

**DEMİR ÇELİK HADDE MERDANELERİNDE
210Cr13Ni7MoW
ÇELİĞİNİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Rana YILMAZ

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Savaş DALMIŞ

2018

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DEMİR ÇELİK HADDE MERDANELERİNDE
210Cr13Ni7MoW
ÇELİĞİNİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Rana YILMAZ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Savaş DALMIŞ

TEKİRDAĞ – 2018

Her hakkı saklıdır.

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Savaş DALMIŞ ve Doç. Dr. Tanju TEKER danışmanlığında, Rana YILMAZ tarafından hazırlanan “Demir çelik hadde merdanelerinde 210Cr13Ni7MoW çeliğinin kullanılabilirliğinin araştırılması” isimli bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Doç. Dr. Tanju TEKER (II. Danışman)

İmza :

Üye: Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Savaş DALMIŞ (Danışman)

İmza :

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Sait Özmen ERUSLU

İmza :

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Aytaç MORALAR

İmza :

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Sencer Süreyya KARABEYOĞLU

İmza :

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Prof. Dr. Fatih KONUKCU
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DEMİR ÇELİK HADDE MERDANELERİNDE 210Cr13Ni7MoW ÇELİĞİNİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Rana YILMAZ

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr.Öğr. Üyesi İbrahim Savaş DALMIŞ

Bu çalışmada, GX200Cr13Ni7MoW malzemesi döküm yoluyla üretilmiştir. Malzeme dört farklı sıcaklık ve altı farklı soğutma şiddetine maruz bırakılarak ısıtılarak ısıl işleme tabi tutulmuştur. Isıl işlemin birincil ve ikincil karbür konsantrasyonu, karbür dağılımı, karbür tipi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Aşınma deneyleri neticesinde malzemenin termal şoklara karşı davranışı ile birlikte aşınma direnci belirlenmiş ve en uygun ısıl işlem şartları belirlenmeye çalışılmıştır. Isıl işlem olarak malzemenin homojenleştirme ısıl işlemi sonrası soğutma şiddetinin artırılmasının sertliği düşürdüğü ve soğutma şiddetinin azaltılmasının ise sertliği artırdığı belirlenmiştir. Sertlik artışının sebebinin yapıda martenzitik dönüşümden kaynaklanmadığı, yapıdaki ikincil karbür konsantrasyonu ile ilgili olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: GX200Cr13Ni7MoW, Yüksek kromlu beyaz dökme demir, Isıl işlem, Abrasiv aşınma yöntemi

2018, 79 Sayfa

ABSTRACT

MSc. Thesis

THE INVESTIGATION OF 210Cr13Ni7MoW STEEL USAGE FOR IRON AND STEEL ROLLING MILL ROLLER.

Rana YILMAZ

Namık Kemal University in Tekirdağ
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. I. Savas DALMIS

In this study, GX200Cr13Ni7MoW material was produced by casting. The material was subjected to heat treatment by exposure to four different temperatures and six different cooling intensities. Primary and secondary carbide concentration, carbide distribution, effects on carbide type were investigated by heat treatment. As a result of the wear tests, the wear resistance was determined together with the behavior of the material against the thermal shocks and the optimum heat treatment conditions were tried to be analyzed. It has been observed that increasing the cooling intensity after the homogenization heat treatment of the material as heat treatment reduces the hardness and decreasing the cooling intensity increases the hardness. It has been determined that the cause of the increase in hardness is related to the secondary carbide concentration in the structure, not from the martensitic transformation in the structure.

Keywords: GX200Cr13Ni7MoW, High chromium white cast iron, Heat treatment, Abrasive wear method

2018, 79 Pages

ÖNSÖZ

Tezimin hazırlanması esnasında değerli fikirleri ile beni yönlendiren ve birçok konuda yardımlarını esirgemeyen sayın hocalarım Doç.Dr. Tanju TEKER ve Yrd. Doç Dr. Savaş DALMIŞ'a, bana destek veren bölümümüz öğretim üyelerine ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Eylül, 2018

Rana YILMAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

| | |
|--|-------------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| ÖNSÖZ | iii |
| İÇİNDEKİLER | iv |
| ÇİZELGE DİZİNİ | vii |
| ŞEKİL DİZİNİ | viii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Dökme Demirler | 1 |
| 1.1.1. Dökme demirlerin sınıflandırılması | 2 |
| 1.1.1.1 Beyaz dökme demir | 3 |
| 1.1.1.2. Gri dökme demir..... | 3 |
| 1.1.1.3. Temper dökme demir..... | 3 |
| 1.1.1.4. Küre grafitli dökme demir (KGDD)..... | 3 |
| 1.1.1.5. Yüksek alaşımlı dökme demirler | 3 |
| 1.1.1.6. Yüksek kromlu beyaz dökme demirler..... | 4 |
| 1.1.1.6.1.Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin özellikleri | 4 |
| 1.1.1.6.2. Mikroyapı | 6 |
| 1.1.1.6.3. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin uygulama alanları..... | 11 |
| 1.2. Alaşım Elementlerinin Özelliklere Etkisi | 11 |
| 1.2.1. Karbon | 12 |
| 1.2.2. Krom..... | 13 |
| 1.2.3. Molibden..... | 14 |
| 1.2.4. Silisyum | 15 |
| 1.2.5. Bakır | 16 |
| 1.2.6. Fosfor..... | 16 |
| 1.2.7. Kükürt..... | 16 |
| 1.2.8. Mangan | 16 |
| 1.2.9. Nikel | 16 |

| | |
|--|-----------|
| 1.2.10. Bor | 16 |
| 1.2.11. Niyobyum | 17 |
| 1.2.12. Vanadyum..... | 17 |
| 1.2.13. Titanyum..... | 17 |
| 1.2.14. Nadir toprak elementleri..... | 19 |
| 1.3. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerde Katılışma ve Isıl İşlem | 20 |
| 1.3.1. Ergitme ve döküm | 20 |
| 1.3.2. Fe – C – Cr Sistemi | 21 |
| 1.3.3. Fe-C-Cr Sistemi katı durum denge diyagramı..... | 22 |
| 1.3.4. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerinin katılışma yapısı..... | 24 |
| 1.3.5. M_7C_3 Karbürlerinin özellikleri | 25 |
| 1.3.6. M_3C Karbürlerinin özellikleri..... | 28 |
| 1.3.7. M_2C (Mo_2C) Karbürlerinin özellikleri | 28 |
| 1.3.8. MC Karbürlerinin özellikleri | 29 |
| 1.3.9. Fe – C – Cr Alaşımlarının döküm matris yapısı..... | 30 |
| 1.3.9.1. Fe – C – Cr Alaşımlarının katı hal reaksiyonları..... | 31 |
| 1.3.9.2. M_7C_3 – Östenit ötektiğinin oluşumu | 32 |
| 1.3.9.3. İkincil M_7C_3 karbürlerini oluşumu | 33 |
| 1.3.10. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin ısıl işlemi..... | 33 |
| 1.3.10.1. Su verme sıcaklığı | 34 |
| 1.3.10.2. Martenzit dönüşümü | 36 |
| 1.3.10.3. Tavlama ve temperleme..... | 37 |
| 1.4. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Aşınma Direnci..... | 39 |
| 1.4.1. Abrasiv aşınmanın tanımı..... | 39 |
| 1.4.2. Aşınma deneyleri ve ölçüm yöntemleri..... | 40 |
| 1.4.3. Beyaz dökme demirlerde aşınma..... | 41 |
| 1.4.4. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde abrasiv aşınmayı etkileyen faktörler | 43 |
| 1.4.4.1. Karbür yapısının abrasiv aşınmaya etkisi..... | 43 |
| 1.4.4.2. Matris yapısının abrasiv aşınmaya etkisi..... | 43 |
| 1.5. Yüksek Kromlu Dökme Demirlerde Darbe Direnci..... | 44 |
| 2. LİTERATÜR TARAMASI | 46 |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM..... | 49 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1. Materyal..... | 49 |
| 3.1.1. Deneyleerde kullanılan malzemeler | 49 |
| 3.1.2. Abresife aşınma test makinesi | 49 |
| 3.1.3. Isıl işlem fırını | 50 |
| 3.2. Yöntem | 51 |
| 3.2.1. Isıl işlemler | 51 |
| 3.2.2. Metalografik çalışmalar | 51 |
| 3.2.3. Sertlik deneyleri..... | 51 |
| 3.2.4. Aşınma deneyleri..... | 52 |
| 4. BULGULAR ve TARTIŞMA | 53 |
| 4.1. Metalografi Sonuçları | 53 |
| 4.2. Sertlik Deney Sonuçları..... | 67 |
| 4.3. Aşınma Deneyi Sonuçları | 69 |
| 5. SONUÇ ve ÖNERİLER..... | 74 |
| 6. KAYNAKLAR..... | 75 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 79 |

ÇİZELGE DİZİNİ

| | Sayfa No |
|--|-----------------|
| Çizelge 1. 1. Aşınmaya dirençli yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin bileşimleri..... | 2 |
| Çizelge 1. 2. Aşınmaya dirençli yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin bileşimleri..... | 4 |
| Çizelge 1. 3. 25–32 mm kesitli yüksek krom–molibdenli beyaz dökme demirlerin mekanik özellikleri | 5 |
| Çizelge 1.4. Yüksek kromlu beyaz dökme demir mikroyapısında bulunan karbürlerin sertlikleri | 6 |
| Çizelge 1. 5. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde matris yapısının aşınma kaybına etkisi | 9 |
| Çizelge 1. 6. Ticari amaçla geliştirilen yüksek krom–molibdenli beyaz dökme demirlerin bileşimleri | 20 |
| Çizelge 1. 7. Yüksek krom molibdenli beyaz dökme demirlerin ısıtma şartları | 38 |
| Çizelge 1. 8. Çeşitli malzemelerin öğütme ve oyuklayıcı aşınma altındaki performansı | 41 |
| Çizelge 3. 1. Numunelerin kimyasal kompozisyonları..... | 49 |
| Çizelge 3. 2. Numunelere uygulanan ısıtma işlemleri..... | 51 |
| Çizelge 4. 1. Kriyojenik ortamda soğutulan numunede EDS analiz değişimi | 61 |
| Çizelge 4. 2. Havada soğutulan numunenin EDS analizi | 62 |

ŞEKİL DİZİNİ

Sayfa No

| | |
|--|----|
| Şekil 1. 1. Demir alaşımlarında yaklaşık demir ve silisyum içerik aralıkları | 2 |
| Şekil 1. 2. Karbür hacim oranının (CVF) artışı ile sertliğin arasındaki ilişki | 7 |
| Şekil 1. 3. Karbür oranının abrasiv aşınma kaybına etkisi (Laird ve ark. 2000)..... | 7 |
| Şekil 1. 4. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde krom ve karbon oranı arasındaki ilişki ... | 8 |
| Şekil 1. 5. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde (a). Östenit ve (b). Martenzit, matrislerine ait mikroyapı fotoğrafları | 8 |
| Şekil 1. 6. Yüksek krom – molibdenli beyaz dökme demirlerde matris mikrosertliğinin (HV- 50) aşınma direncine etkisi | 9 |
| Şekil 1. 7. Yüksek kromlu dökme demirlerde karışık matris yapıları. (γ) östenit, (α') martenzit, (α) pelit, (c) karbür | 10 |
| Şekil 1. 8. Grafit ve karbür ötektik sıcaklığı üzerine alaşım elementlerinin etkisi | 12 |
| Şekil 1. 9. Grafit ve karbür ötektik sıcaklıkları arasındaki temperleme aralığı | 12 |
| Şekil 1. 10. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbonun aşınma direncine etkisi | 13 |
| Şekil 1. 11. Farklı bileşimlerdeki krom karbürlerin mikroyapı fotoğrafları. (a). M23C6 ve (b). M7C3 | 13 |
| Şekil 1. 12. Sertlik ölçümünün yeri ve Cr miktarına bağlı olarak sertlikteki değişim | 14 |
| Şekil 1. 13. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde Molibdenin aşınma direncine etkisi | 15 |
| Şekil 1. 14. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde silisyumun aşınma direncine etkisi | 15 |
| Şekil 1. 15. Östenit matris içerisindeki TiC' ün farklı büyütmelerdeki resimleri | 18 |
| Şekil 1. 16. TiC' lerin bir araya toplanması sonucu karbür şeklinin değişimi. (a) % 1.68 Ti ve (b) %2.02 Ti | 18 |
| Şekil 1. 17. Farklı oranlardaki Ti' un mikroyapıya etkisi | 19 |
| Şekil 1. 18. % 12 – 16 Cr, % 19 – 21 Cr içeren beyaz dökme demirlerin likidüs sıcaklıklarının karbon içeriğine göre değişimi..... | 21 |
| Şekil 1. 19. Fe-C-Cr sisteminin Fe-C-Cr 1000 oC' deki katı durum izotermi | 22 |
| Şekil 1. 20. Fe-C-Cr sisteminin 870 oC deki katı durum izotermi..... | 23 |
| Şekil 1. 21. Fe-C-Cr sisteminin 700 oC deki katı durum izotermi..... | 24 |
| Şekil 1. 22. Ötektik karbürün mikroyapı fotoğrafı | 25 |
| Şekil 1. 23. M7C3 karbürlerinin çubuğa benzer (a) ve bıçağa benzer (b) mikro yapı fotoğrafları | 26 |

| | |
|---|----|
| Şekil 1. 24. M7C3 Karbürünün tahmin edilen Cr içeriği ve Fe' in Cr/C oranı arasındaki ilişki | 26 |
| Şekil 1. 25. (a) M7C3 karbürünün ötektik altı, (b) ötektik ve (c) ötektik üstü yapılarındaki resimleri | 27 |
| Şekil 1. 26. M3C karbürünün; ötektik altı (a), ötektik (b) ve ötektik üstü (c) ait mikro yapı fotoğrafları ve M3C ötektiğinin büyütülmüş yapısı (d)..... | 28 |
| Şekil 1. 27. M2C karbürünün mikroyapı fotoğrafı ve EDS ile alınan analizi | 29 |
| Şekil 1. 28. Östenitik matris içerisinde TiC' ün mikroyapı fotoğrafı ve EDS analizi | 30 |
| Şekil 1. 29. Fe-C-Cr alaşımlarının ZSD diyagramı a) döküm durumu, b) yeniden östenitleme işleminde sonraki durum..... | 32 |
| Şekil 1. 30. Fe – C – Cr alaşımlarında östenitleme sıcaklığına bağlı olarak sertlik (HV) ve kalıntı östenit (γ) oranının değişimi | 34 |
| Şekil 1. 31. Çeşitli kesitlerdeki yüksek kromlu demirlerde havada su vermeden sonra matris yapısına ve sertlik üzerine karbon ve molibden içeriğinin etkisi..... | 35 |
| Şekil 1. 32. Homojenleştirme ısı işleminin süresinin etkisi ve oda sıcaklığına soğuma üzerinde kalıntı östenit miktarında başlangıç matris yapısı..... | 36 |
| Şekil 1. 33. Karbür çökelme oranı- M_s -Sertlik ilişkileri | 37 |
| Şekil 1. 34. Yüksek kromlu beyaz dökme demir sertlik (HV30)-temperleme sıcaklık eğrileri | 38 |
| Şekil 1. 35. Abrasiv aşınma test yöntemleri | 40 |
| Şekil 1. 36. Bazı karbürlerin sertlik ve kırılma toklukları arasındaki ilişki..... | 45 |
| Şekil 4. 1. N1 numunesi a) optik20x50, b) SEMgörüntüsü..... | 53 |
| Şekil 4. 2. N2 numunesinin a) optik 20X50, b) SEM görüntüsü..... | 55 |
| Şekil 4. 3. N3 numunesi a) optik 20X50, b) SEM görüntüsü..... | 55 |
| Şekil 4. 4. XRD diyagramı a) döküm sonrası, b) ısı işlem sonrası..... | 56 |
| Şekil 4. 5. Isıl işlemin kalıntı östenit üzerindeki etkisi, a), 900 °C azot soğutma, b) 900 °C hava soğutma, c) 900 °C su soğutma, d) 900 °C yağ soğutma, e) 900 °C tuz soğutma (550 °C), f) ısıl işlemsiz..... | 57 |
| Şekil 4. 6. Kriyojenik olarak soğutulan numunenin SEM görüntüsü ve bu görüntüdeki farklı bölgelerden alınan EDS analizleri | 60 |
| Şekil 4. 7. Havada soğutulan numunenin SEM görüntüsü ve farklı noktalardan alınan EDS analizleri..... | 61 |
| Şekil 4. 8. S4 numunesinin optik ve Sem görüntüleri, a) 20x15, b) 50x15, c) SEM | 65 |
| Şekil 4. 9. S5 numunesinin optik ve Sem görüntüleri, a) 20x15, b) 50x15 c) SEM | 65 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4. 10. GX200Cr13Ni6WMoMn ısıtma ortamına bağlı olarak sertlik değişimi | 69 |
| Şekil 4. 11. Isıl işlem sonrası numunelerin aşınma oranları ile yük arasındaki ilişki | 71 |
| Şekil 4. 12. a) Karbür hacimsel oranı ile aşınma oranı arasındaki değişim, b) Primer karbür sertliği ile aşınma oranı arasındaki değişim, c) kırılma tokluğu ile aşınma oranı arasındaki değişim | 72 |

1. GİRİŞ

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler, makul derecede tokluk, mükemmel adhesive ve abrasiv aşınma direnci kombinasyonuna sahiptirler. Bu nedenlerden dolayı birçok uygulama alanlarında artan miktarlarda kullanılmaktadırlar.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler aslında dökme demir gurubunda bulunmakla birlikte takım çeliklerine de yakın özellikler sergilerler. Ancak, kimyasal içerikleri diğer dökme demirlere yakın olsa da mikroyapılarından dolayı dökme demirlerden ayrı bir malzeme grubudur. Yüksek alaşımlı dökme demirlerden yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirler, cevher kırıcıları, öğütücü değirmen balyaları, aşınma plakaları, çeşitli astarlar, tarım alet ve makinaları, pistonlar ve dişlileri, çeşitli konveyörler, greyder bıçakları, çeşitli pompalar, pabuçlar, diskler, tuğla kalıpları, segmanlar ve barların üretiminde kullanılır. Ayrıca, madencilik ve mineral sanayinde kırıcı çekici, hadde merdaneleri, kesici bıçaklar gibi yüksek abrasiv aşınma direnci gerektiren yerlerde de kullanılmaktadırlar (Fernandez ve Belzunce 2008, Sricharoenchai ve ark. 2004). Nikel içerikli yüksek kromlu beyaz dökme demirler ise aşınmanın ve termal proseslerde aşınmanın öne çıktığı durumlarda kullanımları öne çıkmaktadır. Söz konusu alanlarda kullanılan malzemelerin aşınma ömürlerinin kısılması, 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.

1.1. Dökme Demirler

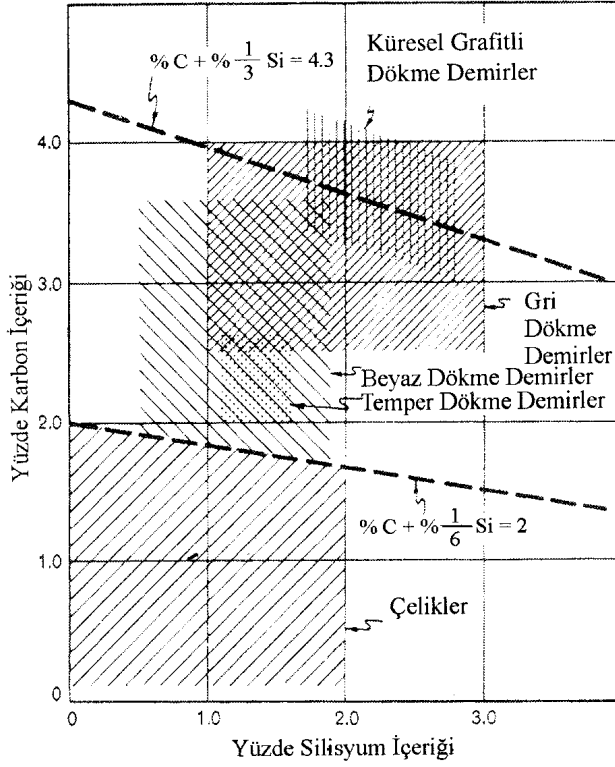
Dökme demirler, demirli bir alaşım olmakla beraber özellikleri çeliğe göre çok farklıdır ve bunların isimleri bu malzemelerin arzulanan fiziksel şekillere, katı durumda şekillendirmeden farklı olarak, dökümle getirilirler. Genellikle % 2'den az karbon içeren çeliklerden farklı olarak dökme demirler yaklaşık olarak % 2 – 4 C ve % 1 – 3 Si içerirler. Belirli özellikleri kontrol etmek ve değiştirmek için diğer metalik ve metalik olmayan alaşım elementleri ilave edilebilir (Erdoğan 2000). Kimyasal bileşim ile birlikte, özellikleri etkileyen diğer önemli faktörler; katılaşma ortamı, katılaşma hızı ve döküm sonrası ısıl işlemlerdir. Dökme demirlerin yaygın olarak kullanılmalarının nedeni, öncelikle olarak düşük maliyetleri ve birçok mühendislik uygulamalarında alternatifsiz olarak kullanılmalarıdır. Yeni malzemelerin güçlü rekabetine rağmen, dökme demirler hala binlerce mühendislik uygulamaları için en uygun ve ekonomik malzeme olarak varlığını sürdürmektedir.

1.1.1. Dökme demirlerin sınıflandırılması

Dört tip dökme demir özellikle mikroyapılarındaki karbonun oranına göre birbirinden ayrılabilir. Kimyasal kompozisyonları çok yakın olduğu için bunlar kimyasal analiz ile birbirinden ayırt edilemezler. Bu temel metalurjik sınıflandırmada, beyaz dökme demir, gri dökme demir, temper dökme demir ve küre grafitli dökme demirden bahsedilebilir. Yüksek alaşımlı dökme demirler, dökme demirlerin beşinci tipini oluşturur. Tipik olarak alaşımlandırılmamış dökme demirlerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 1.1’de, karbon ve silisyum içerik aralıklarının çelikler ile karşılaştırılması ise Şekil 1.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1. 1. Aşınmaya dirençli yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin bileşimleri (Handbook, 1988)

| Element | Gri Dökme Demir % | Beyaz Dökme Demir % | Benekli Dökme Demir % | Sünek 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 – 80 | 0.20 – 1.00 | 0.10 – 1.00 |
| Kükürt | 0.02 – 0.25 | 0.06 – 0.20 | 0.04 – 0.18 | 0.03 max. |
| Fosfor | 0.05 – 1.0 | 0.06 – 0.18 | 0.18 – max. | 0.10 max. |



Şekil 1. 1. Demir alaşımlarında yaklaşık demir ve silisyum içerik aralıkları (Çiğdemoğlu 1968)

1.1.1.1 Beyaz dökme demir

Beyaz dökme demir, dökme demirin kimyasal kompozisyonunu Tablo 2.1’de verilen aralıkta ve soğuma hızı yeterince hızlı ise oluşabilir. Beyaz dökme demir mikroyapısında grafit mevcut değildir. Katılaşma esnasında karbon demir ile birleşerek sert, gevrek bileşik olan demir karbürü (sementit) oluşturur. Beyaz dökme demir bu nedenle sert, kırılğan ve kopma yüzeyi beyaz renklidir. Beyaz dökme demir, yüksek basma ve mükemmel aşınma direncine sahiptir.

1.1.1.2. Gri dökme demir

Dökme demirin kimyasal kompozisyonu, gri dökme demir aralığında ve katılaşma hızı yavaş ise sıvı demirdeki karbon demirden ayrılır veya katılaşma sırasında ayrı grafit lamelleri oluşturmak üzere grafitleşir. Gri dökme demirler, demir alaşımlarının en akışkandır. Bu sebeptendir ki, karmaşık ve ince kesitli parçaları gri dökme demirden üretmek nispeten daha kolaydır. Gri dökme demirler iyi aşınma direnci sağlayan, sertlik alabilen ve mükemmel işlenebilirliğe sahip malzemelerdir. Gri dökme demirin kopma yüzey görünüşü gerçek bir gri renge sahiptir ve bu nedenle adlandırma terimi “gri dökme demir” dir.

1.1.1.3. Temper dökme demir

Bu dökme demir tipinde karbonun çoğu düzensiz şekillerde grafit nodülleri biçimindedir. Temper dökme demir iki aşamada üretilir. İlk dökümü uygun kompozisyonda beyaz dökme demir olarak yapılır. İkinci aşamada genellikle temperleme olarak adlandırılan tavlama işleminde grafitler çekirdeklenir ve nodüller (yumrular) oluşturmak üzere beyaz dökme demir seimentitinden büyür. Temper dökme demirde ısıl işlemi değiştirmekle çok geniş bir aralıkta özellikler elde edilebilir. Buna karşın ilk olarak beyaz dökme demir oluşturmak için hızlı soğutma gerektiğinden temper dökme demirin kalınlığı sınırlıdır.

1.1.1.4. Küre grafitli dökme demir (KGDD)

KGDD (sünek dökme demir) serbest karbonu lamel yerine küre şeklindedir. Bu nedenle bazen ABD’de nodüler dökme demir İngiltere’de ise KGDD olarak adlandırılır. Bu dökme demirlerdeki küre grafit dökümden önce ergiyik demire çok küçük miktarda magnezyum ilavesi ile elde edilir. KGDD’nin kimyasal kompozisyonu gri dökme demire benzer. Ancak, kükürt ve fosfor gibi elementlerin miktarları çok azdır. KGDD’ler uygun sünekliklerinin yanında iyi bir akma dayanımı aralığına sahiptir ve temper dökme demirin aksine ince ve kalın kesitli büyük bir aralıkla dökülebilirler.

1.1.1.5. Yüksek alaşımlı dökme demirler

Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirler, yüksek oranda alaşımlandırılmış KGDD ve gri dökme demirleri kapsar. Alaşımlı dökme demirler, ayrı bir sınıf olarak ayrıca

gruplandırılmıştır. Çünkü; bunların aşınma, ısı ve korozyon dirençleri gibi belirli özellikleri alışsız ve az alışımlı diğer dökme demirlerden oldukça farklıdır. Alışımlı dökme demirler genellikle kimyasal kompozisyonlarıyla tanımlanırlar ancak bu tanımlamalar mekanik özellikleri de içerebilir.

1.1.1.6. Yüksek kromlu beyaz dökme demirler

Yüksek oranda krom veya krom-molibden içeren beyaz dökme demirler çamur pompalarında, tuğla kalıplarında, çeşitli mineral delme, tesviye, işleme millerinde, sert kayaların işlenmesi için gerekli ekipmanlarda vb. gibi alanlarda kullanılmaktadır. Çizelge 1.2’de aşınmaya dirençli yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin bileşimleri verilmiştir.

Çizelge 1. 2. Aşınmaya dirençli yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin bileşimleri (Handbook, 1988)

| Sınıf | Tip | Sembol | Kimyasal Bileşim, ağırlık % | | | | | |
|-------|-----|---------------|-----------------------------|-----------|----------|----------|-----------|---------------|
| | | | C | Mn | Si | Ni | Cr | Mo |
| I | A | Ni-Cr-HC | 3,0-3,6 | 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 | 1,40-4,0 | 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 | 2,50-3,60 | 1,30 max | 1,0-2,20 | 5,0-7,0 | 7,0-11,0 | 1,0 max (b) |
| II | A | % 12 Cr | 2,8 | 0,50-1,50 | 1,0 max | 0,50 max | 11,0-14,0 | 0,50-1,0 (c) |
| II | B | % 15 Cr-Mo-LC | 2,40-2,80 | 0,50-1,50 | 1,0 max | 0,50 max | 14,0-18,0 | 1,0-3,0 (c) |
| II | C | % 15 Cr-Mo-HC | 2,80-3,60 | 0,50-1,50 | 1,0 max | 0,50 max | 14,0-18,0 | 2,30-3,50 (c) |
| II | D | % 20 Cr-Mo-LC | 2,0-2,60 | 0,50-1,50 | 1,0 max | 1,50 max | 18,0-23,0 | 1,50 max (c) |
| II | E | % 20 Cr-Mo-HC | 2,60-3,20 | 0,50-1,50 | 1,0 max | 1,50 max | 18,0-23,0 | 1,0-2,0 (c) |
| III | A | % 25 Cr | 2,30-3,0 | 0,50-1,50 | 1,0 max | 1,50 max | 23,0-28,0 | 1,50 max (c) |

(a): Max. % 0.30 P, % 0.15 S

(b): Max. % 0.10 P, % 0.06 S, % 1.2 Cu

(c): Max. % 0.10 P, % 0.06 S, % 1.2 Cu

LC: Düşük karbonlu

HiCr: Yüksek kromlu

HC: Yüksek karbonlu

1.1.1.6.1. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin özellikleri

Fiziksel özellikler

Yüksek karbon miktarı nedeniyle yoğunlukları azalan beyaz dökme demirlerin, yapısında kalıntı ostenit artarsa, özgül ağırlık da artar. Genellikle özgül ağırlık 7.5–7.8 g/cm³’tür. Isıl genişleme katsayıları 20–425 °C aralığı için 13,5–18 µm/m.°C seviyesindedir. Elektrik direnci 0.5 µΩm, ısı iletkenlikleri ise 22 w/m°K civarındadır (Fairhurst ve Röhring 1974).

Mekanik özellikler

Çizelge 1.3’de 25 – 32 mm kesitli yüksek krom – molibdenli beyaz dökme demirlerin çeşitli mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1. 3. 25–32 mm kesitli yüksek krom–molibdenli beyaz dökme demirlerin mekanik özellikleri (Fairhurst ve Röhring 1974)

| Koşullar (Matris) | Tür | % C | Sertlik | | | Çekme Özellikleri | | Basma Özellikleri | | Isıl. Gen Katsayısı | |
|---|--------|------|---------|---------|------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------|-----------|
| | | | HB | DP H | HRC | Muk. (N/mm ²) | Modül (N/mm ²) | Muk. (N/mm ²) | Modül (N/mm ²) | 20-90 °C | 20-425 °C |
| Su Verilmiş ve Temper. (M,O) (M,O) | 15-3LC | 2,51 | 716 | 782 | 61,7 | 100 | 25,9 | 305 | 183 | 12,7 | 14,9 |
| | 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 % 66 (M+O), % 34P % 71 (M+O), % 29P % 96 O % 4 P M+O | 15-3LC | 2,51 | 426 | 497 | 47,1 | 61,5 | 22,0 | 203 | 75 | 14,4 | 17,9 |
| | 15-3HC | 3,6 | - | - | - | 50,8 | 23,4 | 164 | 68,9 | - | - |
| | 15-3HC | 3,6 | 564 | 681 | 56,4 | 58 | 23 | 232 | 131 | 10,5 | 13,6 |
| | 15-2-1 | 3,32 | 444 | 508 | 46,3 | 45,6 | 22,5 | 183 | 70 | 13,4 | 17,6 |
| | 20-2-1 | 2,89 | 451 | 530 | - | 54,5 | 23,8 | 197 | 83,4 | - | - |
| Fırında Soğut. (P) | 15-3HC | 3,6 | 411 | 455 | 41,8 | 69 | 24,3 | 158 | 48,2 | 11,1 | 13,6 |

M: Martenzit, O: Ostenit, P: Perlit

Çizelge 1.3’deki belirtilen mekanik özellikler, çeşitli ısıl ve mekanik işlemler sırasında oluşabilen hasarlar sebebiyle geniş sapmalar gösterebilir. Bununla beraber bu değerler uygulamalarda karşılaşılan verilerle uygunluk göstermektedir. Genellikle 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 basit olmasına rağmen, numunelerden elde edilecek sonuç ile gerçek döküm sonuçları arasında büyük farklılıklar oluşabilir. Ayrıca, mikro yapı üzerinde katkı elementlerinin etkileri ve katkılı numuneler üzerine termal ortamın etkileri ve mikroyapı gibi mekanik özelliklerdeki değişimleri hala detaylı olarak bilinmemektedir. Sonuç olarak, bu tür malzemelerin kalite kontrollerinde uygulamada sertlik testi dışındaki diğer mekanik testler aktif olarak kullanılmamaktadır.

Manyetik özellikler

Ticari amaçla geliştirilen beyaz dökme demirlerden (15–2–1) ve (20–2–1) sınıflarında üretilen yüksek kromlu beyaz dökme demirler genellikle kalıpta soğuduktan sonra östenitik yapıdadırlar ve manyetik değildirler. Soğutma sırasında perlit veya martenzit dönüşümünden

dolayı gerilme birikiminden kaçınıldığı için; bu tamamen östenitik durum, karmaşık şekilli dökümlerde avantaj sağlamaktadır. Diğer tanımlı beyaz dökme demirler martenzitik mikroyapıda ve manyetiklerdir. Manyetik olma özelliği kalıntı ostenitin bir fonksiyonudur ve kalıntı ostenit arttıkça manyetiklik azalmaktadır (Fairhurst ve Röhring 1974).

1.1.1.6.2. Mikroyapı

Beyaz dökme demirlerde görülen yüksek abrasiv aşınma direnci mikroyapının bir sonucu olarak gerçekleşir. Mikroskobik ölçekte birçok abrasiv aşınma esnasında, aşındırıcı tanelerin, aşınan malzemenin yüzeyine dalması, deformasyon ve aşınma çizikleri oluşturması ve yüzeyden parçalar kopararak gerçekleşmesi ile sonuçlanır. Bunun kesme veya oyma gibi bir mekanik işlem prosesine benzediği ve aşınma parçacıklarının talaşlı işleme talaşlarına benzediği görülür. Bu mekanizmanın gerçekleşebilmesi için aşındırıcı taneciklerin metalden sert olması gerekir. Aşındırıcı partikül metalden yumuşaksa; proses, korozyon veya oksidasyona benzer ve sadece önemsiz bir miktarda aşınma oluşur. Çoğu aşındırıcı minerallerde ana bileşen olan kuvarsın bütün demir esaslı alaşımların matris yapılarından daha sert olduğunu ve bunları kolayca aşındırabileceği bilinmektedir.

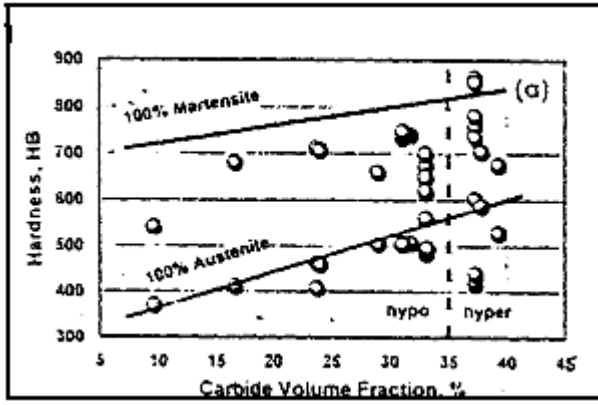
Karbürler

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler, mikroyapıda bulunan M_7C_3 krom karbürlerin etkisiyle, mikroyapısında sementit içeren dökme demirlerden daha serttir ve aşınmaya daha dirençlidir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde mikroyapıda süreksiz primer ötektik karbürler ve ikincil karbürler olmak üzere iki çeşit karbür bulunmaktadır. Çizelge 1.4'de mikro yapıda bulanabilen karbürlerin sertlikleri verilmektedir, karbürlerin sertlikleri bileşime göre değişmektedir.

Çizelge 1.4. Yüksek kromlu beyaz dökme demir mikroyapısında bulunan karbürlerin sertlikleri (Minkoff 1983)

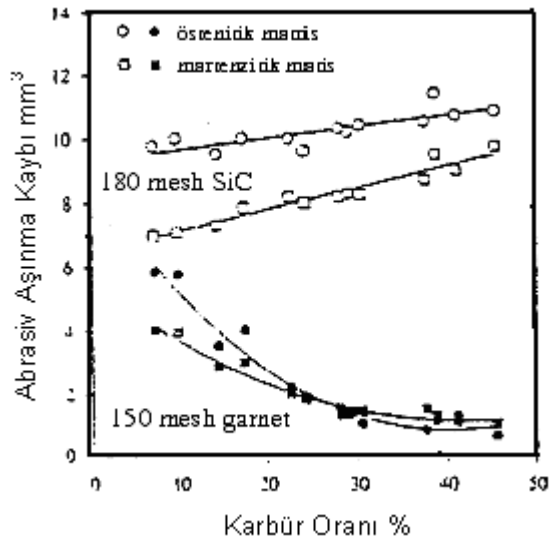
| Karbür Tipi | Sertlik (HV) |
|-------------|--------------|
| M_3C | 840-1100 |
| M_7C_3 | 1200-1800 |
| M_2C | 1500 |

Karbürler mikroyapıda hacimce % 40 – 50 oranında bulunabilir. Bunun dışında kalan kısım matris olarak tanımlanır. Karbür oranı ile sertlik arasında doğru orantılı bir ilişki mevcuttur (Laird ve ark. 2000). Şekil 1.2.'de karbür hacim miktarındaki artış ile yüzey sertliğinin arttığı görülmektedir.



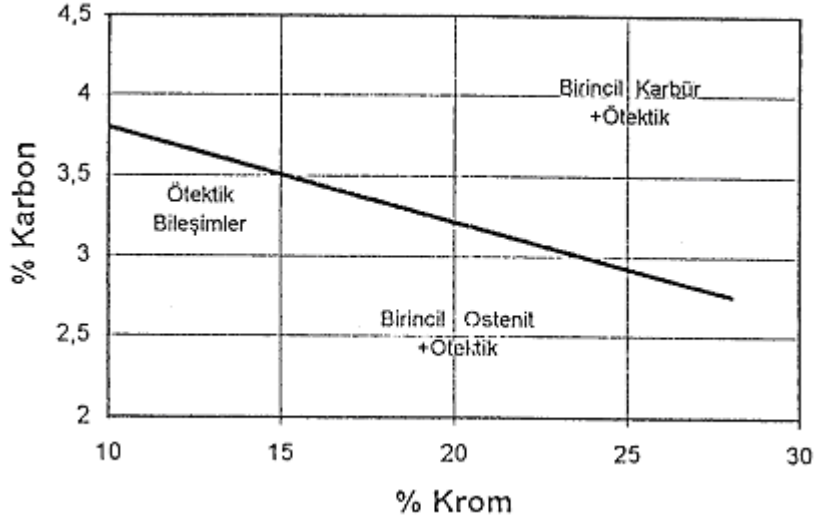
Şekil 1. 2. Karbür hacim oranının (CVF) artışı ile sertliğin arasındaki ilişki (Laird ve ark. 2000)

Karbür oranı azaldıkça ağırlık kaybı artar, ancak; aşındırıcı parçacıkların büyüklüğü ile matrisin yapısı aşınma oranı üzerinde çok önemli rol oynarlar (Laird ve ark. 2000). Şekil 1.3'de karbür oranının abrasiv aşınma kaybına etkisi görülmektedir.



Şekil 1. 3. Karbür oranının abrasiv aşınma kaybına etkisi (Laird ve ark. 2000)

Karbon miktarının artışı ile mikroyapıda bulunan karbür miktarı artar. Ötektik karbon miktarı aşındığında çok kaba birincil karbürler oluşur (Şekil 1.4.) (Metals Handbook, 1988).

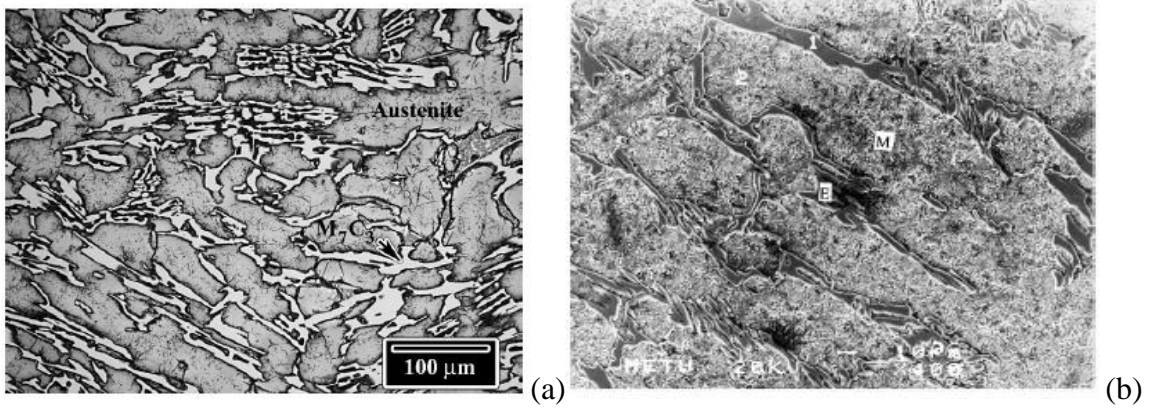


Şekil 1. 4. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde krom ve karbon oranı arasındaki ilişki (Fairhurst ve Röhring 1974)

Mikroyapıda oluşan birincil karbürler gevrek yapıya sahiptir ve abrasiv partiküllerin etkisi altında kırılmaya eğilimlidir. Bu nedenle ötektik karbon içeriği temel uygulamalar için izin verilebilen maksimum orandır. Ötektik karbon miktarı % 15 kromda % 3,6, % 20 kromda % 3,2, % 25 kromda % 3 civarındadır. Diğer elementler bu miktarı değiştirirler. Özellikle silisyum bu miktarı azaltır.

Ana malzeme (matris)

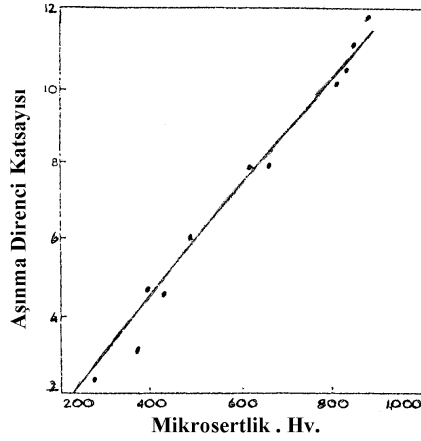
Aşınma direnci ve tokluğun yüksek olabilmesi için beyaz dökme demirin mikro yapısında uygun karbür ve matrisin bulunması gereklidir. Matris için yapılabilecek optimum seçim ikincil karbürlerde sertleştirilmiş yüksek karbonlu sert martenzittir. Diğer bir alternatif ise ısıl işlemlerle sertleştirilebilen kararsız östenittir (Laird 1988, Mutlu 2012, Şahin 2001). Şekil 1.5'de martenzit ve östenit matrisli mikroyapı fotoğrafları verilmektedir.



Şekil 1. 5. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde (a). Östenit (Bedolla-Jacuinde ve ark. 2005) ve (b). Martenzit (İzciler ve Çelik 2000), matrislerine ait mikroyapı fotoğrafları

Karbon artışı ile birlikte martenzitin aşınma direnci artar. Isıl işlem sonucu martenzitik matrisle 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 aşınır ve karbürler matristen kopar. Bu durumda karbürlerin aşınma dirençlerinin yalnızca bir kısmından yararlanılabilmüş olunur. Şekil 1.6' da sertlik ile aşınma direnci arasındaki ilişki ve matrisin önemi görülebilmektedir. Matris yumuşak olursa karbürlerin kırılma eğilimi yüksek ve aşınma direnci daha düşük olur. Matris yumuşadıkça akma noktası düşmektedir. Yumuşak matris, sürtünme sırasında oluşan mekanik gerilmelere karşı karbürlere gerekli desteği sağlayamaz. Sonuçta karbürler kırılır. Bu nedenle mikroyapıdaki perlit varlığı da önemlidir. Beyaz dökme demirlerde mikroyapıda bulunan perlit miktarı % 10'u aştığı zaman aşınma direnci düşmektedir.



Şekil 1. 6. Yüksek krom – molibdenli beyaz dökme demirlerde matris mikrosertliğinin (HV-50) aşınma direncine etkisi (Handbook, 1988, Fairhurst ve Röhring 1974)

Östenitik yapıdaki yüksek krom – molibdenli beyaz dökme demirler % 12 Mn içeren Hadfield çeliği gibi aşınma esnasında oluşan gerilmelerin etkisiyle deformasyon sertleşmesine uğrayabilir. Ancak mekanik gerilmelerle sertleşebilen östenitik matrisin, martenzitik matris kadar aşınmaya dirençli olmadığı Çizelge 1.5'de görülebilir.

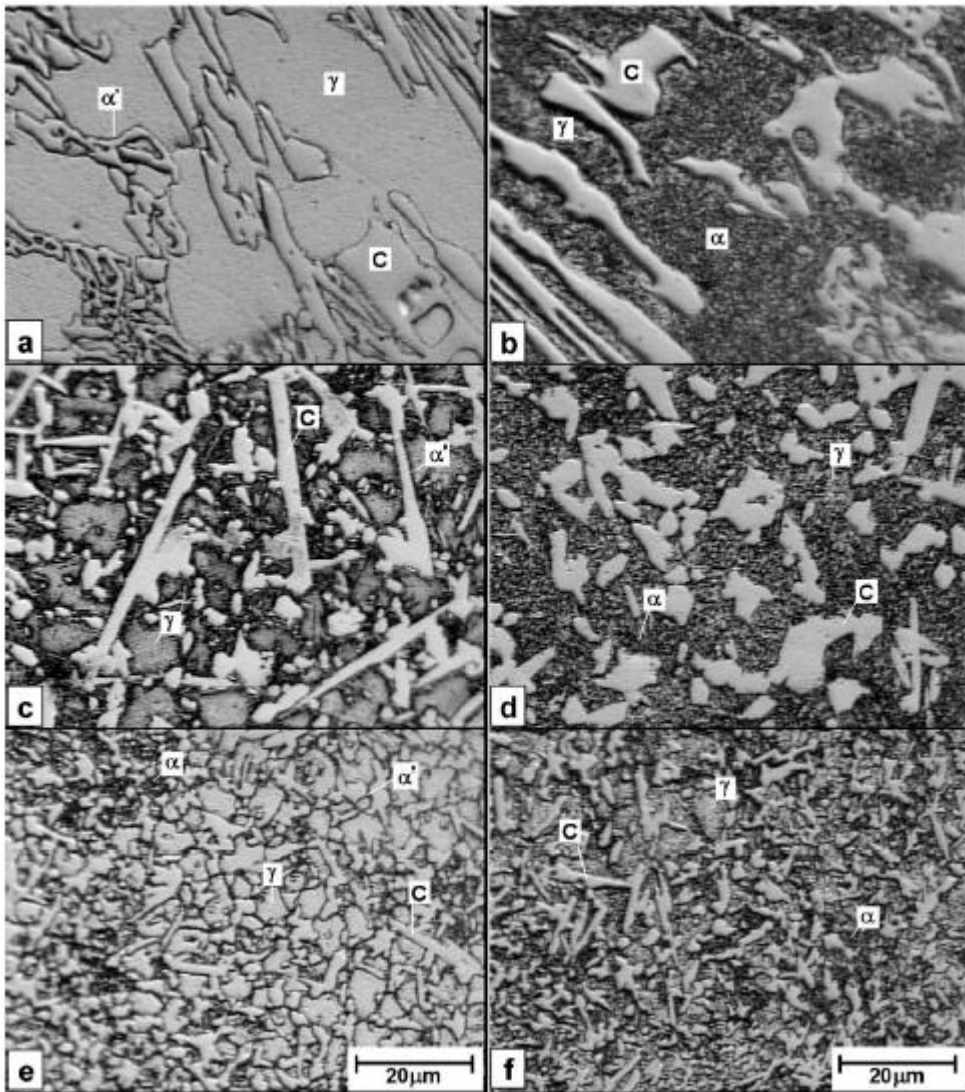
Çizelge 1. 5. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde matris yapısının aşınma kaybına etkisi (Fairhurst ve Röhring 1974)

| Matris | Oyma Aşınması Oranı | Öğütme Aşınması Kaybı (gm) | BHN |
|-----------|---------------------|----------------------------|-----|
| Perlit | 0,41 | 0,14 | 406 |
| Östenit | 0,09 | 0,08 | 564 |
| Martenzit | 0,04 | 0,04 | 840 |

Mekanik gerilmeler etkisiyle martenzitik dönüşüme uğrayan ostenitik veya kısmi ostenitik matrisin bir dezavantajı sıcaklıktaki bir artışla matrisin tekrar kararsız hale gelmesidir. Bu faz dönüşümleri sonucu oluşan hacim değişikliği dökümün kırılmasına veya yüzeyde mikro çatlaklar oluşmasına yol açar.

Farklı araştırmacılar ostenitik matrise sahip yüksek kromlu beyaz dökme demirin aşınma sırasında oluşan deformasyon sertleşmesi nedeniyle martenzitik matrise sahip beyaz dökme demirden daha iyi aşınma direncine sahip olduğunu iddia etmişlerdir.

Uygulanan ısıl işlemlerin farklılığı, ısıl işlem sonrası farklı kesitlerdeki soğuma hızları ve alaşım elementlerinin etkisi, yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin matris yapısına etki ederek karışık matris yapılarını ortaya çıkarmaktadır (Şekil 1.7).



Şekil 1. 7. Yüksek kromlu dökme demirlerde karışık matris yapıları. (γ) östenit, (α') martenzit, (α) pelit, (c) karbür (Kasama ve ark. 2004)

1.1.1.6.3. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin uygulama alanları

Yüksek krom – molibden içeren beyaz dökme demirlerdeki üstün aşınma direnci ve tokluk, bu malzemelerin aşınmaya maruz birçok uygulamada kullanılmasının nedenidir. En başarılı uygulamalardan biri darbe çubukları ve darbeli kırıcıların dövücü bloklarıdır.

Yüksek krom – molibdenli 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 martenzitik yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde elde edilmektedir.

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 alaşımla çeliklerin yerini birçok alanda devralmıştır.

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.

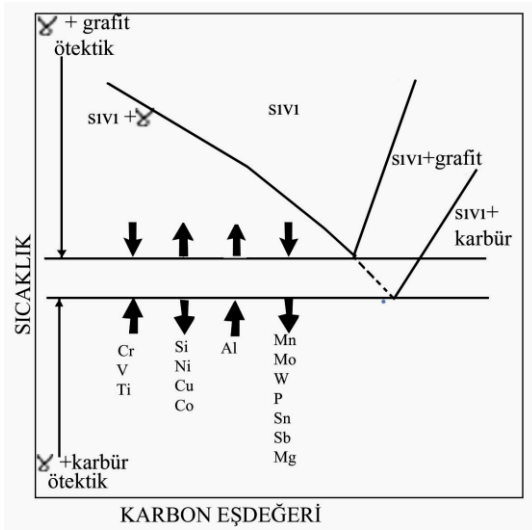
Maden ve mineral endüstrisi dışında yüksek krom molibdenli beyaz dökme demirler, merdaneli değirmenlerde önemli bir uygulama alanı bulmuştur. Şeritli değirmenler için işlem merdanelerinde, profil, çubuk ve tel üretiminde yüksek krom – molibdenli beyaz dökme demirler artan oranda kullanılmakta ve konvansiyonel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

1.2. Alaşım Elementlerinin Özelliklere Etkisi

Birçok dökme demir tipinde alaşım elementlerinin (karbon ve silisyum da dahil) birbirlerinden etkilenmelerinden dolayı dökme demirlerin özelliklerine etkileri büyüktür. Alaşım elementleri grafitin ve karbürlerin şekil ve miktarını etkiler.

Mesela; çil derinliği ve dökme demirin beyazlaşma eğilimi büyük oranda karbon eşdeğeri ve karbon – silisyum oranına bağlı olarak değişir. Mn, Cr, Mo, Ni, V vb. alaşım elementleri ise temel eğilimi yönlendirmek için ilave edilmektedir (Şekil 1.8) (Handbook 1988, Kazdal 2011). Beyaz dökme demirlerde optimum kimyasal bileşim ayarlaması; malzemedeki beklenen hizmet özellikleri dikkate alınarak, maliyet, ısıl işlem, parça boyutu ve kompleksliği gibi üretim parametrelerine göre yapılır. Beyaz dökme demirlerde istenen mikro

yapı ve aşınma direncini sağlayabilmek için C, Mn, Si, Cr, Mo, Ni, V vb. alaşım elementleri uygun kombinasyonlar şeklinde ilave edilirler.

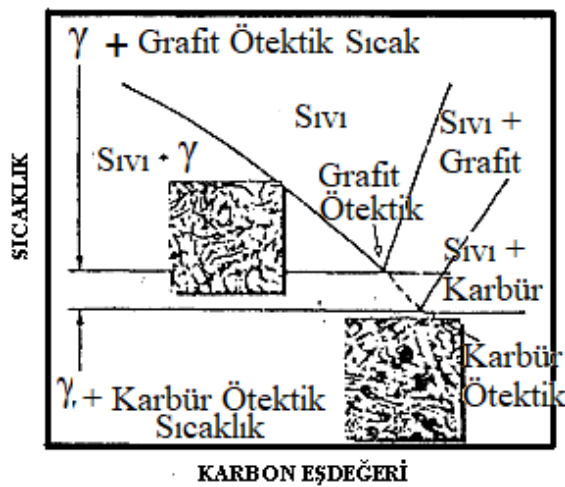


Şekil 1. 8. Grafit ve karbür ötektik sıcaklığı üzerine alaşım elementlerinin etkisi (Laird ve ark. 2000)

Cr, V ve Ti' un miktarındaki artış ile karbür ötektiği yukarı, grafit ötektiği aşağı doğru hareket eder. Neticede Cr, V ve Ti alaşım elementlerinin eklenmesi, karbür oluşumunu tetikler ve grafit oluşumunu engellemede mükemmel bir yoldur.

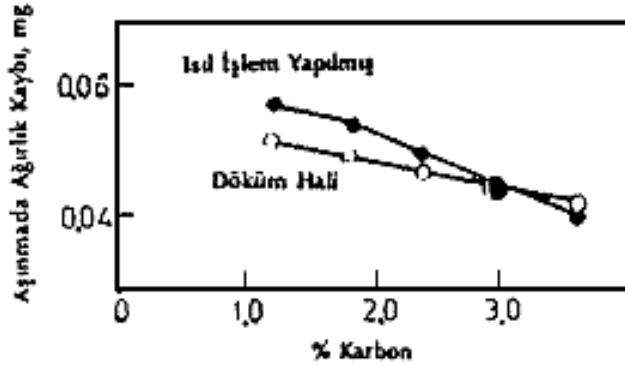
1.2.1. Karbon

Karbon, karbür oluşturması ile beyaz dökme demirin sertliğini artırır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbür oluşumu en önemli etkendir (Şekil 1.9). Karbon içeriği %15Cr için % 2.2 – 3.5, %27Cr için % 2.2 – 2.7 civarındadır.



Şekil 1. 9. Grafit ve karbür ötektik sıcaklıkları arasındaki temperleme aralığı (Laird ve ark. 2000)

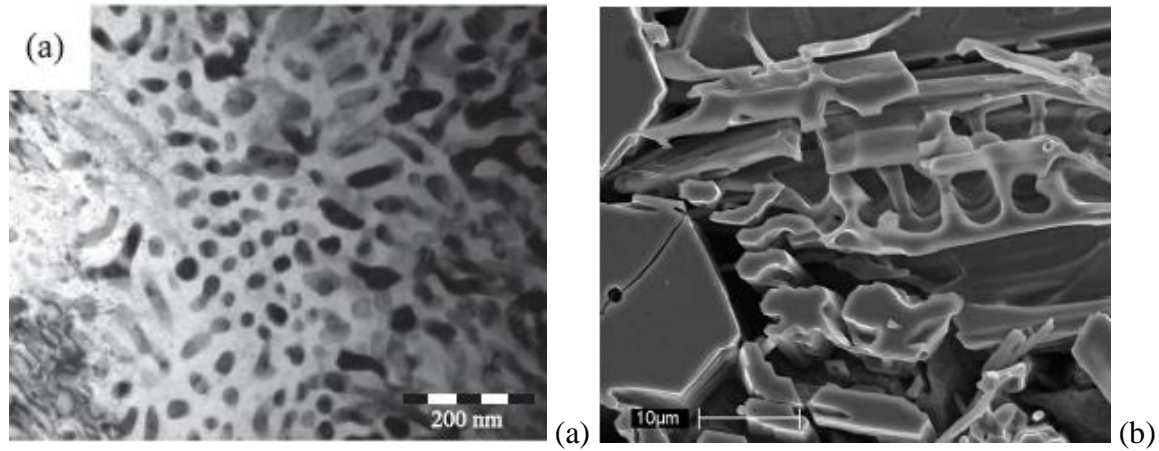
Beyaz dökme demirde, karbon artışı kırılabilirliği artırır ve özellikle mukavemeti düşürür. Diğer alaşım elementlerini sabit kaldığı düşünülürse, karbon artışı sertliği arttırdığı için aşınma direncinin de arttırmaktadır (Şekil 1.10).



Şekil 1. 10. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbonun aşınma direncine etkisi (Akdemir 1994)

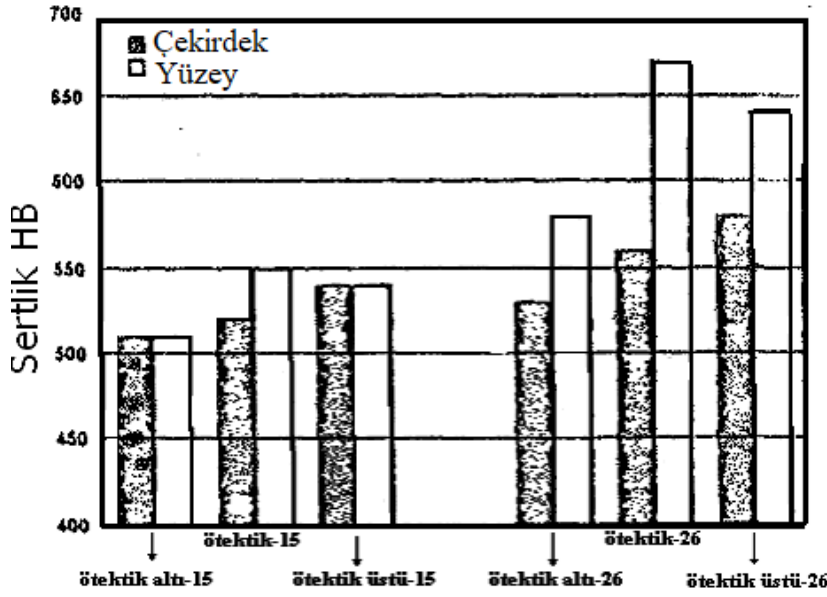
1.2.2. Krom

Aşınmaya dirençli yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde krom; kararlı karbür yapısı oluşturup, sertlik ve aşınma direncinin artırılması için kullanılır (Şekil 1.11).



Şekil 1. 11. Farklı bileşimlerdeki krom karbürlerin mikroyapı fotoğrafları. (a). $M_{23}C_6$ ve (b). M_7C_3 (Radzikowska 2005)

Beyaz dökme demirde krom miktarı % 10'u geçtiği zaman M_7C_3 tipi ötektik karbürler oluşur. Krom içeriği % 10'dan daha az olan alaşımlarda M_3C karbürleri oluşur. Krom 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. Cr miktarındaki artış ile sertliğinde arttığı aşağıdaki grafikte görülmektedir (Şekil 1.12.).



Şekil 1. 12. Sertlik ölçümünün yeri ve Cr miktarına bağlı olarak sertlikteki değişim (Laird ve ark. 2000)

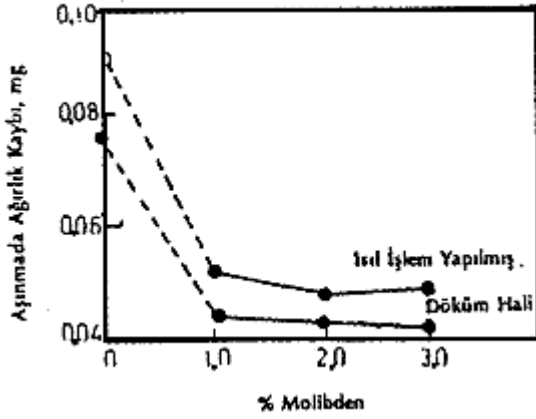
En çok sertlik farkı (yaklaşık 110HB) %26 Cr içeren ötektik yapıya beyaz dökme demirde görülmektedir (Laird ve ark. 2000).

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

1.2.3. Molibden

Molibden, perlit oluşumunu önler. Martenzitik beyaz dökme demirlerde % 0,5 – 3 Mo perlit oluşumunu önler. % 0,5 – 3 Mo ile birlikte Cu, Ni, Cr veya Ni ve Cr'un birlikte ilavesi diğer yüksek sıcaklık dönüşümlerini önler. % 12 – 18 Cr'lu beyaz dökme demirlerde, %1–4 Mo kullanımı, yavaş soğuyan kalın kesitlerde dahi perlit oluşumunu önleyebilir. Mo ince kesitlerde asiküler beynit tipi bir yapının meydana gelmesine yol açabilir.

Molibdenin Cu, Ni ve Mn'a göre üstün olan en önemli özelliği ise; kalıntı ostenite neden olmadan sertleşebilirliği arttırmasıdır. Mo, aynı zamanda beyaz dökme demirin aşınma direncini de arttırmaktadır (Şekil 1.13) (Akdemir 1994).

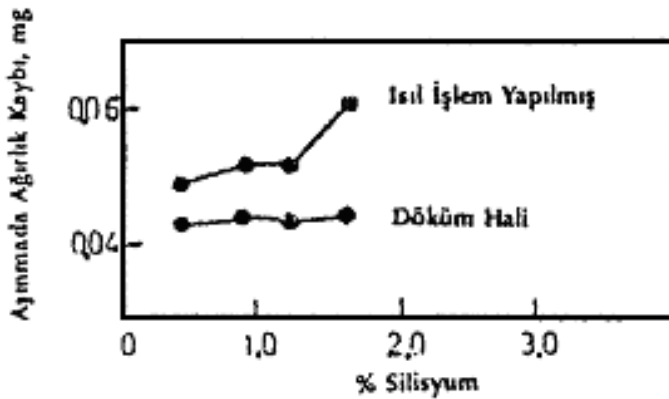


Şekil 1. 13. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde Molibdenin aşınma direncine etkisi (Akdemir 1994)

1.2.4. Silisyum

Silisyum yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin sertleşebilirliğinde olumsuz rol oynar. Silisyum oranı arttıkça ısıl işlem görmüş beyaz dökme demirin aşınma direnci azalır (Şekil 1.14.).

Mikroyapıda yeterli oranda Mn, Ni, Mo ve Cr gibi perlit oluşumunu önleyen elementler olursa silisyum artışı ile M_s sıcaklığı yükselir. Silisyum içeriği yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde % 0,4 – 0,9 arasında olmalıdır. Silisyum ayrıca mikroyapıdaki karbür yapısını değiştirir (Gundlach ve Doane 1990)



Şekil 1. 14. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde silisyumun aşınma direncine etkisi (Akdemir 1994)

Silisyum mikroyapıdaki karbür çekirdeklerinin artışına sebep olur ve daha ince yapılı karbürler oluşturur. Silisyum ilavesi ile karbürler süreksiz ince taneli bloklar veya çubuklar haline gelir. Bunun sonucunda, karbürler arası mesafe azalır. Bu durumda, karbürler matrisi aşınmadan korur ve malzeme yüksek aşınma direnci gösterir. Yeterli derecede silisyum

içeriği, tokluğu % 30 artırır. Ancak, fazla miktarda silisyum ilavesi perlit oluşma ihtimalini yükseltip matrisi zayıflatır. Bundan dolayı, darbe direnci ile birlikte aşınma direnci de düşer.

1.2.5. Bakır

Bakır yüksek kromlu beyaz dökme demirlere perlit oluşumunun önlenmesi için ilave edilir. Bakırın östenit fazında çözünürlüğü kısıtlı olduğundan, kullanımını % 2,5 ile sınırlandırılır. Bakır genelde molibdenle birlikte kullanılır. Maksimum % 1,2 veya daha az bakır; % 0,5 – 2 molibden ile birlikte kullanıldığında perlit oluşumunu önleme etkisi artır (Handbook, 1988).

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde % 2 molibden ile birlikte % 1 bakır ilavesi ile elde edilen sertleşebilirlik, sadece % 3 molibden ilavesi ile elde edilen sertleşebilirlikten daha fazladır.

1.2.6. Fosfor

Fosfor yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin tokluğunu düşürür. Ayrıca, fosfor özellikle kalın kesitli dökümlerde molibdenin sertleştirici etkisini yok edebilmektedir. Fosfor içeriği % 0,3'ün altında olmalıdır (Handbook, 1988).

1.2.7. Kükürt

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde kükürt içeriği çok düşük olmalıdır. Optimum aşınma direnci istendiği için kükürt miktarı maksimum % 0,03'tür. Bu değer üzerinde mikro yapıda yer alan kükürt, aşınma direncinin olumsuz etkiler (Handbook, 1988).

1.2.8. Mangan

Manganez 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. Çünkü söz konusu değer üzerinde manganezin kalıntı ostenit oluşturma riski ve kırılma tehlikesi artar (Handbook, 1988).

1.2.9. Nikel

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde nikel perlit oluşumunun önlenmesi için ilave edilir. Genellikle nikel miktarı % 0,2 – 1,5 arasındadır. Ayrıca nikel sertleşebilirliği de artırır (Handbook, 1988).

1.2.10. Bor

Bor da silisyum gibi mikroyapıdaki karbür morfolojisini etkiler. Bor mikroyapıdaki karbürleri inceltir ve sürekli iğneler şekline getirir. Bunun sonucunda aşınma direnci artar. Bu durum, bor miktarı % 0,12 – 0,3 arasında olduğunda geçerlidir. Bu limitler arasında bor ilavesiyle darbe direnci de % 20 artar (Fusheng ve Chaochang 1989).

Bor miktarının artmasıyla birincil karbürler oluşabilir. Bu yüzden bor ilavesi % 0,57 oranıyla sınırlıdır.

% 28 Cr'lu beyaz dökme demirlerde bor ilavesi karbür miktarını arttırmakta, karbürleri daha sert yapmakta, kabalaştırmakta ve döküm halinde martenzit oluşumunu ilerletmektedir. Bor ilavesi % 28 Cr'lu beyaz dökme demirin tokluğunu düşürmektedir.

1.2.11. Niyobyum

Nb kuvvetli bir karbür yapıcı elementtir. % 0,01 – 0,5 oranında Nb'un; dökme demirlerin mekanik özelliklerini ve aşınma direncini arttırdığı bildirilmektedir. % 3'e kadar Nb, % 15,6 – 27,7 Cr ve % 2,9 – 3,2 C içeren demirlerin aşınma direncini arttırabilir.

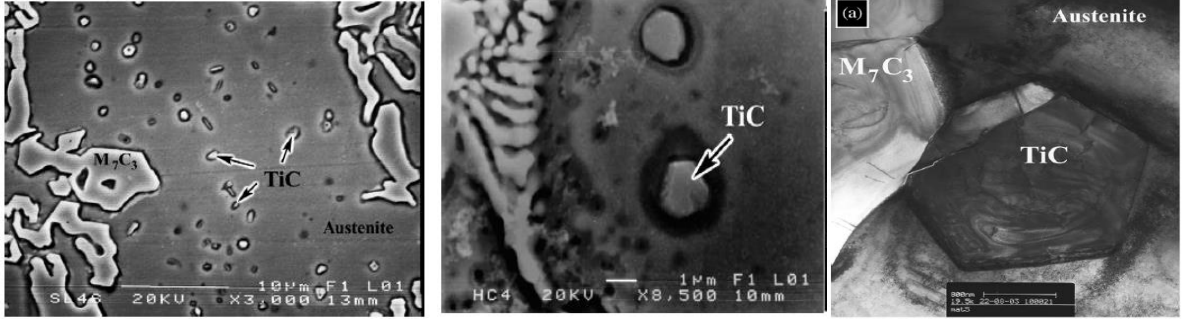
Nb ilavesi yapıyı inceltmektedir. İnce taneli yapı da; demirin aşınma direncini arttırmaktadır. Nb ilavesiyle ötektik nokta sağa doğru kaymaktadır. Böylece demir; gevrek kaba taneli birincil karbür görülmeksizin daha fazla karbon içerebilmektedir.

1.2.12. Vanadyum

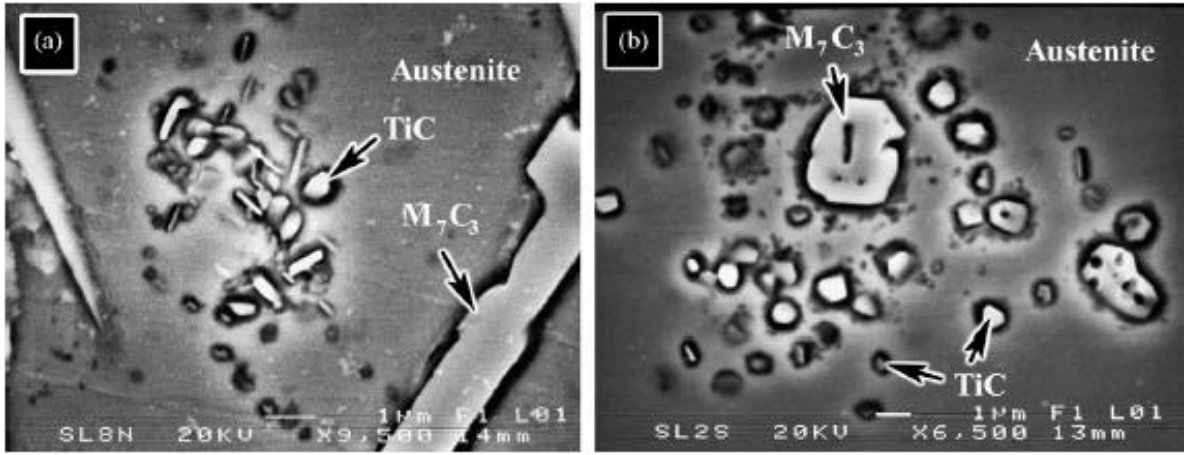
Vanadyum, mikro yapıda karbür oluşturu element olarak yer alır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlere düşük miktarlarda (yaklaşık % 0,5) vanadyum ilavesi aşınma direncini düşürür. Aşınma direncinin düşmesi; vanadyumun krom karbürlerde yoğun olarak çözünüp krom karbürlerin gevrekliğini arttırmasından dolayıdır. Vanadyumun % 3'e kadar artması durumunda, vanadyum karbürlerin (VC) oluşması sebebiyle aşınma direncinden kısmi bir artışın olduğu görülür.

1.2.13. Titanyum

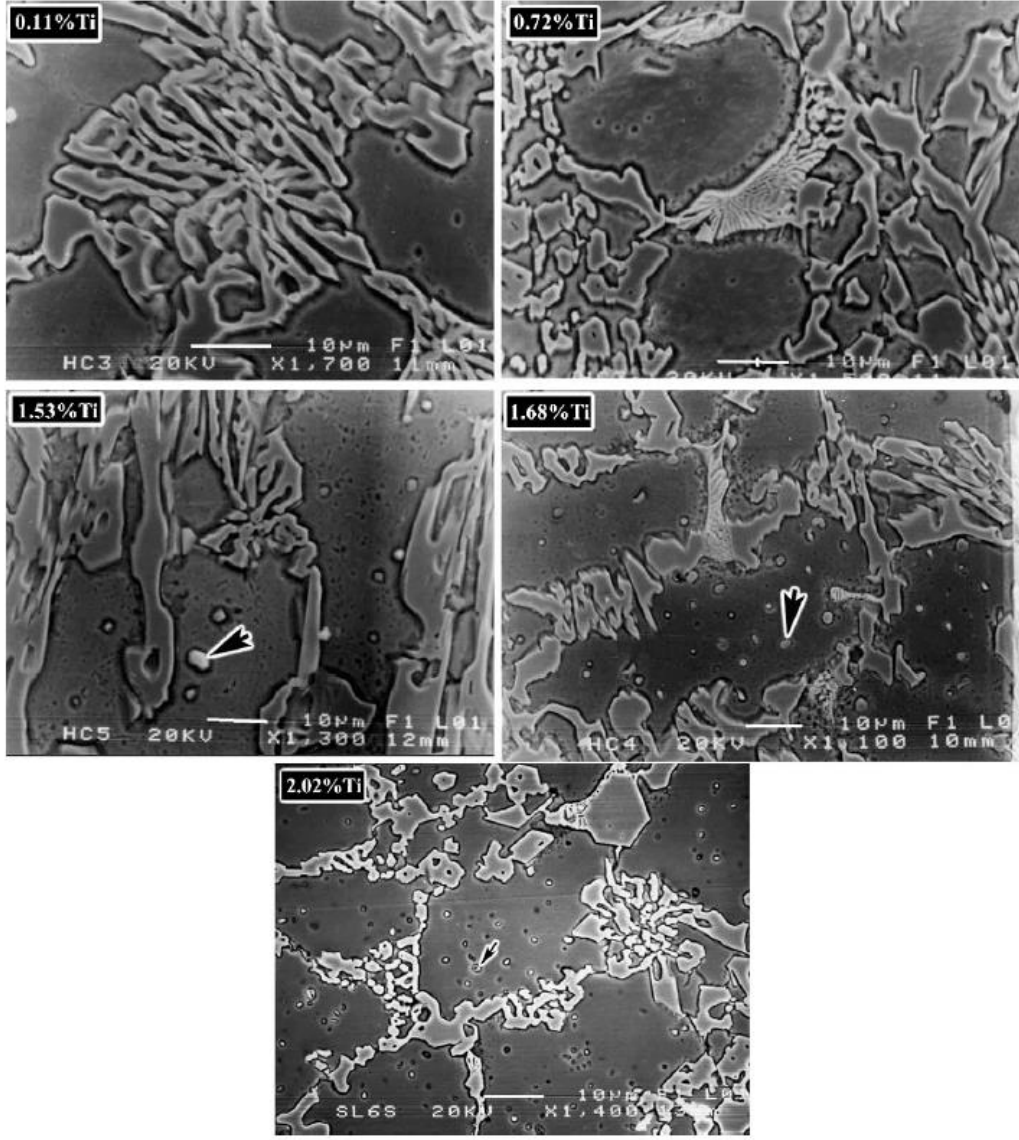
Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde % 0,03 – 0,3 oranlarında titanyum ilavesi yapıdaki birincil ve ötektik karbürleri küreleştirme eğilimi gösterir. Ti oranının arttırılması ile TiC miktarı da artar. Yüksek sıcaklıklarda birincil ve ötektik karbürler olarak çekirdeklenmiş birçok ince TiC partikülü çökler (Şekil 1.15). Bu pek çok çekirdekleşme serbest dentritik, çubuğumsu veya taç yaprağı şeklinde karbür büyümesini bastırır. Bu da mekanik özelliklere, özellikle de toklukta düzelme sağlar. (Şekil 1.16). Ti oranının artması ile ötektik karbür oranı düşer (Bedolla-Jacuinde ve ark. 2005) (Şekil 1.17), matris mikrosertliği ve yüzey sertliği artar.



Şekil 1. 15. Östenit matris içerisindeki TiC' ün farklı büyütmelelerdeki resimleri (Bedolla-Jacuinde ve ark. 2005)



Şekil 1. 16. TiC' lerin bir araya toplanması sonucu karbür şeklinin değişimi. (a) % 1.68 Ti ve (b) %2.02 Ti (Bedolla-Jacuinde ve ark. 2005)



Şekil 1. 17. Farklı oranlardaki Ti' un mikroyapıya etkisi (Bedolla-Jacuinde ve ark. 2005)

1.2.14. Nadir toprak elementleri

Seryum, lantan ve neodim gibi nadir toprak elementleri; % 18 Cr içeren beyaz dökme demirlerin mikroyapı karakteristiklerini değiştirebilmekte ve mekanik özelliklerini düzeltmektedirler. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde optimum seryum, lantan ve neodim içeriği % 0,13 – 0,26 arasındadır. Bu alaşımların aşınma direnci, nadir toprak elementi içermeyen temel alaşıma göre % 10 daha iyidir ve kırılma tokluğunda değişim yoktur.

1.3. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerde Katılışma ve Isıl İşlem

1.3.1. Ergitme ve döküm

Yüksek krom molibdenli beyaz dökme demirlerden ticari amaçla beş temel sınıf geliştirilmiştir. Çizelge 1.6' da söz konusu ticari bileşikler ve özellikler görülmektedir.

Yüksek krom ve molibdenli beyaz dökme demirler genellikle elektrik ark ve indüksiyon fırınlarında üretilir. Astar asidik, bazik veya nötr olabilir. Eğer astar asidik ise ergiyikteki krom ile silika astar arasında bir reaksiyon söz konusudur. Ancak olaya pratik açısından baktığımızda bu; önemli bir problem teşkil etmez.

Normalde şarj malzemeleri çeşitli çelik ve döküm hurdası, servisten geri dönen hurda ve parça ferro krom dur.

Çizelge 1. 6. Ticari amaçla geliştirilen yüksek krom–molibdenli beyaz dökme demirlerin bileşimleri (Fairhurst ve Röhring 1974)

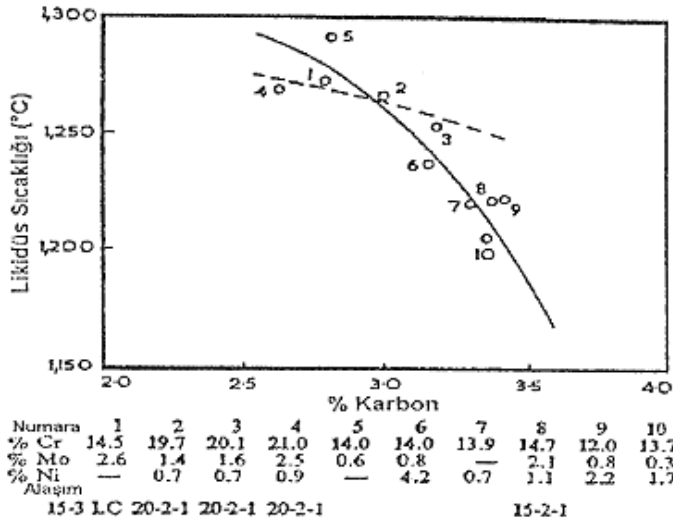
| Tür | % Bileşim | | | | | | | | Sertlik (HRC) | | |
|---------|-----------|-----|-----|----|------|-----|---------|---------|---------------|----------|-----------------|
| | C | Mn | Si | Cr | Mo | Cu | S (max) | P (max) | Döküm Sonrası | Su Verme | Tavlama Sonrası |
| 15-3 HC | 3.4 | 0.9 | 0.6 | 15 | 2.8 | - | 0.05 | 0.1 | 51-56 | 62-67 | 40-44 |
| 15-3 MC | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 15 | 2.8 | - | 0.05 | 0.1 | 50-54 | 60-65 | 37-42 |
| 15-3 LC | 2.6 | 0.7 | 0.6 | 15 | 2.36 | - | 0.05 | 0.1 | 44-48 | 58-63 | 35-40 |
| 15-2-1 | 3.2 | 0.8 | 0.6 | 15 | 2.1 | 0.9 | 0.05 | 0.06 | 50-55 | 60-67 | 40-44 |
| 20-2-1 | 2.8 | 0.8 | 0.7 | 20 | 1.7 | 0.9 | 0.05 | 0.06 | 50-54 | 60-67 | 34-43 |

Molibden genellikle ferro alaşım şeklinde ilave edilir. Özellikle ark fırınlarında molibden oksit de kullanılabilir. Karbon; grafit elektrod, petrol koku ve diğer kaynaklardan elde edilir. Eğer karbürizasyon için pik demir kullanılırsa düşük silisyum içermelidir. İdeal silisyum içeriği % 0.6'dır. Manganez içeriği % 1'dir. Aşırı oksidasyon kaybindan kaçınmak için, ferrokrom ilavesi ergitmenin sonucunda yapılır.

Yüksek krom – molibden içeren beyaz dökme demirlerin likidüs sıcaklığı karbon içeriğine bağlıdır. Şekil 1.18'e göre alaşımın krom içeriği de likidüs sıcaklığını etkilemektedir.

Tong'a göre T_e (ergime sıcaklığı) ve T_8 (ötektik sıcaklığı) aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$T_e = 1554.5 - 89.2(\%C) - 0.77 (\%Cr) \quad T_8 = 1201.7 - 20.3 (\%C) + 5.97 (\%Cr)$$



Şekil 1. 18. % 12 – 16 Cr, % 19 – 21 Cr içeren beyaz dökme demirlerin likidüs sıcaklıklarının karbon içeriğine göre değişimi (Fairhurst ve Röhring 1974)

Yüksek döküm sıcaklıklarında kaba dentritik yapı oluşur. İnce taneli yapı ve ötektik karbür yapısının kontrolü için döküm sıcaklığı düşük olmalıdır.

Alaşım lar yaş – kuru kum kalıba, yağlı kum ya da çelik kumuna dökülür. Katılaşmadan sonraki çekilme % 2'dir.

Besleyici ve yollukların ana parçadan kesilmesi sırasında çatlak oluşturulmamasına dikkat edilmelidir. Ayrıca, kesme işlemi kuru olarak yapılacaksa ısınmaya yol açılmamalıdır.

Tokluk, genellikle dökümden sonra en düşük düzeydedir. Ancak ısıl işlemle tokluk artırılabilir.

1.3.2. Fe – C – Cr Sistemi

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

ASTM A 532'ye göre yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin sınıflandırılması yapılmıştır. Bu standarttan pratik olarak Fe–C–Cr sisteminin % 1–4 C, % 10–30 Cr içeren bölgesi kullanılmaktadır.

Fe–C–Cr sistemi üçlü denge diyagramları birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Özellikle bu araştırmalar sıvılaşma yüzeyi ve üzerindeki kritik noktalar üzerinde yoğunlaşmıştır. Fe–C–Cr sisteminin sıvılaşma yüzeyinin dikkate alınması gerekir.

Fe–C–Cr denge diyagramında yüksek kromlu beyaz dökme demirler açısından en önemli doğru U_1 ve U_2 kritik noktaları arasındaki ötektik alandır. Bu alan üzerinde U_2 ve U_3

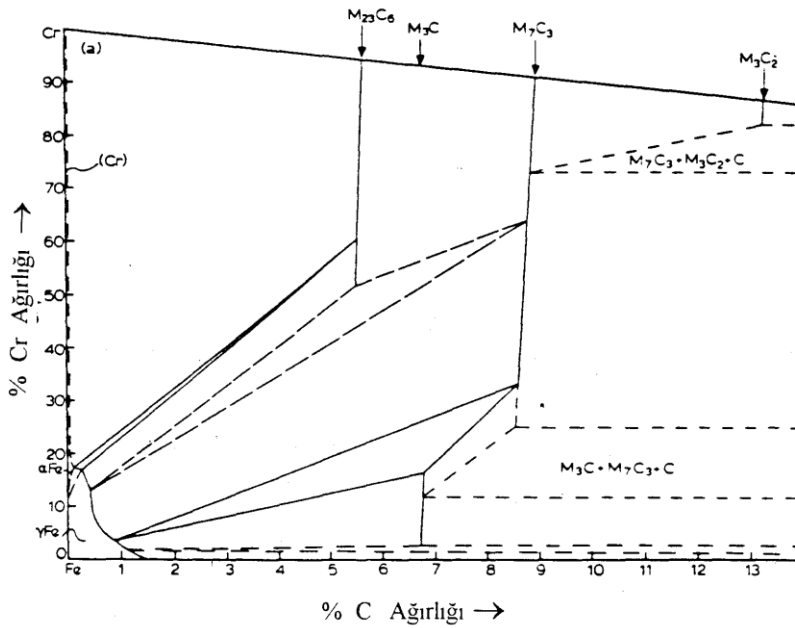
noktaları arasında ötektik karbür fazı M_7C_3 U_3 noktasının altında ise M_3C karbür fazı oluşmaktadır.

Ticari açıdan yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin çoğunluğu bileşim açısından östenit M_7C_3 bölgesinde bulunur. Aynı Cr/C oranına sahip bileşiklerdeki alaşımlar östenitleme sırasında benzer matris yapısı oluşturur. Karbür yapısı farklı olsa bile, aynı sıcaklıkta yapılan ısıtılma işlemiyle benzer matris elde edilir.

Gerçek soğuma şartlarında, Ş oluşması gerekli olan $M_{23}C_6$ karbürleri görülmez. Fe-C-Cr sisteminde bulunan fazların kristal yapıları ve kafes parametreleri farklılık gösterir, ayrıca karbürler çok karmaşık ve farklı kristal yapıya sahiptir.

1.3.3. Fe-C-Cr Sistemi katı durum denge diyagramı

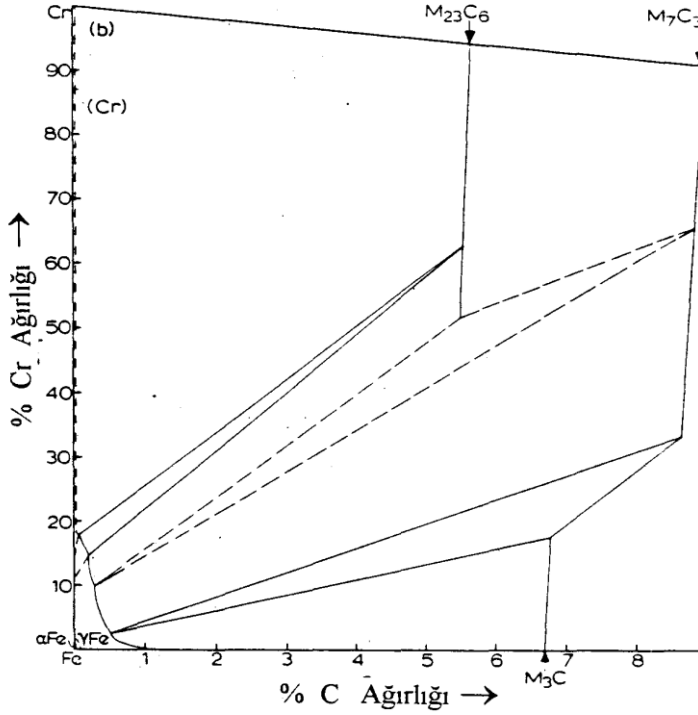
Fe-C-Cr sisteminin katı durum diyagramları yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin dökümünde soğuma sırasında oluşan matris yapısının ve yeniden östenitleme ile östeniti martenzite dönüştürme işlemindeki yapı oluşumları önemlidir. Şekil 1.19 ve Şekil 1.20' de Fe-C-Cr sisteminin 1000 °C ve 870 °C' deki izotermi görülmektedir.



Şekil 1. 19. Fe-C-Cr sisteminin Fe-C-Cr 1000 °C' deki katı durum izotermi

Ticari alanda kullanılan beyaz dökme demir bileşimlerinin çoğunluğu östenit - M_7C_3 bölgesinde bulunur. Şekil 1.20' de gösterilen 870 °C' deki izotermin 1000 °C deki izotermden temel farkı, östenit alanının daralmasıdır. Bu daralma ile belirli bir bileşimdeki yüksek kromlu

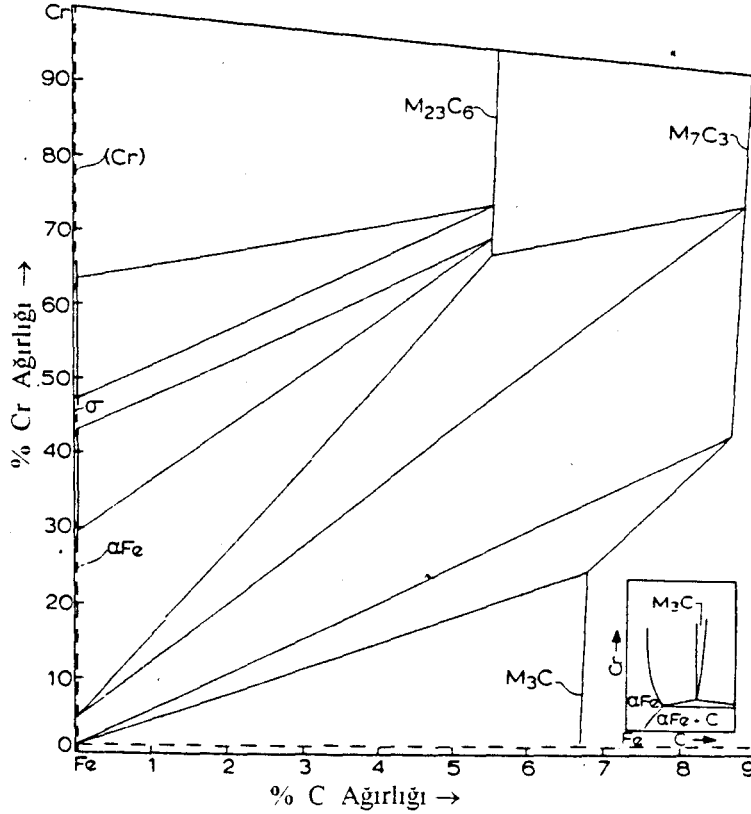
beyaz dökme demirin matrisini oluşturan östenit 870 °C' de, 1000 °C' ye göre daha az krom ve karbon içerir.



Şekil 1. 20. Fe-C-Cr sisteminin 870 °C deki katı durum izotermi (Arıkan 1999)

Bütün bu bileşimdeki sıcaklık azalması ile beraber östenitin, Cr ve C oranı azalmaktadır. Burada dikkati çeken nokta östenit ve östenitin östenit- M_7C_3 ötektoid bölgesini ayıran çizginin sıcaklıkla değişimidir. 1150 °C' de üst noktası %13 Cr, %0.4 C, alt noktası, %4 Cr, %3 C içermektedir. Yani, gerilme daha çok alt noktadadır. Bunun sonucu olarak, düşük Cr/C oranlı bileşimler ısıl işlemlerde sıcaklık değişimlerine yüksek Cr/C oranlı bileşimlere göre daha hassastır. Fakat, bütün bileşimlerde sıcaklığın azalması ile beraber östenitin Cr ve C oranı azalmaktadır. Şekil 1.21' de 700 °C izotermi görülmektedir. Burada östenit bölgesi kaybolmuş, yerini ferrit bölgesi almıştır. Bu izoterm daha çok temperleme işlemleri için kullanılır. Sıcaklık daha da düşerse, matris için denge fazı östenit yerine ferrit olur.

Benz (1974), 1150-900 °C sıcaklıklardaki Fe-C-Cr üçlü faz diyagramlarını optik mikroskop, x-ışınları ve elektron mikroskobu kullanarak hassas bir biçimde analiz etmiştir.



Şekil 1. 21. Fe-C-Cr sisteminin 700 °C deki katı durum izotermi (Laird ve ark. 2000)

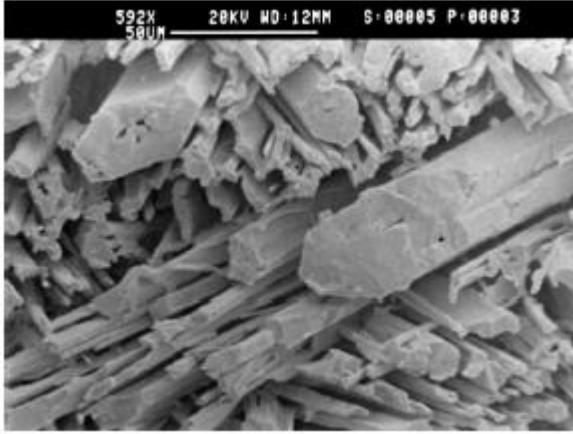
Şekil 1.21' deki çizgiler (kesik çizgiler) 1000°C deki beklenen denge durumunu gösterir. Buradaki oluşumlar; $\gamma\text{Fe} + \text{M}_3\text{C} + \text{C}$ ve $\gamma\text{Fe} + \text{C}$ dir. Ayrıca ileri üçgen bağlantılarında $\text{M}_7\text{C}_3 + \text{M}_3\text{C}_2 + \text{C}$ ve $\text{M}_3\text{C} + \text{M}_7\text{C}_3 + \text{C}$ oluşumları da elde edilebilir. Şekil 1.21' de çözünürlük limitlerinin daha hassas ilişkileri, $\gamma\text{Fe} + \text{M}_3\text{C} + \text{M}_7\text{C}_3$ ve $\gamma\text{Fe} + \text{M}_{23}\text{C}_6 + \text{M}_7\text{C}_3$ ayrıca $\alpha\text{Fe} + \gamma\text{Fe} + \text{M}_3\text{C} + \text{M}_{23}\text{C}_6$ üçgen bağıntıları ile verilebilir. Şekil 1.21' deki grafiklerde dikkati çeken nokta, östenit ve östenit - M_7C_3 ötektoid bölgesini ayıran çizginin sıcaklıkla değişimidir. Bütün bileşimlerde sıcaklık azalması ile beraber östenitin, krom ve karbon oranı azalmaktadır. Sıcaklık daha da düşerse, matris için denge fazı östenit yerine ferrit olur. 700 °C' deki izotermde M_3C içindeki Cr, yaklaşık % 18' e kadar olduğunda krom demirle yer değiştirir. Bu izotermde M_{23}C_6 yaklaşık % 35' e kadar, M_7C_3 ise %50' ye kadar Fe çözündürmektedir.

1.3.4. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerinin katılaşma yapısı

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde östenit M_7C_3 ötektiği arasındaki reaksiyon, katılaşma 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 katılaştırken ilk olarak ostenit taneleri daha sonra M_7C_3 ostenit ötektiği oluşur. Ötektik yapıdaki karbür dağılımı ve şekli ötektiğin miktarı ve bileşiğine bağlıdır.

Ötektik karbürün mikro yapıdaki oranı az ise (% 20) ötektik karbürleri ostenit tane sınırlarına ayırır. Bunlar ostenit tane sınırları boyunca uzanan levhalar ve tane içlerinde küçük çubuklar şeklinde belirir (Şekil 1.22).

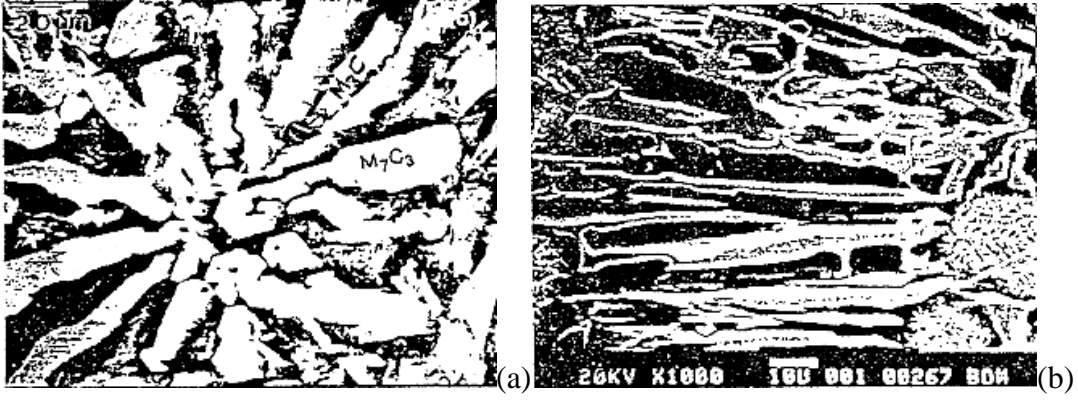


Şekil 1. 22. Ötektik karbürün mikroyapı fotoğrafı (Albertin ve Sinatora 2001)

Ötektik karbür oranı arttıkça karbür lamelleri ostenit 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_7C_3 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, katılma hızı ve bileşim gibi parametrelere bağlıdır.

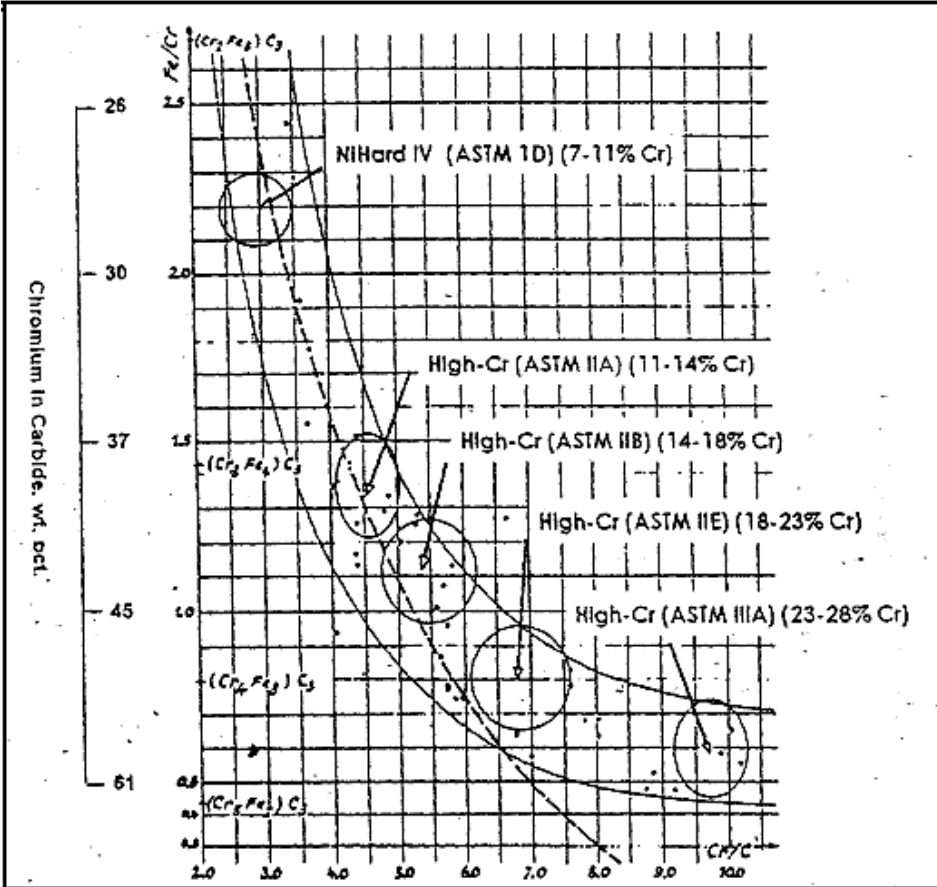
1.3.5. M_7C_3 Karbürlerinin özellikleri

M_7C_3 karbürleri %8.6-8.9 C içerirler. Yoğunluğu $6.6-6.9 \text{ gr/cm}^3$, kristalografik yapısı trigonal (pseudo (yalancı) hegzagonal), çubuk ve bıçağa benzer yapılara sahiptir (Şekil 1.23), sertliği 1000 -1800 (HV) ve serbest enerjisi (-10) – (-20) kJ/mol' dur. Çözündüğü Cr içeriği %24'ten %56' ya kadar değişebilir. %30' un altında V ve %7' nin altında Mo içerebilirler (Laird ve ark. 2000).



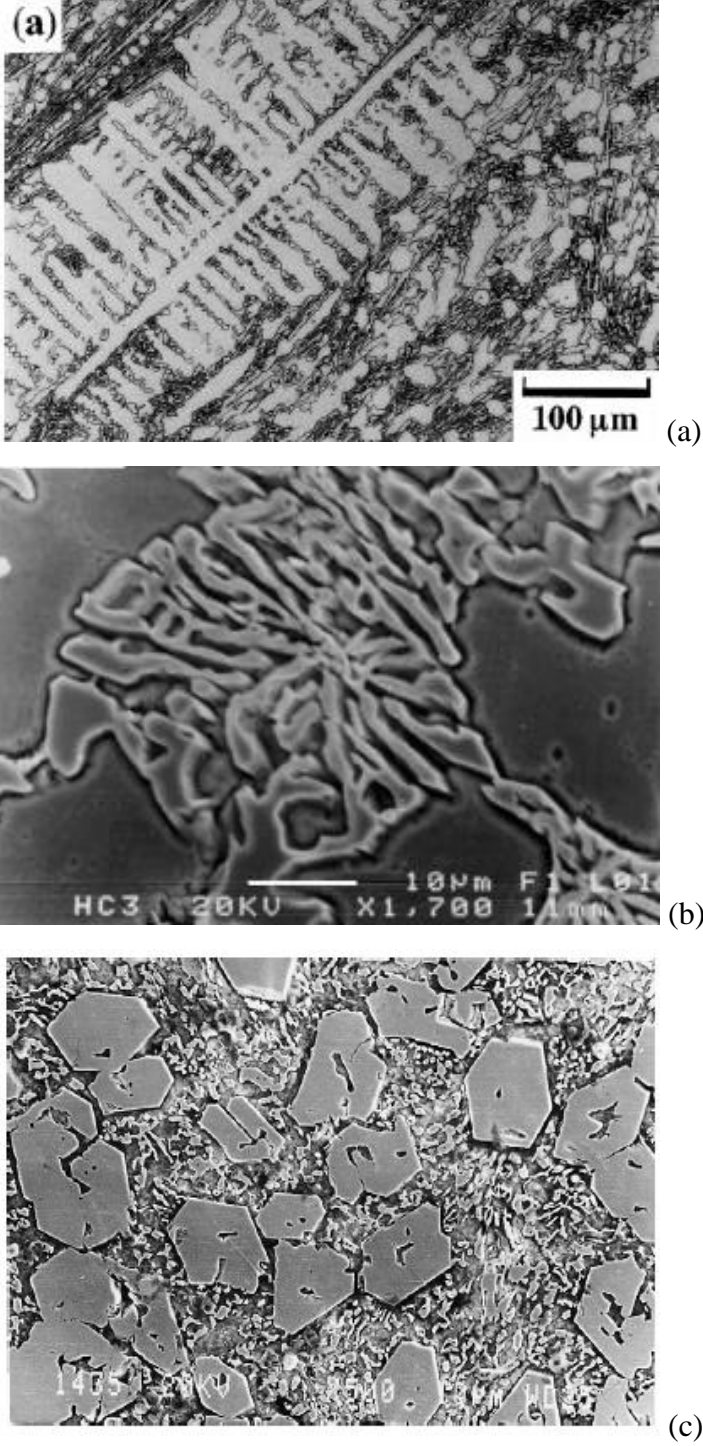
Şekil 1. 23. M_7C_3 karbürlerinin çubuğa benzer (a) ve bıçağa benzer (b) mikro yapı fotoğrafları (Laird ve ark. 2000)

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin bileşimlerinde krom dışında molibden, titanyum, vanadyum gibi karbür yapıcı elementler de bulunmaktadır. Ancak mikro yapıda genel olarak krom karbürler yer alır. Karbürlerin yapısındaki krom miktarı alaşımın Cr/C oranına bağlıdır. Mesela; alaşımın Cr/C oranı üç iken M_7C_3 tipi karbürler oluşur ve $(Cr_5Fe_2)C_3$ karbürü yaklaşık %65 civarında Cr içerirken, $(Cr_2Fe_5)C_3$ karbürü yaklaşık %24 oranında Cr içerir (Şekil 1.24.).



Şekil 1. 24. M_7C_3 Karbürünün tahmin edilen Cr içeriği ve Fe' in Cr/C oranı arasındaki ilişki (Laird ve ark. 2000)

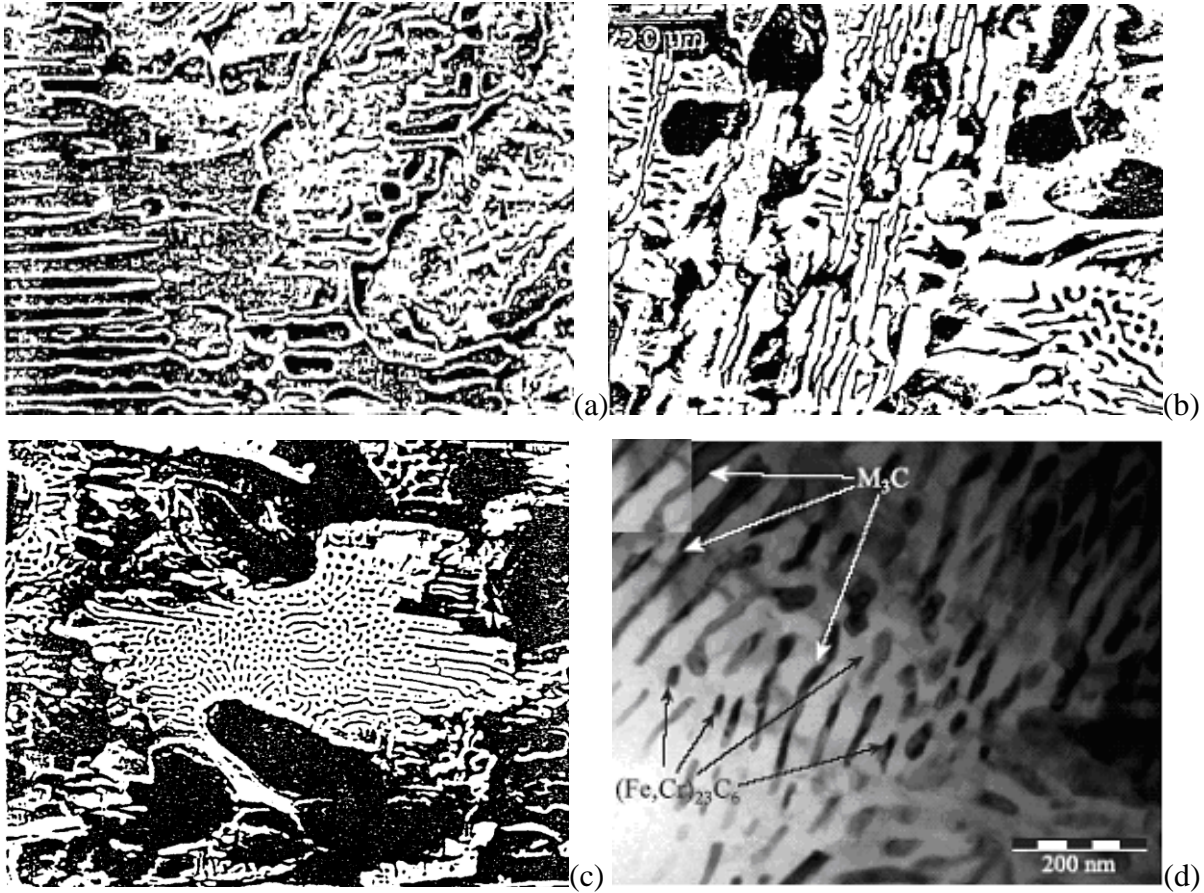
Karbür yapıcı elementlerin bir kısmı M_7C_3 tipi karbürler oluştururken, kendi karbürlerini de oluştururlar. Ötektik altında, ötektik noktada ve ötektik üstünde farklı yapılarda bulunabilirler (Şekil 1.25).



Şekil 1. 25. (a) M_7C_3 karbürünün ötektik altı, (b) ötektik ve (c) ötektik üstü yapılarındaki resimleri (Bedolla-Jacunde ve ark. 2005, Sapate ve Rao 2004, Sakamoto ve ark. 2001)

1.3.6. M_3C Karbürlerinin özellikleri

M_3C karbürleri %6.7-6.9 C içerirler. Yoğunluğu $7.4-7.6 \text{ gr/cm}^3$, kristalografik yapısı Ortorombik, yapısı plakaya benzer, sertliği 800-1100 HV ve serbest enerjisi (+1) – (-10) kJ/mol dur. %1.5 Ni ve %5 Cr'a kadar Ni-Hard'ların çoğunda bulunmaktadır. Cr' u %17' ye kadar çözümlenebilir. Mo ve V gibi diğer metal atomları M_3C içinde sınırlı oranda çözünmektedir. Ötektik altı, ötektik ve ötektik üstünde farklı biçimlerde oluşurlar (Şekil 1.26).



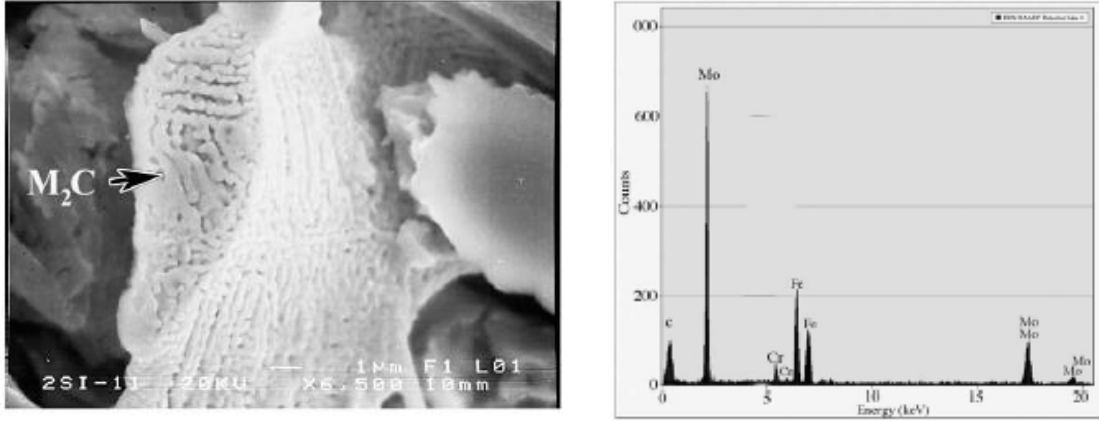
Şekil 1. 26. M_3C karbürünün; ötektik altı (a), ötektik (b) ve ötektik üstü (c) ait mikro yapı fotoğrafları ve M_3C ötekiğinin büyütülmüş yapısı (d) (Laird ve ark. 2000, Sun ve ark. 2004)

1.3.7. M_2C (Mo_2C) Karbürlerinin özellikleri

M_2C (Mo_2C) karbürü %5.9 C içerir. Yoğunluğu 9.1 gr/cm^3 , kristalografik yapısı ortorombik, yapısı bıçağa benzer, sertliği 1500 -1800 HV ve serbest enerjisi (-25) - (-30) kJ/mol dur (Laird ve ark. 2000).

Yüksek oranda Mo içeren dökme demirlerin östenit tane sınırında görülür. Mo dışında karbür oluşturucu diğer alaşım elementleri bu tipte görülmemektedir. Daha çok Mo' e özgü

bir karbür çeşididir (Şekil 1.27). Her ne kadar yüksek kromlu beyaz dökme demirlerdeki M_2C (Mo_2C) karbürü içerisinde az miktarda Cr bulunduğu düşünülse de bunların saf olduğu düşünülmektedir (Bedolla-Jacuinde ve ark. 2005).



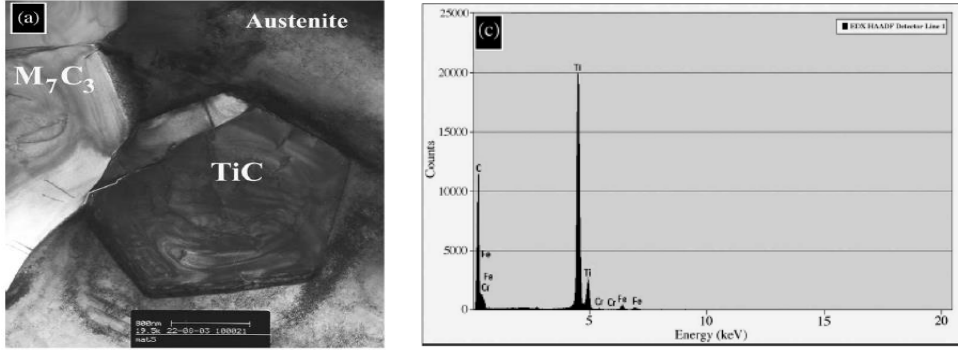
Şekil 1. 27. M_2C karbürünün mikroyapı fotoğrafı ve EDS ile alınan analizi (Bedolla-Jacuinde ve ark. 2005)

1.3.8. MC Karbürlerinin özellikleri

VC: VC %17-20 C içer. Yoğunluğu $5.6-7 \text{ gr/cm}^3$, kristalografik yapısı karmaşık FCC (B_1 Tipi), çubuğa benzer yapıya sahiptir, sertliği 2000-3000 HV ve serbest enerjisi (-40)–(-80) kJ/mol’ dur. VC yanlış anlaşılabilir karbürlerden biridir. %4.5’lik alaşım seviyesinde ötektik karbür olarak görülür. Krom içeren dökme demirlerde VC %20’ye kadar Cr çözümlenebilir (Laird ve ark. 2000).

NbC: NbC %11 C içerir. Yoğunluğu 7.8 gr/cm^3 , kristalografik yapısı karmaşık FCC (B_1 Tipi), mercan veya taç yaprağına benzer yapıya sahiptir, sertliği 2000-2500 HV ve serbest enerjisi (-110)–(-140) kJ/mol’ dur. NbC kristal yapısı içerisinde diğer alaşım elementlerini çok sınırlı oranda çözümlenebilir. Östenit ve ferrit içerisinde sınırlı oranda çözünürlüğe sahiptir (Laird ve ark. 2000).

TiC: TiC %20 C içerir. Yoğunluğu 4.9 gr/cm^3 , kristalografik yapısı karmaşık FCC (B_1 Tipi), hegzagonal kalın bloklara benzer yapıya sahiptir (Şekil 1.28), sertliği 2000 – 3100 (DPH) ve serbest enerjisi -180 kJ/mol’ dur. TiC saf şekilde oluşur. Diğer alaşım elementlerini barındırmaz (Laird ve ark. 2000).



Şekil 1. 28. Östenitik matris içerisinde TiC' ün mikroyapı fotoğrafı ve EDS analizi (Bedolla-Jacuinde ve ark. 2005)

1.3.9. Fe – C – Cr Alaşımlarının döküm matris yapısı

Yüksek karbonlu Fe–C–Cr alaşımlarında katılaşma sırasında ötektik altı bileşimlerde ilk olarak ostenit dendritleri oluşur. Daha sonra bu dendritlerin etrafında ostenit M_7C_3 ötektiği oluşur.

Karbür yapısına giren elementler katılaşma sırasında ayrışır. Karbür yapıcı elementler karbürlerin içinde yer alırken silisyum gibi karbür yapısına girmeyen elementler ötektik karbür kenarlarında birikir. Fosfor ve kükürdün karbür yapısı içinde kısmen dağılması karbür ostenit ara yüzeyini zayıflatarak çatlak oluşmasına ve ilerlemesine sebep olabilir.

Griffing ikili karbürlerin oluşumunu (mikroyapıda M_3C karbürleri ile çevrili M_7C_3 karbürleri) %10-20 Cr ve %4.8-7.5 C içeren alaşım için belirlemiştir. İkili karbür yapısı üç adımda oluşan katılaşmanın sonucudur (Arıkan 1999).

1. Adımda peritektik U_5 , P_1 ile karşılaşınca kadar demir köşesinde hareket eder.
2. Adımda $L+C = M_7C_3$ reaksiyonu ile M_7C_3 karbürleri oluşur. Sıvı P_1' e gelir.
3. Adımda $L+C + M_7C_3 = M_3C$ reaksiyonu oluşur.

Thorpe ve Chicco' ya göre Fe-C-Cr üçlü sisteminde %9.6 Cr, %3.44 C içeren alaşım için benzer ikili karbürler gözlenmiştir.

Jackson' a göre ise Fe-C-Cr sisteminde %10 Cr, %3.5 C içeren alaşımda katılaşma 4 adımda oluşur.

1. Adımda γFe oluşur (Şekil 4.2) $U_2 \rightarrow U_3'$ e gelir.
2. Adımda $L = M_7C_3 + \gamma Fe$ oluşur.
3. Adımda $L + M_7C_3 = M_3C + \gamma Fe$ reaksiyonu oluşur ve bileşim U_3' e ulaşır.
4. Adımda $L = M_3C + \gamma Fe$ ledeburitik ötektik reaksiyonu oluşur.

Thorpe ve Chicco Ni-Hard IV (% 8-9 Cr , % 4-7 Ni , % 3.10 C, %1.4 Si, %0.50 Mn) ticari alaşımında ikili karbürlerin oluştuğunu gözlemişlerdir.

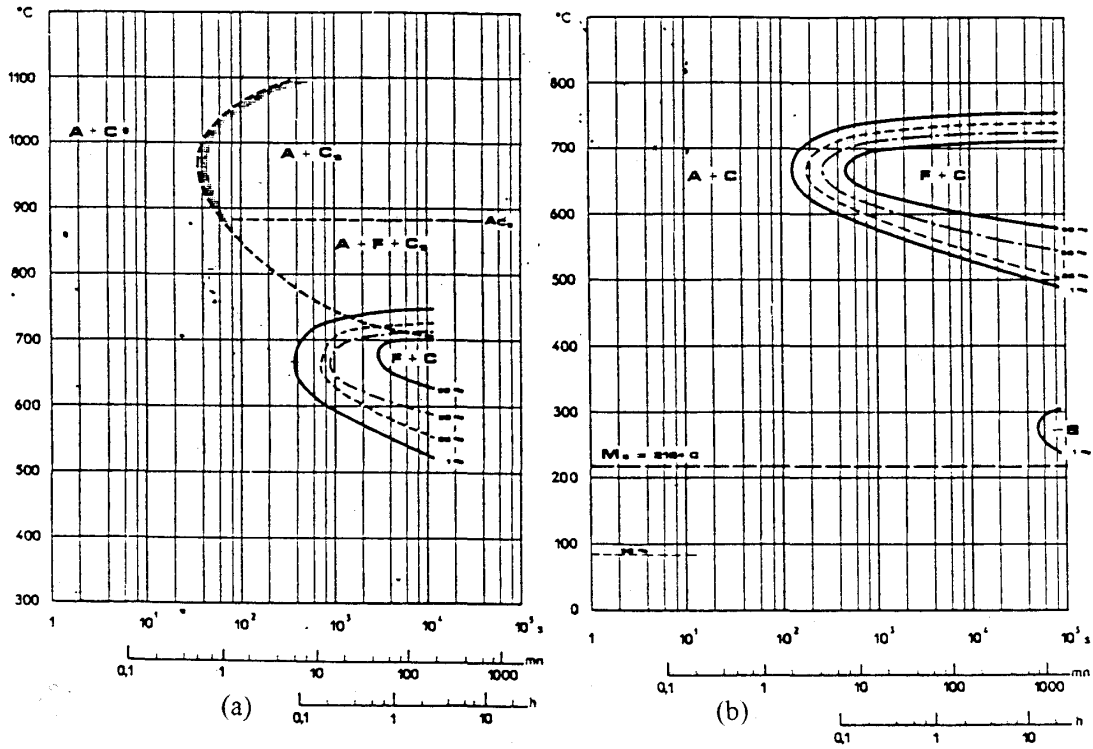
Bu iki bilim adamına göre hızlı soğuma oranı $L = M_7C_3 + \gamma Fe$ reaksiyonuna neden olur ve düşük krom içerikli M_7C_3 karbürleri oluşur. Bu durum sonradan M_3C karbürlerinin oluşumu için daha yüksek bir termodinamik kuvvet sağlar.

1.3.9.1. Fe – C – Cr Alaşımlarının katı hal reaksiyonları

M_7C_3 ostenit bölgesindeki reaksiyonlar yüksek kromlu beyaz dökme demirlere uygulanan ısıl işlemler açısından çok önemlidir. Döküm sırasında oluşan ostenit oda sıcaklığında yarı kararlı durumda varlığını sürdürebilir. Kalıntı ostenit beyaz dökme demirin aşınma direncini olumsuz etkiler. Bu nedenle kalıntı ostenit içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirlere ostenitleme ısıl işlemi uygulanır. Bu işlemin amacı kalıntı ostenitin karbon ve krom miktarını azaltıp oda sıcaklığına soğutulduğunda martensite dönüşümünü sağlamaktır. Bu; matrisin M_s sıcaklığını yükselterek sağlanır. Dökme demirlerde M_s sıcaklığı;

$$M_s = 561^\circ C - 475C - 33Mn - 21Mo - 17Cr - 17Ni$$

formülü ile gösterilir. Bu denklemde görüldüğü gibi, M_s sıcaklığında en büyük düşüşü sağlayan element karbondur. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ostenitin yarı kararlı durumu karbona aşırı doymuşluğundan kaynaklanır. Ostenitleme işleminin amacı kalıntı ostenitin karbonu ve kromundan ikincil M_7C_3 karbürlerini çökelterek denge eğrine getirmektir. Döküm durumundaki malzemeyi ostenitleme işleminin A_3 sıcaklığının üstünde karbon ve kroma aşırı doymuş ostenit çözünerek M_7C_3 tipi karbürler çökeler. Ostenit içinde ikincil M_7C_3 karbürlerinin çökmesi ise ostenitin bileşimi ve dönüşüm özelliklerini değiştirir. Şekil 1.29' da şematik bir zaman – sıcaklık – dönüşüm (ZSD) diyagramı görülmektedir. Östenit içinde M_7C_3 karbürlerin çökmesi östenitin bileşimini ve dönüşüm özelliklerini değiştirir. Yeniden östenitleme işleminden sonra, dengelenmiş östenitin perlit dönüşüm süresi daha uzundur. Fakat bundan da önemlisi martenzit dönüşüm oranı artmaktadır.



Şekil 1. 29. Fe-C-Cr alaşımlarının ZSD diyagramı a) döküm durumu, b) yeniden östenitleme işleminden sonraki durum (Laird ve ark. 2000).

1.3.9.2. M_7C_3 – Östenit ötektiğinin oluşumu

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin ticari alaşımları genellikle ötektik altı bileşime sahiptir. Bu alaşımların katılaşmalarında ilk olarak östenit taneleri, daha sonra M_7C_3 -östenit ötektiği oluşur. Ötektik yapıdaki karbür dağılımı ve şekli ötektiğin miktarı ve bileşimine bağlıdır. Ötektik karbürün yapı içindeki oranı en az ise (%20' nin altında) ötektik karbürleri östenit tane sınırına ayrışır. Bunlar östenit tane sınırları boyunca uzayan levhalar ve östenit tane içinde beliren küçük çubuklar şeklinde görülürler. Ötektik oranı arttıkça karbür lamelleri östenit tanelerinin içine doğru uzanmaya başlar.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin, diğer beyaz dökme demirlere göre daha iyi tokluk özelliği sergilemesi M_7C_3 karbürlerinin, diğer beyaz dökme demirlerdeki M_3C karbürleri gibi sürekli ağ yapısı oluşturmamasından ileri gelmektedir. Bu nedenle, ötektik yapının içindeki bu karbürlerin dağılımı ve boyutları yüksek kromlu beyaz dökme demirin mekanik özellikleri bakımından önemlidir. Ötektik karbürlerin dağılım ve şekilleri, metal döküm sıcaklığı, katılaşma hızı ve şartları gibi fiziki ortamdan kaynaklanan olaylar dışında metal bileşiminden de etkilenirler. Malzeme içindeki krom içeriği attıkça karbürlerin hacim küçülmesi artar ve buna bağlı olarak aşınma azalır. Beyaz dökme demirlerde M_7C_3 tipi karbürlerin malzeme içerisindeki yüzdesi şu bağıntı ile bulunabilir.

$$\% \text{Karbür} = 12,3(\%C) + 0,55(\%Cr) - 15,2 \text{ (Rajagopal Iwasaki 1992).}$$

1.3.9.3. İkincil M_7C_3 karbürlerini oluşumu

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde A_3 sıcaklığının üstünde sadece M_7C_3 karbürleri oluşur. $950\text{ }^\circ\text{C}$ – $1030\text{ }^\circ\text{C}$ arasındaki sıcaklıklarda ikincil karbürler için çekirdekleşme süresinin ortalama 20 sn civarında olduğu ve bütün reaksiyonun 4 – 6 saatte tamamlandığı tespit edilmiştir. Çökeltme sırasında hacimde çok az daralma olur. Cr / C oranı arttıkça çökeltme aralığı daha yüksek sıcaklıklara kayar. Başlangıçta ince çökeltiler karbürler etrafında ve tane sınırlarında gelişigüzel dağınık durumda bulunurlar. Daha sonra ostenit dendritleri içinde belirli bazı kristalografik düzlemler üstünde çökeltme başlar.

Sıcaklık ikincil karbürlerin oluşum sürecinde en önemli etkidir. Karbürler etrafında gelişigüzel çökeltme $950\text{ }^\circ\text{C}$ 'ın altındaki sıcaklıklarda başlar, daha sonra birçok ostenit tanesinde görülmeye başlar. Sıcaklık yükseldikçe gelişigüzel çökelti bölgesi azalır ve sonunda kaybolur, karbürlerin sayısı azalır ve kabalaşır. Karbür büyümesi ile beraber etkin çökeltme düzlemi sayısı da azalır.

İkincil karbür çökeltmesi sadece izotermal ısı işlemle değil, sürekli soğuma sırasında da olabilir. Bu nedenle soğuma ne kadar yavaş olursa karbür çökeltmesi de o kadar fazla olur. Çökeltme yoğunluğu; düşük Cr / C alaşımlarda yüksek Cr / C oranına sahip alaşımlara göre daha fazladır.

1.3.10. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin ısı işlemi

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ısı işlemin amacı martenzitik matris içinde ikincil karbürler oluşturmaktır (Pearce 1984).

Yağda su verme işlemi çatlama riski oluşturduğu için su verme işlemi havada yapılır. Bu nedenle yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin bileşimi, kesite ve boyuta uygun olarak havada sertleşmeye izin verecek şekilde yapılmalı ve uygun soğuma hızı kullanılmalıdır. Havada sertleştirme, fanlar ve püskürtme teknikleriyle hızlandırılabilir (Pearce 1984).

Yapıdaki yüksek krom karbürleri kararlı hale getirir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde alaşımsız dökme demirlerin aksine grafitleşme görülmez.

Katılma sırasında veya yüksek sıcaklıkta oluşan ostenit krom, karbon ve diğer alaşım elementlerine doymuş haldedir. Sıcaklık düşüştüyle birlikte krom ve karbon ikincil karbürler olarak çökeltir ve mikroyapıdaki ostenit miktarı azalır. Bu durumda kararsız hale gelmiş ostenit soğuma hızına bağlı olarak perlit, beynite veya martenzite dönüşebilir. Bununla birlikte, karbür çökeltmesi düzensizdir. Bu nedenle, ortalama soğuma hızlarında bile oda sıcaklığında mikroyapıdaki kalıntı ostenit bulunur. Dolayısıyla dökümden sonraki yapı perlit, martenzit ve kalıntı ostenittir.

İnce kesitli malzemelerde ostenit, kalın kesitli malzemelerde ise perlit mikro yapıya hakimdir. Ancak döküm yapısında yine de perlit bulunur.

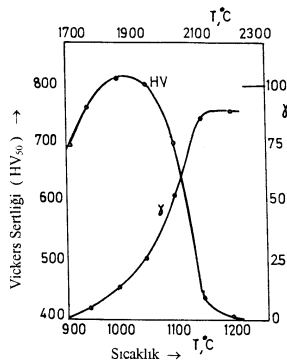
Bununla birlikte, parça kesidi ve soğuma hızına göre bileşim ayarlanırsa tamamen ostenitik yapı elde edilebilir. Bu da; yüksek miktarda krom kullanılması ile molibden, nikel ya da bakır ilavelerinin yapılması anlamına gelir.

Aşırı miktarda kalıntı ostenit içermeyen, tamamen martenzitik mikroyapı elde etmek için dökümün 920–1000 °C’de tutularak destabilize edilmesi gerekir. Bu esnada oluşan ikincil karbür çökmesi matrisin krom ve karbon içeriğini düşürür. Destabilizasyondan sonra yapılan soğutmada soğuma hızı perlit dönüşümüne yol açmayacak kadar yüksek ise ostenit martenzite dönüşebilir (Pearce 1984).

Alaşımının stabilize edilmesinden sonra sertleşebilirlik krom ve karbon içeriği ile belirlenir. Krom ve karbon birleşerek ötektik ve ikincil karbürleri oluşturur. Alaşımın toplam krom içeriğinden yalnız bir kısmı matris içinde kalarak sertleşebilirliği artırır. Karbon içeriği sabit tutularak krom içeriği arttırılırsa sertleşebilirlik artar.

1.3.10.1. Su verme sıcaklığı

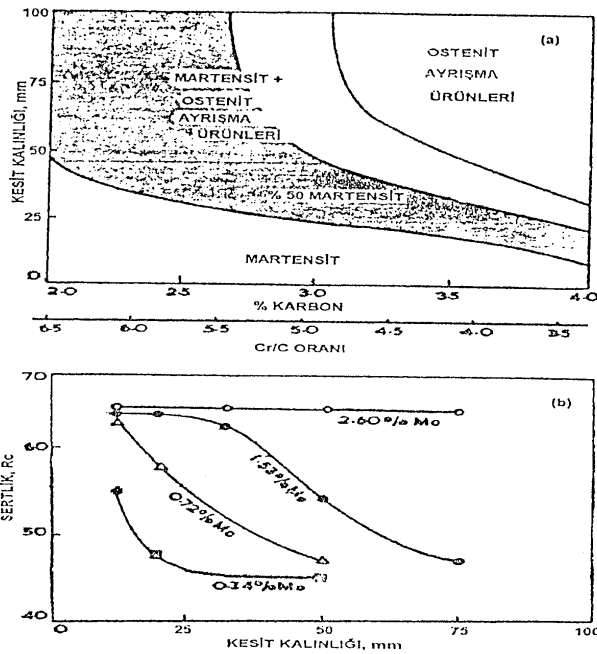
Su verme sıcaklığı dönüşüm özelliklerini ve son durumdaki sertliği, ostenit içinde çözünen krom ve karbon miktarına bağlı olarak belirler. Sıcaklık arttıkça ostenit içindeki karbon çözünürlüğü artar. Karbon içeriğini arttırmak daha fazla sertleşebilirliğe ve su verdikten sonra daha sert martenzit oluşumuna yol açar. Su verildikten sonraki sertlik su verme sıcaklığına bağlı olarak artar. Krom, ferritten ostenite dönüşüm sıcaklığını arttırdığından krom içeriği arttıkça maksimum sertliğin elde edildiği su verme sıcaklığı artar. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ikincil karbür çözülmesinin sertliğe etkisi olduğu için, % 20 kalıntı ostenit sağlayan ostenitleşme sıcaklığı en yüksek sertliği sağlar. % 15 Cr içeren bir alaşımda maksimum sertliğin elde edildiği su verme sıcaklığı 940 – 970 °C arasındadır. Bu durum Şekil 1.30’ de görülmektedir.



Şekil 1. 30. Fe – C – Cr alaşımlarında ostenitleme sıcaklığına bağlı olarak sertlik (HV) ve kalıntı ostenit (γ) oranının değişimi (Laird ve ark. 2000)

Çok miktarda kalıntı ostenit içeren dökme demirlerde ikincil sertleşme, su verildikten sonraki sertlikten daha fazla sertlik oluşturur. Maksimum ikincil sertleşme için temperleme sıcaklığı kalıntı ostenitin kararlılığına bağlıdır. İkincil sertleşmeden sonraki aşınma direnci genellikle su vermeden sonraki aşınma direncinden düşüktür. Bunun sebebi, matriste önceden bulunan martensitin yumuşamasıdır (Laird ve ark. 2000).

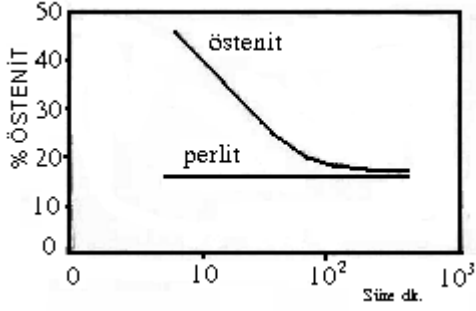
Kesit kalınlığının Cr/C oranı ve molibden içeriğine göre mikro yapı ve sertlik üzerindeki etkisi Şekil 1.31 a ve b' de gösterilmektedir. Kalın kesitli parçalarda soğuma hızına bağlı olarak mikroyapıda perlit oluşması beyaz dökme demirin sertliğini çok fazla düşürmese bile, aşınma direncinde önemli bir düşüşe sebep olabilir.



Şekil 1. 31. Çeşitli kesitlerdeki yüksek kromlu demirlerde havada su vermeden sonra matris yapısına ve sertlik üzerine karbon ve molibden içeriğinin etkisi (Fairhurst ve Röhring 1974)

- % 12 – 14 Cr, % 1,5 Mo'de karbon içeriğinin etkisi,
- % 12 – 14 Cr, % 3 C'da molibdenin etkisidir.

Homojenleştirme ısıl işlem süresi arttıkça östenit miktarı düşer (Şekil 1.32).



Şekil 1. 32. Homojenleştirme ısı işleminin süresinin etkisi ve oda sıcaklığına soğuma üzerinde kalıntı östenit miktarında başlangıç matris yapısı (Laird ve ark. 2000)

Karışık martenzit ve perlit yapısı, önce ostenitik sonra da martenzitik matriste oluşan perlit dönüşümüyle ilgili diferansiyel değişikliklerden dolayı iç gerilmelere de sebep olabilir. Bu tipte karışık yapıları olan dökümlerin hem aşınma direnci hem de kırılma direnci azdır.

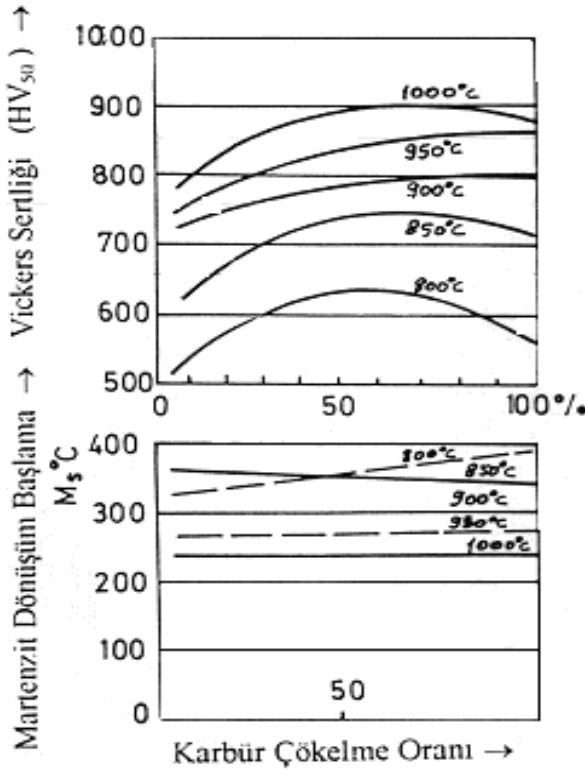
Mikroyapıdaki kalıntı ostenit sertliği düşürür. Kalıntı ostenit miktarı destabilizasyon işlemi ile azaltılabilir. Kalıntı ostenitin kararlılığını azaltmak için bu fazın krom ve karbon içeriğini azaltmak gerekir. Bu; destabilizasyon süresini uzun tutmakla olur. Nikel veya bakır içermeyen alaşımlarda bu süre en az bir saattir. Molibdenin kalıntı ostenite etkisi çok azdır. Bununla birlikte % 0,5 – 1,0 Ni ve Cu içeren beyaz dökme demirlerde yeterli kararlılık, destabilizasyon sıcaklığında 6 saat ya da daha fazla durularak sağlanır. Sonuçtaki düşük karbonlu ostenit, nikel veya bakırsız alaşımların elde edilen yüksek karbonlu martenzitten daha düşük bir sertliğe ve aşınma direncine sahip olan düşük karbonlu bir martenzite dönüşür.

1.3.10.2. Martenzit dönüşümü

Martenzit dönüşüm süreci ikincil karbür çökmesi ile ilgilidir. Daha önce belirtildiği gibi M_s sıcaklığı ostenitin bileşimine bağlıdır. İkincil karbürlerin çökmesi ostenitin karbon ve krom oranını azalttığı ve M_s sıcaklığı ile birlikte M_f sıcaklığını yükselttiği için martenzit dönüşüm oranı artar. M_s ve M_f sıcaklığı ostenitleme sıcaklığı düştükçe azalır. Bu azalma matrisin sıcaklık arttıkça karbon ve krom bakımından gittikçe fakirleştiğini gösterir. Bu olay daha önce incelenen Fe – C – Cr sistemi denge diyagramlarından beklenen durumdur.

%10 karbür çökme oranına kadar, martenzit dönüşüm oranı yeniden ostenitleme sıcaklığından bağımsızdır. Bunun nedeni; M_s sıcaklığında etkin olan elementin en düşük karbon alanı olmasıdır.

Şekil 1.33' de karbür ve martenzit dönüşüm oranı ile sertliğin ilişkisi daha açıkça görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi, M_s sıcaklığı karbür dönüşüm oranından bağımsızdır (Arıkan 1999).



Şekil 1.33. Karbür çökeltme oranı-M_s-Sertlik ilişkileri

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin matrisleri katılaşma sırasında oluşan ayrışma nedeni ile homojen bir bileşime sahip değildir. Martenzit dönüşüm oranı karbür çökeltme oranı ile birlikte artar.

Yüksek sıcaklıklarda karbür çökeltme oranının artması ile oluşan sertlik düşüşü kalıntı ostenit oranının artışı ile ilgilidir. Düşük sıcaklıklardaki düşüş, martenzitteki karbonunun azalması nedeniyledir. Matrisin sertliği, martensit dönüşüm oranı oluşan martensitin sertliğine bağlıdır. Martensitin sertliği de içerdiği karbon miktarına bağlıdır.

1.3.10.3. Tavlama ve temperleme

Yüksek sertlik ve karbür içeriği nedeniyle beyaz dökme demirlerin işlenmesi çok zordur. Ancak, yüksek krom ve molibden içeren beyaz dökme demirlerin işlenebilirliğini arttırmak için tavlama yapılabilir. Tavlama işleminin amacı martensit veya ostenit içermeyen

perlitik matris elde etmektedir. Genellikle yüksek sertleşebilirliğe sahip beyaz dökme demirler için tavlama prosesi oldukça uzun bir ısıl işlemi kapsar.

Çizelge 1.7’de bazı yüksek krom molibdenli beyaz dökme demirlere ait ısıl işlem şartları belirtilmektedir.

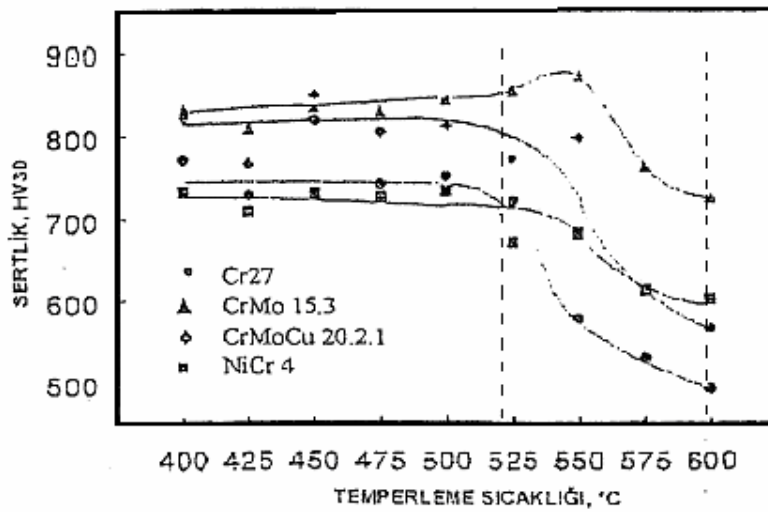
Çizelge 1. 7. Yüksek krom molibdenli beyaz dökme demirlerin ısıl işlem şartları (Fairhurst ve Röhring 1974)

| Sınıf (ASTM A532-67) | Sertleştirme | | | Temperleme Sıcaklığı (°C) |
|----------------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| | Sıcaklık (°C) | Su Verme Süresi | Su Verme Ortamı | |
| 15-3 | 920-960 | ½-1 saat | Hava | 200-260 |
| 15-2-1 | 920-960 | 4 saat min. | Hava | |
| 20-2-1 | 950-1000 | 6 saat min. | Hava | |

Bu işlem aşağıdaki şekilde yapılır:

- 930 – 980°C’da 2 saat bekletme,
- 820°C’a kadar 60°C/saat hız ile kontrollü soğutma,
- 700-720°C’a kadar 10-15°C/saat hız ile kontrollü soğutma,
- 700-720°C’da 4 – 20 saat bekletme.

Şekil 1.34’de temperleme sıcaklığındaki artış ile sertlikteki değişim görülmektedir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde yaklaşık 500 °C’ ye kadar yapılan temperleme işlemlerinde çok fazla bir değişim görülmez. Yaklaşık 500 °C’ den sonra temper gevrekliğinden dolayı sertlikte ani bir artış ve yaklaşık 550 °C’ den sonra ani bir düşüş görülmektedir.



Şekil 1. 34. Yüksek kromlu beyaz dökme demir sertlik (HV30)-temperleme sıcaklık eğrileri (Laird ve ark. 2000)

Tavlamadan sonra sertlik 350 – 450 HB arasında olur. Bu durum, dişli testere ile kesme de dahil olmak üzere işleme operasyonlarına imkân tanır. Ötektik krom karbürler tavlama işleminden etkilenmedikleri için işlenebilirliği etkileyen başlıca faktör, karbon içeriğidir. En kolay işlenebilir sınıf 15-3 LC tipidir. Karbon içeriği % 3'ün üzerine çıktığında işleme operasyonu zorlaşır.

1.4. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Aşınma Direnci

1.4.1. Abrasiv aşınmanın tanımı

Aşınma, bir yüzeyden diğer bir yüzeye malzeme transferi veya aşınma parçalarının oluşumu neticesinde ortaya çıkan malzeme kaybıdır. DIN 50320'de aşınma; “kullanılan malzeme yüzeylerinden mekanik sebeplerle ufak parçaların ayrılması suretiyle meydana gelen değişiklik” olarak tanımlanmaktadır. Benzer şekilde bir aşınma tanımı da aşınma ve erozyonla ilgili terminolojiyi içeren ASTM G-40-93 standartlarında verilmektedir.. Bu tanımlamalara göre makine parçalarının yüzeylerinin taşlanması, parlatılması veya elemanların birbirlerine alıştıırılması işlemlerini aşınma olayı olarak incelemek gerekir. Çünkü bu olaylardaki yüzey değişiklikleri uygulayıcı tarafından bilinerek ve istenerek yapılan bir işlem olduğundan bunlar birer aşınma olayı olarak değil bir işleme veya talaşlı şekillendirme olayı olarak kabul edilmelidir.

Aşınma türlerinden biri olan abrasiv aşınma yırtılma veya çizilme aşınması olarak da isimlendirilir ve sistemde hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Abrasiv aşınma; biri diğerinden daha sert ve pürüzlü olan metal yüzeylerinin birbiriyle temas halindeyken kayma sırasında meydana gelir.

Abrasiv aşınma bir gerilim sonucu oluşur. Gerilimlerin başlıca kaynağı, sertlik ve hız'dır. Metal olmayan malzemelerin sebep olduğu aşınma genellikle çizilme şeklindedir.

Sert parçacıkların yumuşak metale batması abrasiv aşınmaya sebep olabilmektedir. Bu mekanizmaya örnek olarak, sisteme dışarıdan giren toz parçacıklarının veya bir motorda oluşan yanma ürünlerinin sebep olduğu aşınma tarzı verilebilir.

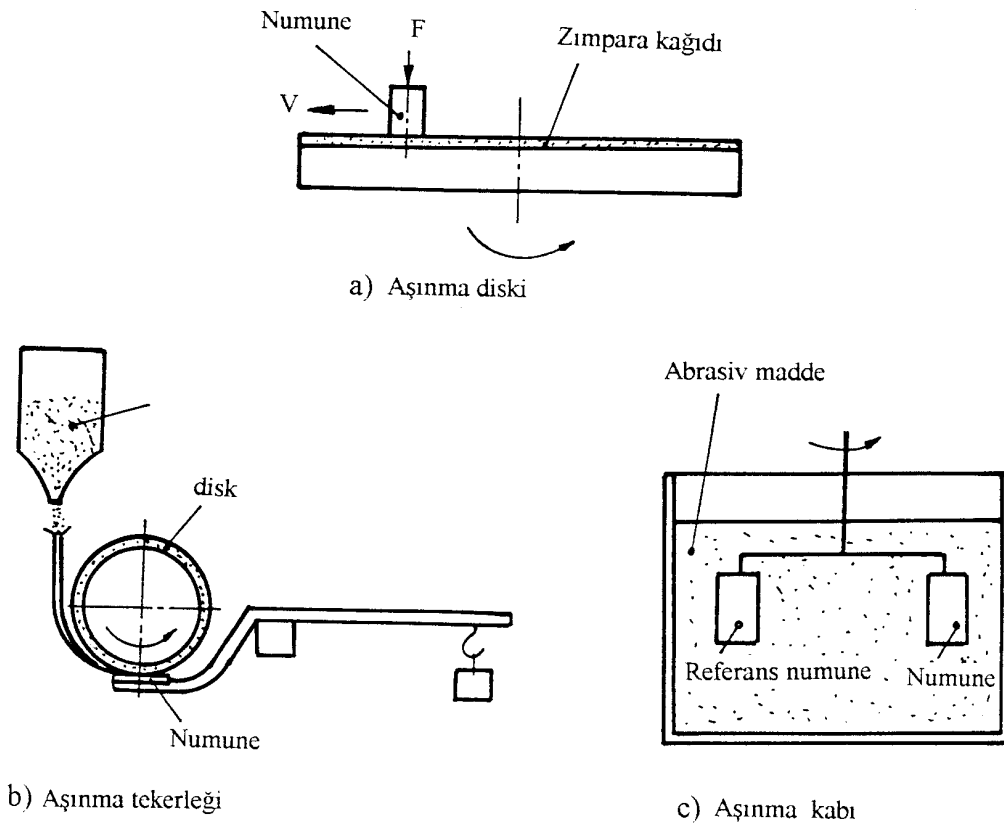
Abrasiv aşınma hızı malzeme yüzeyine etki eden yük azaltılarak düşürülebilir. Böylece, parçacıkların yüzeye daha az batması ve çapak kaldırılması sırasında daha az iz bırakması sağlanır. Malzeme açısından abrasiv aşınmayı azaltmak için;

- Daha sert alaşım kullanmak,
- Sertlik arttırmak amacıyla ısıl işlem uygulamak,
- Malzeme yüzeyini sert bir tabaka ile kaplamak,

tavsiye edilir. Bu önlemlerle abrasiv aşınma hızını azaltmak mümkündür.

1.4.2. Aşınma deneyleri ve ölçüm yöntemleri

Aşınma, endüstrinin hemen hemen her alanında karşılaşılan önemli bir problemdir. Makine sanayinde makine parçalarının aşınması, maden sanayinde madenlerin öğütülmesinde kullanılan bilyaların ve öğütme çubuklarının aşınması birkaç örnek olarak verilebilir. Aşınmanın yarattığı ekonomik kayıpları asgari düzeye indirebilmek amacıyla sürekli araştırmalar yapılmaktadır. Aşınmaya maruz kalan parçalar, aşınma direnci yüksek malzemeler olarak üretilir ve kullanılırlar. Aşınma deneyleri için laboratuvarlarda çok değişik aşınma deney cihazları kullanılmaktadır. Abrasiv aşınma test cihazlarının bazıları Şekil 1.35’de görülmektedir.



Şekil 1. 35. Abrasiv aşınma test yöntemleri (Albertin ve Sinatora 2001)

Aşınma deneylerinde kullanılan ölçüm yöntemleri şunlardır;

1. Ağırlık farkı metodu,
2. Kalınlık farkı metodu,
3. İz değişim metodu,
4. Radyoizotop metodu'dur.

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün, alet duyarlılık kapasitesi dahilinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntem ağırlık farkı metodudur. Deney numunelerinin her ölçümü için numunenin yerinden çıkartılıp ölçme yapılması, yani numune yerindeyken üzerinden ölçü alınmaması bu yöntemin dezavantajıdır. Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-4} veya 10^{-5} hassasiyeti bir terazi yardımıyla yapılır.

1.4.3. Beyaz dökme demirlerde aşınma

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin artan uygulama alanları ve pazar payı üstün darbe direnci ile kombine edilmiş aşınma direncine dayanmaktadır. Ayrıca bazen tavlandıktan sonraki işleme imkânı da bir avantajdır.

Çizelge 1.8'de çeşitli malzemelerin öğütme ve oyuklayıcı aşınma altındaki performansları, tokluklarına dayanılarak verilmektedir.

Çizelge 1. 8. Çeşitli malzemelerin öğütme ve oyuklayıcı aşınma altındaki performansı (Fairhurst ve Röhring 1974)

| Malzeme | Tokluk sırası | Bağıl aşınma kaybı | |
|---|---------------|--------------------|-----------------|
| | | Oyma aşınması | Öğütme aşınması |
| Östenitik Mn Çeliği (% 12 Mn) | 1 | 0.34 – 0.19 | 138 - 142 |
| Martenzitik az Alaşımli Çelik (% 0.3 – 0.6 C) | 2 | 0.28 – 0.15 | 126 - 114 |
| Östenitik Mn Çeliği (% 6 Mn - % Mo) | 3 | 0.25 – 0.17 | 114 - 120 |
| Cr / Mo Çeliği (% 0.7 C), Su verilmiş+ Temp. | 4 | - | 126 - 130 |
| Martenzitik 6 Cr / 1 Mo Çeliği (% 1 C) | 5 | 0.1 | 102 - 97 |
| Martenzitik Yüksek Cr / Mo'li Beyaz D.D. | 6 | 0.08 – 0.035 | 85 - 90 |
| Martenzitik 26 Cr'lu Beyaz D.D. | 7 | 0.17 – 0.09 | 96 - 100 |
| Martenzitik Az Alaşımli Cr / Ni D.D. | 8 | - | 105 - 116 |
| Perlitik Çil Uygulanmış D.D. | 9 | 0.4 | 185 - 200 |

Mikroyapıdaki karbürlerin hacim oranı ve morfolojisi çok önemlidir. Genellikle mikroyapıdaki karbür oranı arttıkça aşınma direnci artmaktadır. Bununla birlikte, matris çatlayan ve deforme olan karbürleri yeterli kuvvetle yerinde tutarsa karbürler aşınma direncini etkiler.

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

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 çatlakan karbürlerin kopması,
5. Karbürlerin yorulma nedeniyle çatlayıp kopmasıdır.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin yüzeyindeki karbürlerin abrasiv aşınma şartlarına karşı davranışı aşınma yüzeyi ve aşınma yönüne göre karbürlerin oriyantasyonuna bağlı olarak farklılık gösterir. Karbür çubuklarının uzun ekseni aşınma yüzeyine paralel olduğunda, yüksek kromlu beyaz dökme demirler, karbürlerin uzun ekseni yüksek gerilmeli abrasiv aşınma şartları altında aşınma yüzeyine dik olduğu durumdakinden daha yüksek aşınma direncine sahip olurlar.

Yüksek krom – molibdenli beyaz dökme demirler bileşimindeki krom içeriği nedeniyle iyi bir korozyon direncine sahiptirler. Mikroyapıdaki sert ötektik karbürler mükemmel aşınma direncinin nedenidir. Molibden ise perlit oluşumunu önleyerek ve sertleşebilirliği artırarak aşınma direncine katkıda bulunur.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlere Nb, B, Ce, La, Nd gibi elementler alaşımlayıcı olarak katıldıklarında, dökme demirin aşınma davranışını etkilerler.

Son derece sert karbürler oluşturduğundan ve yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin (% 15 Cr) matris sertliğini arttırmasından dolayı niyobyum ilavesi yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin aşınma direncini arttırır. Niyobyum ötektik noktayı sağa kaydırır, bu yüzden demir gevrek hiper – ötektik karbürler oluşturma tehlikesi olmaksızın yüksek bir karbon içeriğine sahip olabilir. NbC'ün morfolojisi blok-çengel şeklindedir. Bu şekildeki karbürler matris içinde sıkıca tutunabilirler.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlere (% 28 Cr) bor ilavesi; karbürlerin hacim oranını arttırır ve karbürleri daha sert yapar, döküm halinde karbürleri kalınlaştırır ve martensit oluşumunu ilerletir. % 0,2 B ilavesi, 1050 °C'dan havada su verme şartlarında iki elemanlı abrasiv aşınma durumunda aşınma direncine önemli miktarda yardım eder.

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 Partikülü çökelir. Bu pek çok çekirdekleşme serbest dendritik, Çubukumsu veya taç yaprağı şeklinde karbür büyümesini bastırır.

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 arttırdığı bildirilmektedir.

1.4.4. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde abrasiv aşınmayı etkileyen faktörler

Yüksek krom – molibdenli beyaz dökme demirlerin abrasiv aşınma özelliklerini başlıca iki faktör etkiler. Bunlar beyaz dökme demirin matris yapısı ve bu matriste yer alan karbürlerin yapısıdır.

1.4.4.1. 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 mukavemetinin %40-50 karbür oranda elde edildiği, fakat daha sert olursa bu oranın %30 civarına düştüğü saptanmıştır. Pearce çalışmalarında, plaka şeklinde olan M_3C karbürleri ile ince M_7C_3 karbür çubuklarının kırılmadan aşınma yönünde plastik deformasyona uğradıklarını gözlemlemişlerdir (Dikeç, 1971). Diğer bir çalışmada da karbürler arası uzaklık azaldıkça veya östenit taneleri küçüldükçe aşınma mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir.

Birbirine yakın yerleşmiş karbürler, matrisin desteklenmesi ve matrisin plastik deformasyon kabiliyetinin azaltılması bakımından abrasiv aşınma direnci üzerine faydalı bir etkiye sahiptir. Örneğin karbürlerin abrasivlere direnç gösterecek kadar sert olduğunu düşünürsek ve abrasivlerin, 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.

Diğer taraftan eğer abrasiv partiküller komşu iki karbürün arasındaki matris fazına batacak kadar küçük değilse, aşınma hızı karbürlerin kopma hızına bağlı olacaktır. Böyle bir durumda karbür ve abrasivin sertliği, karbür boyutu, karbür hacim oranı, abrasiv tipi, abrasivin köşelilik durumu daha az önemlidir (Çelik, 1991).

1.4.4.2. 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.

Gundlach (1993) tarafından (%17,5 Cr-%3C) yüksek gerilmeli şartlarda beyaz dökme demirlerin aşınma direnci matris tarafından ötektik karbürlere verilen desteğin seviyesine

bağlı olduğunu; martensitik matrisli yapılar, ostenitik veya perlitik matrisli yapılara göre daha büyük aşınma direnci verdiğini ortaya koymuşlardır. Benzer görüşler diğer araştırmacılar tarafından da ileri sürülmüştür (Pearce 1984).

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 mikrosertlik artışı aşınma direncini etkilemez.

Aşınmaya sebep olan gerilmeler yüksek olursa martensitik yapı ostenitik yapıya göre iki üç kat daha iyi aşınma direnci gösterir. Martensitik yapı ostenitleme işlemi ile sağlandığı için bu işlem sırasındaki reaksiyonlar martensitin yapısı açısından önemlidir.

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

1.5. Yüksek Kromlu Dökme Demirlerde Darbe Direnci

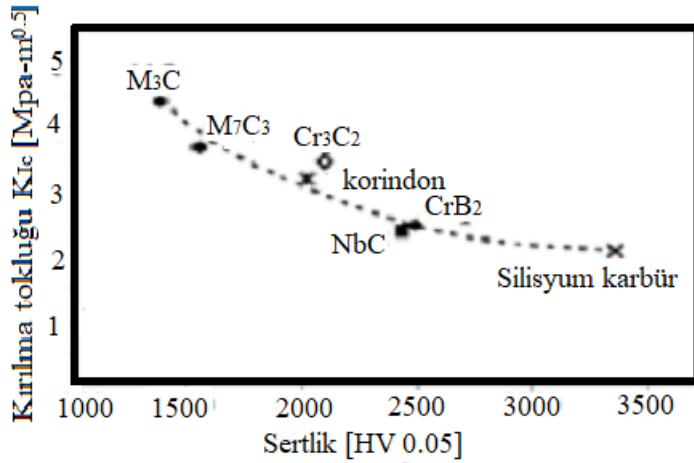
Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde darbe testi çok şey ifade etmemektedir. Çünkü, darbe enerjisi sürtünme ve kırılma esnasındaki parçaların ayrılması ile açığa çıkan enerjiye eşdeğerdir. Ancak, AFS özel Fe komitesi tarafından hazırlanan büyük boyuttaki (50x50x180mm) (5-D) darbe çubukları darbe direncinin tayininde başarılı olduğunu ve bu çubukları kullanarak farklı ısıl işlemler, farklı karbür yüzdesine sahip ve farklı matristeki dökme demirlerin darbe dirençlerini iyi bir şekilde tespit edildiğini savunmuşlardır (Laird ve ark. 2000).

Çentikli veya çentiksiz numunelere yapılan darbe deneyleri yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin, az alaşımlı beyaz dökme demirlerden daha tok olduğunu gösteren bir dağılım aralığı ortaya çıkarmaktadır. Örneğin, 30 mm' lik çentiksiz izod deney çubukları az alaşımlı beyaz dökme demirde 22 -58 J darbe enerji verirken, yüksek alaşımlı beyaz dökme demirde 52 – 87 J darbe enerjisi vermektedir. Karbon miktarı artışı darbe direncini düşürür.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde döküm sıcaklığının üzerinde bir ısıtma (süper ısıtma) yapıldığında, darbe tokluğunda değişimler gözlenmiştir. Süper ısıtma, ötektik altı alaşımlarda olumsuz bir etki oluştururken, ötektik üstü alaşımlarda çok iyi sonuçlar vermiştir. Ötektik alaşımların darbe tokluğunu ise çok az arttırdığı tespit edilmiştir (Laird ve ark. 2000).

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü için süper ısıtmaya karşı darbe tokluğunda değişim farklılık gösterir.

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 uygulanmıştır. Karbon artışı ile martenzitik beyaz dökme demirlerin kırılma tokluğu azalır. Ayrıca yapı içerisindeki karbür çeşidi de kırılma tokluğuna etki eden faktörlerden biridir (Berns 2003). Sertlik ve kırılma tokluğu arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Şekil 1.36' da bazı karbür çeşitlerinin sertliğe bağlı kırılma toklukları verilmiştir.



Şekil 1. 36. Bazı karbürlerin sertlik ve kırılma toklukları arasındaki ilişki (Berns 2003)

2. LİTERATÜR TARAMASI

Yüksek kromlu dökme demir (HCrCI), aşınma ve erozyon direncinin gerekli olduğu alanlarda kullanıma uygun bir malzemedir. M_7C_3 ya da ötentik karbürler nispeten daha yumuşak demir matrisinde dağıldığı için yüksek kromlu dökme demir yüksek aşınma direncine sahiptir. Demir matrisi sert M_7C_3 karbürleri bağladığından, malzeme yüksek darbeler karşısında bile yüksek sertliğe sahip hale gelir (Bedolla ve ark. 2003, Doğan ve ark. 1997, Liu ve ark. 2001, Tabrett ve Sare 2000, Wiengmoon ve ark. 2005, Zhang ve ark. 2001). Alaşım elementlerinde, özel ısıl işlemler, farklı demir matris yapılarının elde edilmesini sağlar. Matristeki tipik mikro bileşenler arasında pearlit, martensit ve ostenit bulunmaktadır.

Yüksek kromlu dökme demirlerin katılaşması, ostenit içinde 35 karbürü M7C3 olabilen veya hipoutentik alaşımlarda hipereutentik olabilen ve bunları takiben her iki fazın da ötentik karışımının eşzamanlı 36 çökeltisini yapabilen birincil fazın oluşumuyla birlikte başlar (Yılmaz ve Teker 2016, Zum Gahr ve Eldis 1980).

Aşınma, endüstriyel parçalarda arızalanmalara sebep olan, katı formdaki yüzeylerden malzemenin sökülmesi, çıkıp ayrışması olarak bilinir. Buna benzer şekilde erozyon da, bir parçacık akımı tarafından tekrarlanan darbe ya da malzeme kaybıdır. Yüksek kromlu dökme demir alaşımları, maden ve malzeme endüstrisinde aşınmaya dayanıklı uygulamalar için yaygın olarak kullanımına başvuru bir malzemedir (Karantzalis ve ark. 2009, Wu ve ark. 2007).

En ekonomik olmayı hedeflemenin yanında üretilebilirlik ve kalitenin geliştirilmesiyle birlikte, öğütme bilyelerinin bundan böyle yüksek karbonlu dökme demirler kullanılarak geliştirilmiş yüksek performansa sahip yeni bir tür malzemeyle ilerlenmesi yönünde çalışılmaya başlandı. Daha öncesinde yüksek kromlu dökme demir alaşımlarının, martensit veya ostenit matrisindeki gömülü sert krom karbürlerin varlığı nedeniyle mükemmel aşınma direncine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu bağlamda, martensit gerilimin azalması sonucunda oluşan yüksek stres aşınması sırasında, tutucu ostenit, yüksek kromlu dökme demirlerin aşınma direncinde önemli bir rol oynar (Tian ve ark. 2009). Bununla birlikte, erozyon süresince matris sertliği, bu alaşımların aşınmasına karşı önemli bir parametredir. Sonrasında, Fe-Cr-C üçlü sisteminde çeşitli krom karbürler arasında tanımlanan M_7C_3 , HCrCI kompozisyonunda baskındır. Genel olarak, mikro yapıda bulunan karbürler, muhteviyattaki morfolojisine, türüne ve hacim oranına bağlı olarak, bozulma olmaksızın, uygulama için gerekli sertliği sağlarlar. Demir-Krom Fe-Cr karbürleri genel olarak baz alındığında, (Fe, Cr) $_7C_3$ ve (Fe, Cr) $_3C$ karbürleri M_3C karbür olarak kısaltılabilir (Barron 1982, Jha 2006).

Öte yandan, demirli matris yapısı, östenitleştirme ve su vererek soğutma tavlama gibi geleneksel ısıl işlemlerin yerini almaya müsaittir. Özellikle, çok sayıda ince ikincil karbürün çökmesi ve akabinde östenit yapıdan martensit yapıya dönüşmesi sayesinde sert bir matris elde edilebilir.

Nikel çoğunlukla östenitik fazda veya östenitten dönüşen fazlar içinde çözünen bir elementtir. Silise benzer bir biçimde nikel grafit oluşumunu teşvik eder. Beyaz ve çil dökme demirlerde bu etki genellikle her üç nikel oranı için bu oran krom ilavesi ile dengelenmeye çalışılır. Bir yapının tamamen beyaz dökme demir olması isteniyorsa krom miktarı yükseltilmelidir. Düşük ve orta laşımli dökme demirlerde enaz kromun nikel oranı 1.3 olarak kullanılmaktadır. Yüksek alaşımli dökme demirlerde östenitin kararlı hale getirilmesi için nikel oranı maksimum %15'e kadar artırılabilir (Guitar ve ark. 2018).

Yüksek kromlu dökme demirlerde nikel miktarı %15'e kadar artırılabilirken, düşük kromlu beyaz dökme demirlerde %2.5 oranında nikel ilavesi yapıdaki perlit miktarını artırdığı gibi perlit ebadını düşürmekte ve abrasive aşınma direncini iyileştirmektedir.

Büyük ebatlı yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde (%12-28Cr) nikel perlit oluşumunu engellemek için %0.2-1.5 oranında genellikle Molibden ile birlikte kullanılır. Bu oranın üzerine çıkılması istenmez. Çünkü, östenit kararlı hale gelir ve kalıntı östenit yapıda kalır. Büyük ebatlı parçalarda kompozisyon kontrolü daha bir önem kazanır. Çünkü, soğuma şiddeti kesit boyunca değişeceğinden su alma derinliği azalır ve yapıda martensit oluşumu zorlaşır (Gaspar ve Erturk 2013).

%12 oranının üzerinde nikel ilavesi korozyon ve ısı direncinin önem kazandığı uygulamalarda tercih edilir. Yüksek nikelli gri dökme demirler genellikle %1-6 Cr ve maksimum %10 Cu içerirler. Bu elementler nikel ile birlikte korozyona ve yüksek ısıda tufalleşmeye karşı direnç gösterirler. Dökme demirlerin %18'den fazla nikel ile birlikte kullanılmaları halinde yapıları tamamen östenitik bir yapı kazanır (Walton ve Opar 1981).

Yapılan genel literatür araştırmalarında bulunan sonuçlar; yüksek kromlu beyaz dökme demire yapılan deneyler sonucu elde edilen sonuçların farklılığı, numune hazırlamanın maliyeti, zorluğu ve hassasiyeti açısından sertlik dışında diğer mekanik testler çok fazla uygulanmamaktadır. AFS Fe komitesi tarafından hazırlanan 5-D çubukları ile yapılan darbe deneylerinin doğruluk açısından en yakın sonuçlar verdiği kabul edilmektedir.

Aşınma deneyleri, en çok uygulanan ve gerekli olan deneylerin başında gelmektedir. Matris fazının oranı, çeşidi, karbür ile yaptığı ara yüzey bağı ile alaşım elementlerinin oranı ve çeşidi aşınma direncini en fazla etkileyen faktörlerin başında gelmektedir.

Karbürler, yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin aşınma direncini ve mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktördür. Karbürün; şekli, çeşidi ve yapı içerisindeki hacim oranı en etkin faktördür. Ötektik altında, ötektik noktada ve ötektik üstünde farklı şekilde bulunabilirler. Yapı içerisine, birincil ve ikincil olmak üzere iki farklı şekilde dağılırlar. Çubuk şeklindeki karbürler aşınma direncini düşürürken, hegzagonal yapıli karbürler aşınma direncine çok büyük oranda katkı sağlamaktadır.

En iyi aşınma sonucunu veren matris martenzitik yapıya sahip olanıdır. Ancak darbe direncinin kötü olması bazı alanlarda kullanımını sınırlamaktadır. Bundan dolayı, ısıl işleme sertleştirilmiş kalıntı östenit de çok fazla oranda kullanılmaktadır.

Katılşma sıcaklığı C ve Cr miktarına bağılıdır. Yüksek döküm sıcaklıklarında kaba dentritik yapı oluşur. İnce taneli yapı ve ötektik karbür yapısının kontrolü için döküm sıcaklığı düşük tutulmalıdır.

Yapılan araştırmalar bu olayın sadece ötektik altı için geçerli olduğunu ortaya koymuştur. Ötektik üstündeki alaşımlar için döküm süper ısıtmanın darbe tokluğunu çok iyi derecede etkilediğı belirlenmiştir.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ısıl işlemin amacı martenzitik matris içinde ikincil karbürler oluşturmaktır.

Yağda su verme işlemleri çatlama riski oluşturduğu için su verme işlemleri havada yapılır. Bu nedenle yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin bileşimi, kesite ve boyuta uygun olarak havada sertleşmeye izin verecek şekilde yapılmalı ve uygun soğuma hızı kullanılmalıdır.

Bu çalışmada, yapılan literatür araştırmalarından görülen çalışmalardan farklı olarak, ısıl işlemin mikroyapılardaki etkileri, sertleştirme davranışı ve GX200Cr13Ni6WMoMn malzemesinin altkritik soğuma işlemine tabi tutulduğundaki aşınma direnci karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Deneylerde kullanılan malzemeler

Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de verilmiştir. Numuneler ötektik altı yüksek kromlu beyaz dökme demir olarak üretildi.

Çizelge 3. 1. Numunelerin kimyasal kompozisyonları

| Kimyasal kompozisyon (ağ.%) | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|------|------|------|
| Fe | C | Mn | Si | Ni | Mo | Cr | W | S | P | Cu |
| Kalan | 2.0 | 0.5 | 1.6 | 7.3 | 3.2 | 13 | 1.2 | 0.03 | 0.03 | 0.20 |

Döküm yöntemi ile numuneler üretildi. Döküm için AISI316 hurdası, yüksek kromlu ferrokrom ve düşük karbonlu çelik hurdası kullanıldı. Eriyik 50 Kg lık orta frekanslı indüksiyon ocağında eritildi. Kalıp CO2-reçine kalıplama sistemi ile üretildi. Numuneler keel blok 230×110×60/25mm ebatlarında alttan boşaltma pota ile üretildi. Mikroyapı ve aşınma testlerine tabi tutulacak numuneler 10x10 kesitinde hazırlandılar. Isıl işlem öncesi ve ısıl işlem sonrası yüzey sertlikleri Rockvell C sertlik ölçme metodu kullanılarak ölçüldü.

3.1.2. Abresife aşınma test makinesi

Denemelerde kullanılan numunelerin abresive aşınma testleri, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında geliştirilmiş olan abresive aşınma test makinesi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1). Abresive aşınma test makinesi; çeşitli malzemelerden oluşturulmuş numunelerin, döner bir silindir üzerine yapıştırılmış zımpara kâğıdı yardımıyla aşındırılarak aşınma başlangıcı ve sonundaki kütle farkının tayininde kullanılır. Gövde, aşındırıcı silindir, ağırlıklar ve numune tutucudan oluşmaktadır. Cihaz devri 160 dev/dk.’dır.



Şekil 3. 1. Abresive aşınma test makinesi

3.1.3. Isıl işlem fırını

Denemelerde numunelerin ısıl işlemleri Çorlu Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan Magmatherm Mt1105-b2 ısıl işlem fırınında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3. 2. Isıl işlem fırını

3.2. Yöntem

3.2.1. ısı işlemler

Deneilerde kullanılan numunelerin ısı işlem şartları Çizelge 3.2' de verilmiştir. Numunelere uygulanan ısı işlemler için dört farklı sabit sıcaklık seçilmiştir. Bu sıcaklıklar 900, 950, 1000 ve 1100 °C'dir. ısı işlem sonrası numuneler fırın içerisinde 1 saat süresince bekletilmiştir. Numuneler fırında, havada, yağda, tuzda, sıvı azotta ve basınçlı havada soğutulmuştur.

Çizelge 3. 2. Numunelere uygulanan ısı işlemler

| Numune | Kompozisyon | Tavlama | Soğutma ortamı |
|--------|-------------------|-------------|---------------------|
| S1 | GX200Cr13Ni6WMoMn | - | - |
| S2 | GX200Cr13Ni6WMoMn | 900 C, 1 h | Havada soğutma |
| S3 | GX200Cr13Ni6WMoMn | 900 C, 1 h | Fırında soğutma |
| S4 | GX200Cr13Ni6WMoMn | 900 C, 1 h | Yağda soğutma |
| S5 | GX200Cr13Ni6WMoMn | 900 C, 1 h | Hızlı soğutma |
| S6 | GX200Cr13Ni6WMoMn | 900 C, 1 h | Sıvı azotta soğutma |
| S7 | GX200Cr13Ni6WMoMn | 900 C, 1 h | Suda soğutma |
| S8 | GX200Cr13Ni6WMoMn | 900 C, 1 h | Tuzda soğutma |
| S8 | GX200Cr13Ni6WMoMn | 950 C, 1 h | Havada soğutma |
| S9 | GX200Cr13Ni6WMoMn | 1000 C, 1 h | Havada soğutma |
| S10 | GX200Cr13Ni6WMoMn | 1100 C, 1 h | Havada soğutma |
| S11 | GX200Cr13Ni6WMoMn | 1000 C, 1 h | Suda soğutma |
| S11 | GX200Cr13Ni6WMoMn | 1000 C, 1 h | Fırında soğutma |

3.2.2. Metalografik çalışmalar

Bu çalışmada ağırlıklı olarak numunelerinin mikroyapıları, yapı içindeki fazların oluşum sıcaklıkları, oluşum ısıları, sertlikleri, fazların ebatları, dağılımları, kimyasal konsantrasyonları, oranları ve numunelerin aşınma dirençlerinin belirlenmesine ağırlık verilmiştir. Numuneler metalografik olarak hazırlanırken 60-1200 meshlik SiC içerikli su zımparalarından geçtikten sonra 3 µm'luk elmas pasta ile parlatılmıştır. Dağlayıcı olarak pikral (3gr FeCl₃, 15ml HCP, 100ml H₂O) kullanılmıştır. Bu işlemlerden geçen numuneler optik mikroskop ve elektron mikroskobu (SEM) ile incelenerek farklı büyütmelemlerde fotoğrafları çekilmiştir.

3.2.3. Sertlik deneyleri

Numunelerin mikro sertlikleri Emco marka sertlik cihazında HV cinsinden ölçülmüştür. Her numuneden en az üç ölçüm yapılmış ve bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır.

3.2.4. Aşınma deneyleri

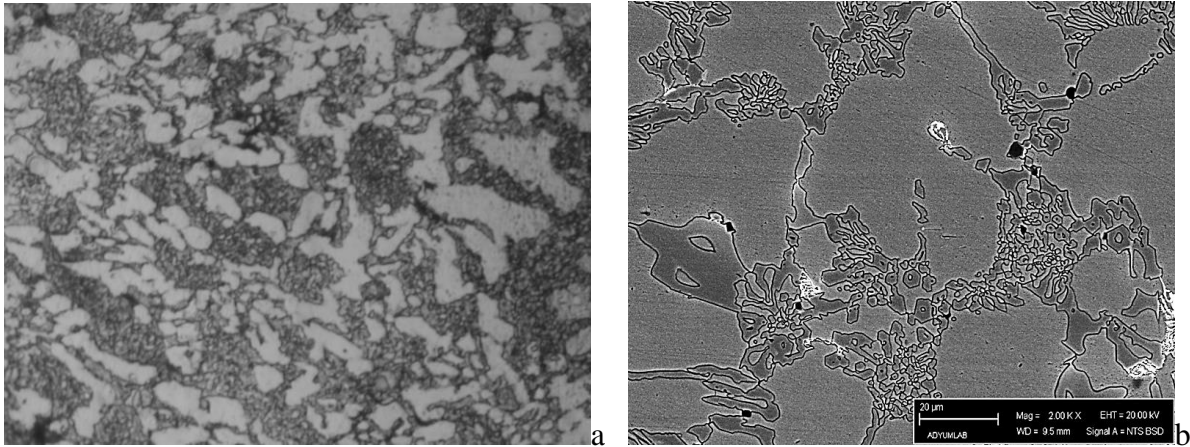
Numunelerin abrasiv aşınma karakteristiği pin-on-disc aşınma test cihazı kullanılarak ve ağırlık kayıpları 10, 20 ve 30 N luk yükler altında belirlenmiştir. Deney öncesi numuneler 1000 mesh' lik zımpara ile zımparalanmıştır. Numunelerin aşınacak yüzeyleri taşlama ile 64 mm² olacak şekilde eşitlenmiştir. Aşınma deneyleri oda sıcaklığında ve 80 mesh' lik zımpara kâğıdı üzerinde yapılmıştır. Numuneler cihazdaki üzerindeki numune yuvasına yerleştirilerek değişken yükler altında ve sabit yol ile aşınmaya tabi tutulmuştur. Numunelerin zımpara kağıdı üzerinde aldığı yol 28,338 m' dir ve numune ilerleme hızı 0,5 mm/devir olarak seçilmiştir. 10⁻⁵ gr hassasiyetindeki tartıda numuneler tartılarak ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. Her numune için üç test ve her testte yeni aşındırıcı kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Metalografi Sonuçları

Düşük kromlu beyaz dökme demirlerde %2.5 Ni kullanılması halinde yapıda perlit tanelerinin ebadı azalır ve sertlik artar. Nikel miktarının %4.5 in üzerine çıkması ile perlit oluşumu baskılanmış olur ve martensit fazı döküm kalıta soğurken bile oluşabilir. Nikel oranı %6.5 değerinin üzerine çıktığı anda martensit fazı her şartta yapıda tezahür eder. Östenitin martensite dönüştürülmesi özel ısıl işlem gerektirir. Ticari uygulamalarda genellikle %3.5-3.7C, 1.0 ile %2.2 Si, 5 ile %7 Ni ve %7-11 Cr kompozisyonu kullanılır. Bu tür malzemelerde M_7C_3 ötektik karbürler martensitik yapı içinde mevcuttur. Yapıda kalıntı östenit mevcut ise yapı aşırı soğutma veya homojenleştirme sonrası havada soğutma ile sertlik kazanır (Gundlach ve Doane 1990). Bu çalışmada ise yukarıda belirtilen ticari uygulamalarda kullanılan kimyasal kompozisyona sahip malzemenin bilinen özelliklerinin dışında karbon konsantrasyonu %2.3-2.0 değerlerine düşürüldü. Malzeme dökme demir karakterinden çelik karakterine dönüştürüldü. Yapıda martensit oluşumu engellenmeye çalışıldı. Böylece yapı suya çekildiğinde bile martensit oluşumunun engellenmesi ve yapıda sertlik için ikincil karbürlerin oluşması tercih edildi.

Dağlanmış numunelerin her biri öncelikle optik mikroskopta incelenmiştir. N1 numunesinin mikroyapı görüntüleri Şekil 4.1 de verilmiştir.

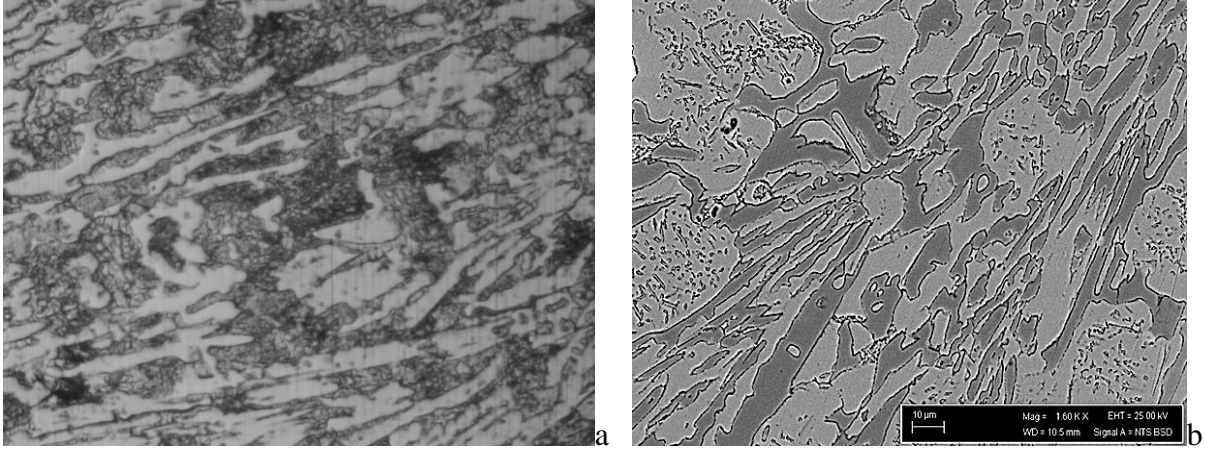


Şekil 4. 1. N1 numunesi a) optik20x50, b) SEMgörüntüsü

Şekil 4. 1' de döküm hali ve ısıl işlem görmemiş halde, N1 numunesinin mikroyapısı görülmektedir. Burada Primer karbürler ile kalıntı östenit matrisin önemli bir kısmını temsil etmektedir. Yapılan ısıl işlem şekline bağlı olarak yapı içinde primer karbürlerin şeklinin değişmesi ile birlikte matrisin de yapısal olarak değiştiği ve yapı içinde ikincil karbürlerin oluştuğu belirlenmiştir. Isıl işlemde soğutma şiddetine bağlı olarak numunelerin sertlikleri değişmiştir. Ancak, çeliklerde ısıl işlem soğuma şiddetine bağlı olarak sertlikteki artışın

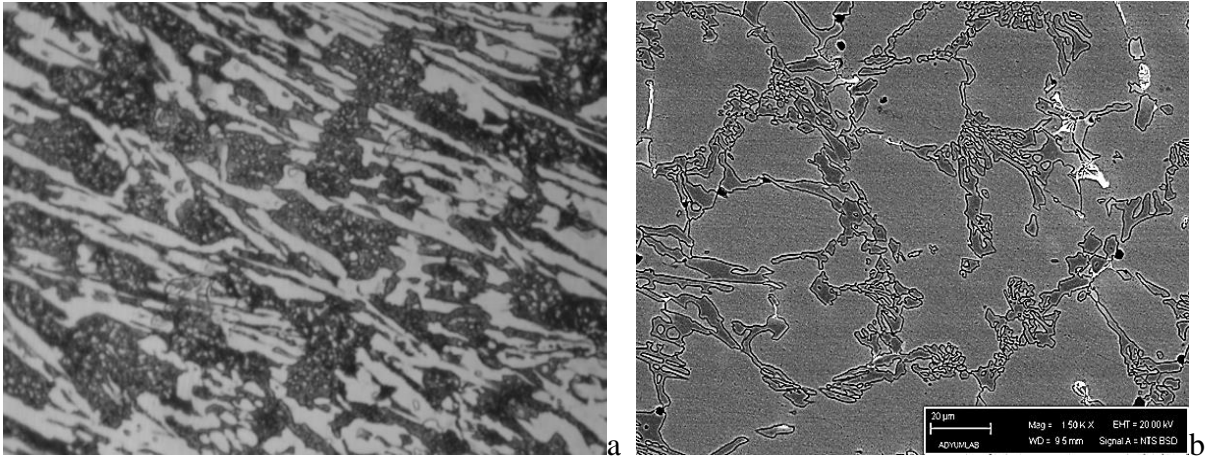
tersine soğuma şiddeti arttıkça sertlik düşmüştür. 1173 °K sıcaklığa alaşım ısıtıldığında primer kabürlerin çözünümü ile matris aşırı doymuş hale gelmektedir. Doymuş yapıda bulunan kabür yapıcı elementlerin (krom ve karbon) çözünümü ile yapıda ikincil kabürler teşekkül etmektedirler. Nikel elementinin yapıda %6 gibi kritik bir değerin üzerine çıkarılması ile yapıdaki östenit fazı bölgesinin genişlemesi ve kalıntı östenitin kararlı bir faz olarak ortaya çıkması bu durumu oluşturmamıza imkan tanımaktadır. Bu oluşum sayesinde martensit fazının oluşum sıcaklığı düşmektedir. Bu sayede, yapıda soğuma şiddetinden bağımsız olarak martensit fazının oluşumu engellenmektedir. Ancak, soğuma şiddetine bağlı olarak sıcaklık düştükçe östenit fazının krom ve karbonu çözüdürmesi mümkün olmadığından yapıda östenit ile birlikte soğuma şiddetine bağlı olarak karbon ve krom elementlerinin ikincil kabürler teşekkül etmektedirler (Arıkan 1999, Çimenoglu ve ark. 2001, Fairhurst ve Röhring 1974, Geçkinli 1989).

Katılma esnasında primer M_7C_3 kabürleri oluşurken soğuma gradyanına bağlı olarak farklı fiziksel şekillerde oluşurlar. Soğuma gradyanı boyunca kabürlerin önü bir ötektik hücre tarafından kesilerek büyümesi durdurulur (Pero-Sanz ve ark. 1999). Ötektik altı yapıda kabürler ince ama ötektik üstü demirlerde kabürler oldukça kalın ve uzun olabilirler (Pero-Sanz ve ark. 1999). Primer kabürler fiber biçimli yapıda oluşurlar. Numunelerin mikroyapısında iki farklı fiziksel görünüme sahip kabür görülmektedir. Primer olarak adlandırılan büyük ebatlı olan kabürler dendritik fiziksel yapısında oluşurlarken, ana matris içinde 1 µm ebadın çok altında ve tane içine dağılmış sekonder olarak adlandırılan kabürler oluşabilir (Pero-Sanz ve ark. 1999). N2 ve N3 numunesine uygulanan ısıl işlemler sonrası mikroyapıdaki değişimi Şekil 4.2- 4.3' de verilmiştir. Isıl işlem sonrası dendritik yapının bozulduğu kabürlerin devamlılıklarının kesintiye uğradıkları ve ana kabürlerin küçülmeye başladıkları, ısıl işlem süresinin özellikle M_7C_3 kabürlerinin ebatlarının küçülmesinde etkili olduğu görülmektedir. Matris içindeki küçük ebatlı ikincil kabürlerin ebatlarının arttığı görülmektedir.



Şekil 4. 2. N2 numunesinin a) optik 20X50, b) SEM görüntüsü

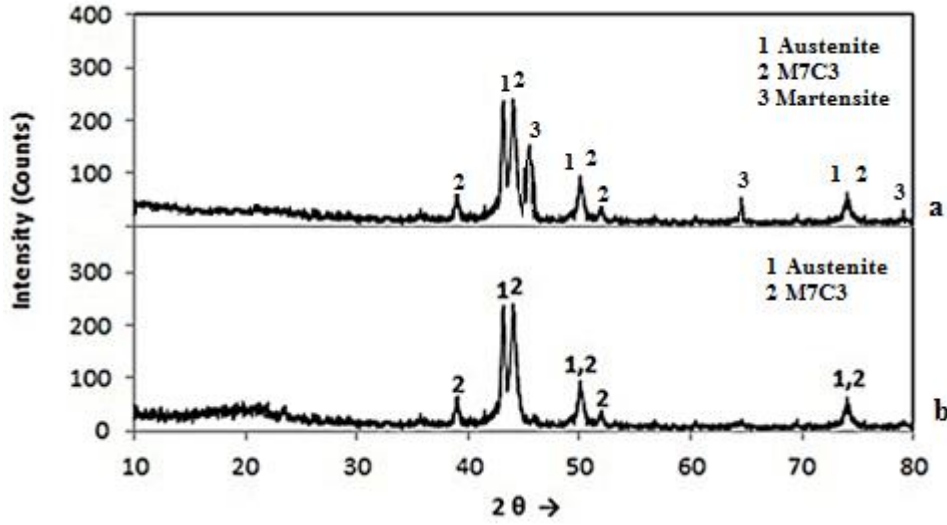
Şekil 4.2’ de 900 °C’ de numunenin ısıl işleme tabi tutulup havada soğutulmasının mikroyapıya etkisi görülmektedir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde bu tip bir ısıl işlem yapıda ikincil karbürlerin oluşmasına sebep olmaz. Ama yapıya %6 dan daha fazla Ni ilave etmemiz sebebiyle ana dokuda ikincil karbürlerin oluştuğu düşünülmektedir. Yapıdaki ikincil karbürlerin ebatları soğuma oranının artmasıyla düşmekte ve miktarları artmaktadır.



Şekil 4. 3. N3 numunesi a) optik 20X50, b) SEM görüntüsü

Şekil 4.3’de numunenin fırında soğutulmasıyla soğuma şidetinin fırın ortamında yavaş bir biçimde uygulanmasının mikroyapı üzerindeki etkisi görülmektedir. Ni elementinin yapı içindeki varlığı M_7C_3 karbürünün stabilitesini etkilemiş olduğu düşünülmektedir. Ni kompozisyonu kademeli olarak yapıya artırılmıştır. Yapıdaki Ni kompozisyonu %0.5 olaak uygulandığında mikroyapının ötektikaltı bir kompozsyon sergilediği görülmektedir (Kasama ve ark. 2004). Ni kompozisyonu %2’ye kadar artırıldığında ötektik mikroyapının varlığını görülür. Ni konsantrasyonu %4 ün üzerine çıktığında ötektik üstü mikroyapı tezahür etmeye başlar ve M_7C_3 karbürleri yapıda görülür (Kasama ve ark. 2004). Fırında soğutma sonrası görülen doku östenitik doku içinde ötektik primer karbürlerin varlığı olarak özetlenebilir.

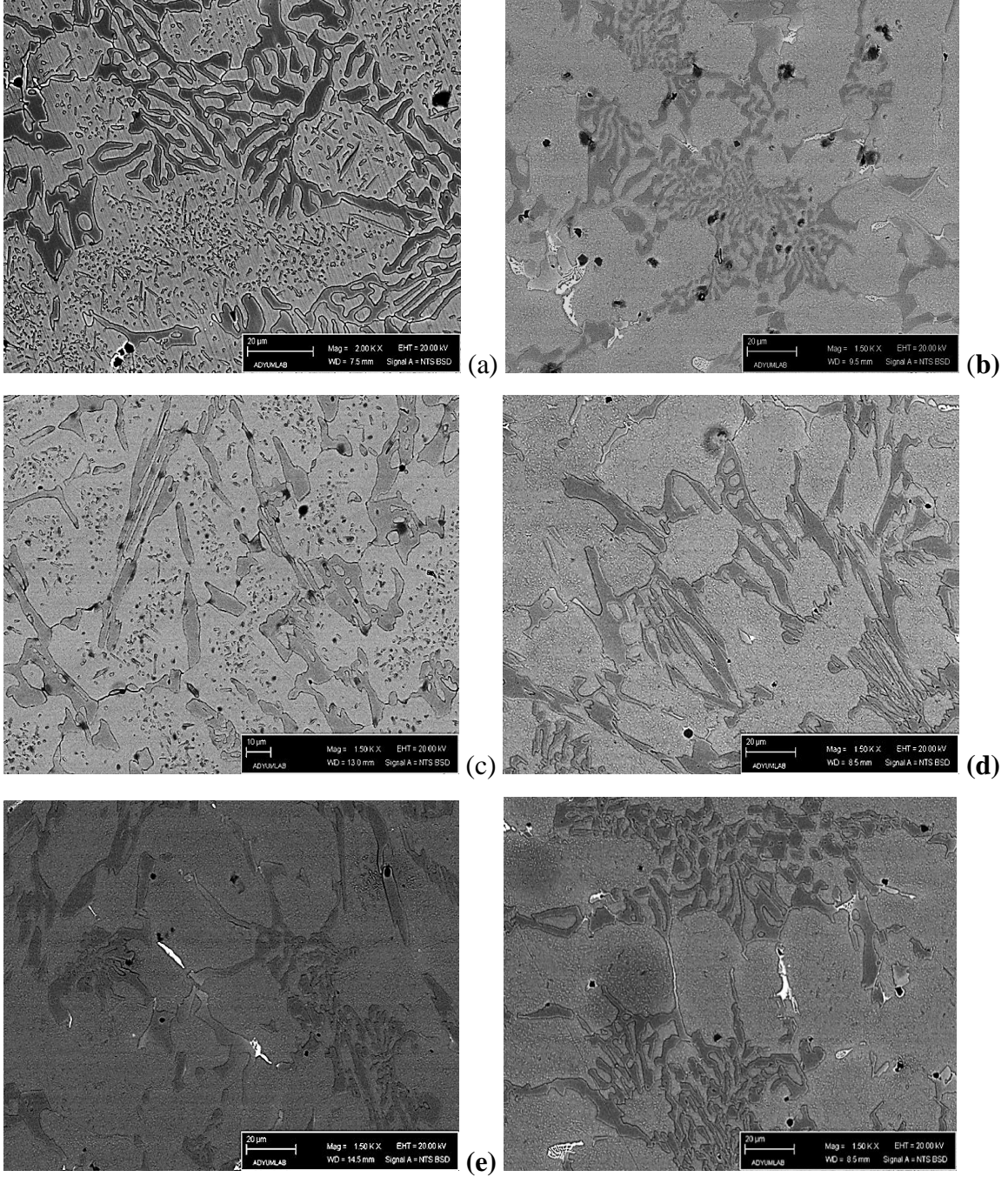
XRD ile yapılan incelemede dokunun yapısı Şekil 4.4 te verilmiştir. Numunelerin döküm sonrası mikroyapısı incelendiğinde fırında soğutma sonrası mikroyapı ile farklı bir doku olduğu görülmektedir. Fırında soğutma sonrası yapıda martensit fazı ek olarak tezahür etmekte ve malzeme sertlik kazanarak sertlik 60 HRC sertliğin üzerine çıkabilmektedir. Soğutma şiddetinin yapıdaki kalıntı östenit üzerindeki etkisi XRD diyagramında östenit ve karbür piklerinin yüksekliklerinin oranları ile bulunmaktadır. XRD sonuçları incelendiğinde her iki fazın karakteristik özelliklerinin standartlara göre büyük olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 4. XRD diyagramı a) döküm sonrası, b) ısıtım sonrası

Ötektik faz karışımı (östenitik matris ve $(Fe, Cr)_7C_3$ karbürler) içindeki östenit dendritleri nikel ilaveli martenzitik yapıdaki kalıntı östenite göre daha serttir. XRD sonuçlarına göre östenit ve primer karbürlerin oranları belirgin bir biçimde oranlanabilirler. Bu tür yapılardaki kafes parametresi standart kafes parametresine göre farklı sonuçlar verir. Bahsi edilen her iki faz karbonca aşırı doymuş olmaları sebebiyle literatürdeki standart kafes parametrelerine göre farklılıklar arzeder. Bu fazların karbonca aşırı doymuş olmaları ise martensit oluşum sıcaklığının düşmesi ve oda sıcaklığında bile kalıntı östenitin var olmasının sebebidir.

Şekil 4.5' de 900 °C sıcaklığa ısıtılmış numunelerin farklı soğutma ortamlarına bağlı olarak mikroyapıları verilmiştir. Yukarıda da bahsedildiği gibi numunenin döküm hali alaşım elementlerince aşırı doymuş bir yapıda bulunması sebebiyle dengesiz ve karasız bir konumdadır.



Şekil 4. 5. Isıl işlemin kalıntı östenit üzerindeki etkisi, a), 900 °C azot soğutma, b) 900 °C hava soğutma, c) 900 °C su soğutma, d) 900 °C yağ soğutma, e) 900 °C tuz soğutma (550 °C), f) ısıl işlemsiz

Şekil 4.5a’ da numune kriyojenik ortamda soğutulmuştur. Şekil 4.5b’ deki numune ise havada soğutulmuştur. İkincil karbürler bu her iki soğutma ortamında da oluşmuşlardır. Soğutma ortamı numunenin soğutma hızını belirler. Bu iki soğutma ortamı sonrası mikroyapı incelendiğinde kriyojenik ortamda elde edilen numunede ikincil karbürlerin havada soğutulmuş numuneye göre daha homojen dağıldığı görülür. Mikroyapılardan da görüldüğü

gibi soğutma hızı ikincil karbürlerin oranının yanında yapıdaki karbürlerin ebatların ve dağılımını da değiştirmektedir.

Isıl işlem uygulaması sonrası ısıl işlemin soğutma hızına bağlı olarak yapıda ikincil karbürler çökelmektedir. Yapı içindeki karbon konsantrasyonu ve matris içindeki krom konsantrasyonu önemlidir. İkincil karbürlerin oluşumu ile matris içindeki karbon ve krom konsantrasyonu düşer ve bunun sonucunda yapının martensit oluşum sıcaklığı artar. Sonuç olarak ikincil karbürlerin oluşumu neticesinde yapıda östenitin martensite dönüşümü kolaylaşır (Sapate ve Rao 2004). Bu sebeptendir ki, ikincil karbür oluşumu gösteren numunelerde kalıntı östenitin yapıda önemli miktarda azalması beklenen bir sonuçtur. Yapılan incelemelerde kalıntı östenit miktarının soğutma şiddetine bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Bu durum mikrosertlik, SEM ve XRD sonuçları ile teyit edilmiştir.

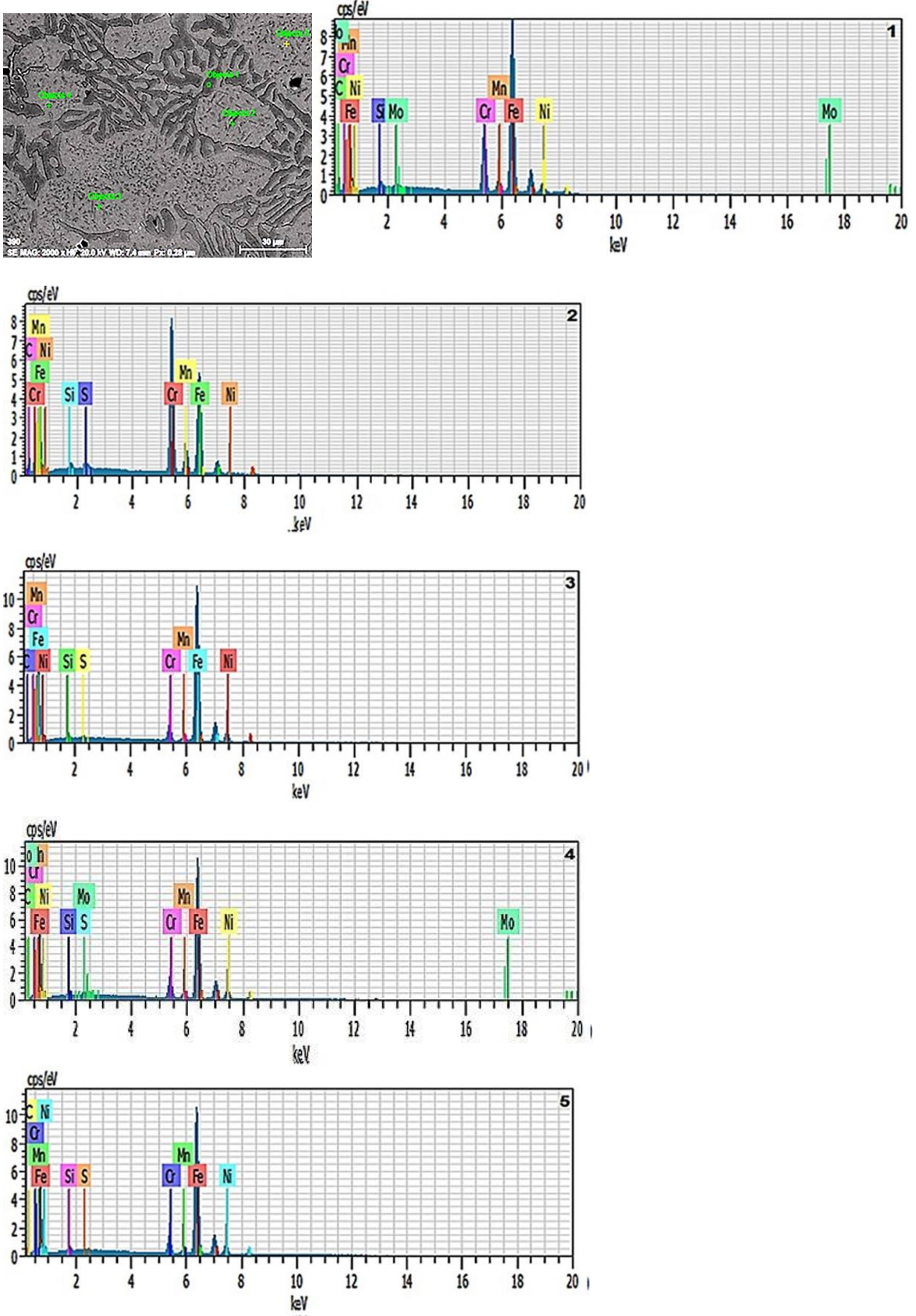
Bu sonuç aslında kalıntı östenit fazının düşük sıcaklıklardaki kararsız ve dengesiz morfolojisinden kaynaklanmaktadır. Bu kalıntı martensit fazına dönüşüme hazır ve küçük enerji değişimi ile dönüşebilecek konumdadır. Ancak, kriyojenik ortamda sulanmış GX200Cr13Ni6WMoMn numunelerde kalan kalıntı östenit martensite dönüşemez. Yapıda bulunan ağırlık %6'nın üzerindeki Ni elementinin varlığı bu dönüşümü engeller.

Şekil 4.5' de verilen SEM görüntüsündeki karbür ve ana matristen alınan EDS analizleri Çizelge 4.1' de verilmiştir.

Şekil 4.5' de verilen mikroyapı görüntülerinde ısıl işlem sonrası mikroyapı görüntüleri karşılaştırıldıklarında, ısıl işlem sonrası elde edilen yapıda karbür ebatlarında bir değişimin olduğu (Şekil 4.5), ısıl işlem sonrası karbürlerin dendritik yapıda oluşmadıkları görülmektedir. Mikroyapıdaki karbür ve matris içindeki Cr/C ve Fe/Cr oranları yapıdaki karbürlerin tipini belirlemede kullanılır (Liu ve ark. 2001). Literatür çalışmalarında Çizelge 4.1' de verilen değerler dikkate alındığında belirlenen karbürlerin $(Cr_5Fe_2)C_3$ karbürleri olduğu görülmektedir (Liu ve ark. 2001). Matristeki karbürlerin ise $(Cr_2Fe_3)C_3$ olduğu görülmektedir (Liu ve ark. 2001). Cr konsantrasyonundaki bu artış ile birlikte oluşan yapının serbest enerjisinin de arttığı literatür bilgilerinde verilmektedir. Cr konsantrasyonu mikro yapıda oluşan karbürün tipini belirler. Ancak, yapının ötektik üstü veya ötektik altı oluşumunu ise C ve Cr konsantrasyonu belirler. Soğutma şiddetinin ikincil karbürlerin yapısı, ebadını belirlemek için soğutma ortamı yağda, tuza ve su da soğutma olarak da denemiştir. İkincil karbürler en belirgin olarak kriyojenik ortamda tezahür etmiştir. Su verme şiddeti ortamda aşırı doymuş östenit fazının ikincil karbür dönüşümü üzerinde etkili olmuştur. Kriyojenik ortam sonrası ikincil karbür oranı %20 ve ebadı maksimum 7 µm, iken suda sulamada oran %15 ebat 2 µm, yağda sulamada oran %11 ebat 0.5 µm ve havada sulama da

ise oran %7 ebat 0.1 μm değerine dūřmūřtur. Sulama ortamının şiddeti kafes distorsiyonunu ve östenit fazının termodinamik olarak kararsızlığını artırır. Bu iki faktörün etkisiyle karbon ve alaşım elementlerinin dağılımı etkilenir. Yüksek aktivasyon enerjisine sahip küçük ikincil karbürler çökelmeye başlar. Homojenleřtirme sıcaklığı artışı çekirdekleşme enerjisini arttırır ve çekirdek sayısını arttırırken soğutma şiddetindeki arttış büyüme mekanizması enerjisini arttırıp çekirdeklerin büyümesine ve daha homojen dağılmasına vesile olur. şekil 4.5 incelendiğinde ikincil karbürlerin ebatları ve dağılımlarıyla soğutma şiddeti arasındaki ilişki görülecektir.

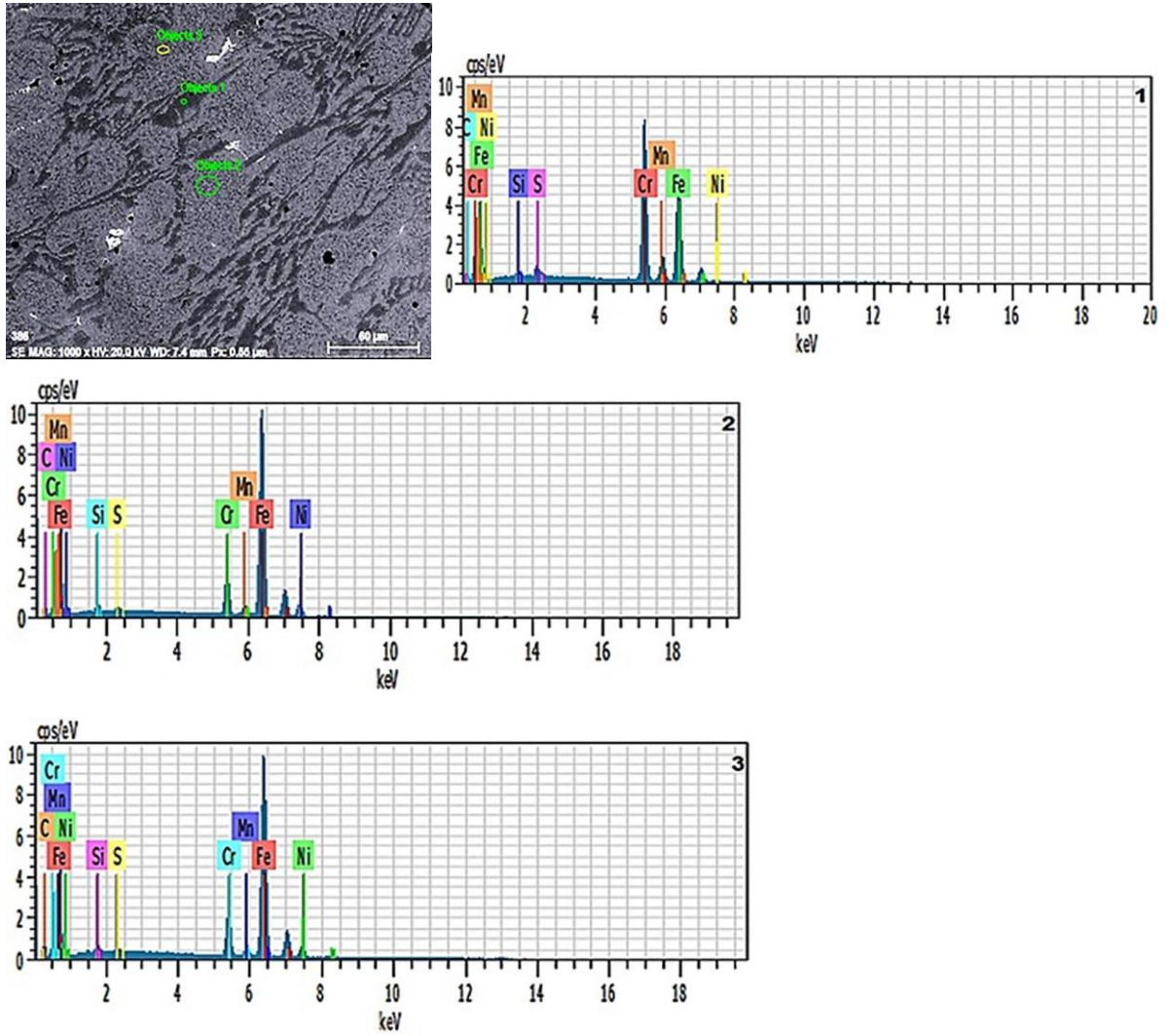
şekil 4.6'de kriyojenik olarak soğutulan numunenin SEM görüntüsü ile birlikte bu numunede farklı bölgelerden alınan noktasal analizleri göstermektedir. Kriyojenik ortamda soğutulan numunede EDS analiz değişimi Çizelge 4.1'de sunulmuştur. şekil 4.7'de havada soğutulan numunenin SEM görüntüsü ve farklı noktalardan alınan EDS analizleri görölmektedir. Havada soğutulan numunenin EDS analiz sonuçları ise Çizelge 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4. 6. Kriyojenik olarak soğutulmuş numunenin SEM görüntüsü ve bu görüntüdeki farklı bölgelerden alınan EDS analizleri

Çizelge 4. 1. Kriyojenik ortamda soğutulan numunede EDS analiz değişimi

| Numune | Analiz Noktaları | Elementer (ağ.%) | | | | | | | |
|--------------------|------------------|------------------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| | | Fe | Ni | C | Cr | Mn | Si | S | Mo |
| Kriyojenik soğutma | 1. Nokta | 45.83 | 3.74 | 38.23 | 10.53 | 0.48 | 0.83 | - | 0.89 |
| | 2. Nokta | 29.65 | 0.40 | 38.49 | 28.74 | 0.88 | 0.62 | 1.23 | - |
| | 3. Nokta | 66.34 | 6.67 | 20.77 | 4.28 | 0.23 | 1.26 | 0.45 | - |
| | 4. Nokta | 62.34 | 5.81 | 23.44 | 6.29 | 0.48 | 1.11 | 0.34 | 0.08 |
| | 5. Nokta | 64.11 | 0.23 | 1.09 | 0.16 | 0.06 | 0.06 | 0.04 | - |



Şekil 4. 7. Havada soğutulan numunenin SEM görüntüsü ve farklı noktalardan alınan EDS analizleri

Çizelge 4. 2. Havada soğutulan numunenin EDS analizi

| Numune | Analiz Noktaları | Elementer (ağ.%) | | | | | | |
|----------------|------------------|------------------|-------|-------|------|------|------|------|
| | | Fe | C | Cr | Ni | Si | Mn | S |
| Havada soğutma | 1. Nokta | 28.63 | 39.96 | 28.22 | 0.24 | 0.56 | 1.00 | 1.40 |
| | 2. Nokta | 59.65 | 25.82 | 6.81 | 5.80 | 1.21 | 0.35 | 0.36 |
| | 3. Nokta | 52.45 | 34.08 | 7.30 | 4.39 | 0.96 | 0.40 | 0.39 |

Döküm sonrası mikroyapı alaşım elementlerinin aşırı doygunluğu sebebiyle termodinamik olarak kararlı değildir. Matristen bu elementlerin ikincil karbür olarak çökelmeleri kritik ısı işlem süresinde gerçekleşir. Dolayısıyla karbon ve krom konsantrasyonu matriste azalır. Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’ de EDS analizlerinde soğutma şiddeti sonrası matristeki karbon ve krom konsantrasyonu bu sonucu teyit etmektedir. Tabiatıyla soğutma şiddetine bağlı olarak matrisin Cr ve C a aşırı doymuş olması ve oda sıcaklığında kararsız östenitin dengede olamaması sebebiyle soğutma şiddetinin artışı matristen ikincil karbürlerin oluşmasına vesile olmaktadır. Tabiatıyla östenitin tamamen ikincil karbürlere dönüşümü uygulanan ısı işlemler ile mümkün olamamıştır. Bu çalışmada östenitin kararsızlığının artırılması ve ikincil karbürlerin oluşturulması Ni elementinin varlığıyla sağlanabilmiştir. Yapılan testlerde Ni oranının %6 nın üzerine çıkarılması sonrası yapıda ikincil karbürlerin oluşumu sağlanabilmiştir (Erdoğan 2000, Arikan ve ark. 2001).

Bu çalışma sonrası, yapının Ni ile takviye edilmesi ve ısı işlemlerin uygulanması sonrasında karbürlerin çita tipli yapıdan tam ve homojen olarak küresel bir yapıya dönüşümlerinden bahsetmek mümkün değildir. Çünkü, çekirdekleşme homojen ve mükemmel dağılımlı olarak gerçekleşmemiştir. Demir, yarı kararlı sıvı yüzeye yaklaştığında küçük katı tanecikleri çekirdekçik rolü oynarlar. Katılaşma devam ettikçe ilave harici tanecikler sıvı metalin çekirdekleşme ve katılaşma hızında önemli rol oynarlar. Sıcaklık düşüktüçe dendritler yarı kararlı yüzeyin altında büyümeye başlarlar. Ancak, katılaşma başlangıcında çekirdekleşen tanecikler katılaşmanın devam eden aşamalarında oluşan taneciklere göre daha fazla büyürler. Sonuçta yapı çok büyük ötektik karbürlere ve bu karbürleri sarmalayan küçük taneciklere sahip olacaktır. Ni takviyesi ile yapıda sadece birincil karbürler oluşmuş çekirdek sayısı artmış, sıvı içinde taneciklerin büyümesi eş zamanlı gerçekleşmiştir. Isıl işlem sonrası ise yapıda yeniden ikincil karbürler kristalleşmiş ve ısı işlem süresine bağlı olarak ikincil karbürlerin ebatları değişmiştir.

M_7C_3 karbürleri trigonal (Pseudo-Hexagonal) kristalografisine sahiplerdir. Morfolojileri çubuk veya plaka tipli olabilir. Mikrosertlikleri 1000-1800 Hv aralığında değişebilir (Sapate ve Rao 2004). Bu değişimin sebebi ölçümün yapıldığı karbür yerine bağlı

olarak değişim gösterir. Örneğin; çubuk tipi bir karbürün dik kesit yüzeyi 1800 HV sertliğinde iken karbürün yatay kesit yüzeyi 1000 HV sertliğindedir. Bu tür karbürlerin yoğunlukları 6,6-6,9 g/cm³ değerinde olup kimyasal yapılarında %C miktarı %8,6-%8,9 mertebesindedir. M₇C₃ karbürleri temel alaşım elementlerinden Cr elementini bünyelerinde %24-50 aralığında barındırabilirler. Sahip oldukları oluşum serbest enerjileri ise -10/-20 kJ/mole aralığındadır.

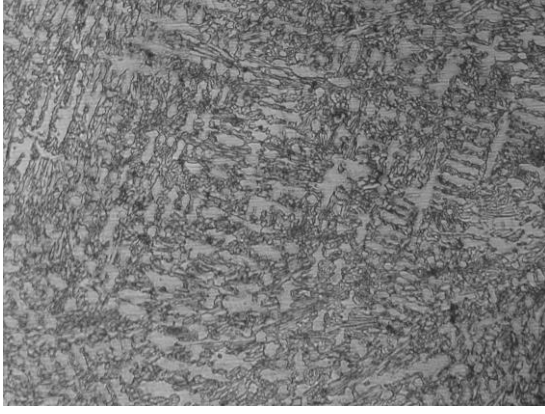
M₃C karbürleri diğer karbürlerden sahip oldukları farklı morfoojilerinden dolayı ayrılırlar. Bu karbürün morfolojisi genellikle ince plaka tipi yapısı ile belirgindir ve ince plaka biçimli karbürün devamlılığı en temel mikroyapısal özellik olarak ortaya çıkar. Bazı açılardan mikroyapı incelemelerinde bu karbür süreksizlik arz ediyor gibi gözükse de SEM incelemeleri göstermiştir ki bu karbür süreklilik arz ederek tezahür eder. Bu durum yapıda ferit veya östenit ile birlikte oluşarak nano kompozit yapısında bir oluşumu gerçekleştirebilir. Bazı hallerde ikincil karbür olarak oluşur (katı hal dönüşümlerinde). Bu durumlarda perlitik bir oluşum söz konusudur. Özellikle üzerinde bu çalışmada çalışılan malzeme ve düşük kromlu demirlerde döküm malzemesi oda sıcaklığına soğurken büyük ikincil M₃C karbürleri östenit matrisi içinde oluşabilirler. Bu karbür 800-1000 HV sertliğinde olabilir ve bu karbürün diğer karbürlere göre en üstün tarafı ise kütsel oranda teşekkül etme kabiliyetidir. Ni içerikli yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbür oranı %40 seviyesinde oluşabilir (Arikan ve ark. 2001). Ancak, gibbs serbest enerjisi açısından incelendiğinde bu karbürün oluşum serbest enerjisi +10/-10 kJ/mol mertebesindedir. Karbürlerdeki Cr konsantrasyonunun artışına bağlı olarak gibbs serbest enerjisinin lineer olarak değiştiiği literatürde belirtilmektedir. Bu karbürlerin kristal örgüleri ortorombik yapıdadır. Sahip oldukları %C oranı %6,7-6,9 ve %Cr oranı ise maksimum %17 seviyesindedir. Bu karbürler oldukça yüksek oranda N elementi çözömlene kabiliyetine sahiptirler. EDS analizleri incelendiğinde karbür tanelerinin M₇C₃ karbürleri oldukları %Cr konsantrasyonundan da belli olmaktadır. Matris yapısındaki Cr/ C konsantrasyonu ise yapıda M₃C karbürlerinin varlığına işaret etmektedir.

Numunelerin mikroyapıları incelendiğinde yapıda ötektik altı birincil karbürler ve matris içinde ikincil karbürler görölmektedir. Beyaz dökme demirlerde en temel fazlar östenit, martensit ve perlittir. Bu fazların oranına bağlı olarak yapının sertliği, tokluğu ve aşınma özelliği değişim gösterir. Ötektik altı beyaz dökme demirlerde ilk oluşan faz Östenit fazıdır. Bu faz dendritler halinde termal gradiente göre dendrit kolları şeklinde oluşurlar. Östenit kristalleri belirli bir karbon eşdeğerine sahiptirler. Bu karbon eşdeğerini C, Mn, Ni, Mo elementleri gibi elementler oluşturur. Karbon konsantrasyonu yapıda arttıkça kübik yüzey merkezli atomik kristal içindeki kafes parametresi de artar. Benzer durum martensit fazı için de geçerlidir. Östenit fazındaki krom konsantrasyonuna bağlı olarak östenit içindeki karbon

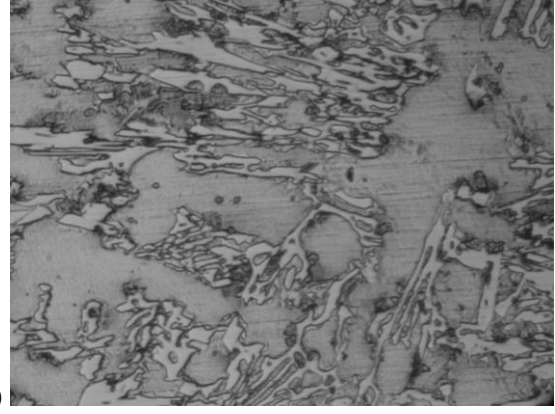
konsantrasyonu %2,11 ile %0,3 aralığında değişebilir. Oda sıcaklığında ise östenit içindeki karbon eşdeğerinin çözünlüğü yaklaşık olarak sıfırdır. Karbon oda sıcaklığında östenit fazının kararlılığı üzerinde en etkin role sahiptir. Basitçe söylemek gerekirse, karbon martensit başlama sıcaklığını daha düşük sıcaklık değerlerine indirmede en etkindir. Yüksek karbon içerikli östenit fazı oda sıcaklığına soğutulduğunda yapının perlit fazına dönüşümü engellenirse oluşacak faz kalıntı östenit olur.

Isıl işlemin karbür kimyasal yapısı üzerinde (Cr/C) etkili olduğu görölmüştür. Cr konsantrasyonu %25 civarına çıktığında, yapıda östenit fazı ve M_7C_3 karbürleri oluşur. Cr konsantrasyonu %15 mertebesine düştüğünde ise matriste özellikle perlit ve beynit fazları teşekkül eder (Liu ve ark. 2001). Cr konsantrasyonu %25 mertebesinde tutulup, karbon konsantrasyonu düştüğünde, yani ötektik altı yapıda ötektik öncesi östenit fazı oluşurken, ötektik hücreleri M_7C_3 karbürleri ve östenitten ibaret biçimde oluşurlar. Karbürler hem çubuk ve hem de plaka tipli olarak oluşurlar. Karbon konsantrasyonu arttığında ise yapıda tamamen ötektik hücre yapısı teşekkül eder ve karbürler tamamen çubuk tipli oluşabilir. Karbürün merkezinde, karbon konsantrasyonu minimum seviyeye düşer.

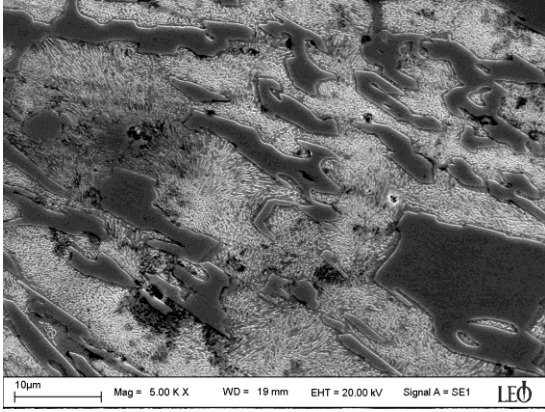
Beyaz dökme demirlerde ısıl işlem sonrası yapıda perlit fazı teşekkül edebilir. Perlit fazı difüzyon kontrollü bir fazdır. Östenit fazının bozulması ile bu yapı oluşur. Ferrit fazı karbon çözündüremez bu sebeple ferrit fazı yanında M_3C fazı teşekkül ederek sıralı bir biçimde bu dönüşümün devam etmesi sonrası bir nano kompozit biçiminde perlit fazı teşekkül eder (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9). Yapıdaki her bir fazın kalınlığını alaşım elementleri ve sıcaklık belirler. Isıl işlem sonrası kimyasal kompozisyonda değişim yaşanmış ancak matris içindeki görüntülerden yapıda oluşmuş muhtemel perlit fazı oranı belirlenememiştir.



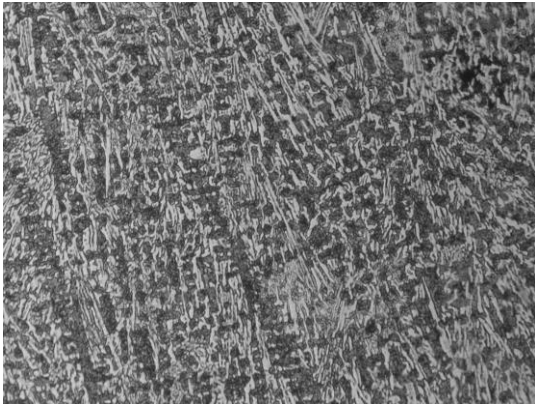
(a)



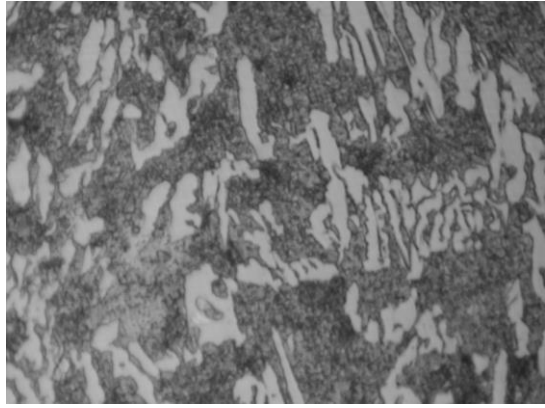
(b)



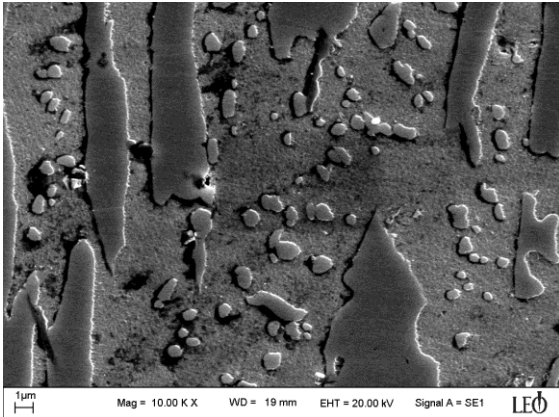
Şekil 4. 8. S4 numunesinin optik ve Sem görüntüleri, a) 20x15, b) 50x15, c) SEM



(a)



(b)



Şekil 4. 9. S5 numunesinin optik ve Sem görüntüleri, a) 20x15, b) 50x15 c) SEM

Literatür incelendiğinde %12-15 Cr içerikli yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin yapısı hakkında ulaşılan bilgilere göre matris katılaştığında öncelikle yapıda östenit fazı oluşurken, bu faz beynit ve perlit fazına dönüşür. Cr konsantrasyonu artmış yapılarda ise, ötektik hücrelerde karbür ebadı daha da küçüktür. Parçanın yüzeyine doğru karbür ebadı artar. Bu mikroayıdaki malzemelerde, ötektik katılma merkezde başlar. Primer karbürlerin etrafında önceden oluşan M_7C_3 karbürleri ve sıvı arasındaki reaksiyon ile M_3C karbürleri oluşabilir ve primer karbürlerin etrafına martensit fazı teşekkül eder (Sapate ve RamaRao 2006). Sıcaklık düştükçe östenit dendritleri içinde Cr, C, Si atomları düzenli ve homojen bir biçimde dağılmazlar. Karbür tanesi sınırında Cr, C miktarı hızla yükselir ve östenit tanesinin merkezine doğru tekrar düşer. Si oranı ise karbürün Si elementini dışarı atması sebebiyle karbür yüzeyinde maksimum değerdedir ve östenit tanesinin merkezine doğru en düşük seviyesine iner. Karbürün cidarındaki bu kararsız bölgede martensit oluşum sıcaklığı oda sıcaklığının üstüne çıkar ve böylece bu bölgede çok ince bir martensit fazı teşekkül eder. Eğer Si konsantrasyonu bir miktar yüksek ve Cr konsantrasyonu bir miktar düşük ise o zaman perlit fazı teşekkül edecektir. Bahsi edilen östenit fazının büyümesi ve etrafındaki kararsız durumun varlığından dolayı asla beyaz dökme demirlerde %100 östenit fazı bulunmaz (Lu ve ark. 2003). Karbür ve matristeki EDS analizlerindeki numunelere göre ve döküm sonrası ile ısı işlem sonrasında göre analiz farkının oluşumu karbürler ile matris arasındaki kimyasal potansiyel farka bağlanmaktadır.

Numunelerin soğuma şiddetinin yapının ötektik sıcaklığını etkilediği düşünülmektedir. Soğuma şiddeti artırıldığında yapının ötektik sıcaklığı düşer, karbür oluşur. Yavaş soğutmalarda grafit ötektik reaksiyonu gerçekleşebilir. Bu durumun sebebi grafitin çekirdeklenmesinin daha kolay olmasıdır. Karbür oluşumu başladığında bu yapının büyümesi grafit fazının büyümesinden daha hızlıdır. Soğuma hızının ötektik reaksiyon sıcaklığını değiştirmesi yapıdaki karbürlerin ebatlarını, dağılımını değiştirmesi sebebiyle önem taşımaktadır. Karbür oluşumu sabit bir sıcaklıkta gerçekleşmez ve bu sıcaklığın değişimi üzerinde mikroyapıda bulunan C ve Cr konsantrasyonları da etkilidir.

Fe-Cr-C üçlü faz diyagramında ötektik altı demirler ötektikaltı yapılarda östenit fazı C ve Cr elementlerini katı fazdan eriyiğe difizyonla gönderir. Östenit fazı büyüdükçe sıvı faz C ve Cr elementleri açısından zenginleşir. Sıvı yapının konsantrasyonu ötektik noktasına yaklaşıncaya katılma başlar. Ötektik reaksiyonun sıcaklığı sıvının katılmasıyla sürekli değişir (Albertin ve Sinatora 2001).

$$T_{\text{likidus}} = 155.5 - 89.2\%C - 0.77\%Cr$$

$$T_{\text{Ötektik}} = 1201.7 - 20.3\%C + 5.97\%Cr$$

Katılaşma esnasında M_7C_3 karbürleri ve östenit fazı içeren ötektik kolonisi çok farklı yönlerle yönelerek büyümeyiz. Sadece bir dominant büyüme yönüne sahiplerdir ve ayrıca bu kolonilerde karbürler silindirik bir yapıdadır. Karbürlerin oranları karbürdeki ve östenitteki Cr konsantrasyonlarının değerlerinin birleşimi ile elde edilen eğri ve bu eğrinin ötektik sıcaklık eğrisi ile kesişmesi sonrası kullanılacak “lever” kuralının Cr-C ikili faz diyagramına uygulanmasıyla belirlenebilmektedir. Bu metodun dışında kullanılan eşitlikler de mevcuttur (Liu ve ark. 2001). Bu tekniğe göre;

$$\%Karbür\ oranı = 12.33\%C + 0.55\%Cr - 15.2$$

$$\%Karbür\ oranı = 14.05C + 0.43Cr - 0.22$$

Ötektik demirler yavaş soğuma sonrası malzemede kolon tipi taneler yüzeyden içeri doğru oluşur. Merkeze doğru kolonumsu yapı eş eksenli tanelere dönüşür. Soğuma hızının yanında alaşımın kompozisyonu da kolonumsu yapı ve eş eksenli tanelerin büyüklüğünü etkiler. Yapı ötektik üstü bir kompozisyona doğru yöneldikçe eş eksenli tane oluşumu ve miktarı artar. Bu durum şöyle açıklanmaktadır. M_7C_3 karbür oluşumu için büyük miktarda Cr gereklidir. Bu sebeple bu karbürler östenit fazı ile karşılaştırıldıklarında çok yavaş büyürler. Sonuç olarak, ötektik üstü yapılarda kalıp yüzeyinden itibaren gerçekleşen katılaşma ötektik altı yapılara göre daha yavaştır. Bu nedenledir ki eş eksenli tanelerin ötektik üstü yapılarda oluşum ve büyüme şansları daha yüksektir. Ancak, soğuma farkı çok yüksek mertebelere çıktığında kalıp yüzeyinden itibaren kolon tipi taneler oluşur.

Ötektik altı yapılarda soğuma şiddeti arttığında tokluk 250 J den 210 J'e düşer. Ötektik yapılarda tokluk soğuma şiddeti ile 240 J den 250 J'e çıkar. Ötektik çekirdekçik oluştuğunda, katılaşma oranı ötektik taneler içinde değişir. Ötektik yapı içindeki karbürler ısıyı bıraktıkça, katılaşma oranı ilk çita şekilli karbürlerin etrafında düşer. Düşük katılaşma oranı plaka tipli karbürlerin ötektik kolonisi içinde ve çita tipli karbürlerin etrafında oluşumuna imkan tanır.

4.2. Sertlik Deney Sonuçları

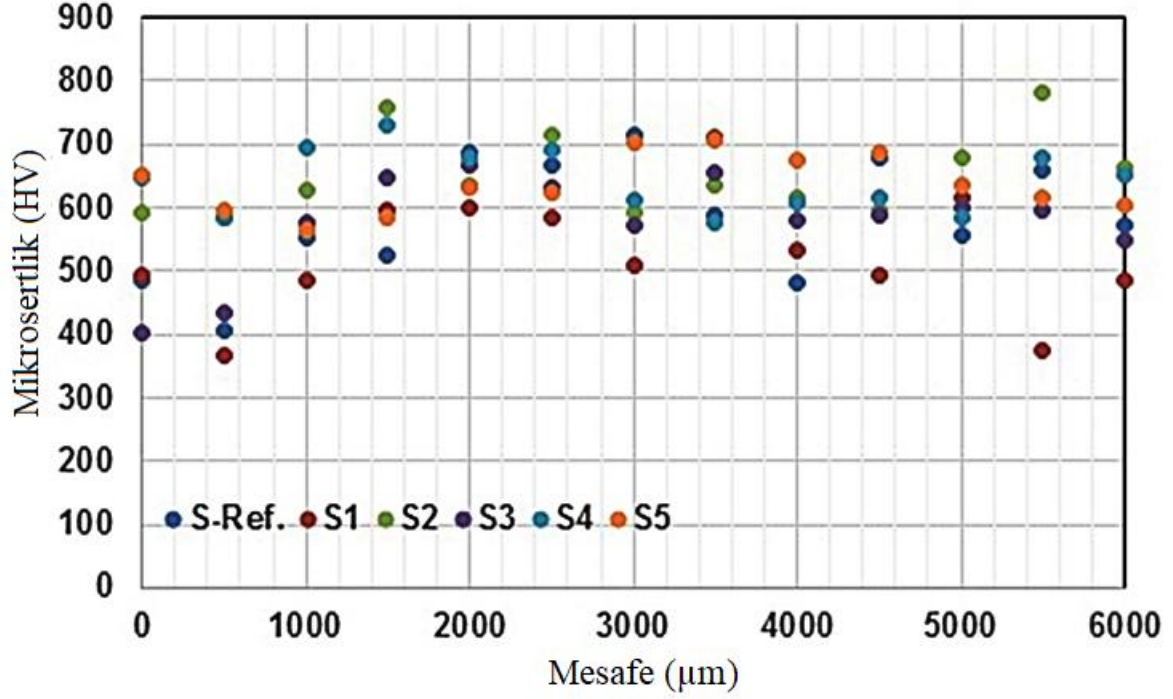
Numunelerin sertlik değişimlerinde karbürlerin tipi, ebatları ve dağılımları etkilidir. Mikroyapıda fazların ebatlarının büyüklüğü sertliği artırabilir veya düşürebilir. Karbür içerikli ısıtma işlemi ile dökme demirlerde mikroyapının ebadı soğuma oranının kontrolü ile sağlanır. Soğuma oranı arttıkça çubuk veya plaka tipli karbürlerin ebatları düşer. Özellikle literatür araştırmaları neticesinde soğuma oranının etkisi parçanın merkezi ve yüzeyindeki sertlikler alınarak incelenmiştir. Cr konsantrasyonu artışı karbür ebadını düşürür. Büyük ebatlı karbürlerin hızlı soğuma ile ebatları değişmez (Sapate ve Rao 2004). Cr/C oranı sertleşebilirlikte önemlidir. Bu oran arttıkça sertleşebilirlik artar. Isıtma işlemi sonrası östenit fazındaki C ve Cr elementlerinin karbür çökmesi sertleşebilirlikte azalmaya sebebiyet verir

(Sapate ve RamaRao 2006). Sonuçta, düşük östemplleme sıcaklığı düşük sertleşebilirliğe sebep olur. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde maksimum sertlik ve maksimum abrasiv aşınma direnci için martensitik yapı ısıtma işlemi ile sağlanılır. Döküm parçası perlitik yapının oluşumunun engellenebilmesi için yeterli dercede alaşım elemanına sahip olmalıdır. Cr, Ni, Cu, Mn ve Mo elementleri bu dönüşümün engellenmesinde kullanılırlar. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde perlit oluşum zamanı ile alaşım elementleri miktarı arasında şöyle bir eşitlik oluşturulmuştur;

$$\text{Log perlit süresi} = 1.07 + 0.43(\% \text{Ni}) + 0.44(\% \text{Cu}) + 0.25(\% \text{Cr/C}) + 0.59(\% \text{Mo} * \% \text{Mn}) + 0.56(\% \text{Mo} * \% \text{Ni})$$

Bu eşitliğe göre Ni ve Cu elementleri sertleşebilirlik üzerinde kendi başlarına en etkili elementlerdir. Ancak, Mo elementinin eklenmesi bu elementlerin sertleşebilirlik etkilerini artırmaktadır.

GX200Cr13Ni6WMo malzememizin farkı ısıtma işlemler sonrası sertlik değişim eğrileri Şekil 4.10' da verilmiştir. Isıtma işlem uygulamasında su verme hızına bağlı olarak malzemede sertlik yüzeyden merkeze doğru değişim göstermiştir. Numuneler havada soğutulduklarında sertlik almamışlardır. Kademeli olarak yağ, tuzlu su, su, ve azot ortamında malzemeye su verilmesiyle numunelerin sertliklerinin değiştiği, arttığı ve kademeli olarak arttığı görülmüştür. Numunelerin sertleşme derinliğinin ortalama olarak 1000 µm olduğu görülmüştür. Ancak numuneler suda su verildiklerinde sertleşme derinliğinin 3000 µm ye eriştiği belirlenmiştir. Yapıda oluşan ikincil karbürlerin yapının sertliğini artırdığı belirlenirken oluşan ikincil karbürlerin yapıda yüzeyden merkeze doğru azaldıkları sertlik diyagramından görülmektedir. Yapıdaki sertliklerin kryojenik ortama göre suda soğutmanın daha etkin olduğu belirlenmiştir. Soğutma hızının ikincil karbürlerin oranı ve ebatları üzerinde etkili olması sebebiyle sertliğin yüzeyden çekirdeğe doğru değiştiği kanaatine varılmıştır (Matsubara ve ark. 2001).



Şekil 4. 10. GX200Cr13Ni6WMoMn ısıtma işlemi soğutma ortamına bağlı olarak sertlik değişimi

4.3. Aşınma Deneyi Sonuçları

Birçok uygulamada beyaz dökme demir malzemeler ısıtma işlemi sonrası kullanılırken, bazı uygulamalarda ısıtma işlemi uygulanmadan kullanıldıkları da görülmektedir. Döküm sonrası ısıtma işlemi uygulanacak aşınma dirençli malzemelerin belirli bir mikroyapıda olmaları beklenir. Özellikle Ni içeriği yüksek beyaz dökme demirler döküm sonrası martensitik veya östenitik-martensitik yapıda üretilirlerken, nikel içeriksiz yüksek kromlu beyaz dökme demirler döküm sonrasında perlitik yapıda olmaları istenir. Çünkü, bu yapıda üretilen ürünlerde daha az oranda kalıntı gerilim olduğundan çatlama riski azdır. Ayrıca işlenmeleri de mümkün olabilir ve ısıtma işlemi ile yapıları değiştirilebilir. Beyaz dökme demirlerde aşınma direncini sağlayan ana unsur karbürlerin varlığıdır (Albertin ve Sinatora 2001). M_7C_3 karbürleri mikroyapıda ısı akışı yönüne paralel olarak jilet biçimli veya çubuk biçimli olarak oluşabilirler (İzciler ve Çelik 2000, Sakamoto ve ark. 2001). Abrasiv aşınma direncini kimyasal kompozisyon, malzemeye uygulanan ortam, aşınmada yük, matris ile takviye arasındaki bağ, aşındırıcının ebadı etkiler (Radzikowska 2005, Berns 2003).

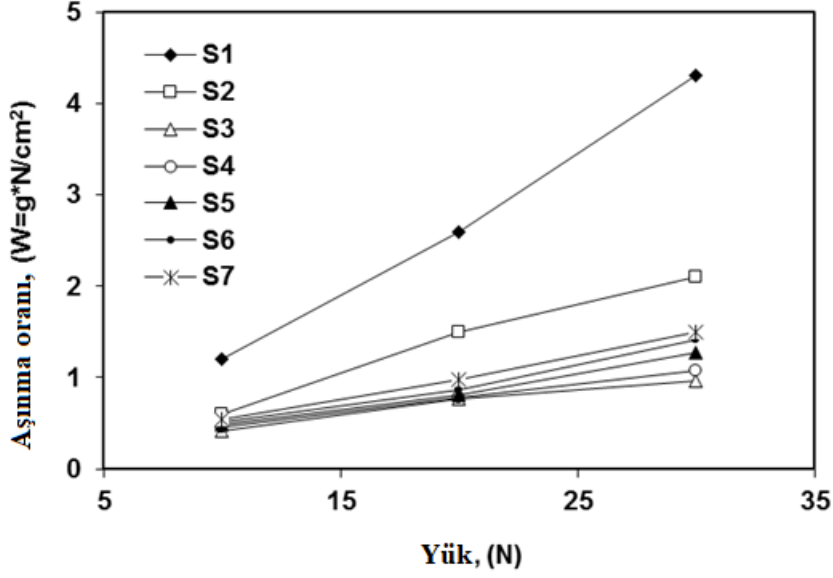
Şekil 4.10 ısıtma işlemi ile mikroyapısı değişen numunelere uygulanan abrasiv aşınmada aşınma oranı ile yük arasındaki ilişkiyi vermektedir. Sonuçlar S3 numunesinin en düşük

aşınma oranı verdiğini göstermektedir. Bu sonucun malzemenin mikroyapısal karakterine temas esnasında yükün etkinliğine bağlamak mümkündür.

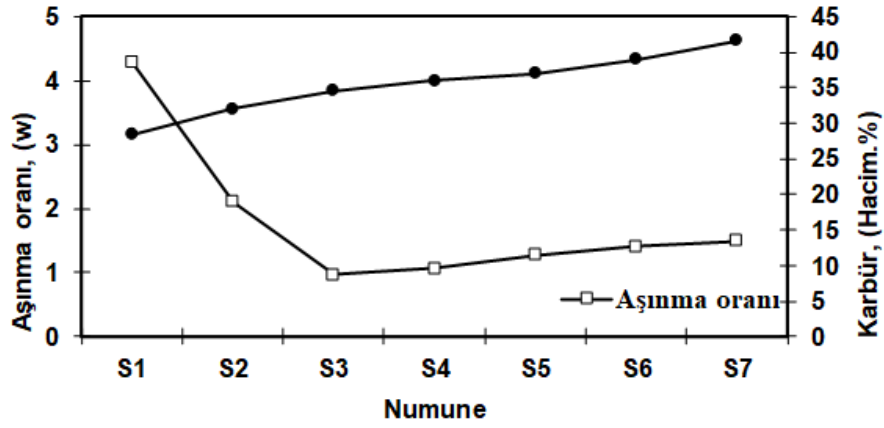
Numunelerde aşınma direncini sağlayan temel faktörün primer karbürün sertliği, primer karbürün şekli-miktarı-kırılma tokluğunun yanında yapıdaki seconder karbürlerin şekli oranı ve mukavemetleri de etkilidir. Aşınma sonuçlarına göre karbür ile takviye sonrası yapıdaki aşınma oranı önemli bir oranda düşmüştür. Ayrıca, karbür etkisinin yanında yapıdaki homojenleştirme ve soğutma etkisinin de aşınma oranı üzerinde etkili olduğunu görmekteyiz. Aşınma oranının üzerinde en etkili mekanizmanın karbür ebadı olduğu kanaatindeyiz. Aşınma oranı yük artışı ile birlikte kritik bir karbür ebadına kadar artar (Handbook, 1988). Bu kritik değerin aşılması sonrası artık aşınma oranı yük ve karbür ebadından etkilenmeden değişir. Bir başka ifadeyle kritik değerin üzerinde etkili olan mekanizma karbür ve matris arasındaki sertlik farkıdır. Bu sebeptir ki bu çalışmada soğuma farkı ile yeni ikincil karbürlerin oluşturulması ile kritik değer artırılmaya çalışılmış ve aşınma mekanizması olarak mikro kesme yerine mikro kırılma ile aşınma mekanizmasına geçiş sağlanmaya çalışılmıştır. Aşınma esnasında aşındırıcı malzeme aşınacak yüzeyi plastik olarak ve aşındırıcının ebadına bağlı olarak deforme eder veya keser. Bu sebeple aşındırıcı ile aşınan malzemedeki takviyenin ebatları arasındaki fark çok önemlidir. Aşındırıcının ebadı düştüğünde aşınma tipi delaminasyon mekanizmasına dönüşür. Bu sebeple kritik bir aşındırıcı ebadından bahsedilebilir. Bu kritik ebadakadar yük artırıldığı zaman aşınma oranı artar. Bu kritik değer aşıldığı zaman aşınma oranı yüke ve aşındırıcı ebadına bağlı olmada değişir. Bunun dışında bu kritik değer karbürlerin sertlikleri ile matrisin sertliği arasındaki farktan etkilenir (Sun ve ark. 2004). Bu sebeptir ki, numunelerde mikro kesmeden mikro kırılmaya dönüşümün gerçekleştiği kritik yük sınırının artırılabilmesi için yapıda primer karbürlerin organizasyonu ile birlikte yapıda ikincil karbürlerin oluşturularak, yapının aşınma oranının artırılması hedeflenmiştir.

Şekil 4.11'de ısıtma işleminin karbür hacimsel oranı ve aynı zamanda aşınma oranı üzerindeki etkileri incelenerek aşınma oranındaki değişimin karbür oranı arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Aşınma testi boyunca uygulanan yük ve aşındırıcı ebadının aşınma yüzeyi altında oluşan plastik deformasyon oranı üzerinde etkileri bilinmektedir (Albertin ve Sinatora 2001). Yüzey altı plastik deformasyon derinliği ile uygulanan yük ve aşındırıcı ebadı arasında doğrusal bir ilişki mevcuttur. Şekil 4.12a' da karbür ebadı ile aşınma oranı arasındaki ilişki verilirken, Şekil 4.12b' de primer karbür sertliği ve Şekil 4.12c' de ise kırılma tokluğu ile aşınma oranı ilişkisi incelenmiştir. Grafiklerden anlaşıldığı gibi aşınma oranı üzerinde karbür sertliği, karbür hacimsel oranının etkili olduğu görülmektedir. Aşınma

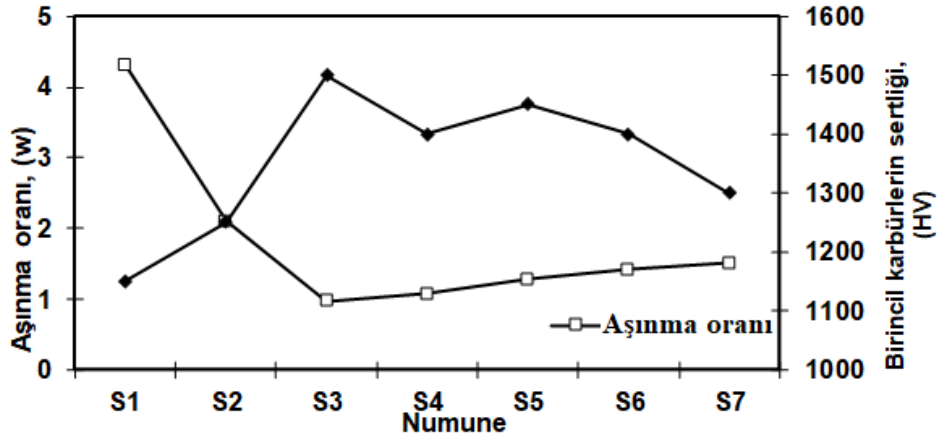
oranı üzerinde ikincil karbürlerin varlığı etkili olmuştur. İkincil karbürlerin miktarları ise homojenleştirme ısıl işlemi sonrası soğutma şiddeti ile doğrusal olarak etkilenmiştir. İkincil karbür oluşumu ile birlikte birincil karbürlerin ebatlarında da kısmen bir küçülme görülmektedir. Birincil karbürlerin ebatlarındaki bu değişim malzemenin kırılma tokluğunu da etkilemiştir.



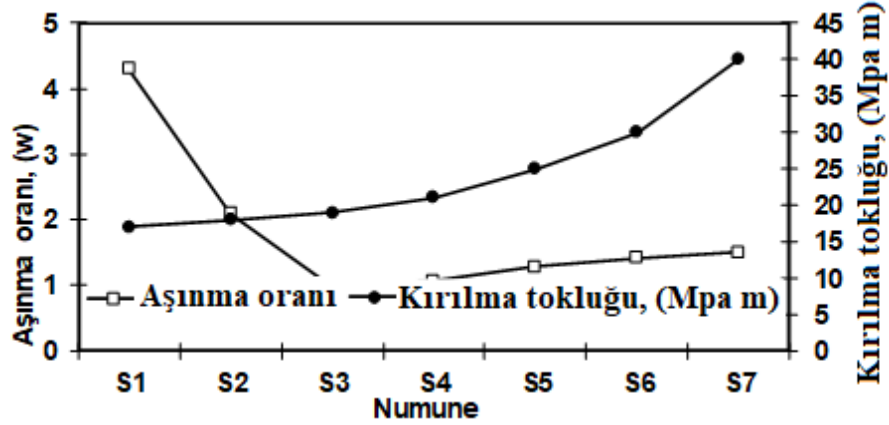
Şekil 4. 11. Isıl işlem sonrası numunelerin aşınma oranları ile yük arasındaki ilişki



a)



b)



Şekil 4. 12. a) Karbür hacimsel oranı ile aşınma oranı arasındaki değişim, b) Primer karbür sertliği ile aşınma oranı arasındaki değişim, c) kırılma tokluğu ile aşınma oranı arasındaki değişim

Aşınma oranının ısı işlem sonrası değişimi yapı içindeki primer karbürlerin dağılımına, sertliğine, ikincil karbürlerin varlığına bağlı olarak değiştiği düşünülmektedir (İzciler ve Çelik 2000, Sakamoto ve ark. 2001). Ayrıca aşındırıcı taneciklerin aşınan yüzey üzerindeki davranışları aşınma mekanizmasını belirler. Bu tanecikler yüzeyi kesebilir veya plastik olarak deforme edebilirler. Bu sebeple aşındırıcı tanecikler ile takviye karbürlerin

ebatları arandaki oran, aşınma mekanizması üzerinde en önemli parametrelerden kabul edilir. Aşındırıcı taneciklerin ebadı düştüğünde ve kiritik bir değerin altına düştüğünde aşınma mekanizması kesme mekanizmasından delaminasyon mekanizmasına dönüşür (Radzikowska 2005, Bedolla-Jacuinde ve ark. 2005).

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Aşınma test sonuçları sonrası en düşük ağırlık kaybı S3 numunesinde görülmüştür. Aşınma sonuçları ile sertlik sonuçlarının paralellik göstermediği belirlenmiştir. Isıl işlemler sonrası soğutma şiddeti artışı ile birlikte numunelerin sertliklerinde düşüş görülürken, ağırlık kayıplarında S3 numunesi sonrası artış belirlenmiştir.

Isıl işlem sonrası oluşan numunelerin darbe absorpsiyon özellikleri artmış, Isıl işlem ile primer karbürlerin küçülmesi, östenit fazının artması sebebiyle tokluk artmıştır.

Homojenleştirme ısıl işlemi sonrası mikroyapıda karbür dağılımı ve yapılarında farklılıklar gözlenmiştir. Homojenleştirme sonrası primer karbürlerin ebatlarının düştüğü ve dağılımlarının homojenleştiği görülmüştür

Mikroyapıda iki tip karbür görülmektedir. Büyük ebatlı olan primer karbürler dendritik yapıda oluşmuş, ana matris içinde ise daha küçük ve eş eksenli 1 µm ebadın altında sekonder tane içine dağılmış karbürler oluşmuştur. Isıl işlem sonrası soğuma gradyanını etkilemesi, matrisin soğuma şiddetini artması sebebiyle matris içinde sekonder (ikincil) karbürlerin oluştuğu düşünülmektedir.

Takım çelikleri sıcak ortamlarda çalıştıklarında (500 °C sıcaklık üstü) sertliklerinde ciddi düşüşler görülür ve çalışma esnasında verimlilikleri azalır. Ayrıca bu çelikler sıcak ortamlarda çalıştıklarında soğutmaya ihtiyaç duyulur. Soğutma esnasında termal şoklar malzemenin çatlamasına deforme olmasına sebep olabilir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre geliştirilen bu malzeme sıcak ortamlarda çalıştığında sertliği düşmemekte ve ani termal şokla çatlama ve deformasyona maruz kalmamaktadır. Dolayısı ile nikel eşdeğerinin artırılması, matrisin östenitik yapıya dönüştürülmesi ile malzemenin termal şoklara karşı dirençli malzeme olarak kullanılabilmesi görülmüştür.

Bu tür malzemelerde sınır şartlarının belirlenebilmesi (kimyasal konsantrasyonun mekanik özelliklere etkisi) için ek çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Karbon eşdeğeri ile nikel eşdeğeri oranının artırılıp azaltılması ile elde edilecek malzemelerin testlerinin devam ettirilmesi bu konuda bilimsel çalışmalar açısından faydalı olacaktır. Böylece bu aralıkta elde edilecek malzemelerin aşınma davranışları incelenerek termal şok karşısında ve sıcakta aşınma direnci olarak, bu tür malzemelerin genel olarak karakterleri belirlenmelidir.

6. KAYNAKLAR

- Agustina GM, Scheid A, Suárez S, Britz D, Mücklich F (2018). Secondary Carbides in High Chromium Cast Irons: An Alternative Approach to Their Morphological and Spatial Distribution Characterization, *Materials Characterization*, 144, 621-630.
- Akdemir Ö (1994). Alaşımli beyaz dökme demirlerin mikroyapı analizi ve aşınma özellikleri. Y. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Albertin E, Sinatora A (2001). Effect of Carbide Fraction and Matrix Microstructure on The Wear of Cast Iron Balls Tested in a Laboratory Ball Mill. *Wear*, 250(1-12), 492-501.
- Arıkan MM (1999). Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Aşınma Direncine Alaşım Elementlerinin Isıl İşlemin Etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Barron, RF (1982). Cryogenic Treatment of Metals to Improve Wear Resistance. *Cryogenics*, 22(8), 409-413.
- Bedolla-Jacuide A, Arias L, Hernández B (2003). Kinetics of Secondary Carbides Precipitation in a High-Chromium White Iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 12 (4), 371- 382.
- Bedolla-Jacuide A, Correa R, Quezada JG, Maldonado C (2005). Effect of Titanium on The As-Cast Microstructure of a 16% Chromium White Iron. *Materials Science and Engineering: A*, 398(1-2), 297-308.
- Benz R, Elliott JF, Chipman J (1974). Thermodynamics of The Carbides in The System Fe-Cr-C. *Metallurgical Transactions*, 5(10), 2235-2240.
- Berns H (2003). Comparison of Wear Resistant MMC and White Cast Iron. *Wear*, 254(1-2), 47-54.
- Celik-Butler Z, Yang W, Hoang HH, Hunter WR (1991). Characterization of Electromigration Parameters in VLSI Metallizations by $1/f$ Noise Measurements. *Solid-state Electronics*, 34(2), 185-188.
- Çiğdemoğlu M. (1968). Pik ve Çelikte Alaşım Elemanları. The London and Scandinavian Metallurgical Company Limited den çeviri, Makine Mühendisleri Odası Neşriyat No 31.
- Çimenoğlu H, Kayali ES (2001). The Effect of Titanium on The Abrasion Resistance of 15Cr–3Mo White Cast Iron. *Wear*, 247(2), 231-235.
- Çimenoğlu H, Geçkinli E, Baydoğan M, Yıldırım S. (2001). Çelik ve Dökme Demirlerin Metalografisi ve Mekanik Muayenesi (TMMOB).
- Dikeç F (1971). Mağnezyum ile Yapılan Küresel Grafitli Dökme Demir Üretiminde Bileşim ve Bazı Döküm Şartlarının Etkileri. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Doğan ÖN, Hawk JA, Laird G (1997). Solidification Structure and Abrasion Resistance of High Chromium White Irons. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 28(6), 1315-1328.
- Erdoğan M. (2000). Mühendislik Alaşımları Yapı ve Özellikleri I (Çeviri). Nobel Yayınları. Ankara.

- Fairhurst W, Röhring K (1974). Abrasion-resistant High Chromium White Cast Irons. Foundry Trade Journal, 136, 685-698
- Fernandez I, Belzunce FJ (2008). Wear and Oxidation Behaviour of High-Chromium white Cast Irons. Materials Characterization, 59, 669 – 674.
- Fusheng H, Chaochang W (1989). Modifying high Cr-Mn cast iron with boron and rare earth-Si alloy. Materials Science And Technology. 5(9), 918-924.
- Gasan H, Erturk F (2013). Effects of A Destabilization Heat Treatment on The Microstructure and Abrasive Wear Behavior of High-Chromium White Cast Iron Investigated Using Different Characterization Techniques. Metallurgical and Materials Transactions A. 44, 4993–5005
- Geçkinli E. (1989). Metalografi Kısım I. İ. T. Ü. (1989). Matbaası, 262 s.
- Guitar MA, Suárez S, Prat O, Duarte Guigou M, Gari V, Pereira G (2018). High Chromium Cast Irons: Destabilized-Subcritical Secondary Carbide Precipitation and Its Effect on Hardness and Wear Properties, J. Mater. Eng. Perform. 27, 3877–3885.
- Gundlach R, Doane V (1990). Alloy Cast Irons. ASM Handbook; Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance, 10th ed., ASM International, Materials Park, USA, 1, 85-98.
- Gundlach R B (1993). Alloy Cast Irons in ASM Handbook, 1, 10th Ed.
- Handbook M. (1988). Casting. ASM International. 15, 238-241.
- Izciler M, Celik H (2000). Two-and Three-Body Abrasive Wear Behaviour of Different Heat-Treated Boron Alloyed High Chromium Cast Iron Grinding Balls. Journal of Materials Processing Technology, 105(3), 237-245.
- Jha AR (2006). Cryogenic Technology and Applications; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 361, pp. 1-21.
- Karantzalis AE, Lekatou A, Mavros H (2009). Microstructural Modifications of As-Cast High-Chromium White Iron by Heat Treatment. Journal of Materials Engineering and Performance, 18(2), 174-181.
- Kasama AH, Mourisco AJ, Kiminami CS, Fo WB, Bolfarini C (2004). Microstructure and Wear Resistance of Spray Formed High Chromium White Cast Iron. Materials Science and Engineering: A, 375, 589-594.
- Kazdal G (2011). Maden Kırıcılarında Kullanılan Beyaz Dökme Demirlerde Bor Katkısının ve Isıl İşlemin Mekanik Özelliklere Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Laird G, Gundlach R, Rohrig, K (2000). Abrasion-Resistant Cast Iron Handbook. Schaumburg, IL: American Foundry Society. 72
- Liu HN, Nomura M, Ogi K, Sakamoto M (2001). Abrasion Resistance of High Cr Cast Irons at An Elevated Temperature. Wear, 250(1-12), 71-75.
- Lu L, Soda H, McLean A (2003). Microstructure and Mechanical Properties of Fe–Cr–C Eutectic Composites. Materials Science and Engineering: A, 347(1-2), 214-222.
- Matsubara Y, Sasaguri N, Shimizu K (2001). Solidification and Abrasion Wear of White Cast Irons Alloyed with 20% Carbide Forming Elements. Wear, 250(1-12), 502-510.

- Minkoff I (1983). *The Physical Metallurgy of Cast Iron*. John Wiley and Sons, Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO 19 1 UD, England.
- Mutlu Ş (2012). Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerde Nb, Ti, V, Mg Elementlerinin Mikroyapı, Aşınma ve Darbe Direncine Etkisinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Pearce JTH (1984). Structure and Wear Performance of Abrasion Resistant Chromium White Cast Irons, *AFS Transactions*, 92, 599-622
- Pero-Sanz JA, Plaza D, Verdeja JI, Asensio J (1999). Metallographic Characterization of Hypoeutectic Martensitic White Cast Irons: Fe-C-Cr System. *Materials Characterization*, 43(1), 33-39.
- Radzikowska JM (2005). Effect of Specimen Preparation on Evaluation of Cast Iron Microstructures. *Materials Characterization*, 54(4-5), 287-304.
- Rajagopal V, Iwasaki I (1992). Corrosion Properties of Cast Iron Ball Materials in Wet Grinding. *Corrosion*, 48(2), 124-131.
- Sakamoto M, Liu HN, Nomura M, Ogi K (2001). Tribological Stability of Al₂O₃ Short Fiber Reinforced High Cr Cast Irons. *Wear*, 251(1-12), 1414-1420.
- Sapate SG, RamaRao AV (2006). Erosive Wear Behaviour of Weld Hardfacing High Chromium Cast Irons: Effect of Erodent Particles. *Tribology International*, 39(3), 206-212.
- Sapate SG, Rao AR (2004). Effect of Carbide Volume Fraction on Erosive Wear Behaviour of Hardfacing Cast Irons. *Wear*, 256(7-8), 774-786.
- Sricharoenchai P, Inthidech S, Sasaguri N, Matsubara Y (2004). Effect of Alloying Elements on Behavior of Hardness and Retained Austenite of Eutectic High Chromium Cast Irons. *AFS Transactions*, 911-923.
- Sun Z, Zuo R, Li C, Shen B, Yan, J, Huang S (2004). TEM Study on Precipitation and Transformation of Secondary Carbides in 16Cr-1Mo-1Cu White Iron Subjected to Subcritical Treatment. *Materials Characterization*, 53(5), 403-409.
- Şahin Y (2001). Kumlama Makinesi Türbin Paletlerindeki Aşınma ve Mikroyapının İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tabrett CP, Sare IR (2000). Fracture Toughness of High-Chromium White Irons: Influence of Cast Structure. *Journal of Materials Science*, 35(8), 2069-2077.
- Thorpe WR, Chicco B (1985). The Fe-Rich Corner of The Metastable C-Cr-Fe Liquidus Surface. *Metallurgical Transactions A*, 16(9), 1541-1549.
- Tian HH, Addie GR, Visintainer RJ (2009). Erosion-Corrosion Performance of High-Cr Cast Iron Alloys in Flowing Liquid-Solid Slurries. *Wear*, 267(11), 2039-2047.
- Walton CF and Opar TJ, (Eds.) (1981). *Iron castings handbook: covering data on gray, malleable, ductile, white, alloy and compacted graphite irons*. Iron Castings Society.
- Wiengmoon, A, Chairuangsi T, Brown A, Brydson R, Edmonds DV, Pearce JTH (2005). Microstructural and Crystallographical Study of Carbides in 30wt.% Cr Cast Irons. *Acta Materialia*, 53(15), 4143-4154.
- Wu X, Xing J, Fu H, Zhi X (2007). Effect of Titanium on The Morphology of Primary M₇C₃ Carbides in Hypereutectic High Chromium White Iron. *Materials Science and Engineering A*, 457(1-2), 180-185.

- Yilmaz SO, Teker T (2016). Effect of TiBAI Inoculation and Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Hypereutectic High Chromium White Cast Iron. *Journal of Alloys and Compounds*, 672, 324-331.
- Zhang MX, Kelly PM, Gates JD (2001). The Effect of Heat Treatment on The Toughness, Hardness and Microstructure of Low Carbon White Cast Irons. *Journal of Materials Science*, 36(16), 3865-3875.
- Zum Gahr KH, & Eldis GT (1980). Abrasive Wear of White Cast Irons. *Wear*, 64(1), 175-194.

ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Elazığ'da doğdu. Lise öğrenimini Elazığ Anadolu Lisesi'nde tamamladı. (2005-2008). 2014 yılında İstanbul Kültür Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2015- 2017 yıllarında Tekirdağ Çerkezköy'de bulunan Türkiye'nin önde gelen beyaz eşya üreticisi olan firmanın ArGe bölümünde master öğrencisi olarak çalıştı. İşletme yönetimi yüksek lisansını ise Namık Kemal Üniversitesi İşletme Bölümünde 2017 yılında tamamladı. 2018 yılında yine Çerkezköy'de bulunan sektöründe lider bir otomotiv firmasında pazarlama mühendisi olarak işe başladı. Hala aynı firmada pazarlama mühendisi olarak çalışmaktadır.

Rana YILMAZ