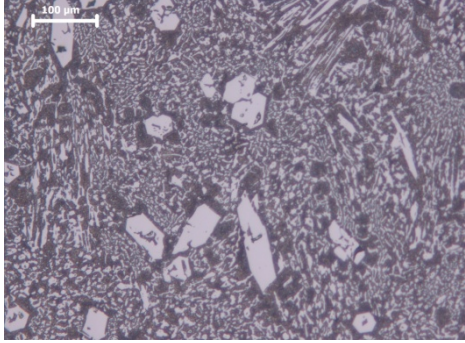
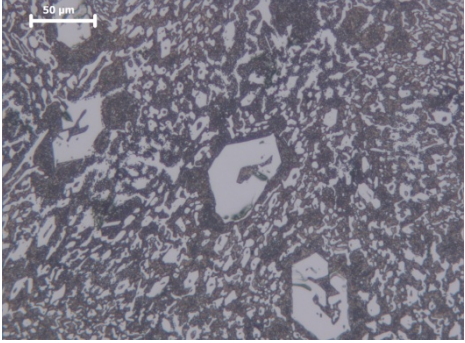
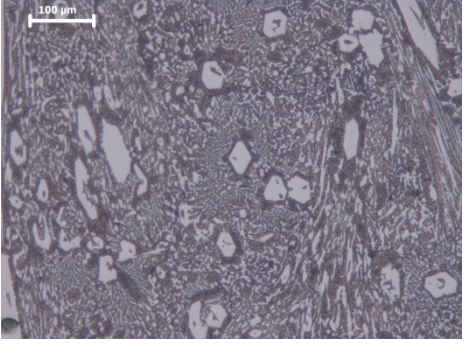
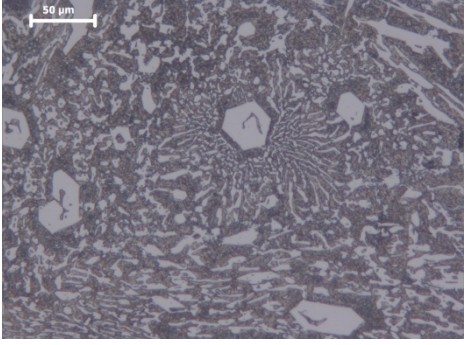
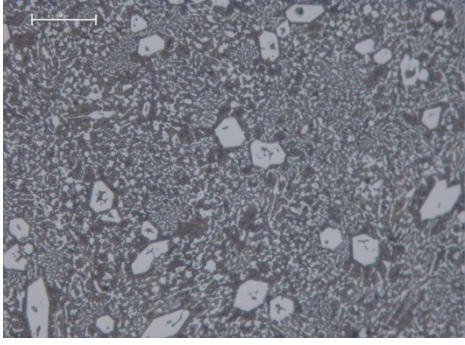
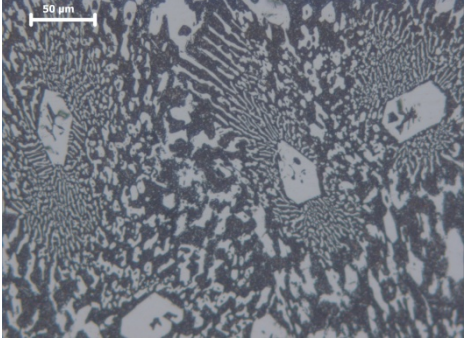
Resim 7.9. %0,5Ti, %1 Ti, %1,5 Ti ve %2 Ti alaşım elementi içeren sertleştirme ve temperleme ısı işlemleri uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin mikroyapısı X100, X200 büyütme



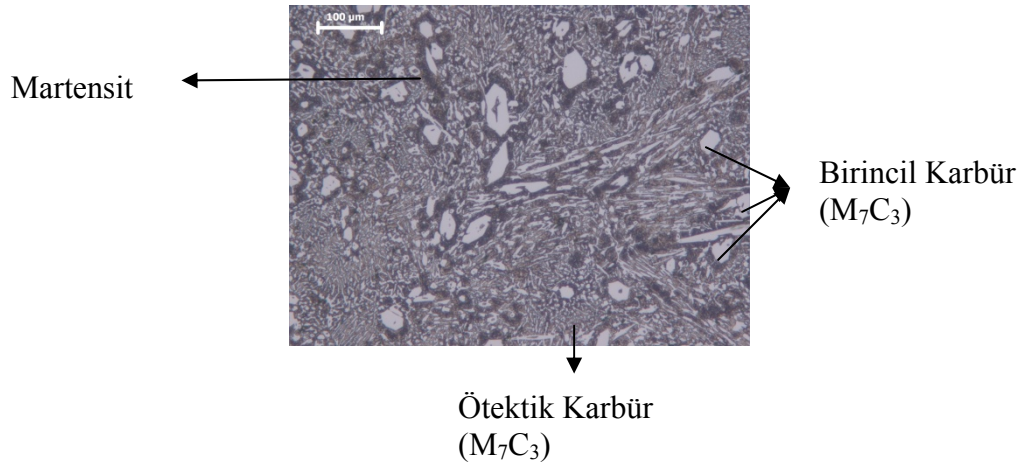
Resim 7.10. %2 Nb ilave edilmiş sertleştirme ve temperleme ısıl işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demirin mikroyapısı



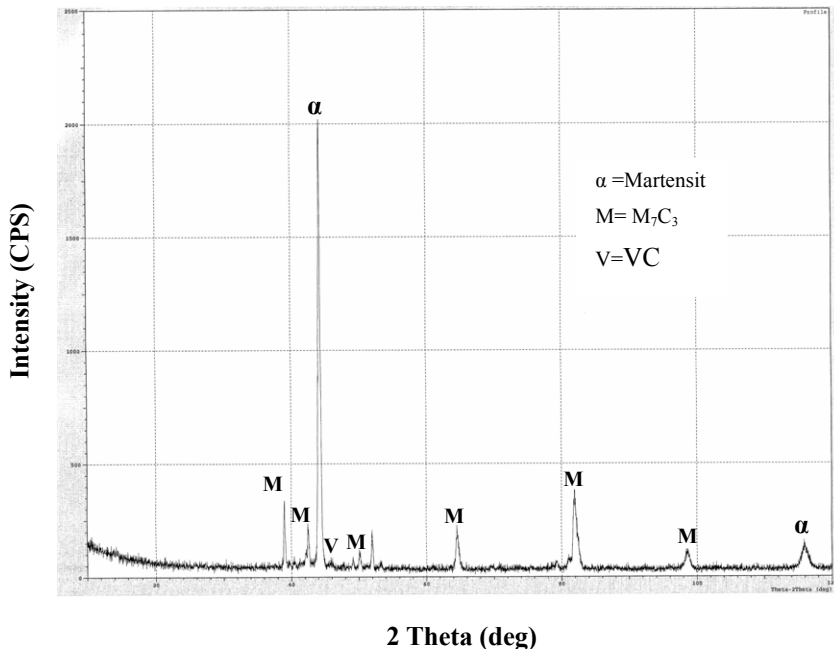
Şekil 7.5. %2 Nb içeren numuneye ait XRD analiz sonuçları

% Oran	Büyütme	
	X100	X200
%0,5Nb		
%1Nb		
%1,5Nb		
%2Nb		

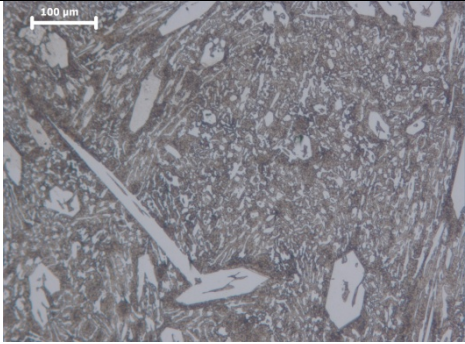
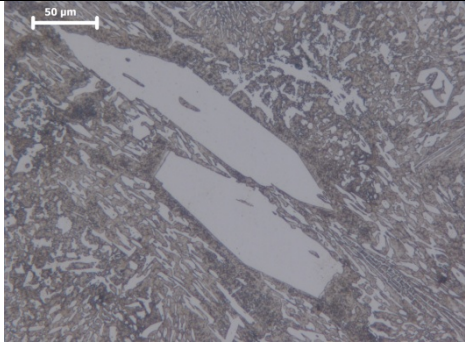
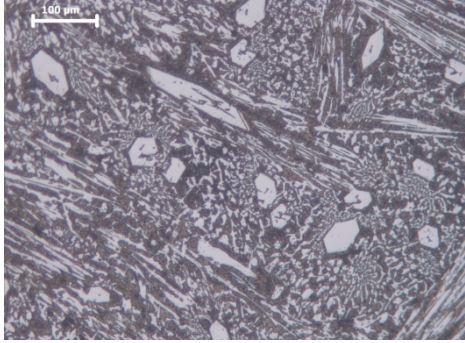
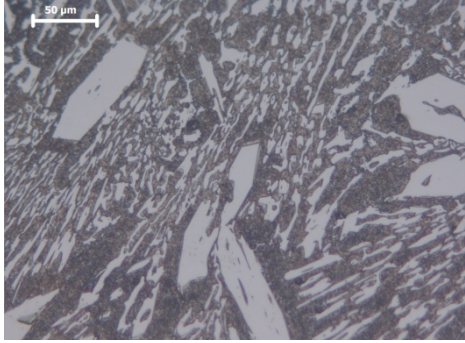
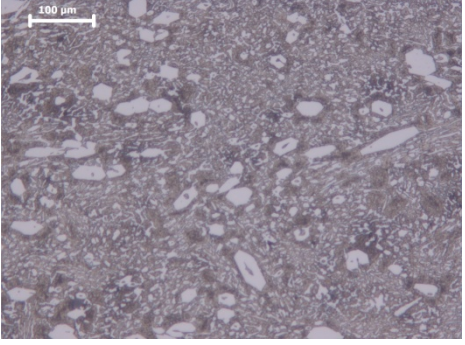
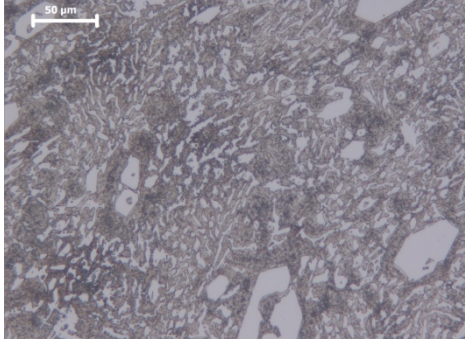
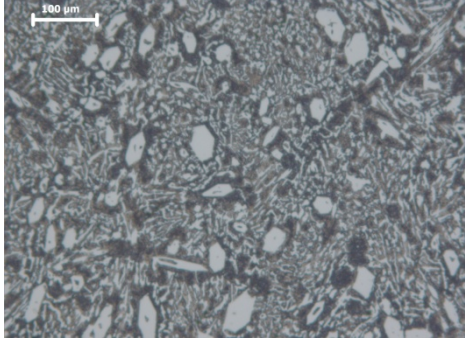
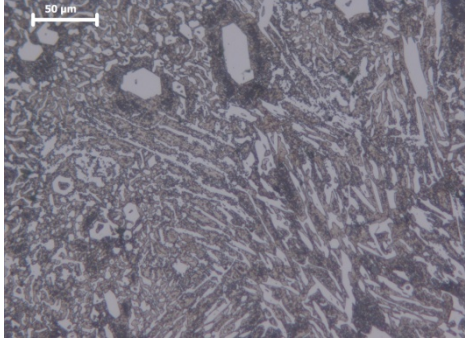
Resim 7.11. %0,5 Nb, %1 Nb, %1,5 Nb ve %2 Nb alaşım elementi içeren sertleştirme ve temperleme ısıl işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin mikroyapısı X100, X200 büyütme



Resim 7.12. %2 V ilave edilmiş sertleştirme ve temperleme ısı işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demirin mikroyapısı



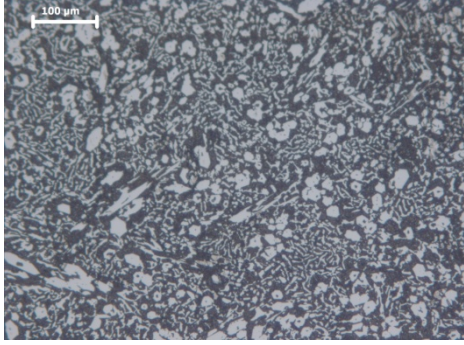
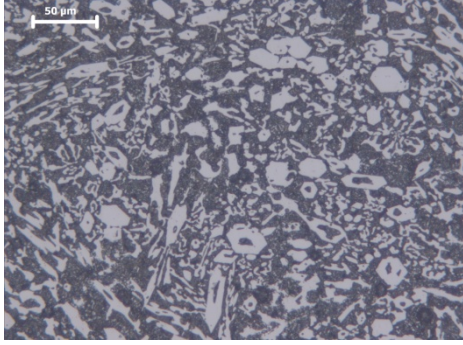
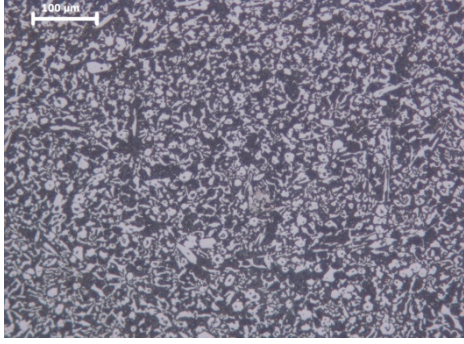
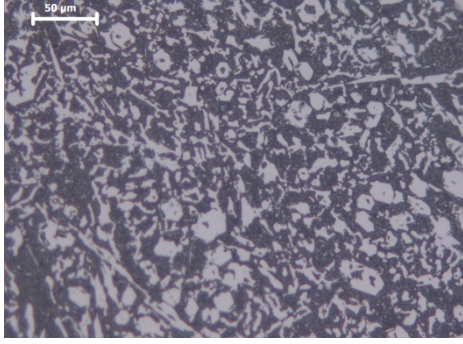
Şekil 7.6. %2 V içeren numuneye ait XRD analiz sonuçları

% Oran	Büyütme	
	X100	X200
%0,5V		
%1V		
%1,5V		
%2V		

Resim 7.13. %0,5 V, %1 V, %1,5 V ve %2 V alaşım elementi içeren sertleştirme ve temperleme ısıl işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin mikroyapısı X100, X200 büyütme

Resim 7.14'de %0,05 ve %0,1 Mg ilave edilmiş numunelere ait mikroyapı

görüntüleri bulunmaktadır.

% Oran	Büyütme	
	X100	X200
%0,05 Mg		
%0,1 Mg		

Resim 7.14. %0,05 Mg ve %0,1 Mg alaşım elementi içeren sertleştirme ve temperleme ısı işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin mikroyapısı X100, X200 büyütme

7.2. Ortalama Karbür Çapının Ölçüm Sonuçları

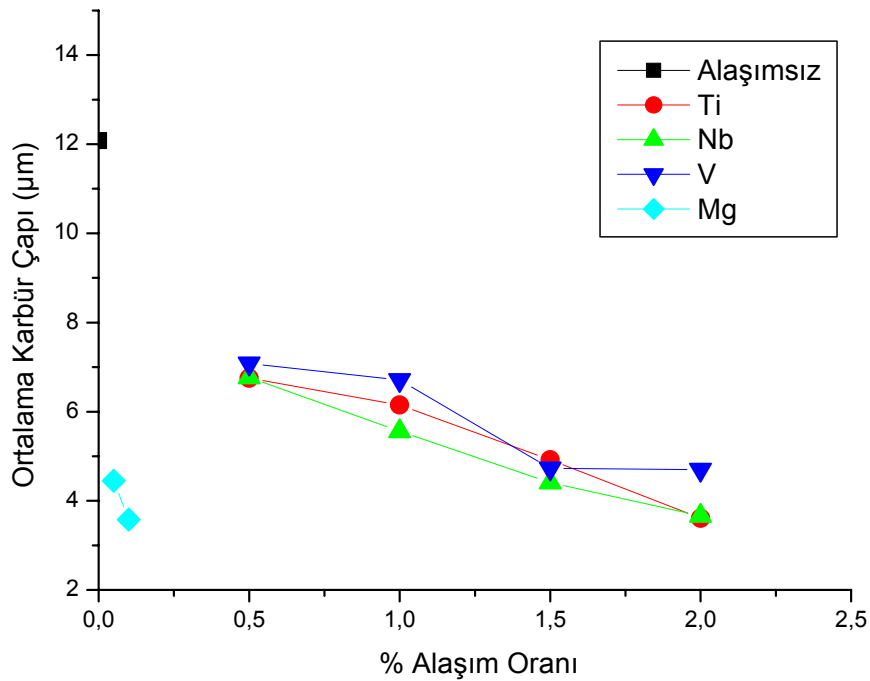
Yüksek kromlu beyaz dökme demirin ilavesiz ve değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş dökümlerin sertleştirme ısı işlemi ve takiben temperleme ısı işlemi sonrası ortalama karbür çapı değerleri Çizelge 7.1. ve Şekil 7.7’de verilmiştir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin ilavesiz halinde 12,08 µm olan ortalama karbür çapı Ti, Nb, V ve Mg ilave oranları artıkça önemli derecede azalmıştır. Alaşımın ortalama karbür çapı %2 Ti, Nb ve V içeriklerinde sırasıyla 3,61, 3,66 ve 4,70 µm değerlerine kadar düşmüştür. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin içerdiği %0,1 Mg ise 3,58 µm değer ile en etkili ortalama karbür çapını vermiştir.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirde Ti, Nb, V ve Mg ilavelerinin ortalama karbür çapını düşürmesi, Ti, Nb, V ve Mg’un birincil ve ötektik karbürü

çekirdeklenmesinden ve ötektik karbürden çok daha küçük boyutta TiC, NbC ve VC oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Mg ilavesinin ortalama karbür çapını düşürme sebebi konusunda ise yeterli çalışma olmadığı için herhangi bir yorum yapılmamıştır.

Çizelge 7.1. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin ilavesiz ve değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilavesi edilmiş dökümlerin sertleştirme ısı işleme ve takiben temperleme ısı işleme sonrası ortalama karbür çapları değerleri

Alaşım Elementi	%Miktarı	Ortalama Karbür Çapı (µm)
Ti	0,5	6,75
	1	6,15
	1,5	4,92
	2	3,61
Nb	0,5	6,77
	1	5,56
	1,5	4,41
	2	3,66
V	0,5	7,08
	1	6,71
	1,5	4,73
	2	4,7
Mg	0,05	4,45
	0,1	3,58
0	0	12,08



Şekil 7.7. Yüksek kromlu beyaz dökme demirde sertleştirme ısı işlemi ve takiben temperleme ısı işlemi sonrası ortalama karbür çaplarının Ti, Nb, V ve Mg'un oranlarına bağlı olarak değişimi

Zhi ve arkadaşları [45], %4C ve %20Cr içeren yüksek kromlu beyaz dökme demire %0,5, %1 ve %1,5 Nb içeriklerinin sırasıyla 9,3, 8,6 ve 5,8 μm ortalama karbür çapı üreterek karbürlerde incelme sağladıklarını belirtmişlerdir. Bu çalışmada ise alaşımda %1,5 Nb içeriği 4,41 μm ortalama karbür çapı üretirken %2 Nb içeriği 3,66 μm karbür çapı üretmiştir. Alaşımın içerdiği Nb miktarı arttıkça ortalama karbür çapının düşmeye devam ettiği görülmüştür. Yapılan literatür çalışmasında ortalama karbür çapı ölçümlerini gerçekleştiren diğer bir çalışmanın mevcut olmadığı görülmüştür.

7.3. Mekanik Testler

7.3.1. Sertlik testi sonuçları

Yüksek kromlu beyaz dökme demirin ilavesiz ve değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş dökümlerin döküm halinde, sertleştirme ısı işlemi sonrası ve

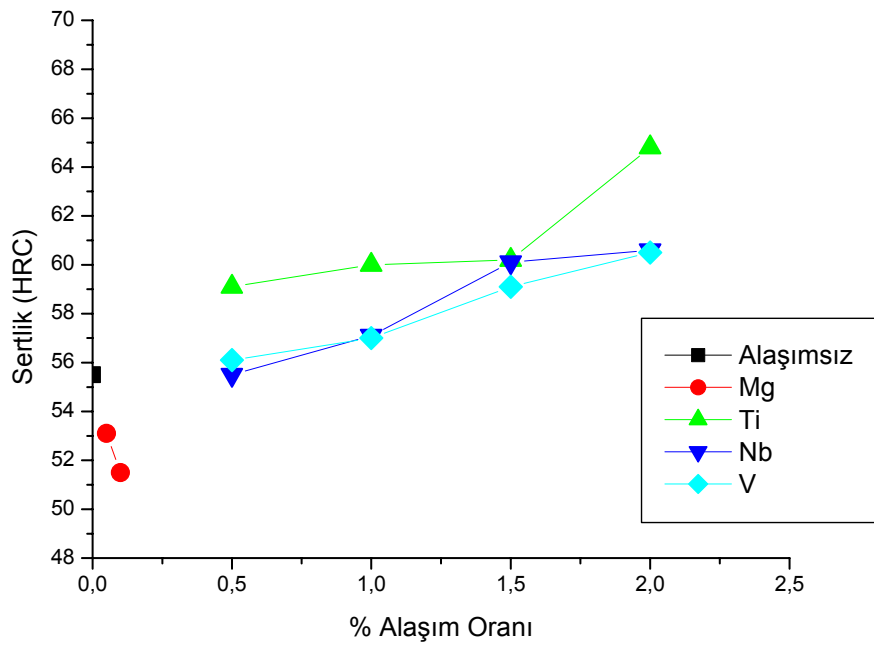
sertleştirme ısı işlemleri ve takiben temperleme ısı işlemleri uygulanmış numunelerinin sertlik değerleri sırasıyla Çizelge 7.2, 7.3, 7.4'de ve Şekil 7.8., 7.9. ve 7.10'da verilmiştir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin ilavesiz döküm halinde 55,5 HRC sertlik değeri %0,5 Ti oranı ile artmaya başlamış ve sertlik değerinde artış %1, 1,5 ve 2 oranlarında yükselmeye devam etmiştir. Alaşımda %0,5, 1, 1,5 ve 2 Nb ve V içerikleri sertlik değerini ilavesiz durumuna göre sürekli olarak hafifçe yükseltme eğilimindedir. %2 Nb ve V içerikleri sırasıyla 60,6, ve 60,5 HRC sertlik değerlerini üretmiştir. Çizelge 7.2.'den görüleceği üzere sertlikte en etkili artış %2 Ti mevcudiyeti ile %16,76 olarak gerçekleşmiştir. Sertlikteki bu artış Ti çözünürlüğünün daha düşük olduğundan tane büyümesini engellemektedir. Mg ise yüksek kromlu beyaz dökme demirin sertliğini düşürme eğilimindedir.

İlavesiz yüksek kromlu beyaz dökme demirin 55,5 HRC olan sertliği sertleştirme ısı işlemleri sonrası 58,2 HRC'ye yükselmiştir. %0,5, 1, 1,5 ve 2 Ti, Nb ve V içeren alaşımların sertliği sertleştirme ısı işlemleri ile sürekli olarak yükselme eğilimi göstermiştir. Fakat %0,05 ve 0,1 Mg içeren alaşımların sertliği sertleştirme ısı işlemleri ile düşmeye başlamıştır. % 2 Ti, Nb ve V içeren alaşımların sertliği sertleştirme ısı işlemleri ile ilavesiz sertleştirme işlemleri görmüş alaşıma göre sırasıyla %17,35, %13,40 ve %11,68 artmıştır.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirin ilavesiz ve değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş dökümlerin sertleştirme ısı işlemleri ve takiben temperleme ısı işlemleri uygulanmış numunelerinin sertlik değerleri sertleştirme ısı işlemleri uygulanmış numunelere göre hafifçe düşmüştür. Bu düşme miktarı 1-3 HRC arasında olup önemli derecede değildir.

Çizelge 7.2. Değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş yüksek kromlu beyaz dökme demirin döküm halinde sertlik değerleri

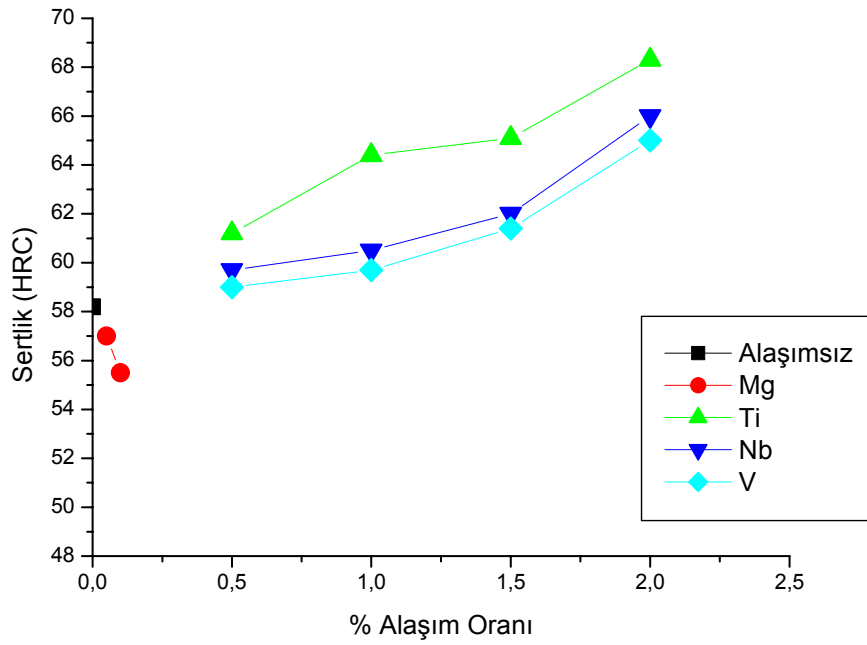
Alaşım Elementi	%Miktarı	Döküm Halindeki Sertlik (HRC)
Ti	0,5	59,1
	1	60
	1,5	60,2
	2	64,8
Nb	0,5	55,5
	1	57,1
	1,5	60,1
	2	60,6
V	0,5	56,1
	1	57
	1,5	59,1
	2	60,5
Mg	0,05	53,1
	0,1	51,5
0	0	55,5



Şekil 7.8. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin döküm halinde sertliğinin % Ti, Nb, V ve Mg oranına bağlı olarak değişimi

Çizelge 7.3. Değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş yüksek kromlu beyaz dökme demirin sertleştirme ısıl işlemi sonrası sertlik değerleri

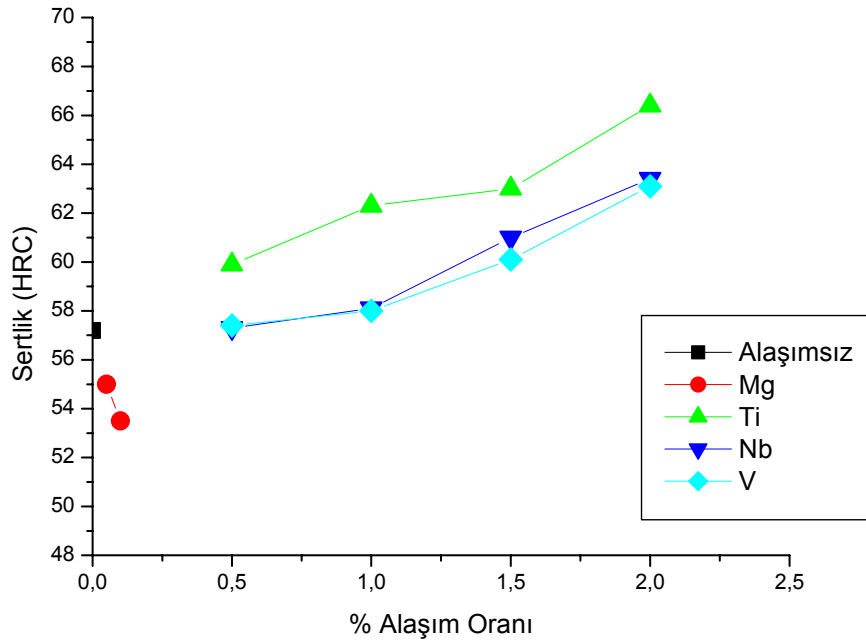
Alaşım Elementi	%Miktarı	Sertleştirme Isıl İşlemi Sonrası Sertlik (HRC)
Ti	0,5	61,2
	1	64,4
	1,5	65,1
	2	68,3
Nb	0,5	59,7
	1	60,5
	1,5	62
	2	66
V	0,5	59
	1	59,7
	1,5	61,4
	2	65
Mg	0,05	57
	0,1	55,5
0	0	58,2



Şekil 7.9. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin sertleştirme ısıl işlemi sonrası sertliğin % Ti, Nb, V ve Mg oranına bağlı olarak değişimi

Çizelge 7.4. Değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş yüksek kromlu beyaz dökme demirin sertleştirme ve takiben temperleme ısı işlemi sonrası sertlik değerleri

Alaşım Elementi	%Miktarı	Sertleştirme ve Temperleme Isıl İşlemi Sonrası Sertlik (HRC)
Ti	0,5	59,9
	1	62,3
	1,5	63
	2	66,4
Nb	0,5	57,3
	1	58,1
	1,5	61
	2	63,4
V	0,5	57,4
	1	58
	1,5	60,1
	2	63,1
Mg	0,05	55
	0,1	53,5
0	0	57,2



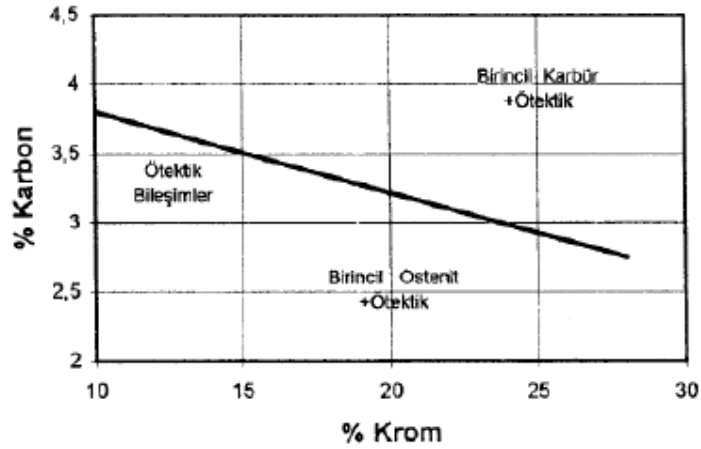
Şekil 7.10. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin sertleştirme ve temperleme ısı işlemi sonrası sertliğin % Ti, Nb, V ve Mg oranına bağlı olarak değişimi

Yüksek kromlu beyaz dökme demirin sertliğinin artan Ti, Nb ve V ilavesi ile artması mikroyapıda meydana gelen TiC, NbC ve VC'lerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çizelge 7.5'de görüleceği üzere vanadyum karbür ve titanyum karbürün sertliği krom karbürden daha yüksektir. İlave olarak Ti, Nb ve V birincil ve ötektik karbürü incelterek daha homojen dağılım sağlamakla birlikte birincil M_7C_3 karbürün hacim oranını azaltmıştır. İlavesiz alaşımın sertliğinin sertleştirme ısı işlemi ile artması sertleştirme ısı işleminde ikincil M_7C_3 karbürlerin çökmesinden ve östenitin martensite dönüşmesinden kaynaklanmıştır. Ti, Nb ve V içeren alaşımların sertliklerinin sertleştirme ısı işlemi ile içerik oranları arttıkça artması sertleştirme ısı işlemi ile çökelen M_7C_3 , TiC, NbC ve VC ikincil karbürlerden ve östenitin martensite dönüşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sertleştirme ısı işlemi ile çökelen küçük ve sert karbürlerin martensit matriste homojen olarak dağıldığı bir çok araştırmacı tarafından belirtilmiştir [21, 45, 60, 74].

Çizelge 7.5. Yüksek kromlu beyaz dökme demirde meydana gelen karbürlerin sertlik Değerleri [10]

Karbür	Sertlik
	HV
Krom Karbür	1200-1600
Molibden Karbür	1500
Tungsten Karbür	2400
Vanadyum Karbür	2800
Titanyum Karbür	3200

Karbür oranı ile sertlik arasında doğru orantılı bir ilişki vardır. Karbür miktarındaki artış ile sertliğin arttığı görülmektedir [17].



Şekil 7.11. Krom/Karbon oranı arasındaki ilişki [1]

Elde edilen sertlik değerlerinde en yüksek değerlerin %2 Ti içeren numuneden elde edilmesi Ti oranının artırılması ile yapıda TiC miktarı da artar. Yüksek sıcaklıklarda birincil ve ötektik karbürler olarak çekirdeklenmiş birçok ince TiC partikülü çöker. Ti oranının artması ile ötektik karbür oranı düşer ve matrisin mikro sertliği ile dökümlerin yüzey sertliği artar. Çizelge 7.5’de titanyum karbürlerinin 3200HV ile en yüksek sertlik değerinde olduğu görülmektedir [10, 21].

Farah ve arkadaşları [87], Nb ilave edilmiş yüksek kromlu beyaz dökme demirde sertleştirme ısısal işlemi ile sertlik artışını, 1050 °C sıcaklıkta karbonun östenit içinde difüzyonun iyileştiğini ve bu östenitin yüksek karbonlu martensite dönüşmesine bağlamışlardır.

Diğer bir araştırmada [58], %4 C, %18 Cr %1 Mo ve %1 Ti içeriğine sahip yüksek kromlu beyaz dökme demirde makro sertlik değerinin artan sertleştirme sıcaklığı ile attığı ve 1000°C sıcaklıkta maksimum 64.6HRC değerine ulaştığı, ancak daha yüksek sıcaklıklarda düşmeye başladığı belirtilmiştir.

Bedolla ve arkadaşlarının [46], %16 Cr ve %2,5 C içerikli beyaz dökme demirde Ti içeriği arttıkça makro sertliğin arttığını, yüksek Ti(%2) içeriğinde sert küçük TiC partiküllerinin matriste homojen dağılım gösterdiğini ve titanyumun matriste katı

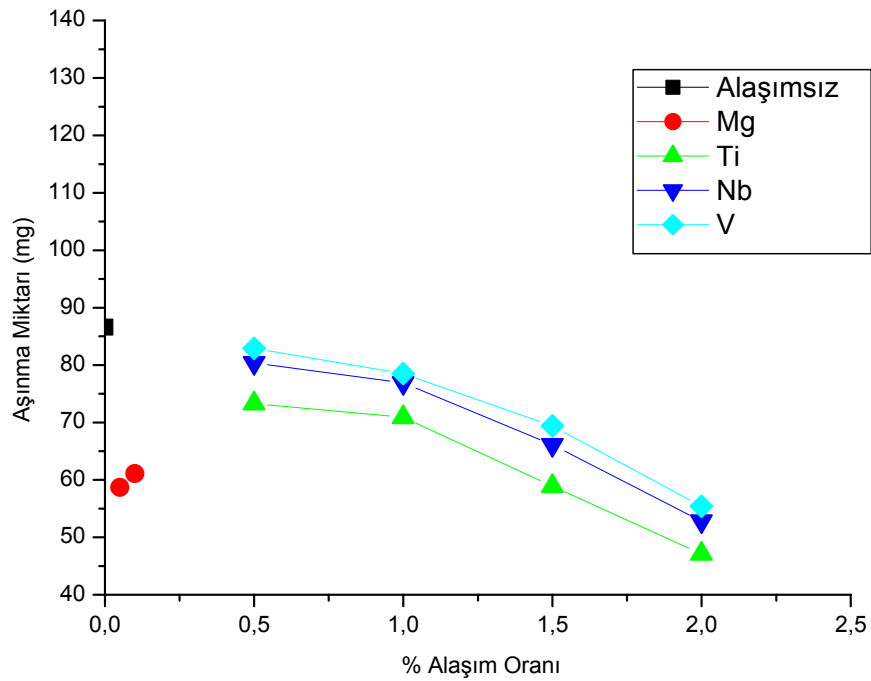
eriyik olarak bulunmasının da sertlik değerini artırdığını açıklamışlardır. İlave olarak, Ti içermeyen alaşımda 48HRC sertlik değerinin %2 Ti içeriğinde 58HRC'ye yükseldiğini belirtilmiştir.

7.3.2. Aşınma testi sonuçları

İlavesiz ve değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş, sertleştirme ısıl işlemi ve takiben temperleme ısıl işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerinin 20N ve 40N yük altında aşınma miktarı Ti, Nb, V ve Mg oranına bağlı olarak değişimi sırasıyla Çizelge 7.6., 7.7. ve Şekil 7.12. ve 7.13'de verilmiştir. Alaşımın 20N ve 40N yük altında aşınma miktarı ilavesiz alaşıma göre Ti, Nb ve V oranları artıkça sürekli olarak azalmıştır. Ancak aşınma miktarında en fazla düşme Ti ilavesi ile elde edilmiştir. Alaşımın %2 Ti bileşiminde 20N ve 40N yük altında aşınma miktarında düşme yaklaşık olarak % 45'dir. %2 Ti içeren alaşımın aşınma deneyinde yükün 20N'dan 40N'a artırılması aşınmayı yüzde olarak değiştirmemiştir. Fakat %2 Nb içeren alaşım 20N'da %39 ve 40N'da %45 daha düşük aşınma kaybına uğramıştır. Alaşımda %2 V içeriği de %2 Nb içeren alaşıma benzer şekilde yük miktarı artıkça aşınma dayanımı artan aşınma davranışı sergilemiştir. Alaşıma ilave edilen Mg ise aşınma miktarını düşürmekle birlikte, %0,05 Mg içeriği %0,1 Mg içeriğinden daha düşük aşınma kaybı göstermiştir. Alaşımda %0,05 Mg, ilavesiz alaşıma göre, 20N yük altında %32 aşınma miktarında düşme sergilerken 40N yük altında %11 aşınma miktarında düşme ile aşınma kaybına uğramıştır.

Çizelge 7.6. Değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirde, sertleştirme ve temperleme ısı işlemi sonrası, 20N yük altında aşınma değerleri

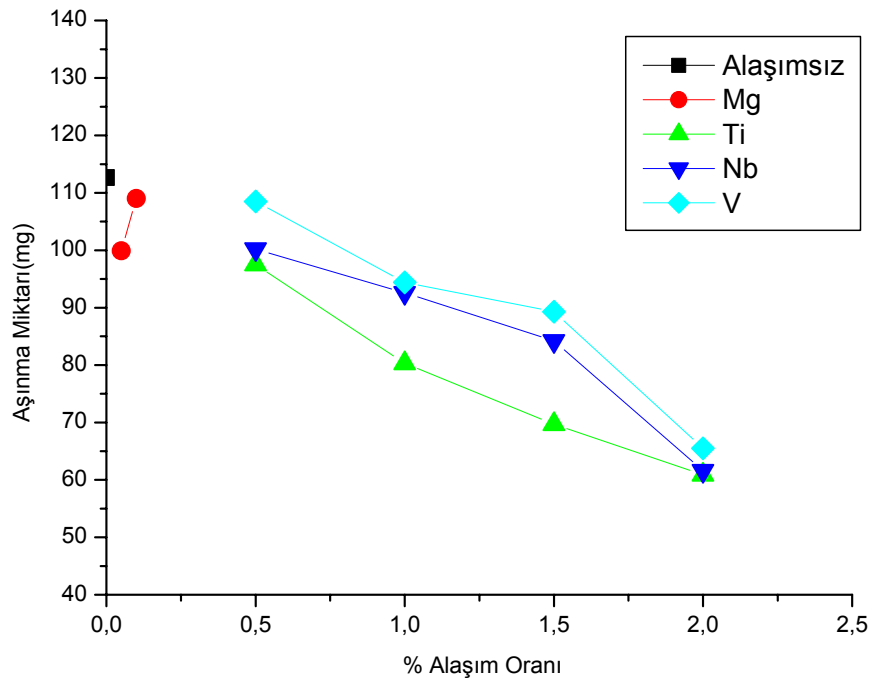
Alaşım Elementi	%Miktarı	Aşınma Miktarı(mg) 20N
Ti	0,5	73,3
	1	70,9
	1,5	58,9
	2	47,1
Nb	0,5	80,4
	1	76,9
	1,5	66,1
	2	52,8
V	0,5	82,9
	1	78,5
	1,5	69,4
	2	55,4
Mg	0,05	58,7
	0,1	61,1
0	0	86,6



Şekil 7.12. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin , sertleştirme ve temperleme ısı işlemi sonrası 20N yük altında aşınma davranışının % Ti, Nb, V ve Mg oranına bağlı olarak değişimi.

Çizelge 7.7. Değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirde, sertleştirme ve temperleme ısısal işlemi sonrası, 40N yük altında aşınma değerleri

Alaşım Elementi	%Miktarı	Aşınma Miktarı(mg) 40N
Ti	0,5	97,5
	1	80,3
	1,5	69,7
	2	60,9
Nb	0,5	100,2
	1	92,6
	1,5	84,2
	2	61,6
V	0,5	108,5
	1	94,4
	1,5	89,3
	2	65,5
Mg	0,05	99,9
	0,1	109
0	0	112,65



Şekil 7.13. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin, sertleştirme ve temperleme ısısal işlemi sonrası 40N yük altında aşınma davranışının % Ti, Nb, V ve Mg oranına bağlı olarak değişimi

Değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş, sertleştirme ısı işlemi ve takiben temperleme ısı işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerinin 20N ve 40N yük altında aşınma dayanımı ilavesiz alaşıma göre Ti, Nb, V ve Mg miktarı arttıkça artmıştır. Aşınma dayanımında meydana gelen artış Ti, Nb, V ve Mg ilaveleri ile birincil ve ötektik karbürde meydana gelen incelme, morfoloji değişikliği ve homojen dağılım, katılaşma sırasında teşekkül eden ikincil karbürler (TiC, NbC ve VC) ve ısı işlem ile oluşan martensit ve çok sayıda küçük, sert ve homojen dağılımlı ikincil karbürlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde, martensite göre daha yumuşak olan östenit matrisin aşınması ve aşınan matristen karbürlerin ayrılması veya kopması daha hızlıdır. Bu durumda karbürlerin aşınma dirençlerinin yalnızca bir kısmından yararlanılabilmiş olunur. İlave olarak matriste heterojen dağılımlı, uzun lamel şekline sahip kaba birincil ve ötektik karbürlerin aşınma dayanımı üzerindeki olumsuz etkisinin önemi dikkate alınmalıdır. Bu nedenle alaşıma Ti, Nb, V ve Mg ilaveleri ve sonrası uygulanan sertleştirme ve temperleme ısı işlemi ile aşınma dayanımı üzerine etki eden olumsuz etkenler önemli ölçüde elimine edilmiştir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde mikro yapıda matris, karbürlerin kimyasal bileşimi, hacim oranı, boyutu, dağılımı ve morfolojisi aşınma direnci açısından oldukça önemlidir. Çünkü bu faktörler aşınmada matriste meydana gelecek deformasyon derinliği ve karbür kırılmalarını etkileyecektir. Genellikle mikro yapıdaki karbür oranı arttıkça aşınma direnci artmaktadır [10].

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde Ti ilavesinin aşınma dayanımı üzerine etkisinin araştırıldığı çalışmada [74], bütün yükler altında aşınma katsayısının Ti içeriği arttıkça azaldığı, aşınmada deformasyon derinliği Ti içeriği arttıkça azaldığı ve TiC ile güçlendirilmiş matrisin ötektik karbürlerin kırılmalarına karşı daha fazla destek sağladığı tespit edilmiştir. Aşınmada matriste meydana gelen deformasyon derinliği kadar karbürlerin boyut, morfoloji ve dağılımı da önemlidir.

Coronado, %5,13 C, %7,39 Cr, %0,22 Si, %0,47 Mn, %0,008 S içeren beyaz dökme demirde karbür oryantasyonu ve uygulanan yükün aşınma dayanımı üzerindeki etkilerini incelediği çalışmasında, çapraz ve boyuna yönelmiş karbürlere

sahip beyaz dökme demirde uygulanan yükün artması ile ağırlık kaybının arttığını tespit etmiştir [32].

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde matris yapının aşınma direnci üzerine etkisinin araştırıldığı diğer bir çalışmada [88, 89] ise, martensitik matrisin östenitik matrisden daha iyi aşınma direnci gösterdiği açıklanmıştır.

%0-2,02 Ti ilave edilmiş %16 Cr içeren beyaz dökme demirin 50-250 N aralığı yük altında kayma aşınma şartlarında aşınma davranışının analiz edildiği bir araştırmada alaşım elementi olan titanyumdan dolayı, sert ve küçük Ti karbürlerin çökmesi ile matrisin incelendiği, sertliğin arttığı ve en iyi aşınma davranışını %2,02 Ti içeren alaşımın gösterdiği vurgulanmıştır [65].

Ağırlıkça %25 Cr, %4 C içeren ötektik üstü yüksek kromlu beyaz dökme demirde Ti ilavesinin mikroyapı ve aşınma direncine etkisinin incelendiği araştırmada [53], %2 Ti ilavesinde en ince mikroyapının elde edildiği, ötektik karbürlerin krom karbürlerden ve Ti karbürlerden teşekkül ettiği, ötektik yapının mikroyapı incelmesinden ve bir miktar krom karbürün titanyum karbür ile yer değiştirmesinden dolayı en yüksek sertlik ve aşınma direnci gösterdiği belirtilmiştir.

7.3.3. Darbe testi sonuçları

Deneysel çalışmada kullanılan yüksek kromlu beyaz dökme demirin ilavesiz ve değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş dökümlerin döküm halinde, sertleştirme ısı işlemi takiben temperleme ısı işlemi uygulanmış numunelerinin 150J yük altında elde edilen darbe dayanımları Çizelge 7.8. ve 7.9.'da ve Şekil 7.14. ve 7.15'de verilmiştir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin ilavesiz döküm halinde 4.1 J/cm^2 darbe dayanımı değeri %0,5 Nb ve V oranlarında değişmemiştir. Ancak %1, %1,5 ve %2 Ti, Nb ve V oranları ile % 0,05 ve %1 mg oranlarında oran arttıkça darbe dayanımı artmıştır. %2 Ti, Nb ve V oranları sırasıyla 5,5, 5,4 ve $5,2 \text{ J/cm}^2$ darbe dayanım değerlerini üretmişlerdir. Bu değerler ilavesiz alaşımın sahip olduğu değere göre yaklaşık olarak % 27-34 daha yüksektir. Yüksek kromlu beyaz dökme

demirin döküm halindeki numunelerinde en yüksek darbe dayanım değeri, Çizelge 7.8’de görüleceği üzere, $5,5 \text{ J/cm}^2$ ile %2 Ti içeren numuneden elde edilmiştir.

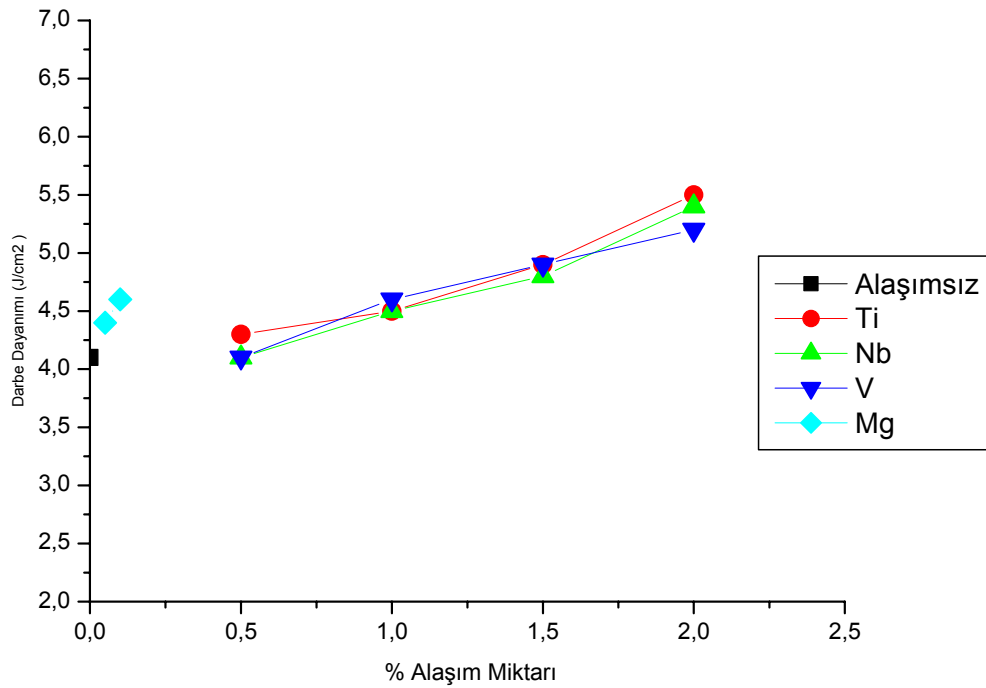
Sertleştirme ısı işlemi ve takiben temperleme ısı işlemi uygulanmış yüksek kromlu beyaz dökme demir numunelerin darbe dayanımı Ti, Nb, V ve Mg oranları arttıkça artmıştır, Çizelge 7.9. ve Şekil 7.15. Yüksek kromlu beyaz dökme demirde %2 Ti, Nb ve V oranları sırasıyla 6, 5,7 ve $5,6 \text{ J/cm}^2$ darbe dayanım değerlerini üretmişlerdir. Bu gruptaki numunelerde en yüksek darbe dayanımı, döküm halinde numunenin sahip olduğu 4 J/cm^2 değere göre %50 artış sağlayan %2 Ti oranında elde edilmiştir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirde %0,1 Mg oranı %1 Ti, Nb ve V oranlarının ürettiği darbe dayanımına yakın değer üretmiştir.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirde Ti, Nb, V ve Mg ilavelerinin, sertleştirme ve temperleme ısı işlemlerinin darbe dayanımında sağladığı iyileşme aşağıda verilen mekanizmalar ile açıklanabilir;

- 1- Ti, Nb, V ve Mg ilaveleri mikroyapıda mevcut olan birincil ve ötektik karbürlerde önemli derecede incelme sağlamıştır. Karbürlerde incelme derecesi ortalama karbür çapı değerleri ile açık bir şekilde görülmektedir.
- 2- Ti, Nb, V ve Mg ilaveleri mikroyapıda mevcut olan birincil ve ötektik karbürlerin morfolojisini değiştirmiştir. Birincil karbürler hegzagonal şekline dönüşmüştür. Özellikle ısı işlem ile karbürlerin keskin köşeleri ve sivri uçları yuvarlaklaşmıştır.
- 3- Ti, Nb, V ve Mg ilaveleri ile karbür dağılımı daha homojen olmuştur.
- 4- Yüksek kromlu (%30Cr) beyaz dökme demirlerde, kendilerini destekleyen bir matris olmaması durumunda karbürlerin hacim oranı arttıkça tokluk düşmektedir [29]. Bu nedenle, ilavesiz ve ısı işlem uygulanmamış alaşımda darbe dayanımı östenit matristen dolayı düşük çıkmıştır. İlaveler ve ısı işlem ile karbürlerin hacim oranı artmış fakat matris martensite dönüşmüştür. Martensit matris karbürler için daha iyi bir destekleyicidir.
- 5- Alaşımın ısı işleminde martensit matriste homojen olarak dağılmış küçük boyutlu ve çok sayıda ikincil karbürler çökelmiştir.

Çizelge 7.8. Değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş yüksek kromlu beyaz dökme demirin döküm halinde darbe dayanımları

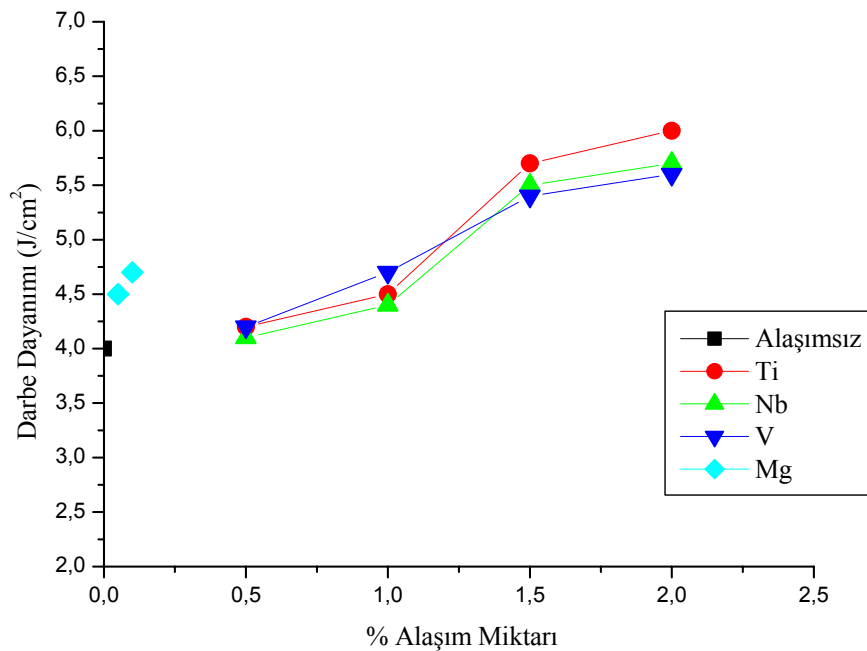
Alaşım Elementi	%Miktarı	Darbe Dayanımı (J/cm ²)
Ti	0,5	4,3
	1	4,5
	1,5	4,9
	2	5,5
Nb	0,5	4,1
	1	4,5
	1,5	4,8
	2	5,4
V	0,5	4,1
	1	4,6
	1,5	4,9
	2	5,2
Mg	0,05	4,4
	0,1	4,6
0	0	4,1



Şekil 7.14. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin döküm halinde darbe dayanımlarının % Ti, Nb, V ve Mg oranına bağlı olarak değişimi

Çizelge 7.9. Değişik oranlarda Ti, Nb, V ve Mg ilave edilmiş yüksek kromlu beyaz dökme demirin sertleştirme ve temperleme ısı işlemi sonrası elde edile darbe dayanımları

Alaşım Elementi	%Miktarı	Darbe Dayanımı (J/cm ²)
Ti	0,5	4,2
	1	4,5
	1,5	5,7
	2	6
Nb	0,5	4,1
	1	4,4
	1,5	5,5
	2	5,7
V	0,5	4,2
	1	4,7
	1,5	5,4
	2	5,6
Mg	0,05	4,5
	0,1	4,7
0	0	4



Şekil 7.15. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin sertleştirme ve temperleme ısı işlemi sonrası darbe dayanımlarının % Ti, Nb, V ve Mg oranına bağlı olarak değişimi

Bedolla ve arkadaşları [46], %16 Cr içeren beyaz dökme demirde %2'ye kadar olan Ti içeriğinin döküm halinde kırılma tokluğunu değiştirmedeğini belirtmişlerdir. Yüksek kromlu beyaz dökme demir üzerine yapılan diğer bir araştırmada [58], %4 C, %18 Cr, %1 Mo ve %1 Ti içeren alaşımda kırılma tokluğunun Ti içermeyen alaşıma göre önemli derecede arttığı, tokluk değerinin 6,3-6,9 J/cm² aralığında gerçekleştiği ve tokluk değerinin sertleştirme sıcaklığı ile değişmediği vurgulanmıştır.

Zhi ve arkadaşları [58], ötektik üstü yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde kırılma tokluğunun matris değişimi ve ısıtma işlem sıcaklığı ile değişmediğini belirtmişlerdir.

Diğer bir araştırmada [28], yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde tokluğu etkileyen kesin faktörlerin karbür morfolojisi ve dağılımı olduğu açıklanmıştır. Ötektik üstü yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde birincil karbürün incelmeye kırılma tokluğu üzerinde oldukça etkilidir.

Literatürde, titanyum ilavesinin yapıdaki birincil ve ötektik karbürleri incelterek küreleştirme eğilimi gösterdiği, Ti, Nb ve V oranının artırılması ile yapıda TiC, NbC ve VC'lerinin miktarının da artacağı, yüksek sıcaklıklarda birincil ve ötektik karbürler olarak çekirdeklenmiş, birçok ince karbür partiküllerinin çökeleceği, çekirdeklenme oranındaki artış serbest dentritik, çubuğumsu veya taç yaprağı şeklinde karbür büyümesini bastırarak mekanik özelliklerde, özellikle de toklukta iyileşme sağlayacağı belirtilmiştir [10, 21].

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler üzerine yapılan diğer bir araştırmada [90], sertliğin aşınma dayanımını belirlemede doğru bir parametre olmadığı, martensitte karbon oranı arttıkça daha az aşınma kaybının olduğu, aynı zamanda kalıntı östenitte karbon içeriğinin azalması kırılma tokluğunu artırdığı, 1000-1050 °C sıcaklıkta 4 saat süre ile sertleştirme ısıtma işlemi ve 200 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile temperleme işleminin iyi kırılma tokluğu ve aşınma dayanımı veren mikroyapıyı ürettiği açıklanmıştır.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Yüksek kromlu (%28 Cr) beyaz dökme demire farklı oranlarda Ti, Nb, V, Mg ilavelerinin mikroyapı, aşınma direnci, sertlik ve tokluk üzerine etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Yüksek kromlu beyaz dökme demire Ti, Nb, V ve Mg ilavesi ile ilave oranlarına bağlı olarak:

- a) Uzun ve keskin köşelere sahip karbürler altıgen şekillere yakın morfolojiye dönüşmüştür.
- b) Karbür dağılımı döküm halindeki yapısına göre daha homojen olmuştur.
- c) Karbür boyutları küçülmüştür.
- d) Mikroyapıda TiC, NbC ve VC karbürleri teşekkül etmiştir.

2. Yüksek kromlu beyaz dökme demire % 0,05 ve % 0,1 Mg ilavesi, karbürleri küreye yakın morfolojiye dönüştürmüştür.

3. İlavesiz ve değişik oranlarda Ti, Nb, V, Mg ilave edilmiş yüksek kromlu beyaz dökme demirin ısıtılması işlemi ile:

- a) Döküm halinde östenit matris martensite dönüşmüştür.
- b) İkincil karbürler çökelmiştir.
- c) Karbürlerin dağılımı daha homojen olmuştur.

4. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin döküm halinde yaklaşık 12,08µm değeri ile ortalama karbür çapı Ti, Nb, V ve Mg ilave oranı arttıkça azalmıştır. Karbür çaplarında en etkili düşme %237 oranında % 0,1 Mg, % 2 Ti, Nb, V, ilavesi ile elde edilmiştir.

5. Yüksek kromlu beyaz dökme demire %0,05 ve % 0,1 Mg ilavesi alaşımın

sertliğini düşürürken Ti, Nb, V ilavesi artan ilave oranlarına bağlı olarak artmıştır. Sertlikteki en yüksek artışı %17 oranı ile % 2 Ti ilavesi sağlamıştır.

6. Isıl işlem uygulanmış numunelerin bütününde döküm haline göre sertlik artmıştır. Isıl işlem uygulanmış numunelerin sertliği Mg dışında ilave oranı arttıkça artmıştır. %2 oranında Ti, Nb, V içeren numunelerin sertliği ısıtıl işlem ile sırasıyla %17, %13, %12 yükselmiştir.

7. Dökümlerin bütününde ısıtıl işlem sonrası uygulanan temperleme işlemi sertlik değerlerini yaklaşık olarak %3 düşürmüştür.

8. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin darbe direnci Ti, Nb, V, Mg ilave oranları arttıkça yükselmiştir. Aşınma miktarında 47,1, 52,8, 55,4 ve 58,7mg en düşük değerler 20 N yük altında %2 Ti, Nb, V ve Mg ilavesi ile elde edilmiştir. Döküm haline göre aşınma miktarında en yüksek düşme yaklaşık olarak %45,6, %39, %36 ve %32 ile sırasıyla %2 Ti, Nb, V ve %0,05 Mg ilave oranlarında gerçekleşmiştir.

9. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin darbe dayanımı %2 Ti ilavesi ile ilavesiz alaşıma göre yaklaşık olarak döküm halinde %25, temperleme ısıtıl işlemi sonrası %33 artmıştır.

8.2. Öneriler

Yüksek kromlu (%28 Cr) beyaz dökme demire farklı oranlarda Ti, Nb, V, Mg ilavelerinin mikroyapı, aşınma direnci, sertlik ve tokluk üzerine etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada imkanların kısıtlı olması sebebi ile mikroyapının elektron tarama mikroskobu ve XRD ile analizi yeterli düzeyde yapılamamıştır. Bu tez konusunda veya benzeri konularda yapılacak araştırmalarda mutlaka elektron tarama mikroskobu ve XRD ile mikroyapı analiz ağırlıklı çalışma yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Laird, G., Gundlach, R., Röhrig, K., “Abrasion Resistant Cast Iron Handbook”, *American Foundry Society*, Colorado, 7-10, 45-53, 69, 123-150, 165-174 (1988).
2. Gundlach, R., Doane, V., “Alloy Cast Irons”, ASM Handbook,; Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance, Vol 1, 10th ed., *ASM International*, Materials Park, USA, 85-98 (1990).
3. Şahin, Y., “Kumlama Makinesi Türbin Paletlerindeki Aşınma ve Mikroyapının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 31, 32, 40, 45-48 (2001).
4. Ming, C., Ming, L. C., Chun, H C., “Effect of Carbon Content on Microstructural characteristics of The Hypereutectic Fe-Cr-C Claddings”, *Materials Chemistry and Physics*, 117: 257-261 (2009).
5. Fernandez, I., Belzunce, F.J. “Wear and oxidation behaviour of high-chromium white cast irons” *Materials Characterization*, 59: 669 – 674 (2008).
6. Scandian, C., Boher, C., Mello, J. D. B., Rézaï-Aria, F., “Effect of molybdenum and chromium contents in sliding wear of high-chromium white cast iron: The relationship between microstructure and wear”, *Wear*, 267, 401-408 (2009).
7. Pattyn, R.L., “Heat Treatment of High-Cr White Cast Irons”, *AFS Transactions*, 101, 161-165 (1993-1).
8. Ay, M., Çayda, U., Hasçalık, A., “Determining the optimal testing parameters on the abrasive wear behaviour of FeCr-reinforced iron-based composites” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 224 1129 (2010)
9. Sağlam, C., “Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Aşınma Direncine Alaşım Elementleri İlavesinin Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 19-26 (2009).
10. Say, Y., “Borürlerin Aşıl原因ıcı Olarak Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Aşınma Direncine Etkilerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 1, 9-12, 15-20, 36, 37 (2008).
11. Inthidech, P. Sricharoenchai, N. Sasaguri, Y. Matsubara, “Behavior of Hardness and Retained Austenite in Heat Treatment of High Chromium Cast Iron for Abrasive Wear Resistance”, *AFS Transactions*, 106: 899-910 (2004).
12. Sricharoenchai, P., Inthidech, S., Sasaguri, N., Matsubara, Y., “Effect of Alloying Elements on Behavior of Hardness and Retained Austenite of Eutectic High Chromium Cast Irons”, *AFS Transactions*, 911-923 (2004).

13. Cevher, Ö., “ Dökme Demirlerde Sert Faz Oluşumunun Önlenmesi ve Giderilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 1-9 (2006).
14. Erdoğan, M.; “Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri”, Cilt. 1, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 332-346 (1998).
15. Sağlam, D., “Dökme Demirlerin Aşınma Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 4, 38, 41-45, 48-51, 59 (2009).
16. Erdoğan, M.; “Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özelliği”, Cilt. 1, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 215-261 (2000).
17. Çavuşoğlu, E., Döküm Teknolojisi I. GTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, *Ofset Atölyesi*, İstanbul (1992).
18. Callister, W.D., “Materials Science and Engineering an Introduction”, *John Wiley & Sons Inc.*, Canada, 360 (1997).
19. Homma, M., Minato, A., Meguro, H., Abe, Y., “Some Investigations on The Cerium-Treated Cast Iron”, *The Research Institute for Iron, Steel and Other Metals*, 30: 500-509 (1960).
20. Li, D., Lu, L., Zhang, Y., Ye, C., Ren, X., Yang, Y., Yang, Q., “Phase Diagram Calculation of High Chromium Cast Irons and Influence of Its Chemical Composition”, *Materials and Desing*, 30: 340-345 (2009).
21. Odabaşı, A., Göğtaş, C., Sezer, L., Ünlü, N., Eruslu, N., “Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Isıl İşlemi”, *Metal Dünyası*, 157: 104-108 (2006).
22. Standart Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons, A532/A532M-93a, *ASTM International*, West Conshohocken, 2 (2003).
23. Rothman, M.F., “High - Temperature Property Data: Ferrous Alloys”, *ASM International*, Metals Park, Ohio, 117-118 (1960).
24. Çetinkaya, C., “Yüksek Kromlu Beyaz dökme demir malzemelerin SiC aşındırıcı Karşısındaki Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, *Journal of Polytechnic*, 6 (4): 661-669 (2003).
25. Doğan, O. N., Hawk, J.A., Laird, G., “Solidification Structure and Abrasion Resistance of High Chromium White Irons”, *Met. Materials Transactions A*, 28: 1315-1328 (1997).

26. Tabrett, C. P., Sare, I. R., Ghomashchi, M. R., “Microstructure-Property Relations in High Chromium White Iron Alloys”, *International Materials Rev.*, 41: 59 (1996).
27. Zum Gahr, K. H., Eldis, G. T., “Abrasive Wear of White Cast Irons”, *Wear*, 64: 175 (1980).
28. Zum Gahr, K. H., Scholz, W. G., “Fracture Toughness of White Cast Irons”, *Journal of Met.*, 38-44 (1980).
29. Tang, X.H., Chung, R., Li, D.Y., Hinckley, B., K. Dolman., “Variations in microstructure of high chromium cast irons and resultant changes in resistance to wear, corrosion and corrosive wear” *Wear*, 267: 116–121 (2009).
30. Pintaude, G., Bernardes, F. G., Santos, M. M., Sinatora, A., Albertin, E., “Mild and Severe Wear of Steels and Cast Irons in Sliding Abrasion”, *Wear*, 267: 19-25 (2009).
31. Wiengmoon, A., Chairuangsi, T., Poothong, N., Pearce, J.T.H., “Electron Microscopy and Hardness Study of a Semi-Solid Processed 27 wt%Cr Cast Iron”, *Materials Science and Engineering A*, 480: 333-341 (2008).
32. Coronado, J.J., Sinatora, A., “Abrasive wear study of white cast iron with different solidification rates”, *Wear*, 267: 2116–2121 (2009).
33. Chang, C. M., Chen, L. H., Lin, C. M., Chen, J. H., Fan, C. M., Wu, W., “Microstructure and wear characteristics of hypereutectic Fe–Cr–C cladding with various carbon contents”, *Surface & Coatings Technology*, 205: 245–250 (2010).
34. Dong, SY., Tien, SL., “The Effect of Microstructure on Unidirectional Chilled Solidification of High Chromium White Cast Iron”, *Materials Processing Technologies*, 154-155: 1558-1570 (2011).
35. Coronado, C., “Effect of load and carbide orientation on abrasive wear resistance of white cast iron”, *Wear*, 270: 823-827 (2011).
36. Su, Y.L., “Optimization of Hardenability of High Chromium White Cast Iron”, *China Academic Journal Electronic Publishing House*, 3 (4): 284-287 (2008).
37. Tian, H.H., Addie, G.R., Visintainer, R.J., “Erosion–corrosion performance of high-Cr cast iron alloys in flowing liquid–solid slurries” *Wear*, 267: 2039–2047 (2009).
38. Ribeiroa, L., Barbosab,A., Vianaa, F., Monteiro Baptistac, A., Diasd,C., Ribeiroa , C.A., “Abrasion wear behaviour of alloyed and chilled cast irons” *Wear*, 270: 535–540 (2011).

39. Wiengmoon, A., Pearce, J.T.H., Chairuangsrir, T., "Relationship between microstructure, hardness and corrosion resistance in 20 wt.%Cr, 27 wt.%Cr and 36 wt.%Cr high chromium cast irons" *Materials Chemistry and Physics*, 125: 739–748 (2011).
40. Scandian, C., Boher, C., Mello, J. D. B., Rézaï-Aria, F., "Effect of molybdenum and chromium contents in sliding wear of high-chromium white cast iron: The relationship between microstructure and wear", *Wear*, 267: 401-408 (2009).
41. Zhi, X. H., Xing, J. D., Fu, H. G., Gao, Y. M., "Effect of fluctuation, modification and surface chill on structure of 20 Cr hypereutectic white cast iron", *Materials Science and Technology*, 25: 1, 56-60 (2009).
41. Zhou, XL., Hua, XZ., Zhang JY., Tang, YJ., Chen, QJ., "Microstructure and Property of the New Type White Cast Iron", *Engineering Materials II*, 51: 31-39 (2008).
43. Chakrabarty, I., "Effect of Copper on the Corrosion Resistance Behaviour of As-Cast and Destabilized Cr-Mn White Cast Irons", *International Journal of Metal Casting*, 5 (1): 49-56 (2011).
44. Wei-ke, An., An-hui, Cai a., Yun, Luo., Hua, Chen., Wei-xiang, Liu., Tie-lin, Li., Min "Optimization of Composition of As-cast Chromium White Cast Iron Based on Wear-resistant Performance" *Materials and Design*, 30: 2339–2344 (2009).
45. Zhi, X., Xing, Fu, J., H., Xiao, B., "Effect of Niobium on The As-cast Microstructure of Hypereutectic High Chromium Cast Iron", *Materials Letters*, 62: 857-860 (2008).
46. Bedolla, A., Correa, R., Quezada, J. G., Maldonado, C., "Effect of Titanium on The As-cast Microstructure of a 16 Chromium White Iron", *Materials Science and Engineering A*, 398: 297-308 (2005).
47. Li, Y. X., Li, Z. L., Chen, X., "Development of Boron White Cast Iron", *International Journal of Cast Metals*, 21: 1-4, 67-70 (2008).
48. Correa, R., Bedolla-Jacuindea, A., Zuno-Silva, J., Cardosoc, E., Mejía, I., "Effect of boron on the sliding wear of directionally solidified high-chromium white irons" *Wear*, 267: 495–504 (2009).
49. Zhongli, Liu., Yanxiang, Li., Xiang, Chen., Kaihua, Hub., "Microstructure and mechanical properties of high boron white cast iron", *Materials Science and Engineering*, 486: 112–116 (2008).
50. Reda, R., Nofal, A., Ibrahim, K., Hussien, A., "Investigation of improving wear performance of hypereutectic 15% Cr-2% Mo white irons" *69th World Foundry Congress (Wfc) Hangzhou, Peoples R China*, 4: 438-446 (2010).

51. Filipovic, M., Zeljko, K., Korac, M., “Solidification of High Chromium White Cast Iron Alloyed with Vanadium”, *Materials Transactions*, 52 (3): 386-390 (2011).
52. Pearce, J.T.H, “Structure and Wear Performance of Abrasion Resistant Chromium White Cast Irons”, *AFS Transactions*, 126: 599-622 (1984).
53. Chung, R.J., Tang, X., Li, D.Y., Hinckley, B., Dolman, K., “Effects of titanium addition on microstructure and wear resistance of hypereutectic high chromium cast iron Fe-25wt.%Cr-4wt.%C” *Wear*, 267: 356-361 (2009).
54. Qu, Y., Xing, J., Zhi, X., Peng, J., Fu, H., “Effect of Cerium on The As-cast Microstructure of a Hypereutectic High Chromium Cast Iron”, *Materials Letters*, 62: 3024-3027 (2008).
55. Li, Y., Gao, Y., Wang, B., Shi, F., Di, X., “Fabrication and Interface Property of WC-TiC-Co/Cr 20 Composites”, *Rare Metal Materials and Engineering*, 39 (4): 715-718 (2010).
56. Yefei, L., Yimin, G., “Three-body abrasive wear behavior of CC/high-Cr WCI composite and its interfacial characteristics” *Wear*, 268: 511-518 (2010).
57. Kambakas, K., Tsakirooulos, “Solidification of High-Cr White Cast Iron-WC Particle Reinforced Composites”, *Materials Science Engineering A*, 413-414: 538-544 (2005).
58. Zhi, X., Xing, J., Gao, Y., Fu, H., Peng, J., Xiao, B., “Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of a Ti-bearing Hypereutectic High Chromium White Cast Iron”, *Materials Science and Engineering A*, 487: 171-179 (2008).
59. Wang, J., Xiong, J., Fan, H. Y., Yang, H. S., “Effect of high temperature and cryogenic treatment on the Microstructure and Abrasion Resistance of a High Chromium cast iron”, *Journal of Materials Processing*, 209 (7): 3236-3240 (2009).
60. Hou, Q., Huang, Z., Wang, J., “Application of Rietveld Refinement to Investigate the High Chromium White Cast Iron Austempered at Different Temperatures” *Journal of Iron and Steel Research. International*, 16 (4): 33-38 (2009).
61. Kishore, P. Sampathkumaran, S. Seetharamu, “Erosion and Abrasion Characteristics of High Manganese Chromium Irons”, *Wear*, 259: 70-77 (2005).
62. Haohuai, L., Jun, W., Hongshan, Y., Baoluo S., “Effects of cryogenic treatment on microstructure and abrasion resistance of CrMnB high-chromium cast iron subjected to sub-critical treatment” *Materials Science and Engineering*, 478: 324-328 (2008).

63. Karantzalis, A.E., Lekatou, A., Mavros, H., “Microstructural Modifications of As-Cast High-Chromium White Iron by Heat Treatment”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 18: 174-181 (2009).
64. Doğan, O. N., Hawk, J.A., “Effect of Retained Austenite on Abrasion Resistance of High-Cr White Cast Irons”, *AFS Transactions*, 114: 167-174 (1997).
65. Çapa, M., Gülmez, T., “X210 Cr 12 Çelik Hurdasından Üretilen Beyaz Dökme Demirin Aşınma ve Darbe Dirençlerinin Artırılması”, *Journal of Engineering Environmental Science*, 25: 497-502 (2001).
66. Wei, LI., “Effect of Microstructure on Impact Fatigue Resistance and Impact Wear Resistance of Medium Cr-Si Cast Iron”, *Journal of Iron and Steel Research*, 14: 47-50 (2007).
67. Tomruk, S., “Toz Metalurjisi ile Üretilmiş AA2014 Alüminyum Alaşımının Mikroyapısal Karakterizasyonu ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 35-37 (2010).
68. Çetinkaya, C., “Pulluk Uç Demirlerinin Kum Havuzunda Kaynaklı ve Kaynaksız Halde Aşınmaya Karşı Dayanımlarının Tespit Edilmesi”, *Journal of Polytechnic*, 3 (3): 55-60 (2000).
69. Soydaş, S., “Üniversal Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 18, 26, 28, 30-32 (2006).
70. Karabaşoğlu, M., “Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 10, 13, 14, 16-18, 24, 29-38 (2008).
71. Karaoğlu, Y., “Bir Aşınma Test Cihazının Tasarımı ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 10-14, 22, 23 (2006).
72. Özkan, S., “Alüminyum Matrisli SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretimi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 43, 45, 46 (2007).
73. Yu, S.K., Matsubara, Y., “Abrasion Wear Resistance of Alloyed White Iron with Several Types of Carbides and Matrices”, *AFS Transactions*, 27: 53-58 (1998).
74. Bedolla, A., Correa, R., Mejia, I., Quezada, J. G., Rainforth, W. M., “The effect of Ti on the wear behaviour of a %16 Cr White Cast Iron Under Pure Sliding”, *Wear*, 263: 808-820 (2007).

75. Çetinkaya, C., “Yüksek Kromlu Beyaz dökme demir malzemelerin Al₂O₃ ile Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, *Journal of Polytechnic*, 6 (3): 559-567 (2003).
76. Zhang, G.S., Gao, Y.M., Xing, J.D., Wei, S.Z., Zhang, X.L., “Interfacial Characteristics and Wear Resistance of WCp/White-Cast-Iron Composites”, *Advanced Materials and Processing*, 26: 293 (2007).
77. Hashemi, M., Ghajar, R., “Empirical comparison of sliding friction and wear behaviors of gray and white cast iron” *Proceedings Of The Asme 10th Biennial Conference On Engineering Systems Design and Analysis*, 1: 489-493 (2010).
78. Özdin, K., “Alüminyum Esaslı SiC Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 20, 22 (2006).
79. Çetinkaya, C., “An Investigation of the Wear Behaviours of White Cast Irons Under Different Compositions ”, *Materials and Design* , 27: 437-445 (2006).
80. Stachowiak, G. B., Stachowiak, G. W., Celliers, O., “Ball-cratering Tests of High-Cr White Cast Irons”, *Tribology*, 38: 1076-1087 (2005).
81. Blau, J. P., Jolly, C. B., “Wear of Truck Brake Lining Materials Using Three Different Test Methods”, *Wear*, 259: 1022-1030 (2005).
82. Doğan, O. N., Hawk, J.A., “Three Types of Wear of 26Cr White Cast Irons”, *AFS Transactions*, 64: 625-631 (1998).
83. Hinckley, B., Dolman, K.F., Wuhner, R., Yeung, W., Ray, A., “Sem Investigation of Heat Treated High-Chromium Cast Irons”, *Materials Forum*, 32 (2008).
84. Kuyucak, S., Llewellyn, R., “High-Chrome White Irons Incorporating Ultra-Hard Carbide-Forming Elements for Improved Wear-Resistance”, *AFS Transactions*, 05: 551-573 (2006).
85. WU, H., Q., Sasaguri, N., Matsubara, Y., Hashimoto, M., “Solidification of Multi-Alloyed White Cast Iron: Type and Morphology of Carbides”, *AFS Transactions*, 140: 103-108 (1996).
86. Youping, M., Xiulan, L., Yugao, L., Shuyi, Z., Xiaoming, D., “Effect of Ti-V-Nb-Mo Addition On Microstructure of High Chromium Cast Iron”, *China Foundry Research & Development*, 9 (2): 148-153 (2012).
87. Farah, A.F., Crnkovic, O.R., Canale, L.C.F., “Heat treatment in high Cr white cast iron Nb alloy”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 10 (1): 42-45 (2001).

88. Sare, I.R., Arnold, B.K., "The effect of heat treatment on the gouging abrasion resistance of alloy white cast irons", *Met. Materials Transactions A*, 26: 357 (1995).
89. Sare, I.R., Arnold, B.K., "The influence of heat treatment on the high-stress abrasion resistance and fracture toughness of alloy white cast irons", *Met. Materials Transactions A*, 26: 785 (1995).
90. Mitsuo, H., Osamu, K., Nobuya, S., Yasuhiro, M., "Analysis of carbides in multi-component white cast iron", *Journal of Japon Foundry Engineering Society*, 75 (5): 317-324 (2003).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı :MUTLU, Şükran
 Uyuğu :T.C.
 Doğum Tarihi :05.06.1976
 Medeni Hali :Evli
 Telefon :0 (312) 280 86 97
 Faks :0 (312) 280 86 99
 e-mail :sukran04@mynet.com.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniv. Fen Bil. Enst. Metal Eğt. Böl.	2005
Lisans	Gazi Üniv. Tek. Eğt. Fak. Metal Eğt. Böl.	2001
Ön Lisans	Dokuz Eylül Üniv. İnşaat Bölümü	1997
Lise	Afyon Kocatepe Anadolu Lisesi	1994

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2003-	Ergenekon Çelik San. ve Tic. A.Ş.	Kalite Müdürü

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca