

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

**BEYAZ DÖKME DEMİRDEN ÜRETİLEN MADEN  
KIRICILARINDA MOLİBDENİN MİKROYAPIYA VE  
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

**Hakan YILDIRIM**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
Yrd.Doç.Dr.Kamil ÖZDİN**

**ŞUBAT 2014**

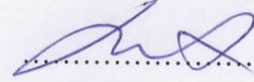
**ÇORUM**

Hakan YILDIRIM tarafından hazırlanan “Beyaz Dökme Demirden Üretilen Maden Kırıcılarında Molibdenin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi” adlı tez çalışması 21/02/2014 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Halil AYKUL



Yrd. Doç. Dr. Kamil ÖZDİN



Doç. Dr. Oğuz ÇOLAK



Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun ..... tarih ve ..... sayılı kararı ile Hakan YILDIRIM’ın Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

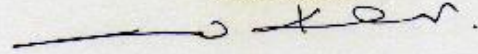
Prof. Dr. Ali KILIÇARSLAN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**TEZ BEYANI**

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 yaptığımı beyan ederim.

imza

Hakan YILDIRIM



# BEYAZ DÖKME DEMİRDEN ÜRETİLEN MADEN KIRICILARINDA MOLİBDENİN MİKROYAPIYA VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Hakan YILDIRIM

HİTİT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2014

## ÖZET

Bu çalışmada maden kırıcılarında kullanılan yüksek krom alaşımlı beyaz dökme demirin mikroyapısal ve mekanik özellikleri irdelenecektir. Ayrıca beyaz dökme demirler için kullanılan en önemli alaşım elemanlarından olan molibden elementinin gerek mikroyapı ve gerekse mekanik özelliklere etkisi araştırılacaktır. Bu amaçla öncelikle farklı oranda molibden elementi ihtiva eden 50x80x80 mm<sup>3</sup> boyutlarındaki yüksek krom alaşımlı beyaz dökme demir numunelerin üretimi yapılmıştır.

Bu numunelerin her birine östenitleme ve temperleme işlemleri uygulanmıştır. Numunelerde yapılan östenitleme ve temperleme ısı işlemi sonrasında martenzitik bir matris, kaba primer karbürler ve matriste çökelmiş ikincil karbürlerden oluşan bir beyaz dökme demir genel metalografik görüntüleri elde edilmiştir. Bu çalışmada Cr/C oranı 6,88 olan 9620 alaşım kodlu numunenin aşınma direnci en yüksek değerde ölçülmüştür. En düşük aşınma direncine sahip 9640 kodlu alaşımın Cr/ C oranı ise 6,08'dir. Cr/C oranı arttıkça aşınma direncinin yükseldiği görülmektedir. Ayrıca molibden oranı arttıkça sertlikte artmıştır. Molibden oranının en yüksek olduğu 9620 alaşımı ortalama 61,1 HRC ile en yüksek sertlik değerini almıştır.

Yapılan darbe testlerinde molibden oranı % 0,55 olan 9640 kodlu numunenin emilen enerji miktarı 1,22 j çıkarken, % 1,84 molibden içeren 9620 alaşım kodlu numunenin emilen enerji miktarı ise 1,38 j çıkmıştır. Yine molibden elementi ile birlikte beyaz

dökme demir mikroyapısında iğnemi karbür yapısının gelişmesi ve daha kaba primer karbür teşekkülü görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Beyaz Dökme Demir, Molibden, Isıl İşlem, Mikroyapı, Aşınma

**EFFECT OF MOLYBDENUM ON MECHANICAL  
PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF WHITE  
CAST IRON FOR MINING APPLICATION**

Hakan YILDIRIM

HITIT UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2014

**ABSTRACT**

In this study, we are going to examined in detail mechanical and microstructure properties of high chrome alloy white cast iron materials used for mining industry. Will also investigate the effect of microstructure and mechanical properties of molybdenum. For this purpose, there different white cast iron samples were produced. Sample size is 50X80X80 mm<sup>3</sup>. Austenitising and tempering were applied to the samples. Martensitic matrix emerged in white cast iron after heat treatment. In addition, general metallographic images occurred which were composed of rough primer carbides and seconder carbides precipitating in matrix.

In this study, wear resistance of the sample whose code is 9620 and Cr/C ratio is 6,88 happened to be the highest. Wear resistance of the sample whose code is 9640 and Cr/C ratio is 6,08 happened to be the lowest. It was seen that when the ratio of Cr/C increased the wear resistance increased. Furthermore, when the molybdenum ratio rose the hardness also rose. The hardness value of the alloy whose code is 9620 and the molybdenum ratio is the highest became 61,1 HRC.

After impact test, the amount of energy absorbed by the sample whose code is 9640 and containing %0,55 molybdenum happened to be 1,22 J while the amount of energy absorbed by the sample whose code is 9620 and containing %1,84

molybdenum happened to be 1,38 J. Besides, the structure of needle shape carbides increased and more rough primer carbides occurred when the ratio of molybdenum increased in white cast iron.

**Key Words:** White Cast Iron, Molybdenum, Heat Treatment, Microstructure, Wear

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarımdeki değerli katkılarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Kamil ÖZDİN'e DUDUOĞLU Çelik Döküm A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı Mustafa DUDUOĞLU'na ve Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanı Prof. Dr. Halil AYKUL'a teşekkürü bir borç bilirim. Yüksek lisans eğitimi sürecinde desteğini esirgemeyen aileme ve çok kıymetli katkılarından dolayı Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU'na Prof. Dr. Mehmet ERDOĞAN'a ve Doç Dr. Havva Kazdal ZEYTİN'e ayrıca teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

|   | <b>Sayfa</b> |
|---|--------------|
| ÖZET.....   | iv           |
| ABSTRACT.....   | vi           |
| TEŞEKKÜR.....   | vii          |
| İÇİNDEKİLER.....  | ix           |
| ÇİZELGELER DİZİNİ.....  | xii          |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....  | xiii         |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....  | xv           |
| 1. GİRİŞ.....   | 1            |
| 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....                         | 3            |
| 2.1.Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirler.....                             | 3            |
| 2.1.1. Özellikler.....  | 3            |
| 2.1.2 . Kullanım alanları.....  | 4            |
| 2.2.Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerde Mikroyapı.....                 | 4            |
| 2.2.1.Karbür tipleri.....   | 4            |
| 2.2.2.Matriks oluşumu.....  | 5            |
| 2.2.3.Alaşım elementleri ve etkileri.....                               | 5            |
| 2.3.Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Isıl İşlemi.....               | 8            |
| 2.3.1. Ergitme.....   | 8            |
| 2.3.2. Fe-Cr-C sistemi.....   | 8            |
| 2.3.3. Katılaşma, $M_7C_3$ ve diğer karbürlerin oluşumu.....            | 10           |
| 2.3.4. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlere uygulanan ısıl işlemler..... | 11           |

|  | <b>Sayfa</b> |
|--|--------------|
| 2.3.5. Destabilizasyon.....                                      | 12           |
| 2.3.6. Kritik sıcaklık altı veya temperleme ısıl işlemi.....     | 13           |
| 2.3.7. Sıfır altı soğutma işlemleri.....                         | 13           |
| 2.3.8. Gerilim-giderme ısıl işlemi.....                          | 13           |
| 2.4. Aşınmanın Tanımı ve Ölçme Yöntemleri.....                   | 14           |
| 2.4.1. Aşınmanın tanımı.....                                     | 14           |
| 2.4.2. Aşınma deneyleri.....                                     | 14           |
| 2.4.3. Ağırlık farkı metodu.....                                 | 15           |
| 2.4.4. Kalınlık farkı metodu.....                                | 15           |
| 2.4.5. İz değişim metodu.....                                    | 15           |
| 2.4.6. Radyoizotop metodu.....                                   | 16           |
| 2.4.7. Aşınma mekanizmaları ve aşınmayı etkileyen faktörler..... | 16           |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....                                       | 26           |
| 3.1. Materyal.....   | 26           |
| 3.1.1. Deneyde kullanılan beyaz dökme demir malzemeler.....      | 26           |
| 3.2. Yöntem.....   | 26           |
| 3.2.1. Yapılacak ısıl işlemler.....                              | 26           |
| 3.2.2. Metalografik çalışmalar ve sertlik deneyleri.....         | 28           |
| 3.2.3. Aşınma deneyleri ve darbe testleri .....                  | 28           |
| 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....                          | 29           |
| 4.1. Metalografik İnceleme ve Sertlik Deney Sonuçları.....       | 29           |
| 4.2. Aşınma ve Darbe Test Sonuçlarının İrdelenmesi.....          | 52           |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....  | 55           |

**Sayfa**

KAYNAKLAR.....57

ÖZGEÇMİŞ.....59

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

| <b>Çizelge</b>  | <b>Sayfa</b> |
|---|--------------|
| Çizelge 2.1. Çeşitli Karbür ve Matriks Fazlarının Sertlikleri .....           | 5            |
| Çizelge 2.2. Tipik beyaz dökme demirler ve kimyasal bileşimleri.....          | 8            |
| Çizelge 2.3. Fazlar ve kafes yapıları .....                                   | 10           |
| Çizelge 2.4. Malzeme özelliklerinin adhesiv aşınmaya etkisi.....              | 17           |
| Çizelge 3.1. Kullanılan alaşımlar.....  | 26           |
| Çizelge 3.2. Cr/C oranı.....  | 26           |
| Çizelge 4.1. 9640 kodlu numune analizi.....                                   | 29           |
| Çizelge 4.2. 9640 sertlik değerleri.....                                      | 37           |
| Çizelge 4.3. 9645 kodlu numune analizi .....                                  | 37           |
| Çizelge 4.4. 9645 sertlik değerleri.....                                      | 44           |
| Çizelge 4.5. 9620 kodlu numune analizi.....                                   | 44           |
| Çizelge 4.6. 9620 sertlik değerleri.....                                      | 52           |
| Çizelge 4.7. Aşınma deney sonuçları.....                                      | 53           |
| Çizelge 4.8. Darbe testi sonuçları .....                                      | 54           |
| Çizelge 4.9. Alaşımların sertlik ve darbe sonuçlarının karşılaştırılması..... | 54           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| Şekil   | Sayfa |
|---|-------|
| Şekil 2.1. Fe-Fe <sub>3</sub> C Denge diyagramı.....                    | 7     |
| Şekil 2.2. Fe-Cr-C sıvı yüzeyi.....                                     | 9     |
| Şekil 2.3. Adhesive aşınma aparatı modeli.....                          | 17    |
| Şekil 2.4. Abrasif aşınma mekanizması.....                              | 18    |
| Şekil 2.5. Yorulma aşınması aparatı modeli.....                         | 21    |
| Şekil 2.6. Aşınma çeşitleri.....  | 22    |
| Şekil 3.1. Isıl işlem grafiği.....                                      | 27    |
| Şekil 3.2. 9640 kodlu numune.....                                       | 27    |
| Şekil 3.3. 9645 kodlu numune.....                                       | 27    |
| Şekil 3.4. 9620 kodlu numune.....                                       | 27    |
| Şekil 3.5 Darbe test numunesi.....                                      | 28    |
| Şekil 4.1. 9640 mikroyapılar.....                                       | 31    |
| Şekil 4.2. Karbür üzerinden yapılan SEM-EDS analizi 9640.....           | 32    |
| Şekil 4.3. Başka bir karbür üzerinden yapılan SEM-EDS analizi 9640..... | 33    |
| Şekil 4.4. Matriks bölgeden yapılan SEM-EDS analizi 9640.....           | 34    |
| Şekil 4.5. Aynı matriks bölgeden yapılan SEM-EDS analizi 9640.....      | 35    |
| Şekil 4.6. Karbür üzerinden yapılan SEM EDS analizi 9640.....           | 36    |
| Şekil 4.7. 9645 mikroyapılar.....                                       | 39    |
| Şekil 4.8. Matriks bölgeden yapılan SEM-EDS analizi 9645.....           | 40    |
| Şekil 4.9. Aynı matriks bölgeden yapılan SEM-EDS analizi 9645.....      | 41    |
| Şekil 4.10. Karbür üzerinden yapılan SEM-EDS analizi 9645.....          | 42    |

**Sayfa**

|  |    |
|--|----|
| Şekil 4.11. Aynı karbür üzerinden yapılan SEM-EDS analizi 9645.....      | 43 |
| Şekil 4.12. 9620 mikroyapılar.....                                       | 46 |
| Şekil 4.13. Matriks bölgeden yapılan SEM-EDS analizi 9620.....           | 47 |
| Şekil 4.14. Aynı matriks bölgeden yapılan SEM-EDS analizi 9620.....      | 48 |
| Şekil 4.15. Karbür üzerinden yapılan SEM-EDS analizi 9620.....           | 49 |
| Şekil 4.16. Başka bir karbür üzerinden yapılan SEM-EDS analizi 9620..... | 50 |
| Şekil 4.17. Karbür üzerinden yapılan SEM-EDS analizi 9620.....           | 51 |
| Şekil 4.18. Molibden oranlarına göre sertlik değişimi.....               | 52 |
| Şekil 4.19. Alaşımların aşınma miktarları.....                           | 53 |
| Şekil 4.20. Alaşımlarda emilen enerji miktarındaki değişim.....          | 54 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| <b>Simgeler</b>                 | <b>Açıklama</b>      |
|---------------------------------|----------------------|
| <b><math>\mu\text{m}</math></b> | Mikrometre           |
| <b><math>\gamma</math></b>      | Östenit              |
| <b>mm</b>                       | Milimetre            |
| <b>dk</b>                       | Dakika               |
| <b>dv</b>                       | Devir                |
| <b>%</b>                        | Yüzde                |
| <b>N</b>                        | Newton               |
| <b>g</b>                        | Gram                 |
| <b>Ms</b>                       | Martenzit başlangıcı |
| <b>Mf</b>                       | Martenzit bitişi     |
| <b>km</b>                       | kilometre            |
| <b><math>\alpha</math></b>      | Alfa                 |
| <b>Ø</b>                        | Çap                  |

## 1. GİRİŞ

Madencilik sektöründe kullanılan ve maden kırıcı makinelerinde karşılaşılan en önemli problemlerden biriside maden kırıcılarının aşınma ömrünün yeteri kadar uzun olmamasıdır. Aslında son yıllarda bu konuda Türkiye ve Dünyada önemli aşamalar kaydedilmiştir. Maden kırıcı makinelerinde kullanılan maden kırıcı parçaları yüksek manganlı östenitik çeliklerden imal edilmektedir ve günümüzde de yine tercih edilen bir malzeme grubunu temsil etmektedir. Ancak, manganlı çeliklerin çalışma koşullarındaki sertleşebilme kabiliyetine rağmen yüksek tokluk avantajının korunması nedeniyle aşınma ömrü, çok daha sınırlı bir zamanı kapsamaktadır. Bu durum madencilik sektörünün verimli çalışmasına engel teşkil eden bir problem halini almaktadır. Çünkü madencilik sektöründe planlı duruşların sıklığı verimliliği olumsuz yönde etkilemektedir. Bu problem ekseninde maden kırıcıları yüksek aşınma direncinin yanında, darbeli çalışma koşullarında yeteri kadar darbe direncine sahip, yüksek kromlu beyaz dökme demirlerden üretilmeye başlanmıştır.

Her ne kadar darbe direnci servis koşullarında yeterli olsa da, beyaz dökme demirlerin darbe mukavemetinin düşük olması, madenle birlikte sisteme girebilecek olan metalik maden dışı parçalara karşı dayanıksız olma ve tahribata uğrayabilme gerçeğini değiştirmemektedir. Bu durum beyaz dökme demirden üretilen maden kırıcılarının yüksek aşınma ömrü yanında bilinen en büyük dezavantajını oluşturmaktadır. Ancak son yıllarda madencilik sektöründe daha modern makinelerin kurulması ve halihazırda kurulu tesislerin modernizasyonu ile yüksek kromlu beyaz dökme demirden üretilen maden kırıcıları bugün sektörde verimli olarak kullanılabilir. Bundan dolayıdır ki beyaz dökme demirden üretilen maden kırıcı parçaları sektörün vazgeçilmez malzemesi olarak yerini almıştır.

Döküm hali ile sektör için ticari bir değeri bulunmayan yüksek kromlu beyaz dökme demir malzemeler, kompleks kimyasal bileşimlerinin yanı sıra yine bir dizi ısıtma işlem prosedürlerinin titizlikle uygulanmasını gerektiren çok hassas ve pahalı bir üretim prosesine sahiptir. Nihai ürünün mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ve aşınma ömrünün en iyi düzeye çıkarılması için mühendisler ısıtma işlem, mikroyapı



elemanları ve bunları en iyi şekilde kombine edecek optimizasyon çalışmaları ile yoğun Ar-Ge faaliyetleri yürütmektedirler. Dolayısı ile madencilik sektöründe beyaz dökme demirden üretilen maden makinelerinde kullanılan maden kırıcılarının servis ömrünü artıracak Ar-Ge çalışmalarına her geçen gün daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır.

Maden kırıcıları yüksek devirde ve kırdığı hammaddeye göre çok hızlı aşınmaların meydana geldiği bir ortamda çalışırlar. Madencilik sektöründe maden kırıcı makinelerinde kullanılan maden kırıcı parçaları, en büyük maliyet kalemini oluşturmaktadırlar. Bu nedenle firmalar işletme şartlarını iyileştirme yoluna giderek darbe dayanımı düşük ama aşınma mukavemeti açısından mükemmel değerlere sahip yüksek kromlu beyaz dökme demir malzemelere yönelmektedirler. Madencilik sektöründe, çalışma koşullarında beyaz dökme demirin manganlı çeliklere göre 2,5 ile 4 kat arasında ömür artışı sağlaması ve duruşların yüksek maliyet getirmesinden dolayı beyaz dökme demirin popülerliği giderek artmaktadır. Çok yüksek aşınma direncinin yanında hassas bir kullanım şekline sahip olan beyaz dökme demir malzemenin üretilen maden kırıcı parçalarının en verimli şekliyle kullanılabilmesi için maden sektörü maden kırıcılarındaki iyileştirme maliyetlerinden kaçınmamaktadırlar.

Maden kırıcılarında kullanılan beyaz dökme demir malzemenin istenilen mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin kazandırılabilmesi için uygulanan ısıtma işlem prosedürleri mutlaka beyaz dökme demir içerisinde bulunan alaşım elementleri ve parça kalınlığı gibi kriterler göz önünde bulundurularak hazırlanmalıdır. İdeal bir beyaz dökme demir yapısı, yeterli bir östenitleme sıcaklığı ve yapılan temperleme işlemleri ile, tamamen  $M_7C_3$  ötektik karbürlerle çevrili, martenzitik bir matrikste yaygın çökertilmiş sekonder karbür içeren bir yapıyı tarif eder.

## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirler

#### 2.1.1. Özellikler

İçerisinde bulunan manganezin etkisi ile karbonun büyük bir kısmının sementit yaptığı bir dökme demir grubu olan yüksek karbon ve krom ihtiva eden beyaz dökme demirler yüksek aşınma direnci nedeniyle maden kırıcı olarak tercih edilen bir malzemedir. Beyaz dökme demirler, yüksek aşınma dayanımlarına karşın içerdikleri yüksek karbür nedeniyle toklukları nispeten düşüktür. Dolayısıyla bu tür bir malzemenin üretilmiş olan, yüksek devirle çalışarak aşınmaya ve darbeye maruz kalan döküm malzemelerinin çok titizlikle üretilmeleri gerekmektedir.

Bu tür malzemelerin kimyasal içeriği ve ısıl işlemi, malzemenin aşınma ve darbe direncini doğrudan etkilemektedir. Burada nihai malzemenin uygun kimyasal analizi ve yapılan özel ısıl işlemlerinden sonra, mikroyapı kontrolünün de önemi büyüktür. Bu kontroller üretilen malzemenin çalışma koşullarındaki ömrünü belirler.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler bazı uygulamalarda darbe direnci yanında çok iyi aşınma direncinin de elde edildiği iyi bir kombinasyon sağlayabilmektedirler. Yüksek kromlu beyaz dökme demirler mikroyapıları sert ve düzensiz  $M_7C_3$  karbürlerle çevrilidir. Düşük krom içerikli alaşımlı dökme demirlerde daha yumuşak  $M_3C$  ötektik karbürleri bulunmaktadır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde bulunan karbürler, çok sert ve aşınmaya dirençli olup, aynı zamanda kırılıgandırılar. Genelde tokluk karbon oranının düşürülmesi ile iyileştirilirken, aşınma direnci karbür oranının artırılması ile sağlanmaktadır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin özellikleri alaşımın kimyasal bileşimi kadar uygulanan ısıl işlemle de belirlenmektedir. Kimyasal kompozisyon aynı olduğu halde farklı ısıl işlemler farklı özellikte dökümler ortaya çıkartmaktadır. Çoğu ısıl işlemin ilk amacı östeniti stabilize etmektir. Böylece soğutma sırasında matriks, martenzite dönüşmektedir. Kritik sıcaklık altı ve sıfır altı soğutma işlemleri gibi diğer ısıl işlemler matriksteki östenit miktarını azaltmak için yapılır.

### **2.1.2. Kullanım alanları**

Yüksek Kromlu beyaz dökme demirler yüksek aşınma direncinin yanı sıra belirli oranda tokluğa sahip olduklarından konkasör sanayinde darbeli maden kırıcılarında çok yaygın olarak kullanılmaktadır.

Konkasör makinelerinde kullanılan darbeli kırıcılar ortalama 1200 dv/dk hızla dönen rotora bağlı olarak darbe ve öğütme ile belirli büyüklükteki kayaçları istenilen daha küçük boyutlara verimli şekilde getirmektedirler. Bunun yanı sıra öğütücü bilyeler ve değirmen astarları için yüksek kromlu beyaz dökme demirler geniş bir kullanım alanına sahiptir. Çimento sektöründe değirmen içlerinde astar olarak başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Çimento sektöründe çelik malzeme ile bir arada kullanılan beyaz dökme demirler, bu sayede hem klinker kırıcılarda ve hem de hammadde kırıcılarında yoğunlukla kullanılmakta ve verimli bulunmaktadırlar (Akdemir, 1994).

## **2.2. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerde Mikroyapı**

### **2.2.1. Karbür tipleri**

Yüksek kromlu beyaz dökme demirde aşınma dayanımını belirleyen mikroyapısal özelliklerdir. Mikroyapıyı oluşturan Fe-Cr-C üçlü sistemi, dökme demirlerle beraber ferritik ve martenzitik paslanmaz çeliklerinde seçiminde kullanılır. % 15'e kadar krom sementit fazı içinde demir ile yer değiştirebilir. Ancak yapıda krom içeriği yükseldikçe sementit kararsız hale gelir ve  $M_7C_3$  hegzagonal karbürüne dönüşür. Krom karbür yoğunlukta olmakla birlikte karbür içinde diğer elementlerde belirli oranda çözünürler. Burada aşınmada önemli rol oynayan krom karbürün sertliği 1200- 1500 HV iken sementit 840-1100 HV sertliğe sahiptir. İşte bu özelliği ile yüksek kromlu beyaz dökme demirler aşınma uygulamaları için tercih edilen önemli bir malzemedir (Zeytin ve ark., 2011).

**Çizelge 2.1.** Çeşitli karbür ve matriks fazlarının sertlikleri (Akdemir, 1994)

|   |              |
|---|--------------|
| M <sub>3</sub> C Karbürü                      | 840-1100 HV  |
| M <sub>7</sub> C <sub>3</sub> Karbürü         | 1200-1800 HV |
| Martenzit                                     | 500-1010 HV  |
| Molibden Karbür (Mo <sub>2</sub> C)           | 1500 HV      |
| Krom Karbür (Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> ) | 1200-1600 HV |
| Sementit (Fe <sub>3</sub> C)                  | 840- 1100 HV |

### 2.2.2. Matriks oluşumu

Aşınma direnci ve tokluğun yüksek olabilmesi için beyaz dökme demirin mikro yapısında uygun karbür ve matriksin bulunması gerekir. Matriks için yapılabilecek optimum seçim, tüm matrikste dağılmış primer karbürler, ikincil karbürlerle sertleştirilmiş yüksek karbonlu sert martenzitik bir matrikstir. Bir dizi ısı işlem sonunda matrikste dağılan sekonder karbürler sertlik artışı ile birlikte aşınma direncini artırır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbürler matriks içinde dağılmıştır. Matriksin yumuşak olması istenmez. Matriksin akma noktası, matriks yumuşadıkça düşer. Yumuşak matriks sürtünme sırasında oluşan mekanik gerilmelere karşı karbürlere gerekli desteği sağlayamaz. Bu karbürlerin kırılmasına yol açar. Bu durumda karbürlerin yüksek aşınma direncinden faydalanılamaz. Yine matrikste perlit miktarı % 10'u aştığında aşınma direnci düşmektedir (Akdemir, 1994). Östenitik yapıdaki yüksek krom molibdenli beyaz dökme demirlerde, gerilme etkisiyle östenitik veya kısmi östenitik matriks martenzite dönüşür. Bu yapı ise sıcaklıktaki bir artış ile tekrar kararsız hale gelmektedir. Bu faz dönüşümleri sonucu oluşan hacim değişikliği dökümün kırılmasına veya yüzeyde mikro çatlaklar oluşmasına yol açabilmektedir.

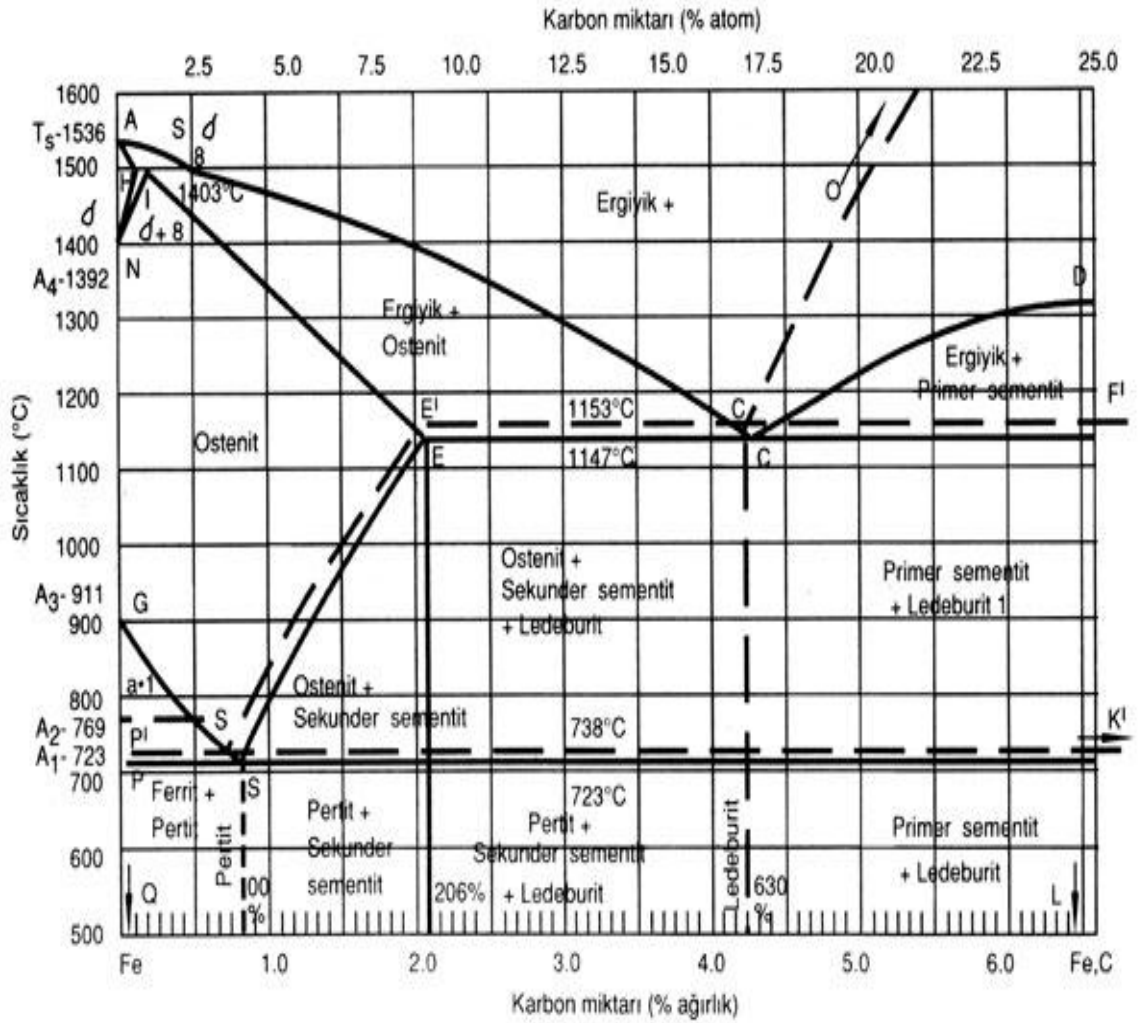
### 2.2.3. Alaşım elementleri ve etkileri

Beyaz dökme demirde alaşım elementleri nihai özellikleri büyük oranda belirleyen en önemli parametredir. Aşınma direnci yüksek olan, yüksek kromlu beyaz dökme

demirde krom elementi kararlı karbür yapısı oluşturup, sertlik ve aşınma direncinin artırılması için kullanılır. Beyaz dökme demirde krom miktarı % 10'u geçtiği zaman  $M_7C_3$  tipi ötektik karbürler oluşur. Krom içeriği % 10 dan daha az alaşımlarda  $M_3C$  karbürleri oluşur. Krom elementi aynı zamanda beyaz dökme demirin korozyon direncini de artırır. % 12-22 Cr içeren beyaz dökme demirlerin martenzitik yapıda en iyi aşınma direncini gösteren alaşım olduğu görülmektedir. Karbon beyaz dökme demirlerin sertliğini artırır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbon içeriği % 15 Cr için, % 2.2-3.5, % 27 Cr için % 2.2-2.7 civarındadır. Molibden ilavesi yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde % 0.5-4 arasında, dökümden sonraki mikroyapıda perlitin oluşmaması için yapılır. Ayrıca molibden beyaz dökme demirin sertleşebilirliğini artırmak amacı ile ilave edilir. Manganez perlit oluşumunu önlemek için ilave edilir. Manganez içeriği % 0.7'nin altında olmalıdır. Beyaz dökme demirlerde Mn içeriği % 1,5'i aştığı zaman tokluk, mukavemet ve aşınma direnci düşer. Çünkü söz konusu değer aralığında manganezin kalıntı östenit oluşturma riski ve kırılma tehlikesi artar. Kükürt içeriği, yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde çok düşük oranlarda tutulmalıdır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin kükürdü % 0.03'ü aştığı zaman aşınma direnci düşer. Fosfor, yüksek kromlu beyaz dökme demirin tokluğunu düşürür. Ayrıca fosfor özellikle kalın kesitli dökümlerde molibdenin sertleştirici etkisini yok edebilmektedir. Fosfor içeriği % 0.3'ün üzerinde olmamalıdır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde nikel, perlit oluşumunun önlenmesi için ilave edilir. Genellikle nikel miktarı, % 0.2-1.5 arasında olmalıdır. Ayrıca nikel sertleşebilirliği de artırır.

Bakır, yüksek kromlu beyaz dökme demirlere perlit oluşumunun önlenmesi için ilave edilir. İlave edilen bakır miktarı % 2.5'i aşmamalıdır. Bakır molibden gibi sertleşebilirliği artırır. Silisyum, yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin sertleşebilirliğinde olumsuz rol oynar. Silisyum oranı arttıkça ısıl işlem görmüş beyaz dökme demirin aşınma direnci azalır. Silisyum içeriği, yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde % 0.4-0.9 arasında olmalıdır. Silisyum ayrıca mikroyapıdaki karbür yapısını da modifiye eder. Silisyum, mikroyapıdaki karbür çekirdeklerinin artışına neden olur, karbür yapısı incelikli. Silisyum ilavesi ile karbürler süreksiz ince taneli bloklar veya çubuklar haline gelir. Bunun sonucunda karbürler arası mesafe

azalır. Bu durumda karbürler matriksi aşınmadan korur ve malzemenin aşınma direnci artar. Uygun oranda silisyum içeriği, tokluğu % 30 artırabilir. Ancak fazla miktarda silisyum ilavesi perlit oluşma ihtimalini yükseltip matriksi zayıflatır. Bu nedenle darbe direnci ile birlikte aşınma direncide düşer. Vanadyum, mikroyapıda karbür oluşturuca element olarak yer alır. Vanadyum miktarı % 0.1-0.50 arasında olmalıdır. Bor da silisyum gibi mikro yapıdaki karbür morfolojisini etkiler. Bor mikroyapıdaki karbürleri inceltir ve sürekli iğneler şekline getirir. Bunun sonucunda aşınma direnci artar. Bor içeriği % 0.12-0.30 arasında olduğunda bu durum geçerlidir. Bu limitler arasında bor ilavesi ile darbe direnci de yaklaşık olarak % 20 artar. Niyobyum matriksin sertliğini artırarak beyaz dökme demirin aşınma direncini yükseltir (Zeytin ve ark., 2011).



Şekil 2.1. Fe-Fe<sub>3</sub>C Denge diyagramı

## 2.3. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Isıl İşlemi

### 2.3.1. Ergitme

**Çizelge 2.2.** Tipik beyaz dökme demirler ve kimyasal bileşimleri (Çapa, 2001)

|                                | C       | Si       | Cu      | Cr        | Ni       | Mo      |
|--------------------------------|---------|----------|---------|-----------|----------|---------|
| Perlitik<br>Alaşimsız          | 3,3-3,6 | 0,4-1,0  | 0,5-0,7 | -         | -        | -       |
| Martenzitik<br>krom nikelli    | 3,3-3,6 | 0,4-0,7  | 0,4-0,7 | 1,4-3,5   | 4,0-4,75 | -       |
| Martenzitik<br>krom molibdenli | 3,2-3,6 | 0,3-0,8  | 0,7-1,0 | 14,0-16,0 | 0,0-1,2  | 2,5-3,0 |
| Martenzitik<br>yüksek kromlu   | 2,7-2,8 | 0,25-1,0 | 0,5-1,2 | 24-30     | -        | -       |

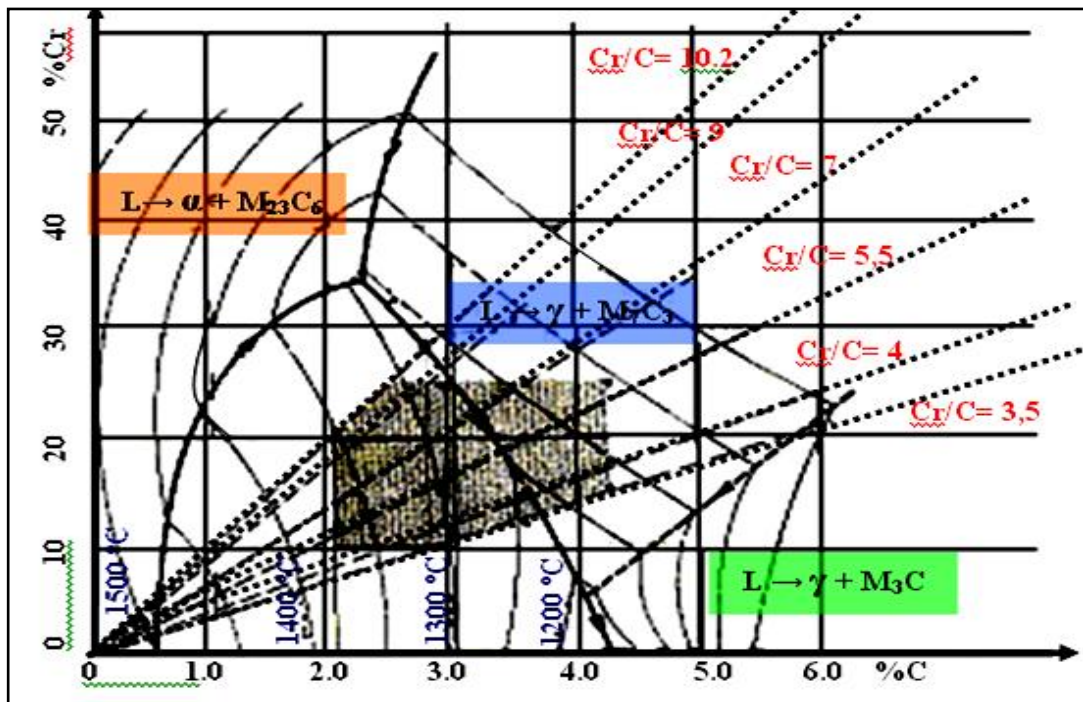
Yüksek kromlu ve molibdenli beyaz dökme demirler genellikle elektrik ark ve indüksiyon ocaklarında üretilirler. Ocak astarı asidik, bazik veya nötr olabilir. Pratik uygulamalarda asidik astarın kullanımı daha yaygındır. Şarj malzemeleri, çelik hurdası, geri dönüşüm (yolluk, besleyici vb.) ve ferro alyajlardır. Bu ferro alyajlar, FeCr, FeMo, FeMn, FeSi vb dir. Molibden genellikle ferro alaşım şeklinde ilave edilir. Elektrik ark fırınlarında molibden oksitte kullanılabilir. Molibden elementi mevcut alaşımlar içerisinde pahalı olmasından dolayı ergitme maliyetini önemli oranda etkiler. Manganez üst limiti % 1 civarındadır. Çünkü çok yüksek manganez asidik astarı yiyebilir. Yüksek döküm sıcaklıklarında kaba dentritik yapı oluşur. İnce taneli yapı ve ötektik karbür yapısının kontrolü için döküm sıcaklığı düşük olmalıdır. Ergitilen maden bentonitli yada reçineli kum kalıplara dökülür. Katılaşmadaki çekilme oranı % 2 civarındadır. Besleyici ve yollukların ana parçadan kesilmesi sırasında çatlak oluşturulmamasına dikkat edilmelidir. Ayrıca kesme işlemi kuru olarak yapılacaksa aşırı ısı birikimi yine çatlak oluşumunu tetikleyebilmektedir. Beyaz dökme demirlerde tokluk dökümden sonra en düşük düzeydedir. Ancak ısıl işlemlerle bu değer artırılabilir. Kompleks kimyasal bileşime sahip beyaz dökme

demirler yine uzun ısıl işlem süreleri ile oldukça maliyetli üretim süreçlerine sahiptirler.

### 2.3.2. Fe-Cr-C sistemi

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin üstün aşınma direnci ve mekanik özellikleri mikro yapılarından kaynaklanır. Bu nedenle Fe-C-Cr sisteminin özelliklerinin incelenmesinde yarar vardır.

Fe-Cr-C sistemine ait diyagram Şekil 2.2'de verilmiştir. Bu diyagramda  $\gamma$  (ostenit)- $M_3C_3$  bölgesini içerecek şekilde ve iki peritektik çizgi ile sınırlandırılmış olarak verilmiştir. Diyagramda Cr/C oranına bağlı olarak oluşan karbür tipleri görülmektedir. Diyagramda faz alanlarını gösteren eğrilerin durumu soğuma hızına bağlıdır. Soğuma hızına bağlı olarak ötektik hücrelerin büyüklüğü değişir. Düşük döküm sıcaklıkları ve hızlı soğutma koşullarında ötektik hücreler küçülür, ısıl işlemin ise ötektik hücrelerin morfolojisine önemli bir etkisi yoktur.



Şekil 2.2. Fe-Cr-C diyagramında sıvı yüzeyi (Zeytin ve ark., 2011)



Şekil 2.2'de verilen denge diyagramındaki karbürler  $K_C$ ,  $K_1$  ve  $K_2$  olarak adlandırılırlar. Bunlardan  $K_C$  Karbürü:  $M_3C(FeCr)_3C$ ;  $K_1$  karbürü:  $M_{23}C_6 (Fe,Cr)_{23}C_6$  ve  $K_2$  karbürü:  $M_7C_3 (Fe,Cr)_7C_3$  karbürleridir. Beyaz dökme demirler yüksek aşınma dayanımlarına karşın içerdikleri yüksek karbür miktarı nedeni ile toklukları nispeten düşüktür. Son yıllarda yapılan araştırmalar aşınma davranışı ile birlikte tokluğu da arttırma yönünde yoğunlaşmış olup, ısıtım işlem ile birlikte alaşım bileşimi ile ilgili araştırmalar hala devam etmektedir. Alaşım elementleri seçimi ve miktarı, krom karbürün bileşimi, birincil ve ikincil karbür çökmesinin kontrolü, perlitik dönüşümün geciktirilmesi, martenzit dönüşüm sıcaklığı üzerindeki etkisi gibi faktörler dikkate alınarak yapılır. Bu üç faktöre bağlı olarak alaşım bileşimi kontrol edilir. Alaşım elementlerinden en önemlisi molibdendir. Molibden genellikle % 0.5 ile % 4 arasında ilave edilir. Molibdenin oluşturduğu karbür Cr/C oranına bağlıdır. Eğer Cr/C =5 ise  $Mo_2C$  karbürü, Cr/C= 10 ise  $M_6C$  karbürü oluşturur. Molibden, % 50  $Mo_2C$ , % 25  $M_7C_3$  karbürleri şeklinde ve % 25 matriste bulunur. Molibdenin en önemli etkisi döküm koşullarında ostenit fazını stabil etmesidir (Zeytin ve ark., 2011).

**Çizelge 2.3.** Fazlar ve kafes yapıları (Akdemir, 1994)

| Faz          | Kafes Yapısı |
|--------------|--------------|
| $Fe_3C$      | Ortorombik   |
| $Cr_{23}C_6$ | YMK          |
| $Cr_7C_3$    | Hegzagonal   |
| $Cr_3C_2$    | Ortorombik   |

### 2.3.3. Katılma, $M_7C_3$ ve diğer karbürlerin oluşması

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ostenit  $M_7C_3$  ötektiği arasındaki reaksiyon katılma özellikleri, karbür morfolojisi ve bunun sonucunda malzemenin aşınma direnci ile tokluğunu etkilediği için mekanik özellikler açısından önemlidir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin ticari alaşımları çoğunlukla ötektik altı bileşimdedir. Bu alaşımlar katılma sırasında ilk olarak ostenit taneleri daha sonra  $M_7C_3$  ostenit ötektiği oluşur. Ötektik yapıdaki karbür dağılımı ve şekli ötektiğin miktarı ve bileşimine

bağlıdır. Ötektik karbürün mikroyapıdaki oranı az ise (% 20), ötektik karbürleri östenit tane sınırlarına ayrışır. Bunlar östenit tane sınırları boyunca uzanan levhalar ve tane içlerinde küçük çubuklar şeklinde belirir. Ötektik karbür oranı arttıkça karbür lamelleri östenit tanelerinin içine doğru uzamaya başlar. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin diğer beyaz dökme demirlere göre daha iyi tokluk özelliği göstermesi  $M_7C_3$  karbürlerinin, öteki beyaz dökme demirlerdeki  $M_3C$  karbürleri gibi sürekli ağ yapısı oluşturmamasından kaynaklanır. Bu nedenle ötektik yapının içindeki bu tür karbürlerin boyut ve dağılımı yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin mekanik özellikleri açısından önemlidir. Ötektik karbürlerin dağılım ve şekilleri metal döküm sıcaklığı, katılaşma hızı ve bileşim gibi parametrelere bağlıdır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin bileşimlerinde krom dışında molibden, titanyum, vanadyum gibi karbür yapıcılarla bulunmaktadır. Ancak mikroyapıda genel olarak krom karbürler yer alır. Karbürlerin yapısındaki krom miktarı alaşımın  $Cr/C$  oranına bağlıdır. Örneğin alaşımda  $Cr/C$  oranı 3 iken  $M_7C_3$  tipi karbürler oluşur. Karbür yapıcı elementlerin bir kısmı  $M_7C_3$  tipi karbürler oluştururken, kendi karbürlerini de oluşturur.

#### **2.3.4. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlere uygulanan ısı işlemler**

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler yüksek aşınma direnci ile bilinirler. Mikroyapıları ise sert ve düzensiz  $M_7C_3$  ötektik karbürleri içerir. Uygulanan ısı işlemler yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin özelliklerini önemli ölçüde değiştirirler.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin aşınma ve tokluk özelliklerinin geliştirilmesi için standart ısı işlemler uygulanır. Optimum özellikler martenzitik bir yapı ile elde edilir. Temel ısı işlem kademeleri ostenitleme (destabilizasyon), su verme, temperleme, kritik sıcaklık altı (sub-kritik) ısı işlem, tavlama ve gerilim giderme işlemleridir.

### 2.3.5. Destabilizasyon

Destabilizasyon (östenitleme) ısı işlemleri 920 °C-1060 °C sıcaklık aralığında 1-6 saat bekleme işlemidir. Sekonder karbürler matrikste çökeler. Matrikste alaşım içeriği azalır ve karbon miktarı düşer. Destabilizasyon sıcaklığında yeterli süre bekletilen beyaz dökme demir malzemeye havada su verilir. Böylece hızlı soğumadan kaynaklı çatlamların önüne geçilmiş olur. Bu şekilde yeterli miktar martenzit elde edilmiş olur. Oluşan sekonder karbür tipleri  $M_3C$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$  şeklindedir. Bu karbür tiplerinin oluşumu östenitleme sıcaklığına ve matriks bileşimine doğrudan bağlıdır. Destabilizasyon işleminden sonra martenzitçe zengin matriks oluşumuna rağmen, % 35 kadar östenit matrikste kalabilmektedir. Destabilizasyonu takiben kalıntı östenit miktarı alaşım bileşimine, destabilizasyon sıcaklığına, zamana, kesit boyutuna ve matriks karbon içeriğine bağlıdır. Havada soğutulmuş yapıda maksimum sertliğe ulaşmak için bir optimum destabilizasyon sıcaklığı mevcuttur. Yüksek sıcaklıklarda yapılan destabilizasyon işlemlerinde, östenitteki karbon çözünürlüğü yüksektir. Bu durum karbon çökmesinde azalmaya neden olur. Yüksek karbonlu matriks ile  $M_s$  (Martenzit başlangıç) sıcaklığı düşer. Havada soğutulmuş yapıda büyük miktarda kalıntı östenit elde edilmektedir. Düşük sıcaklıklarda yapılan destabilizasyon ısı işleminde karbür çökmesi fazladır. Matriksin karbon içeriği belirgin şekilde düşmektedir. Soğutmada oluşan düşük karbonlu martenzit nispeten düşük sertliğe sahiptir. Büyük kesitli parçalarda yavaş soğutma ile ilave ikincil karbür çökmesi oluşabilmektedir.

Çok düşük soğutma hızları, perlit oluşumuna ve düşük sertliğe sebep olmaktadır. Destabilizasyon işleminde bekleme süresi 1-6 saat arasında değişmektedir. Her 25 mm kesit kalınlığı için 75 dk bekleme süresi bir kural olarak uygulanmaktadır. Optimum tutma zamanı alaşım kompozisyonuna ve kesit kalınlığına bağlıdır. Destabilizasyon ısı işleminde matriksten ayrılan alaşım elementleri, ikincil karbürler olarak çökeltmektedir. Çökelen karbür tipleri doğal olarak alaşım bileşimine ve destabilizasyon sıcaklığına bağlıdır. % 15-20 krom içeren alaşımlarda aglomera çubuklar şeklinde  $M_7C_3$  karbürü çöklerken, yüksek krom içerikli alaşımlarda  $M_{23}C_6$  karbürü teşekkül etmektedir.

### 2.3.6. Kritik sıcaklık altı veya temperleme ısıl işlemi

Destabilizasyon ısıl işlemi takiben martenzitik matriks % 35'e kadar kalıntı östenit içerebilir. Düşük miktarda kalıntı östenit için kritik sıcaklık altı işlemler uygulanmaktadır. Kritik sıcaklık altı veya temperleme ısıl işlemi 200 °C - 600 °C arasında 2-6 saat arasında bekleme işlemi içerir. Temperleme ısıl işlemi, ikincil karbür çökmesi ( $M_{23}C_6$  karbürü) meydana gelecek şekilde yapılır. 400 °C'ye kadar martenzit temperlenir. Sertlikte biraz düşme görülür. 400 °C - 500 °C arasında ikincil karbür çökmesi oluşur, östenit miktarı düşer ikincil sertleşme meydana gelir. 600°C° den yüksek sıcaklıklar, perlit oluşumuna veya östenit bozunumuna neden olmaktadır. Östenit miktarının azalmasına rağmen bu işlem aşınma direncinde düşüşe ve sertlik kaybına neden olduğu için tercih edilmemektedir (Odabaşı, 2006).

### 2.3.7. Sıfır altı soğutma işlemleri

Matriks yapısında kalan östenitin dönüşümü, stabilizasyon işlemi takiben sıfır altı soğutma işlemleri ile yapılmaktadır. Sıfır altı soğutma işlemi ile yüksek kromlu dökme demirlerin sertliğinde ve aşınma direncinde belirgin iyileşmeler olduğunu tespit edilmiştir. Bu iyileşmenin nedeni yapılan işlemle kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi ve sertliği artıran sekonder karbür çökmesini sağlanmasıdır.

### 2.3.8. Gerilme giderme ısıl işlemleri

Kalıntı gerilmeler, döküm malzemelerde kalın ve ince kesitler arasındaki veya yüzey ve iç bölgeler arasındaki soğuma hızlarının farklılığından kaynaklanmaktadır. Kalıp malzemenin karakteristiği kadar, döküm malzemenin özellikleri ve döküm dizaynı da kalıntı gerilmelerin gelişimini etkilemektedir. Destabilizasyon ısıl işlemi gibi yüksek sıcaklık işlemi takiben soğutmada sıcaklığın değişiminin artması ve su vermenin yada havada soğutmanın şiddetinin artmasıyla, kalıntı gerilmelerin gelişimi artmaktadır. Kalıntı gerilmeler dökümlerin kalıp içinde yavaş ve uniform soğutulmasıyla azaltılabilmektedir. Genelde beyaz dökme demirlerde gerilme giderme sıcaklık aralığı 600-700 °C arasında uygulanmaktadır. Gerilme giderme

işlemleri uygulanırken soğutmanın hızlı yapılması, malzemede yeni gerilimlere yol açabilmektedir.

## **2.4. Aşınma ve Ölçme Yöntemleri**

### **2.4.1. Aşınma**

Aşınma; "kullanılan malzeme yüzeylerinden mekanik sebeplerle ufak parçaların ayrılması suretiyle meydana gelen değişiklik" olarak tanımlanmaktadır. Yada sürtünme halinde bulunan yüzeylerden parçacıkların kopup ayrılması yüzeyin geometrik şeklinin bozulmasıdır. Bir aşınma sisteminde ;

- a) Ana malzeme (aşınan)
- b) Karşı malzeme (aşındıran)
- c) Ara malzeme
- d) Yük
- e) Hareket

aşınmanın temel unsurlarıdır. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem tribolojik sistem olarak bilinir.

### **2.4.2. Aşınma deneyleri**

Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür.

- a) Yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemenin adhesiv (metal-metal) aşınma değerlerinin ölçüldüğü deneyler.
- b) Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma değerinin ölçüldüğü deneyler.

Aşınma deneylerinde aşınmanın ölçüm yöntemleri olan ağırlık farkı, kalınlık farkı, iz değişim ve radyo izotop metotları aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

#### **2.4.3. Ağırlık farkı metodu**

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, yani numune yerindeyken üzerinden ölçü alınamaması bu yöntemin dezavantajıdır. Ağırlık kaybının ölçülmesi 0,1 g veya 0,0001 g hassasiyetinde oldukça duyarlı bir terazi yardımı ile yapılır. Aşınma miktarı gram veya miligram cinsinden ifade edilirse, metre veya kilometre olarak tespit edilen sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (g/km) (mg/m) ile ifade edilebilir. Ağırlık kaybı birim alan için hesap edilecekse (g/cm<sup>2</sup>) 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 ağırlığına karşılık gelen hacim kaybindan gidilerek de bulunabilir.

#### **2.4.4. Kalınlık farkı metodu**

Aşınma esnasında oluşan boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeriyle karşılaştırılması suretiyle elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek hacimsel kayıp değeri hesaplanır. Kalınlık, hassas ölçme aletleri yardımıyla  $\pm 1\mu\text{m}$  duyarlılıkta ölçülmelidir.

#### **2.4.5. İz değişimi metodu**

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile, geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değişimi ölçülür. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucudur. Elmas piramit veya bilyenin bıraktığı iz boyutlarındaki değişme mikroskop vasıtası ile ölçülerek belirlenir.

#### **2.4.6. Radyoizotop metodu**

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü  $\alpha$  parçacıklarıyla bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır.

Aşınmanın büyük hassasiyetle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesi avantajlı yönleridir. Fakat ekonomik olmaması nedeni ile ancak özel amaçlarla kullanılır. Özel problemlerin çözümü dışında yaygın olarak kullanılan bir metot değildir.

#### **2.4.7. Aşınma mekanizmaları ve aşınmayı etkileyen faktörler**

##### Aşınma mekanizmaları

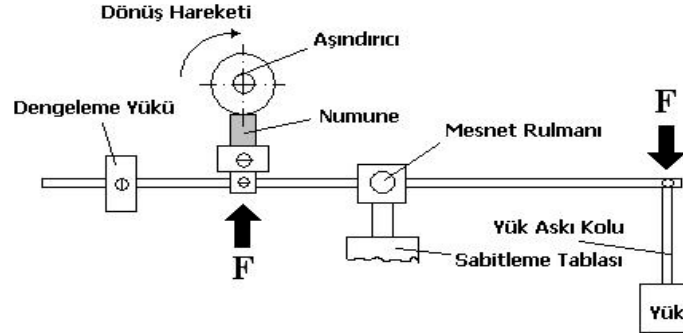
Daha öncede belirtildiği gibi, aşınma tribolojik sistemin elemanları arasında karşılıklı zorlamalar neticesinde meydana gelir. Aşınmanın tanımı çok geniş olup, çeşitli aşınma tipleri ve farklı sınıflandırmaları yapılabilir. Burada aşınma mekanizmaları aşağıdaki şekilde sınıflandırılır.

- 1) Adhesiv Aşınma,
- 2) Abrasif Aşınma,
- 3) Tribooksidasyon Aşınması,
- 4) Yorulma Aşınması.

##### Adhesiv aşınma

Yapışma aşınması olarak da adlandırılan adhesiv aşınma, en sık rastlanan aşınma türüdür. Adhesiv aşınma bir metal yüzeyinin bir başka metal yüzeyindeki bağlı hareketi sırasında birbirlerine kaynamış veya yapışmış yüzeydeki pürüzlerin kırılması sonucu ortaya çıkar. Uygulamada, metal-metal aşınmasına benzer olarak,

adhesiv aşınma özellikle metaller arasındaki kayma sürtünmesi nedeniyle meydana gelir ve aşınma parçacıkları yumuşak olan metalden kopar.



**Şekil 2.3.** Adhesiv aşınma aparatı modeli (Yıldız, 2006)

Eğer her iki metal aynı sertlikte ise aşınma her iki yüzeyde de oluşur. Metaller arasındaki yağlamanın mükemmel olması, yüzeye etki eden yükün azaltılması ve malzemenin sertliğinin artırılması adhesiv aşınmayı azaltır. Sonuç olarak adhesiv aşınma, yüzeye etkiyen normal yük kayma yolu ve aşınan malzemenin yüzey sertliği ile orantılıdır. Çizelge 2.4’te adhesiv aşınmaya malzeme özelliklerinin etkisi özetle verilmiştir.

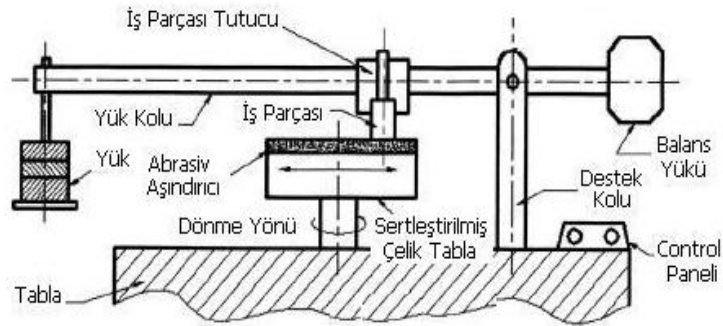
**Çizelge 2.4.** Malzeme özelliklerinin adhesiv aşınmaya etkisi (Akdemir, 1994)

| Özellikler                       | Adhesiv Aşınma |
|----------------------------------|----------------|
| Oksitli Yüzey                    | Az             |
| Kristal Yapı Kübik               | Çok            |
| Hegzagonal                       | Az             |
| Yüksek Deformasyon Sertleşmesi   | Çok            |
| Yüksek Sertlik                   | Az             |
| Yüksek Elastisite Modülü         | Az             |
| Yüksek Ergime Noktası            | Az             |
| Yüksek Yeniden Kristalleşme Sıc. | Az             |
| Küçük Atom Yarıçapı              | Az             |



### Abrasif aşınma

Yırtılma veya çizilme aşınması olarak da isimlendirilen abrasif aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Abrasif aşınma biri diğerinden daha sert ve pürüzlü olan metal yüzeylerinin birbirleriyle temas halindeyken kayması sırasında meydana gelir. Şekil 2.4'te sert bir malzemenin yumuşak bir malzemeden çapak şeklinde parçaları alışı görülmektedir. Sert parçacıkların yumuşak metale batması abrasif aşınmaya neden olabilmektedir. Bu mekanizmaya örnek olarak, sisteme dışardan giren toz parçacıklarının veya bir motorda oluşan yanma ürünlerinin sebep olduğu aşınma tarzı verilebilir.



**Şekil 2.4.** Abrasif aşınma mekanizması (Yıldız, 2006)

Abrasif aşınmayı üç gruba ayırmak mümkündür. Bunlar;

- a) Oymalı Sürtünme Aşınması (gouging wear)
- b) Öğütmeli Sürtünme Aşınması (grinding wear)
- c) Erozyon Aşınması (erosive wear)

Oymalı sürtünme aşınması, yüzeyin aşırı deformasyonu sonucu meydana gelir. Aşırı yüklemeler etkisi ile meydana gelen oymalı sürtünme aşınmasına örnek olarak ağır koşullar altında çalışan kazıcı, kırıcı gibi maden araçlarında görülen aşınmalar verilebilir. Öğütmeli sürtünme aşınması, ağır yükler altında aşınma parçalarının kırılarak küçük keskin köşeli parçacıklar oluşturup yüzeye batarak ve çizerek

malzeme kaybına sebep olması sonucu meydana gelir. Ögütmeli sürtünme aşınmasına örnek olarak bilyeli değirmenler gösterilebilir.

Erozyon aşınması ise, gaz ve sıvı gibi akışkan bir ortamda bulunan aşındırıcı parçacıkların yüzeye çarpması sonucu metal yüzeyinden parçaların kopmasıyla ortaya çıkar. Sıcaklık ve akış hızı artıkça aşınma hızlanır. Erozyon ve korozyonun birlikte etkisi de aşınmayı hızlandırmaktadır. Erozyon aşınmasına örnek olarak gemi pervanelerinde çok sık rastlanan aşınma verilebilir. Akış halindeki sıvılarda ani basınç düşmesi sonucu oluşan gaz kabarcıkları aşınmaya neden olmaktadır. Bu gaz kabarcıklarının metal yüzeyine çarparak oluşturduğu aşınmaya “Kavitasyon Aşınması” da denilmektedir.

Abrasif aşınma hızı malzeme yüzeyine etki eden yük azaltılarak düşürülebilir. Böylece parçacıkların yüzeye daha az batması ve çapak kaldırması sırasında daha az iz bırakması sağlanır. Malzeme açısından abrasif aşınmayı azaltmak için ,

- a) Daha sert alaşım kullanmak,
- b) Sertliği artırmak amacıyla ısıl işlem uygulamak,
- c) Malzeme yüzeyini sert bir tabaka ile kaplamak, (nitrasyon, elektro kaplama metal püskürtme vb. gibi yöntemler uygulamak) tavsiye edilir. Bu önlemlerle abrasif aşınma hızını azaltmak mümkündür.

Abrasif aşınma endüstriyel cihazlarda malzeme kayıplarının başlıca sebebidir. Aşındırıcı malzeme serbest halde iki metal arasında bulunuyorsa veya yalnız bir metali aşındırıcı sabit veya serbest taneler mevcut ise bu durumda;

- a) İki elemanlı abrasif aşınma,
- b) Üç elemanlı abrasif aşınma şeklinde gruplandırılması mümkündür.

İki elemanlı abrasif aşınma sürtünen elemanların doğrudan birbirleriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abrasif aşınmada ise ana ve karşı malzeme arasında serbest ara malzemesi olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilir. Metal-metal sürtünmelerinde aşınma iki elemanlı abrasif veya adhesiv olarak başlayıp üç elemanlı abrasif olarak devam eder. Bu durumda araya giren toz mineral taneleri çizilme sonucu serbest hale geçen mikro talaşlar ve parçalanmış oksit parçacıkları üçüncü elemanı (ara malzemeyi) oluşturabilir. Serbest hale geçen mikro talaş parçacıkları genellikle ana malzemeden daha sert olduklarından aşınmayı hızlandırmaktadır. Endüstriyel makinelerdeki en önemli aşınma türü olan abrasif aşınmaya genel olarak aşağıda verilen yerlerde rastlanılmaktadır.

- a) Traktör, greyder gibi tarım ve iş makinelerinin bıçak ve tırnaklarında,
- b) Cevher işleme ve öğütme tesislerinde,
- c) Eleklerde,
- d) Değirmenlerde,
- e) Nakletme makinelerinde.

Bu gibi makine veya makine parçalarında yalnızca abrasif aşınmadan söz edilebileceği gibi bunlardan diğer aşınma türlerinin de birlikte görülmesi mümkündür.

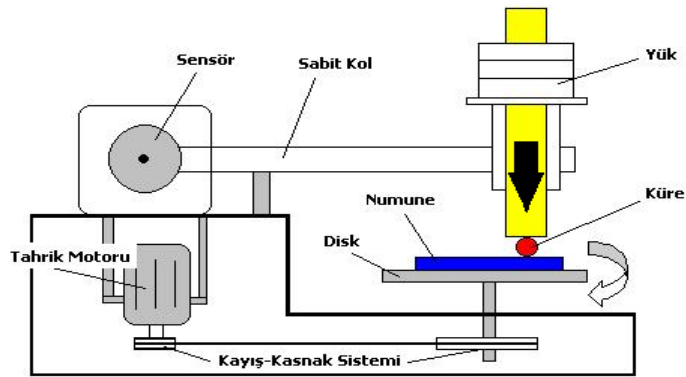
#### Tribooksidasyon aşınması

Tribooksidasyon denilince ana malzeme ile karşı malzeme arasındaki tribolojik zorlanmalardan dolayı meydana gelen kimyasal reaksiyon anlaşılır. Malzeme yüzeylerinin hava ile reaksiyona girerek oluşturduğu yüzey tabakaları (oksit tabakası) aşınmayı azaltmasına rağmen bu yüzey tabakalarının tribooksidasyon

sonucu özelliklerinin değişmesi aşınmayı hızlandırmaktadır. Yağ gibi kimyasal maddeler bulunan ortamda çalışan makine parçalarının yüzeylerinde oluşan yüzey tabakalarının bir kısmının tribolojik zorlanmalarla kırılması ve aşındırıcı parçacıklar oluşturması aşınmayı hızlandırmaktadır. Triboksidasyon özellikle metalik malzeme yüzeylerinde görülür.

### Yorulma aşınması

Yorulma aşınması değişken, tekrarlı yükler sonucu ortaya çıkar. Tribolojik zorlanmalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden yorulma aşınması bir çok aşınma prosesinde görülür. Neticede malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur ve bu da yüzeyden parçacıkların ayrılması çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur.

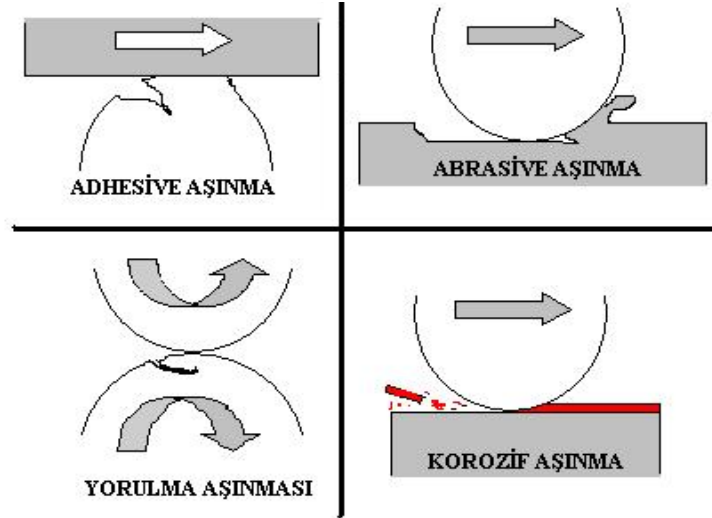


**Şekil 2.5.** Yorulma aşınması aparatı modeli (Yıldız, 2006)

Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelir. Bu boşlukların zamanla yüzeye doğru ilerleyerek büyümesi yüzeyde küçük çukurların ortaya çıkmasına sebep olur. Bu tür aşınmalar daha çok dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeylerinde görülür. Büyük oranda aşınmaya sebep olan yukarıdaki mekanizmalar dışında “Tribosüblimasyon” ve “Yayınma” mekanizmalarından da bahsetmek mümkündür. Bu iki mekanizma yüzeydeki sıcaklığın sürtünme ısıyla yükselmesi sonucu etkili

olur. Örneğin, uzay araçlarının atmosfere girmeleri neticesinde sürtünme ısıyla sıcaklık yükselir. Uzay aracının zarar görmesini engellemek için sıcaklık yükselmesini sınırlı tutacak önlemlerle malzemenin ergimesi engellenir.

Yayınma ise tribolojik zorlanmada ana malzemenin üst yüzeylerindeki atomların yayınma ile karşı malzemeye geçmesi neticesinde malzeme kaybının meydana gelmesidir. Alaşım elementlerinin karşı malzemeye geçmesi sonucu ana malzemenin kimyasal bileşimi bozularak mukavemeti düşer. Örneğin, sert maden uçların bünyesindeki karbon, yüksek kesme hızlarında karşı malzemeye (talaşa) geçerek mukavemetin düşmesine sebep olur ve aşınmayı artırır.



Şekil 2.6. Aşınma çeşitleri (Yıldız, 2006)

### Aşınmayı etkileyen faktörler

Aşınmayı etkileyen çeşitli faktörler farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu faktörler aşağıda dört grup halinde verilmektedir.

#### A) Ana malzemeye bağlı faktörler

##### 1) Malzemenin kristal yapısı

2) Malzemenin sertliği

3) Elastisite modülü

4) Deformasyon davranışı

5) Yüzey pürüzlülüđü

6) Malzemenin boyutu

B) Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi

C) Ortamın etkisi

1) Sıcaklık

2) Nem

3) Atmosfer

D) Servis koşulları

1) Basınç

2) Hız

3) Kayma yolu

### Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin aşınma direnci

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler için artan uygulama alanları, yeterli darbe direnci ile kombine edilmiş aşınma direncinden ileri gelmektedir. Ayrıca

tavlandıktan sonraki durumda işlenebilirliğin sağlanması da bir avantajdır. Yüksek krom molibdenli beyaz dökme demirlerin bileşiminde bulunan krom içeriği ile iyi bir korozyon direncine sahiptir. Mikroyapıdaki sert ötektik karbürler mükemmel aşınma direncinin nedenidir. Mikroyapıdaki karbürlerin hacim oranı ve morfolojisi çok önemlidir. Genellikle mikroyapıdaki karbür oranı arttıkça aşınma direnci artmaktadır. Bununla birlikte matriks çatlayan ve deforme olan karbürleri yeterli kuvvetle yerinde tutarsa karbürlerin aşınma direncini olumlu yönde etkiler.

Beyaz dökme demirlerin aşınmasında çeşitli mekanizmalar rol oynayabilir. Bu mekanizmaları şu şekilde sıralamak mümkündür.

- 1) Sadece matriks yada matriksle birlikte karbürlerinde kesme ile aşınması,
- 2) Matriksin yorulma sonucu aşınması,
- 3) Matriksin plastik deformasyon sonucunda aşınması,
- 4) Karbürlerde kesme yada plastik deformasyon sonucu mikro çatlaklar oluşması ve çatlayan karbürlerin kopması,
- 5) Karbürlerin yorulma nedeniyle çatlayıp kopması.

#### Yüksek krom molibdenli beyaz dökme demirlerde abrasif aşınmayı etkileyen faktörler

Yüksek kromlu-molibdenli beyaz dökme demirlerin abrasif aşınma özelliklerini başlıca iki faktör etkiler. Bunlar beyaz dökme demirin matriks yapısı ve bu matrikste yer alan karbür oluşumlarıdır.

#### Karbür yapısının abrasif aşınmaya etkisi

Karbür miktarı arttıkça aşınma direnci artar. % 30 karbür oranına kadar sertlik arttıkça aşınma direnci artar. % 30'un üzerinde karbür oranındaki artıştan aşınma direnci belirgin şekilde etkilenmez. Bu oran ötektik bileşime yakındır.

Ötektiğın üzerinde karbür oranı artışı aşınma direncini fazla etkilemez. Karbürler arası uzaklık ne kadar düşük olursa aşınma direnci o kadar yüksek olur.

#### Matriks yapısının abrasif aşınmaya etkisi

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

Matriksin aşınma direnci, aşınma sırasındaki gerilmelere bağlıdır. Matriksin bileşimindeki karbon miktarı arttıkça mikro sertlik ve buna bağlı olarak aşınma direnci artar. Ancak düşük gerilmeli aşınma ortamlarında sertlik belirli bir değere geldikten sonra mikrosertlik artışı aşınma direncini etkilemez (Akdemir, 1994).

Aşınmaya neden olan gerilmeler yüksek olursa martenzitik yapı östenitik yapıya göre iki üç kat daha iyi aşınma direnci gösterir. Ms (Martenzit başlangıç) sıcaklığını aşırı yükseltecek bir işlem martenzitik karbonunu azaltıp sertliğini düşüreceği için aşınma direncini düşürür. Ms sıcaklığı ile beraber Mf (Martenzit bitiş) sıcaklığı da düşeceği için mikroyapıdaki kalıntı östenit miktarı artar ve sertlik düşer. Yüksek gerilmeler altında östenit martenzite dönüşerek hacimsel genleşmelerin oluşmasına ve bunun sonucu oluşan gerilmeler nedeniyle mikro çatlaklara neden olur (Akdemir, 1994).



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Deneyde kullanılan beyaz dökme demir malzemeler

Deneysel çalışmalarda Çizelge 3.1'de verilen alaşımlar kullanılmıştır.

**Çizelge 3.1.** Kullanılan alaşımlar

| Alaşım Kodu                  | C     | Si    | Mn    | Cr     | Mo    |
|------------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|
| G-X 300 CrMoNi 15 2 1 (9640) | 2,973 | 0,701 | 0,661 | 18,082 | 0,552 |
| G-X 260 CrMoNi 20 2 1 (9645) | 2,909 | 0,709 | 0,663 | 19,899 | 1,511 |
| G-X 300 CrMo 21.2 (9620)     | 2,979 | 0,803 | 0,705 | 20,519 | 1,84  |

Bu çalışmada karbon elementi % 2,4-3,2 arasında, silisyum % 0,6-0,8 arasında, manganez %0,6-0,8 ve molibden elementi ise % 0,5-2 arasında tutulmuştur. Yukarıda kimyasal kompozisyonları verilen alaşım grubunun Cr/C oranları aşağıda Çizelge 3.2'de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Cr/C Oranları

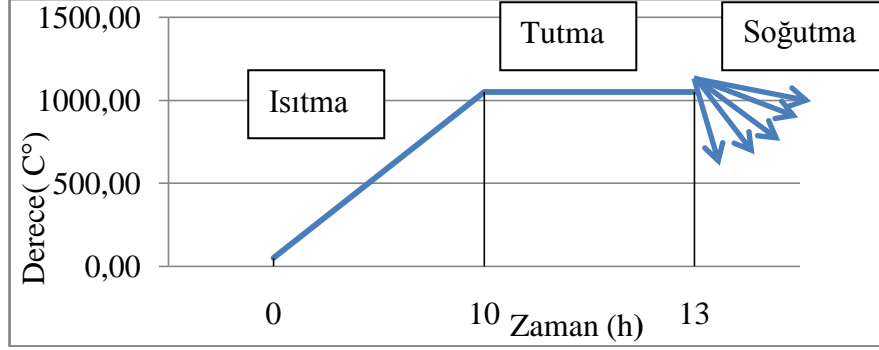
| Alaşım | Cr/C |
|--------|------|
| 9640   | 6,08 |
| 9645   | 6,84 |
| 9620   | 6,88 |

#### 3.2. Yöntem

##### 3.2.1. Yapılacak ısı işlemler

Kimyasal bileşimleri Çizelge 3.1'de verilen alaşımlara döküm sonrasında östenitleme işlemi uygulanmıştır. Östenitleme işlemi uygulanan parçalar 50x80x80 mm<sup>3</sup> boyutlarında numunelerdir. Östenitleme işlemi 1050 °C'de uygulanmıştır.

Östenitleme sonrası numunelere durgun havada su verilerek sertleştirilmiştir. Daha sonra numunelere 450 °C'de temperleme işlemi yapılmıştır. Isıl işlem, 50 kg'lık açık atmosferli Emtav marka elektrikli fırında yapılmıştır.



Şekil 3.1. Isıl işlem grafiği (östenitleme)



Şekil 3.2. 9640 50X80X80 mm<sup>3</sup>

Şekil 3.3. 9645 50X80X80 mm<sup>3</sup>



**Şekil 3.4.** 9620 50X80X80 mm<sup>3</sup>

### **3.2.2. Metalografik çalışmalar ve sertlik deneyleri**

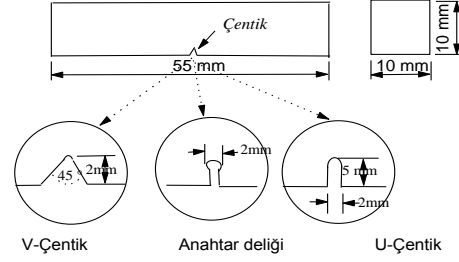
Çizelge 3.1'de ki kimyasal bileşimlere belirlenen ısıl işlem prosedürü uygulanarak mikro yapılarını saptamak amacıyla metalografik çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla numuneler Nikon LV150 tip optik mikroskopta ve JOEL JXA-840A SEM cihazında incelenmiş, Noran Tracor Northern TN-2000 EDS sisteminde analiz edilmiştir. Örnekler Wilson Wolpert Instruments universal sabit sertlik ölçme cihazında ölçülmüştür. Her örnek için beş ölçüm yapılmış ve ortalamaları alınmıştır. Sertlikler Rockwell C cinsinden ölçülmüştür.

### **3.2.3. Aşınma deneyleri ve darbe testleri**

Aşınma deneyleri abrasif aşınma esasına uygun deney cihazında ASTM G99-05 standardına göre yapılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında, disk üzerine yerleştirilen 180'lik SiC partiküllü zımpara kağıdı ile yapılmıştır. Her deneyden önce örnekler parlatılmıştır. Deneyden önce aşınma numuneleri 0,0001 g hassasiyete sahip terazide tartılmıştır. Aşınma deneyleri cihaz üzerindeki hazneye yerleştirilmiştir ve 5N basma yükü altında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında aşınma diskinin hızı 90 dv/dk olup 200 m kayma mesafesinde yapılmıştır. Aşınma numunesi ölçüsü, aşınma cihazına uygun ve Ø6 mm, 40 mm boyu olan silindir numuneler şeklinde hazırlanmıştır.

Darbe testleri Dynatup 9250 HV tip darbe cihazında yapılmıştır. Darbe numuneleri 10 X 10 X 55 mm<sup>3</sup> ve 45° v çentikli, standart çentik darbe numunesi şeklinde

hazırlanmıştır. Darbe testleri yapılacak olan 9640, 9645 ve 9620 alaşım kodlu beyaz dökme demir numunelerinin hazırlanmasında tel erezyon cihazı kullanılmıştır.



**Şekil 3.5.** Darbe test numunesi (TS EN ISO 148-1 standardına göre yapılmıştır)

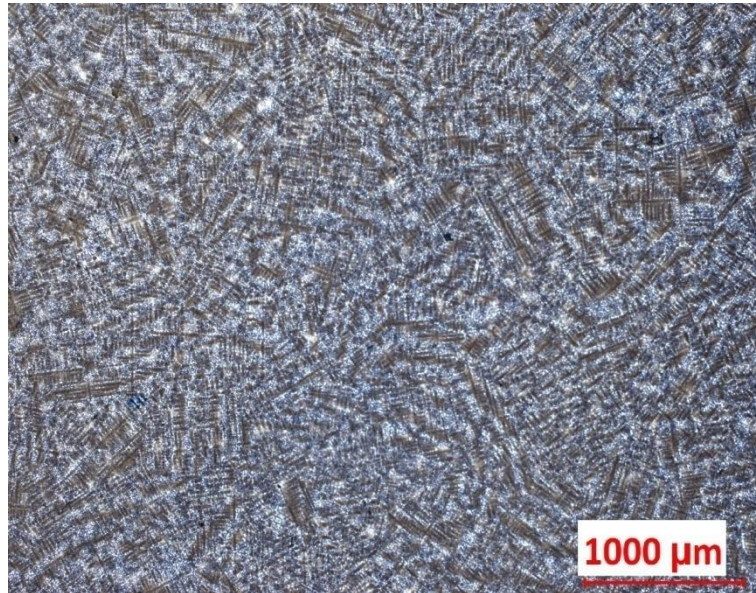
#### 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

##### 4.1. Metalografik İnceleme ve Sertlik Deney Sonuçları

9640 Kodlu malzemenin mikroyapıları Şekil 4.1'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** 9640 kodlu numune analizi

| Kod:9640 | C     | Si    | Mn    | Cr     | Mo    |
|----------|-------|-------|-------|--------|-------|
|          | 2,973 | 0,701 | 0,661 | 18,082 | 1,552 |

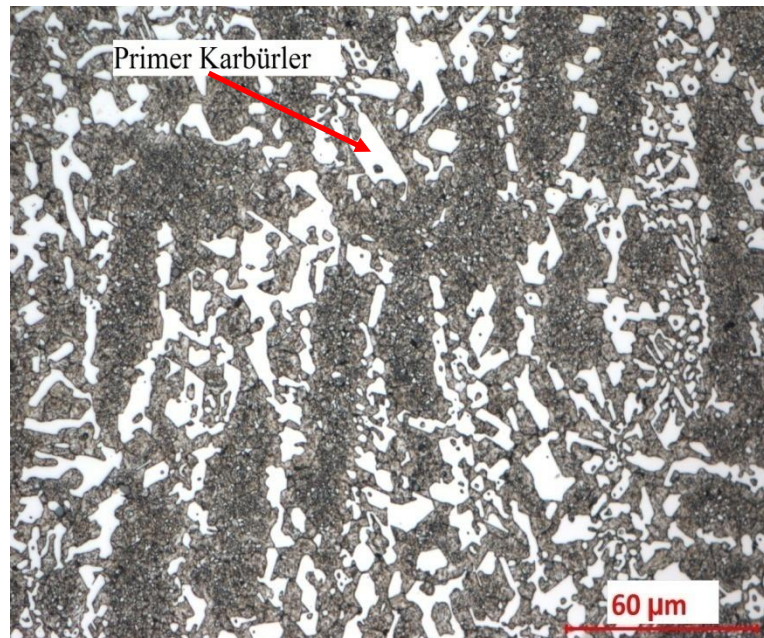


a)

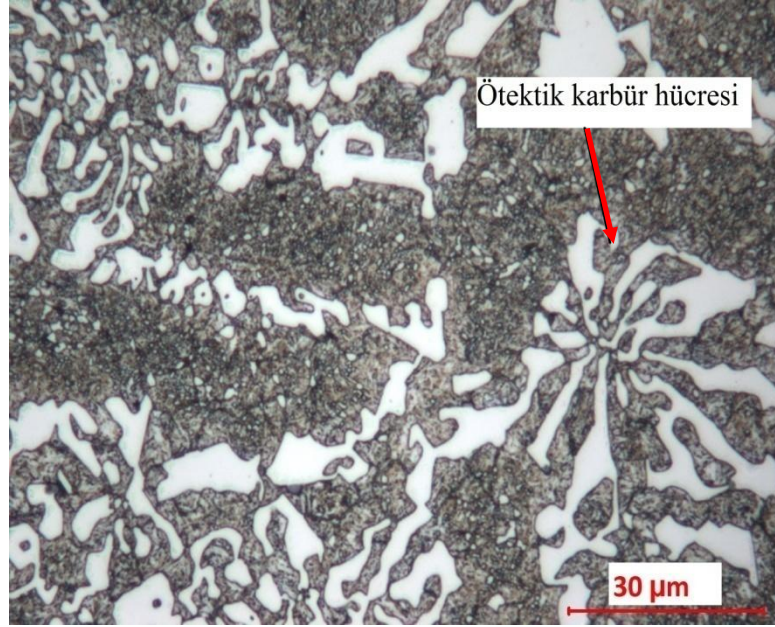




b)



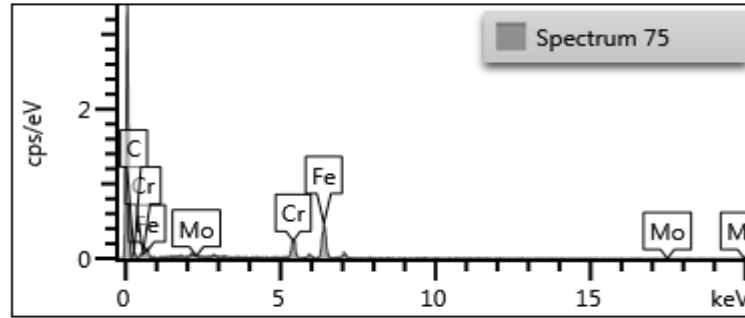
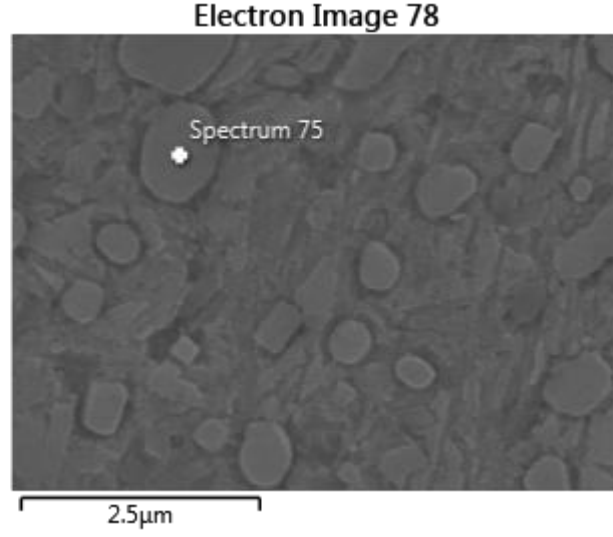
c)



d)

**Şekil 4.1.** 9640'ın mikroyapıları, a) 2,5X, b) 10X, c) 50X, d) 100X

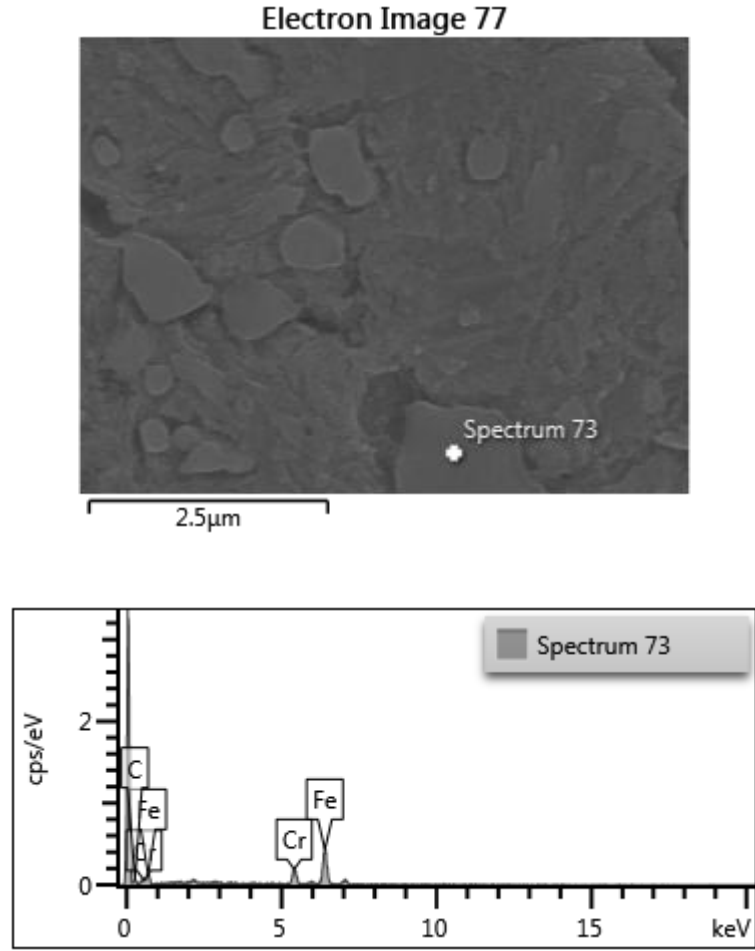
Şekil 4.1'de a) 2,5X, b)10X, c)50X d) 100X ölçekte mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Yapılan ısıl işlem, 1050 °C'de 3 saat bekleme, durgun havada oda sıcaklığına kadar soğuma 450 °C'de 4 saat bekleme ve durgun havada oda sıcaklığına kadar soğuma şeklinde gerçekleştirilmiştir. Mikrograflar incelendiğinde dentritik bir mikroyapı görülmektedir. Mikroyapıda, diğer alaşımlara göre çok daha ince primer karbürler, yer yer ötektik karbür hücreleri ve temperleme ile matrikste çökelmiş ince sekonder karbür taneleri genel metalografik yapıyı oluşturmuştur.



| Element | Wt%    | Wt% Sigma |
|---------|--------|-----------|
| C       | 31.35  | 4.81      |
| Cr      | 16.77  | 1.49      |
| Fe      | 49.95  | 3.69      |
| Mo      | 1.92   | 1.37      |
| Total:  | 100.00 |           |

**Şekil 4.2.** Karbür üzerinden yapılan SEM-EDS analizi 9640

Şekil 4.2'de % 0,55 molibden oranına sahip olan 9640 kodlu beyaz dökme demir numunede belirlenen karbür üzerinden yapılan analizde, mevcut molibdenin karbür bileşiği içerisinde girdiği görülmektedir. Krom yüzdesi ise bu karbürde % 1,49 sapma ile % 16,77 olarak ölçülmüştür.

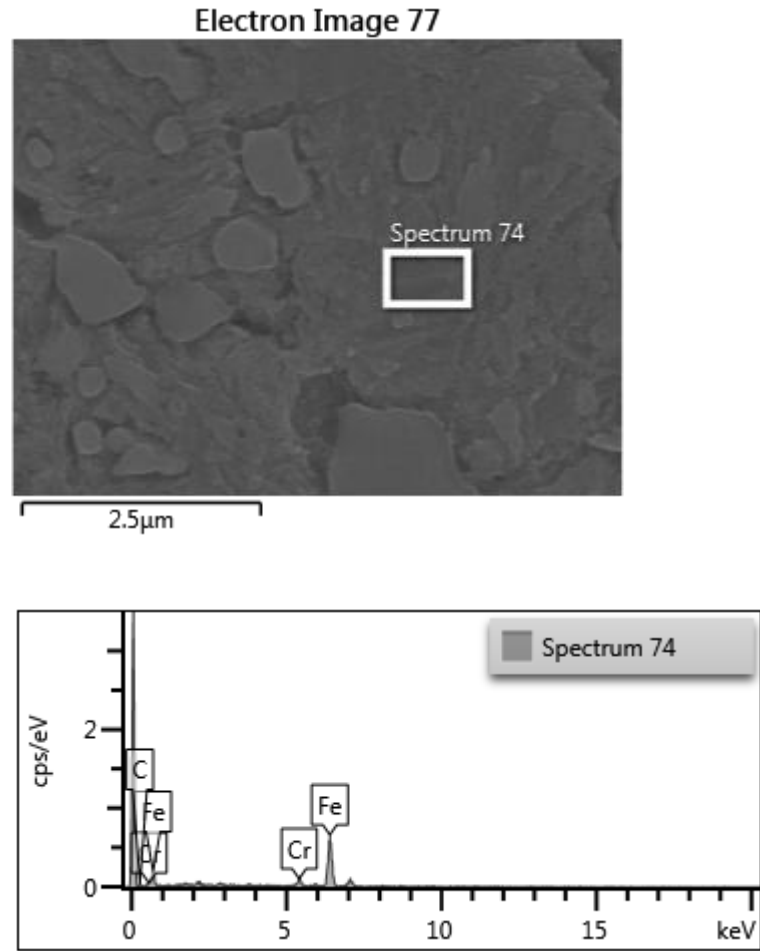


| Element | Wt%    | Wt% Sigma |
|---------|--------|-----------|
| C       | 27.55  | 4.44      |
| Cr      | 15.09  | 1.36      |
| Fe      | 57.36  | 3.67      |
| Total:  | 100.00 |           |

**Şekil 4.3.** Başka bir karbür üzerinden yapılan SEM-EDS analizi 9640

Şekil 4.3'te karbür üzerinden alınan analizde, Cr % 1,36 sapma ile % 15,09 olarak ölçülmüştür. Karbürün, demirce zengin bir Fe-Cr-C bileşiği olduğu anlaşılmaktadır ( $(FeCr)_3C$ ).

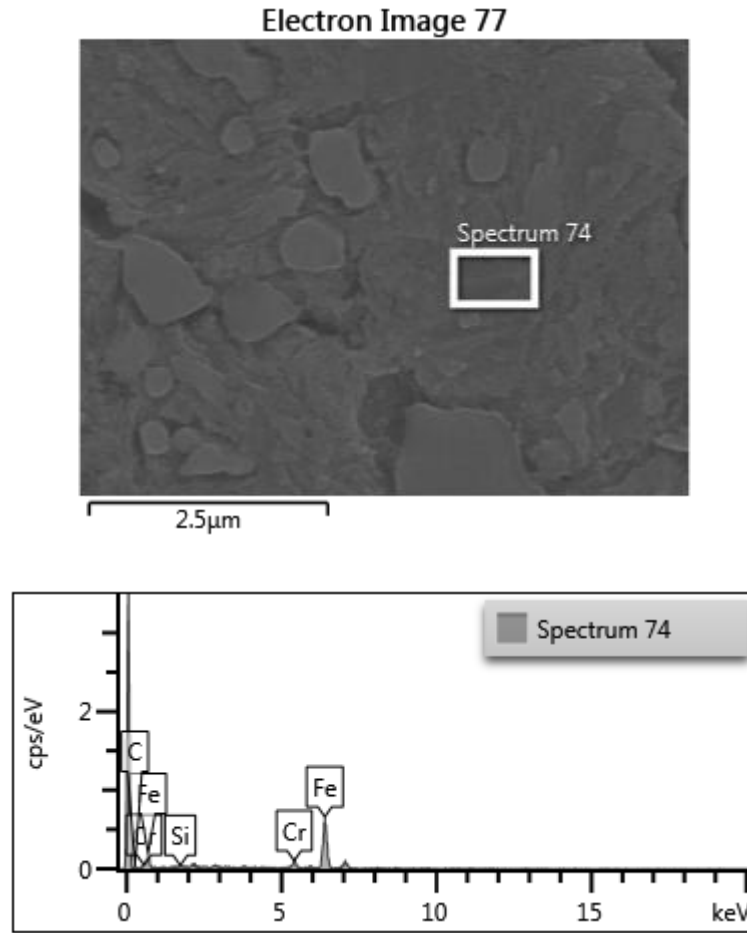




| Element | Wt%    | Wt% Sigma |
|---------|--------|-----------|
| C       | 19.63  | 3.83      |
| Cr      | 7.11   | 0.80      |
| Fe      | 73.26  | 3.57      |
| Total:  | 100.00 |           |

**Şekil 4.4.** Matriks bölgeden yapılan SEM-EDS analizi 9640

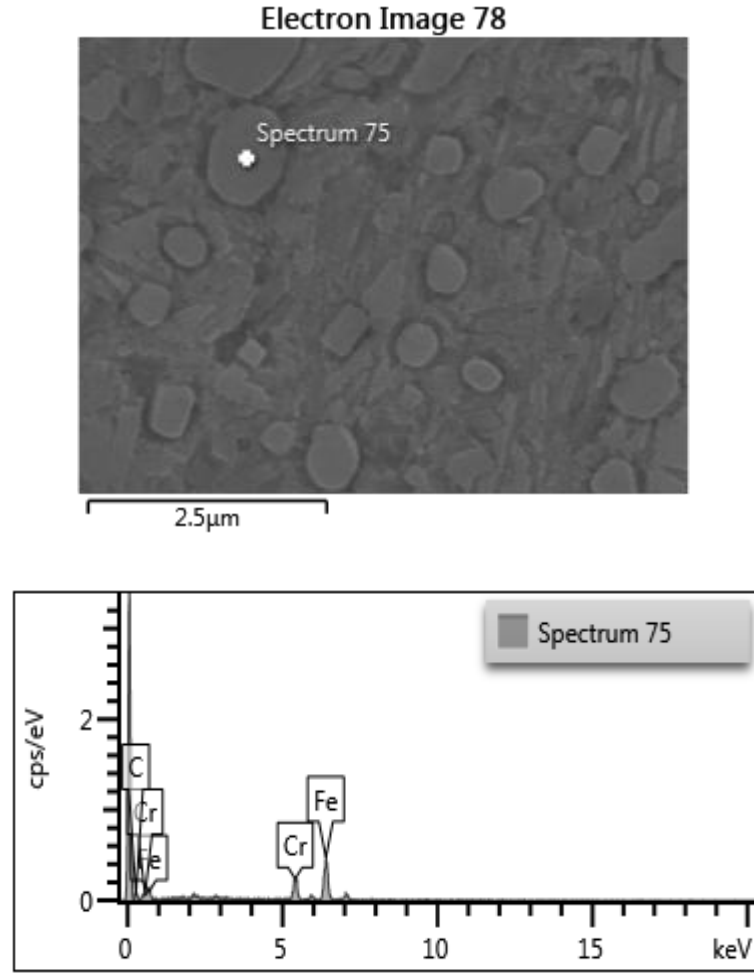
Şekil 4.4'te 9640 kodlu beyaz dökme demir numunede matriks bölgeden yapılan analizde krom oranı % 0,80 sapma ile % 7,11 olarak ölçülmüştür. Krom elementinin karbür yapıcı özelliğinden dolayı, karbür üzerinden yapılan analizlerde daha yüksek oranda bulunduğu görülmektedir. Matriksteki çözünürlüğü ise sınırlı kalmıştır.



| Element | Wt%    | Wt% Sigma |
|---------|--------|-----------|
| C       | 31.35  | 4.81      |
| Cr      | 16.77  | 1.49      |
| Fe      | 49.95  | 3.69      |
| Mo      | 1.92   | 1.37      |
| Total:  | 100.00 |           |

**Şekil 4.5.** Aynı matriks bölgeden yapılan SEM-EDS analizi 9640

Şekil 4.5'te yine aynı matriks bölgeden alınan analizde % 0,79 sapma ile % 7,04 oranında krom elementi tespit edilirken, bir miktar yapıda bulunan silisyum elementi de tespit edilmiştir.



| Element | Wt%    | Wt% Sigma |
|---------|--------|-----------|
| C       | 30.33  | 3.78      |
| Cr      | 17.38  | 1.32      |
| Fe      | 52.30  | 3.00      |
| Total:  | 100.00 |           |

**Şekil 4.6.** Karbür üzerinden yapılan SEM-EDS analizi 9640

Şekil 4.6'da karbür üzerinden alınan bir analiz sonucu görülmektedir. Karbür yapıcı özelliğe sahip olan krom elementinin, analizi yapılan karbür yapıda % 1,32 sapma ile % 17,38 oranında bulunduğu tespit edilirken molibden elementi tespit edilememiştir.

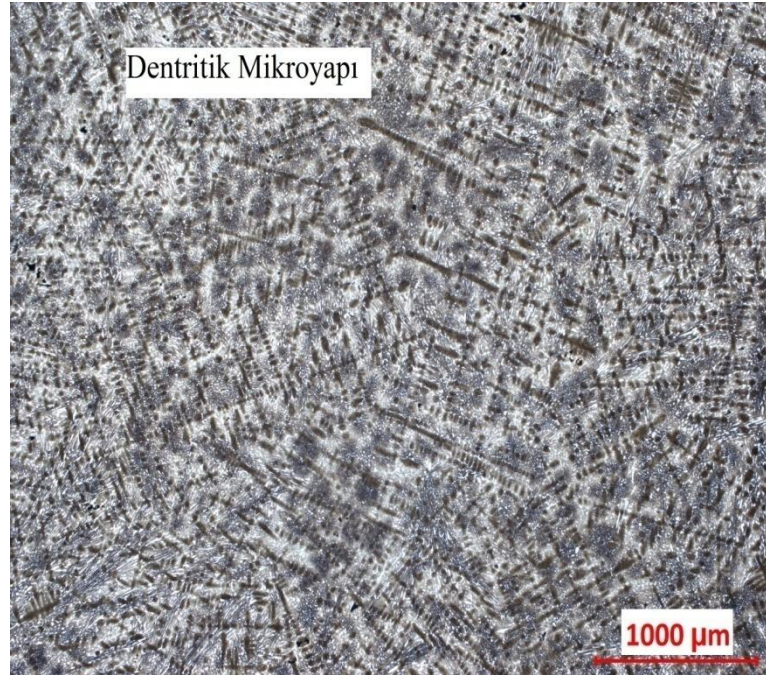
**Çizelge 4.2.** 9640 Sertlik değerleri (numune yüzeyinden, 5 mm ara ile ölçülmüştür)

|            |                 |
|------------|-----------------|
| No         | 9640            |
| 1          | 59,1 HRC        |
| 2          | 58,8 HRC        |
| 3          | 59,4 HRC        |
| 4          | 59,8 HRC        |
| 5          | 58,3 HRC        |
| <i>Ort</i> | <i>59,0 HRC</i> |

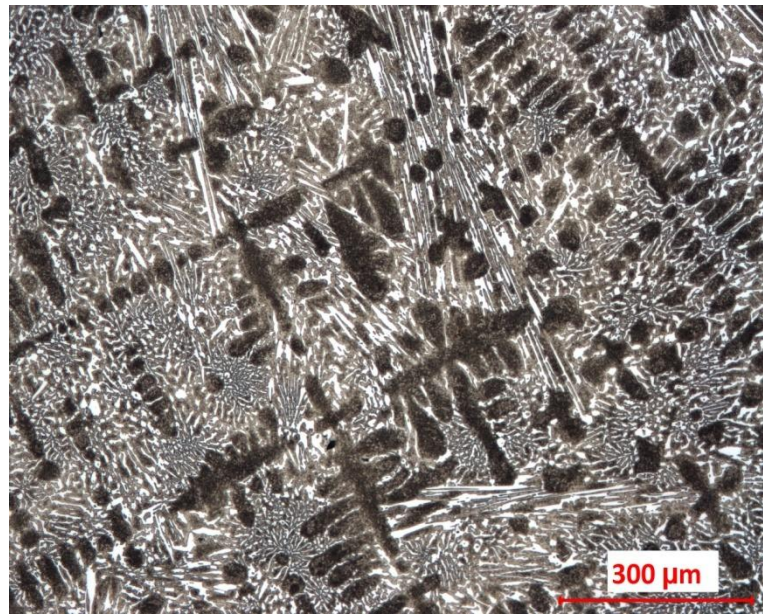
9645 Kodlu malzemenin mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.7'de verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** 9645 kodlu numune analizi

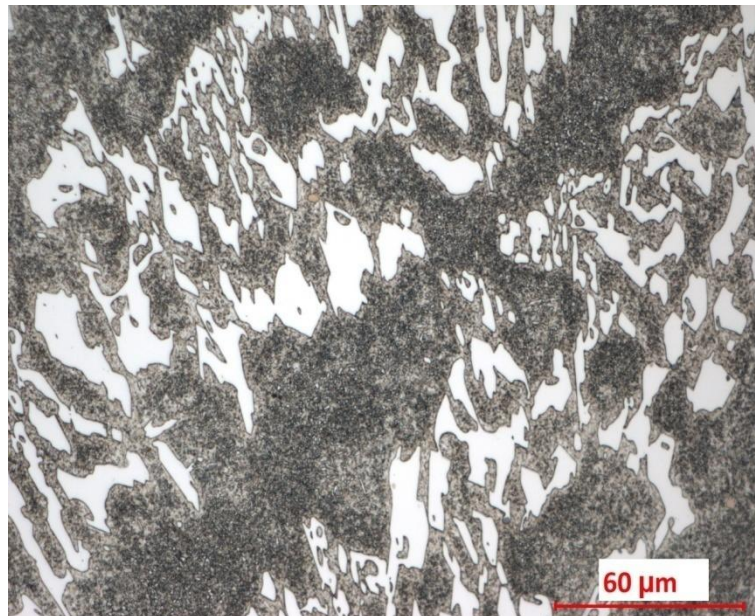
|          |       |       |       |        |       |
|----------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Kod:9645 | C     | Si    | Mn    | Cr     | Mo    |
|          | 2,909 | 0,709 | 0,663 | 19,899 | 1,511 |



a)

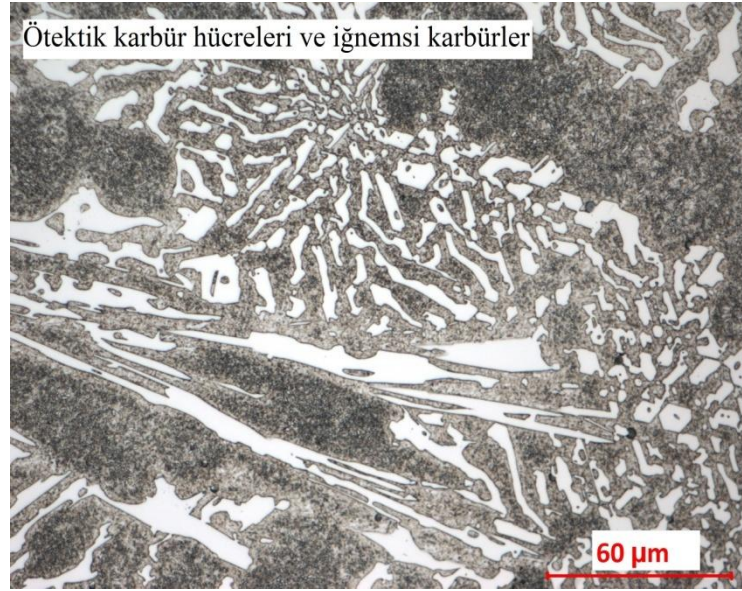


b)

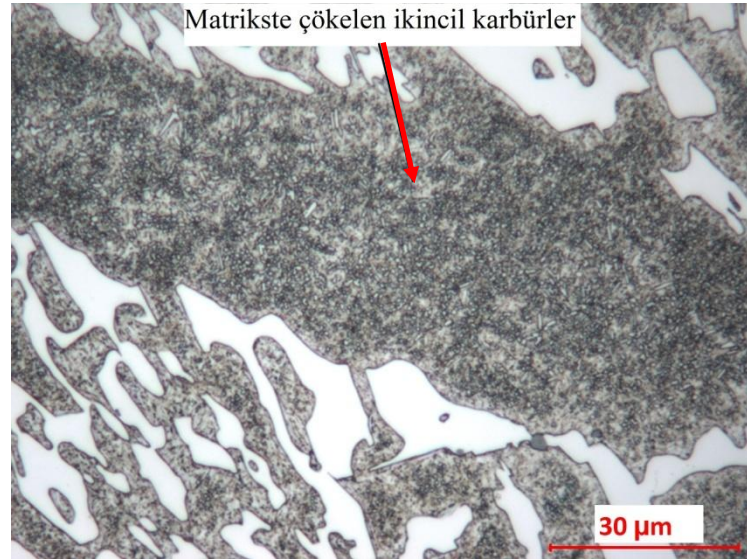


c)





d)

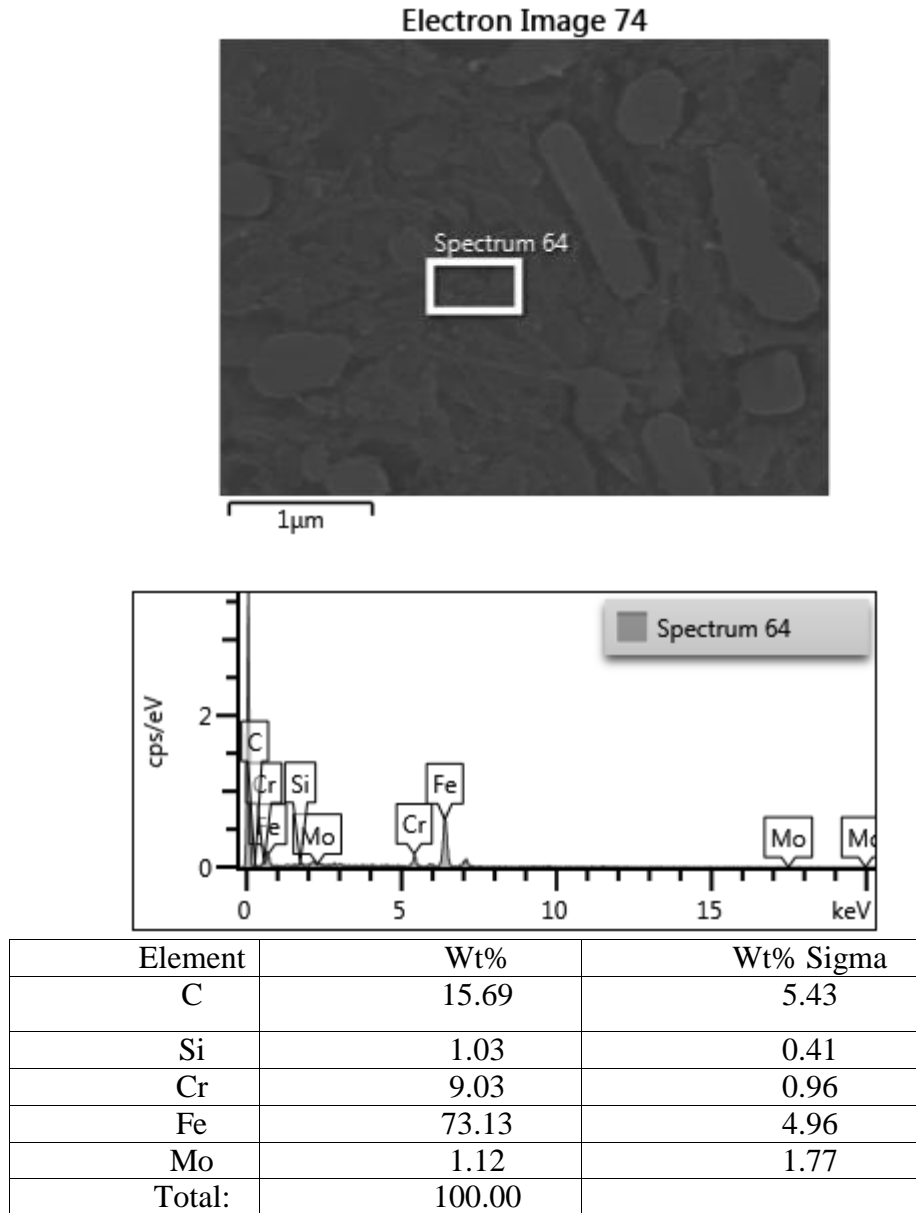


e)

**Şekil 4.7.** 9645 mikroyapılar a) 2,5X, b) 10X, c) 50X, d) 50X, e) 100X

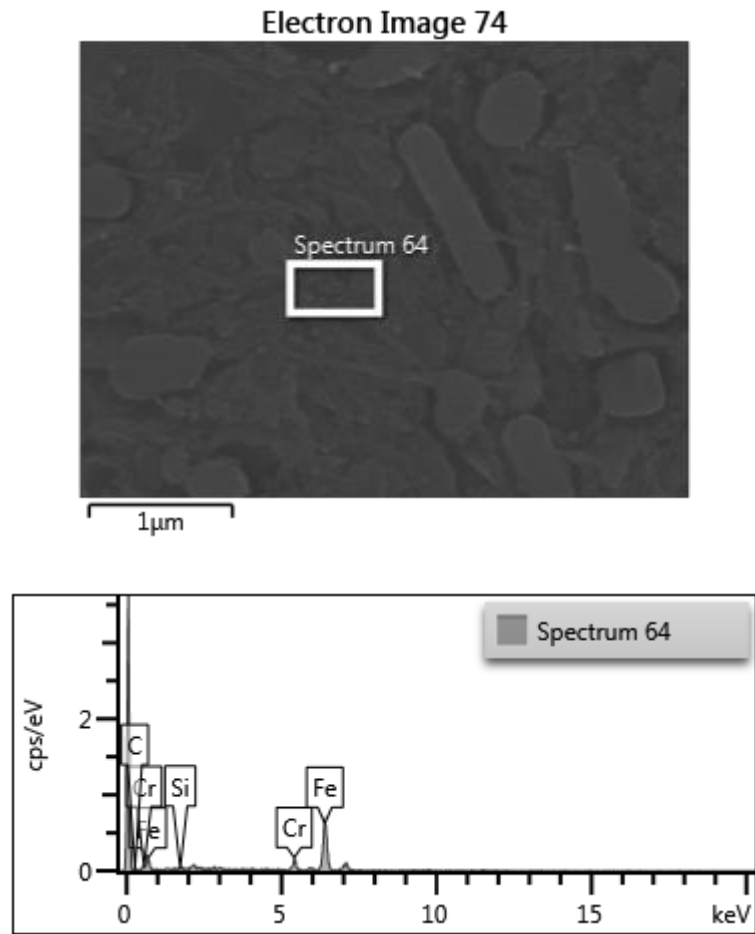
Şekil 4.7'de a) 2,5X, b) 10X, c) 50X, d) 50X e) 100X ölçekte mikroyapı fotoğrafları gösterilmektedir. Yapılan ısıl işlem, 1050 °C'de 3 saat bekleme, durgun havada oda sıcaklığına kadar soğuma, 450 °C'de 4 saat bekleme ve durgun havada oda sıcaklığına kadar soğuma şeklinde gerçekleştirilmiştir. Mikrograflar incelendiğinde çok belirgin bir dentritik yapı görülmektedir. Mikroyapıda döküm sonrasında oluşan primer karbürler, çok daha yaygın ötektik karbür hücreleri ve temperleme ile

matrikste çökelmiş yoğun ince ikincil karbür taneleri genel metalografik yapıyı oluşturmuştur. Ayrıca mikroyapıda, oluşan pirimer karbürlerin iğnemsileştiği bölgelerde mevcuttur.



**Şekil 4.8.** Matriks bölgeden yapılan SEM-EDS analizi 9645

% 1,51 molibden içeren 9645 kodlu beyaz dökme demir numunede, matriksten alınan analiz sonucu görülmektedir. Yapıda bulunan molibden ve silisyum elementlerinin de krom elementi ile birlikte matriks yapıda yer aldığı görülmektedir. Çökelen  $M_7C_3$  karbürleri nedeniyle matriksin kromca fakirleştiği görülmektedir.

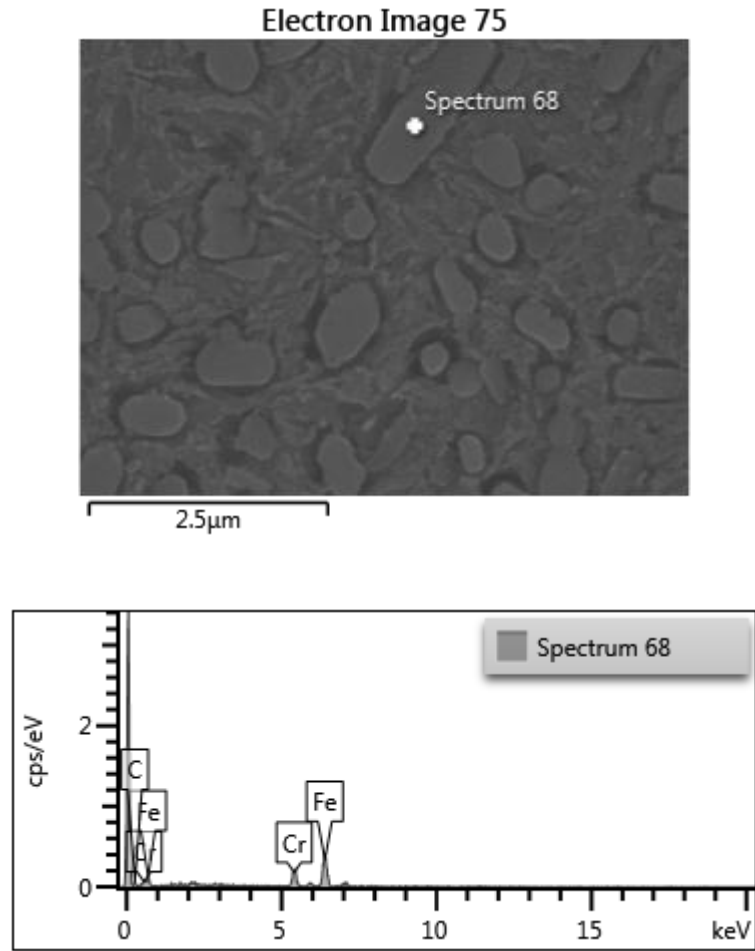


| Element | Wt%    | Wt% Sigma |
|---------|--------|-----------|
| C       | 15.58  | 4.09      |
| Si      | 1.05   | 0.41      |
| Cr      | 9.10   | 0.87      |
| Fe      | 74.27  | 3.70      |
| Total:  | 100.00 |           |

**Şekil 4.9.** Aynı matriks bölgeden yapılan SEM-EDS analizi 9645

Yine matriks bölgeden alınan bir analiz sonucu Şekil 4.9' da görülmektedir. Karbür yapıcı olan krom elementinin matriste sınırlı oranda çözüldüğü görülmektedir.

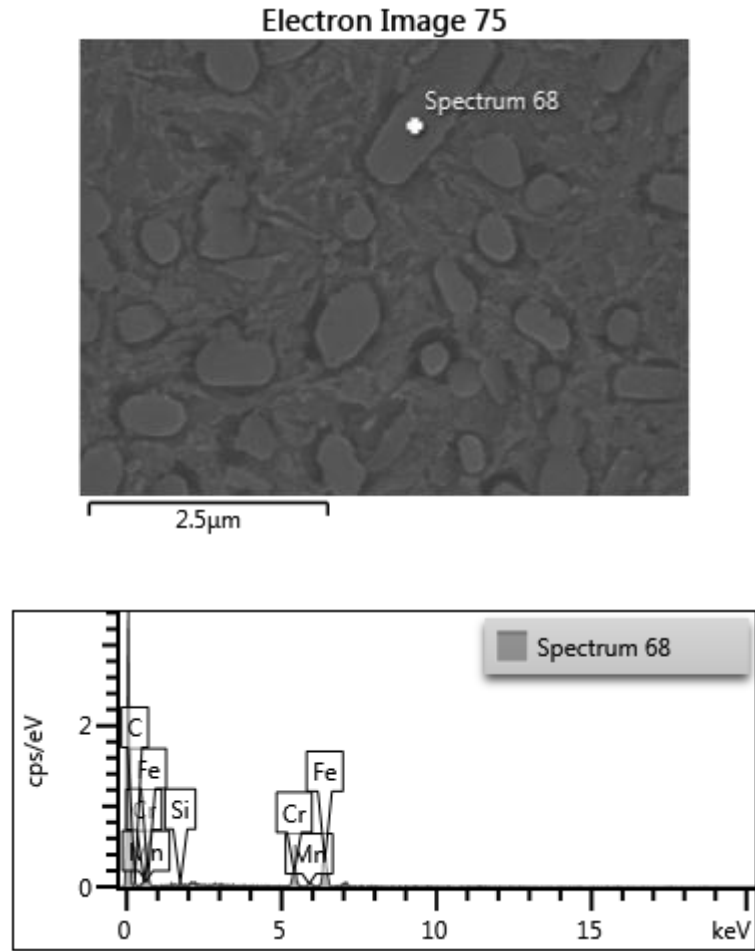




| Element | Wt%    | Wt% Sigma |
|---------|--------|-----------|
| C       | 27.45  | 4.10      |
| Cr      | 20.32  | 1.58      |
| Fe      | 52.23  | 3.19      |
| Total:  | 100.00 |           |

**Şekil 4.10.** Karbür üzerinden yapılan SEM-EDS analizi 9645

Şekil 4.10'da, 9645 kodlu numunede karbür üzerinden alınan bir analiz sonucu görülmektedir. Yapıda bulunan yüksek krom içeriğinin yapılan analizde karbür yapısına yansıdığı ve % 1,58 sapma ile % 20,32 oranında bulunduğu tespit edilmiştir. Bu karbürün kromca zengin  $M_7C_3$  (Fe,Cr) $_7C_3$  karbürü olduğu anlaşılmaktadır.



| Element | Wt%    | Wt% Sigma |
|---------|--------|-----------|
| C       | 27.39  | 4.08      |
| Si      | 0.86   | 0.39      |
| Cr      | 19.72  | 1.54      |
| Mn      | 1.34   | 0.82      |
| Fe      | 50.70  | 3.12      |
| Total:  | 100.00 |           |

**Şekil 4.11.** Aynı karbür üzerinden yapılan SEM-EDS analizi 9645

Şekil 4.11'de aynı karbür üzerinden alınan analizde, yüksek krom içeriğine ve karbür yapıcı özelliğine bağlı olarak, % 1,54 sapma ile % 19,72 oranında krom tespit edilmiştir. Ayrıca yapıda bir miktar silisyum ve manganez de tespit edilmiştir.

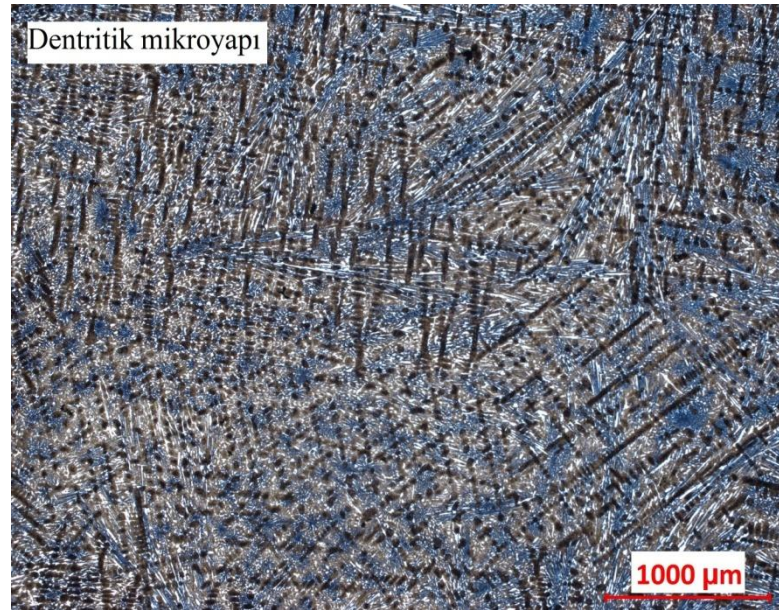
**Çizelge 4.4.** 9645 Sertlik değerleri (numune yüzeyinden, 5 mm ara ile ölçülmüştür)

|            |                 |
|------------|-----------------|
| No         | 9645            |
| 1          | 58,8 HRC        |
| 2          | 60,6 HRC        |
| 3          | 60,0 HRC        |
| 4          | 60,9 HRC        |
| 5          | 59,3 HRC        |
| <i>Ort</i> | <i>59,9 HRC</i> |

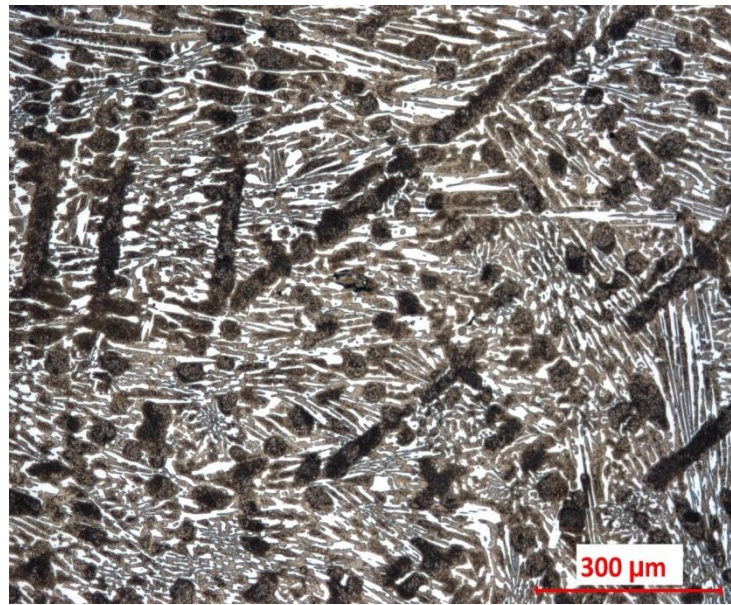
9620 Malzemenin mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.12'de verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** 9620 kodlu numune analizi

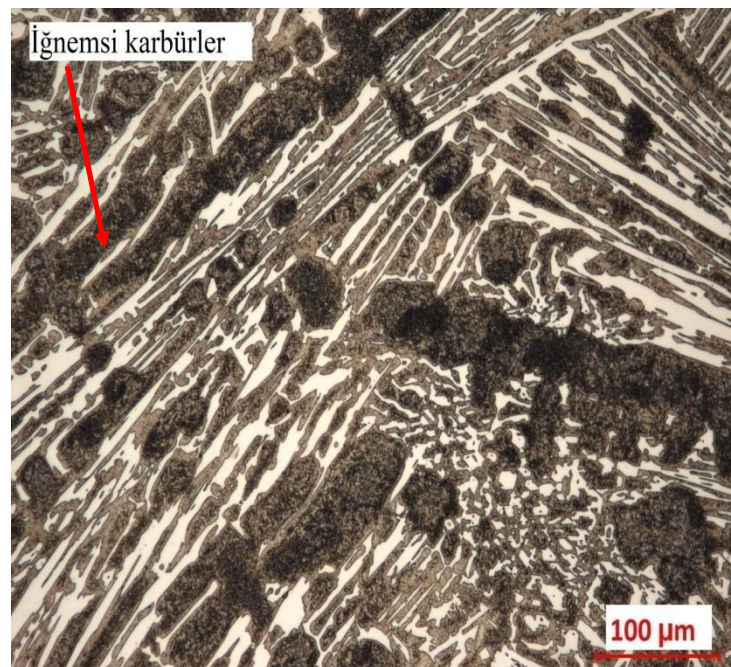
| Kod:9620 | C     | Si    | Mn    | Cr     | Mo   |
|----------|-------|-------|-------|--------|------|
|          | 2,979 | 0,803 | 0,705 | 20,519 | 1,84 |



a)

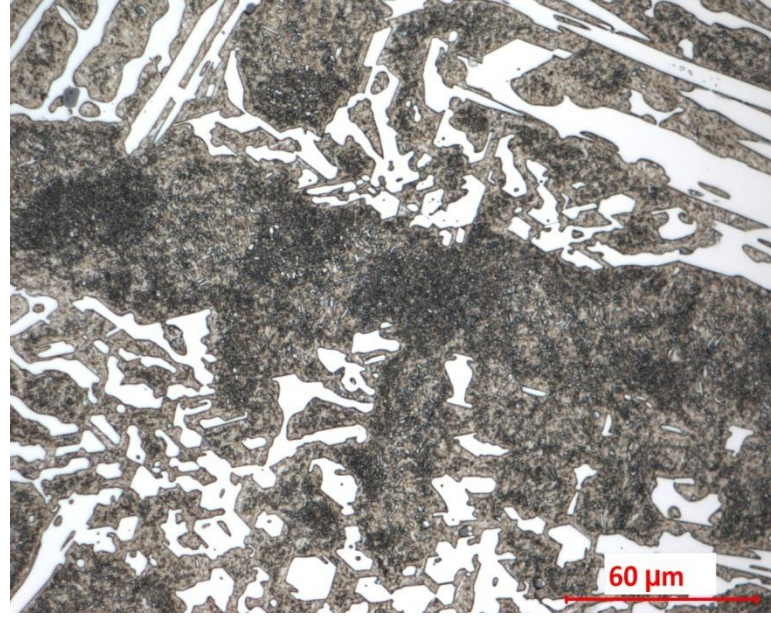


b)

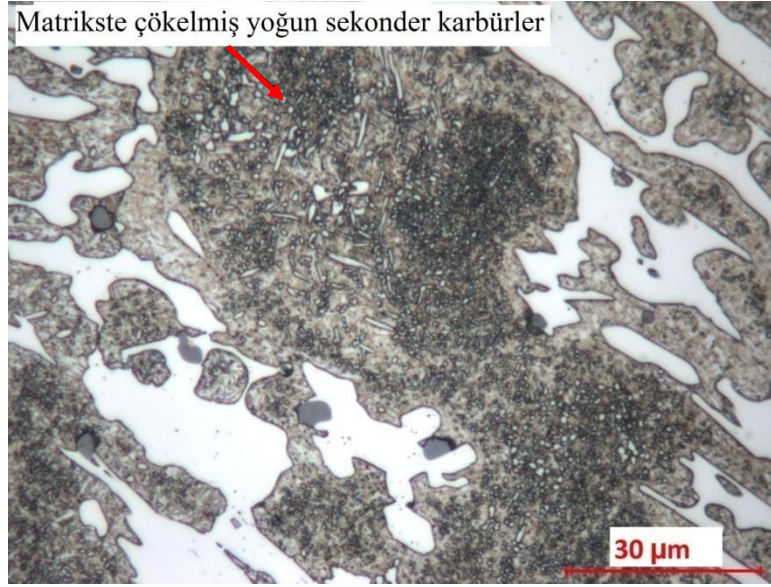


c)





d)

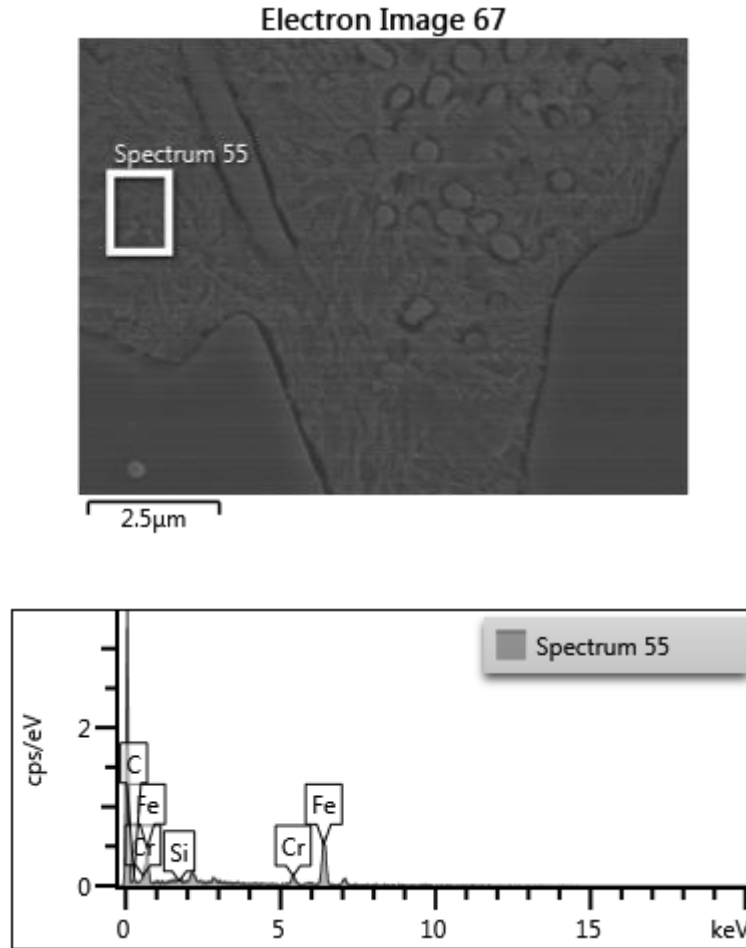


e)

**Şekil 4.12.** 9620 mikroyapılar a) 2,5X, b) 10X, c) 20X, d) 50X, e) 100X

Şekil 4.12'de a) 2,5X, b) 10X, c) 20X, d) 50X e) 100X ölçekte mikroyapı fotoğrafları gösterilmektedir. Yapılan ısıl işlem, 1050 °C'de 3 saat bekleme, durgun havada oda sıcaklığına kadar soğuma 450 °C'de 4 saat bekleme ve durgun havada oda sıcaklığına kadar soğuma şeklinde gerçekleştirilmiştir. Mikrograflar incelendiğinde yine dentritik bir mikroyapı ile karbür yapılarında belirgin iğnemsileşme görülmektedir. Mikroyapıda, nispeten daha kaba primer karbürler, ötektik karbür hücreleri ve

temperleme ile yer yer kabalaşarak matrikste çökelmiş sekonder karbür taneleri genel metalografik yapıyı oluşturmuştur.

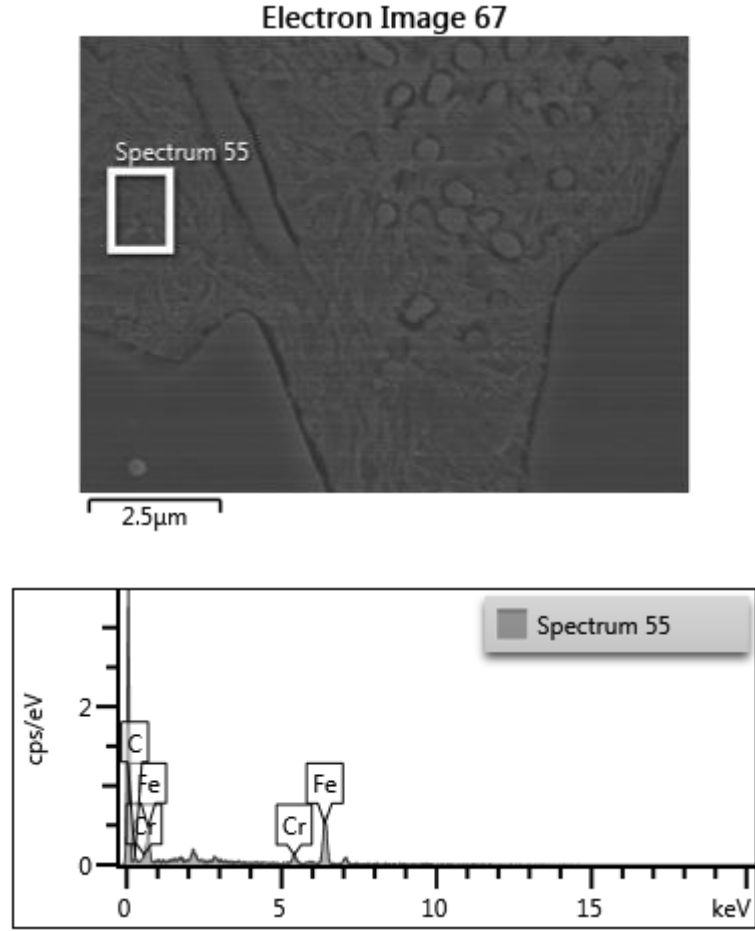


| Element | Wt%    | Wt% Sigma |
|---------|--------|-----------|
| C       | 12.93  | 3.02      |
| Si      | 1.05   | 0.37      |
| Cr      | 8.58   | 0.92      |
| Fe      | 77.44  | 2.85      |
| Total:  | 100.00 |           |

**Şekil 4.13.** Matriks bölgeden yapılan SEM-EDS analizi 9620

9620 kodlu beyaz dökme demir numunede matriks bölgeden alınan bir analiz örneği Şekil 4.13'te görülmektedir. Krom yüzdesi matrikste % 0,92 sapma ile % 8,58

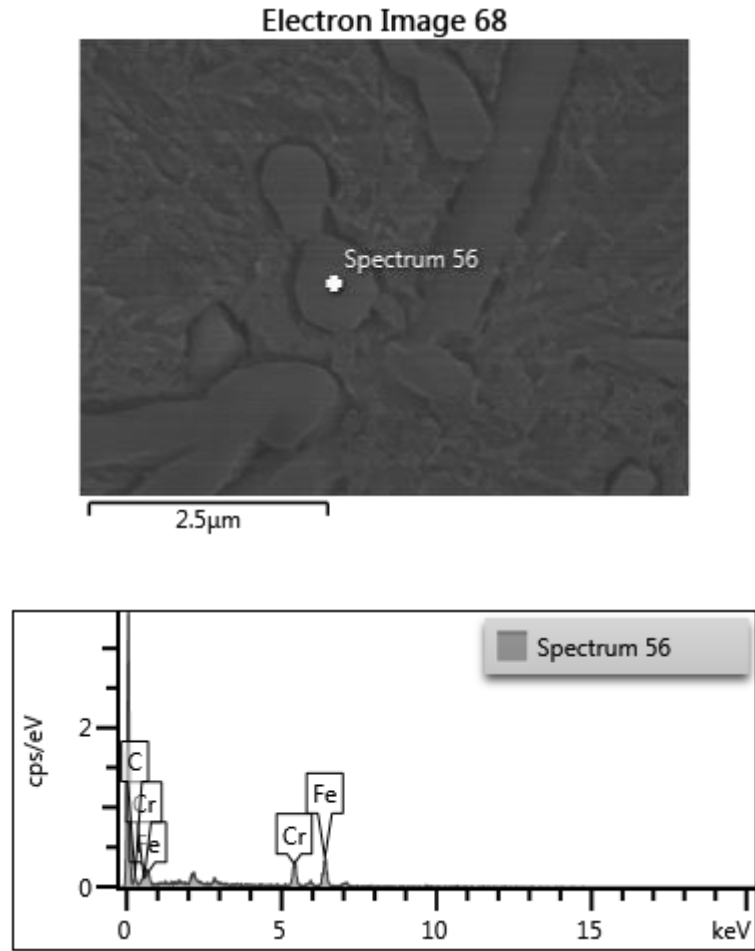
oranında çözünürken yapıda bulunan silisyum elementi de bu noktada % 0,37 sapma ile % 1,05 oranında tespit edilmiştir.



| Element | Wt%    | Wt% Sigma |
|---------|--------|-----------|
| C       | 12.84  | 3.01      |
| Cr      | 8.67   | 0.93      |
| Fe      | 78.48  | 2.85      |
| Total:  | 100.00 |           |

**Şekil 4.14.** Aynı matriks bölgeden yapılan SEM-EDS analizi 9620

Yine aynı matriks bölgeden alınan bir analiz sonucu şekil 4.14'te görülmektedir. Benzer şekilde krom içeriği burada da % 8,67 oranında ölçülmüştür.

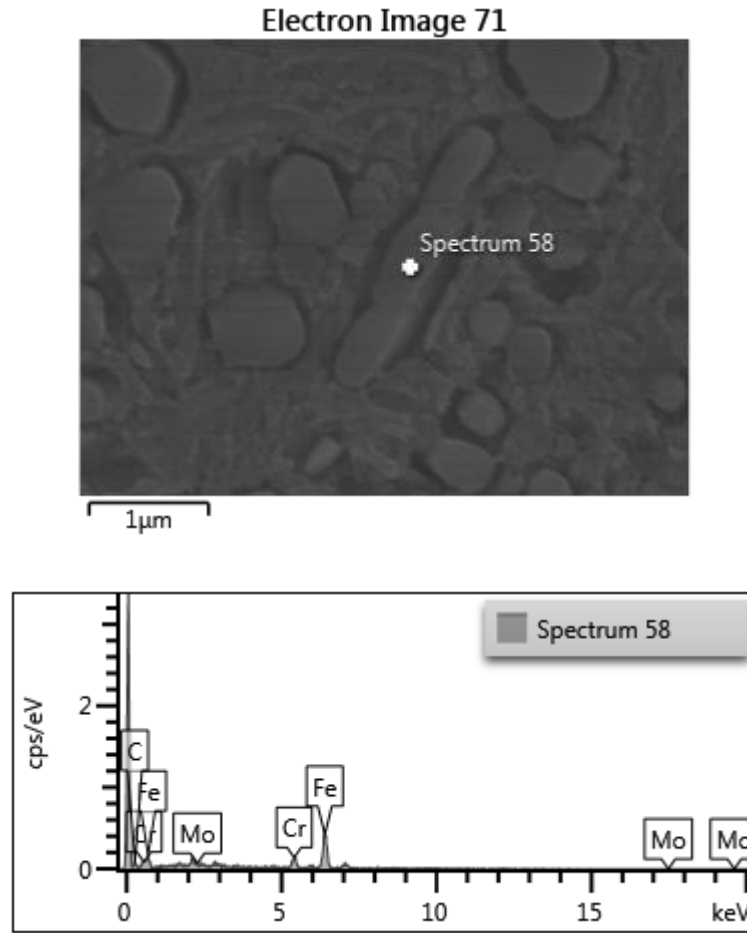


| Element | Wt%    | Wt% Sigma |
|---------|--------|-----------|
| C       | 23.17  | 2.73      |
| Cr      | 27.18  | 1.58      |
| Fe      | 49.66  | 2.24      |
| Total:  | 100.00 |           |

**Şekil 4.15.** Karbür üzerinden yapılan SEM-EDS analizi 9620

Şekil 4.15'te karbür üzerinden alınan analizde, kromun yüksek karbür yapıcı özelliğine bağlı olarak krom oranı % 1,58 sapma ile % 27,18 olarak ölçülmüştür. Burada oluşan karbürün kromca zengin  $M_7C_3$  ( $Fe, Cr)_7C_3$  olduğu görülmektedir.

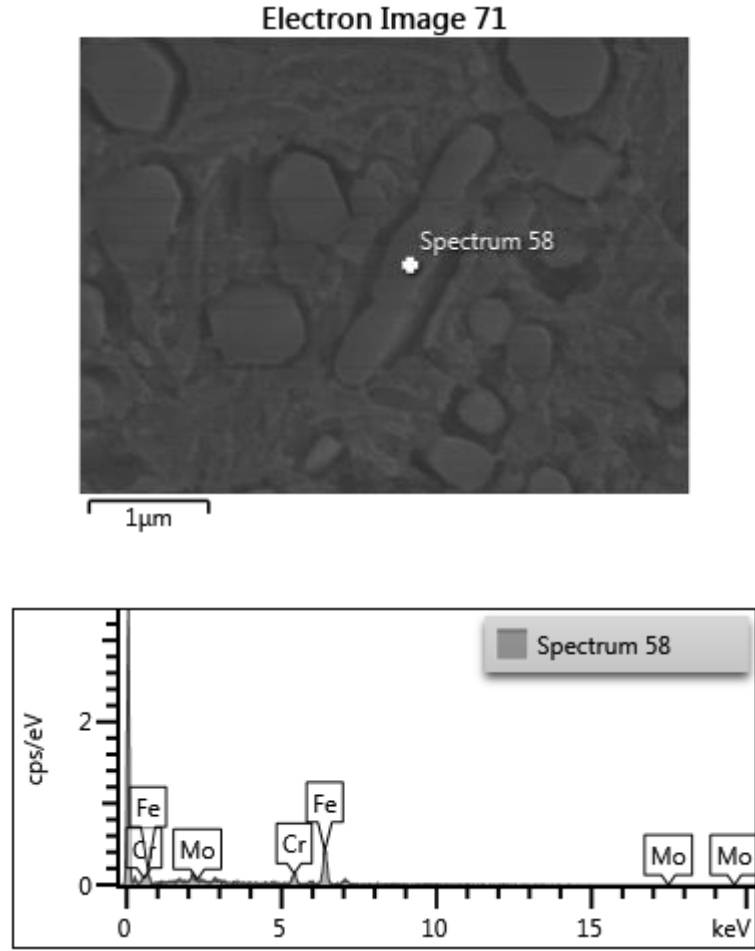




| Element | Wt%    | Wt% Sigma |
|---------|--------|-----------|
| C       | 20.96  | 3.24      |
| Cr      | 11.17  | 1.09      |
| Fe      | 65.60  | 3.09      |
| Mo      | 2.26   | 1.69      |
| Total:  | 100.00 |           |

**Şekil 4.16.** Başka bir karbür üzerinden yapılan SEM-EDS analizi 9620

Şekil 4.16'da yüksek molibden içeriğine sahip olan 9620 kodlu numunede, molibden elementi % 1,69 sapma ile % 2,26 oranında karbür yapıda yer almıştır. Krom çözünürlüğü ise % 1,09 sapma ile % 11,17 olarak ölçülmüştür.



| Element | Wt%    | Wt% Sigma |
|---------|--------|-----------|
| Cr      | 14.07  | 1.27      |
| Fe      | 82.90  | 2.28      |
| Mo      | 3.03   | 2.24      |
| Total:  | 100.00 |           |

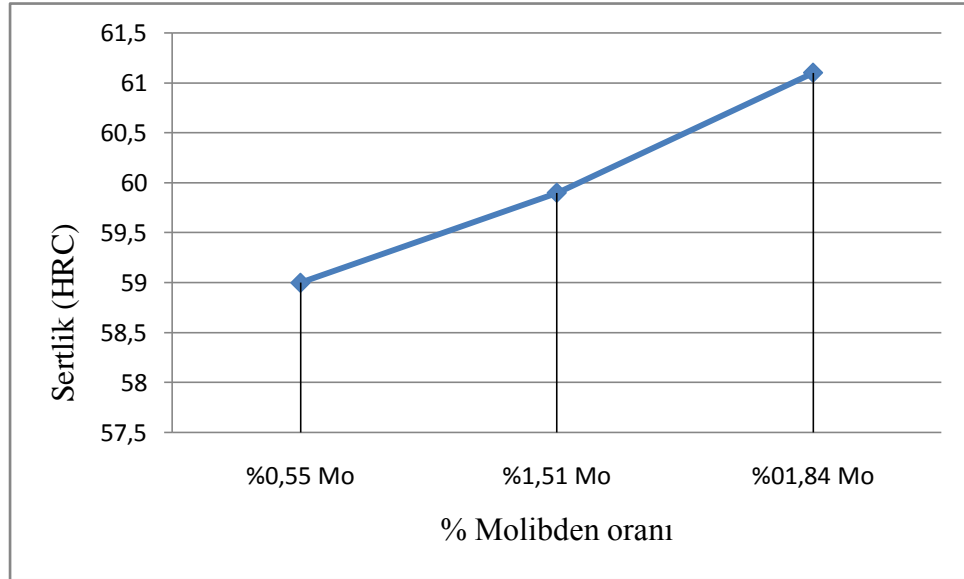
**Şekil 4.17.** Karbür üzerinden yapılan SEM-EDS analizi 9620

Şekil 4.17'de yapıda % 1,84 molibden içeren 9620 kodlu beyaz dökme demir numunede karbür yapısı içerisindeki molibden oranının % 2,24 sapma ile % 3,03 olduğu görülmektedir. Karbür yapısındaki krom çözünürlüğü % 1,27 sapma ile % 14,07 olarak ölçülmüştür.

**Çizelge 4.6.** 9620 Sertlik değerleri (numune yüzeyinden, 5 mm ara ile ölçülmüştür)

| No         | 9620            |
|------------|-----------------|
| 1          | 60,4 HRC        |
| 2          | 60,9 HRC        |
| 3          | 61,4 HRC        |
| 4          | 61,7 HRC        |
| 5          | 61,5 HRC        |
| <i>Ort</i> | <i>61.1 HRC</i> |

Sertlik testleri TS EN ISO 6508-1 standardına göre yapılmıştır. Her bir alaşım için molibden oranına göre belirlenen sertlik değişim grafiği Şekil 4.18' de görülmektedir.



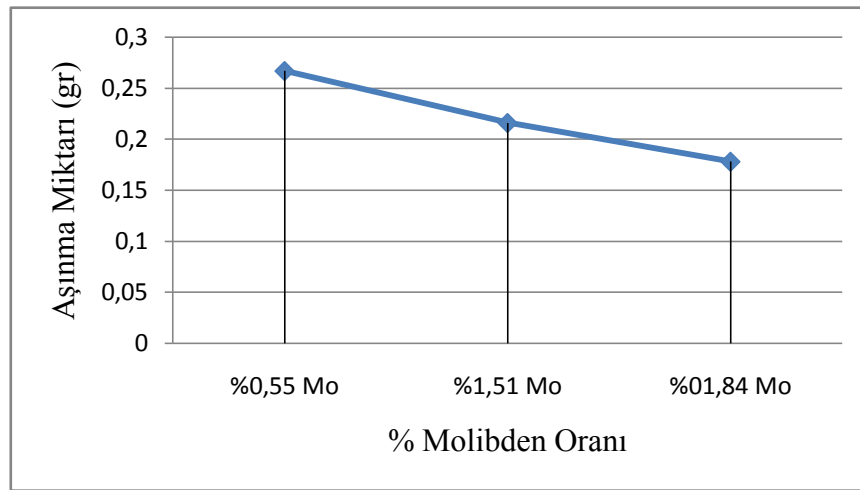
**Şekil 4.18.** Molibden oranlarına göre sertlik değişimi

#### 4.2. Aşınma ve Darbe Test Sonuçlarının İrdelenmesi

9640, 9645 ve 9620 kodlu alaşımlara, abrasif aşınma testi uygulanmıştır. Her bir alaşım için hazırlanan numuneler aynı şartlarda aşınma testine tabi tutulmuş ve ağırlık kayıpları tespit edilerek aşınma miktarları bulunmuştur.

**Çizelge 4.7.** Aşınma deney sonuçları

|                                | 9640                  | 9645                  | 9620                  |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| İlk Tartım                     | 11,5453               | 11,5833               | 11,4921               |
| Son Tartım                     | 11,5432               | 11,5816               | 11,4907               |
| Aşınma Miktar(g)               | 0,0021                | 0,0017                | 0,0014                |
| Aşınma Hacmi(mm <sup>3</sup> ) | 0,267 mm <sup>3</sup> | 0,216 mm <sup>3</sup> | 0,178 mm <sup>3</sup> |
| Kayma Yolu                     | 200 m                 | 200 m                 | 200 m                 |

**Şekil 4.19.** Alaşımların aşınma miktarları

Yapılan aşınma testinde, % C, % Cr ve % Mo oranı daha fazla olan 9620 kodlu alaşımın en az, % C, % Cr ve % Mo oranları en düşük olan 9640 alaşımın ise en fazla kütle kaybına uğrayan alaşım olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.19'da aşınma miktarlarındaki farklılıklar görülmektedir. Burada C, Cr ve Mo elementleri karbür yapıcı elementlerdir ve yapıdaki karbür oranını artırır. Yapıdaki karbürler ise aşınma direncini sağlayan en önemli yapı elemanlarıdır. 9620 kodlu alaşım içeriğindeki yüksek molibdeninde etkisi ile aşınma direnci en iyi çıkan alaşım olmuştur. 9640, 9645, 9620 kodlu yüksek krom alaşımlı beyaz dökme demir numunelerin mukavemet ve tokluğunun tespiti için, darbe deneyinde emilen enerji miktarları  $E=G(h-h_1)=G.L(\cos\beta-\cos\alpha)$  formülüne göre hesaplanmıştır. Burada, G: sarkacın ağırlığı (kg) L: sarkacın ağırlık merkezinin sarkacın salınım merkezine uzaklığı(m) h:sarkacın ağırlık merkezinin düşme yüksekliği (m) h<sub>1</sub>:sarkacın ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği (m)  $\alpha$ : düşme açısı (derece)  $\beta$ : yükseliş açısı (derece)'dir.

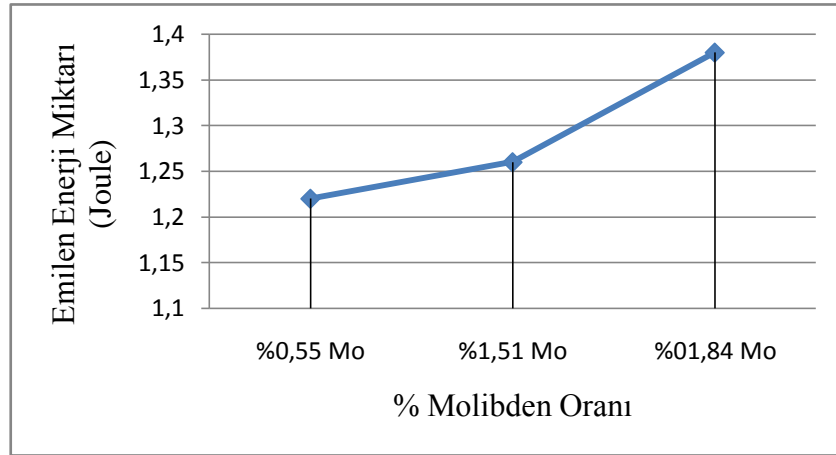
Alaşımların ısıtılma işlem sonrasında, darbe testi sonuçları Çizelge 4.8'de ve sertlikle birlikte karşılaştırması Çizelge 4.9'da verilmiştir.

**Çizelge 4.8.** Darbe testi sonuçları

| Darbe test sonuçları (Joule) |                 |                |
|------------------------------|-----------------|----------------|
| 9640 (%0,55Mo)               | 9645 (%1,51 Mo) | 9620(%1,84 Mo) |
| 1,44                         | 1,47            | 1,44           |
| 1,04                         | 1,22            | 1,31           |
| 1,18                         | 1,11            | 1,39           |
| Ort. 1,22 j                  | Ort. 1,26 j     | Ort. 1,38 j    |

**Çizelge 4.9.** Alaşımların sertlik ve darbe sonuçlarının karşılaştırılması

| Kodu           | Sertlik değeri | Emilen enerji miktarı (j) |
|----------------|----------------|---------------------------|
| 9640 (0,55 Mo) | 59,0 HRC       | 1,22 J                    |
| 9645 (1,51 Mo) | 59,9 HRC       | 1,26 J                    |
| 9620 (1,84 Mo) | 61,1 HRC       | 1,38 J                    |



**Şekil 4.20.** Alaşımlarda emilen enerji miktarındaki değişim

9640, 9645 ve 9620 alaşımlarında emilen enerji miktarları, beyaz dökme demirlerin çok sert ve gevrek bir malzeme olmasından dolayı çok dar bir aralıkta ölçülmüştür. Burada molibden oranı arttıkça soğrulan enerji miktarı da çok belirgin bir fark görülmemekle birlikte artmaktadır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada farklı molibden oranlarına sahip olan beyaz dökme demirlerin öncelikle spektrometre cihazında kimyasal analizleri yapılmıştır. Numuneler ısıtma işlem sonrası metalografik açıdan incelenmiştir. Bunun için optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobundan yararlanılmıştır. Ayrıca EDS ünitesi kullanılarak elementel analizler yapılmıştır. Bunun yanı sıra aşınma testleri ile numunelerin aşınma dirençleri ölçülmüş ve yapılan darbe testleri ile emilen enerji miktarları tespit edilmiştir.

Molibden oranı arttıkça ısıtma işlem sonrasında mikroyapıda belirgin değişiklikler meydana gelmektedir. Yapıda yaygın halde bulunan primer karbürlerin daha kaba oluştuğu ve iğnemsiz yapıya dönüşme eğilimi tespit edilmiştir. Ayrıca temperleme etkisi ile numunelerin tamamında matrikste çökelmiş yoğun ikincil karbür hücreleri mevcuttur. Ancak molibden oranı en fazla olan 9620 kodlu beyaz dökme demir numunede matrikste çökelen ikincil karbürler diğer alaşımlara göre nispeten daha büyüktürler. Ayrıca yine matrikste çökelen ikincil karbürlerde de bir iğnemsileşme eğiliminden bahsetmek mümkündür.

Molibden elementindeki oransal artışa bağlı olarak, sertlik değerleri de bir miktar artış göstermiştir. % 0,55 oranında molibden içeren 9640 alaşımı ortalama 59,0 HRC gelirken, % 1,51 oranında molibden içeren 9645 alaşımında ortalama sertlik 59,9 HRC olmuştur. % 1,84 molibden içeren 9620 alaşımında ise ortalama 61,1 HRC ile en yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür.

Beyaz dökme demirlerde karbür yapıcı elementlerin (C, Cr, Mo vb) artmasıyla yapıdaki karbür oranı artmaktadır. Bu da aşınma direncini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu deneysel çalışmada kullanılan 9640, 9645 ve 9620 alaşımlarından, en fazla karbür yapıcı içeren 9620 alaşımının aşınma direncinin en fazla olduğu, aşınma deneyleri ile tespit edilmiştir. 9640 kodlu beyaz dökme demir numune ise, aşınma direnci en az olan alaşım olmuştur.

Beyaz dökme demirlerde Cr/C oranı arttıkça sertlik artarken, aşınma direnci de artmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar göstermektedir ki, Cr/C oranı 6,88 olan 9620 alaşımı sertlik ve aşınma direnci bakımından diğer iki alaşıma göre daha iyi değerlere sahip alaşım olmuştur.

Yapılan darbe testleriyle numunelerin emilen enerji miktarları tespit edilmiştir. % 0,55 molibden içeriğine sahip 9640 alaşım kodlu beyaz dökme demir numune için ort. 1,22 j olan darbe testi sonucu, % 1,51 molibden içeren 9645 alaşımı için 1,26 j ve % 1,84 molibden içeren 9620 alaşımı içinse 1,38 j olarak ölçülmüştür. Bu sonuca göre, beyaz dökme demirde bir miktar sertlik artışı ile birlikte, emilen enerji miktarında da artış görülmektedir. Bu ilginç durumun, mikro alaşım elementlerinin etkisi ile yapıda bulunan primer karbürlerin morfolojisindeki stabilitenin bozulması ve çökelen ikincil karbür hücrelerinin, karbonca fakirleşen matriksteki dağılım şekli ile ilgili olduğu söylenebilir.

Madencilik uygulamalarında, maden kırıcı makinelerinde kullanılan ve beyaz dökme demirden üretilen maden kırıcılarının darbe direncini düşürmeden aşınma ömrünün artırılması bu konu ile ilgili yapılan çalışmaların esasını oluşturmaktadır.

Beyaz dökme demirler, her ne kadar aşınma dirençleri mükemmel olsa da, düşük darbe dirençleri nedeniyle çok titiz çalışma koşullarında verimli kullanılabilen malzemelerdir. Normal servis koşullarının dışındaki bir gerilime maruz kalması durumunda, çalışma esnasında hasara uğraması ve büyük zararlara neden olması söz konusu olabilmektedir. Bu da maden kırıcılarında kullanılan beyaz dökme demirin bir dezavantajı olarak karşımıza çıkmaktadır.

**KAYNAKLAR**

- Akdemir, Ö., 1994. Alaşımli Beyaz Dökme Demirlerin Mikroyapı Analizi ve Aşınma Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Asensio, J., Pero-Sanz, J., Verdeja, J., 2003. Microstructure selection criteria for cast irons with more than 10 wt.% chromium for wear applications. *Materials Characterization*, 49(6), 83-93.
- Chenje, T., Simbi, D., Navara, E., 2004. Relationship between microstructure hardness impact toughness and wear performance of selected grinding media for mineral ore milling operations. *Materials and Design*, 25, 11-18.
- Choi, J., Chang, S., 1992. Effects of molybdenum and copper additions on microstructure of high chromium cast iron rolls. *ISIJ Institute*, 3, 1170-1176.
- Çapa, M., Gülmez, T., 2001. X210Cr12 çelik hurdasından üretilen beyaz dökme demirin aşınma ve darbe dirençlerinin araştırılması. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 25, 497-502.
- Çetinkaya, C., 2006. An investigation of the wear behaviors of white cast irons under different compositions. *Journal of Iron and Steel Research*, 27, 437-445.
- De mello, J., Durand-Charre, M., 1985. Abrasion mechanisms of white cast iron : influence of the metallurgical structure of molybdenum white cast irons. *Mater Science*, 17, 203-213.
- Karantzalis, A., Lekatou, A., Mavros, H., 2009. Microstructural modifications of as-cast high-chromium white iron by heat treatment. *ASM Institute*, 18, 174-181.
- Lee, S., Kim, B., Shin J., Moon, B., 2007. Optimization of heat treatment parameters of Mo-free high cr-cast iron mill balls. *Advanced Materials Research*, 14 (26-28), 913-916.
- Liu, Z., Li, Y., Chen, X., Hu, K., 2008. Microstructure and mechanical properties of high boron white cast iron. *Journal of Iron and Steel Research*, 486, 112-116.
- Petrovic, S., Markoviv, S., Pavlovic, Z., 2003. The effect of boron on the stereological characteristics of the structural phases present in the structure of the 13% Cr white iron. *Journal of Materials Science*, 38, 3263-3268.



- Scandion, C., Boher, C., De Mello., Rezai, F., 2009. Effect of molybdenum and chromium content in sliding wear of high-chromium white cast iron: the relation ship between microstructure and wear. *Journal of Iron and Steel Research*, 267, 401-408.
- Tabrett, C., Sare, I., 1997. The effect of heat treatment on the abrasion resistance of allo white irons. *Journal of Iron and Steel Research*, 23(203-204), 206-219.
- Wong, J., Zuo, R., Sun, Z., Li, C., Liu, C., Yong, H., Shen, B., Huong, S., 2005. Influence of secondary carbides precipitation and transformation on hardening behavior of a 15Cr-1Mo 1,5V white iron. *Materials Characterization*, 55, 234-240.
- Zeytin, H., Yildirim, H., Berme, B., Duduoğlu, S., Kazdal, G., Deniz, A., 2011. Effect of boron and heat treatment and mechanical properties of white cast iron for mining application. *Journal of Iron and Steel Research*, 18(11), 33-3.
- Odabaşı, A., Göğtaş, C., Sezer, L., Ünlü, N., Eruslu, N., 2006. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin ısıl işlemleri. *Metal Dünyası*, 157,104-109.
- Kazdal, G., Zeytin, H., Çimenoglu, H., 2012. Kimyasal bileşim ve ısıl işlemin beyaz dökme demirin mikroyapı ve aşınma özelliklerine etkisi: Maden kırıcılarında uygulanabilirliği. *International Steel Symposium*, 02-04 April, Karabük, 241-249.
- Yıldız, T., Gür, A., 2006. Aşınma sistemleri, <http://www.web.firat.edu.tr/daum/docs/42/16-> (30.12.2013).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : YILDIRIM, Hakan

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 31.08.1977 - Çorum

Medeni hali : Evli

Telefon : 0 (364) 225 10 11

e-mail : hakanyetalurji@gmail.com

### Eğitim

| Derece        | Eğitim Birimi   | Mezuniyet tarihi |
|---------------|---|------------------|
| Yüksek Lisans | Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü<br>Makina Müh. ABD             | 2014             |
| Lisans        | İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi<br>Metalurji ve Malz.Müh.Böl. | 2001             |
| Lise          | Çorum Fatih Lisesi  | 1995             |

### İş Deneyimi

| Yıl         | Yer                        | Görev            |
|-------------|----------------------------|------------------|
| 2003- 2004  | Akman Döküm/İstanbul       | Üretim Mühendisi |
| 2004- ..... | Duduoğlu Çelik Döküm/Çorum | Ar-Ge Mühendisi  |

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

Zeytin, H., Yıldırım, H., Berme, B., Duduoğlu, S., Kazdal, G., Deniz, A., 2011. Effect of boron and heat treatment on mechanical properties of white cast iron for mining application. Journal of Iron and Steel Research, 18(11), 33-3.