

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERİN AŞINMA DİRENCİNE
ALAŞIM ELEMENTLERİNİNVE ISIL İŞLEMİN ETKİSİ**

**DOKTORA TEZİ
Y.Müh. Mustafa M. ARIKAN
F691D020**

100678

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 11 Ocak 1999
Tezin Savunulduğu Tarih: 28 Mayıs 1999**

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. E. Sabri KAYALI

Diğer Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. Niyazi ERUSLU (İ.T.Ü.)

Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU (İ.T.Ü.)

Prof. Dr. Mehmet KOZ (M.Ü.)

Prof. Dr. Zeki ÇİZMECİOĞLU (Y.T.Ü.)

MAYIS 1999

- [47] Akdemir, Ö., 1994. Alaşımlı beyaz dökme demirlerin mikroyapı analizi ve aşınma özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [48] Çelik, H., 1991. Kaynak edilebilen kobalt ve demir esaslı alaşımların yüksek sıcaklıktaki aşınma davranışları, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [49] Afanasyev, V.V., 1978. *Tool Steels*, MIR Publishers, Moscow.
- [50] Doğan, Ö.N., Hawk, J.A., 1995. Effect of carbide orientation on abrasion of high chromium white cast iron, *Wear*, **189**, 136-142.
- [51] Doğan, Ö.N., Laird II, G., Hawk, J.A., 1995. Abrasion resistance of the columnar zone in high Cr white cast irons, *Wear*, **181-183**, 342-349.
- [52] Pearce, J.T.H., Abrasive wear behaviour of alloy cast irons, F 1433, 13-23.
- [53] Diesburg, D.C., Borik, F., 1974. Optimizing abrasion resistance and toughness in steels and irons for the mining industry, *Symposium on-Materials for the Mining Industry*, Vail Colorado.
- [54] Gundlach, R.B., 1993. Alloy cast irons in *ASM Handbook*, 1, 10th Ed.
- [55] El-Ghazaly, S.A., 1993. Optimizing structure, toughness and wear performance of 15% Cr cold work cast tool steel, *Materials Technology*, **64**, 136-141.
- [56] Özdoğan, N., Çizmecioglu, Z., 1988. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin yapısına vanadyumun etkisi, *Ülkemizin Kalkınmasında Mühendisliğin Rolü Sempozyumu*, İstanbul, Haziran 1988.
- [57] Özdoğan, N., 1995. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin yapı, sertlik ve tokluk özelliklerine döküm yöntemi ve ısıtım işlem şartlarının etkisinin merdane aşınması açısından incelenmesi, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [58] İzçiler, M., 1997. Yüksek krom alaşımlı dökme demirlerin farklı sıcaklıktaki abrasiv aşınma davranışına alaşıım katkı oranının ve ısıtım işlem şartlarının etkileri, *Doktora Tezi*, T.C. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

KAYNAKLAR

- [1] *The International Nickel Company, Inc.*, 1978. Abrasion resistant castings for handling coal properties and uses of the Ni-hard irons.
- [2] *The International Nickel Company, Inc.*, 1978. Engineering properties and applications of Ni-hard, 4th ed.
- [3] **Avner, S.H.**, 1983. *Introduction to Physical Metallurgy*, Mc Graw-Hill International Book Company, 2nd ed.
- [4] **Jinzhu, Liu, Shizhuo, Li, Yongfa Man**, 1993. Wear resistance of Ni-hard 4 and high chromium cast iron re-evaluated, *Wear*, **166**.
- [5] **Sare, I.R., Arnold, B.K.**, 1989. Gouging abrasion of wear resistant alloy cast irons, *Wear*, **131**, 15-38.
- [6] **Fairhurst, W., Röhrig, K.**, 1974. Abrasion-resistant high chromium white cast irons, *Foundry Trade Journal*, **136**, 685-698.
- [7] *Metals Handbook*, 1988. 9th Ed., **15**, Casting, ASM.
- [8] *Metals Handbook*, 10th Ed., **1**, Properties and Selection, ASM.
- [9] **Aytekin, M.B.**, 1981. Aşınmaya dayanıklı yüksek kromlu ve yüksek karbonlu çelik ve dökme demirlerin metalurjik özellikleri, *Bitirme Ödevi*, İTÜ Kimya-Metalurji Fak., Metalurji Müh.Böl., İstanbul.
- [10] **Laurence, H.P.**, 1983. Fighting wear in agricultural and off-road equipment, *Metal Progress*.
- [11] **Turenne, S., Lavallee, F., Masounave, J.**, 1989. Matrix microstructure effect on the abrasion wear resistance of high-chromium white cast iron, *Journal of Materials Science*, **24**.
- [12] **Minkoff, I.**, 1983. *The Physical Metallurgy of Cast Iron*, A Wiley-Interscience Publication.
- [13] **Demello, D.B., Burand Charre, M.**, 1986. Abrasion mechanisms of white cast iron and influence of the metallurgical structure of V-Cr cast irons, *Materials Science and Engineering*, **78**.
- [14] **Ohide, T., Ohira, G.**, 1983. Solidification of high chromium alloyed cast iron, *British Foundryman*, **76**, 7-14.

ÖNSÖZ

Tez çalışmasının her aşamasında fikir ve önerilerinden faydalandığım sayın hocam Prof. Dr. E.Sabri Kayalı'ya çok teşekkür ederim.

Tez çalışması sırasında yardımlarını gördüğüm sayın Prof. Dr. Hüseyin Çimenoglu'na, sayın Doç. Dr. Kelami Şeşen'e, numunelerin dökümünde yardımcı olan TÜBİTAK'a ve sayın Met Yük. Müh. Serdar Sevik'e ve Met. Yük. Müh. Yüksel Palacı'ya, analizlerin yapıldığı Silvan Döküm'e, numunelerin hazırlanmasında ve incelenmesinde yardım eden sayın arkadaşlarım Yrd. Doç. Dr. Gültekin Goller'e, teknisyen Mızrap Canıbeyaz'a, teknisyen Hüseyin Sezer'e, teknisyen Celal Ertekin'e ve teknisyen Osman Alma'ya teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım sırasında her konuda yardımcı olan arkadaşlarım sayın Met. Müh. Can Daysal'a, Met. Yük. Müh. C. Fahir Arısoy'a, Met. Yük. Müh. Gökhan Başman'a ve Çiğdem Gök'e teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 1999

Met.Yük.Müh. Mustafa M. Arıkan

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	x
SEMBOL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xviii
SUMMARY	xx
1.GİRİŞ VE AMAÇ	1
2.DÖKME DEMİRLER	3
2.1.Dökme Demirlerin Tanımı	3
2.2.Dökme Demirlerin Sınıflandırılması	3
2.2.1.Beyaz dökme demirler	3
2.2.2.Gri dökme demirler	4
2.2.3.Temper dökme demirler	4
2.2.4.Küresel grafitli dökme demirler	4
3.YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLER	5
3.1.Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Özellikleri	6
3.1.1.Fiziksel özellikler	6
3.1.2.Mekanik özellikler	6
3.1.3.Manyetik özellikler	7
3.1.4.Mikroyapı	7
3.1.4.1.Karbürler	9
3.1.4.2.Matris	10
3.2.Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Uygulama Alanları	12
3.3.Alaşım Elementlerinin Özelliklere Etkisi	14
3.3.1.Karbon	14
3.3.2.Krom	14
3.3.3.Molibden	15
3.3.4.Silisyum	15

3.3.5.Bakır	16
3.3.6.Fosfor	16
3.3.7.Kükürt	16
3.3.8.Manganez	16
3.3.9.Nikel	17
3.3.10.Bor	17
3.3.11.Niyobyum	17
3.3.12.Vanadyum	18
3.3.13.Titanyum	18
3.3.14.Nadir toprak elementleri	18
4.YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERDE	
KATILAŞMA VE ISIL İŞLEM	19
4.1.Ergitme ve Döküm	19
4.2.Fe-C-Cr Sistemi	21
4.3.Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Katılaşma Yapısı	25
4.4.M ₇ C ₃ Karbürlerinin Özellikleri	25
4.5.Fe-C-Cr Alaşımlarının Döküm Matris Yapısı	26
4.5.1.Fe-C-Cr alaşımlarının katı hal reaksiyonları	27
4.5.2.İkincil M ₇ C ₃ karbürlerinin oluşumu	27
4.6.Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Isıl İşlemi	28
4.6.1.Su verme sıcaklığı	30
4.6.2.Martensit dönüşümü	32
4.6.3.Tavlama ve temperleme	32
5.YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERİN AŞINMA	
DİRENCİ	35
5.1.Abrasiv Aşınmanın Tanımı	35
5.2.Beyaz Dökme Demirlerde Aşınma	36
5.3.Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerde Abrasiv Aşınmayı	
Etkileyen Faktörler	39
5.3.1.Karbür yapısının abrasiv aşınmaya etkisi	39
5.3.2.Matris yapısının aşınmaya etkisi	39
6.DENEYSEL ÇALIŞMALAR	41
6.1.Deneylerde Kullanılan Malzemeler	41
6.2.Isıl İşlemler	41

6.3.Mikroyapı İncelemeleri	42
6.4.X-ışınları Analizleri	42
6.5.Taramalı Eelektron Mikroskobu (SEM) Analizleri	43
6.6.Sertlik Deneyleri	43
6.7.Aşınma Deneyleri	43
6.8.Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	45
7.DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ	46
7.1.Mikroyapı İncelemesi Sonuçları	46
7.2.Sertlik Deneyi Sonuçları	92
7.3.Aşınma Deneyi Sonuçları	98
7.4.Genel Değerlendirme	108
8.SONUÇLAR	112
KAYNAKLAR	114
ÖZGEÇMİŞ	118

KISALTMALAR

DD	: Dökme Demir
DPH	: Diamond Pyramid Hardness
EDS	: Electron Dispersive Spectroscope
HB	: Hardness of Brinell
HC	: High Carbon
HiCr	: High Chromium
HRC	: Hardness of Rockwell C
HV	: Hardness of Vickers
LC	: Low Carbon
M	: Martensit
MC	: Medium Carbon
M _f	: Martensit Dönüşümü Bitiş Sıcaklığı
M _s	: Martensit Dönüşümü Başlangıç Sıcaklığı
O	: Ostenit
P	: Perlit
SEM	: Scanning Electron Microscope

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1.	Aşınmaya dirençli yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin bileşimleri	5
Tablo 3.2.	25-32 mm kesitli yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerin mekanik özellikleri	6
Tablo 3.3.	Çeşitli minerallerin, karbürlerin ve matrislerin sertlikleri	8
Tablo 3.4.	Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerde mikroyapıda bulunan karbürlerin sertlikleri	9
Tablo 3.5.	Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerde matris yapısının aşınma kaybına etkisi	12
Tablo 4.1.	Ticari amaçla geliştirilen yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerin bileşimleri	19
Tablo 4.2.	Fe-C-Cr sisteminin sıvılaşma yüzeyindeki kritik noktalarda oluşan reaksiyonlar	22
Tablo 4.3.	Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin mikroyapısında bulunan fazlar ve kafes parametreleri	23
Tablo 4.4.	Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerin ısıtılma şartları	33
Tablo 5.1.	Çeşitli malzemelerin öğütme ve oyuklayıcı aşınma altındaki performansı	36
Tablo 6.1.	Deneylede kullanılan malzemelerin spektral analiz ile elde edilen kimyasal bileşimleri	41
Tablo 6.2.	Deneylede kullanılan numunelerin ısıtılma şartları (ostenitleme süresi: 6 saat, su verme ortamı: hava, temperleme süresi: 6 saat)	44
Tablo 7.1.	%0,74 Nb içeren 3 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerin noktasal EDS analizi sonuçları	49
Tablo 7.2.	%0,253 Ti içeren 5 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerin noktasal EDS analizi sonuçları	51
Tablo 7.3.	%0,376 Ti içeren 6 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerin noktasal EDS analizi sonuçları	53

Tablo 7.4.	%0,72 V içeren 8 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.....	55
Tablo 7.5.	%0,53 V içeren 9 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.....	56
Tablo 7.6.	%0,253 Ti içeren 51 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.....	61
Tablo 7.7.	%0,253 Ti içeren 61 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.....	62
Tablo 7.8.	%0,74 Nb içeren 32 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.....	67
Tablo 7.9.	%0,253 Ti içeren 52 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.....	69
Tablo 7.10.	%0,376 Ti içeren 62 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.....	71
Tablo 7.11.	%0,72 V içeren 82 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.....	73
Tablo 7.12.	%0,53 V içeren 92 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.....	74
Tablo 7.13.	%0,253 Ti içeren 53 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.....	78
Tablo 7.14.	%0,72 V içeren 83 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.....	82
Tablo 7.15.	%0,53 V içeren 93 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.....	84
Tablo 7.16.	%0,72 V içeren 84 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.....	89
Tablo 7.17.	%0,53 V içeren 94 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.....	91
Tablo 7.18.	Döküm halindeki ve ısıtıl işlem uygulanmış numunelerin sertlik değerleri (R_c).....	92
Tablo 7.19.	Deneyleerde kullanılan bütün numunelerin oda sıcaklığında 60 no ve 120 no zımpara kullanılarak 4,65 m'lik kayma mesafesi için yapılan aşınma deneyi sonuçları	99

Tablo 7.20.	İncelenen beyaz dökme demirlerin bağıl aşınma dirençleri.....	101
Tablo 7.21.	İncelenen beyaz dökme demirler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen toplu sonuçlar	110



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1.	Kalın kesitli %20 Cr, %2 Mo, %1 Ni, %2,7 C'lu bir dökme demirin mikroyapısı, solda ötektik karbür dağılımı (100x), sağda ısıtılma ile elde edilen ikincil karbürler (500x)	9
Şekil 3.2.	Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde krom ve karbon oranı arasındaki ilişki	10
Şekil 3.3.	Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerde matris mikrosertliğinin (Hv 50) aşınma direncine etkisi.....	11
Şekil 4.1.	%12-16 Cr, % 19-21 Cr içeren beyaz dökme demirlerin likidüs sıcaklıklarının karbon içeriğine göre değişimi.....	20
Şekil 4.2.	Fe-C-Cr sistemi	21
Şekil 4.3.	Fe-C-Cr sisteminin sıvılaşma yüzeyi	22
Şekil 4.4.	Fe-C-Cr sisteminin 900°C izotermi.....	23
Şekil 4.5.	Fe-C-Cr sisteminin 1150°C izotermi.....	24
Şekil 4.6.	Fe-C-Cr sisteminin 700°C izotermi.....	24
Şekil 4.7.	Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde perlit dönüşümünün önlenmesinde krom, karbon ve molibdenin etkisi	29
Şekil 4.8.	Çeşitli kesitlerdeki yüksek kromlu demirlerde havada su vermeden sonra matris yapısına ve sertlik üzerine karbon ve molibden içeriğinin etkisi a- % 12-14 Cr, % 1,5 Mo'de karbon içeriğinin etkisi	31
	b- % 12-14 Cr, % 3 C'da molibdenin etkisi	31
Şekil 4.9.	Çeşitli yüksek kromlu beyaz dökme demirler için sertlik (HV30)- temperleme sıcaklığı eğrileri	34
Şekil 5.1.	Rölatif aşınma kaybına göre çeşitli malzemelerin karşılaştırılması	37

Şekil 6.1.	Deneylerde kullanılan abrasiv aşınma cihazının şematik gösterimi	45
Şekil 7.1.	Hiçbir alaşım elementi katılmamış 1 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı	46
Şekil 7.2.	%0,24 Nb ile alaşımlanmış 2 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı	47
Şekil 7.3.	%0,74 Nb ile alaşımlanmış 3 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı	48
Şekil 7.4.	%0,74 Nb ile alaşımlanmış 3 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş döküm halindeki mikroyapısı	48
Şekil 7.5.	% 0,096 Ti ile alaşımlanmış 4 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı	49
Şekil 7.6.	%0,253 Ti ile alaşımlanmış 5 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı	50
Şekil 7.7.	%0,253 Ti ile alaşımlanmış 5 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilen döküm halindeki mikroyapısı	51
Şekil 7.8.	% 0,376 Ti ile alaşımlanmış 6 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı	52
Şekil 7.9.	%0,376 Ti ile alaşımlanmış 6 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş döküm halindeki mikroyapısı	52
Şekil 7.10.	%0,14 V ile alaşımlanmış 7 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı	53
Şekil 7.11.	%0,72 V ile alaşımlanmış 8 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı	54
Şekil 7.12.	%0,72 V içeren 8 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş döküm halindeki mikroyapısı	54
Şekil 7.13.	%0,53 V içeren 9 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı	55
Şekil 7.14.	%0,53 V içeren 9 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş döküm halindeki mikroyapısı	56
Şekil 7.15.	Hiçbir alaşım elementi katılmamış 11 nolu numunenin 1000°C’da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	57
Şekil 7.16.	%0,24 Nb ilave edilmiş 21 nolu numunenin 1000 °C’da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	58

Şekil 7.17.	%0,74 Nb ilave edilmiş 31 nolu numunenin 1000 °C’da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	58
Şekil 7.18.	%0,096 Ti ile alaşımlanmış 41 nolu numunenin 1000°C’da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	59
Şekil 7.19.	%0,253 Ti ile alaşımlanmış 51 nolu numunenin 1000°C’da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	60
Şekil 7.20.	%0,253 Ti ile alaşımlanmış 51 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilen 1000°C’da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	60
Şekil 7.21.	%0,376 Ti içeren 61 nolu numunenin 1000°C’da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	61
Şekil 7.22.	%0,376 Ti içeren 61 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilen 1000°C’da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	62
Şekil 7.23.	%0,14 V içeren 71 nolu numunenin 1000°C’da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	63
Şekil 7.24.	%0,72 V içeren 81 nolu numunenin 1000°C’da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	63
Şekil 7.25.	%0,53 V içeren 91 nolu numunenin 1000°C’da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	64
Şekil 7.26.	Hiçbir alaşım elementi ilave edilmemiş 12 nolu numunenin 1000°C’da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı	65
Şekil 7.27.	%0,24 Nb ile alaşımlanmış 22 nolu numunenin 1000°C’da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı	65
Şekil 7.28.	%0,74 Nb ile alaşımlanmış 32 nolu numunenin 1000°C’da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı	66
Şekil 7.29.	%0,74 Nb ile alaşımlanmış 32 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş 1000°C’da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da 6 saat temperlenmesiyle elde edilen mikroyapısı	67

Şekil 7.30.	%0,096 Ti ile alaşımlanmış 42 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı	68
Şekil 7.31.	%0,253 Ti ile alaşımlanmış 52 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı	68
Şekil 7.32.	%0,253 Ti ile alaşımlanmış 52 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş 1000°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesiyle elde edilen mikroyapısı	69
Şekil 7.33.	%0,376 Ti ile alaşımlanmış 62 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı	70
Şekil 7.34.	%0,376 Ti ile alaşımlanmış 52 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş 1000°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesiyle elde edilen mikroyapısı	70
Şekil 7.35.	%0,14 V ile alaşımlanmış 72 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı	71
Şekil 7.36.	%0,72 V ile alaşımlanmış 82 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı	72
Şekil 7.37.	%0,72 V ile alaşımlanmış 82 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş 1000°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesiyle elde edilen mikroyapısı	72
Şekil 7.38.	%0,53 V ile alaşımlanmış 92 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı	73
Şekil 7.39.	%0,53 V ile alaşımlanmış 92 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş 1000°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesiyle elde edilen mikroyapısı	74

Şekil 7.40.	Hiçbir alaşım elementi ilave edilmemiş 13 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	75
Şekil 7.41.	%0,24 Nb ile alaşımlanmış 23 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	75
Şekil 7.42.	%0,74 Nb ile alaşımlanmış 33 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	76
Şekil 7.43.	%0,096 Ti ile alaşımlanmış 43 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	77
Şekil 7.44.	%0,253 Ti ile alaşımlanmış 53 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	77
Şekil 7.45.	%0,253 Ti ile alaşımlanmış 53 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonraki mikroyapısı	78
Şekil 7.46.	%0,376 Ti ile alaşımlanmış 63 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	79
Şekil 7.47.	% 0,376 Ti içeren 1050°C'da ostenitlenip havada su verilmiş 63 nolu numunenin X-ışınları difraksiyon paterni.....	80
Şekil 7.48.	%0,14 V ile alaşımlanmış 73 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	81
Şekil 7.49.	%0,72 V ile alaşımlanmış 83 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.....	81
Şekil 7.50.	%0,72 V ile alaşımlanmış 83 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonraki mikroyapısı	82
Şekil 7.51.	%0,53 V ile alaşımlanmış 93 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı	83
Şekil 7.52.	%0,53 V ile alaşımlanmış 93 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonraki mikroyapısı	83

Şekil 7.53.	Hiçbir alaşım elementi ilave edilmemiş 14 nolu numunenin 1050°C’da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı	84
Şekil 7.54.	%0,24 Nb ilave edilmiş 24 nolu numunenin 1050°C’da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.....	85
Şekil 7.55.	%0,74 Nb ilave edilmiş 34 nolu numunenin 1050°C’da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.....	85
Şekil 7.56.	%0,096 Ti ilave edilmiş 44 nolu numunenin 1050°C’da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.....	86
Şekil 7.57.	%0,253 Ti ilave edilmiş 54 nolu numunenin 1050°C’da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.....	86
Şekil 7.58.	%0,376 Ti ilave edilmiş 64 nolu numunenin 1050°C’da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.....	87
Şekil 7.59.	%0,14 V ilave edilmiş 74 nolu numunenin 1050°C’da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.....	87
Şekil 7.60.	%0,72 V ilave edilmiş 84 nolu numunenin 1050°C’da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.....	88
Şekil 7.61.	%0,72 V ile alaşımlanmış 84 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş 1050°C’da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da 6 saat temperlenmesiyle elde edilen mikroyapısı	89
Şekil 7.62.	%0,53 V ilave edilmiş 94 nolu numunenin 1050°C’da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.....	90
Şekil 7.63.	%0,53 V ile alaşımlanmış 94 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş 1050°C’da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da 6 saat temperlenmesiyle elde edilen mikroyapısı	90
Şekil 7.64.a.	Alaşım elementlerinin sertliğe etkisi (döküm halinde)	93
Şekil 7.64.b.	Alaşım elementlerinin sertliğe etkisi (1000°C’da ostenitlenip havada su verilmiş halde)	93

Şekil 7.64.c.	Alaşım elementlerinin sertliğe etkisi (1000°C’da ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da temperlenmiş halde)	94
Şekil 7.64.d.	Alaşım elementlerinin sertliğe etkisi (1050°C’da ostenitlenip havada su verilmiş halde)	95
Şekil 7.64.e.	Alaşım elementlerinin sertliğe etkisi (1050°C’da ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da temperlenmiş halde)	96
Şekil 7.65.a.	Nb içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ısıtılma işleminin sertliğe etkisi.....	97
Şekil 7.65.b.	Ti içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ısıtılma işleminin sertliğe etkisi	97
Şekil 7.65.c.	V içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ısıtılma işleminin sertliğe etkisi	98
Şekil 7.66.	%0,74 Nb içeren 21 nolu numunenin 1000°C’den havada su verilmiş haldeki yüzeyinin aşınma deneyinden önceki (800 no’ya kadar zımparalanmış) yüzey profili.....	100
Şekil 7.67.	%0,74 Nb içeren 21 nolu numunenin 1000°C’den havada su verilmiş haldeki yüzeyinin 60 no zımpara ile yapılan aşınma deneyinden sonraki yüzey profili	100
Şekil 7.68.	Nb içeren malzemelerde ısıtılma işleminin aşınma kaybına etkisi.....	103
Şekil 7.69.	Ti içeren malzemelerde ısıtılma işleminin aşınma kaybına etkisi	104
Şekil 7.70.	V içeren malzemelerde ısıtılma işleminin aşınma kaybına etkisi.....	105
Şekil 7.71.	Deneylerde kullanılan bütün beyaz dökme demirlerin bağlamlı aşınma direnci-sertlik ilişkisi.....	107

SEMBOL LİSTESİ

K_1	: $(Cr,Fe)_{23}C_6$
K_2	: $(Cr,Fe)_7C_3$
K_c	: $(Fe,Cr)_3C$
R	: Bağlı Aşınma Direnci
R_c	: Rockwell C



YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERİN AŞINMA DİRENCİNE ALAŞIM ELEMENTLERİNİN VE ISIL İŞLEMİN ETKİSİ

ÖZET

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler; makul derecede tokluk ve işleme operasyonlarını kolaylaştıran tavlama imkanıyla birlikte mükemmel bir abrasiv aşınma direnci kombinasyonuna sahiptirler. Bu nedenlerden dolayı bir çok uygulama alanında artan miktarlarda kullanım bulmaktadırlar.

Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirler, cevher kırıcıları, öğütücü değirmen bilyaları, çeşitli astarlar, tarım alet ve makinaları, pistonlar ve dişlileri, çeşitli konveyörler, grayder bıçakları, çeşitli pompalar, pabuçlar, diskler, tuğla kalıpları, segmanlar ve çubuklar, madencilik ve mineral sanayii gibi yüksek abrasiv aşınma direnci gerektiren yerlerde kullanılmaktadırlar.

Bu uygulamalarda kullanılan malzemelerin aşınması maddi zararlara ve iş kayıplarına sebep olmaktadır. Bundan dolayı daha sert ve aşınmaya daha dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Yüksek krom-molibden alaşımlı beyaz dökme demirler bu amaca en uygun malzeme gruplarından biridir.

Bu çalışmanın amacı alaşım elementlerinin ve ısıt işlemlerin yüksek Cr-Mo'li beyaz dökme demirlerin aşınma direncine etkilerini incelemektir. Bunun için yüksek kromlu beyaz dökme demir malzemeye çeşitli oranlarda Nb, Ti ve V ilave edilmiş ve çeşitli ısıt işlemler uygulanmıştır.

%15 Cr, %2,5 Mo, %2,5 C içeren baz malzemeye %0,24 ve %0,74 Nb, %0,096, %0,253 ve %0,376 Ti, %0,14, %0,53 ve %0,72 V ilave edilmiş ve bu malzemelere 1000°C ve 1050°C'da 6 saat süreyle ostenitleme ısıt işlemi uygulanmıştır. Daha sonra numunelere havada su verilmiştir. Daha sonra su verilen bu numunelere 250°C'da 6 saat temperleme işlemi uygulanmıştır.

Her bileşim ve ısıt işlem durumu için metalografi numuneleri hazırlanmış ve standart parlatma metodları ile parlatılarak dağlanmışlardır. Bu numuneler üzerinde optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu ile mikroyapı incelemesi, bazı numuneler üzerinde de noktasal faz analizleri yapılmış ve mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir.

Yapılan metalografik incelemeler sonucunda, ısıt işlem görmemiş döküm halindeki bütün malzemelerin mikroyapısının kromca zengin birincil karbürler, molibdenca zengin ikincil karbürler ve Fe-Cr ferrit katı eriyik matristen ibaret olduğu belirlenmiştir. Malzemelere ısıt işlem uygulandıktan sonra matris martensit'e dönüşmüş ve mikroyapıda kromca zengin birincil karbürlere ve molibdenca zengin ikincil karbürlere ilaveten, Nb içeren malzemelerde niyobyumca zengin ikincil karbürler, Ti içeren malzemelerde ise titanyumca zengin ikincil karbürler

çökelmişlerdir. V içeren malzemelerde ise vanadyumca zengin ikincil karbür çökmesi gözlenmemiştir. Isıl işlem görmüş Ti içeren malzeme grubunda 1050°C'dan havada su verilenlerin yapısındaki kromca zengin birincil karbürlerin daha masif bir yapıya sahip oldukları belirlenmiştir.

Numunelerin her işlem sonrası sertliği ölçülmüş, abrasiv aşınma deneyleri yapılmıştır. Abrasiv aşınma deneylerinde 16 mm çapında ve 30 mm yüksekliğinde silindirik numuneler kullanılmıştır. Aşınma deneylerinden önce numunelerin yüzeyleri 800 no'ya kadar zımparalanmış ve hassas terazide tartılmışlardır. Daha sonra 60 ve 120 no Al_2O_3 esaslı zımpara ile 4,65 m'lik kayma yolu için 0,24 MPa'lık basma gerilmesi altında oda sıcaklığında aşınma deneyleri yapılmış ve tekrar ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Deney öncesi ve sonrasındaki ağırlık farkları hesaplanarak ağırlık kayıpları tespit edilmiştir.

Isıl işlem uygulanmış malzemelerde sertlik değerleri döküm haline göre artmıştır. En yüksek sertlik değerlerini veren ısıtıl işlem; 1000°C'da 6 saat ostenitlemeden sonra havada su verme işlemidir. Su verme işleminden sonra yapılan temperleme ısıtıl işlemleri malzemelerin sertliklerinde düşüşe yol açmaktadır.

Malzemelerin 1050°C'da ostenitlenip havada su verilmesiyle elde edilen sertlik değerleri 1000°C'da ostenitlenip havada su verme ile elde edilen değerlerden düşük olmasına rağmen 1050°C'dan su verme ile elde edilen aşınma direnci değerleri 1000°C'dan su verme ile elde edilen aşınma direnci değerlerinden daha yüksektir. En yüksek aşınma direnci değerlerini veren ısıtıl işlemin 1050°C'da ostenitlemeden sonra havada su verme işlemi, en düşük aşınma direnci değerlerini veren ısıtıl işlemin ise 1000°C'da ostenitlemeden sonra havada su vermeyi müteakip 250°C'da temperleme işlemi olduğu tespit edilmiştir.

En yüksek aşınma direncini veren malzeme grubunun ise Ti ile alaşımlanmış malzeme grubu olduğu belirlenmiştir.

60 no zımpara 120 no zımparaya göre daha kalın taneli abrasiv partiküllere sahip olduğundan dolayı malzemeleri daha çok aşındırmakla birlikte her iki zımparalarla yapılan aşınma deneylerinden birbirine paralel sonuçlar elde edilmiştir.

THE EFFECT OF ALLOYING ELEMENTS AND HEAT TREATMENT ON ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF THE HIGH CHROMIUM WHITE CAST IRONS

SUMMARY

The high-chromium white cast irons possess a combination of excellent abrasion resistance together with a reasonable degree of toughness and the possibility of annealing to facilitate machining operations. For these reasons they are finding increasing use in many fields of application.

The high alloy white cast irons are primarily used for abrasion resistant applications such as slurry pumps, ore classifiers, brick molds, impeller blades and liners for shot blasting equipment, refine disks in pulp refiners, impact hammers, roller segment and ring segment in coal grinding mills, feed and lifter bars and mill liners in ball mills for hard-rock mining, tillage tools, bucket teeth, scraper blades, screw conveyors and grain handling equipment.

In these applications, wear of materials causes economical waste and production losses. For this reason, the materials which are much harder and wear resistant must be improved. High Cr-Mo white cast irons are one of the suitable group of the materials for this aim.

The aim of this study is to investigate the effects of alloying elements and heat treatments on wear resistance of high Cr-Mo white cast irons. For this purpose, varying amounts of Nb, Ti and V were added and some heat treatments were applied to the high chromium white cast irons.

0,24% and 0,74% Nb; 0,096%, 0,253% and 0,376% Ti; 0,14%, 0,53% and 0,72% V were added to the base material: 15% Cr, 2,5% Mo, 2,5% C. These materials were austenitized at 1000°C and 1050°C for 6 hours. After austenitizing they were air-quenched. Then quenched materials were tempered at 250°C for 6 hours.

Metallographic specimens were prepared for each composition and heat treatment condition. These specimens were polished by standard polishing methods and then etched. Optical and scanning electron microscopy examinations were carried out and some photographs were taken on the microstructures of the specimens. During Scanning Electron Microscope examinations, EDS analyses were also made on some of the specimens.

It was detected from the metallographic examinations that microstructures of all as-cast materials had chromium-rich primary carbides, molybdenum-rich secondary carbides

and Fe-Cr ferrite solid solution matrixes. Matrixes of the specimens transformed to the martensite after heat treatments and titanium-rich secondary carbides precipitated in the specimens containing Ti, niobium-rich secondary carbides precipitated in the specimens containing Nb, in addition to the chromium-rich primary carbides and molybdenum-rich secondary carbides in the microstructure. Vanadium-rich secondary carbide precipitation in the specimens containing V was not observed. It was detected that chromium-rich primary carbides in the specimen group containing Ti which was air-quenched after austenitizing at 1050°C for 6 hours had more massive structures.

Rockwell hardness and abrasive wear tests were carried out on each specimen. Cylindrical specimens which have a diameter of 16 mm and a height of 30 mm were used in the abrasive wear tests. Surfaces of the specimens were ground by sandpaper up to 800 grid and their weights were measured by a sensitive scale before the wear tests. Then wear tests were performed by Al₂O₃-based 60 and 120 grid abrasive papers under the compression stress of 0,24 MPa for 4,65 m sliding length at the room temperature. After performing the abrasive wear tests, weights of the specimens were measured again and weight losses were detected by calculating the weight differences before and after the wear tests.

Hardness values of the as-cast materials increased after heat treatment. Heat treatment giving the highest hardness values was giving the highest abrasive wear resistance had been air-quenching after austenitizing at 1050°C and heat treatment giving the lowest wear resistance had been tempering at 250°C after air-quenching from 1000°C.

It was also found that material group giving the highest abrasive wear air-quenching after austenitizing at 1000°C for 6 hours. Tempering heat treatments after air-quenching resulted in drop in the hardness values of the materials.

Although hardness values of the materials obtained from the air-quenching after austenitizing at 1050°C were lower than those obtained from the air-quenching after austenitizing at 1000°C, abrasive wear resistance values obtained from air-quenching after austenitizing at 1050°C were higher than those obtained from the air-quenching after austenitizing at 1000°C. It was detected that heat treatment resistance values had been the material group alloyed with Ti.

Parallel results were obtained from the wear tests carried out with both 60 grid and 120 grid abrasive papers, although 60 grid abrasive paper abraded the materials more than the 120 grid abrasive paper did, since 60 grid abrasive paper had coarser abrasive particles compared to the 120 grid abrasive paper.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Alaşımlı beyaz dökme demirler diğer dökme demirlerden ayrı bir malzeme grubudur. Yüksek alaşımlı ve özellikle de yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirler, cevher kırıcıları, öğütücü değirmen bilyaları, çeşitli astarlar, tarım alet ve makinaları, pistonlar ve dişlileri, çeşitli konveyörler, grayder bıçakları, çeşitli pompalar, pabuçlar, diskler, tuğla kalıpları, segmanlar ve barlar, madencilik ve mineral sanayii gibi yüksek abrasiv aşınma direnci gerektiren yerlerde kullanılmaktadırlar [1-10].

Yukarıda bahsedilen alanlarda kullanılan malzemelerin aşınması maddi zararlara ve iş kayıplarına sebep olmaktadır. Bundan dolayı daha sert ve aşınmaya daha dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Yüksek krom-molibden alaşımlı beyaz dökme demirler bu amaca en uygun malzeme gruplarından biridir.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin yapısında yeralan krom korozyon direncini artırır. Mikroyapıda yeralan geniş primer ve özellikle M_7C_3 tipi ötektik karbürler; kırma, öğütme, işleme gibi alanlar için gerekli yüksek sertliği ve aşınma direncini sağlarlar [6,7,11].

Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirler aynı zamanda yeterli derecede tokluk ve işlenebilme özelliğine sahiptir. Mükemmel aşınma direnci ve tokluk arasındaki denge, ısıtma işlem ve alaşımlandırma ile sağlanır.

Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirler başlıca iki gruba ayrılır:

- 1) Nikel-krom içeren beyaz dökme demirler; bileşimlerinde % 3-5 nikel, % 1-4 krom veya % 7-11 krom bulunur.
- 2) Krom-molibden içeren beyaz dökme demirler:
 - Bileşimlerinde % 11-23 krom, max % 3 molibden, nikel ya da bakır bulunur.
 - Bileşimlerinde % 25-28 krom, max % 1,5 nikel ve/veya molibden bulunur.

Bu çalışmada; yukarıda belirtilen alanlarda yaygın bir şekilde kullanılan % 15 Cr-% 3 Mo'li beyaz dökme demir baz malzemeye çeşitli alaşım elementleri ilave ederek ve çeşitli ısıl işlemler uygulayarak daha iyi abrasiv aşınma direnci sağlayacak bileşim ve ısıl işlem şartlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.



2. DÖKME DEMİRLER

2.1 Dökme Demirlerin Tanımı

Dökme demir ismi; gerçekte özellikleri birbirinden oldukça farklı malzemelerin meydana getirdiği grubun veya ailenin soy ismidir. Genel olarak dökme demirler; % 2-4 oranında karbon, % 3.5'a kadar silisyum içerebilen bir demir alaşımı olup dökülmüş halde sünek değildirler.

2.2 Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Dökme demirler, mühendislikte kullanılan genel bir terimdir. Bunlar; beyaz dökme demirler, gri dökme demirler, temper dökme demirler ve küresel grafitli dökme demirler olarak sınıflandırılmaktadırlar. Değişik alaşımlama, ısıtma işlem ve döküm karakteristikleri ile dökme demirlere oldukça geniş mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikler kazandırılır. Dökme demirler, geniş bir uygulama alanına sahip tribolojik malzemelerdir. Bu malzemelerin kullanım alanlarında aşınma direnci özellikle önemlidir. Dökme demirlerin matris yapısı perlitten martensite kadar değişiklikler gösterebilir.

2.2.1 Beyaz Dökme Demirler

Karbonun tamamı sementit olarak bileşik haldedir. Katılaşma sıcaklığında hızlı soğuma yoluyla elde edilir. Beyaz dökme demirlerde önemli miktarda sementit bulunmasından ve sementitin sert ve gevrek bir bileşik oluşundan dolayı, beyaz dökme demirlerin yapıları sert ve aynı zamanda aşınmaya karşı dirençlidir. Gevrek yapılarından dolayı beyaz dökme demirlerin işlenebilmesi zordur, aşınma direncinin önemli olduğu ve sünekliğin istenmediği yerlerde kullanılır.

2.2.2 Gri Dökme Demirler

Katılaşma sonrasında bileşimindeki karbonun büyük bir kısmı serbest halde veya başka bir ifadeyle grafit lamelleri halinde bulunur. Genellikle ötektik üstü demirlerdir ve % 2,5-4 karbon içerirler. Gri dökme demirlerin mekanik özellikleri doğrudan doğruya grafit yapısına ve morfolojisine bağlıdır.

2.2.3 Temper Dökme Demirler

Karbon içeriğinin önemli bir kısmı veya tamamı temper karbonu olarak adlandırılan düzensiz rozetler şeklindedir. Beyaz dökme demirin yaklaşık 900°C civarında temperlenmesiyle elde edilir.

Temper dökme demirler, temperlemenin oksidan ya da nötr bir ortamda yapılmasına göre ikiye ayrılır;

1. Beyaz temper dökme demir
2. Siyah temper dökme demir

2.2.4 Küresel Grafitli Dökme Demirler

Bu tip dökme demirlerde grafit, lameler formdan küresel forma dönüştürülür. Karbonun lamel yerine küre şeklinde oluşmasını sağlamak için sıvı metale, döküm öncesi aşılایıcı (Mg veya Ce) ilave edilir. Grafit şeklinin lamel yerine küre oluşu dökme demire süneklik ve mukavemet kazandırır. Küresel grafitli dökme demirler aynı zamanda nodüler, sfero ve düktil gibi isimlerle de anılırlar.

3. YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLER

Yüksek oranda krom ve molibden içeren beyaz dökme demirler çamur pompalarında, tuğla kalıplarında, çeşitli mineral delme, tesviye, işleme millerinde, sert kayaların işlenmesi için gerekli ekipmanlarda vb. gibi alanlarda kullanılmaktadırlar [6,7]. Tablo 3.1.'de aşınmaya dirençli yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin bileşimleri verilmektedir.

Tablo 3.1. Aşınmaya dirençli yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin bileşimleri [7].

Sınıf	Tip	Sembol	Kimyasal Bileşim, %					
			C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
I	A	NI-Cr-HC	3,0-3,60	1,30 max	0,80 max	3,30-5,0	1,40-4,0	1,0 max (a)
I	B	NI-Cr-LC	2,50-3,0	1,30 max	0,80 max	3,30-5,0	1,40-4,0	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, %0,15 S

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

HC: Yüksek karbonlu

LC: Düşük karbonlu

HiCr: Yüksek kromlu

3.1 Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Özellikleri

3.1.1 Fiziksel Özellikler

Artan karbon miktarı sonucu özgül ağırlıklarında düşme görülen beyaz dökme demirlerde, yapıda kalıntı ostenit artarsa, özgül ağırlık da artar. Genellikle özgül ağırlık 7,5-7,8 g/cm³'tür. Isıl genleşme katsayıları 20-425°C aralığı için 13,5-18 µm/m.°C mertebelerindedir. Elektrik direnci 0,5µΩm, ısıl iletkenlikleri ise 22 w/m°K civarındadır [6].

3.1.2 Mekanik Özellikler

Tablo 3.2'de 25-32 mm kesitli yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerin çeşitli mekanik özellikleri verilmektedir.

Tablo 3.2. 25-32 mm kesitli yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerin mekanik özellikleri [6].

Koşullar (Matris)	Tür	%C	Sertlik			Çekme Özellikleri		Basma Özellikleri		Isıl.Gen. Katsayısı	
			HB	DPH	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 Temperl. (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: Martensit,

O: Ostenit,

P: Perlit

Tablo 3.2.'deki değerler çeşitli ısı ve mekanik işlemeler sırasında oluşabilen çatlaklar sebebiyle geniş sapmalar gösterebilir. Bununla beraber bu değerler pratikteki verilerle uygunluk sağlamaktadır.

Tokluk özellikle kırma ve öğütme işlemlerinde kazaları önleyici bir faktör olduğundan çok önemlidir.

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. Mesela 30 mm'lik çentiksiz izod deney çubukları az alaşımlı beyaz dökme demirde 22-58 joule darbe enerjisi verirken, yüksek alaşımlı beyaz dökme demirde 52-87 joule darbe enerjisi vermektedir. Karbon miktarı artışı darbe direncini düşürür [6].

Son yıllarda kırılma tokluğu ölçümü başarılı bir şekilde yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlere uygulanmıştır. Karbon artışı ile martensitik beyaz dökme demirlerin kırılma tokluğu azalır [6,7].

3.1.3 Manyetik zellikler

Ticari amaçla geliştirilen beyaz dökme demirlerden 15-2-1 ve 20-2-1 sınıfından yapılan dökümler genellikle kalıpta soğuduktan sonra stenitiktirler ve sonuçta manyetik değildirler. Soğutma sırasında perlit veya martensit dönüşümünden dolayı gerilme birikiminden kaçınıldığı için; bu tamamen östenitik durum, karmaşık şekilli dökümlerde avantaj olabilir. Beyaz dökme demirler martensitik yapıda manyetikler. Manyetik olma özelliği kalıntı ostenit arttıkça manyetiklik azaldığından kalıntı ostenitin bir fonksiyonudur [6].

3.1.4 Mikroyapı

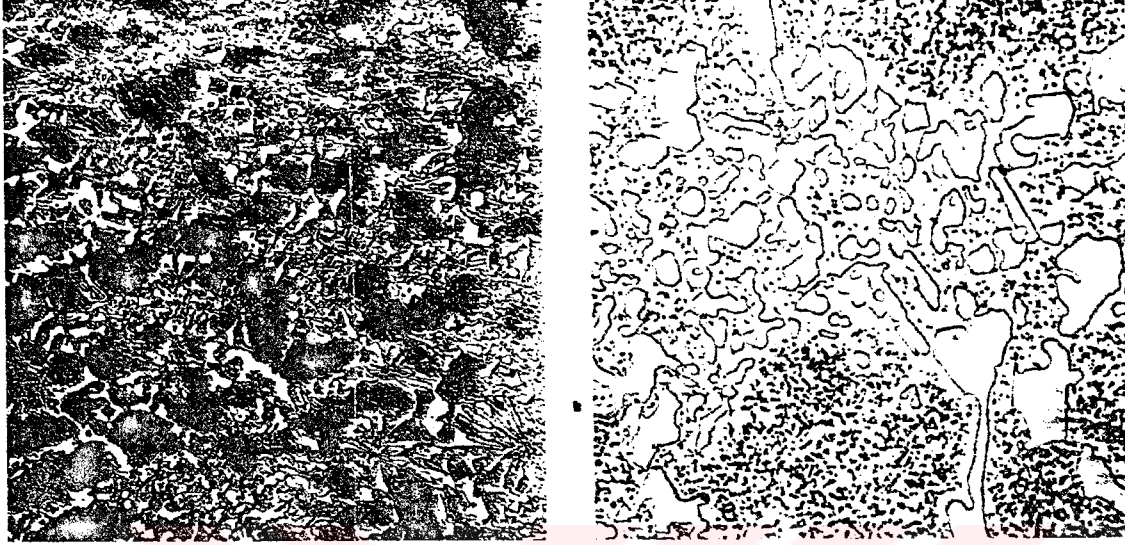
Beyaz dökme demirlerin üstün aşınma direnci doğrudan mikroyapılarının bir sonucudur. Mikroskobik ölçekte birçok aşınma prosesi, aşındırıcı tanelerinden birinin, metalin yüzeyine girmesi, deformasyon ve aşınma çizikleri oluşturması ve yüzeyden parçalar kopararak gerçekleşir. Bunun kesme veya oyma gibi bir mekanik işlem prosesine benzediği ve aşınma parçacıklarının talaşlı işleme talaşlarına benzediği görülür. Bu mekanizmanın gerçekleşebilmesi için aşındırıcı partikülün

metalden sert olması gerekir [6,7,11]. Partikül metalden yumuşaksa; proses, korozyon veya oksidasyona benzer ve sadece önemsiz bir miktarda aşınma oluşur. Tablo3.3’de çeşitli minerallerin, karbürlerin ve matrislerin sertlikleri gösterilmektedir. Tablo 3.3; çoğu aşındırıcı minerallerde ana bileşen olan kuvarsın bütün demir esaslı alaşımların matris yapılarından daha sert olduğunu ve bunları kolayca aşındırabileceğini göstermektedir.

Tablo 3.3. Çeşitli minerallerin, karbürlerin ve matrislerin sertlikleri [6,7].

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

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin mikroyapısı ostenit veya onun dönüşüm ürünlerinden oluşan bir matris içinde süreksiz ötektik demir-krom karbürler $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$ ve kromca zengin ikincil karbürlerden ibarettir (Şekil 3.1) [6].



Şekil 3.1. Kalın kesitli %20 Cr, %2 Mo, %1 Ni, %2,7 C'lu bir dökme demirin mikroyapısı, solda ötektik karbür dağılımı (100x), sağda ısıl işlemle elde edilen ikincil karbürler (500x) [6].

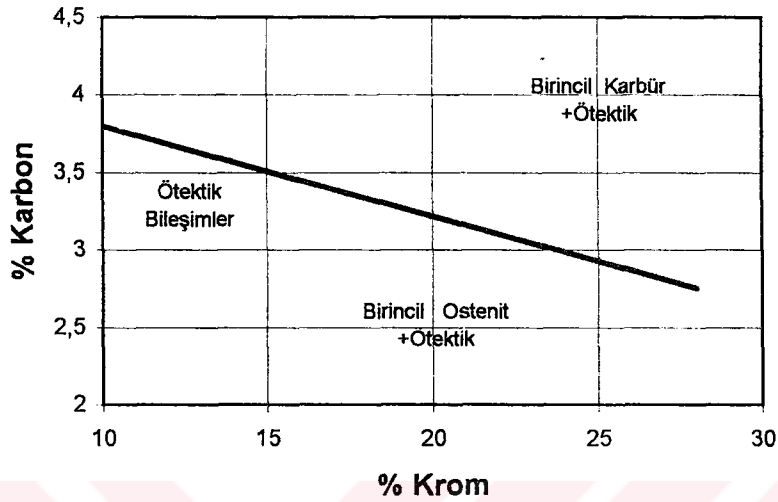
3.1.4.1 Karbürler

Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirler, mikroyapıda bulunan krom karbürlerin etkisiyle, mikroyapısında sementit içeren dökme demirlerden daha serttir ve aşınmaya daha dirençlidir. Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerde mikroyapıda süreksiz ötektik karbürler ve ikincil karbürler olmak üzere iki çeşit karbür bulunmaktadır. Tablo 3.4'de mikroyapıda bulunabilen karbürlerin sertlikleri verilmektedir, karbürlerin sertlikleri bileşime göre değişmektedir.

Tablo 3.4. Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerde mikroyapıda bulunan karbürlerin sertlikleri [12].

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

Karbürler mikroyapıda hacimce % 40-50 oranında bulunur. Bunun dışında kalan kısım matristir. Şekil 3.2.'den görüldüğü gibi karbon miktarının artışıyla mikroyapıda bulunan karbür miktarı artar. Ötektik karbon içeriği aşıldığında çok kaba birincil karbürler oluşur.



Şekil 3.2. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde krom ve karbon oranı arasındaki ilişki [6,7].

Mikroyapıda oluşan birincil karbürler gevrek yapıya sahiptir ve abrasiv partiküllerin etkisi altında kırılmaya eğilimlidirler. Bu nedenle ötektik karbon içeriği temel uygulamalar için izin verilebilen maksimum orandır [6,13]. 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 [6,7,11].

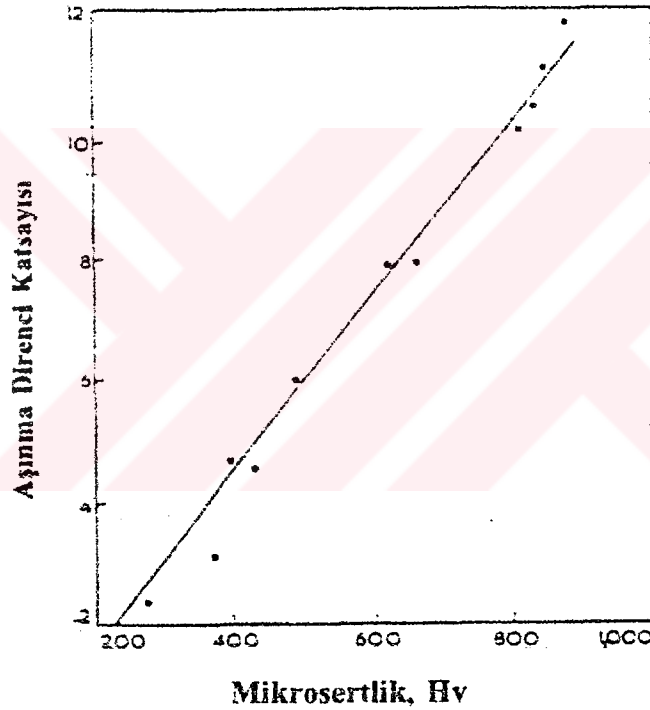
3.1.4.2 Matris

Aşınma direnci ve tokluğun yüksek olabilmesi için beyaz dökme demirin mikroyapısında uygun karbür ve matrisin bulunması gereklidir. Matris için yapılabilecek optimum seçim ikincil karbürlerle sertleştirilmiş yüksek karbonlu sert martensittir. Diğer bir alternatif ise ısıtılımlerle sertleştirilebilen kararsız ostenittir [6].

Karbon artışı ile birlikte martensitin aşınma direnci artar. Isıl işlem sonucu martensitik matrise dağılan ikincil karbürler aşınma direncinde artışa sebep olurlar. Temperleme ile aşınma direnci düşmektedir.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbürler matris içinde dağılmışlardır. Matris yumuşak olduğunda aşınır ve karbürler matristen kopar. Bu durumda karbürlerin aşınma dirençlerinin yalnızca bir kısmından yararlanılabilmiş olunur.

Matrisin önemi Şekil 3.3'den açıkça görülebilir. 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 [7].



Şekil 3.3. Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerde matris mikrosertliğinin (Hv 50) aşınma direncine etkisi [6,7].

Ostenitik 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 ostenitik matrisin, martensitik matris kadar aşınmaya dirençli olmadığı Tablo 3.5'den görülebilir.

Tablo 3.5. Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerde matris yapısının aşınma kaybına etkisi [6].

Matris	Oyma Aşınması Oranı	Öğütme Aşınması Kaybı (gm)	BHN
Perlit	0,41	0,14	406
Ostenit	0,09	0,08	564
Martensit	0,04	0,04	840

Tablo 3.5'deki sıralama endüstriyel olarak birçok kırma ve öğütme operasyonundaki pratik bilgilerle doğrulanmaktadır.

Mekanik gerilmeler etkisiyle martensitik 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.

Bununla birlikte Turenne, Lavallee ve Masounave isimli araştırmacılar ostenitik matrise sahip yüksek kromlu beyaz dökme demirin aşınma sırasında oluşan deformasyon sertleşmesi nedeniyle martensitik matrise sahip beyaz dökme demirden daha iyi aşınma direncine sahip olduğunu iddia etmişlerdir [11].

3.2 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. Darbeli kırıcılarda serbest düşen şarj malzemesi 250-500 m/sn'lik hızla hareket eden darbe çubukları ile dövülüp ezilmektedir. Parçalar daha fazla parçalanmak için dövücü bloğa doğru fırlatılmaktadır. Ledebüritik beyaz dökme demir bu şartlara direnç gösteremezken yüksek kromlu beyaz dökme demirler direnç göstermektedir. Bu tür uygulama için 15-3 HC sınıfı [ASTM A 532-67 (%15 Cr, %3 Mo, %3 C)] en iyi malzemedir. Özellikle sert kayaları kırmak için bu tür beyaz dökme demirler ekonomiktir [6,7].

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 martensitik yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde elde edilmektedir.

Yüksek gerilme ve ufalayıcı aşınma altında öğütücü bilyalar ve değirmen astarları için yüksek kromlu beyaz dökme demirler geniş bir kullanım alanına sahiptir. Kuru öğütmede birinci kamarada martensitik yüksek kromlu dökme demir bilyaları kullanmak, aşınma miktarını 1000 g/ton çimentodan 50 g/ton'a kadar düşürmüştür. Büyük ve modern değirmenlerde bu bilyaların uzun süreli kullanımı maksimum darbe direncinin elde edilmesini gerekli kılmıştır. Bu da karbon içeriğini % 12-25 düşürüp kalıntı ostenit miktarını minimuma indiren bir ısıtma işlemi uygulamakla elde edilir.

Sulu değirmenler gibi daha şiddetli şartların hakim olduğu yerlerde de yüksek kromlu beyaz dökme demir kullanılmaktadır. Son yıllarda peletlemeden önce demir cevherinin kuru öğütülmesi için yüksek kromlu beyaz dökme demir bilyaların kullanımı yönünde çalışılmaktadır. [5,6].

Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirler çimento değirmenlerinde astar olarak başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca cevher öğütmek için bilyalı ve otojen değirmenler de kullanılmaktadır. Burada yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirler, ostenitik Mn çeliklerinin veya su verilip temperlenmiş az alaşımlı çeliklerin yerini birçok alanda devralmışlardır.

Bowl değirmenleri termik santrallerde kömür öğütmek için uzun bir süredir kullanılmaktadır ve çimento, kireçtaşı, fosfat gibi cevherlerin öğütülmesinde de gittikçe daha fazla bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu da aşınmaya daha dirençli malzeme ihtiyacını doğurmuştur. Bu amaçla yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirler Babcock E ve MPS değirmenlerinde, Pfeiffer değirmenlerinde ve yanma mühendisliği değirmenlerinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

Aşınmaya dirençli pompa üretiminde yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirler artan ölçülerde kullanılmaktadır. Bu alanda yüksek krom-molibdenli 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 [6,9].

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 [6,7,10].

3.3 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. Beyaz dökme demirlerde optimum kimyasal bileşim ayarlaması; malzemeden beklenen hizmet özellikleri dikkate alınarak, maliyet, ısıtma işlemi, parça boyutu ve kompleksliği gibi üretim parametrelerine göre yapılır. Beyaz dökme demirlerde istenen mikroyapı ve aşınma direncini sağlayabilmek için C, Mn, Si, Cr, Mo, Ni, V vb. alaşım elementleri uygun kombinasyonlar şeklinde ilave edilirler.

3.3.1 Karbon

Karbon, beyaz dökme demirin sertliğini artırır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbon içeriği % 15 Cr için % 2,2-3,5, % 27 Cr için % 2,2-2,7 civarındadır. Beyaz dökme demirde, karbon artışı kırılganlığı artırır ve özellikle mukavemeti düşürür. Diğer alaşım elementlerinin sabit kaldığı düşünülürse, karbon artışı sertliği arttırdığı için aşınma direncini de arttırmaktadır.

3.3.2 Krom

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

dökme demirde krom miktarı % 10'u geçtiği zaman M_7C_3 tipi ötektik karbürler oluşur. Krom içeriği % 10'dan daha az olan alaşımlarda M_3C karbürleri oluşur [14]. Krom aynı zamanda beyaz dökme demirin korozyon direncini de artırır. % 12-22 Cr içeren beyaz dökme demirlerin martensitik yapıda en iyi aşınma direncini gösteren alaşım olduğu görülmektedir.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde krom yalnız başına kullanıldığında perlit oluşumunu önleyemediğinden, yeterli sertleşebilirliği sağlayabilmek için Mn, Ni, Mo gibi elementler ile birlikte kullanılır [15,16].

3.3.3 Molibden

Molibden, perlit oluşumunu önler. Martensitik 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.

Molibdenin Cu, Ni ve Mn'a göre üstün olan en önemli özelliği ise; kalıntı ostenite neden olmadan sertleşebilirliği arttırmasıdır [17]. Mo, aynı zamanda beyaz dökme demirin aşınma direncini de arttırmaktadır [9].

3.3.4 Silisyum

Silisyum yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin sertleşebilirliğinde olumsuz rol oynar. Silisyum oranı arttıkça ısıtılma işlem görmüş beyaz dökme demirin aşınma direnci azalır.

Mikroyapıda yeterli oranda Mn, Ni, Mo ve Cr gibi perlit oluşumunu önleyen elementler olursa silisyum artışı ile M_s sıcaklığı yükselir [6,11,18]. Silisyum içeriği yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde % 0,4-0,9 arasında olmalıdır. Silisyum ayrıca mikroyapıdaki karbür yapısını da modifiye eder. Silisyum mikroyapıdaki karbür çekirdeklerinin artışına 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 [19]. 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 [7,13,18].

3.3.5 Bakır

Bakır yüksek kromlu beyaz dökme demirlere perlit oluşumunun önlenmesi için ilave edilir. Bakırın ostenit fazında çözünürlüğü kısıtlı olduğundan, kullanımı %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 artar [7].

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 [20].

3.3.6 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 [7].

3.3.7 Kükürt

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde kükürt içeriği çok düşük olmalıdır. Optimum aşınma direnci istendiği için kükürt miktarı maksimum % 0,03'tür. Bu değerin üzerinde mikroyapıda yeralan kükürt, aşınma direncini olumsuz etkiler [7].

3.3.8 Manganez

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 değerin üzerinde manganezin kalıntı ostenit oluşturma riski ve kırılma tehlikesi artar [7,21].

3.3.9 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 [7].

3.3.10 Bor

Bor da silisyum gibi mikroyapıdaki karbür morfolojisini etkiler. Bor mikroyapıdaki karbürleri inceltir ve sürekli iğneler şekline getirir. Bunun sonucunda aşınma direnci artar [19]. Bu durum, bor miktarı % 0,12-0,3 arasında olduğunda geçerlidir. Bu limitler arasında bor ilavesiyle darbe direnci de % 20 artar [19,22].

Bor miktarının artmasıyla birincil karbürler oluşabilir. Bu yüzden bor ilavesi % 0,57 oranıyla sınırlıdır [23].

% 28 Cr'lu beyaz dökme demirlerde bor ilavesi karbür miktarını arttırmakta, karbürleri daha sert yapmakta, kabalaştırmakta ve döküm halinde martensit oluşumunu ilerletmektedir. Bor ilavesi % 28 Cr'lu beyaz dökme demirin tokluğunu düşürmektedir [24].

3.3.11 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 [15,25].

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 [26].

3.3.12 Vanadyum

Vanadyum, mikroyapıda 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 direncinde kısmi bir artışın olduğu görülür [15].

3.3.13 Titanyum

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde % 0,03-0,3 oranlarında titanyum ilavesi yapıdaki birincil ve ötektik karbürleri küreleştirme eğilimi gösterir. Yüksek sıcaklıklarda primer ve ötektik karbürler olarak çekirdeklenmiş birçok ince TiC partikülü çökler. Bu pek çok çekirdeklenme serbest dendritik, çubukumsu veya taç yaprağı şeklinde karbür büyümesini bastırır. Bu da mekanik özelliklerde, özellikle de toklukta düzelme sağlar [27].

3.3.14 Nadir Toprak Elementleri

Seryum, lantan ve neodim gibi nadir toprak elementleri; % 18 Cr içeren beyaz dökme demirlerin mikroyapısal 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, hiç nadir toprak elementi içermeyen temel alaşıma göre % 10 daha iyidir ve kırılma tokluğunda hiçbir değişim yoktur [28].

4. YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERDE KATILAŞMA VE ISIL İŞLEM

4.1 Ergitme ve Döküm

Yüksek krom molibdenli beyaz dökme demirlerden ticari amaçla beş temel sınıf geliştirilmiştir. Tablo 4.1’de söz konusu ticari bileşimler ve özellikler görülebilir.

Tablo 4.1. Ticari amaçla geliştirilen yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerin bileşimleri [6].

Tür	% Bileşim								Sertlik (R _c)		
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Cu	S (max)	P (max)	Dök. Son.	Su Ver.	Tav.
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	2.6	--	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	38-43

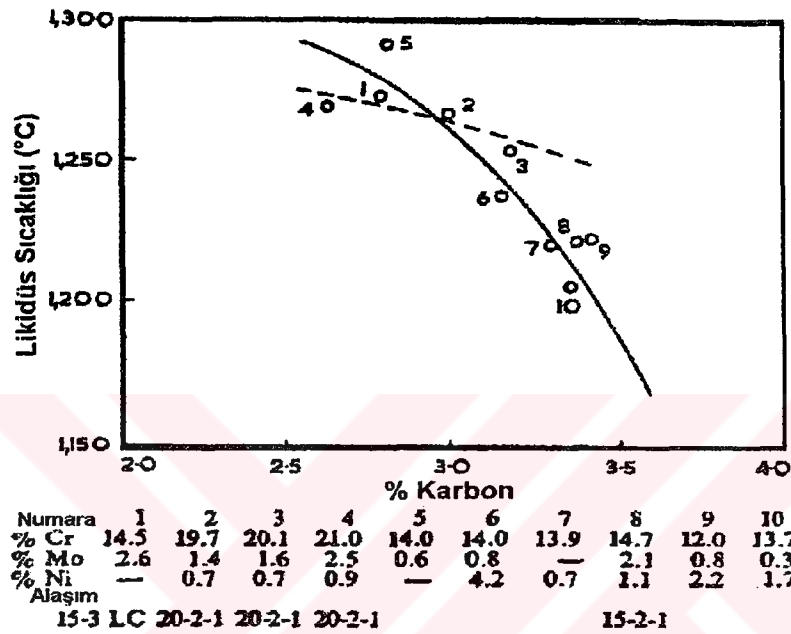
Yüksek krom ve molibdenli beyaz dökme demirler genellikle elektrik ark ve indüksiyon fırınlarında üretilir. Astar asidik, bazik veya nötr olabilir. Eğer astar asidik ise ergiyikteki krom ile silika astar arasında bir reaksiyon söz konusudur. Ancak olaya pratik açılarından baktığımızda bu; önemli bir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

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

Molibden genellikle ferro alaşım şeklinde ilave edilir. Ancak 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 sonunda yapılır.

Yüksek krom-molibden içeren beyaz dökme demirlerin likidüs sıcaklığı karbon içeriğine bağlıdır Şekil 4.1'e göre alaşımın krom içeriği de likidüs sıcaklığını etkilemektedir.



Şekil 4.1. % 12-16 Cr, % 19-21 Cr içeren beyaz dökme demirlerin likidüs sıcaklıklarının karbon içeriğine göre değişimi [6].

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

Alaşımlar yaş-kuru kum kalıba, yağlı kum yada 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.

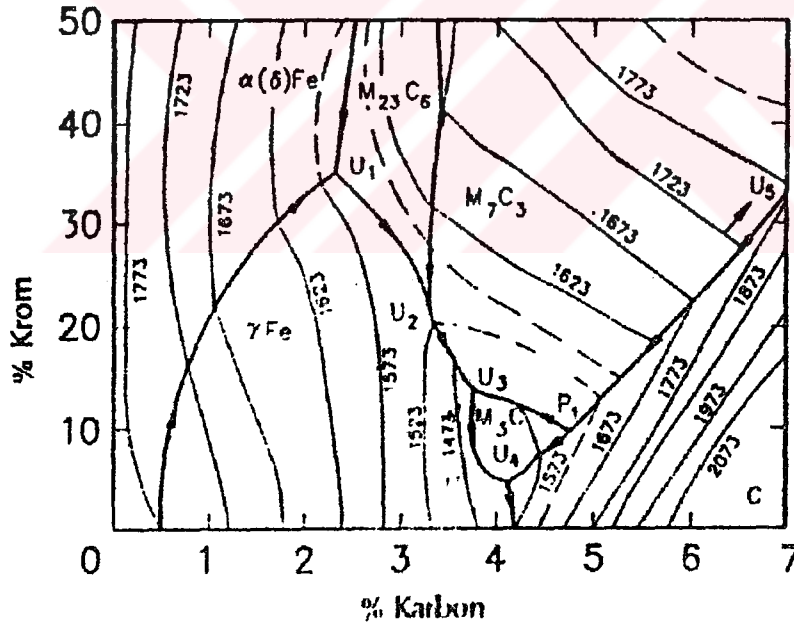
4.2 Fe-C-Cr Sistemi

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

Tablo 4.1'de ASTM A 532'ye göre yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin sınıflandırılması görülmektedir. Bu tablodan pratik olarak Fe-C-Cr sisteminin %1-4C, % 10-30 Cr içeren bölgesinin kullanıldığı anlaşılmaktadır.

Fe-C-Cr sistemi üçlü denge diyagramları birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Özellikle bu araştırmalar sıvılaşma yüzeyi ve üzerindeki kritik noktalar üzerinde yoğunlaşmıştır [18,29-34].

Şekil 4.2'de Fe-C-Cr sisteminin sıvılaşma yüzeyi görülmektedir. Tablo 4.2, Şekil 4.2'deki bazı kritik noktalarındaki reaksiyonları göstermektedir.

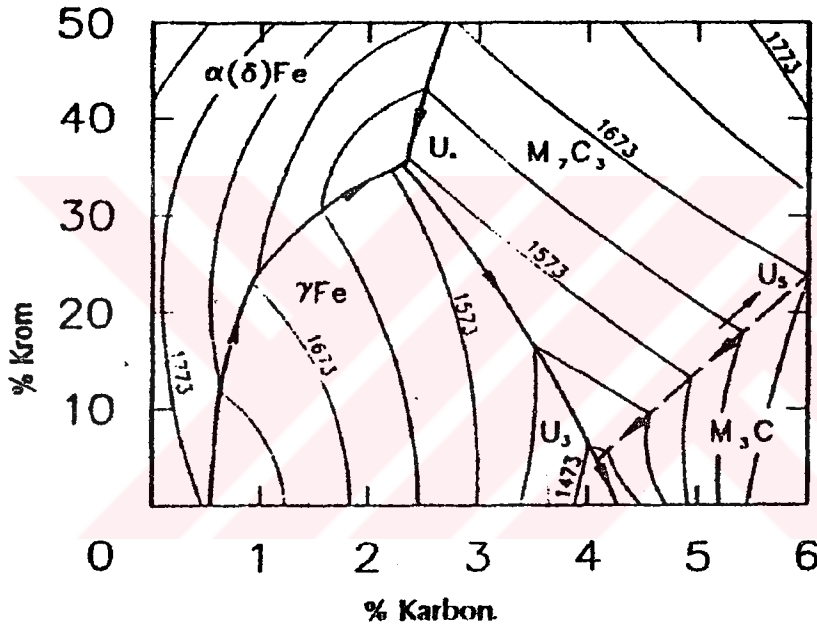


Şekil 4.2. Fe-C-Cr sistemi [29].

Tablo 4.2. Fe-C-Cr sisteminin sıvılaşma yüzeyindeki kritik noktalarda oluşan reaksiyonlar [29-31].

Sistem	Sembol	Sıcaklık°C	Reaksiyon
Fe-C-Cr	U ₁	1275	$L + \delta Fe = M_{23}C_6 + \Gamma Fe$
	U ₂	1255	$L + M_{23}C_6 = M_7C_3 + \Gamma Fe$
	U ₃	1160	$L + M_7C_3 = M_3C + \Gamma Fe$
	U ₄	1156	$L + M_3C = M_3C + \Gamma Fe + C$
	P ₁	1230	$L + M_7C_3 + C = M_3C$
	U ₅	1585	$L + M_3C_2 = M_7C_3 + C$

R.S. Jackson'un gösterdiği sıvılaşma yüzeyinde ise U₁ ve U₂ ile U₃ ve U₄ noktaları çakışmaktadır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Fe-C-Cr sisteminin sıvılaşma yüzeyi [31].

Gerçek soğuma şartlarında, Şekil 4.2'ye göre oluşması gerekli olan $M_{23}C_6$ karbürleri görülmez. Tablo 4.3'de Fe-C-Cr sisteminde bulunan fazların kristal yapıları ve kafes parametreleri görülmektedir. Tablo 4.3'den görüldüğü gibi karbürler çok karmaşık ve farklı kristal yapıya sahiptir.

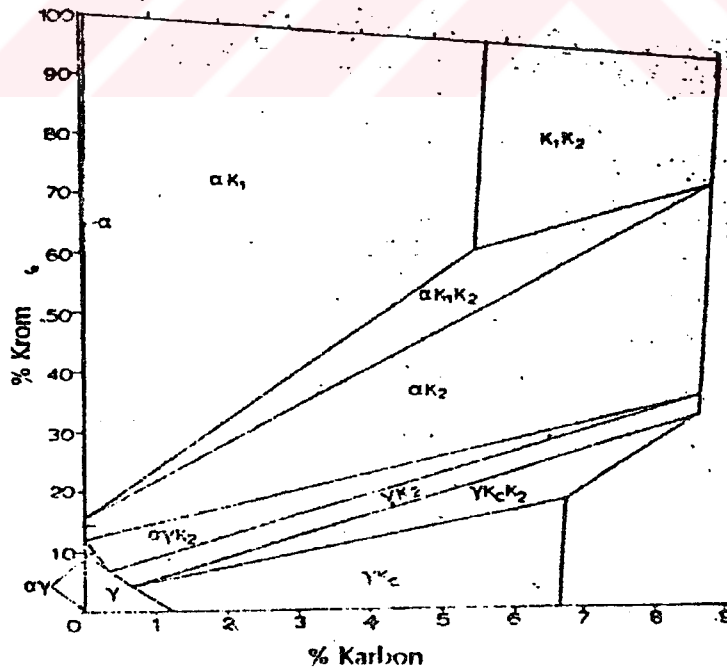
Ticari açıdan yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin çoğunluğu bileşim açısından ostenit M_7C_3 bölgesinde bulunur. Aynı Cr/C oranına sahip bileşimdeki alaşımlar ostenitleme sırasında benzer matris yapısı oluşturur. Karbür yapısı farklı olsa bile aynı sıcaklıkta yapılan ısıtılma işlemi benzer matris elde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

Tablo 4.3. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin mikroyapısında bulunan fazlar ve kafes parametreleri [12,32].

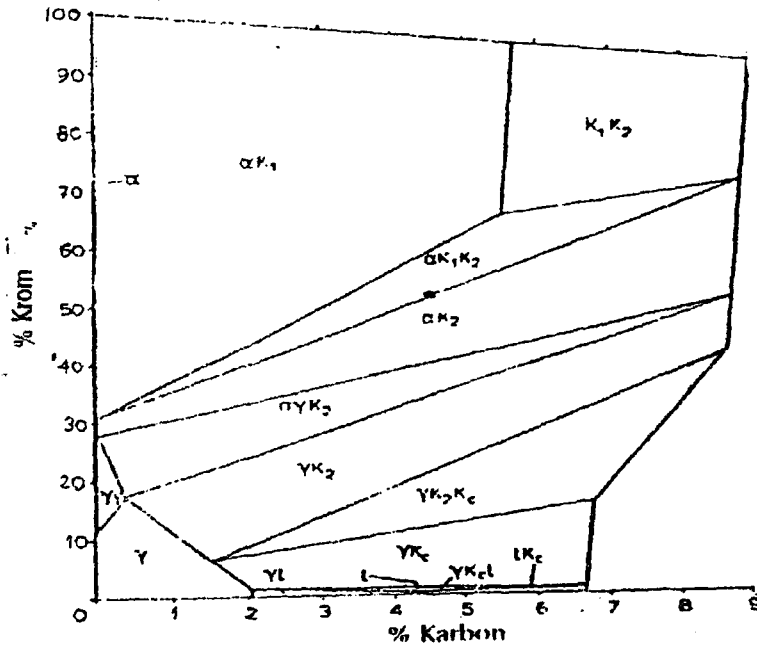
FAZ	KAFES YAPISI
α Fe	HMK
Γ Fe	YMK
δ Fe	HMK
Cr	HMK
Fe_3C	Ortorombik
Cr_{23}C_6	YMK
Cr_7C_3	Hekzagonal
Cr_3C_2	Ortorombik
σ (% 14,7 Cr)	Tetragonal

Şekil 4.4'de görülen 900°C izoterminin Şekil 4.5'deki 1150°C izotermine göre farkı, ostenit alanının daralmasıdır. Bu daralma nedeniyle belli bir bileşimdeki yüksek kromlu beyaz dökme demirin matrisini oluşturan ostenit 900°C'da, 1150°C'a göre daha az krom ve karbon içermektedir.

Düşük Cr/C oranına sahip bileşimler ısıtılarda sıcaklık değişikliklerine yüksek Cr/C oranına sahip alaşımlara göre daha hassastır. Ancak sıcaklık düşüşü ile birlikte bütün bileşimlerde ostenitin Cr ve C oranı azalır.

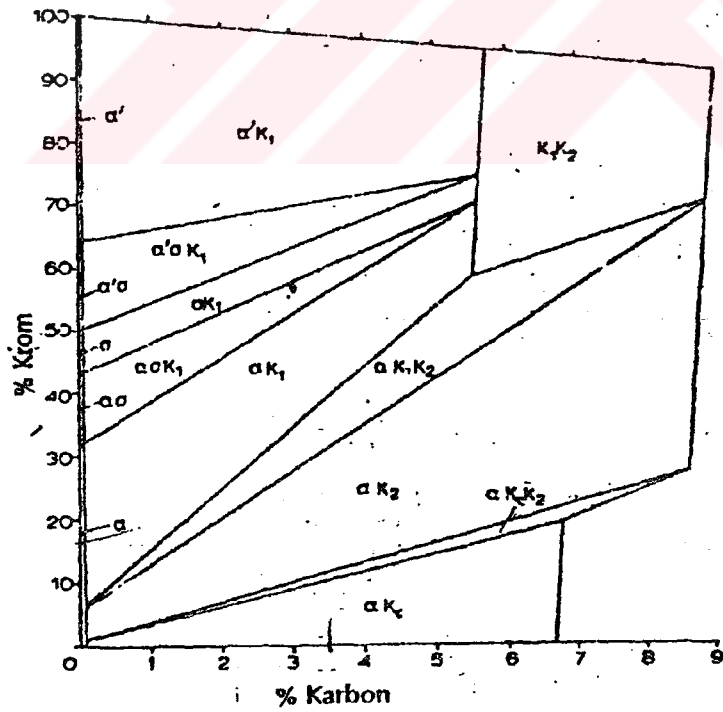


Şekil 4.4. Fe-C-Cr sisteminin 900°C izotermi [31].



Şekil 4.5. Fe-C-Cr sisteminin 1150°C izotermi [31].

Sıcaklık daha da düşerse matris içinde denge faz ostenit yerine ferrit oluşur. Şekil 4.6'da 700°C izotermi görülmektedir. Burada ostenit bölgesi yok olmuş ve yerini ferrit bölgesi almıştır.



Şekil 4.6. Fe-C-Cr sisteminin 700°C izotermi [31].

4.3 Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Katılaşma Yapısı

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ostenit 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 katılaşırken ilk olarak ostenit taneleri daha sonra M_7C_3 -ostenit ötektiği oluşur. Ötektik yapıdaki karbür dağılımı ve şekli ötektiğin miktarı ve bileşimine bağlıdır [29].

Ötektik karbürün mikroyapıdaki oranı az ise (% 20) ötektik karbürleri ostenit tane sınırlarına ayrışır. Bunlar ostenit tane sınırları boyunca uzanan levhalar ve tane içlerinde küçük çubuklar şeklinde belirir.

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_3C karbürleri gibi sürekli ağ yapısı oluşturmamasından kaynaklanır [29,30,33]. Bu nedenle ötektik yapının içindeki bu tür karbürlerin boyut ve dağılımı yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin mekanik özellikleri açısından önemlidir. Ötektik karbürlerin dağılım ve şekilleri; metal döküm sıcaklığı, katılaşma hızı ve bileşim gibi parametrelere bağlıdır.

4.4 M_7C_3 Karbürlerinin Özellikleri

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin bileşimlerinde krom dışında molibden, titanyum, vanadyum gibi karbür yapıcı elementler de bulunmaktadır. Ancak mikroyapıda 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 [31,33].

Karbür yapıcı elementlerin bir kısmı M_7C_3 tipi karbürler oluştururken, kendi karbürlerini de oluştururlar [33].

4.5 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 arayüzeyini zayıflatarak çatlak oluşmasına ve ilerlemesine sebep olabilir.

Griffing, dublex 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. Dublex karbür yapısı üç adımda oluşan katılaşmanın sonucudur [29]. (Şekil 4.2).

1. adımda peritektik U_5P_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 da Fe-Cr-C üçlü sisteminde % 9,6 Cr, % 3,44 C içeren alaşım için benzer dublex karbürleri gözlemiştir [29-30].

Jackson'a göre ise Fe-Cr-C sisteminde % 10 Cr, % 3,5 C içeren alaşımda katılaşma 4 adımda oluşur.

1. adımda γ -Fe oluşur (Şekil 4.3). U_2 , U_* 'a 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 $L = M_3C + \gamma Fe$ ledebüritik ötektik reaksiyonu oluşur [29,30,31].

4.5.1 Fe-C-Cr Alaşımlarının Katı Hal Reaksiyonları

M_7C_3 ostenit bölgesindeki reaksiyonlar yüksek kromlu beyaz dökme demirlere uygulanan ısı 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 ısı 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 [35];

$$M_s = 561^\circ\text{C} - 475^\circ\text{C} - 33 \text{ Mn} - 21 \text{ Mo} - 17 \text{ Cr} - 17 \text{ Ni} \quad (4.1)$$

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 değerine getirmektir [35]. Döküm durumundaki malzemeyi ostenitleme işlemiyle A_3 sıcaklığının üstünde karbon ve kroma aşırı doymuş ostenit çözünerek M_7C_3 tipi karbürler çökler. Ostenit içinde ikincil M_7C_3 karbürlerinin çökmesi ise ostenitin bileşimi ve dönüşüm özelliklerini değiştirir. Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm diyagramlarından dengelenmiş ostenitin perlitte dönüşüm süresinin daha uzun olduğu görülür [36].

4.5.2 İkincil M_7C_3 Karbürlerinin Oluşumu

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde A_3 sıcaklığının üstünde sadece M_7C_3 karbürleri oluşur. 950°C - 1030°C arasındaki sıcaklıklarda ikincil karbürler için çekirdekleşme süresinin ortalama 20 sn civarında olduğu ve bütün reaksiyonun 4-6 saatte tamamlandığı tespit edilmiştir. Çökme sırasında hacimde çok az daralma olur. Cr/C oranı arttıkça çökme aralığı daha yüksek sıcaklıklara kayar. Başlangıçta ince çökelti karbürler etrafında ve tane sınırlarında gelişigüzel dağınık durumda bulunurlar. Daha sonra ostenit dendritleri içinde belirli bazı kristallografik düzlemler üstünde çökme başlar.

Sıcaklık ikincil karbürlerin oluşum sürecinde en önemli etkidir. Karbürler etrafında gelişigüzel çökme 950°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 çökme düzlemi sayısı da azalır.

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

4.6 Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Isıl İşlemi

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ısıtma işlemin amacı martensitik matris içinde ikincil karbürler oluşturmaktır.

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 [37].

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

Katılaşma sırasında veya yüksek sıcaklıkta oluşan ostenit; krom, karbon ve diğer alaşım elementlerine doymuş haldedir. Sıcaklık düşüşüyle birlikte krom ve karbon ikincil karbürler olarak çöker ve mikroyapıdaki ostenit miktarı azalır. Bu durumda kararsız hale gelmiş ostenit soğuma hızına bağlı olarak perlite, beynite veya martensite dönüşebilir. Bununla birlikte karbür çökmesi düzensizdir. Bu nedenle ortalama soğuma hızlarında bile oda sıcaklığında mikroyapıda kalıntı ostenit bulunur. Dolayısıyla dökümden sonraki yapı perlit, martensit ve kalıntı ostenittir .

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

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

Aşırı miktarda kalıntı ostenit içermeyen, tamamen martensitik mikroyapı elde etmek için dökümün 920-1000°C'da tutularak stabilize edilmesi gerekir. Bu esnada

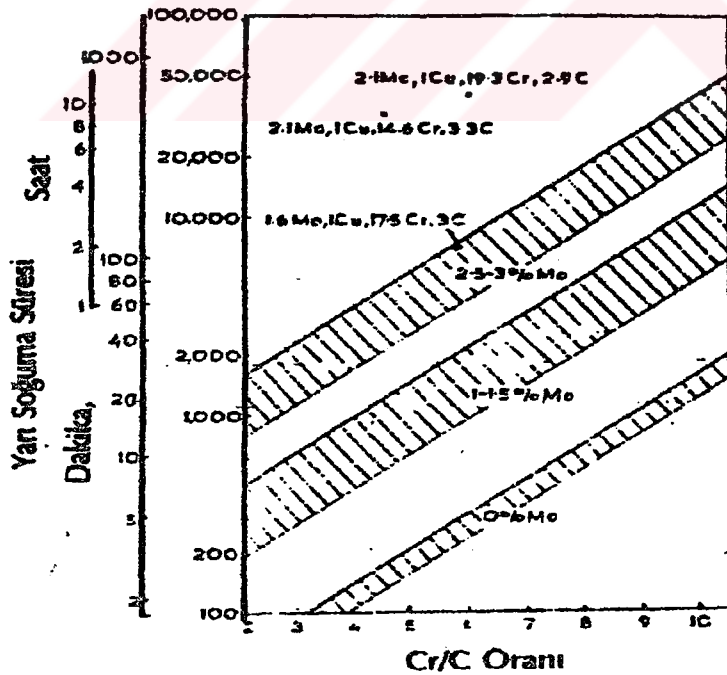
oluşan ikincil karbür çökmesi matrisin krom ve karbon içeriğini düşürür. Destabilizasyondan sonra yapılan soğutmada soğuma hızı perlit dönüşümüne yol açmayacak kadar yüksek ise ostenit martensite dönüşebilir [37].

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

Şekil 4.7’de Cr/C oranının perlit oluşturmaya maksimum yarı soğuma süresine etkisi görülmektedir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin çoğu %13-20 Cr, % 2,5-3,0 C içerir ve Cr/C oranları 4-8 arasındadır.

Perlitsiz yapı elde etmek için maksimum yarı soğuma süresi havada soğutmada 20-30 mm’lik kesit için 10 dakikadır.

Şekil 4.7’den görüleceği gibi molibden ilavesi sertleşebilirliği artırır. % 2,5-3,0 Mo ve 5-7 Cr/C oranına sahip 100 mm kesitli parçalar, havada su vermenin şiddetine bağlı olarak tamamen sertleşebilir.



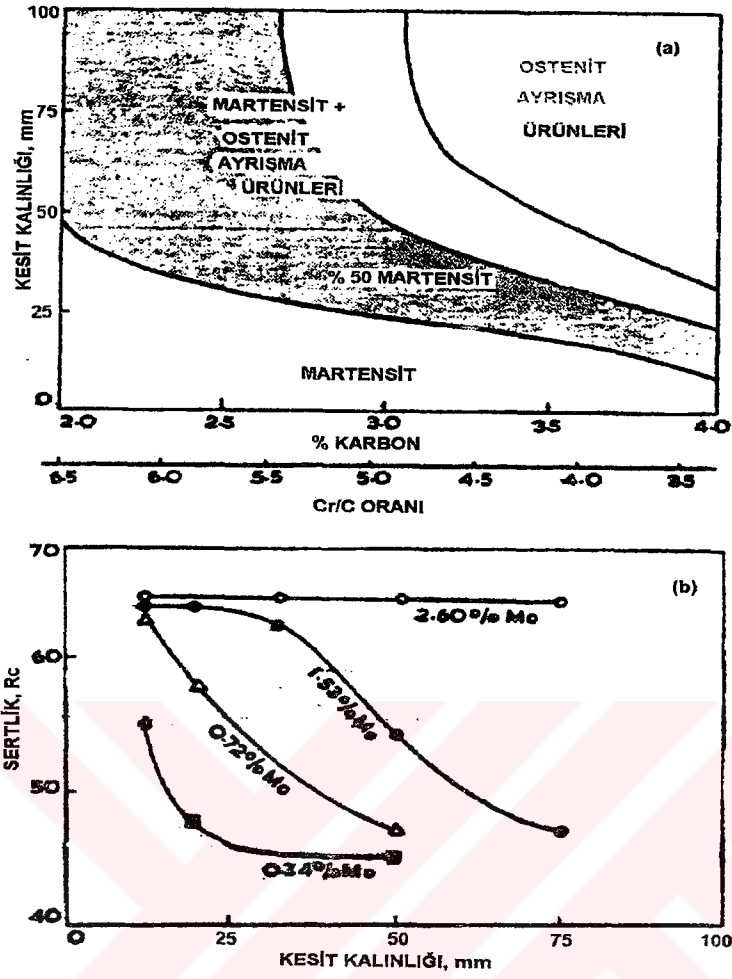
Şekil 4.7. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde perlit dönüşümünün önlenmesinde krom, karbon ve molibdenin etkisi [6].

4.6.1 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 martensit 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 çökmesinin sertliğe etkisi olduğu için, % 20 kalıntı ostenit sağlayan ostenitleme sıcaklığı en yüksek sertliği sağlar. % 15 Cr içeren bir alaşımda maksimum sertliğin elde edildiği su verme sıcaklığı 940-970°C arasındadır.

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 matrisde önceden bulunan martensitin yumuşamasıdır [11]. 15Cr 3Mo'lu beyaz dökme demirlerde 1000°C'da ostenitleme işlemi, döküm halindeki yapıya göre aşınma direncinde önemli bir artışa yol açmaktadır; 1000°C'dan daha yüksek sıcaklıklarda ostenitleme ise aşınma direncinde ihmal edilebilir bir değişikliğe sebep olmaktadır. 1000°C'da sertleştirme işlemini takiben 500°C'da yapılan ısıtıl işlem ise aşınma direncinde sadece çok az bir kayba yol açmaktadır [38].

Kesit kalınlığının Cr/C oranı ve molibden içeriğine göre mikroyapı ve sertlik üzerindeki etkisi Şekil 4.8.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 4.8. Çeşitli kesitlerdeki yüksek kromlu demirlerde havada su vermeden sonra matris yapısına ve sertlik üzerine karbon ve molibden içeriğinin etkisi [6].
a- % 12-14 Cr, % 1,5 Mo'de karbon içeriğinin etkisi
b- % 12-14 Cr, % 3 C'da molibdenin etkisi

Karışık martensit ve perlit yapısı, önce ostenitik sonra da martensitik 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 veya Cu içeren beyaz dökme

demirlerde yeterli kararlılık, destabilizasyon sıcaklığında 6 saat yada daha fazla durularak sağlanır. Sonuçtaki düşük karbonlu ostenit, nikel veya bakırsız alaşımlarda elde edilen yüksek karbonlu martensitten daha düşük bir sertliğe ve aşınma direncine sahip olan düşük karbonlu bir martensite dönüşür.

4.6.2 Martensit Dönüşümü

Martensit dönüşüm süreci ikincil karbür çökmesi ile ilgilidir. Daha önce belirtildiği gibi M_s sıcaklığı ostenitin bileşimine bağlıdır. İkincil karbürlerin çökmesi de ostenitin karbon ve krom oranını azalttığı ve M_s sıcaklığı ile birlikte M_f sıcaklığını da yükselttiği için martensit 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.

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

Yüksek sıcaklıklarda karbür çökme oranının artması ile oluşan sertlik düşüşü kalıntı ostenit oranının artışı ile ilgilidir. Düşük sıcaklıklardaki düşüş, martensitin karbonunun azalması nedeniyledir. Matrisin sertliği, martensit dönüşüm oranı ve oluşan martensitin sertliğine bağlıdır. Martensitin sertliği de içerdiği karbon miktarına bağlıdır. Ostenitin karbonu arttıkça martensit dönüşüm oranının azalması sebebiyle matrisin sertliğinin artış hızı azalır.

4.6.3 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 etmektir.

Genellikle yüksek sertleşebilirliğe sahip beyaz dökme demirler için tavlama prosesi oldukça uzun bir ısıtma işlemi kapsar.

Tablo 4.4’de bazı yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlere ait ısıtım şartları belirtilmektedir.

Tablo 4.4. Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerin ısıtım şartları [6].

Sınıf (ASTM A 532-67)	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	

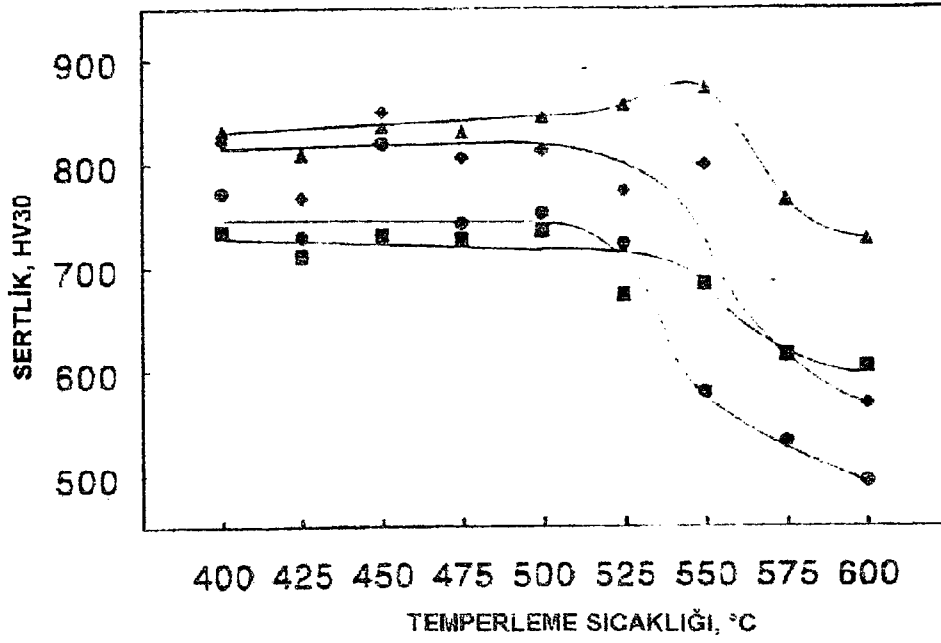
Bu işlem aşağıdaki şekilde yapılır:

- 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.

Tavlama sonrasında sertlik 350-450 HB arasında olur. Bu durum dişli testere ile kesme de dahil olmak üzere işleme operasyonlarına imkan 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.

Temperleme işlemi genellikle 205-230°C’da 2-4 saat süreyle yapılır. Sertleştirmeden sonra yapı % 10-30 ostenit içerir. Kalıntı ostenit miktarını azaltmak için yüksek sıcaklık temperlemesi yapılır.

Şekil 4.9.’da çeşitli yüksek kromlu beyaz dökme demirler için temperleme sıcaklığı ile sertlik değişimi eğrileri görülmektedir.



- Cr27
- ▲ CrMo 15.3
- ◆ CrMoCu 20.2.1
- NiCr 4

şekil 4.9. Çeşitli yüksek kromlu beyaz dökme demirler için sertlik (HV30)-temperleme sıcaklığı eğrileri [38].

şekil 4.9.'dan CrMo 15.3 alaşımının bütün temperleme sıcaklıkları için en yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu ve bu alaşımın artan temperleme sıcaklığı ile 550°C'da zayıf bir ikincil sertleşme gösterdiği görölmektedir. Diğer alaşımlar ise 500°C'dan sonra yumuşamaya başlamaktadırlar.

5. YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERİN AŞINMA DİRENCİ

5.1 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 [39]. Benzer şekilde bir aşınma tanımı da aşınma ve erozyonla ilgili terminolojiyi içeren ASTM G-40-93 standartlarında verilmektedir [40]. Bu tanımlamalara göre makine parçalarının yüzeylerinin taşlanması, parlatılması veya elemanların birbirlerine alıştırılması işlemlerini aşınma olayı olarak incelememek 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 [41-45].

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 [45-48].

Abrasiv aşınma bir gerilim sonucu oluşur. Gerilimlerin başlıca kaynağı sertlik ve hızdır. Metal olmayan malzemelerin sebep olduğu aşınma genellikle çizilme şeklindedir [46].

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 ısıtıl işlem uygulamak,
- Malzeme yüzeyini sert bir tabaka ile kaplamak,

tavsiye edilir. Bu önlemlerle abrasiv aşınma hızını azaltmak mümkündür.

5.2 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 imkanı da bir avantajdır.

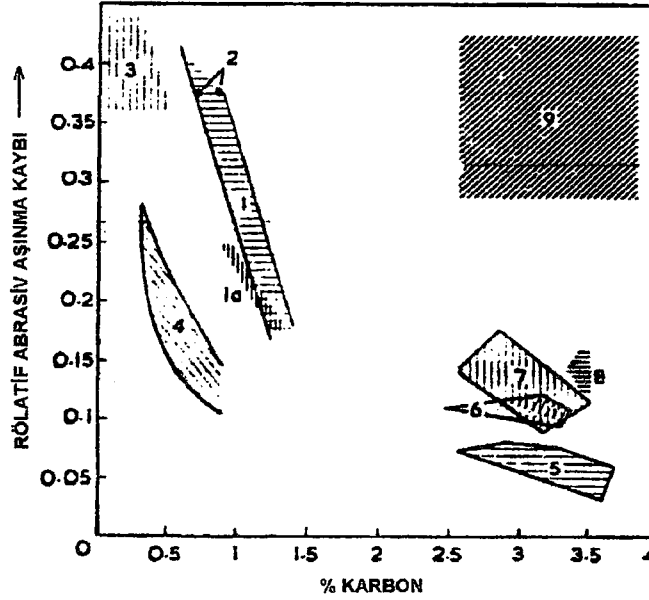
Tablo 5.1’de çeşitli malzemelerin öğütme ve oyuklayıcı aşınma altındaki performansları, tokluklarına dayanılarak verilmektedir.

Tablo 5.1. Çeşitli malzemelerin öğütme ve oyuklayıcı aşınma altındaki performansı [6].

MALZEME ADI	TOKLUK SIRASI	BAĞIL AŞINMA KAYBI	
		OYMA AŞINMASI	ÖĞÜTME AŞINMASI
Ostenitik Mn Çeliği (% 12 Mn)	1	0,34-0,19	138-142
Martensitik Az Alaşımlı Çelik (%0,3-0,6 C)	2	0,28-0,15	126-114
Ostenitik Mn Çeliği (% 6 Mn - %1 Mo)	3	0,25-0,17	114-120
Cr/Mo Çeliği (% 0,7 C), Su verilmiş+Temp	4	--	126-130
Martensitik 6Cr/1Mo Çeliği (% 1C)	5	0,1	102-97
Martensitik Yüksek Cr/Mo’lu Beyaz D.D.	6	0,08-0,035	85-90
Martensitik 26Cr’lu Beyaz D.D.	7	0,17-0,09	96-100
Martensitik Az Alaşımlı 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 [49].

Şekil 5.1’de çeşitli malzemeler karbon içeriklerine ve mikroyapılarına göre gruplandırılmıştır. Bu iki faktör geniş bir malzeme grubunda aşınma direncini belirler.



1. 12 Mn çeliği: 1a.6Mn/1Mo çeliği: 2. Perlitik dökme çelik: 3. Su verilmiş ve temperlenmiş dövme çelik: 4. Su verilmiş ve temperlenmiş Cr/Mo dökme çeliği: 5. Sertleştirilmiş 15 Cr/Mo'lu dökme demir: 6. 12-20 Cr/Mo'lu dökme demir, döküm halinde: 7. Sertleştirilmiş 26 Cr'lu dökme demir: 8. 6Ni/9Cr'lu dökme demir ve 9. Perlitik beyaz dökme demir.

Şekil 5.1. Rölatif aşınma kaybına göre çeşitli malzemelerin karşılaştırılması [6].

Beyaz dökme demirlerin aşınmasında çeşitli mekanizmalar rol oynayabilir. Bu mekanizmaları şu şekilde sıralamak mümkündür [47].

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

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 eksenini aşınma yüzeyine paralel olduğunda, yüksek kromlu beyaz dökme demirler, karbürlerin uzun eksenini yüksek gerilmeli abrasiv aşınma şartları altında aşınma yüzeyine dik olduğu durumdakinden daha yüksek aşınma direncine sahip olurlar [50,51].

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 arttırarak aşınma direncine katkıda bulunur [46].

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 (% 15Cr) 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 [26].

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlere (% 28Cr) bor ilavesi; karbürlerin hacim oranını arttırır ve karbürleri daha sert yapar, döküm halinde karbürleri kalınlaştırır ve martensit oluşumunu iletir. % 0,2 B ilavesi, 1050°C'dan havada su verme şartlarında iki elemanlı abrasiv aşınma durumunda aşınma direncine önemli miktarda yardım eder [24].

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 çöker. Bu pek çok çekirdekleşme serbest dendritik, çubukumsu veya taç yaprağı şeklinde karbür büyümesini bastırır [27].

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 [28].

5.3 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.

5.3.1 Karbür Yapısının Abrasiv Aşınmaya Etkisi

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

Ötektiğin üstünde karbür oranı artışı aşınma direncini fazla etkilemez. Karbürler arası uzaklık aşınma direncinde önemli rol oynar. Karbürler arası uzaklık ne kadar düşük olursa aşınma direnci o kadar yüksek olur.

5.3.2 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 matrisde etkin olmaktadır.

Yüksek gerilmeli şartlarda beyaz dökme demirlerin aşınma direnci matris tarafından ötektik karbürlere verilen desteğin seviyesine bağlıdır; martensitik matrisli yapılar, ostenitik veya perlitik matrisli yapılara göre daha büyük aşınma direnci vermektedir [37,52]. Perlitik matris en düşük aşınma direncine sahip olduğu için beyaz dökme demirlerde perlitik yapı istenmez [53,54].

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.

M_s sıcaklığını aşırı düşürecek bir işlem martensitin karbonunu azaltıp sertliğini düşüreceği gibi aşınma direncini de düşürür. M_s sıcaklığı ile beraber M_f 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.



6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada 15 Cr-3Mo grubu alaşımlı beyaz dökme demire farklı miktarlarda Nb, Ti ve V elementlerinin katılmasıyla elde edilen alaşımlı beyaz dökme demir malzemeler kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar için üretilen malzemeler, % 2,5 C, %1 Si, % 1 Mn, % 0,3 Ni, % 15 Cr, % 3 Mo, % 0-0,74 Nb, % 0-0,376 Ti ve % 0-0,72 V içerikli, yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demir alaşımlarıdır. Bu malzemelerin döküm işlemi TÜBİTAK MAM'da bir endüksiyon ocağında gerçekleştirilmiştir. Sıvı haldeki alaşımlar, silindirik çubuklar şeklinde kalıplanmış kum kalıplara dökülmüştür.

Tablo 6.1'de, kullanılan malzemelerin spektral analiz ile elde edilen kimyasal bileşimleri verilmektedir.

Tablo 6.1. Deneylerde kullanılan malzemelerin spektral analiz ile elde edilen kimyasal bileşimleri.

Numune No	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	V
1	2,33	0,49	0,013	0,073	0,85	0,17	14,93	2,61	—	—	—
2	2,25	0,86	0,013	0,069	0,76	0,17	14,90	2,49	0,24	—	—
3	2,51	0,33	0,015	0,078	0,75	0,16	15,42	2,88	0,74	—	—
4	2,47	1,45	0,026	0,320	1,15	0,36	17,04	3,14	—	0,096	—
5	2,51	1,39	0,025	0,330	1,08	0,36	16,89	3,08	—	0,253	—
6	2,42	1,94	0,022	0,320	1,13	0,36	16,71	3,02	—	0,376	—
7	2,41	0,94	0,014	0,074	0,98	0,41	13,14	2,42	—	—	0,14
8	2,33	0,92	0,016	0,078	0,97	0,42	13,37	2,52	—	—	0,72
9	2,83	1,14	0,023	0,083	1,03	0,41	15,26	3,04	—	—	0,53

6.2 Isıl İşlemler

Kimyasal bileşimleri Tablo 6.1'de verilen malzemelere döküm işleminden sonra sertleştirme amacıyla önce ostenitleme işlemi uygulanmıştır. Alaşımlı beyaz dökme demirlerin mikroyapısının ve aşınma özelliklerinin incelendiği bir çalışmada [47] ostenitleme süresi arttıkça malzemelerin sertliğinin arttığı tespit edilmiştir.

Ostenitleme işlemi için; 16 mm çap ve 30 mm yüksekliğe sahip silindirik numuneler ısıtıl işlem fırınına yerleştirilip ayarlanan ostenitleme sıcaklığına ısıtmaya başlanmış ve bu sıcaklığa ulaşıldıktan sonra bu sıcaklıkta 6 saat tutulmuşlardır. Ostenitleme sıcaklıkları 900°C, 1000°C ve 1050°C'dır. Daha sonra numuneler 250°C'da 6 saat süreyle temperlenmişlerdir. Tablo 6.1'de kimyasal bileşimleri verilen malzemelerin ısıtıl işlem şartları Tablo 6.2'de belirtilmektedir. 900°C'da ostenitlenip havada su verilen numunelerde beklenen sertlik değerleri sağlanamadığından 1000 °C ve 1050 °C'da ostenitlenip daha sonra temperlenmiş olan numunelerde bu çalışma yapılmıştır.

Tablo 6.2'deki numune numaralarından tek rakamlı olanlar; malzemenin döküm halinde olduğunu, "1" ile bitenler; 1000°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildiğini, "2" ile bitenler; 1000°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlendiğini, "3" ile bitenler; 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildiğini, "4" ile bitenler ise; 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlendiğini ifade etmektedir.

6.3 Mikroyapı İncelemeleri

Tablo 6.1'de kimyasal bileşimleri ve Tablo 6.2'de ısıtıl işlem şartları verilen malzemelerin iç yapılarını tespit etmek için metalografik çalışmalar yapılmıştır. Malzemelerden hazırlanan metalografi numuneleri standart parlatma metodları ile parlatıldıktan sonra 2,5 g FeCl₃, 5g pikrik asit, 2ml HCl, 90ml etanol çözeltisiyle dağlanmışır. Bundan sonra bu numuneler optik mikroskopla incelenmiş ve farklı büyütmelemlerde fotoğrafları çekilmiştir.

6.4 X-Işınları Analizleri

Tablo 6.2'de ısıtıl işlem şartları belirtilen malzemeler, tüp anodu kobalt olan hem Philips hem de Rigaku marka difraktometre tipiyle 40 kV'luk voltaj altında X-ışınları analizine tabi tutulmuşlardır. Isıl işlem yapılmış ve yapılmamış olan her malzeme için X-ışınları difraksiyon grafikleri elde edilmiştir.

6.5 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri

Bölüm 6.3’de belirtilen dağılayıcı ile dağılanan bazı numuneler üzerinde Jeol JSM 840 marka taramalı elektron mikroskobu ile mikroyapı incelemesi yapılmış ve fotoğrafları çekilmiştir, TN5500 model EDS ile de 15 kV voltaj altında faz analizi yapılmıştır.

6.6 Sertlik Deneyleri

Numunelerin sertlikleri Misawa Seiki Seisakuho markalı Rockwell sertlik ölçüm cihazında Rockwell C cinsinden ölçülmüştür. Her numune için 6 ölçüm yapılmış ve bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır.

6.7 Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri Şekil 6.1’de görülen abrasiv aşınma esasına uygun deney cihazında yapılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında iki silindirik disk arasına yerleştirilen, sonsuz şerit şeklindeki 60 no ve 120 no Al_2O_3 esaslı zımpara (aşındırma kağıdı) ile yapılmıştır.

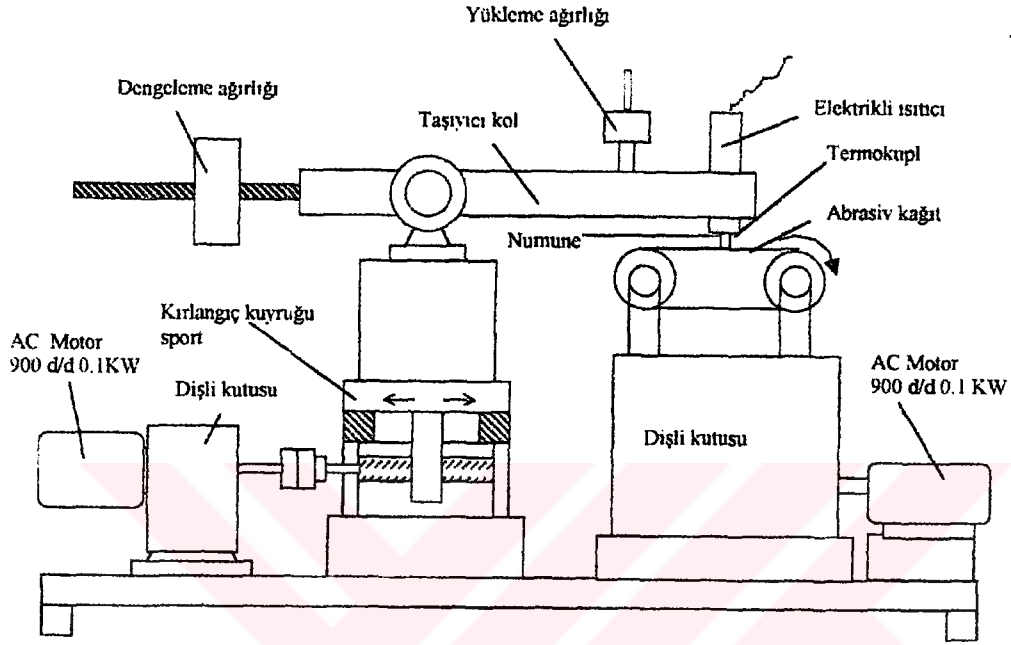
Her deneyden önce numuneler 800 no. zımparaya kadar zımparalanmıştır. Deneyden önce aşınma numuneleri 10^{-4} g. hassasiyetli terazide tartılmıştır. Daha sonra numuneler cihaz üzerindeki yuvaya yerleştirilmiştir. Aşınma deneyleri 0,24 MPa’lık basma gerilmesi altında yapılmıştır.

Deney sırasında aşınma diskinin hızı 30 dev/dak. olup aşınma deneyleri 4,65m. kayma yolu için yapılmıştır. Deney numunelerinin aşınma sırasında zımparanın devamlı yeni yüzeylerinde aşındırılması sağlanmıştır.

Tablo 6.2. Deneylerde kullanılan numunelerin ısıtım işlem şartları (ostenitleme süresi: 6 saat, su verme ortamı: hava, temperleme süresi: 6 saat)

Numune No:	Ostenitleme Sıcaklığı (°C)	Temperleme Sıcaklığı (°C)
1	Döküm Halinde	--
11	1000	--
12	1000	250
13	1050	--
14	1050	250
2	Döküm Halinde	--
21	1000	--
22	1000	250
23	1050	--
24	1050	250
3	Döküm Halinde	--
31	1000	--
32	1000	250
33	1050	--
34	1050	250
4	Döküm Halinde	--
41	1000	--
42	1000	250
43	1050	--
44	1050	250
5	Döküm Halinde	--
51	1000	--
52	1000	250
53	1050	--
54	1050	250
6	Döküm Halinde	--
61	1000	--
62	1000	250
63	1050	--
64	1050	250
7	Döküm Halinde	--
71	1000	--
72	1000	250
73	1050	--
74	1050	250
8	Döküm Halinde	--
81	1000	--
82	1000	250
83	1050	--
84	1050	250
9	Döküm Halinde	--
91	1000	--
92	1000	250
93	1050	--
94	1050	250

Deneyler bittikten sonra numuneler tekrar tartılmış ve deney öncesi ile deney sonrasındaki ağırlık farkı hesaplanmıştır. Bulunan ağırlık farkları kullanılarak 6.1 denklemi ile Bağıl Aşınma Direnci (R) değerleri hesaplanmıştır. -



Şekil 6.1. Deneylerde kullanılan abrasiv aşınma cihazının şematik gösterimi.

$$R = (\Delta G_1 / \Delta G_x) \quad (6.1)$$

ΔG_1 =Döküm halindeki orijinal beyaz dökme demirin (Num.no:1) ağırlık kaybı

ΔG_x =Test edilen beyaz dökme demirin ağırlık kaybı

6.8 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

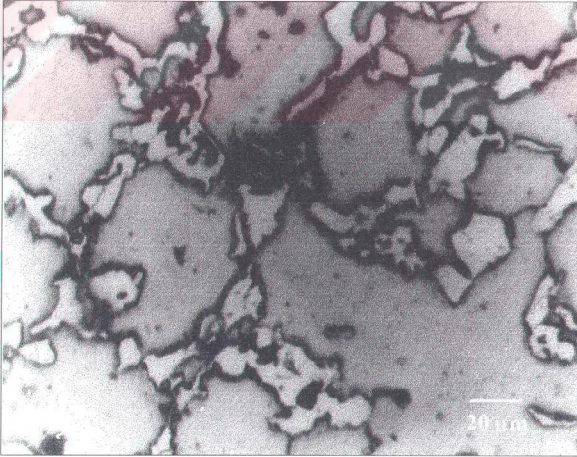
Mahr Perthen marka yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazında numune yüzeyleri hakkında yaklaşık bir fikir sahibi olabilmek için bazı numuneler üzerinde ölçümler yapılmış ve yüzeylerin profilleri çıkarılmıştır.

7. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

7.1 Mikroyapı İncelemesi Sonuçları

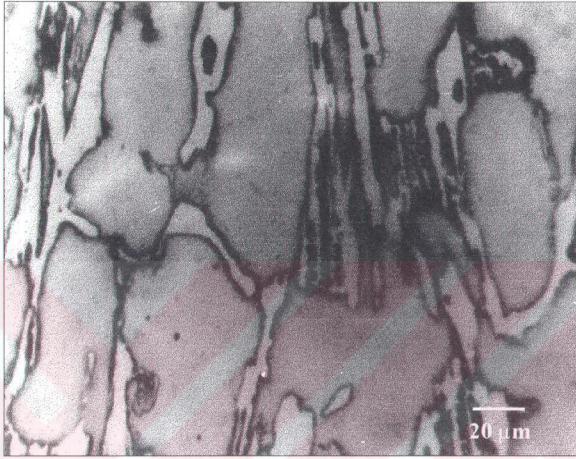
Şekil 7.1-14’de deneylerde kullanılan bütün numunelerin döküm halindeki mikroyapıları görülmektedir. Dökülen alaşımların mikroyapıları bileşim olarak Şekil 3.2’ye göre ötektik bileşimlere yakın bulunmaktadır.

Şekil 7.1’de hiçbir alaşım elementi katılmamış 1 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı görülmektedir. Numune dendritik bir yapıya sahip olup Fe-Cr ferrit katı eriyiği, kromca zengin birincil karbürlerden ve birincil karbürlerin etrafına toplanmış molibdence zengin ikincil karbürlerden ibarettir. Beyaz dökme demirlerde Cr miktarı %10’u geçtiği zaman M_7C_3 tipi ötektik karbürler oluştuğu [14], %15 Cr, %2 Mo’li bir beyaz dökme demir malzemede ise döküm halindeki mikroyapıda da MoC şeklinde ikincil karbürlerin mevcut olduğu bildirilmektedir [53].



Şekil 7.1. Hiçbir alaşım elementi katılmamış 1 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı.

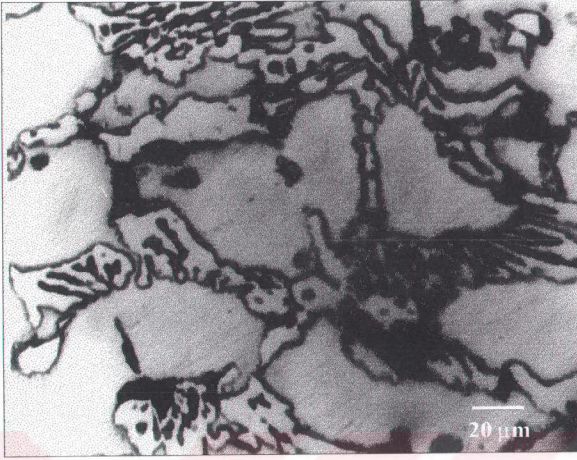
Şekil 7.2’de %0,24 Nb ile alaşımlanan 2 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı görülmektedir. Bu numune de dendritik bir yapıya sahip olup Fe-Cr ferrit katı eriyiği, kromca zengin birincil karbürlerden ve birincil karbürlerin etrafına toplanmış molibdence zengin ikincil karbürlerden ibarettir.



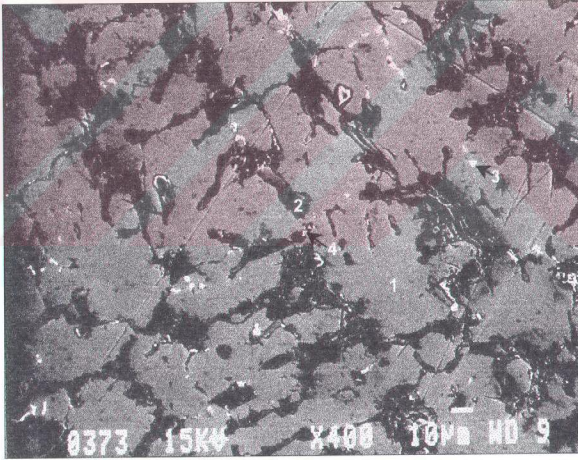
Şekil 7.2. %0,24 Nb ile alaşımlanmış 2 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı.

Şekil 7.3’de %0,74 Nb ile alaşımlanan 3 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı görülmektedir. Bu numunenin de yapısı dendritik görünümündedir ve yapı Fe-Cr ferrit katı eriyiği, kromca zengin birincil karbürler ve bunların etrafında toplanmış molibdence zengin ikincil karbürlerden ibarettir. Ayrıca bu numunede niyobyumca zengin küçük karbürlerin varlığı da tespit edilmiştir. Şekil 7.4’de 3 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilen mikroyapısı görülmektedir.

Tablo 7.1’de ise Şekil 7.4’de mikroyapısı görülen %0,74 Nb ile alaşımlanmış 3 nolu beyaz dökme demir numunede çeşitli bölgelerde yapılan noktasal EDS analizi sonuçları görülmektedir. Şekil 7.4’de “4” olarak işaretlenen partiküllerin niyobyumca zengin karbür olduğu Tablo 7.1’deki analizle belirlenmiştir.



Şekil 7.3. %0,74 Nb ile alaşımlanmış 3 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı.



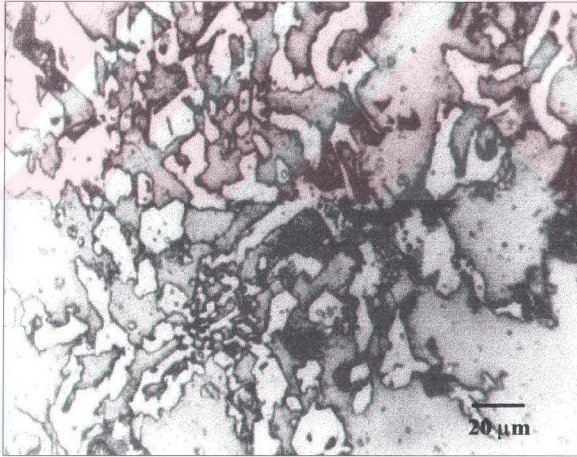
Şekil 7.4. %0,74 Nb ile alaşımlanmış 3 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş döküm halindeki mikroyapısı.

Tablo 7.1. %0,74 Nb içeren 3 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerin noktasal EDS analizi sonuçları.

		Bölge			
		1	2	3	4
% Element	Si	0,52	0,09	0,00	0,24
	Mo	1,41	3,63	82,00	2,75
	Cr	12,18	53,16	11,38	2,94
	Fe	85,72	41,70	6,62	2,34
	Nb	0,00	1,42	0,00	89,51
	Ti	0,16	0,00	0,00	2,22

%15 Cr'lu beyaz dökme demirlerde Nb miktarı %7'ye kadar arttıkça döküm halinde oluşan NbC oranının da yaklaşık %7'ye kadar arttığı bildirilmektedir [27].

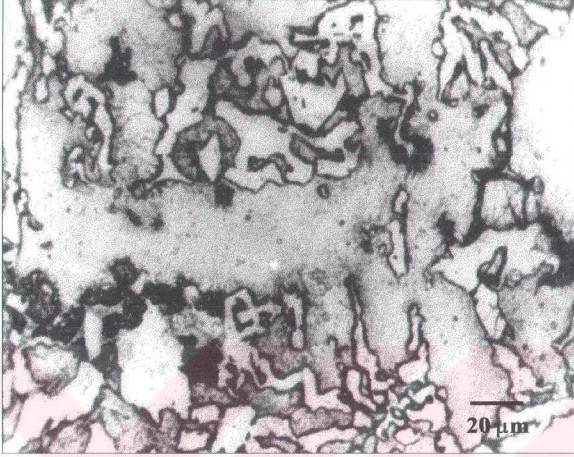
Şekil 7.5'de %0,096 Ti ile alaşımlanmış 4 nolu beyaz dökme demir numunenin döküm halindeki mikroyapısı görülmektedir. Bu numunede de yine dendritik bir yapıda katılaşma olmuş ve yapı Fe-Cr ferrit katı eriyiği, kromca zengin birincil karbürler şeklinde oluşmuştur. Demirce zengin bölgeler de mevcuttur.



Şekil 7.5. % 0,096 Ti ile alaşımlanmış 4 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı.

Şekil 7.6'da ise %0,253 Ti ile alaşımlanmış 5 nolu beyaz dökme demir numunenin döküm halindeki mikroyapısı görülmektedir. Fe-Cr ferrit katı eriyik matris içinde

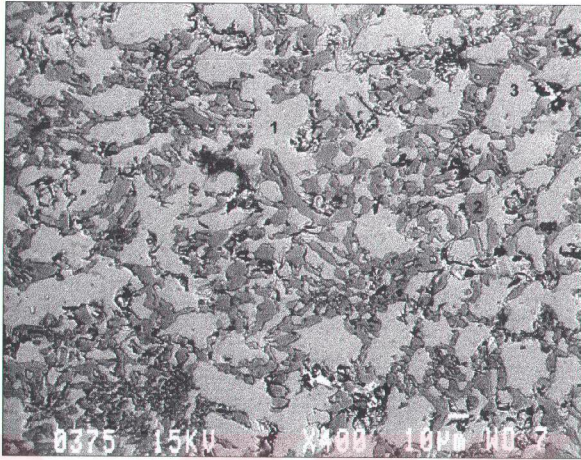
kromca zengin birincil karbürler bulunmaktadır. Burada da görülen demirce zengin bölgeler, malzemenin oksitlendiğine işaret etmektedir.



Şekil 7.6. %0,253 Ti ile alaşımlanmış 5 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı.

Şekil 7.6'da optik mikroskopla belirlenen mikroyapının elektron mikroskopunda görüntülenen yapısı Şekil 7.7'de, bu şekilde görülen bölgelerin EDS analizi sonuçları ise Tablo 7.2'de görülmektedir.

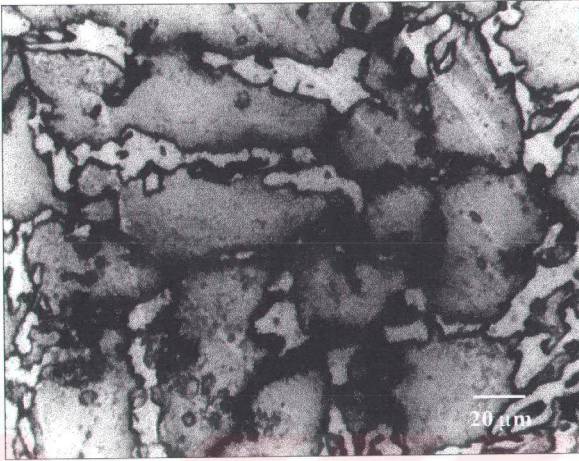
Şekil 7.8'de 0.376 Ti ile alaşımlanmış 6 nolu beyaz dökme demir numunenin döküm halindeki mikroyapısı görülmektedir. Bu numunede de dendritik bir yapı söz konusu olup Fe-Cr ferrit katı eriyik matris içerisinde kromca zengin birincil karbürler ve molibdence zengin ikincil karbürler mevcuttur.



Şekil 7.7. %0,253 Ti ile alaşımlanmış 5 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilen döküm halindeki mikroyapısı.

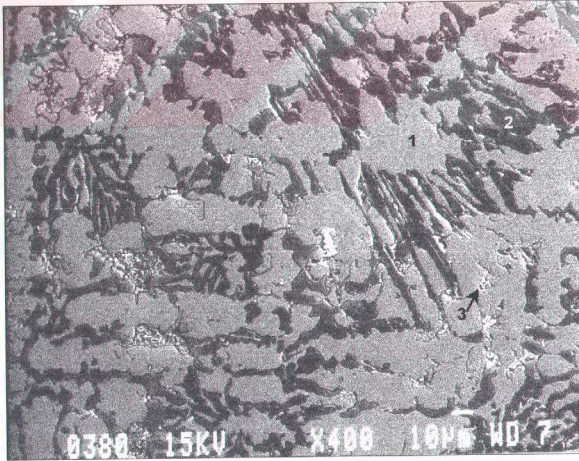
Tablo 7.2. %0,253 Ti içeren 5 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerin noktasal EDS analizi sonuçları.

		Bölge		
		1	2	3
% Element	Si	1,51	0,13	0,12
	P	0,00	0,00	0,59
	Mo	1,31	6,16	2,79
	Ti	0,00	0,14	0,08
	Cr	12,35	52,51	19,70
	Fe	84,83	41,06	76,72



Şekil 7.8. % 0,376 Ti ile alaşımlanmış 6 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı.

Şekil 7.9'da ise, Şekil 7.8'de optik mikroskopta yapısı görüntülenen 6 nolu numunenin elektron mikroskobunda çekilen mikroyapısı görülmektedir. Tablo 7.3'de ise bu mikroyapıda çeşitli bölgelerin EDS analizi sonuçları görülmektedir.



Şekil 7.9. %0,376 Ti ile alaşımlanmış 6 nolu numunenin elektron mikroskobunda çekilmiş döküm halindeki mikroyapısı.

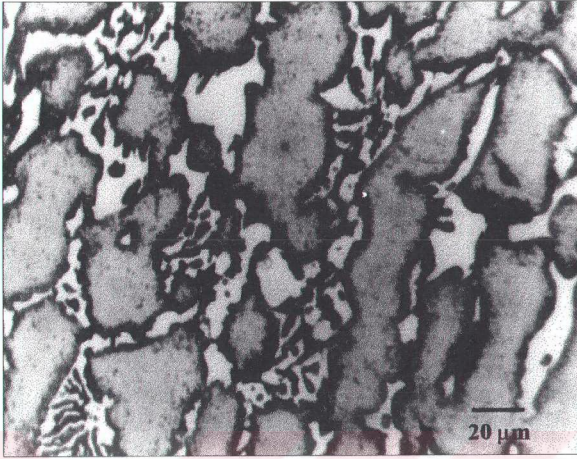
Tablo 7.3. %0,376 Ti içeren 6 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerin noktasal EDS analizi sonuçları.

		Bölge		
		1	2	3
% Element	Si	1,83	0,10	2,52
	P	0,36	0,00	4,62
	Mo	1,14	8,02	41,64
	Ti	0,00	0,25	0,22
	Cr	12,31	51,68	12,50
	Fe	84,36	39,95	38,51

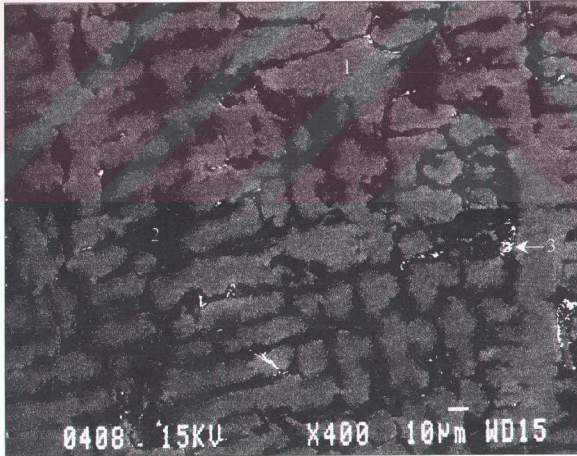
Şekil 7.10'da %0,14 V ile alaşımlanmış 7 nolu beyaz dökme demir numunenin, Şekil 7.11'de ise %0,72 V ile alaşımlanmış 8 nolu beyaz dökme demir numunenin döküm halindeki mikroyapıları görülmektedir. Şekil 7.12'de ise Şekil 7.11'de optik mikroskopta mikroyapısı görülen 8 nolu beyaz dökme demir numunenin elektron mikroskobunda çekilen mikroyapısı görülmektedir. Her üç şekilde de görüldüğü gibi her iki numunede de dendritik bir yapı mevcut olup, Fe-Cr ferrit katı eriyik matris içinde kromca zengin birincil karbür dendritleri ve molibden zengin ikincil karbürler bulunmaktadır.



Şekil 7.10. %0,14 V ile alaşımlanmış 7 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı.



Şekil 7.11. %0,72 V ile alaşımlanmış 8 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı.



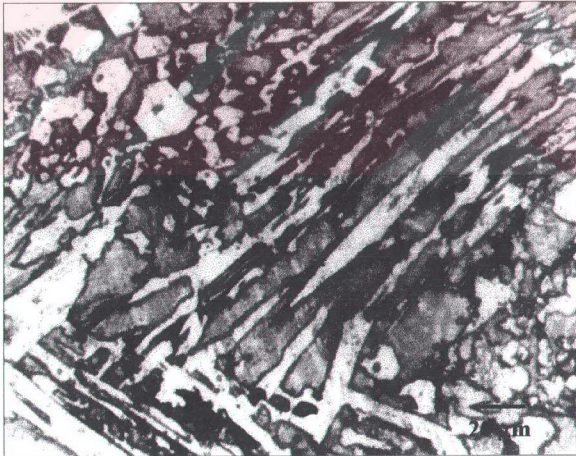
Şekil 7.12. %0,72 V içeren 8 nolu numunenin elektron mikroskobunda çekilmiş döküm halindeki mikroyapısı.

Tablo 7.4'de ise Şekil 7.12'de mikroyapısı görülen %0,72 V içeren 8 nolu numunenin çeşitli bölgelerinden alınan EDS analizi sonuçları görülmektedir.

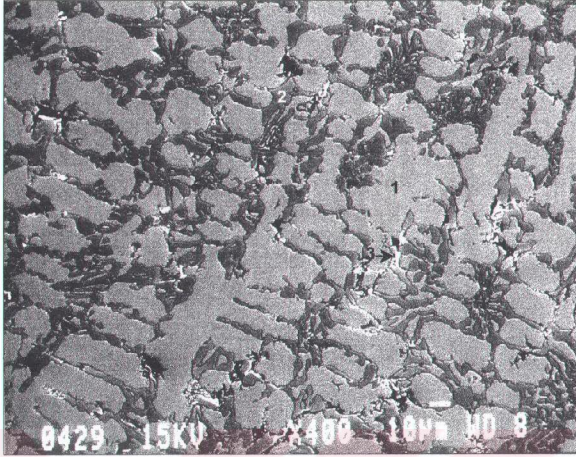
Tablo 7.4. %0,72 V içeren 8 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerin noktasal EDS analizi sonuçları.

		Bölge		
		1	2	3
% Element	Si	1,14	0,43	0,22
	Mo	1,07	4,03	63,95
	Cr	11,00	38,57	13,59
	Fe	86,58	53,88	20,71
	V	0,21	3,08	1,53

%0,53 V içeren 9 nolu numunenin optik mikroskopta çekilen döküm halindeki yapısı Şekil 7.13'de, elektron mikroskobunda çekilen döküm halindeki yapısı ise Şekil 7.14'de görülmektedir. Bu numunede de Fe-Cr ferrit katı eriyik matris içinde dendritik bir yapıda katılaşmış kromca zengin birincil karbürler ve molibdence zengin ikincil karbürler görülmektedir. Tablo 7.5'de ise matris ve karbürler üzerinden alınan EDS analizi sonuçları görülmektedir.



Şekil 7.13. %0,53 V içeren 9 nolu numunenin döküm halindeki mikroyapısı.



Şekil 7.14. %0,53 V içeren 9 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş döküm halindeki mikroyapısı.

Tablo 7.5. %0,53 V içeren 9 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerin EDS analizi sonuçları.

		Bölge		
		1	2	3
% Element	Si	1,27	0,18	0,06
	Mo	1,07	9,71	77,98
	V	0,31	1,68	1,01
	Cr	10,51	40,42	13,50
	Mn	0,97	1,01	0,51
	Fe	85,26	42,26	6,94
	Ni	0,62	0,74	0,00

Literatürde genelde %15 kromlu beyaz dökme demirlerde döküm halinde %1 V'a kadar VC görülmekle birlikte, bu konuyla ilgili yapılan bir çalışmada [27] %8'e kadar artan V ile oluşan VC miktarının da yaklaşık %7'ye kadar arttığı, bir başka çalışmada ise [55]; %0,6 ve %0,96 V için döküm halinde V'un ikincil karbürlerin hacim oranını arttırdığı tespit edilmiştir.

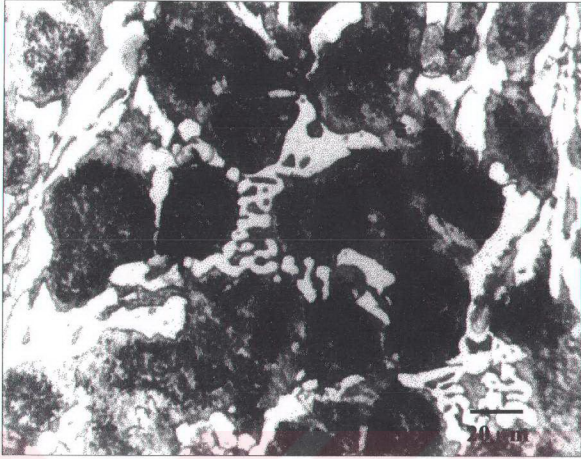
Bütün numunelerin döküm halindeki mikroyapıları (Şekil 7.1-14) incelendiğinde, çeşitli oranlarda Ti içeren 4,5 ve 6 nolu numunelerin Nb ve V içeren numunelere göre biraz daha küçük bir dendritik yapıya sahip olduğu söylenebilir.

Şekil 7.15-25’de ise deneylerde kullanılan 1-9 nolu numunelerin dökümden sonra 1000 °C sıcaklıkta 6 saat ostenitlenmesiyle ve daha sonra havada su verme işleminin gerçekleştirilmesiyle elde edilen mikroyapıları görülmektedir.

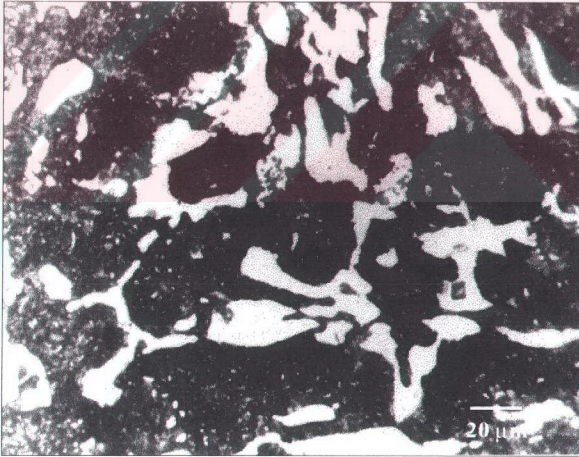
Şekil 7.15’de alaşım elementi katılmamış 11 nolu numunenin, Şekil 7.16’da %0,24 Nb ilave edilmiş 21 nolu numunenin, Şekil 7.17’de ise %0,74 Nb ilave edilmiş 31 nolu numunenin 1000 °C’da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapıları görülmektedir. Yapının kromca zengin birincil karbürlerden ve martensitik matris içinde çökelmiş molibdence zengin ikincil karbürlerden oluştuğu görülmektedir. Ayrıca matris içerisinde küçük boyutlu niyobyumca zengin karbürler de çökelmişlerdir. Malzemeye ilave edilen Nb miktarı arttıkça çökelen ikincil karbürlerin miktarının arttığı görülmektedir.



Şekil 7.15. Hiçbir alaşım elementi katılmamış 11 nolu numunenin 1000 °C’da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.



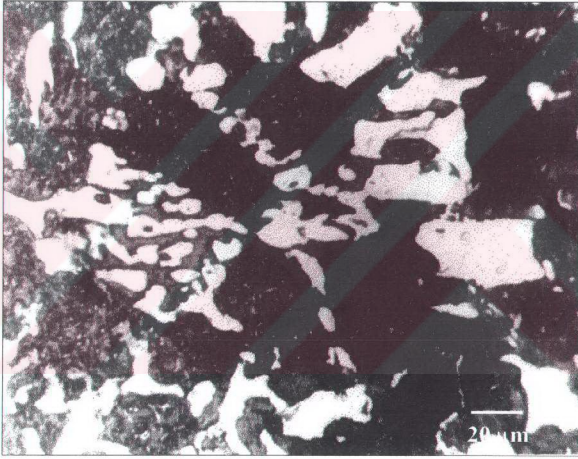
Şekil 7.16. %0,24 Nb ilave edilmiş 21 nolu numunenin 1000 °C’da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.



Şekil 7.17. %0,74 Nb ilave edilmiş 31 nolu numunenin 1000 °C’da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.

Şekil 7.18'de %0,096 Ti ile alaşımlanmış 41 nolu, Şekil 7.19'da %0,253 Ti ile alaşımlanmış 51 nolu beyaz dökme demir numunelerin 1000°C'da 6 saat süre ile ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapıları görülmektedir. Mikroyapılarda kromca zengin birincil karbürler ve martensitik matris içinde çökelmiş molibdene ve titanyumca zengin ikincil karbürler mevcuttur. Şekil 7.20'de ise 51 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş mikroyapısı görülmektedir.

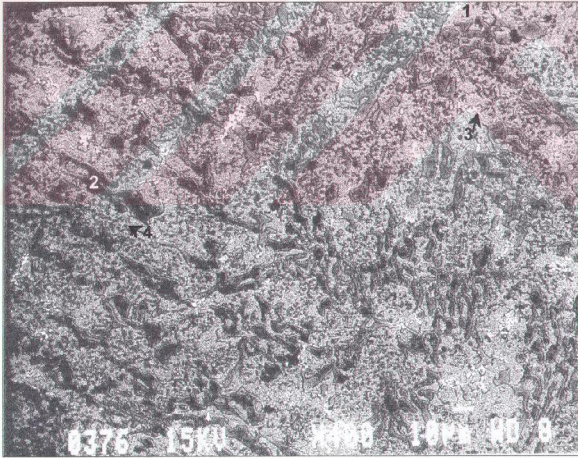
Tablo 7.6.'da ise, Şekil 7.20'de mikroyapısı görülen 1000 °C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilen 51 nolu numunenin çeşitli bölgelerinde yapılan noktasal EDS analizi sonuçları görülmektedir.



Şekil 7.18. %0,096 Ti ile alaşımlanmış 41 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.



Şekil 7.19. %0,253 Ti ile alaşımlanmış 51 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.

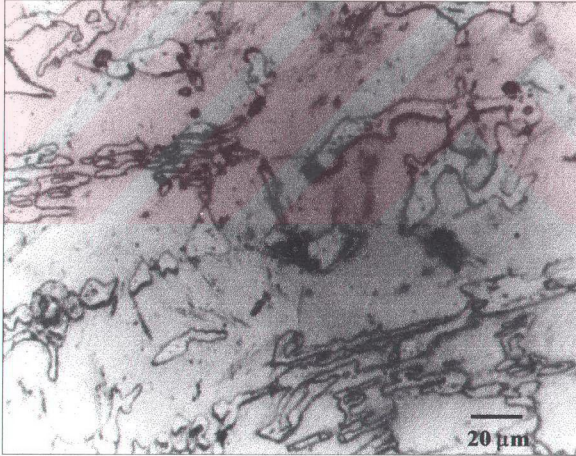


Şekil 7.20. %0,253 Ti ile alaşımlanmış 51 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilen 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı

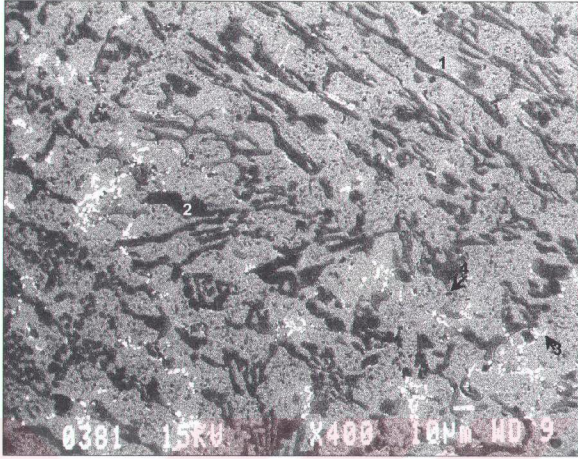
Tablo 7.6. %0,253 Ti içeren 51 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.

		Bölge			
		1	2	3	4
% Element	Si	1,58	0,25	3,13	0,24
	P	0,27	0,00	2,99	0,11
	Mo	0,96	7,72	48,40	2,45
	Ti	0,00	0,24	0,00	92,95
	Cr	8,85	51,66	12,12	2,32
	Fe	88,35	40,13	33,35	1,92

%0,376 Ti ile alaşımlanmış, 1000 °C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş 61 nolu beyaz dökme demir numunenin optik mikroskopta çekilen mikroyapısı Şekil 7.21'de, elektron mikroskobunda çekilen mikroyapısı ise Şekil 7.22'de görülmektedir. Tablo 7.7'de ise bu numunenin çeşitli bölgelerinde yapılan noktasal EDS analizi sonuçları görülmektedir. Yapıda yine kromca zengin birincil karbürler, molibdenca ve titanyumca zengin ikincil karbürler mevcuttur.



Şekil 7.21. %0,376 Ti içeren 61 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.

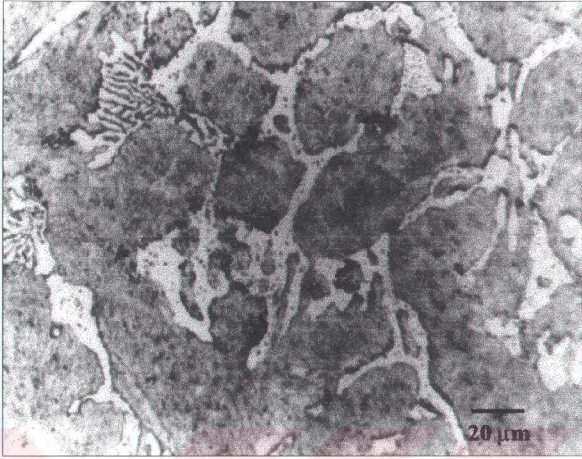


Şekil 7.22. %0,376 Ti içeren 61 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilen 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.

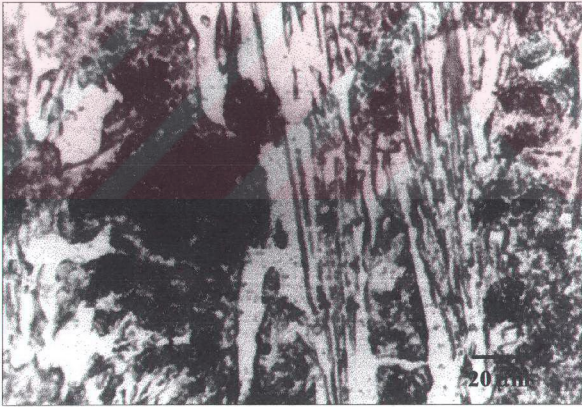
Tablo 7.7. %0,253 Ti içeren 61 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.

		Bölge			
		1	2	3	4
% Element	Si	2,11	0,40	4,10	0,75
	P	0,41	0,10	2,10	0,20
	Mo	1,53	3,52	54,59	14,11
	Ti	-	-	-	30,21
	Cr	8,29	57,48	10,14	23,47
	Fe	87,66	38,51	29,07	31,26

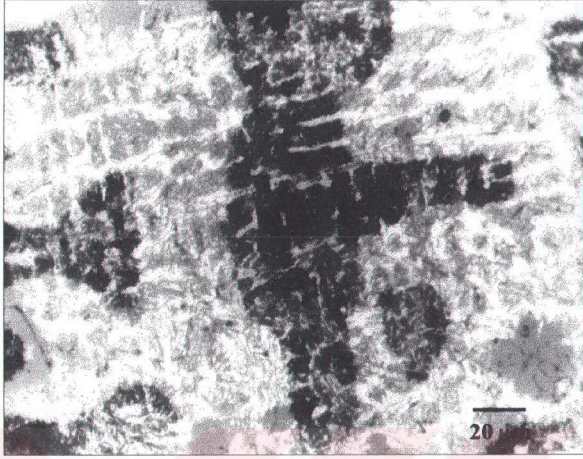
Şekil 7.23'de %0,14 V ile alaşımlanmış 71 nolu, Şekil 7.24'de %0,72 V ile alaşımlanmış 81 nolu, Şekil 7.25'de ise %0,53 V ile alaşımlanmış 91 nolu beyaz dökme demir numunelerin 1000 °C'da 6 saat ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapıları görülmektedir. Yapıda kromca zengin birincil karbürler ve martensitik matris içinde çökelmiş molibden zengin ikincil karbürler bulunmaktadır.



Şekil 7.23. %0,14 V içeren 71 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.



Şekil 7.24. %0,72 V içeren 81 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.



Şekil 7.25. %0,53 V içeren 91 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.

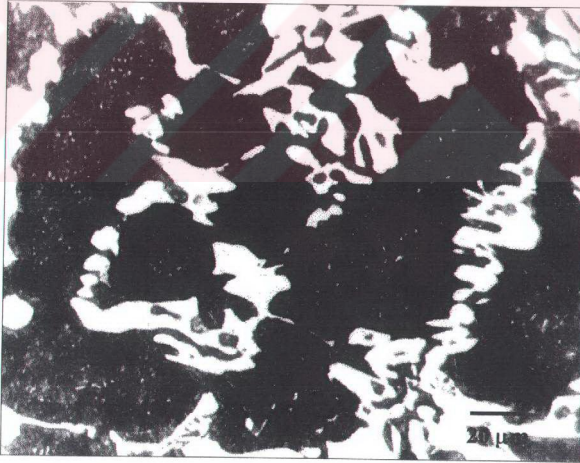
Bütün numunelerde döküm halindeki mikroyapılar Fe-Cr ferrit katı eriyik matrise sahipken, 1000 °C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra matris martensite dönüşmüştür. Molibden zengin ikincil karbürler döküm halinde genellikle kromca zengin birincil karbürler civarında kümelenirken, ostenitlenip havada su verildikten sonra martensitik matris içerisinde küçük partiküller halinde çökelmişlerdir.

Ayrıca niyobyum ile alaşımlanmış 21 ve 31 nolu numunelerde niyobyumca zengin karbürler ve titanyum ile alaşımlanmış 41, 51 ve 61 nolu numunelerde ise titanyumca zengin karbürler martensitik matris içerisinde çökelmişlerdir. Fakat bu durum vanadyum ile alaşımlanmış malzeme grubu için (71, 81 ve 91 nolu numuneler) gözlenmemiştir, yani vanadyum kendi karbürleri halinde çökmek yerine diğer metallerin karbürleri içinde yer almıştır [15].

Şekil 7.26'da hiçbir alaşım elementi ilave edilmemiş 12 nolu, Şekil 7.27'de %0,24 Nb ile alaşımlanmış 22 nolu ve Şekil 7.28'de ise %0,74 Nb ile alaşımlanmış 32 nolu numunenin 1000 °C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250 C'da 6 saat süreyle temperlenmesiyle elde edilen mikroyapıları görülmektedir.



Şekil 7.26. Hiçbir alaşım elementi ilave edilmemiş 12 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.



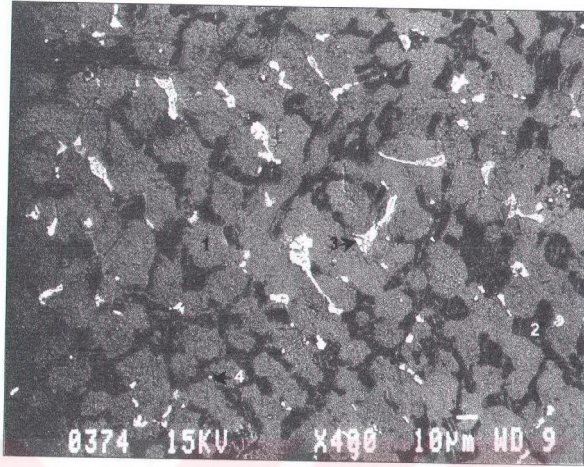
Şekil 7.27. %0,24 Nb ile alaşımlanmış 22 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.



Şekil 7.28. %0,74 Nb ile alaşımlanmış 32 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.

Şekil 7.29'da ise Şekil 7.28'de optik mikroskopta çekilen mikroyapısı görülen 32 nolu numunenin elektron mikroskobunda çekilen mikroyapısı görülmektedir. Tablo 7.8'de ise Şekil 7.29'da görülen çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları görülmektedir.

1000 °C'da 6 saat ostenitlenip havada su verilmiş malzemeleri 250 °C'da 6 saat temperlemek suretiyle matris içinde çökelen molibdence zengin ikincil karbürlerin bir miktar arttığı görülmektedir. (Şekil 7.26-28). Yapıda kromca zengin birincil karbürler ve temperlenmiş martensit matris içinde çökelmiş niyobyumca zengin ikincil karbürler mevcuttur.

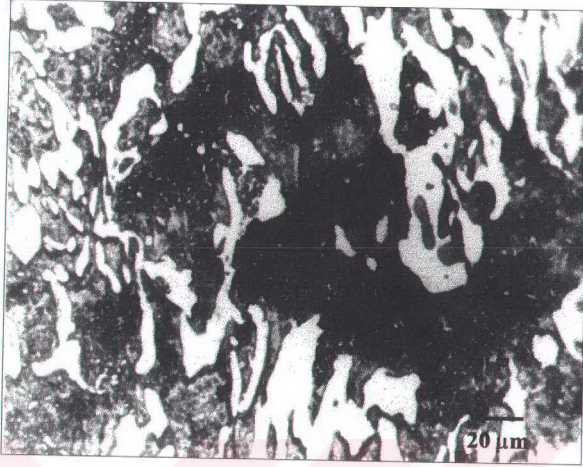


Şekil 7.29. %0,74 Nb ile alaşımlanmış 32 nolu numunenin elektron mikroskobunda çekilmiş 1000°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesiyle elde edilen mikroyapısı.

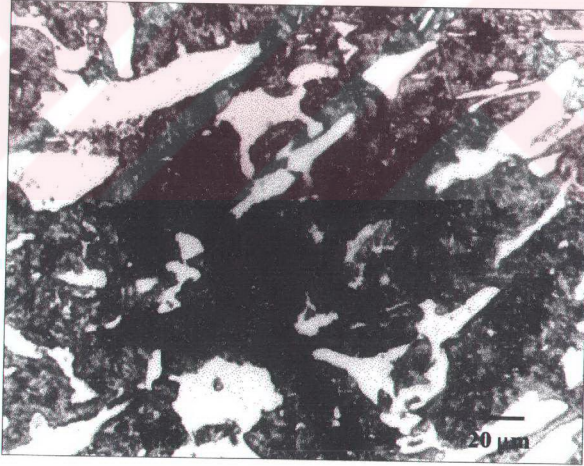
Tablo 7.8. %0,74 Nb içeren 32 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.

		Bölge			
		1	2	3	4
% Element	Si	0,52	0,18	0,41	0,28
	Mo	2,71	5,15	59,44	4,82
	Cr	13,66	53,70	6,93	2,19
	Fe	83,12	40,41	33,22	1,45
	Nb	0,00	0,56	-	89,38
	Ti	0,00	0,00	-	1,89

1000°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da temperlenmiş %0,096 Ti içeren 42 nolu numunenin mikroyapısı Şekil 7.30'da, %0,253 Ti içeren 52 nolu numunenin mikroyapısı Şekil 7.31'de görülmektedir.

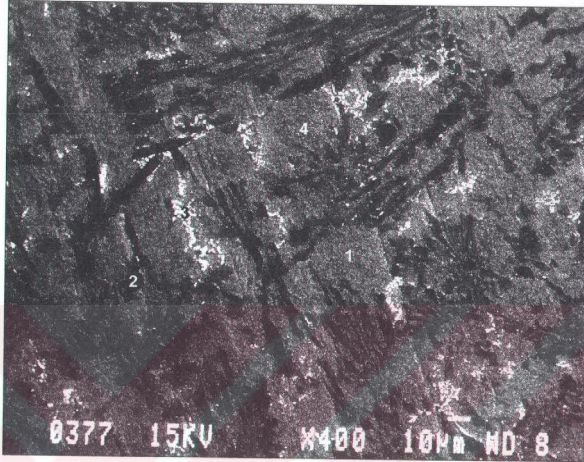


Şekil 7.30. %0,096 Ti ile alaşımlanmış 42 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.



Şekil 7.31. %0,253 Ti ile alaşımlanmış 52 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.

Şekil 7.32'de ise 52 nolu numunenin elektron mikroskobunda görüntülenen mikroyapısı, Tablo 7.9'da da bu şekilde görülen çeşitli bölgelerin noktasal EDS analizi sonuçları görülmektedir.

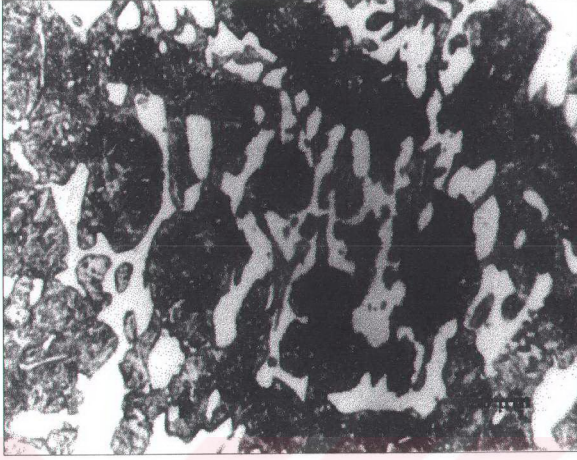


Şekil 7.32. %0,253 Ti ile alaşımlanmış 52 nolu numunenin elektron mikroskobunda çekilmiş 1000°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesiyle elde edilen mikroyapısı.

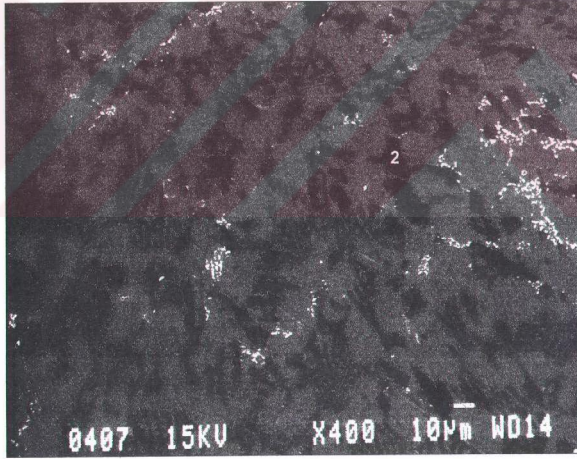
Tablo 7.9. %0,253 Ti içeren 52 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.

		Bölge			
		1	2	3	4
% Element	Si	1,67	0,00	2,71	0,35
	P	0,54	0,00	1,97	0,00
	Mo	1,58	3,95	34,59	2,01
	Ti	0,00	0,29	0,00	81,12
	Cr	10,07	55,46	7,67	8,06
	Fe	86,14	40,31	53,05	8,46

1000 °C'da 6 saat ostenitlenip havada soğutulan ve sonra 250 °C'da 6 saat temperlenen %0,376 Ti içeren 62 nolu numunenin optik mikroskop görüntüsü Şekil 7.33'de, elektron mikroskobu görüntüsü ise Şekil 7.34'de görülmektedir. Tablo 7.10'da ise Şekil 7.34'de görülen çeşitli bölgeler üzerinde yapılan noktasal EDS analizi sonuçları görülmektedir.



Şekil 7.33. %0,376 Ti ile alaşımlanmış 62 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.



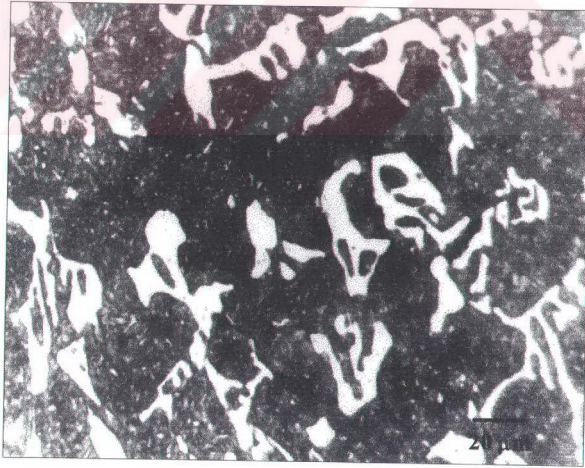
Şekil 7.34. %0,376 Ti ile alaşımlanmış 62 nolu numunenin elektron mikroskobunda çekilmiş 1000°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesiyle elde edilen mikroyapısı.

Tablo 7.10. %0,376 Ti içeren 62 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.

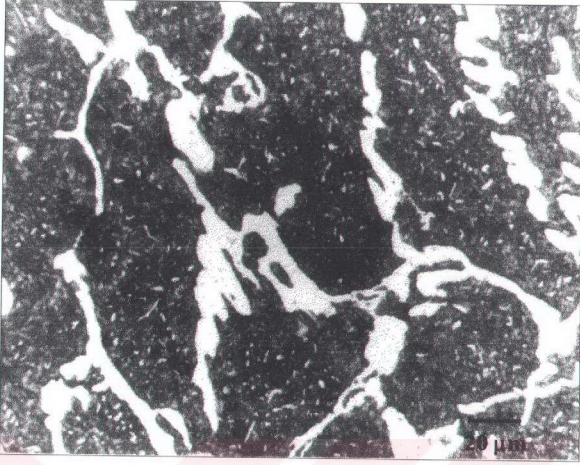
		Bölge		
		1	2	3
% Element	Si	0,96	0,12	0,78
	Mo	1,82	4,04	18,18
	Ti	0,00	0,36	24,32
	Cr	8,93	53,14	7,33
	Fe	88,29	42,34	49,40

Çeşitli oranlarda Ti içeren numune gruplarının mikroyapıları incelendiğinde, 1000 °C'da ostenitlemeden sonra havada su verilip sonra da temperleme yapılmış malzemelerin yapılarında yine kromca zengin birincil karbürler ve temperlenmiş martensit matris içinde çökelmiş molibden ve titanyumca zengin ikincil karbür partikülleri bulunduğu tespit edilmiştir. Bu gruptaki birincil karbür dendritlerinin boyutları Nb içeren malzeme grubuna göre biraz daha küçüktür.

1000 °C'da ostenitlenip havada su verilmiş ve 250 °C'da temperlenmiş %0,14 V içeren 72 nolu numunenin mikroyapısı Şekil 7.35'de, %0,72 V içeren 82 nolu numunenin mikroyapısı ise Şekil 7.36'da görülmektedir.

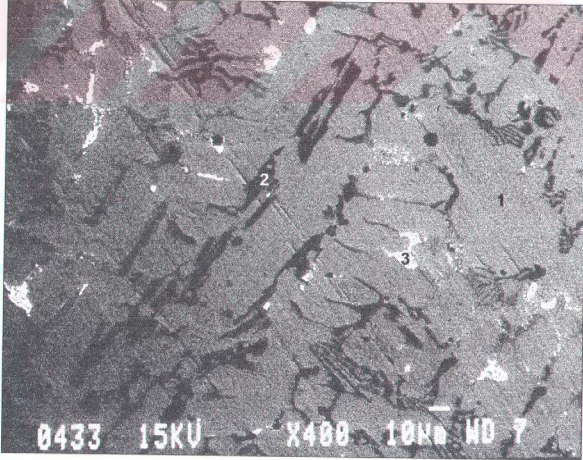


Şekil 7.35. %0,14 V ile alaşımlanmış 72 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.



Şekil 7.36. %0,72 V ile alaşımlanmış 82 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.

%0,72 V içeren 82 nolu numunenin elektron mikroskobu görüntüsü ise Şekil 7.37'de görülmektedir. Bu şekil üzerinde görülen çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları ise Tablo 7.11'de görülmektedir.

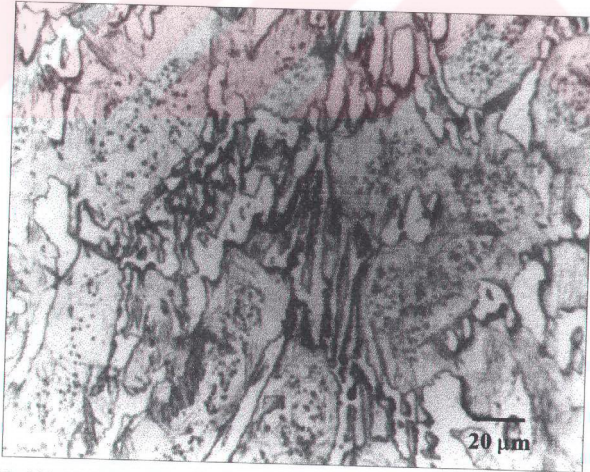


Şekil 7.37. %0,72 V ile alaşımlanmış 82 nolu numunenin elektron mikroskobunda çekilmiş 1000°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesiyle elde edilen mikroyapısı.

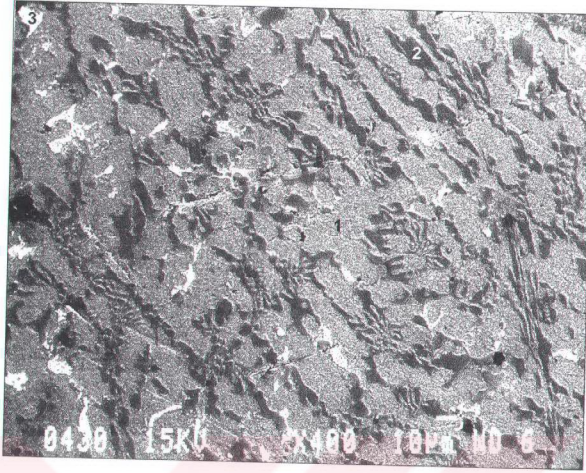
Tablo 7.11. %0,72 V içeren 82 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.

		Bölge		
		1	2	3
% Element	Si	0,91	0,15	2,35
	Mo	1,31	4,54	42,64
	V	0,27	4,40	1,21
	Cr	9,47	48,95	9,64
	Mn	1,03	1,18	0,76
	Fe	86,26	40,77	43,40
	Ni	0,75	0,00	0,00

Şekil 7.38'de görülen %0,53 V içeren 92 nolu numunenin optik mikroskopta çekilen 1000 °C'da ostenitlenip havada su verilmiş ve daha sonra 250 °C'da temperlenmiş halinin mikroyapısı görülmektedir. Aynı numunenin elektron mikroskobunda çekilen mikroyapısı ise Şekil 7.39'da görülmektedir. Şekil 7.39'da görülen çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları ise Tablo 7.12'de görülmektedir. 1000 °C'da ostenitlenip havada su verilmiş ve daha sonra 250 °C'da temperlenmiş V içeren malzeme grubunun mikroyapısında da kromca zengin birincil karbür dendritleri ve temperlenmiş martensitik matris içinde molibden zengin ikincil karbürler bulunmaktadır. Malzemeye çeşitli oranlarda ilave edilen V, kendi karbürü olarak çökmek yerine diğer metallerin oluşturduğu karbürlerin içinde yer almıştır.



Şekil 7.38. %0,53 V ile alaşımlanmış 92 nolu numunenin 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat süreyle temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.



Şekil 7.39. %0,53 V ile alaşımlanmış 92 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş 1000°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesiyle elde edilen mikroyapısı.

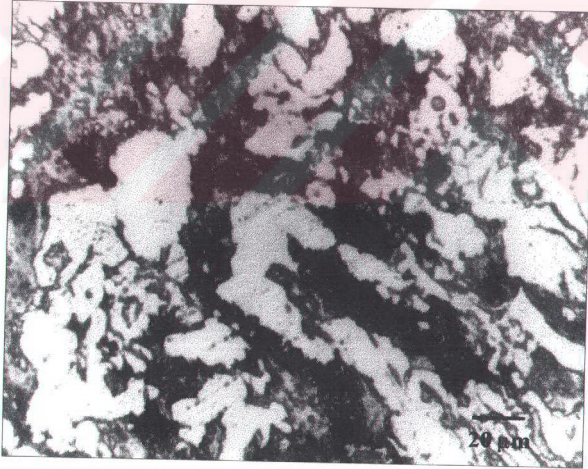
Tablo 7.12. %0,53 V içeren 92 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.

		Bölge		
		1	2	3
% Element	Si	1,33	0,18	3,42
	Mo	2,30	6,74	56,92
	V	0,22	2,12	1,04
	Cr	9,76	45,14	7,00
	Mn	0,86	1,16	0,41
	Fe	85,00	44,16	31,00
	Ni	0,53	0,51	0,21

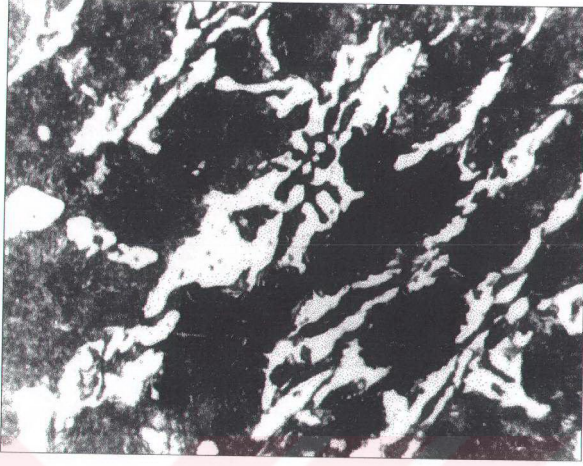
Şekil 7.40'da hiçbir alaşım elementi ilave edilmemiş 13 nolu numunenin, Şekil 7.41'de %0,24 Nb ilave edilmiş 23 nolu numunenin, Şekil 7.42'de ise %0,74 Nb ilave edilmiş 33 nolu numunenin 1050 °C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapıları görülmektedir. Yine dendritik bir yapı söz konusu olup, bileşenler kromca zengin birincil karbürler, martensitik matris içinde dağılmış molibdenca zengin ikincil karbürler, 23 ve 33 nolu numunelerde ise bunlara ilaveten matris içinde yer alan niyobyumca zengin ikincil karbür partikülleridir.



Şekil 7.40. Hiçbir alaşım elementi ilave edilmemiş 13 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.

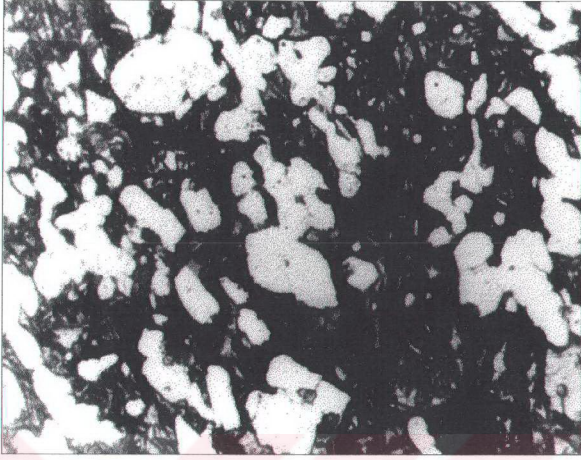


Şekil 7.41. %0,24 Nb ile alaşımlanmış 23 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.

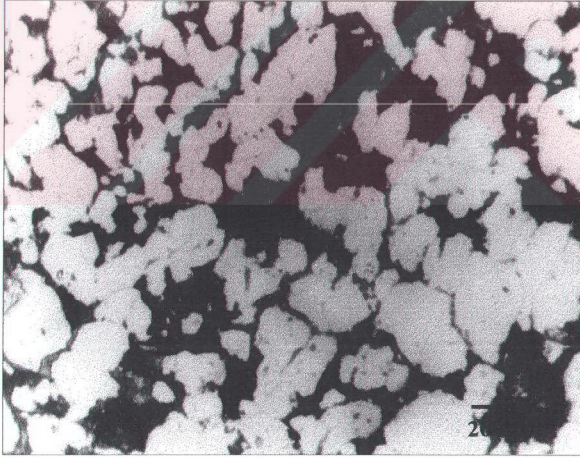


Şekil 7.42. %0,74 Nb ile alaşımlanmış 33 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.

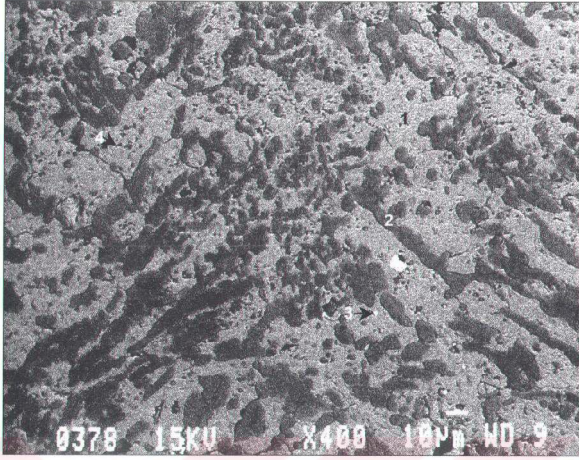
Şekil 7.43'de %0,096 Ti ile alaşımlanmış 43 nolu numunenin 1050 °C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı görülmektedir. Yapıda kromca zengin birincil karbürler ve martensitik matris içinde molibden ve titanyumca zengin ikincil karbür partikülleri mevcuttur. Bu numunedeki kromca zengin birincil karbür partiküllerinin şu ana kadar bahsedilen kromca zengin karbürlere göre daha masif yapıda olduğu görülmektedir. Şekil 7.44'de ise %0,253 Ti ile alaşımlanmış 53 nolu numunenin mikroyapısı görülmektedir. Bu numune de 1050 °C'da 6 saat ostenitleme ve havada su verme ısıl işlemi görmüştür. Şekil 7.45'de ise bu numunenin elektron mikroskopunda görüntülenen mikroyapısı görülmektedir. 53 nolu numunenin mikroyapısı incelendiğinde oluşan kromca zengin birincil karbürlerin %0,096 Ti içeren 43 nolu numunede bulunan kromca zengin birincil karbürlere göre biraz daha büyük boyutlu ve daha masif olduğu gözlenmektedir. Yapıda yine martensit matris içinde molibdence zengin ve titanyumca zengin ikincil karbürler mevcuttur. Çökelen titanyumca zengin karbürlerin miktarı artan titanyum içeriği ile birlikte bir miktar artmıştır. Tablo 7.13'de 53 nolu numunenin çeşitli bölgelerinde yapılan noktasal EDS analizi sonuçları görülmektedir.



Şekil 7.43. %0,096 Ti ile alaşımlanmış 43 nolu numunenin 1050°C’da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.



Şekil 7.44. %0,253 Ti ile alaşımlanmış 53 nolu numunenin 1050°C’da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.

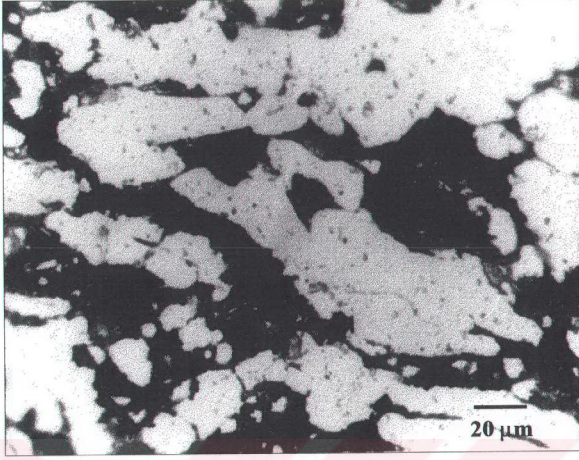


Şekil 7.45. %0,253 Ti ile alaşımlanmış 53 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş 1050°C’da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonraki mikroyapısı.

Tablo 7.13. %0,253 Ti içeren 53 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.

		Bölge			
		1	2	3	4
% Element	Si	1,47	0,12	2,81	0,25
	P	0,60	0,11	2,45	0,51
	Mo	1,87	8,02	56,09	4,29
	Ti	0,00	0,00	0,21	54,92
	Cr	8,33	52,91	8,63	8,97
	Fe	87,73	38,83	29,82	31,05

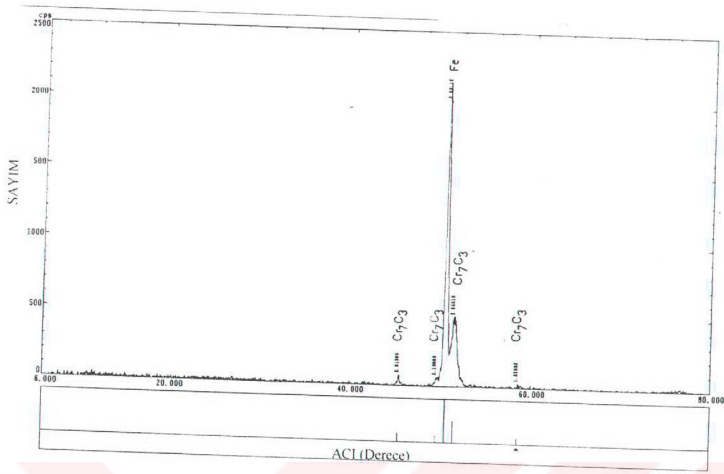
Şekil 7.46’da ise %0,376 Ti içeren 63 nolu numunenin 1050 °C’da ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı görülmektedir. 63 nolu numunenin yine kromca zengin birincil karbürler, molibden ve titanyumca zengin ikincil karbürler sahip olduğu görülmektedir. Fakat titanyum oranının artmasına bağlı olarak yapıda masif haldeki kromca zengin birincil karbürlerin boyutları ve miktarı artmıştır. Ve aynı zamanda matris içinde çökelen titanyumca zengin karbürlerin miktarı da artmıştır.



Şekil 7.46. %0,376 Ti ile alaşımlanmış 63 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat süreyle östenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.

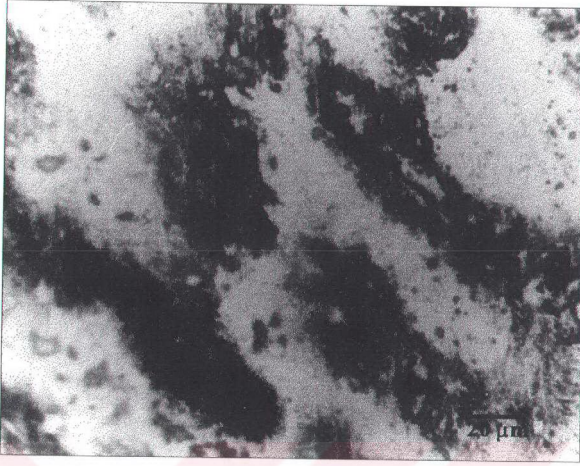
Sawamoto ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada [27], %0,03-0,3 Ti'un yapıdaki birincil ve ötektik karbürleri küreleştirdiklerini, çökelen ince TiC partiküllerinin, dendritik, çubukumsu veya taç yaprağı şeklinde karbür büyümesini bastırdığını belirtmektedirler.

Mikroyapı analizinin bir parçası olarak Philips marka Co tüplü X-ışınları cihazı ile yapılan X-ışınları analizinden tatminkar sonuçlar elde edilememiştir. Sadece birkaç dökme demir için sonuç alınmıştır. Rigaku marka ve Co tüplü X-ışınları cihazı ile yapılan analizlerde de tatminkar sonuçlar alınamazken, bazı dökme demirlerde (örneğin %0,376 Ti içeren 63 nolu dökme demir) birincil karbürlerin Cr_7C_3 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7.47). Literatürde %15 Cr'lu beyaz dökme demirlerle ilgili olarak daha önce yapılan çalışmalarda mikroyapıdaki birincil karbürlerin bulgularımıza uygun olarak M_7C_3 tipi karbürler olduğu belirtilmektedir [26,33,50,51,55].

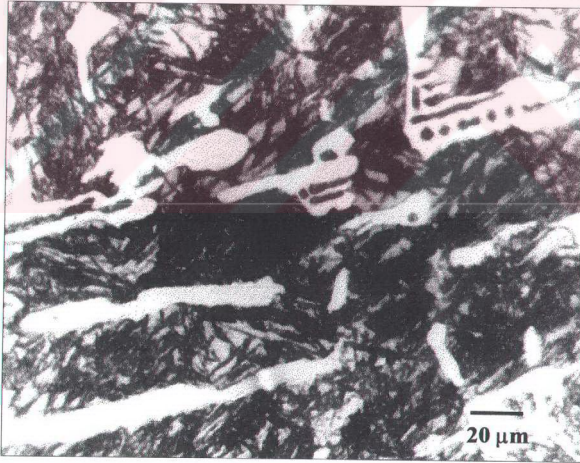


Şekil 7.47. %0,376 Ti içeren 1050°C'da ostenitlenip havada su verilmiş 63 nolu numunenin X-ışınları difraksiyon paterni.

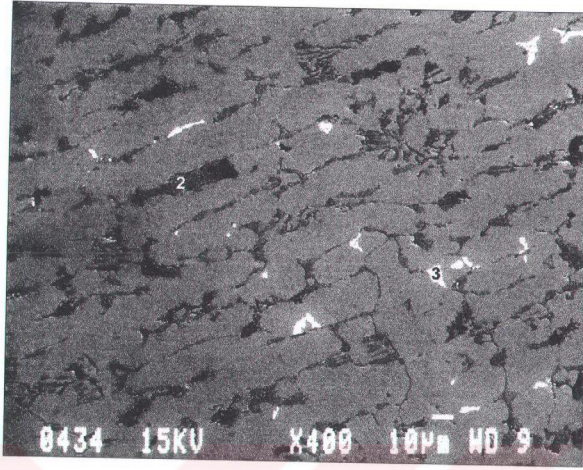
Şekil 7.48'de %0,14 V ile alaşımlanmış 73 nolu. Şekil 7.49'da %0,72 V ile alaşımlanmış 83 nolu numunenin 1050 °C'da 6 saat ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı görülmektedir. Şekil 7.50'de ise 83 nolu numunenin elektron mikroskopunda görüntülenen mikroyapısı görülmektedir. Tablo 7.14'de ise bu numune üzerinde çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları görülmektedir. 73 nolu malzemede kromca zengin karbürler yapıda sürekli ağ şeklinde yer almaktadır ve boyutları da oldukça büyüktür (yaklaşık 80 μm). 83 nolu malzemede ise kromca zengin karbürler yapıda küçük boyutlarda (yaklaşık 25 μm) ve daha homojen olarak dağılmışlardır. Yani dökme demire ilave edilen V miktarı arttıkça sürekli ağ yapısındaki karbür yapısının parçalanmış olduğu görülmektedir. Aynı yönde bulgulara başka çalışmalarda da rastlanmaktadır [56,57]. Her ikisinde de molibdenca zengin karbürler mevcuttur, fakat 83 nolu malzemedeki molibdenca zengin karbürlerin yapıda dağılımı 73 noludakine göre daha homojendir.



Şekil 7.48. %0,14 V ile alaşımlanmış 73 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.



Şekil 7.49. %0,72 V ile alaşımlanmış 83 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.

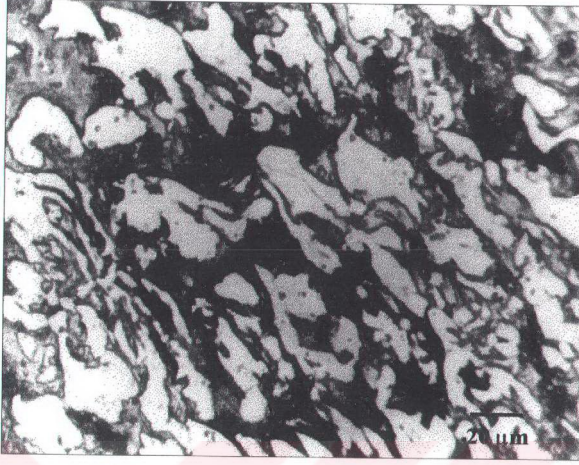


Şekil 7.50. %0,72 V ile alaşımlanmış 83 nolu numunenin elektron mikroskobunda çekilmiş 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonraki mikroyapısı.

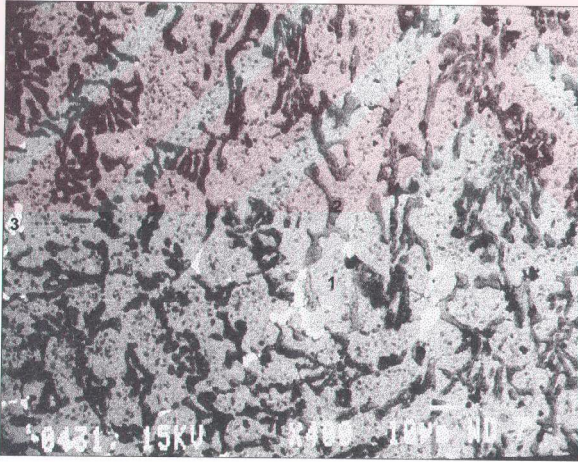
Tablo 7.14. %0,72 V içeren 83 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.

		Bölge		
		1	2	3
% Element	Si	0,84	0,19	2,16
	Mo	2,09	10,50	54,39
	V	0,32	2,29	1,72
	Cr	11,53	50,44	9,70
	Mn	1,04	0,37	0,32
	Fe	83,32	36,22	31,72
	Ni	0,85	0,00	0,00

Şekil 7.51'de %0,53 V içeren 93 nolu numunenin optik mikroskopta, Şekil 7.52'de ise aynı numunenin elektron mikroskobunda çekilen görüntüsü yer almaktadır. Bu numune de 1050 °C'da 6 saat ostenitlemeyi müteakip havada su verme ısıtma işlemi görmüştür. Tablo 7.15'de ise Şekil 7.52'de görülen çeşitli bölgelerin noktasal EDS analizi görülmektedir.



Şekil 7.51. %0,53 V ile alaşımlanmış 93 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su verilmiş haldeki mikroyapısı.



Şekil 7.52. %0,53 V ile alaşımlanmış 93 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonraki mikroyapısı.

Tablo 7.15. %0,53 V içeren 93 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.

		Bölge		
		1	2	3
% Element	Si	1,64	0,25	3,99
	Mo	2,63	5,57	56,26
	V	0,31	1,96	1,52
	Cr	8,21	46,73	7,31
	Mn	1,15	1,12	0,25
	Fe	85,42	44,36	30,03
	Ni	0,63	0,00	0,64

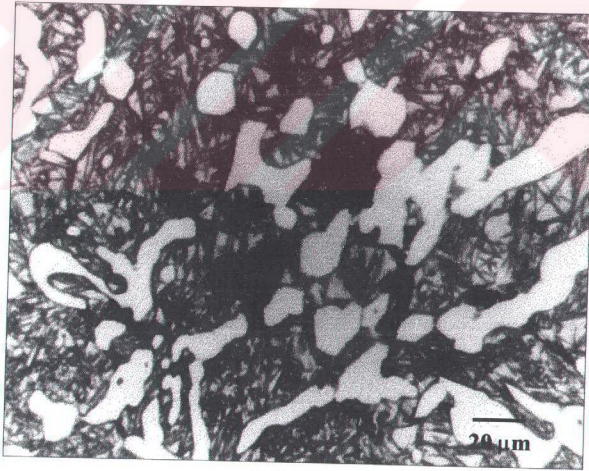
Şekil 7.53'de hiç alaşım elementi ilave edilmemiş 14 nolu numunenin, Şekil 7.54'de %0,24 Nb ilave edilmiş 24 nolu numunenin ve Şekil 7.55'de ise %0,74 Nb ilave edilmiş 34 nolu numunenin 1050 °C'da ostenitlenip havada su verildikten sonra 250 °C'da 6 saat temperlenmiş haldeki mikroyapıları görülmektedir. Yapıda kromca zengin birincil karbürler, temperlenmiş martensitik matris içinde molibdenca zengin ikincil karbürler, 24 ve 34 nolu numunelerde ise bunlara ilaveten niyobyumca zengin ikincil karbürler mevcuttur.



Şekil 7.53. Hiçbir alaşım elementi ilave edilmemiş 14 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.

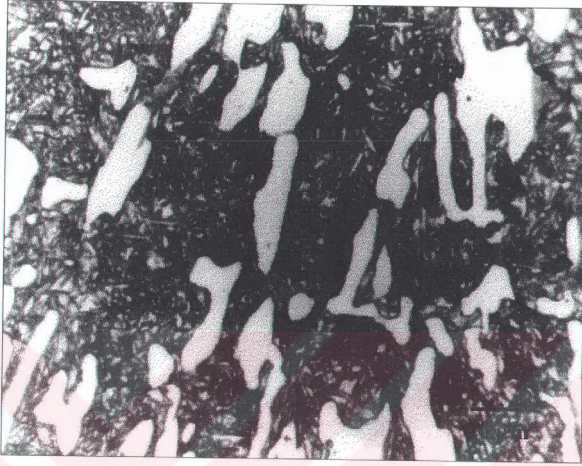


Şekil 7.54. %0,24 Nb ilave edilmiş 24 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.

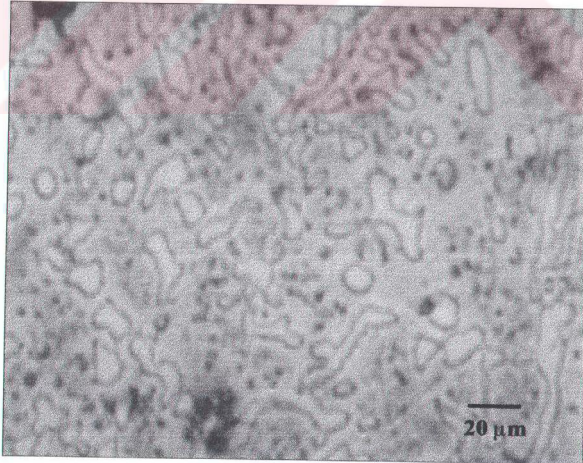


Şekil 7.55. %0,74 Nb ilave edilmiş 34 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.

Şekil 7.56'da %0,096 Ti ilave edilmiş 44 nolu, Şekil 7.57'de ise %0,253 Ti ilave edilmiş 54 nolu numunenin 1050 °C'da ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da temperlenmiş haldeki mikroyapıları görülmektedir.

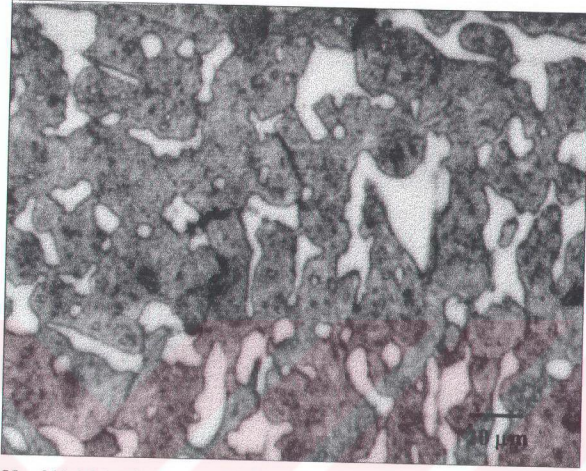


Şekil 7.56. %0,096 Ti ilave edilmiş 44 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.

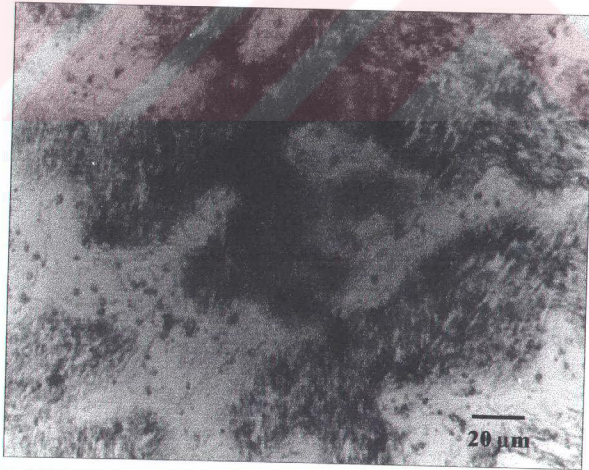


Şekil 7.57. %0,253 Ti ilave edilmiş 54 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.

Şekil 7.58'de %0,376 Ti ilave edilmiş 64 nolu numunenin Şekil 7.59'da ise %0,14 V ilave edilmiş 74 nolu numunenin 1050 °C'da ostenitlenip havada su verildikten sonra 250 °C'da temperlenmiş haldeki mikroyapısı görülmektedir.

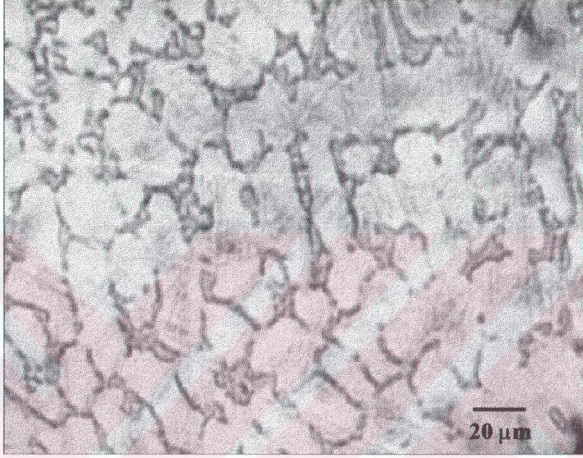


Şekil 7.58. %0,376 Ti ilave edilmiş 64 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.

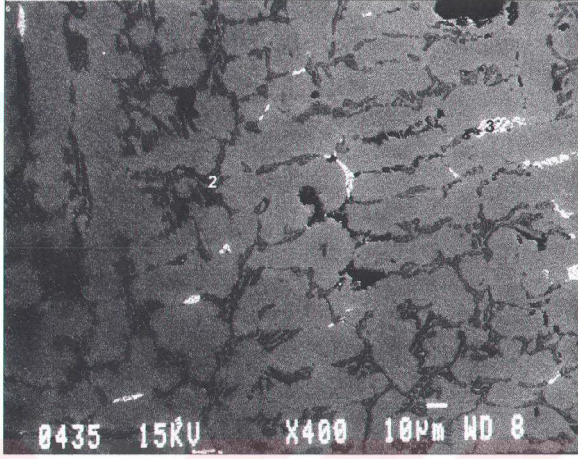


Şekil 7.59. %0,14 V ilave edilmiş 74 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.

%0,72 V ilave edilmiş ve 1050 °C’da ostenitlenip havada su verme ve 250 °C’da temperleme ısıl işlemi görmüş 84 nolu numunenin optik mikroskopta görüntülenen mikroyapısı Şekil 7.60’da, elektron mikroskobunda görüntülenen mikroyapısı ise Şekil 7.61’de görülmektedir. Tablo 7.16’da ise bu numune üzerinde çeşitli noktalardan alınan noktasal EDS analizi sonuçları görülmektedir.



Şekil 7.60. %0,72 V ilave edilmiş 84 nolu numunenin 1050°C’da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C’da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.

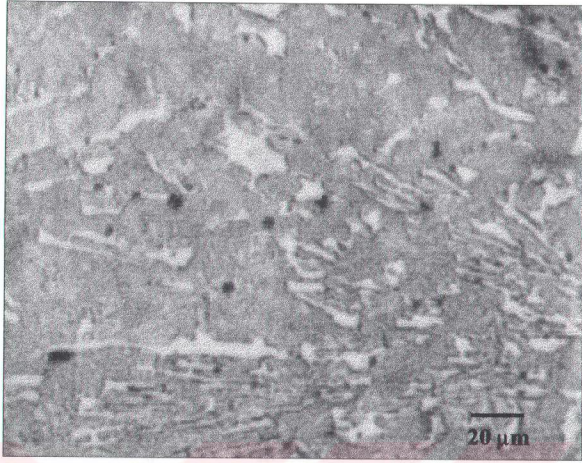


Şekil 7.61. %0,72 V ile alaşımlanmış 84 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesiyle elde edilen mikroyapısı.

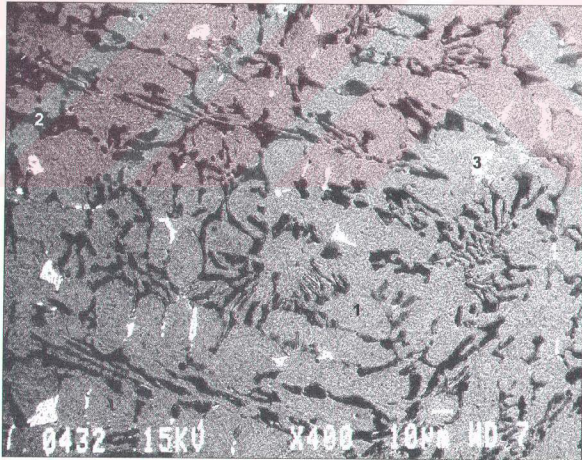
Tablo 7.16. %0,72 V içeren 84 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.

		Bölge		
		1	2	3
% Element	Si	0,97	0,10	2,11
	Mo	2,42	9,91	53,72
	V	0,19	2,28	1,62
	Cr	12,17	49,48	10,45
	Mn	0,97	10,4	0,26
	Fe	82,95	36,86	31,36
	Ni	0,33	0,33	0,48

%0,53 V ilave edilmiş ve 1050 °C'da ostenitlenip havada su verme ve 250 °C'da temperleme ısı işlemi görmüş 94 nolu numunenin optik mikroskopta görüntülenen mikroyapısı Şekil 7.62'de, elektron mikroskopunda görüntülenen mikroyapısı ise Şekil 7.63'de görülmektedir. Tablo 7.17'de ise bu numune üzerinde çeşitli noktalardan alınan noktasal EDS analizi sonuçları görülmektedir.



Şekil 7.62. %0,53 V ilave edilmiş 94 nolu numunenin 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesi sonrasında elde edilen mikroyapısı.



Şekil 7.63. %0,53 V ile alaşımlanmış 94 nolu numunenin elektron mikroskopunda çekilmiş 1050°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da 6 saat temperlenmesiyle elde edilen mikroyapısı.

Tablo 7.17. %0,53 V içeren 94 nolu numunenin mikroyapısındaki çeşitli bölgelerden alınan noktasal EDS analizi sonuçları.

		Bölge		
		1	2	3
% Element	Si	1,68	0,15	3,34
	Mo	2,31	4,81	58,43
	V	0,10	2,20	0,61
	Cr	9,21	48,04	7,35
	Mn	1,12	1,29	0,60
	Fe	85,41	43,43	29,39
	Ni	0,17	0,00	0,28

Sonuç olarak yapılan tüm mikroyapısal incelemelerden, bütün numunelerin dendritik ötektik karbürlere sahip olduğu, ısıtılma işlem görmüş numunelerin ise hepsinin martensitik yapılara sahip oldukları tespit edilmiştir. Beyaz dökme demirlerin abrasiv aşınma davranışları üzerine alaşım katkı elemanlarının ve ısıtılma şartlarının incelendiği bir çalışmada da [58] benzer sonuçlar bulunmuştur.

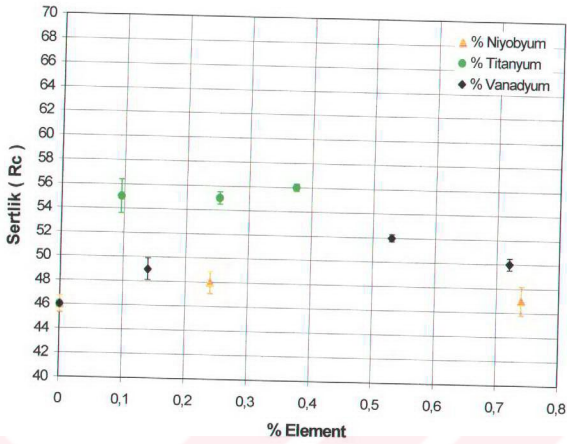
7.2 Sertlik Deneyi Sonuçları

Tablo 6.2’de belirtilen ısıt işlemler yapılmış malzemelerin sertlik (R_C) değerleri Tablo 7.18’de verilmektedir.

Tablo 7.18. Döküm halindeki ve ısıt işlem uygulanmış numunelerin sertlik değerleri (R_C).

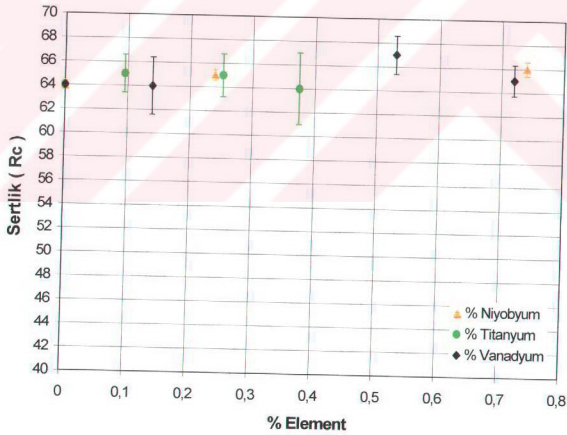
Numune No	Sertlik (R_C)	Numune No	Sertlik (R_C)	Numune No	Sertlik (R_C)
1	46	4	55	7	49
11	64	41	65	71	64
12	61	42	60	72	59
13	60	43	63	73	60
14	56	44	60	74	58
2	48	5	55	8	50
21	65	51	65	81	65
22	60	52	62	82	58
23	59	53	62	83	64
24	58	54	59	84	58
3	47	6	56	9	52
31	66	61	64	91	67
32	61	62	64	92	62
33	58	63	62	93	65
34	58	64	60	94	60

Şekil 7.64.a’da yüksek kromlu beyaz dökme demirlere ilave edilen alaşım elementlerinin döküm halinde sertliğe etkisi görülmektedir. Alaşım elementlerinden Ti ve V ilavesi ile genelde alaşımların sertlik değerleri artmaktadır. Nb artışı ile sertlikte belirgin bir artış görülmemektedir. Sertlik yaklaşık 47 R_C seviyelerinde seyretmektedir. Ti miktarı arttıkça malzemenin sertliğinde yaklaşık %20’lik bir artış görülmektedir. Sertlik 46 R_C ’den yaklaşık 56 R_C ’ye kadar artmaktadır. V elementinin artmasıyla sertlikte yaklaşık %10’luk bir artış gözlenmektedir. Sertlik değeri 46 R_C ’den yaklaşık 52 R_C ’ye artmaktadır. Alaşım elementlerinin sertliğe etkisini döküm hali için veren Şekil 7.64.a’ya göre sertliği en fazla Ti elementinin arttırdığı görülmektedir. % 0,74 mertebesine kadar arttırılan Nb’un ise sertlikte herhangi belirgin bir etkisi görülmemiştir.



Şekil 7.64.a. Alaşım elementlerinin sertliğe etkisi (döküm halinde).

Şekil 7.64.b'de 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenmiş ve havada su verilmiş malzemelerde alaşım elementlerinin sertliğe etkisi görülmektedir.

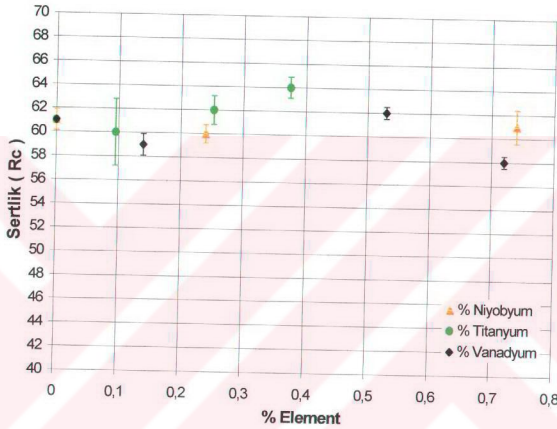


Şekil 7.64.b. Alaşım elementlerinin sertliğe etkisi (1000°C'da ostenitlenip havada su verilmiş halde).

1000°C'da 6 saat ostenitleme ve havada su verme sonucunda, Nb, V ve Ti elementlerinin her üçünün artışıyla da sertlik değerlerinde bariz bir değişme

görülmemektedir. Sertlik değerleri yukarıda da görüldüğü gibi 64-66 R_C aralığında değişmektedir. Bu ısıtıl işlemin etkisiyle sertlik döküm halindeki Ti'lu alaşımlarda 55 - 56 R_C seviyesinden, döküm halindeki V'lu alaşımlarda 49-52 R_C seviyesinden, döküm halindeki Nb'lu alaşımlarda ise 46-47 R_C seviyesinden 1000°C'da ostenitleme ve havada su verme sonrası 64-66 R_C seviyesine artmıştır.

Şekil 7.64.c'de, 1000°C'da 6 saat süreyle ostenitlenip havada su vermeyi müteakiben 250°C'da 6 saat temperlenmiş malzemelerde, alaşım elementlerinin sertliğe etkisi görülmektedir.



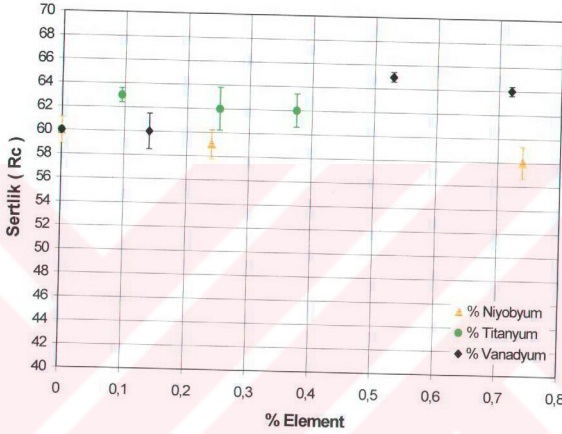
Şekil 7.64.c. Alaşım elementlerinin sertliğe etkisi (1000°C'da ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da temperlenmiş halde).

1000°C'da 6 saat ostenitlenip havada su verme sonrası 250°C'da 6 saat temperlenmiş malzemelerde; Nb artışıyla sertlikte herhangi bir değişim gözlenmemekte, sertlik değerleri 60 R_C civarlarında seyretmektedir. Ti artışı ise sertliği yaklaşık 59 R_C 'den 64 R_C 'ye kadar arttırmaktadır. V artışı ile sertlikte 58 ile 62 R_C arasında kararsız bir değişim görülmektedir.

Bu irdelemeden, yapılan ısıtıl işlem (1000°C'da ostenitlemeden sonra havada su verme ve 250°C'da temperleme) sonucunda Ti'un daha yüksek sertlik değerleri sağladığı söylenebilir. Nb ve V ilavesiyle bu ısıtıl işlem şartları sonucunda sertlikte pek bir değişim görülmezken, Ti artışıyla sertlikte bariz artış görülmektedir. Maksimum sertlik değeri %0,376 Ti'lu alaşımda 64 R_C olarak elde edilmiştir.

1000°C'da ostenitlenip havada su verilen malzemeleri 250°C'da temperlemekle, Nb ve V ilave edilmiş malzemelerde, sertlik değerlerinde yaklaşık 5 Rc değerinde düşüşler görülürken, Ti'lu malzemelerde; temperleme ile sertlikte fazla bir düşüş olmamış, buna karşılık artan Ti ilavesiyle yapıda çökelen titanyumca zengin ikincil karbürlerin artmasından dolayı sertlik artmıştır.

Şekil 7.64.d'de, 1050°C'da 6 saat ostenitlemeye tabii tutulup havada su verilmiş malzemelerde alaşım elementlerinin sertliğe etkisi görülmektedir.

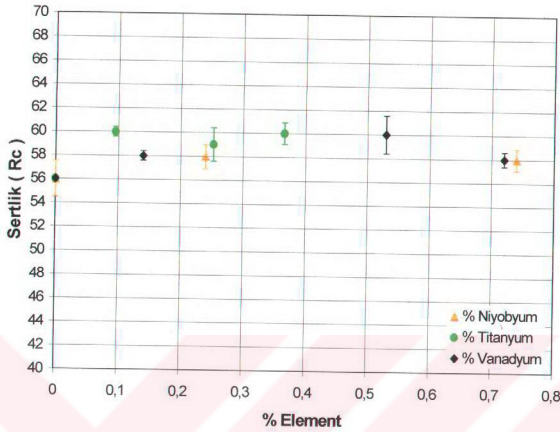


Şekil 7.64.d. Alaşım elementlerinin sertliğe etkisi (1050°C'da ostenitlenip havada su verilmiş halde).

Şekil 7.64.d'ye göre malzemeye Nb ilavesiyle sertlikte 60 Rc'den 58 Rc'ye bir düşme görülmektedir. V ilavesiyle sertlikte yaklaşık 60 Rc'den 64 Rc'ye artış görülmektedir. Ti artışıyla ise sertlikte az bir artış görülmektedir (60 Rc'den 62 Rc'ye).

Görüldüğü gibi 1050°C'dan su verme sonucunda, (Şekil 7.64.d) 1000°C'dan su vermeye göre (Şekil 7.64.b) sertlik değerlerinde her üç element için de bir miktar düşme görülmektedir. Yani bütün malzemeler 1000°C'da ostenitlenip havada su verme sonucunda daha yüksek sertlik değerlerine ulaşmaktadır. Nb'lu malzemeler; 1050°C'da ostenitleme sonucunda en fazla sertlik kaybına uğrayan malzeme grubudur.

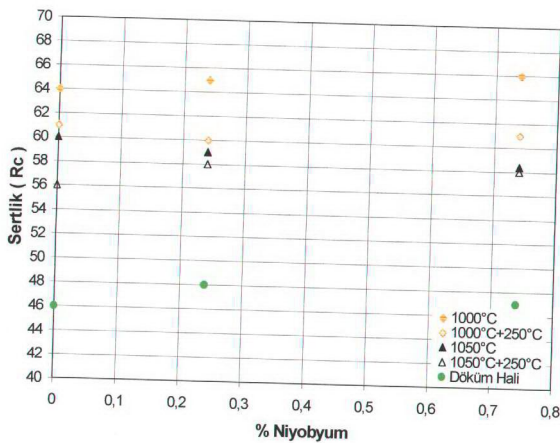
1050°C'da 6 saat ostenitleme ve havada su vermeden sonra, 250°C'da 6 saat temperleme sonucunda alaşım elementlerinin sertliğe etkisi ise Şekil 7.64.e'de görülmektedir.



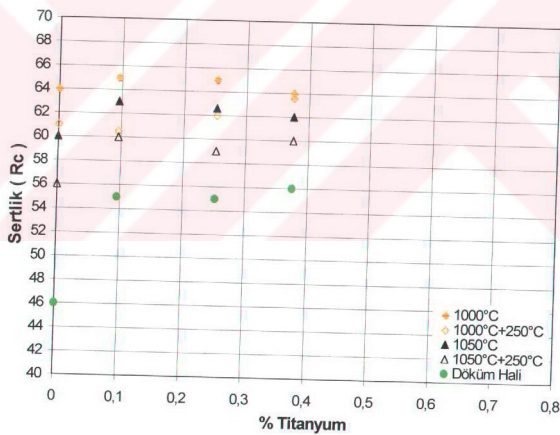
Şekil 7.64.e. Alaşım elementlerinin sertliğe etkisi (1050°C'da ostenitlenip havada su verildikten sonra 250°C'da temperlenmiş halde).

Şekil 7.64.e'den görülebileceği gibi Nb'lu malzeme grubu Ti ve V'lu malzeme gruplarına göre biraz daha düşük sertlik değerlerine sahiptir. 1050°C'dan su verilmiş ve 250°C'da temperlenmiş bütün malzeme gruplarının 1000°C'dan su verilmiş ve 250°C'da temperlenmiş malzemelerden yaklaşık 2 R_C daha düşük sertlik değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

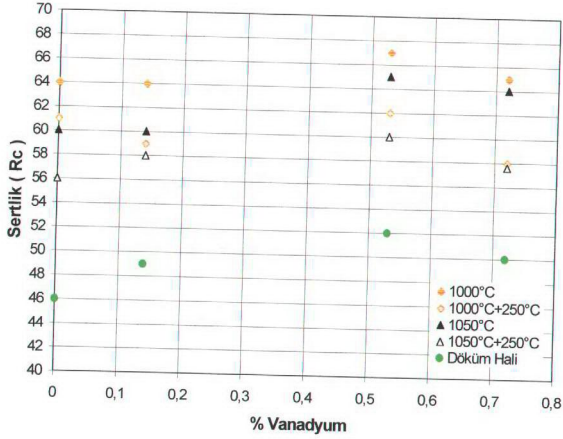
Sonuç olarak her üç malzeme grubu için de en yüksek sertlik değerleri veren ısıtılma işlemi; 1000°C'da ostenitlemeyi takiben yapılan havada su verme olduğu tespit edilmiştir. Isıl işlemsiz numunelerin sertliklerinin ısıtılma işlemi görmüş numunelerin sertliklerinden daha düşük olduğunun tespit edildiği bu çalışmanın sonuçları İzçiler'in yaptığı çalışmanın [58] sonuçları ile uyum içindedir. Literatürde yapılan diğer bir çalışmada ise [47] ostenitleme sıcaklığı arttıkça sertliğin düştüğü de belirtilmektedir. Şekil 7.65, literatürde yapılan çalışmalarla [47,58] uyum göstermektedir.



Şekil 7.65.a. Nb içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ısıtılmanın sertliğe etkisi.



Şekil 7.65.b. Ti içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ısıtılmanın sertliğe etkisi.



Şekil 7.65.c. V içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ısı işlemin sertliğe etkisi.

%17 Cr'lu beyaz dökme demirde, %1 V ilavesinin çeşitli sıcaklıklarda ostenitlenip havada soğutulmuş malzemelerde, sertlik üzerine pek bir etki göstermediği, %2 V ilavesinin ise 800°C, 900°C ve 1000°C'da ostenitlenip havada soğutulmuş numunelerin sertliklerinde düşüşe sebep olduğu belirtilmektedir [56]. Bu çalışmada ise %0,53'e kadar artan V ile hemen hemen her ısı işlem durumu için sertliğin arttığı, bu değerden sonra pek değişmediği görülmektedir (Şekil 7.65.c).

7.3 Aşınma Deneyi Sonuçları

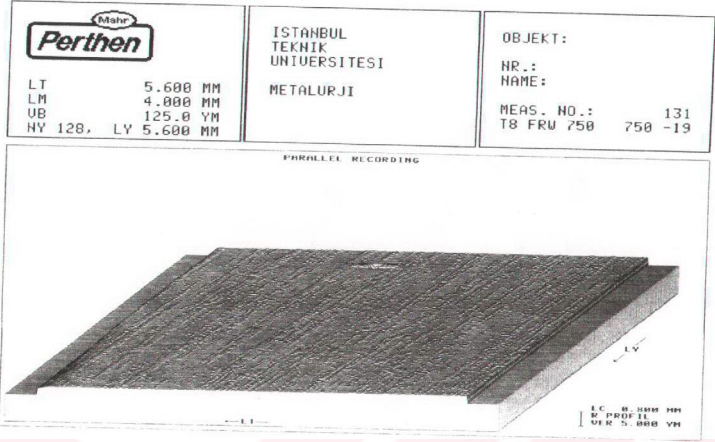
Tablo 7.19'da bütün numunelerin oda sıcaklığında 60 no ve 120 no Al_2O_3 zımpara kullanılarak 4,65 m'lik kayma mesafesi için yapılan aşınma deneyi sonuçları görülmektedir.

Tablo 7.19. İncelenen beyaz dökme demirlerde 60 no ve 120 no zımpara üzerinde 4.65 m'lik kayma mesafesi sonrasında meydana gelen ağırlık kayıpları.

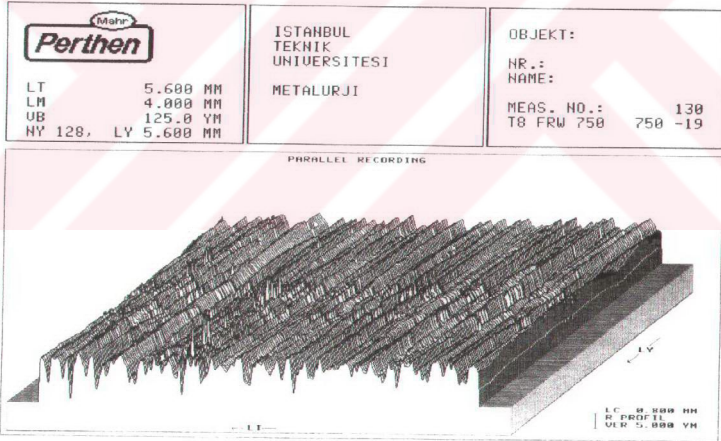
Numune No:	$\Delta G(\text{mg})$		Numune No:	$\Delta G(\text{mg})$		Numune No:	$\Delta G(\text{mg})$	
	60 No	120 No		60 No	120 No		60 No	120 No
1	21.5	18.7	4	19.6	15.5	7	22.8	16.7
11	21.4	18.1	41	22.1	17.1	71	19.4	18.5
12	22.6	22.3	42	28.0	19.7	72	28.6	26.9
13	20.5	15.8	43	17.4	14.5	73	18.3	17.7
14	21.6	17.7	44	21.9	15.4	74	20.9	18.8
2	21.3	19.0	5	21.7	16.1	8	20.4	16.9
21	20.1	17.5	51	22.3	19.0	81	21.1	20.4
22	26.3	21.8	52	23.3	19.4	82	42.1	31.4
23	23.1	21.1	53	18.7	14.9	83	18.7	15.8
24	19.7	18.8	54	17.2	17.0	84	28.2	19.9
3	20.9	18.9	6	23.2	16.4	9	22.7	19.2
31	20.3	18.3	61	21.8	14.8	91	20.7	17.8
32	35.9	33.3	62	24.0	21.2	92	24.2	23.7
33	18.3	17.4	63	15.9	14.3	93	19.6	18.0
34	25.5	21.9	64	16.0	15.7	94	27.1	19.6

Tablo 7.19'dan görüldüğü gibi 60 no zımpara ile yapılan aşınma deneylerinde elde edilen aşınma kaybı değerleri, 120 no zımpara ile yapılan deneylerde bulunan değerlerden daha büyüktür. Bu, beklenen bir durumdur, çünkü 60 no zımpara daha kaba taneli bir yüzeye sahiptir ve karşısındaki malzemeyi daha ince taneli 120 no zımparaya göre daha fazla aşındırmaktadır.

Şekil 7.66'da incelenen beyaz dökme demirler içinden örnek olarak seçilen % 0,74 Nb içeren 21 nolu numunenin 1000°C'dan havada su verilmiş haldeki yüzeyinin aşınma deneyinden önceki (800 no'ya kadar zımparalanmış), Şekil 7.67'de ise aynı numunenin 60 no zımpara ile yapılan aşınma deneyinden sonraki yüzey profili görülmektedir. Aşınma deneyi sonrasında numunenin aşınma yüzeyinin pürüzlülüğü önemli oranda artmıştır.



Şekil 7.66. %0,74 Nb içeren 21 nolu numunenin 1000°C'dan havada su verilmiş haldeki yüzeyinin aşınma deneyinden önceki (800 no'ya kadar zımparalanmış) yüzey profili.



Şekil 7.67. %0,74 Nb içeren 21 nolu numunenin 1000°C'dan havada su verilmiş haldeki yüzeyinin 60 no zımpara ile yapılan aşınma deneyinden sonraki yüzey profili.

İncelenen dökme demirlerin aşınma davranışlarını kıyaslamak amacıyla Denklem 6.1 kullanılarak Tablo 7.19'daki deney sonuçları bağıl aşınma direncine dönüştürülmüştür (Tablo 7.20).

Tablo 7.20. İncelenen beyaz dökme demirlerin bağıl aşınma dirençleri.

Numune No	Bileşim	Bağıl Aşınma Direnci = $\left(\frac{\Delta G_1}{\Delta G_x} \right)$	
		60 No	120 No
1	Ref.	1.00	1.00
11	"	1.00	1.03
12	"	0.95	0.84
13	"	1.05	1.18
14	"	1.00	1.06
2	%0,24Nb	1.01	0.98
21	"	1.07	1.07
22	"	0.82	0.86
23	"	0.93	0.89
24	"	1.09	0.99
3	%0,74Nb	1.03	0.99
31	"	1.06	1.02
32	"	0.60	0.56
33	"	1.17	1.07
34	"	0.84	0.85
4	%0,096Ti	1.10	1.21
41	"	0.97	1.09
42	"	0.77	0.95
43	"	1.24	1.29
44	"	0.98	1.21
5	%0,253Ti	0.99	1.16
51	"	0.96	0.98
52	"	0.92	0.96
53	"	1.15	1.26
54	"	1.25	1.10
6	%0,376Ti	0.93	1.14
61	"	0.99	1.26
62	"	0.90	0.88
63	"	1.35	1.31
64	"	1.34	1.19
7	%0,14V	0.94	1.12
71	"	1.11	1.01
72	"	0.75	0.70
73	"	1.17	1.06
74	"	1.03	0.99
8	%0,72V	1.05	1.11
81	"	1.02	0.92
82	"	0.51	0.60
83	"	1.15	1.18
84	"	0.76	0.94
9	%0,53V	0.95	0.97
91	"	1.04	1.05
92	"	0.89	0.79
93	"	1.10	1.04
94	"	0.79	0.95

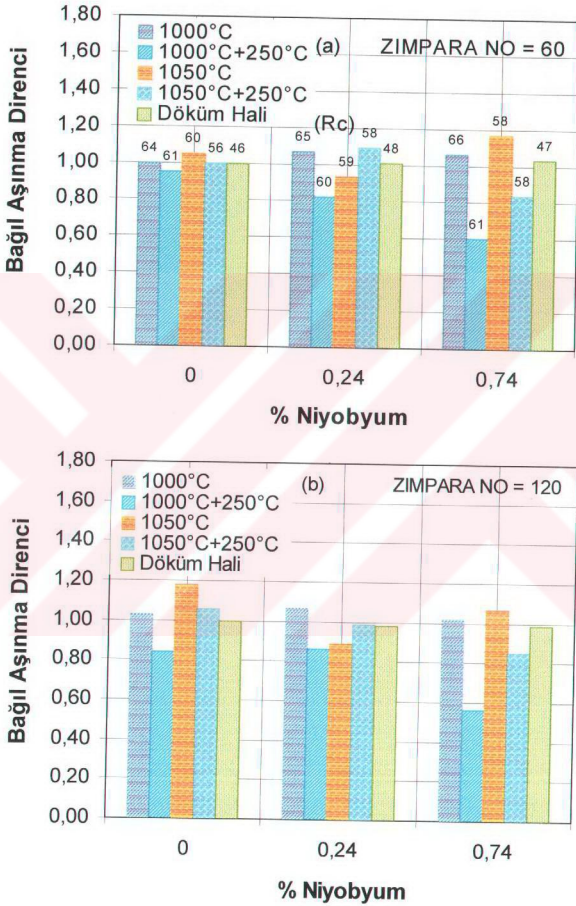
Döküm halindeki malzemelerin aşınma dirençlerini arttırmak için uygulanan ısı işlemlerin hem 60 no hem de 120 no zımpara ile yapılan aşınma deneylerinin sonuçlarına göre elde edilen aşınma direncine etkisi Şekil 7.68-70'den görülmektedir. Nb ile alaşımlanmış beyaz dökme demir grubunda, döküm haline göre aşınma direncini arttıran ısı işlemlerin; 1000°C ve 1050°C'da 6 saat ostenitlemeden sonra havada su verme olduğu görülmektedir (Şekil 7.68). Fakat bu aşınma direnci artışı çok kayda değecek miktarda değildir. Literatürde % 0,86'ya kadar ilave edilen Nb ile; aşınma direncinin 1000°C'dan ve 1030°C'dan havada su verme ısı işlemi ile azaldığı yönünde sonuçlar mevcuttur [26]. Aynı çalışmada Nb miktarı % 0,86'dan daha fazla artırıldığında aşınma direncinin de arttığı bildirilmektedir. Bu tez çalışmasında ise 1000°C'dan ve 1050°C'dan havada su verme durumu için % 0,74'e kadar artan Nb ile aşınma direncinde belirgin bir değişim tespit edilememiştir. Ayrıca malzemelerin temperleme ısı işlemi ile genelde aşınma dirençleri azalmaktadır (Şekil 7.68).

1000°C'dan su verilen Nb'lu dökme demirler 1050°C'dan su verilenlerden daha yüksek sertliğe sahip olmasına rağmen, aşınma direncinde belirgin bir değişiklik göstermemektedir. Hatta % 0,74 Nb için 1050°C'dan su verilen dökme demir daha az aşınmaya uğramıştır (Şekil 7.68).

Ti ile alaşımlanmış beyaz dökme demirlerde, döküm haline göre aşınma direncinde artış sağlayan ısı işlemler 1050°C'dan su verme ve 1050°C'dan su verme sonrasında yapılan 250°C'da temperlemedir (Şekil 7.69).

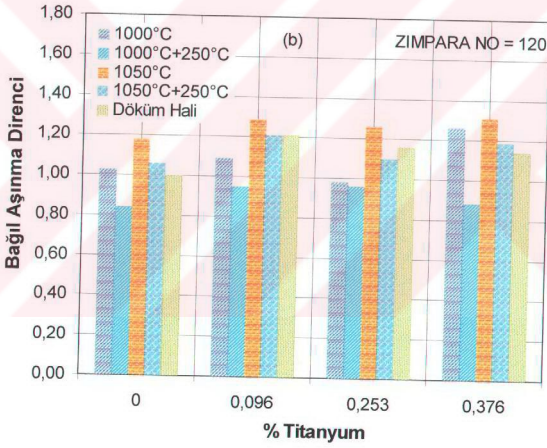
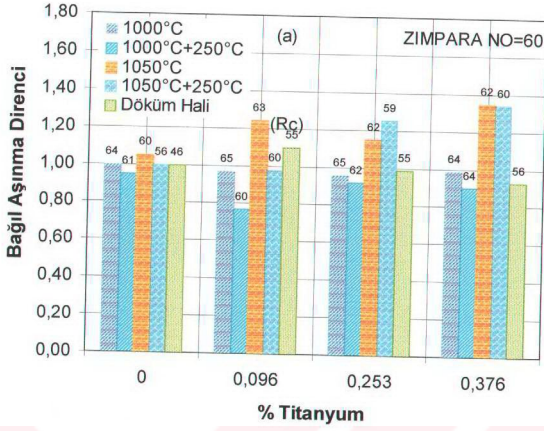
Ti içeren dökme demirlerde en yüksek sertlik değerlerini 1000°C'dan su verme işlemi vermesine rağmen, bu ısı işlem için aşınma direnci değerleri döküm haline göre bile daha azdır. 880°C'dan fanla soğutulan ve 250°C'da temperlenen beyaz dökme demire ilave edilmiş % 0,21 oranında Ti'un aşınma direncini arttırdığı belirtilmektedir [58]. Söz konusu araştırmadan farklı olarak bu tez çalışmasında en yüksek aşınma direncinin elde edildiği Ti oranı % 0,376 olarak belirlenmiştir. İncelenen beyaz dökme demirlerde, en yüksek aşınma direnci, 1050°C'dan su verilmiş % 0,376 Ti içeren 63 nolu dökme demirde elde edilmiştir. Bu dökme demir için elde edilen aşınma direnci, alaşım elementi içermeyen döküm halindeki 1 nolu dökme demire göre yaklaşık % 30-35'lik bir artış göstermektedir (Şekil 7.69). 1050°C'dan havada su verilmiş Ti içeren dökme demirleri 250°C'da temperlemekle

aşınma direncinde fazla bir düşüş görülmemektedir. 1050°C'dan havada su verilen ve 250°C'da temperlenen %0,376 Ti içeren dökme demirde döküm halindeki 1 nolu dökme demire göre zımpara türüne bağlı olarak yaklaşık %20-35 düzeylerinde aşınma direnci artışı görülmüştür.



Şekil 7.68. Nb içeren malzemelerde ısı işlemin aşınma direncine etkisi.

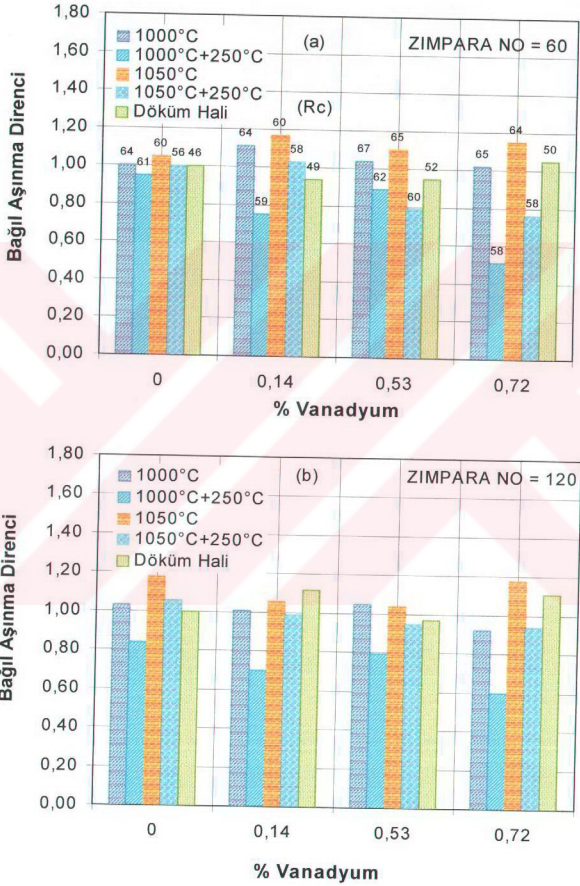
- (a) 60 no zımpara için
(b) 120 no zımpara için



Şekil 7.69. Ti içeren malzemelerde ısıtıl işlemin aşınma direncine etkisi.

- (a) 60 no zımpara için
(b) 120 no zımpara için

V içeren 15Cr-3Mo'li beyaz dökme demir malzemelerde ısıtıl işlemin aşınma direncine etkisini gösteren Şekil 7.70'in incelenmesinden; 1000°C'dan su verme ile aşınma direncinin bir miktar arttığı fakat en yüksek aşınma direnci değerlerinin 1050°C'dan su verme sonucunda elde edildiği tespit edilmiştir. Su verme işlemlerinden sonra yapılan temperleme işlemleri ile aşınma dirençleri düşmektedir



Şekil 7.70. V içeren malzemelerde ısıtıl işlemin aşınma direncine etkisi.

(a) 60 no zımpara için

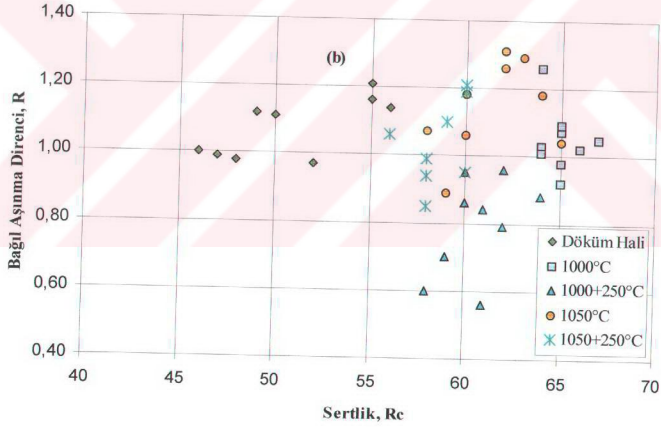
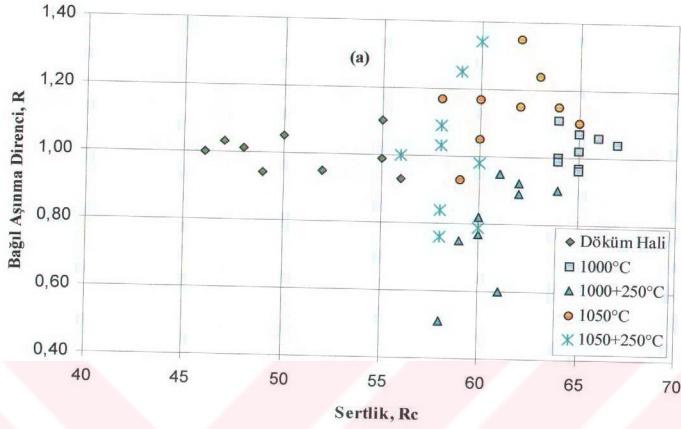
(b) 120 no zımpara için

V için de en yüksek sertlik değerleri 1000°C'dan su verme neticesinde elde edilmesine rağmen en az aşınma 1050°C'dan su verme ile elde edilmektedir. Alaşım elementi olarak V ilave edilen dökme demir grubu içinde aşınma direnci en yüksek olan dökme demirin % 0,72 oranında V içeren dökme demir olduğu söylenebilir. Bu dökme demir döküm halindeki 1 nolu dökme demirden % 20 düzeyinde daha yüksek aşınma direncine sahiptir. Literatürde döküm haline göre, 970°C'dan havada su verilmiş % 0,9 V'lu bir dökme demirin (% 15Cr, % 2,5Mo) aşınma miktarının oldukça düşük olduğu belirtilmektedir [55].

Görüldüğü gibi her üç element için de genellikle en yüksek sertlik değerlerini veren ısıtım işlemi 1000°C'dan su verme olmasına rağmen aşınma direncini en çok arttıran ısıtım işlemi ise 1050°C'dan su vermedir. Ayrıca incelenen dökme demirlerin temperleme ile sertlik değerleri ve aşınma dirençleri azalmaktadır. Yapılan literatür taramasında aynı yönde bulgulara başka çalışmalarda da rastlanmaktadır [6,47].

Şekil 7.71'de incelenen dökme demirlerde bağıl aşınma direnci-sertlik ilişkisi görülmektedir. Şekil 7.71'den döküm halindeki dökme demirlerin en düşük sertlik değerlerine sahip oldukları, uygulanan ısıtım işlemlerin sertlik değerlerini yükselttiği açıkça görülmektedir. Fakat beyaz dökme demirlere uygulanan ısıtım işlemleri aşınma direnci üzerine farklı etkiler göstermektedirler. 1050°C'da ostenitleme ve havada su verme işlemi aşınma direncini arttırmaktadır. En yüksek aşınma direnci % 0,376 Ti içeren ve 1050°C'dan havada su verilen 62 Rc sertliğindeki dökme demirden elde edilmiştir. Döküm yapısındaki 1 nolu dökme demire göre aşınma direnci % 35 düzeyinde artmıştır. Ti içeren ve 1050°C'da havada soğutulup 250°C'da temperlenen dökme demirler, aynı ısıtım işlemi uygulanan farklı bileşimdeki dökme demirlere nazaran daha yüksek aşınma direncine sahiptir. İncelenen dökme demirlerde en yüksek sertlik değerleri 1000°C'dan su verme sonucunda elde edilmiş olup bu malzemelerde aşınma direnci artışı en fazla % 10 düzeyindedir. 1000°C'da ostenitlemeden sonra havada su vermeyi müteakip 250°C'da temperleme ısıtım işlemi ise sertliği ve aşınma direncini azaltmaktadır.

Sonuç olarak; incelenen dökme demirlerde en yüksek sertlik değerlerini veren ısıtım işlemi 1000°C'da ostenitlemeden sonra havada su verme olmasına rağmen, en yüksek aşınma direncini veren ısıtım işlemi 1050°C'da ostenitlemeden sonra havada su vermedir.



Şekil 7.71. Deneylerde kullanılan bütün beyaz dökme demirlerin bağıl aşınma direnci-sertlik ilişkisi.
(a) 60 no zımpara için
(b) 120 no zımpara için

7.4 Genel Değerlendirme

Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar ısıtma işlemi-aşınma direnci, ısıtma işlemi-sertlik, mikroyapı-ısıtma işlemi, bileşim-aşınma direnci ve sertlik-aşınma direnci ilişkisi maddeleri halinde aşağıda değerlendirilmiştir.

Isıtma işlemi-aşınma direnci ilişkisi: Beyaz dökme demirlere uygulanan ısıtma işlemleri aşınma direnci üzerine farklı etkiler göstermektedirler; 1050°C'da ısıtma işlemi ve havada su verme işlemi aşınma direncini arttırırken, 1000°C'da ısıtma işleminden sonra havada su vermeyi müteakip 250°C'da temperleme ısıtma işlemi ise aşınma direncini genellikle azaltmaktadır. 1000°C'da ısıtma işlemi ve havada su verme işlemi ise aşınma direncinde döküm haline göre fazla bir değişiklik yapmamaktadır. 1050°C'dan su verilip 250°C'da temperlenen Ti'lu dökme demirlerde aşınma direncinde döküm haline göre bir miktar artış olmaktadır. Ancak bu ısıtma işleminin Nb ve V içeren dökme demirlerin aşınma direnci üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir.

Isıtma işlemi-sertlik ilişkisi: En yüksek sertlik değerlerini veren ısıtma işlemi 1000°C'da ısıtma işleminden sonra havada su vermedir. 1050°C'dan su verilen dökme demirler ise 1000°C'dan su verilenlere nazaran daha düşük sertliğe sahiptir. Gerek 1000°C ve gerekse 1050°C'dan su verilen dökme demirlerin 250°C'da temperlenmesiyle sertliklerinde düşme olmaktadır.

Mikroyapı-ısıtma işlemi ilişkisi: Döküm halindeki beyaz dökme demirlere uygulanan ısıtma işlemleri mikroyapıyı ve matris ve karbürlerin bileşimini değiştirmektedir. ısıtma işlemi ve havada su verme işlemiyle ve ısıtma işlemi sıcaklığının artışıyla döküm yapısına göre matriste çözünen Cr miktarı azalmaktadır. ısıtma işlemi sıcaklığı arttıkça özellikle Ti içeren beyaz dökme demir grubunda mikroyapıda bulunan kromca zengin birincil karbürlerin oranında bir artış olmaktadır. Ayrıca Nb içeren dökme demirlerde niyobyumca zengin ikincil karbürler, Ti içeren dökme demirlerde titanyumca zengin ikincil karbürler gözlenirken; V içeren dökme demirlerde vanadyum, kendi karbürü olarak çökmek yerine diğer metallerin oluşturduğu karbürlerin içinde yer aldığı için vanadyumca zengin karbürler gözlenmemektedir.

Bileşim-aşınma direnci ilişkisi: Döküm yapısında Nb, Ti ve V'un dökme demirlerin aşınma direncine belirgin bir etkisi görülmemiştir. İncelenen dökme demirler içinde en yüksek aşınma direnci %0,376 Ti içeren dökme demirde 1050°C'dan su verme sonucunda elde edilmiştir. Beyaz dökme demirlerin 1050°C'da ostenitlenip havada su verilmesiyle Nb ve V miktarının artışıyla aşınma direncinde belirgin bir değişim görülmezken, Ti miktarının artışıyla aşınma dirençleri artmaktadır. 1050°C'da ostenitlenip havada su vermeyi müteakip yapılan temperleme işlemi durumunda ise, artan Nb ve V ile aşınma direncinin azaldığı, artan Ti miktarı ile aşınma direncinin arttığı görülmektedir. Artan Ti ile aşınma direncindeki artışın, oluşan titanyumca zengin karbürlerin ve kromca zengin birincil karbürlerin artışından ve bunların masif yapısından kaynaklandığı söylenebilir.

Sertlik-aşınma direnci ilişkisi: İncelenen dökme demirlerde en yüksek sertlik değerlerini veren ısıtma işlemi 1000°C'da ostenitlemeden sonra havada su verme olmasına rağmen, en yüksek aşınma direncini veren ısıtma işlemi 1050°C'da ostenitlemeden sonra havada su vermedir. Sertliği en yüksek olan dökme demirler en yüksek aşınma direncine sahip değildirler. Buradan, incelenen dökme demirler için sertliğin birinci derecede önemli bir parametre olmadığı ortaya çıkmaktadır. Yani beyaz dökme demirlerin aşınma direnci üzerinde sertliğin yanısıra tokluğun da etkili olabileceği söylenebilir.

İncelenen beyaz dökme demirler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 7.21'de toplu olarak görülmektedir.

Tablo 7.21. İncelenen beyaz dökme demirler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen toplu sonuçlar.

Num. No	% Alaşım Elementi	Isıl İşlem Durumu	Mikroyapı	Sertlik (Rc)	Bağıl Aşınma Direnci	
					Zımpara No:60	Zımpara No:120
1	-	Döküm Hali	Fe-Cr ferrit katı eriyik matris içinde Cr' ca zengin birincil karbürler Mo' ce zengin ikincil karbürler, 3 no lu numunede Nb' ca zengin ikincil karbürler	46	1,00	1,00
2	0.24 Nb			48	1,01	0,98
3	0.74 Nb			47	1,03	0,99
4	0.096 Nb			55	1,10	1,21
5	0.253 Ti			55	0,99	1,16
6	0.376 Ti			56	0,93	1,14
7	0.14 V			49	0,94	1,12
8	0.53 V			52	0,95	0,97
9	0.72 V			50	1,05	1,11
11	-	1000°C' da Östenitleme *	Martensitik matris içinde Cr' ca zengin birincil karbürler, Mo' ce zengin ikincil karbürler; 21 ve 31 nolu numunelerde Nb' ca zengin ikincil karbürler, 41, 51, 61 nolu numunelerde Ti' ca zengin ikincil karbürler	64	1,00	1,03
21	0.24 Nb			65	1,07	1,07
31	0.74 Nb			66	1,06	1,02
41	0.096 Ti			65	0,97	1,09
51	0.253 Ti			65	0,96	0,98
61	0.376 Ti			64	0,99	1,26
71	0.14 V			64	1,11	1,01
81	0.53 V			67	1,04	1,05
91	0.72 V			65	1,02	0,92
12	-	1000°C' da Östenitleme * + 250°C' da temperleme	Temperlenmiş martensitik matris içinde Cr ' ca zengin birincil karbürler, Mo' ce zengin ikincil karbürler, 22 ve 32 nolu numunelerde Nb' ca zengin ikincil karbürler, 42, 52, 62 nolu numunelerde Ti' ca zengin ikincil karbürler	61	0,95	0,84
22	0.24 Nb			60	0,82	0,86
32	0.74 Nb			61	0,60	0,56
42	0.096 Ti			60	0,77	0,95
52	0.253 Ti			62	0,92	0,96
62	0.376 Ti			64	0,90	0,88
72	0.14 V			59	0,75	0,70
82	0.53 V			62	0,89	0,79
92	0.72 V			58	0,51	0,60

Num. No	% Alaşım Elementi	Isıl İşlem Durumu	Mikroyapı	Sertlik (Rc)	Bağıl Aşınma Direnci	
					Zımpara No:60	Zımpara No:120
13	-	1050°C da Ostenitlenme *	Martensitik matris içinde Cr' ca zengin birincil karbürler, Nb' ca zengin ikincil karbürler, 23 ve 33 nolu numunelerde Nb' ca zengin ikincil karbürler, 43, 53, 63 nolu numunelerde Ti' ca zengin ikincil karbürler	60	1,05	1,18
23	0.24 Nb			59	0,93	0,89
33	0.74 Nb			58	1,17	1,07
43	0.096 Ti			63	1,24	1,29
53	0.253 Ti			62	1,15	1,26
63	0.376 Ti			62	1,35	1,31
73	0.14 V			60	1,17	1,06
83	0.53 V			65	1,10	1,04
93	0.72 V			64	1,15	1,18
14	-	1050 °C da Ostenitlenme* + 250 °C de temperleme	Matris: Temperlenmiş martensit, Cr' ca zengin birincil karbürler, Mo' ce zengin ikincil karbürler, 24 ve 34 nolu numunelerde Mo' ce zengin ikincil karbürler, 44, 54, 64 nolu numunelerde Ti' ca zengin ikincil karbürler; Ti arttıkça ikincil karbür miktarı artmakta	56	1,00	1,06
24	0.24 Nb			58	1,09	0,99
34	0.74 Nb			58	0,84	0,85
44	0.09 Ti			60	0,98	1,21
54	0.253 Ti			59	1,25	1,10
64	0.376 Ti			60	1,34	1,19
74	0.14 V			58	1,03	0,99
84	0.53 V			60	0,79	0,95
94	0.72 V			58	0,76	0,94

* Ostenitlemeden sonra tüm malzemelere havada su verilmiştir

8. SONUÇLAR

1. Döküm halindeki malzemelere ostenitleme ve havada su verme işlemi uygulanmasıyla matristeki Cr miktarı azalmaktadır. Ostenitleme sıcaklığının 1000°C 'dan 1050°C 'a çıkmasıyla matristeki Cr miktarı azalmaktadır.
2. Ostenitleme ve havada su verme işlemi sonrasında matris, Fe-Cr ferrit katı eriyiğinden martensite dönüşmektedir.
3. Havada su verilmiş malzemeleri temperlemekle matristeki Cr miktarında artma görülmektedir.
4. Nb içeren numunelerde niyobyumca zengin karbürlere ve Ti içeren numunelerde titanyumca zengin karbürlere rastlanırken, V içeren numunelerde vanadyumca zengin karbürlere rastlanmamıştır.
5. Titanyumlu malzeme grubu 1050°C 'da ostenitlenip havada su verildiğinde kromca zengin birincil karbürler daha masif yapıda oluşmuşlardır.
6. Döküm halinde, Ti ve V arttıkça sertlik artmakta, Nb artışıyla sertlikte belirgin bir artış görülmemektedir.
7. Malzemelere ostenitleme ve havada su verme işlemi uygulanmasıyla sertlikleri artmaktadır. Sertlik değerlerinde en fazla artış 1000°C 'da ostenitleme ile elde edilmektedir.
8. Temperleme ile sertlik değerleri düşmektedir.
9. 1050°C 'da ostenitlenip su verilen malzemelerin sertlik değerleri 1000°C 'da ostenitlenenlere göre daha düşüktür.

10. En yüksek sertlik değerlerini veren ısıtıl işlem 1000°C’da ostenitlemeyi müteakip havada su verme, en düşük sertlik değerlerini veren ısıtıl işlem ise 1050°C’da ostenitlemeyi müteakip havada su verme işleminden sonra 250°C’da temperleme işlemidir.

11. 60 no ve 120 no Al₂O₃ esaslı zımparalarla yapılan aşınma deneylerinden elde edilen aşınma kaybı değerleri birbirine paralel sonuçlar vermiştir fakat 120 no zımpara 60 no zımparaya göre daha ince taneli olduğu için 120 no zımpara ile yapılan aşınma deneylerinden elde edilen aşınma kaybı değerleri daha düşüktür.

12. En yüksek sertlik değerlerini veren ısıtıl işlem 1000°C’den havada su verme olmasına rağmen, oluşan mikroyapısal değişimlerden dolayı en yüksek aşınma direncini veren ısıtıl işlem 1050°C’da ostenitlemeden sonra havada su vermedir.

13. Havada su vermeden sonra temperleme işlemi malzemelerin sertliklerinde düşüşe sebep olduğu gibi aşınma dirençlerinde de düşüşe yol açmaktadır. Aşınma direncindeki bu düşüş 1000°C’den su verilmiş malzemeleri 250°C’da temperlemekle maksimum seviyeye ulaşmaktadır. En düşük aşınma direncinin elde edildiği ısıtıl işlem her üç malzeme grubu için de 1000°C’den su vermeden sonra 250°C’da temperlemedir.

14. İncelenen alaşım elementleri içinde sadece artan Ti miktarı ile 1050°C’den havada su verme sonucunda çökelen titanyumca zengin karbürlerin artmasından dolayı aşınma direnci artmaktadır. Her ısıtıl işlem durumu için en az aşınmaya uğrayan malzeme grubunun Ti içeren malzeme grubu olduğu tespit edilmiştir.

Ticari olarak yaygın bir şekilde kullanılan 15Cr-3Mo’li beyaz dökme demir malzemelere %0,3-0,4 oranında Ti ilavesi malzemenin toplam maliyetini yaklaşık %10 arttırmasına rağmen, bu malzemeye uygun ısıtıl işlem yapmak suretiyle aşınma direncinde yaklaşık %30-35’lik bir artış sağlanmaktadır.

- [15] **Shadrov, N.S., Korshunor, L.G., Cheremryhk, V.P.**, 1983. Influence of molybdenum, vanadium and niobium on the abrasion resistance of high chromium cast iron, *Met.Sci., Heat Treat (USSR)*, **25**, 286-287.
- [16] **Alton, C.F., Opar, T.J.**, 1981. Alloy white irons for abrasion resistance, *Iron Casting Handbook*, 399-460.
- [17] *Metals Handbook*, 1985. 9th Ed., **9**, Metallography and Microstructure, ASM.
- [18] **Kinzel, A.B., Crafts, W.**, 1937. *The Alloys of Iron and Chromium*, **1**, McGraw-Hill Book Company, Inc.
- [19] **Fusheng, H., Chaochang, W.**, 1989. Modifying high Cr-Mo cast iron with boron and rare earth-Si alloy, *Materials Science and Technology*.
- [20] **Dodd, J., Gouin, C.E.**, 1974. Making abrasion resistant irons, *Foundry Management Technology*, **102**, 102-105.
- [21] **Rozhkova, E.V., Romanov, O.M.**, 1984. Optimizing the compositions of wear-resistant chromium cast irons, *Met.Sci. Heat Treat. (USSR)*, **26**, 769-775.
- [22] **Naiheng, M., Qichang, R., Qingde, Z.**, 1989. Corrosion abrasion wear resistance of 28% Cr white cast iron containing boron, *Wear*, **132**.
- [23] **Yan, P., Zhou, Q.**, 1987. *Proc. Int. Conf. on Wear of Materials*, American Society of Mechanical Engineers, in K.C. Ludema, New York, 743-752.
- [24] **Ma, N., Rao, Q., Zhou, Q.**, 1990. Effect of boron on the structures and properties of 28% Cr white cast iron, *AFS Transactions*, , **90-18**, 775-781.
- [25] **Guesser-Wilson, L.**, 1985. *Foundry Mater. Technol.*, 50-52.
- [26] **Chen, H., Chang, Z., Lu, J., Lin, H.**, 1993. Effect of niobium on wear resistance of 15% Cr white cast iron, *Wear*, **166**, 197-201.
- [27] **Sawamoto, A., Ögi, K., Matsuda, K.**, 1986. Solidification structures of Fe-C-Cr-(V-Nb-W) alloys, *AFS Transactions*, **86-72**, 403-416.
- [28] **Radulovic, M., Fiset, M., Peev, K.**, 1994. Effect of rare earth elements on microstructure and properties of high chromium white iron, *Materials Science and Technology*, **10**, 1057-1062.
- [29] **Laird II, G., Nielsen, R.L., Macmillan, N.H.**, 1991. On the nature of eutectic carbides in Cr-Ni white cast irons, *Metallurgical Transactions*, **22-A**.
- [30] **Laird II, G., Brown, R.R., Nielsen, R.L.**, 1991. Factors effecting eutectic solidification of Cr-Ni (Si-Mn) white cast irons, *Materials Science And Technology*.

- [31] **Jackson, R.S.**, 1970. The austenite liquidus surface and constitutional diagram for the Fe-Cr-C metastable system, *Journal of the Iron and Steel Institute*.
- [32] **Kuo, K.**, 1953. Carbides in chromium, molybdenum and tungsten steels, *Journal of the Iron and Steel Institute*, 173.
- [33] **Powell, G.L.F., Laird II, G.**, 1992. Structure, nucleation, growth and morphology of secondary carbides in high chromium and Cr-Ni white cast irons, *Journal of Materials Science*, 27, 29-35.
- [34] **Randle, V., Laird II, G.**, 1993. A microtexture study of eutectic carbides in white cast irons using electron back-scatter diffraction, *Journal of Materials Science*, 28.
- [35] **Bain, E.C., Paxton, H.W.**, 1966. Alloying elements in steel, ASM.
- [36] **Mataray, F., Usseglio Nanot, R.**, 1970. Factors effecting the structure of chromium-molybdenum white irons, Climax Molybdenum Publication.
- [37] **Pearce, J.T.H.**, 1984. Structure and wear performance of abrasion resistant chromium white cast irons, *AFS Transactions*, 84-126, 599-622.
- [38] **Sare, I.R., Arnold, B.K.**, 1995. The influence of heat treatment on the high-stress abrasion resistance and fracture toughness of alloy white cast irons, *Metallurgical And Materials Transactions A.*, 26A, 1785-1793.
- [39] DIN 50320, 1979. Verschleiss.
- [40] ASTM Standarts, G 40-93, 163
- [41] **Colangelo, V.J., Heiser F.A.**, 1974. *Analysis of Metallurgical Failures*, John Wiley and Sons, NewYork.
- [42] *Metals Handbook*, 1975. 8th Ed., 10, Failure Analysis and Prevention, ASM.
- [43] *Metals Handbook*, 1986. 9th Ed., 11, Failure Analysis and Prevention, ASM.
- [44] **Kayalı, E.S., Çimenoglu, H.**, 1990. *Hasar Analizi Semineri*, TMMOB, Met.Müh.Odası, İstanbul.
- [45] **Gürleyik, M.**, 1986. Makine mühendisliğinde aşınma olayları, *Makine ve Mühendis*, 27, 3-14.
- [46] **Yurderi, F.**, 1982. Aşınmaya dayanıklı malzemelerin aşınma özelliklerine metalurjik ve diğer faktörlerin etkileri, *MMLS Tezi*, İTÜ Kimya-Metalurji Fak, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa M. ARIKAN 1966 yılında Bursa’da doğmuştur. Lise eğitimini 1983 yılında İzmit Endüstri Meslek Lisesi Elektronik Bölümünde tamamladıktan sonra aynı yıl Yıldız Üniversitesi Kocaeli Meslek Yüksek Okulu Elektronik Bölümünü kazanarak bu okula bir yıl devam etmiş, 1984 yılında ise İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümünü kazanmış, 1988 yılında da mezun olmuştur. 1991 yılında ise İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programında yüksek lisans eğitimini tamamlayarak yine aynı yıl aynı programda doktora eğitimine başlamıştır.

1990-1996 yılları arasında İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak, 1996-1998 yılları arasında ise Al-Mak Alüminyum ve Makine San. Ltd. Şirketinde Döküm Koordinatörü olarak çalışmıştır. Halihazırda serbest çalışmaktadır.