

39492.

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALAŞIMLI BEYAZ DÖKME DEMİRLERİN MİKROYAPI ANALİZİ VE
AŞINMA ÖZELLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji Müh. Özgür AKDEMİR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 HAZİRAN 1994

Tezin Savunulduğu Tarih : 30 HAZİRAN 1994

Tez Danışmanı : Prof.Dr.E.Sabri KAYALI

Diğer Jüri Üyeleri : Doç.Dr.Hüseyin ÇİMENÖĞLU

: Doç.Dr.Erdem DEMİRKESEN

HAZİRAN 1994

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans tezimin hazırlanmasının her aşamasında düşünce ve önerileri ile bana yol gösteren değerli hocam Sayın Prof.Dr. Eyüp Sabri KAYALI'ya en derin teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin hazırlanmasında benimle yakından ilgilenip yardımlarını esirgemeyen Doç.Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU'na teşekkür ederim.

Bana her zaman yardımcı olan Sayın Yrd.Doç.Dr.Kelami ŞEŞEN'e, Arş.Gör.Senih DİNÇ, Arş.Gör.Mustafa ARIKAN, Arş. Gör.Nazım NARÇIN, Arş.Gör.Kürşat KAZMANLI'ya ayrıca Teknisyen Sayın Osman ALMA'ya teşekkür ederim.

Dönem arkadaşlarım Sayın Met.Müh.Ümit Yaşar BAŞARA ve Met.Müh.Gürhan TOPGÖL'e teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca deney numunelerini sağlayan Akman Döküm Sanayi ve Sayın Nevzat İNAL'a, numunelerin analizinde yardımcı olan Haliç Tersanesi ve Sayın Süreyya SÖZİPEK ile Numunelerin SEM fotoğraflarını çekip mikro analizini yapan Sayın Met.Yük.Müh. A.Soner AKKURT ve Arçelik 'e ve bize her zaman destek olan TÜBİTAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bana her zaman destek olan aileme şükranlarımı sunarım.

HAZİRAN, 1994

Müh.Özgür AKDEMİR

İ Ç İ N D E K İ L E R

ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
BÖLÜM 1. GİRİŞ VE AMAÇ.....	1
BÖLÜM 2. YÜKSEK KROM-MOLİBDEN İÇEREN BEYAZ DÖKME DEMİRLER.....	3
2.1. Özellikler.....	3
2.2. Yüksek Krom-Molibdenli Beyaz Dökme Demirlerin Uygulama Alanları.....	6
BÖLÜM 3. YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERDE MİKROYAPI BİLEŞENLERİ.....	9
3.1. Karbürler.....	11
3.2. Matris.....	13
3.3. Alaşım Elementlerinin Etkisi.....	15
BÖLÜM 4. YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERDE KATILAŞMA VE ISIL İŞLEM.....	20
4.1. Ergitme ve Döküm.....	20
4.2. Fe-C-Cr Sistemi.....	22
4.3. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Katılaşma Yapısı.....	27
4.4. M_7C_3 Karbürlerinin Özellikleri.....	28
4.5. Fe-C-Cr Alaşımının Döküm Matris Yapısı.....	29
4.5.1. Fe-C-Cr Alaşımının Katı Hal Reaksiyonları.....	30
4.5.2. Sekonder M_7C_3 Karbürlerinin Oluşumu...	31
4.6. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Isıl İşlemi.....	32
4.6.1. Su Verme Sıcaklığı.....	34
4.6.2. Martensit dönüşümü.....	37
4.6.3. Tavlama ve Temperleme.....	37

BÖLÜM 5. AŞINMA VE ÖLÇÜMÜ.....	40
5.1. Aşınmanın Tanımı	40
5.2. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri....	41
5.2.1. Ağırlık Farkı Metodu.....	42
5.2.2. Kalınlık Farkı Metodu.....	45
5.2.3. İz Değişimi Metodu.....	46
5.2.4. Radyoizotop Metodu.....	46
5.3. Aşınma Mekanizmaları ve Aşınmayı Etkileyen Faktörler.....	46
5.3.1. Aşınma Mekanizmaları.....	46
5.3.1.1. Adhesiv Aşınma.....	47
5.3.1.2. Abrasiv Aşınma.....	48
5.3.1.3. Tribooksidasyon Aşınması.....	53
5.3.1.4. Yorulma Aşınması.....	53
5.4. Aşınmayı Etkileyen Faktörler.....	54
5.5. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Aşınma Direnci.....	55
5.6. Yüksek Krom-Molibdeni Beyaz Dökme Demirlerde Abrasiv Aşınmayı Etkileyen Faktörler.....	57
5.6.1. Karbür Yapısının Abrasiv Aşınmaya Etkisi.....	57
5.6.2. Matris Yapısının Abrasiv Aşınmaya Etkisi.....	57
BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	59
6.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....	60
6.2. Isıl İşlemler.....	60
6.3. Metalografik Çalışmalar ve Sertlik Deneyleri.....	62
6.4. Aşınma Deneyleri.....	62
BÖLÜM 7. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ.....	64
7.1. Metalografik İnceleme ve Sertlik Deneyi Sonuçları.....	64
7.2. Aşınma Deneyi Sonuçları ve İrdeleme.....	90
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	104
KAYNAKLAR.....	106
ÖZGEÇMİŞ.....	109

ÖZET

Bu çalışmada çeşitli ısıtma işlem koşullarının beyaz dökme demirlerin mikroyapısı, sertliği ve abrasiv aşınma özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Bu amaçla beyaz dökme demirler 940°C ile 1100°C arasında değişen sıcaklıklarda ostenitleme işlemine tabi tutulup çeşitli ortamlarda soğutulmuştur. Ayrıca Cr/C oranı 4.24 olan beyaz dökme demirler 1000°C de 4 saat ostenitlenip havada su verildikten sonra 200°C ile 500°C sıcaklıklar arasında temperlenmiştir.

Isıl işlem uygulanan beyaz dökme demirlerde sertliğin artan ostenitleme sıcaklığı ile azaldığı , artan ostenitleme süresi ile de arttığı belirlenmiştir. Beklenildiği gibi temperleme ile sertlik azalmaktadır.

Aşınma deneyleri yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirler ile Ni-Hard IV alaşımına uygulanmıştır.

Aşınma deneyleri sonucunda Cr/C oranı 5.4 olan beyaz dökme demirin en iyi aşınma direncine sahip olduğu saptanmıştır. Cr/C oranı 4.24 olan beyaz dökme demirlerde uygulanan ısıtma işlemleri sertliği artırmaya rağmen aşınma direncini düşürmüştür. Söz konusu malzeme grubunda sertliği daha düşük olmasına rağmen döküm yapısındaki beyaz dökme demirin en iyi aşınma direncine sahip olduğu belirlenmiştir.

Sertliği düşük olan Ni-Hard IV alaşımının (42Rc) aşınma direncinin de beklenildiği gibi yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerden daha düşük olduğu saptanmıştır.

MICROSTRUCTURE ANALYSIS AND WEAR PROPERTIES OF ALLOYED WHITE CAST IRONS

SUMMARY

Cast irons, like steels, are basically alloys of iron and carbon. In relation to the iron-iron carbide diagram, cast irons contain a greater amount of carbon than that necessary to saturate austenite at the eutectic temperature. Therefore cast irons contain between 2 and 6.67 percent carbon. Since high carbon content tends to make the cast iron very brittle, most commercially manufactured types are in the range of 2.5 to 4 percent carbon.

The best method of classifying cast iron is according to metallographic structure. There are four variables to be considered which lead to the different types of cast iron, namely the carbon content the alloy and impurity content, the cooling rate during and after freezing and the heat treatment after casting. These variables control the condition of the carbon and also its physical form. The carbon may be combined as iron carbide in cementite, or it may exist as free carbon in graphite. The shape and distribution of the free carbon particles will greatly influence the physical properties of the cast iron. The types of cast irons are as follows:

White cast irons in which all the carbon is in the combined form as cementite.

Malleable cast irons in which most or all of the carbon is uncombined in the form of irregular round particles known as temper carbon. This is obtained by heat treatment of white cast iron.

Gray cast irons, in which most or all of the carbon is uncombined in the form of graphite flakes.

Chilled cast irons in which a white cast-iron layer at the surface is combined with a gray iron interior.

Modular cast irons in which, by special alloy additions, the carbon is largely combined in the form of compact spheroids. This structure differs from malleable iron in that it is obtained directly from solidification and the round carbon particles are more regular in shape.

Alloy cast irons, in which the properties or the structure at any of the above types are modified by the addition of alloying elements.

The high alloy white cast irons are primarily used for abrasion resistant applications such as slurry pumps, classifier wear shoes, 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, pulverizer, rolls, 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.

Generally, in metallic materials, wear resistance is proportional to hardness. However while the hardness increases, the ductility and the toughness decrease. The hardness of a material is related to the presence of carbides and/or hard matrix phase in the microstructure. Since white cast irons contain carbides in a hard matrix, they have superior bulk hardness and wear resistance. Therefore they are suitable for wear related applications.

High alloy white cast irons are most often melted in electric furnaces, specifically electric arc furnaces, and induction furnaces in which the precise control of composition and temperature can be achieved.

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 this reason they are finding increasing use in many fields of applications.

All high alloy white irons contain chromium to prevent the formation of graphite upon solidification and to ensure stability of the carbide phases. Most also contain nickel, molybdenum, copper or combinations of these alloying-elements to prevent the formation of pearlite in the microstructure.

The large volume fraction of primary and eutectic carbides in the microstructure provides the high hardness needed for crushing and grinding other materials. The metallic matrix supporting the carbide phase in these irons can be adjusted by alloy content and heat treatment to develop the proper balance between the resistance to abrasion and the toughness needed to withstand repeated impact.

The high alloy white cast irons fall into two major groups;

1- Nickel-Chromium white cast irons which are two-chromium alloys containing 3 to 5 % Ni and 1 to 4 % Cr with one alloy modification that contains 7 to 11 % Cr.

2- * The chromium-molybdenum white irons containing 11 to 23 % Cr up to 3 % Mo and often additionally alloyed with nickel or copper.

* This group comprises the 25 % or 28 % Cr white irons, which may contain other alloying conditions of molybdenum and/or nickel up to 1,5 %.

Surface deterioration is important in engineering practice. It is often the major factor limiting the life and the performance of machine components. Wear may be defined as unintentional deterioration resulting from use or environment. It may be considered essentially a surface phenomenon. The displacement and detachment of metallic particles from a metallic surface may be

caused by contact with another metal (adhesive or metallic wear), a metallic or a non-metallic abrasive (abrasion) or moving liquids or gases(erosion).

Wear is affected by a variety of conditions, such as the type of lubrication loading, speed, temperature materials, surface finish, hardness, composition and compability of the mating parts involved.

Wear involving a single type is rare and in most cases both abrasive and adhesive wear occur.

In adhesive wear tiny projections produce friction by mechanical interference with the relative motion of contacting surfaces increasing resistance to further movement.

Abrasive wear occurs when hard particles slide or roll under pressure accross a surface, or when a hard surface rubs accross another surface.

The wear resistance of a material is generally calculated by measuring the weight loss due to wear. Other methods are thickness loss, size change of impression.

In this study, the effects of heat treatment on the microstructure, hardness and abrasive wear resistance of Cr-Mo cast irons were investigated. In addition commercial Ni-Hard IV alloy also been used. The chemical compositions of the materials used in this study are given in Table 1.

Heat treatments applied to white cast irons were as; quenching in various medium after austenitizing between 940°C - 1100°C for 20 minutes and 4 hours after quenching the white cast irons with Cr/C ratio of 4.24 were tempered between 200°C and 500°C the effect of austenitizing temperature and time Cr/C ratio of the white cast irons were investigated, by microstructural analysis and hardness measurements (Table 2). Optical microscopy and scanning electron microscopy were utilized for microstructural analysis. Hardness of the materials measured with Rc hardness tester and micro hardness tester.

TABLE: 1. The Chemical Compositions of the Materials
Used in the Experiments

Sample No	Hardness, Rc	Chemical Composition, %										Cr/C
		C	Mo	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	Cu	V	
1	64	3.43	2.91	14.87	0.46	0.53	0.50	0.03	0.02	0.15		4.33
2	66	3.34	2.89	14.85	0.47	0.53	0.49	0.29	0.03	0.15		4.46
3	68	3.21	2.74	14.36	0.44	0.51	0.47	0.02	0.02	0.15		4.47
4	62	3.40	2.89	14.76	0.47	0.54	0.50	0.03	0.02	0.15		4.34
5	65	3.22	2.80	14.37	0.45	0.51	0.46	0.03	0.02	0.16		4.46
6	61	3.23	2.62	14.72	0.43	0.57	0.50	0.02	0.02	0.14		4.56
7	63	3.12	2.85	14.91	0.46	0.49	0.54	0.03	0.03	0.16		4.78
8	63	2.82	2.73	14.28	0.45	0.52	0.48	0.02	0.03	0.16		5.09
9	63	3.04	2.80	14.42	0.44	0.51	0.48	0.02	0.03	0.16		4.74
10	62	3.04	2.81	14.76	0.46	0.50	0.54	0.04	0.02	0.16		4.85
11	60	3.56	2.78	15.11	0.50	0.88	0.59	0.02	0.02	0.15	0.10	4.24
12	60	3.56	2.78	15.11	0.50	0.88	0.59	0.02	0.02	0.15	0.10	4.24
13	60	3.56	2.78	15.11	0.50	0.88	0.59	0.02	0.02	0.15	0.10	4.24
14	60	3.56	2.78	15.11	0.50	0.88	0.59	0.02	0.02	0.15	0.10	4.24
15	60	3.56	2.78	15.11	0.50	0.88	0.59	0.02	0.02	0.15	0.10	4.24
16	60	3.56	2.78	15.11	0.50	0.88	0.59	0.02	0.02	0.15	0.10	4.24
17	60	3.56	2.78	15.11	0.50	0.88	0.59	0.02	0.02	0.15	0.10	4.24
18	60	3.56	2.78	15.11	0.50	0.88	0.59	0.02	0.02	0.15	0.10	4.24
19	60	3.56	2.78	15.11	0.50	0.88	0.59	0.02	0.02	0.15	0.10	4.24
20	60	3.56	2.78	15.11	0.50	0.88	0.59	0.02	0.02	0.15	0.10	4.24
21	60	3.56	2.78	15.11	0.50	0.88	0.59	0.02	0.02	0.15	0.10	4.24
22	60	3.56	2.78	15.11	0.50	0.88	0.59	0.02	0.02	0.15	0.10	4.24
23	60	3.56	2.78	15.11	0.50	0.88	0.59	0.02	0.02	0.15	0.10	4.24
24	60	3.56	2.78	15.11	0.50	0.88	0.59	0.02	0.02	0.15	0.10	4.24
25	60	3.56	2.78	15.11	0.50	0.88	0.59	0.02	0.02	0.15	0.10	4.24
26	64	3.38	2.28	18.50	0.38	0.75	0.61	0.02	0.02	0.07	0.08	5.47
27	65	1.58	0.37	12.36	0.32	0.82	0.69	0.08	0.03	0.11	0.04	7.82
28	42	2.34	0.38	9.80	3.57	1.39	0.58	0.04	0.01	0.22	0.05	4.18

TABLE: 2. Heat Treatments Applied to White Cast Irons Were Investigated in Experiments.

Sample No	Material, Austenitizing Temperature and Time	Quenching Medium	Tempering Temperature and Time
1	15Cr3Mo/940 °C/20 min.	Fan	-
2	15Cr3Mo/940 °C/1 h	Fan	-
3	15Cr3Mo/940°C/20 min.	Fan	-
4	15Cr3Mo/1000°C/0.5 h	Fan	-
5	15Cr3Mo/1000°C/20 min	Fan	-
6	15Cr3Mo/1100 °C/2 h 1000°C/0.5 h	Fan	-
7	15Cr3Mo/1100 °C/2 h 1000°C/0.5 h	Fan	-
8	15Cr3Mo/1100 °C/2 h 1000°C/0.5 h	Fan	500 °C/6 h
9	15Cr3Mo/1100 °C/2 h 1000°C/0.5 h	Fan	500 °C/6 h
10	15Cr3Mo/1100 °C/2 h 1000°C/0.5 h	Fan	500 °C/6 h
11	15Cr3Mo/1000 °C/2 h	Air	-
12	15Cr3Mo/1000 °C/2 h	Water	-
13	15Cr3Mo/1000 °C/2 h	Furnace	-
14	15Cr3Mo/1000 °C/2 h	Oil	-
15	15Cr3Mo/1000 °C/3 h	Air	-
16	15Cr3Mo/1000 °C/3 h	Furnace	-
17	15Cr3Mo/1000 °C/4 h	Water	-
18	15Cr3Mo/1000 °C/4 h	Air	-
19	15Cr3Mo/1000 °C/4 h	Air	200°C/4 h
20	15Cr3Mo/1000 °C/4 h	Air	250°C/4 h
21	15Cr3Mo/1000 °C/4 h	Air	300°C/4 h
22	15Cr3Mo/1000 °C/4 h	Air	350°C/4 h
23	15Cr3Mo/1000 °C/4 h	Air	400°C/4 h
24	15Cr3Mo/1000 °C/4 h	Air	450°C/4 h
25	15Cr3Mo/As-Cast	-	-
26	18Cr3Mo/Import	-	-
27	12Cr White Cast Iron *	-	-
28	Ni-Hard IV	-	-

Abrasive wear tests were performed as-cast and heat treated white cast irons and as-cast Ni-Hard IV alloy. Wear resistance of these materials were performed by a two-body pin-on disc tester at room temperature. Wear specimens were slide on grinding wheels, under the compression stress of 1.62 MPa. Sliding distance was selected as 50m and 100m.

Hardness measurements performed on the heat treated white cast irons showed that the bulk hardness decreased with increasing austenitizing temperature, decreasing austenitizing time. The maximum hardness was obtained at austenitizing temperature of 940°C with the white cast iron which has Cr/C ratio of 4.50.

Among the investigated compositions, increasing of Cr/C ratio increased the bulk hardness of the white cast irons.

Cooling rate from austenitizing temperature has a severe effect on the microstructure. The carbide coarsening occurs as the cooling rate decreases. On the other hand, cracking susceptibility of the white cast irons increased with increasing cooling rate..

White cast irons having a Cr/C ratio of 5.40 have both high hardness and superior wear resistance. Heat treatments performed on white cast irons with a Cr/C ratio of 4.24 showed that wear resistance decreased while hardness increased. Thus the higher wear resistance was obtained in the as-cast structure which has the lowest hardness.

At a constant hardness level, lowest wear resistance was obtained from the white cast iron which has the low amount of carbides segregated along grain boundaries.

Commercial Ni-Hard IV alloy showed both the lower hardness and wear resistance compared to white cast irons due to the low matrix hardness.

BÖLÜM 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 makineleri, pistonlar ve dişlileri, çeşitli konyeörler, grayder bıçakları, çeşitli pompalar, pabuçlar, diskler, tuğla kalıpları, segmanlar ve barlar, madencilik ve mineral sanayii gibi yüksek abrasiv aşınma direnci gerektiren yerlerde kullanılmaktadır [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10].

Yukarıda sözü edilen alanlarda kullanılan malzemelerin aşınması maddi zararlara ve iş kayıplarına neden olmaktadır. Bu nedenle daha sert ve aşınmaya daha dirençli malzemelerin geliştirilmesi gerekliliği bulunmaktadır. Yüksek krom-molibdenli ve alaşımlı beyaz dökme demirler bu amaca en uygun malzeme gruplarından birisidir.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin yapısında yer alan krom korozyon direncini arttırır. Mikroyapıda yer alan geniş primer ve özellikle M_7C_3 tipi ötektik karbürler kırma, öğütme, işleme gibi alanlar için gerekli yüksek sertliği ve aşınma direncini verir [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 işlemi 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 yada bakır bulunur.

* Bileşimlerinde % 25-28 krom, max.% 1,5 nikel ve/veya molibden bulunur.

Bu çalışmada çeşitli ısıtıl işlemlerinin beyaz dökme demirlerin mikro yapısı, sertliği ve abrasiv aşınma özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Ayrıca ticari Ni-Hard IV alaşımının da abrasiv aşınma özellikleri incelenmiştir.

BÖLÜM 2. YÜKSEK KROM-MOLİBDEN İÇEREN BEYAZ DÖKME DEMİRLER

2.1. Özellikler

Yüksek oranda krom ve molibden içeren beyaz dökme demirler, mükemmel aşınma direnci ve tokluğa sahiptir. Genellikle bu grup dökme demirler çamur pompalarında, tuğla kalıplarında, çeşitli mineral delme, tesviye, işleme millerinde, sert kayaların işlenmesi için gerekli ekipmanlarda vb. alanlarda kullanılmaktadır [6,7]. Tablo 2.1'de aşınmaya dirençli yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin bileşimleri verilmektedir [7].

TABLO: 2.1. Aşınmaya Dirençli Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Bileşimleri [7]

Sınıf	Tip	Sembol	KİMYASAL BİLEŞİM, %					
			C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
I	A	Ni-Cr-HC	3.0-3.60	1.30 max	0.80 max	3.30-5.0	1.40-4.0	1.0 max (a)
I	B	Ni-Cr-LC	2.50-3.0	1.30 max	0.80 max	3.30-5.0	1.4-4.0	1.0 max (a)
I	C	Ni-Cr-GB	2.90-3.70	1.30 max	0.80 max	2.70-4.0	1.10-1.50	1.0 max (a)
I	D	Ni-HiCr	2.50-3.60	1.30 max	1.0-2.20	5.0-7.0	7.0-11.0	1.0 max (b)
II	A	%12Cr	2.80	0.50-1.50	1.0 max	11.0	14.0	0.50-1.0 (c)
II	B	%15Cr-Mo-LC	2.40-2.8	0.50-1.50	1.0 max	0.50 max	14.0-18.0	1.0-3.0 (c)
II	C	%15Cr-Mo-HC	2.80-3.60	0.50-1.50	1.0 max	0.50 max	14.0-18.0	2.30-3.50 (c)
II	D	%20Cr-Mo-LC	2.0-2.6	0.50-1.50	1.0 max	1.50 max	18.0-23.0	1.50 max (c)
II	E	%20Cr-Mo-HC	2.6-3.2	0.50-1.50	1.0 max	1.50 max	18.0-23.0	1.0-2.0 (c)
III	A	%25Cr	2.30-3.0	0.50-1.50	1.0 max	1.50 max	23.0-28.0	1.50 max (c)

(a)-Maksimum % 0.30 P, % 0.15 S, (b)- Maksimum % 0.10 P, % 0.15 S, (c)-Maksimum % 0.10 P, % 0.06 S, % 1.2 Cu

Tablo 2.2'de 25-32 mm kesitli yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerin için çeşitli mekanik özellikler verilmektedir.

TABLO: 2.2. 25-32 mm Kesitli Yüksek Krom-molibdenli Beyaz Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri [6].

Koşullar (Matris)	Sınıf	%C	SERTLİK			ÇEKME ÖZELLİKLER		BASMA ÖZELLİKLERİ		TERM. GEN. KATSAYISI	
			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 Veril Temper. (M, O)	15- 3LC	2.51	716	782	61.7	100	25.9	305	183	12.7	14.9
(M,O)	15- 3HC	3.68	712	813	62.8	48.5	23.2	317	122	-	-
	15-2-1	3.32	760	-	64.6	62.3	23.7	310	226	11.5	14.3
	20-2-1	2.89	757	824	63.8	68.5	22.6	286	187	11.1	13.6
O	15- 3LC	2.51	426	497	47.1	61.5	22.0	203	75	14.4	17.9
%66 (M+O), %34P	15- 3HC	3.60	-	-	-	50.8	23.4	164	68.9	-	-
%71 (M+O), %29P	15- 3HC	3.60	564	681	56.4	58	23.0	232	131	10.5	13.6
%96O,%4 P	15-2-1	3.32	444	508	46.3	45.6	22.5	183	70	13.4	17.6
M+O	20-2-1	2.89	451	530	-	54.5	23.8	197	83.4	-	-
Fırında Soğut. (P)	15- 3HC	3.60	411	455	41.8	69	24.3	158	48.2	11.1	13.6

Tablo 2.2'deki değerler çeşitli ısı ve mekanik işlemler sırasında oluşabilen çatlaklar nedeni ile geniş sapmalar gösterebilir. Bununla birlikte bu değerler pratikteki verilerle uygunluk sağlamaktadır.

Yüksek kromlu alaşımların tokluğu düşük kromlu alaşımlardan daha yüksektir. Tokluk özellikle kırma ve

Öğütme işlemlerinde kazaları önleyici bir faktör olduğundan çok önemlidir.

Çentikli ve çentiksiz numunelere yapılan darbe deneyleri ile yüksek krom ve molibdenli beyaz dökme demirlerin düşük krom ve molibdenli beyaz dökme demirlerden daha tok olduğunu gösteren bir dağılım ortaya çıkarmıştır. Örneğin 30 mm'lik çentikli izod deneyi çubukları az alaşımlı beyaz dökme demirde 42-58 joule darbe enerjisi verirken, yüksek alaşımlı demirde 52-87 joule darbe enerjisi verir. Karbon miktarı artışı darbe direncini düşürür [6].

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

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler sınıfları ASTM A 532'ye göre Tablo 2.1'de belirtilmiştir.

Krom molibdenli beyaz dökme demirler % 11-23'Cr ve max % 3.50 Mo içerir. Maksimum aşınma direnci için; ya ostenitik veya ostenitik-martensitik matris veya ısıtılıp martensitik yapı elde edilmelidir. Söz konusu beyaz dökme demir grubu dökme demirlerin en sert grubudur. Düşük alaşımlı nikel kromlu beyaz dökme demirlere göre, bu dökme demirlerin mikroyapısında bulunan ötektik karbürler (M_7C_3) daha serttir.

ASTM A 532 sınıf III. yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin en eski grubudur. Bu grup % 25 Cr ve/veya % 28 Cr'lu beyaz dökme demirler olarak adlandırılır. Ayrıca bileşimde % 1.50 Mo yer alır. Molibden perlit oluşumunu engellemek ve maksimum sertliğe ulaşmak için ilave edilmektedir. Bileşimde bakır ve nikel % 1'e kadar bulunabilir.

Sınıf II'de yüksek sertliğe ulaşamamasına rağmen korozyon direncinin istendiği durumlarda bu grup seçilir.

2.2. Yüksek Krom-Molibdenli 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 koşullara direnç gösteremez iken yüksek kromlu beyaz dökme demirler direnç göstermektedir. Bu tür uygulama için 15-3 HC sınıfı 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 koşullarında başarılı uygulamalar; çeşitli sahmerdanlar, 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 değirmenlerde kullanılmaktadır. Burada yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirler, ostenitik Mn çeliklerinin veya su verilip temperlenmiş az alaşımlı çeliklerin yerini bir çok 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, Pfifer değirmenlerinde ve basınçlı mühendislik değirmenlerinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

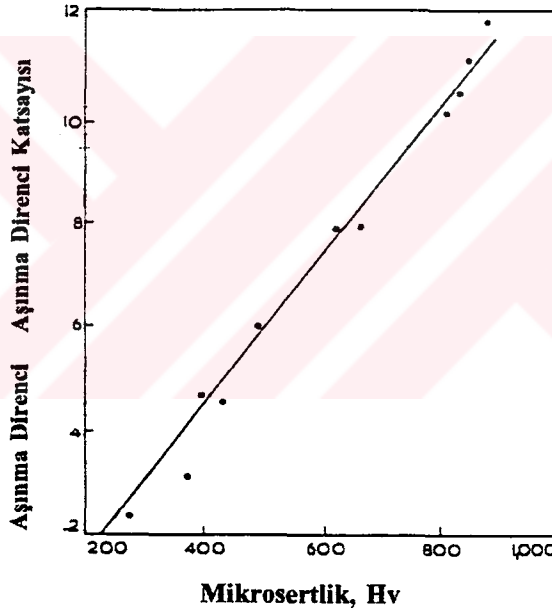
Aşınmaya dirençli pompa üretiminde yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirler artan ölçülerde kullanılmaktadır. Bu alanda yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlerin az alaşımlı beyaz dökme demirlere göre üstünlüğü sadece daha yüksek tokluk ve aşınma direncine sahip olmalarından değil aynı zamanda 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, hadde merdanelerinde, şekillendirme 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].



BÖLÜM 3. YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERDE MİKROYAPI BİLEŞENLERİ

Beyaz dökme demirlerin mükemmel aşınma direnci mikroyapılarının bir sonucudur. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi artan sertlikle aşınma direnci artmaktadır.



ŞEKİL: 3.1. Yüksek Krom-Molibdenli Beyaz Dökme Demirlerde Matris Sertliğinin Aşınma Direnci-Etkisi [6,7].

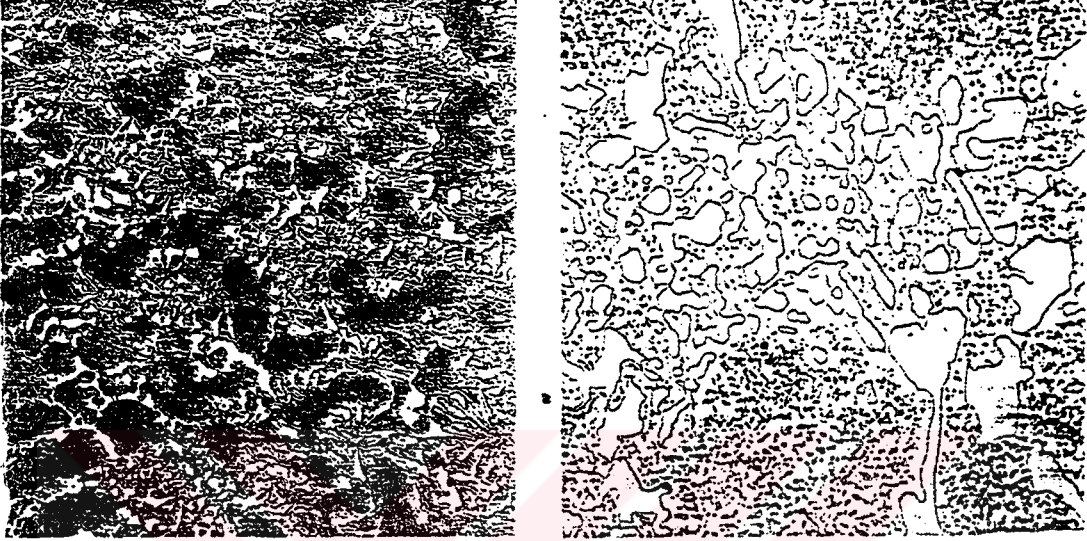
Aşınma prosesine mikroskopik olarak bakılırsa aşınma aşındırıcı tanelerden birinin metalin yüzeyine girmesi, deformasyon ve aşınma çizikleri oluşturması ve yüzeyden parçalar kopması nedeni ile gerçekleşir. Bu olay kesme veya ayırma gibi bir mekanik işlem prosesine benzerdir ve gerçekleşebilmesi için aşındırıcı partikülün metalden daha sert olması gerekir [6,7,11].

Tablo 3.1'de çeşitli mineral karbür ve matrislerin sertlikleri gösterilmektedir. Tablo 3.1'de göre kuarts demir esaslı alaşımların matris yapısından daha serttir ve bunları kolayca aşındırabilir. Bununla birlikte yüksek krom ve molibdenli beyaz dökme demirlerde öncelikle oluşan krom-karbür kuartzdan daha serttir ve sonuçta aşınmaya daha dayanıklıdır.

TABLO: 3.1. Çeşitli Mineral Karbür 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	950
Kuarts	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 (Alaşimsız)	-	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

Şekil 3.22'de % 20 Cr, % 2 Mo % 1.0 Ni ve % 2.7C içeren beyaz dökme demirin mikroyapısı görülmektedir.



ŞEKİL: 3.2. % 20 Cr, % 2 Mo, % 1 Ni, % 2.7 Cu içeren Beyaz Dökme Demirin Mikroyapısı [6]

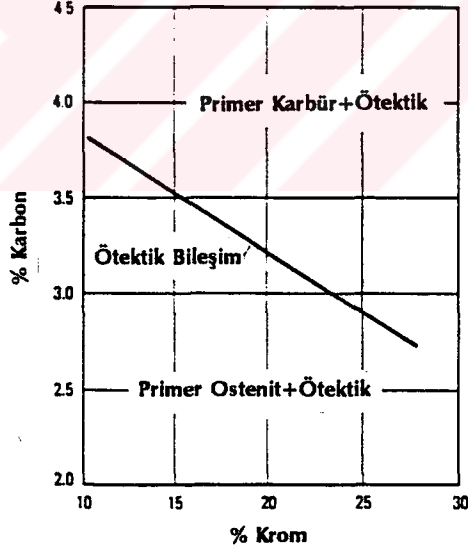
3.1. Karbürler

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 sekonder karbürler olmak üzere iki çeşit karbür bulunmaktadır. Karbürlerin bileşime göre sertlikleri Tablo 3.2'de görüldüğü gibi değişmektedir. M_7C_3 tipi karbürler en yüksek sertliğe sahiptir.

TABLO: 3.2. Yüksek Krom-Molibdenli Beyaz Dökme Demirlerde Mikroyapıda Bulunan Karbürlerin Sertlikleri [2]

Karbür Tipi	Sertlik (Hv)
M_3C	840-1100
M_7C_3	1200-1800
Mo_2C	1500

Karbürler mikroyapıda hacimce % 40-50 oranında bulunur. Bunun dışında kalan kısım matristir. Şekil 3.3'ten görüldüğü gibi karbon miktarının artışı ile mikroyapıda bulunan karbür miktarı artar. Ötektik karbon içeriği aşıldığında çok kaba primer karbürler oluşur.



ŞEKİL: 3.3. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerde Krom ve Karbon Oranı Arasındaki İlişki [6,7].

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

Ötektik karbon içeriği % 3.6 C-%15 Cr, % 3.2C-% 20 Cr ve % 3.0C - % 25 Cr'da oluşur. Diğer alaşım elementleri bu miktarı değiştirir. Özellikle silisyum bu içeriği azaltmaktadır [6,7,11].

3.2. 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 ısıt işlemlerle sertleştirilebilen ostenittir [6,7].

Karbon artışı ile birlikte martensitin aşınma direnci artar. Isıt işlem sonucu martensitik matrise dağılan ikincil karbürler aşınma direncinde artışa neden olur. Temperleme ile aşınma direnci düşmektedir.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbürler matris içinde dağılmıştır. Matris yumuşak olduğu anda aşınır ve karbürler matrisden kopar. Bu durumda karbürlerin aşınma dirençlerinin yalnızca bir kısmından yararlanılabilmiş olur.

Matrisin önemi Şekil 3.1'den açıkça görülebilir. Matris yumuşak olursa karbürlerin kırılma eğilimi yüksek ve aşınma direnci daha düşüktür. Akma noktası matris yumuşadıkça düşmektedir. Yumuşak matris, sürtünme sırasında oluşan mekanik gerilmelere karşı karbürlere gerekli desteği sağlayamaz. Sonuçta karbürler kırılır.

Bu nedenle mikro yapıdaki perlit varlığı da önemlidir. Beyaz dökme demirlerde mikroyapıda bulunan perlit miktarı % 10'u aştığı zaman aşınma direnci düşmektedir [7].

Ostenit yapıdaki yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirler % 12 Mn içeren Headfield çeliği gibi aşınma esnasında oluşan gerilmelerin etkisiyle deformasyon sertleşmesine uğrayabilir. Ancak mekanik gerilmelerle sertleşebilen ostenitik matris, martensitik matris kadar aşınmaya dirençli olmadığı Tablo 3.3'den görülebilmektedir.

TABLO: 3.3. Yüksek Krom-Molibdenli Beyaz Dökme Demirlerde Matris Yapısının Aşınma Kaybına Etkisi [6]

Matris	Oyma Aşınması Oranı	Öğütme Aşınması Kaybı (gm)	HB
Perlit	0.41	0.14	406
Ostenit	0.09	0.08	564
Martensit	0.04	0.04	840

Tablo 3.3'deki sıralama endüstriyel olarak birçok kırma ve öğütme operasyonundaki pratik datalarla doğrulanmaktadır.

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

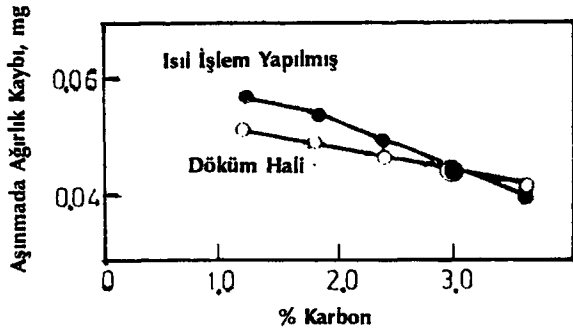
Bununla birlikte S.TURENNE, F.LAVALLEE, ve J. MASOUNAVE isimli araştırmacılar ostenitik matrise sahip yüksek kromlu beyaz dökme demirin aşınma sırasında oluşan deformasyon sertleşmesi nedeni ile martensitik matrise sahip beyaz dökme demirden daha iyi aşınma direncine sahip olduğunu iddia etmişlerdir [11].

3.3. Alaşım Elementlerinin Etkisi

Beyaz dökme demirlerde alaşım elementleri özellikleri etkileyen önemli etkenlerdir.

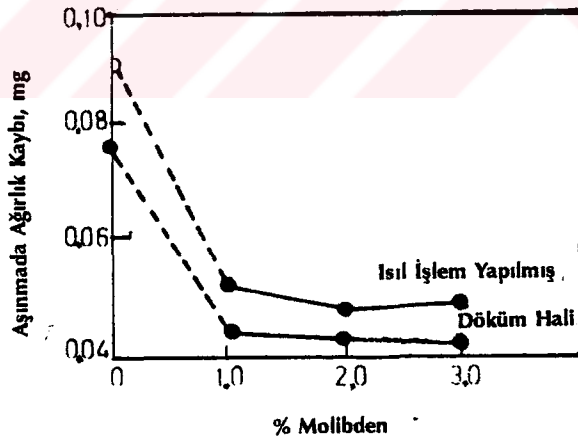
Aşınmaya dirençli yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde krom kararlı karbür yapısı oluşturup, sertlik ve aşınma direncinin artırılması için kullanır. Beyaz dökme demirde krom miktarı % 10'u geçtiği zaman M_7C_3 tipi ötektik karbürler oluşur. Krom içeriği % 10'dan daha az alaşımlarda M_3C karbürleri oluşur. Krom 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.

Karbon beyaz dökme demirin sertliğini artırır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbon içeriği % 15Cr için % 2.2-3.50, % 27 Cr için % 2.2-2.7 civarındadır. Şekil 3.4'de karbonun yüksek kromlu beyaz dökme demir alaşımlarının aşınma direncine etkisi görülmektedir. Karbon oranı arttıkça aşınma direnci artmaktadır.



ŞEKİL: 3.4. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerde Karbonun Aşınma Direncine Etkisi[9].

Molibden ilavesi yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde % 1-4 arasında, dökümden sonraki mikroyapıda perlitin oluşmaması için yapılır. Ayrıca molibden beyaz dökme demirin sertleşebilirliğini artırmak amacı ile ilave edilir. Molibdenin beyaz dökme demirin aşınma direncini Şekil 3.5'de görüldüğü gibi artırır.



ŞEKİL: 3.5. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerde Molibdenin Aşınma Direncine Etkisi[9].

Manganez perlit oluşumunu önlemek için ilave edilir. Manganez içeriği % 0.7'nin altında olmalıdır. Beyaz dökme demirlerde Mn içeriği % 1.5'i aştığı zaman tokluk, mukavemet ve aşınma direnci düşer. Çünkü söz konusu değer aralığında manganezin kalıntı ostenit oluşturma riski ve kırılma tehlikesi artar.

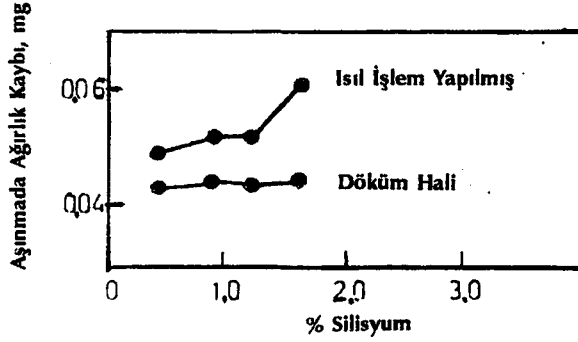
Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde kükürt içeriği çok düşük olmalıdır. Optimum aşınma direnci amaçlandığından kükürt miktarı maksimum %0.03'tür. Bu değer üzerinde mikroyapıda yer alan kükürt aşınma direncini olumsuz etkiler.

Fosfor yüksek kromlu beyaz dökme demirin tokluğunu düşürür. Ayrıca fosfor, özellikle kalın kesitli dökümlerde molibdenin sertleştirici etkisini yok edebilmektedir. Fosfor içeriği % 0.3'ün altında olmalıdır.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde nikel perlit oluşumunun önlenmesi için ilave edilir. Genellikle nikel miktarı % 0.20- 1.50 arasındadır. Ayrıca nikel sertleşebilirliği de artırır.

Bakır yüksek kromlu beyaz dökme demirlere perlit oluşumunun önlenmesi için ilave edilir. İlave edilen bakır miktarı % 2.5'u aşmamalıdır . Bakır molibden gibi sertleşebilirliği de artırır.

Silisyum yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin sertleşebilirliğinde olumsuz rol oynar. Şekil 3.6'dan görüldüğü gibi silisyum oranı arttıkça ısıtılma işlem görmüş beyaz dökme demirin aşınma direnci azalır.



ŞEKİL: 3.6. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerde Silisyumun Aşınma Direncine Etkisi [9]

Mikroyapıda yeterli oranda Mn, Ni, Mo ve Cr gibi perlit oluşumunu önleyen elementler olursa silisyum artışı ile Ms sıcaklığı yükselir [6.11]. Silisyum içeriği yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde % 0.4-0.9 arasında olmalıdır. Silisyum ayrıca mikroyapıdaki karbür yapısını da modifiye eder. Silisyum mikroyapıdaki karbür çekerdeklerinin artmasına neden olur ve daha ince yapıllı 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 [14]. Yeterli derecede silisyum içeriği tokluğu % 30 artırır. Ancak fazla miktarda silisyum ilavesi perlit oluşma ihtimalini yükseltip matrisi zayıflatır. Bu nedenle darbe direnci ile birlikte aşınma direnci de düşer [7,13].

Vanadyum mikroyapıda karbür oluşturunca element olarak yer alır. Vanadyum miktarı % 0.10-0.50 arasında olmalıdır.

Bor da silisyum gibi mikroyapıdaki karbür morfolojisini etkiler. Bor mikroyapıdaki karbürleri inceltir

ve sürekli iğneler şekline getirir. Bunun sonucunda aşınma direnci artar [14].

Bor içeriği % 0.120-0.30 arasında olduğunda bu durum geçerlidir. Bu limitler arasında bor ilavesi ile darbe direnci de % 20 artar [14,15].

Niobyum matrisin sertliğini artırarak beyaz dökme demirin aşınma direncini yükseltir [16].

BÖLÜM 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].

Sınıf	% Bileşim							Max.	Sertlik (Rc)		
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Cu	S	P	Dök Son.	Su Ver.	Tav.
15-3HC	3.4	0.7-1	0.70	15	2.5	-	0.05	0.10	51-68	62-67	40-44
15-3MC	3.0	0.80	0.70	15	2.5	-	0.05	0.10	50-54	60-85	57-42
15-3LC	2.6	0.80	0.70	15	2.6	-	0.05	0.10	44-48	58-63	35-40
15-2-1	3.2	0.80	0.60	15	2.1	0.90	0.05	0.60	50-55	60-67	40-44
20-2-1	2.8	0.80	0.70	20	1.7	0.90	0.05	0.60	50-54	60-67	38-43

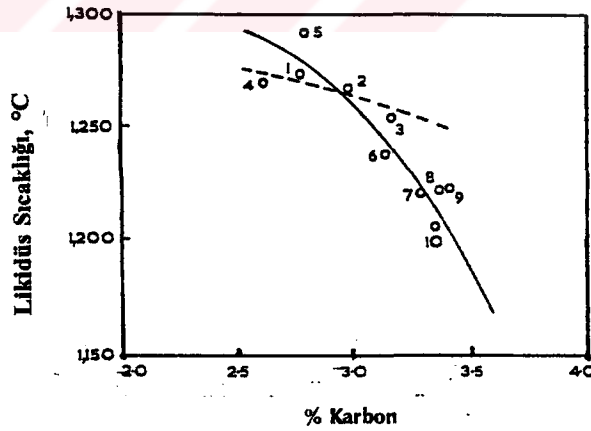
Yüksek krom ve molibdenli beyaz dökme demirler genellikle elektrik ark ve indüksiyon fırında üretilir. Fırın asidik, bazik veya nötr olabilir. Eğer astar asidik ise ergiyikteki krom ile silika astar arasında bir reaksiyon söz konusudur. Ancak pratikte asidik astar kullanımı daha yaygın olduğu için fazla problem yaratmaz. Kromun curuflla birleşerek hızlı bir şekilde refrakter aşınmasına neden olmasından dolayı asidik astar bazik astara göre daha ekonomiktir.

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 elektrot, petrol koku ve diğer kaynaklardan elde edilir. Eğer karbürizasyon için pik demir kullanılırsa düşük silisyum içermelidir. İdeal silisyum içeriği % 0.6'dır. Manganez içeriği % 0.5-1.5 arasındadır. Çok yüksek mangan asidik astari yiyebilir. Limit mangan bu nedenle % 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). Aynı şekle göre alaşımın krom içeriği de likidüs sıcaklığını etkilemektedir.



No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% Cr	14.5	19.7	20.1	21.0	14.0	14.0	13.9	14.7	12.0	13.7
% Mo	2.6	1.4	1.6	2.5	0.6	0.8	-	2.1	0.8	0.3
% Ni	-	0.7	0.7	0.9	-	4.2	0.7	1.1	2.2	1.7
Alaşım	15-3 LC	20-2-1	20-2-1	20-2-1				15-2-1		

ŞEKİL: 4.1. % 12-16 Cr, % 19-21 Cr İçeren Beyaz Dökme Demirlerin Likidüs Sıcaklıklarının Karbon İçeriğine Göre Değişimi[6]

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

Alaşımlar yağ-kuru kum kalıba, yağlı kum yada çelik kuma dökülür. Katılaşmadan sonraki çekilme % 2'dir.

Besleyici ve yollukların ana parçadan kesilmesi sırasında çatlak oluşturulmamasına dikkat edilmelidir. Ayrıca kesme işlemi kuru olarak yapılacaksa ısınmaya neden olunmamalıdır.

Tokluk genellikle dökümden sonra en düşük düzeydedir. Ancak ısıtılma işlemi ile tokluk artırılabilir.

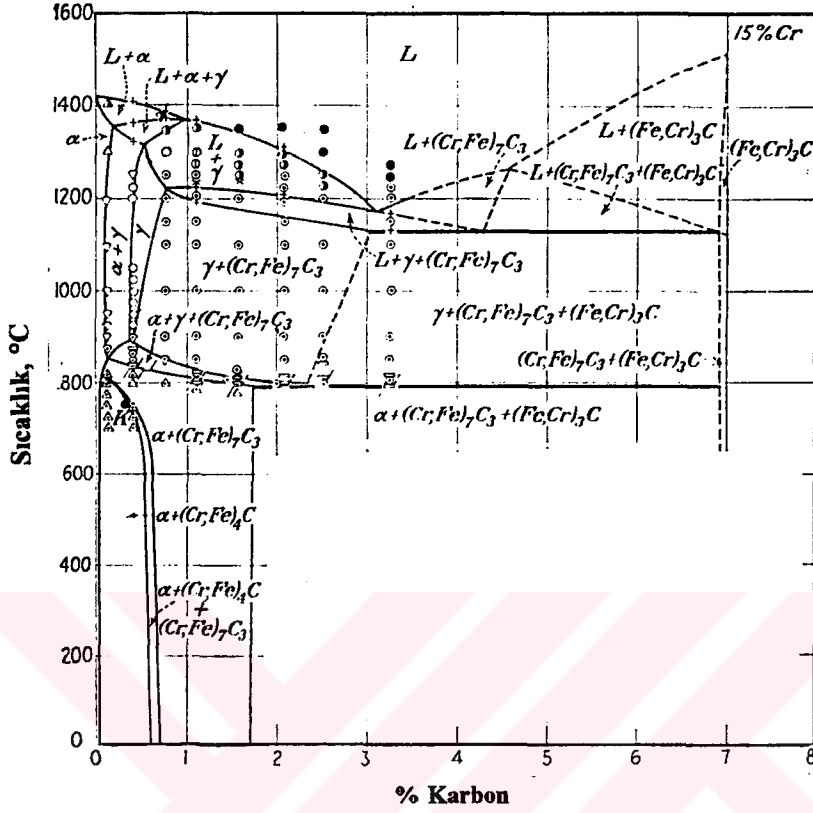
4.2. Fe-C-Cr Sistemi

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

Tablo 2.1'de ASTM A 532'ye göre yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin sınıflandırılması görülmektedir. Bu tablodan pratik olarak Fe-C-Cr sisteminin % 1-4 C , % 10-30 Cr içeren bölgesinin kullanıldığı anlaşılmaktadır.

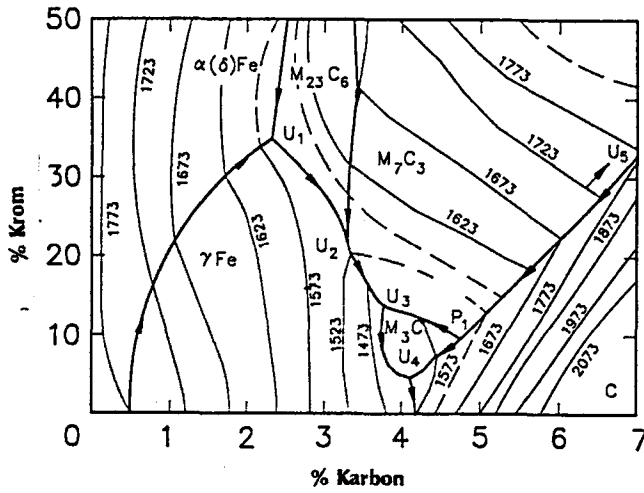
Fe-C-Cr sistemi üçlü denge diyagramları birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Özellikle bu araştırmalar sıvılaştırma yüzeyi ve üzerindeki kritik noktalar üzerinde yoğunlaşmıştır [17,18,19,20,21,22,23].

Şekil 4.2 Fe-C-Cr sisteminin %15 kroma kadar olan bölgesini göstermektedir.



ŞEKİL: 4.2. Fe-C-Cr Sisteminin % 15 Kroma Kadar Olan Bölgesi [23]

Şekil 4.3'de Fe-C-Cr sisteminin sıvılaşma yüzeyi görülmektedir. Tablo 4.2, Şekil 4.3'deki bazı kritik noktalandaki reaksiyonları göstermektedir.

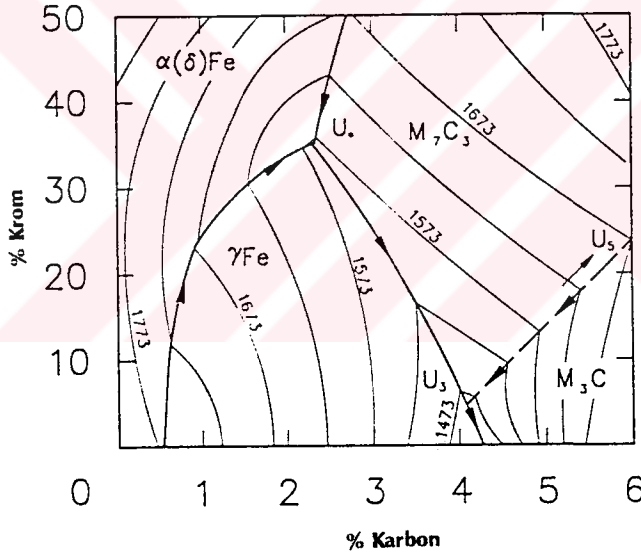


ŞEKİL: 4.3. Fe-C-Cr Sistemi [17]

TABLO: 4.2. Fe-C-Cr Sisteminin Sıvılaşıma Yüzeyindeki Kritik Noktalarda Oluşan Reaksiyonlar [17,18,19].

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 sıvılaşıma yüzeyinde ise U₁ ve U₂ ile U₃ ve U₄ noktaları çakışmaktadır (Şekil 4.4).



ŞEKİL: 4.4. Fe-C-Cr Sisteminin Sıvılaşıma Yüzeyi [19].

Gerçek soğuma şartlarında, Şekil 4.3'e 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 4.4'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.

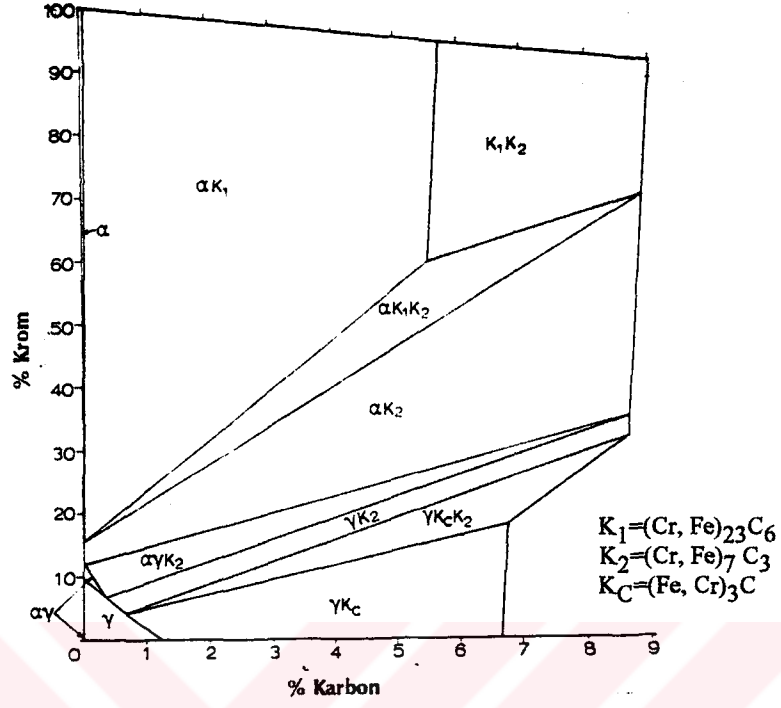
TABLO: 4.3. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Mikro-Yapısında Bulunan Fazlar ve Kafes Parametreleri [12,20].

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 (%44 7 Cr)	Tetragonal

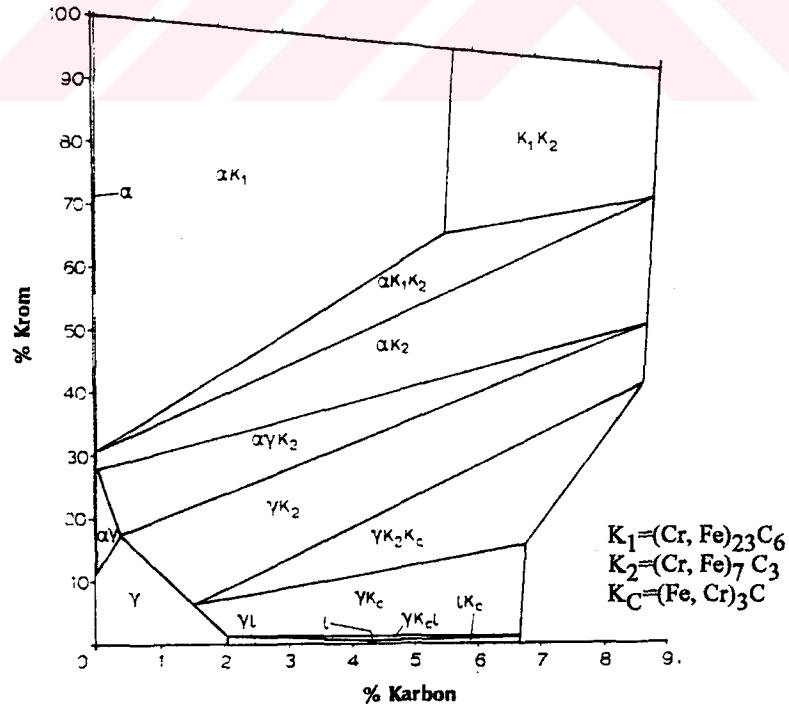
Karbür yapısı farklı olsa bile aynı sıcaklıkta yapılan ısıtıl işlemle benzer matris elde edilir.

Şekil 4.5'de görülen $900^\circ C$ izoterminin Şekil 4.6'daki $1150^\circ C$ izoterminine göre farkı, ostenit alanının daralmasıdır. Bu daralma nedeniyle belli bir bileşimdeki yüksek kromlu beyaz dökme demirin matrisini oluşturan ostenit $900^\circ C$ 'de, $1150^\circ C$ 'ye göre daha az krom ve karbon içermektedir.

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



ŞEKİL: 4.5. Fe-C-Cr Sisteminin 900°C İzotermi [19]



ŞEKİL: 4.6. Fe-C-Cr Sisteminin 1150°C İzotermi [19]

dağılımı ve şekli ötekiğin miktarı ve bileşimine bağlıdır.

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 [17,18,21]. 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 demirler bileşimlerinde krom dışında molibden, titanyum, vanadyum gibi karbür yapıcılar da bulunmaktadır. Ancak mikroyapıda genel olarak krom karbürler yer alır. Karbürlerin yapısındaki krom miktarı alaşımın Cr/C oranına bağlıdır. Örneğin alaşım Cr/C oranı üç iken M_7C_3 tipi karbürler oluşur.

Karbür yapıcı elementlerin bir kısmı M_7C_3 tipi karbürler oluştururken, kendi karbürlerini de oluşturur.

4.5. Fe-C-Cr Alaşımlarının Döküm Matris Yapısı

Yüksek karbonlu Fe-C-Cr alaşımlarında katılaşma sırasında ötektik altı bileşimlerde ilk olarak ostenit dentritleri oluşur. Daha sonra bu dentritlerin etrafında ostenit M_7C_3 ötekiği 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 kükürtün karbür yapısı içinde kısmen dağılması karbür ostenit ara yüzeyini zayıflatarak çatlak oluşmasına ve ilerlemesine neden olabilir.

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi, % 14-23 Cr içeren (Şekil 4.3'deki U_2 ile U_3 noktaları arası) beyaz dökme demirlerde yavaş soğuma ile M_7C_3 ötektik karbürleri oluşur.

Griffing dublex karbürlerin oluşumunu (mikro yapıda M_3C karbürleri ile çevrili M_7C_3 karbürleri). % 10-20 Cr ve % 4.80-7.50 C içeren alaşım için belirlemiştir. Dublex karbür yapısı üç adımda oluşan katılaşmanın sonucudur [17].

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 $L+C+M_7C_3 = M_3C$ reaksiyon oluşur.

Thorpe ve Chicco'da Fe-Cr-C üçlü sisteminde % 9.6 Cr, % 3.44 C içeren alaşım için benzer dublex karbürleri gözlemiştir [17,18].

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

1. Adımda γ -Fe oluşur (Şekil 4.4) $U_4 \rightarrow U_3$ 'e gelir.
2. Adımda $L = M_7C_3 + \gamma Fe$ oluşur.
3. Adımda $L + M_7C_3 = M_3C + \gamma Fe$ reaksiyonu oluşur ve bileşim U_3 'e ulaşır.
4. Adımda $L = M_3C + \gamma Fe$ ledabüritik ötektik reaksiyonu oluşur [17,18,19].

Thorpe ve Chicco Ni-Hard IV (% 8-9.0 Cr, % 4.0-7.0 Ni, % 3.10 C, % 1.40 Si, % 0.50 Mn) ticari alaşımında dublex karbürlerin oluştuğunu gözlemişlerdir.

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

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 sıcaklığı yükselterek sağlanır. Dökme demirlerde M_s sıcaklığı;

$M_s = 561^{\circ}\text{C} - 475^{\circ}\text{C} - 33 \text{ Mn} - 21 \text{ Mo} - 17 \text{ Cr} - 17 \text{ Ni}$ formülü ile gösterilir.

Bu denklemde görüldüğü gibi M_s sıcaklığında en büyük düşüşe karbon neden olur. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ostenitin yarı kararlı durumu karbona aşırı doymuşluğundan kaynaklanır. Ostenitleme işleminin amacı kalıntı ostenitin karbonu ve kromundan sekonder M_7C_3 karbürlerini çökelterek denge değerine getirmektir.

4.5.2. Sekonder 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 sekonder karbürler için çekirdeklenme süresinin ortalama 20 sn civarında olduğu ve bütün reaksiyon 4-6 saatte tamamlandığı saptanmıştır. Çökelme sırasında hacimde çok az daralma olur. Cr/C oranı arttıkça çökelme aralığı daha yüksek sıcaklıklara kayar. Başlangıçta ince çökelti karbürler etrafında ve tane sınırlarında gelişigüzel dağınık durumda bulunmaktadır. Daha sonra ostenit dentritleri içinde belirli bazı kristalografik düzlemler üstünde çökelme başlar.

Sıcaklık sekonder karbürlerin oluşum süresince en önemli etkidir. Karbürler etrafında gelişigüzel çökelme 950°C 'nin altındaki sıcaklıkta 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 çökelme düzlemi sayısı da azalır.

Sekonder karbür çökelmesi sadece izotermal ısıtma işlemle değil, sürekli soğuma sırasında da olabilir. Bu nedenle soğuma ne kadar yavaş olursa karbür çökelmesi de o kadar fazla olur. Çökelme 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 karbürleri oluşturmaktır.

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

Yapıdaki yüksek krom içeriği karbürleri kararlı hale getirir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde alaşımsız dökme demirlerin aksine grafitleşme görülmez[6,7].

Katılaşma sırasında veya yüksek sıcaklıkta oluşan ostenit krom, karbon ve diğer alaşım elementlerine doymuş haldedir. Sıcaklık düşüştükçe 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 çökelmesi düzensizdir. Bu nedenle ortalama soğuma hızlarında bile oda sıcaklığında mikroyapıda kalıntı ostenit bulunur. Dolayısıyla dökümden sonraki yapı perlit, martensit ve kalıntı ostenittir [6,7].

İnce kesitli malzemelerde ostenit, kalın kesitli malzemelerdeyse perlit mikroyapıya hakimdir. Ancak döküm yapısında yine de perlit bulunur. Bununla birlikte parça kesidi ve soğuma hızına göre bileşim ayarlanırsa tamamen ostenitik yapı elde edilebilir. Bu da yüksek miktarda krom kullanılması ile molibden, nikel yada bakır ilavelerinin yapılması anlamına gelir.

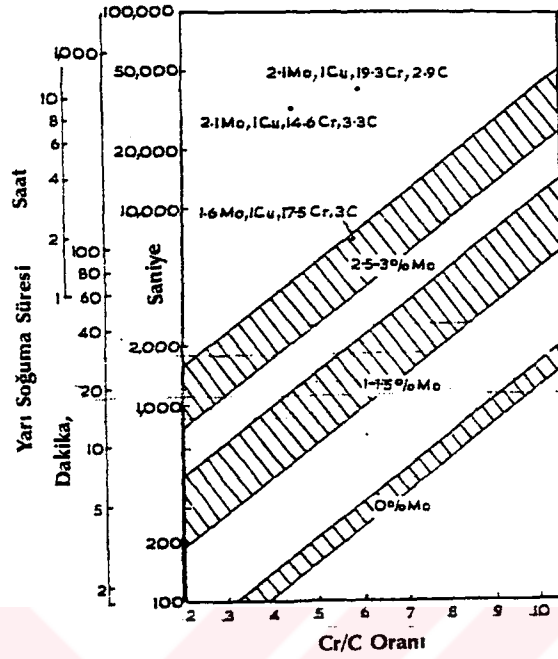
Aşırı miktarda kalıntı ostenit içermeyen, tamamen martensitik mikroyapı elde etmek için dökümün 920-1000°C de tutularak destabilize edilmesi gerekir. Bu esnada oluşan sekonder karbür çökmesi matrisin krom ve karbon içeriğini düşürür. Destabilizasyondan sonra yapılan soğutmada soğuma hızı perlit dönüşümüne yol açmayacak kadar yüksek ise ostenit martensite dönüşebilir.

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

Şekil 4.8.'de Cr/C oranının perlit oluşturmayacak maximum 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 4.8'den görülebileceği 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.



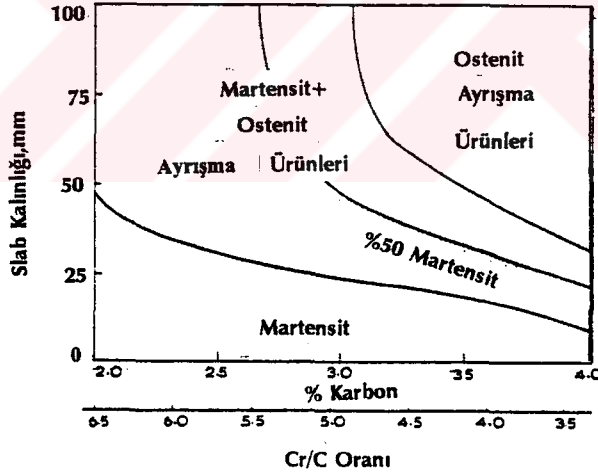
ŞEKİL: 4.8. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerde Perlit Dönüşümünün Önlenmesinde Krom, Karbon ve Molibdenin Etkisi [6].

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. Ostenit içindeki karbon çözünlülüğü sıcaklık arttıkça artar. Karbon içeriğini artırmak daha fazla sertleşebilirliği ve su verdikten sonra daha sert martensit oluşumuna yol açar. Su verildikten sonra sertlik su verme sıcaklığına bağlı olarak artar. Krom ferritten ostenite dönüşüm sıcaklığına artırdığından krom içeriği arttıkça maksimum sertliğin elde edildiği su verme sıcaklığı artar. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde sekonder 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.

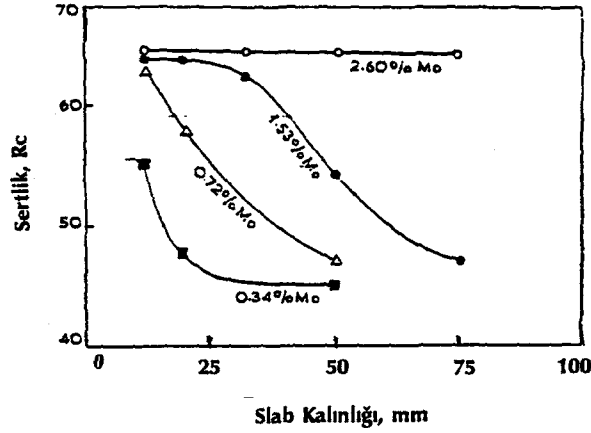
Çok miktarda kalıntı ostenit içerenlerde sekonder sertleşme su verildikten sonraki sertlikten daha fazla sertlik oluşturur. Maksimum sekonder sertleşme için temperleme sıcaklığı kalıntı ostenitin kararlılığına bağlıdır. Sekonder sertleşmeden sonraki aşınma direnci genellikle su vermeden sonraki aşınma direncinden düşüktür. Bunun nedeni matrisde önceden bulunan martensitin yumuşamasıdır.

Kesit kalınlığının Cr/C oranı ve molibden içeriği ile ilgili olarak, mikroyapı ve sertlik üzerindeki etkisi Şekil 4.9, 4.10'da gösterilmiştir. Kalın kesitli parçalarda soğuma hızına bağlı olarak mikroyapıda perlit oluşması beyaz dökme demirin sertliğini çok fazla düşürmese bile, aşınma direncinde önemli bir düşüşe neden olabilir.



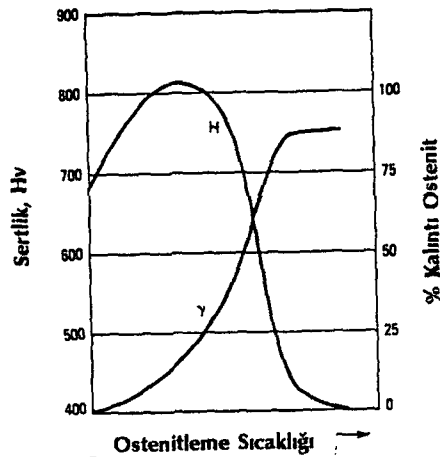
ŞEKİL: 4.9. Çeşitli Kesitlere Sahip Yüksek Krom-Molibdenli Beyaz Dökme Demirin Sertliğine Slab Kalınlığına Bağlı Olarak Karbonun Etkisi [6].

Martensit ve perlitten oluşan yapı önce ostenitik sonra da martensitik matrisde oluşan perlit dönüşümüne bağlı olarak iç gerilmeler içerebilir. Bu gerilmeler beyaz dökme demirin aşınma ve darbe direncini düşürür.



ŞEKİL: 4.10. Çeşitli Kesitlere Sahip Yüksek Krom-Molibdenli Beyaz Dökme Demirinin Sertliğine Slab Kalınlığına Bağlı Olarak Molibdenin Etkisi [6].

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 işlemi süresini uzun tutmakla olur. Nikel veya bakır içermeyen alaşımlarda bu süre en az bir saattir. Molibdenin kalıntı ostenit üzerindeki etkisi çok azdır. Bununla birlikte % 0.50-1.0 Ni veya Cu içeren beyaz dökme demirlerde yeterli kararlılık destabilizasyon, sıcaklığında 6 saat yada daha fazla durularak sağlanır. Sonuçta oluşan düşük karbonlu ostenit yüksek karbonlu martensitten daha düşük sertlik ve aşınma direncine sahiptir.(Şekil 4.11).



ŞEKİL: 4.11. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerde Ostenitleme Sıcaklığının Sertlik ve Kalıntı Ostenit Miktarı Üzerindeki Etki [7].

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 ve 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 nedeniyle matrisin sertliğinin artış hızı azalır [6,7].

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 artırmak için tavlanaabilir. Tavlama prosesinin amacı martensit veya ostenit içermeyen perlitik matris elde etmektedir.

Genellikle yüksek sertleşebilirliğe sahip beyaz dökme demirler için tavlama prosesi oldukça uzun bir ısıt işleml kapsar.

Tablo 4.4.'de bazı yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirlere ait ısıt işlem koşulları belirtilmektedir.

TABLO: 4.4. Yüksek Krom-Molibden İçeren Beyaz Dökme Demirlerin Isıt İşlem Koşulları[6].

Sınıf	Sertleştirme			Temperleme Sıcaklığı, °C
	Sıcaklık, °C	Su Verme Süresi	Su Verme Ortamı	
15-3	920-960	1/2-1 saat	Hava	200-260
15-2-1	920-960	4 saat min.	Hava	
20-2-1	950-1000	6 saat min.	Hava	

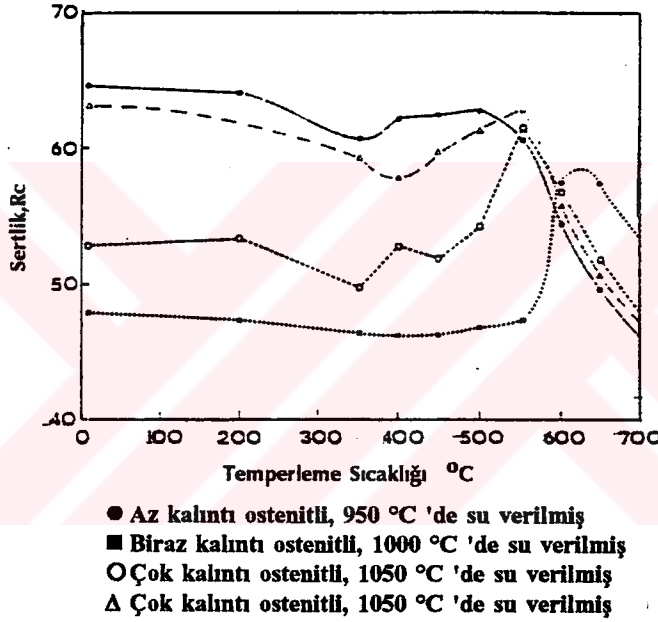
Bu işlem aşağıdaki şekilde yapılır;

- 930-980°C'de 2 saat bekletme
- 820°C'ye kadar 60°C/h ile kontrollü soğutma
- 700-720°C'ye kadar 10-15°C/h soğuma hızıyla kontrollü soğutma.
- 700-720°C de 4-20 saat bekletme

Tavlamadan sonra sertlik 350-430 HB arasında olur. Bu durum tel kesme dahil olmak üzere birçok işleme operasyonuna olarak tanır. Ütektik krom karbürler tavlama prosesinden etkilenmedikleri için işlenebilirliği etkileyen başlıca faktör karbon içeriğidir. En kolay işlenebilir sınıf 15-3LC'dir. Karbon içeriği % 3'ün üzerine çıktığında işleme operasyonu zorlaşır.

Temperleme işlemi genellikle $205-230^{\circ}\text{C}$ 'de 2-4 saat için yapılır. Sertleştirmeden sonra yapı % 10-30 ostenit içerir. Yenme problemi varsa yüksek sıcaklık temperlemesi kalıntı ostenit miktarını azaltmak için yapılır.

Şekil 4.12'de değişik sıcaklıklarda su verme ile elde edilmiş değişik miktarlarda kalıntı ostenit içeren üç alaşımın temperleme sıcaklığı ile sertlik değişimi eğrileri görülmektedir.



ŞEKİL 4.12. Yüksek Krom-Molibden İçeren Beyaz Dökme Demirlerde Temperleme Sıcaklığı İle Sertliğin Değişimi [6].

Artan temperleme sıcaklığı ile çok az yada hiç kalıntı ostenit içermeyen alaşım sıcaklık artışı sonucu sertlik düşüşü gösterir. 500°C üzerinde sertlik ani olarak düşer.

BÖLÜM 5. AŞINMA VE ÖLÇÜMÜ

5.1. Aşınmanın Tanımı

Aşınma, bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme transferi veya aşınma parçalarının oluşumu neticesinde ortaya çıkan malzeme kaybıdır. DIN 50320'de aşınma;"kullanılan malzeme yüzeylerinden mekanik sebeplerle ufak parçaların ayrılması suretiyle meydana gelen değişiklik" olarak tanımlanmaktadır. Benzer şekilde bir aşınma tanımı da aşınma ve erozyonla ilgili terminolojiyi içeren ASTM G-40-93 standartlarında verilmektedir. Bu tanımlamalara göre makina 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 [24,25,26,27,28,29].

Bir aşınma sisteminde;

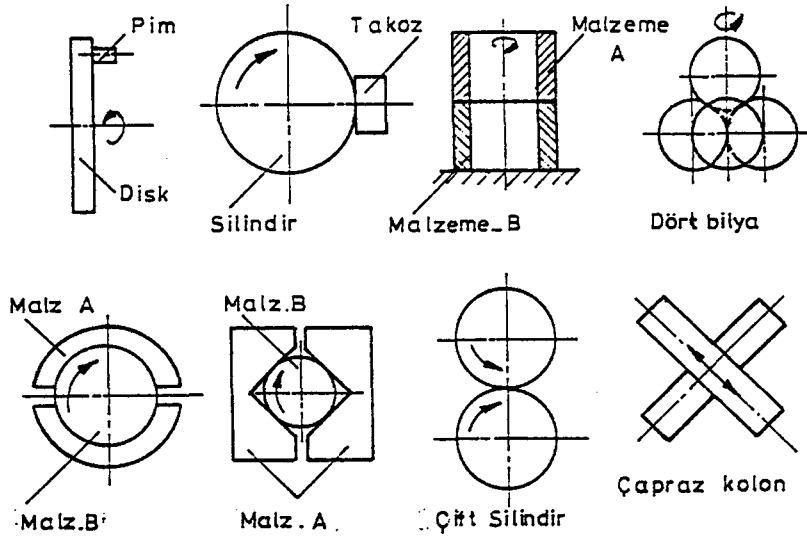
- a)- Ana malzeme (Aşınan)
- b)- Karşı malzeme(Aşındıran)
- c)- Ara malzeme
- d)- Yük
- e)- Hareket

Aşınmanın temel unsurlarıdır. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte "Tribolojik Sistem" olarak adlandırılır.

5.2. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri

Endüstride kullanılan alet ve makinalarda aranılan özelliklerden bir tanesi de bunların kullanım ömürleridir. Makina parçalarının çabuk aşınması makinanın ömrünü kısaltarak maliyetini arttırdığı gibi, onarım için geçen süre de üretimin önemli ölçüde aksamasına neden olmaktadır. Bu sebepten dolayı makina imalatında aşınmaya maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmalıdır. Bu malzemelerin tesbiti için de mutlaka birçok laboratuvar deneylerinin yapılması gerekir (Şekil 5.1).

Laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde ana malzemenin bir modeli ile çalışılır. Bu model basit geometrik şekle sahip olup, fazla bir masrafa gerek kalmadan üretilir ve daha sonra bir deney cihazına takılarak her türlü aşınma ölçme işlemleri bunun üzerinde yapılabilir.



ŞEKİL: 5.1. Yağlamalı veya Yağlamasız Adhesiv (metal-metal) Aşınma Deney Yöntemleri [30].

Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür.

a)- Yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemenin adhesiv (metal-metal) aşınma değerlerinin ölçüldüğü deneyler.

b)- Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma değerinin ölçüldüğü deneyler (Şekil 5.2).

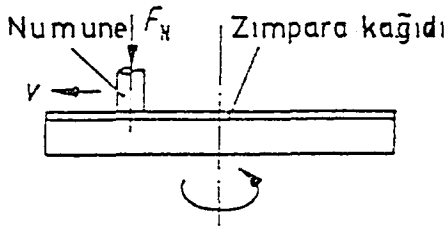
ASLE (Amerikan Society of Lubrication Engineers, 1976) tarafından yüz kadar deney sistemi belirlenmiştir. Bunlardan en çok kullanılanları Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 de görülmektedir. Aşınma deneylerinde aşınmanın ölçüm yöntemleri olarak bilinen ağırlık farkı, kalınlık farkı iz değişim ve radyoizotop metotları aşağıda sırasıyla açıklanmıştır[30].

5.2.1. Ağırlık Farkı Metodu

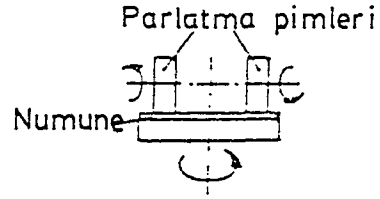
Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün, alet duyarlılık kapasitesi dahilinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Deney numunelerinin her ölçümü için numunenin yerinden çıkartılıp ölçüm yapılması, yani numune yerindeyken üzerinden ölçü alınamaması bu yöntemin dezavantajıdır.

Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-1} veya 10^{-4} g hassasiyetinde oldukça duyarlı bir terazi yardımıyla yapılır.

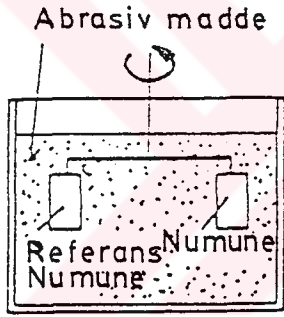
Aşınma miktarı gram veya miligram cinsinden ifade edilirse, metre veya kilometre olarak tespit edilen sürtünme yoluna göre, birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (g /km), (mg/m) ile ifade



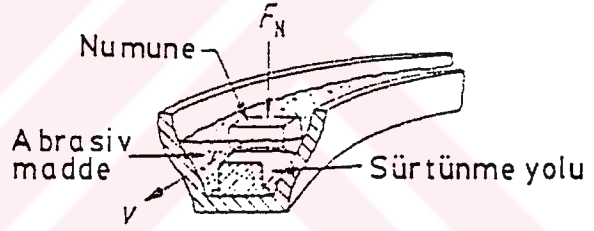
a) Aşınma diski



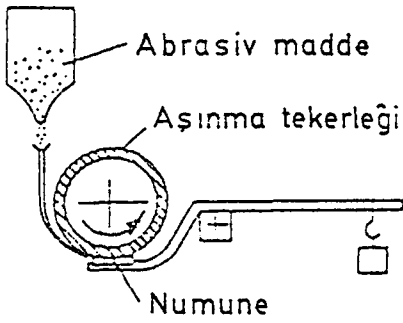
b) Aşınma tablası



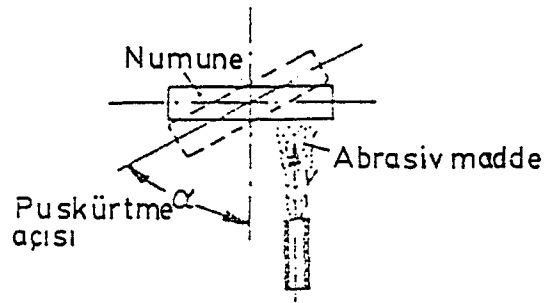
c) Aşınma kabı



d) Avery cihazı



e) Aşınma tekerleği



f) Püskürtme lülesi

ŞEKİL: 5.2. Abrasiv Aşınma Deneylerinde Kullanılan Yöntemler [30].

edilebilir. Ağırlık kaybı birim alan için hesap edilecekse (g/cm^2) gibi bir birim kullanılabilir. Ağırlık kaybı hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde, yine ağırlık kaybından hareketle kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığı hesaba katılmak suretiyle birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından gidilerek de bulunabilir.

Bu tanımlamalara göre en çok kullanılan ağırlık farkı ölçme metodunda kullanılan bağıntılar şunlardır [30].

$$W_a = \Delta G / d.M.S. (mm^3/N.m) \quad (5.1)$$

Burada;

W_a : Aşınma oranı ($mm^3/N.m$),
 ΔG : Ağırlık kaybı (mg),
 M : Yükleme ağırlığı (N),
 S : Aşınma yolu (m),
 d : Yoğunluk (gr/cm^3),
olarak verilmiştir. Aşınma oranının (W_a) ters değeri de aşınma direnci (W_r) olarak gösterilir.

$$W_r = 1/W_a (N.m/mm^3) \quad (5.2)$$

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

$$V_s = 10^4 \Delta G / F.d.s (um/km) \quad (5.3)$$

Burada;

W_s : Bir km. aşınma yoluna tekabül eden yükseklik kaybı (um)

G : Ağırlık kaybı (g)

F : Aşınma yüzeyi (cm²)

d : Yoğunluk (g /cm³)

S : Kayma yolu (km)

olarak alınır. Deney malzemesi yükseklik kaybının mukayese malzemesi (örneğin Fe 37 çeliği) yükseklik kaybına oranı, aşınma orantı sayısını (W_a) verir.

$$W_s = V_s(\text{deney numunesi})/V_s(\text{Fe 37}) \quad (5.4)$$

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

$$R = 1/W_s \quad (5.5)$$

Üç elemanlı abrasiv aşınmada ise, genellikle DIN 50320'de verilen boyutsuz aşınma oranı formülü yaygın olarak kullanılır.

5.2.2. Kalınlık Farkı Metodu

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

5.2.3. İz Değişimi Metodu

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile, geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değişimi ölçülür.

Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucudur. Elmas pramit veya bilyanın bıraktığı iz boyutlarındaki değişme mikroskop vasıtasıyla ölçülerek belirlenir.

5.2.4. Radyoizotop Metodu

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

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

5.3. Aşınma Mekanizmaları ve Aşınmayı Etkileyen Faktörler

5.3.1. Aşınma Mekanizmaları

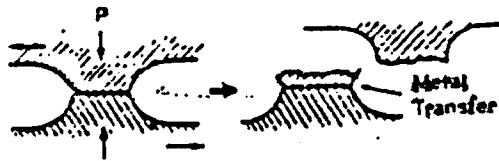
Daha önce de belirtildiği gibi, aşınma tribolojik sistemin elemanları arasında karşılıklı zorlamalar neticesinde meydana gelir. Aşınmanın tanımı çok geniş olup, çeşitli aşınma tipleri ve farklı sınıflandırılmaları yapılmaktadır. Burada aşınma mekanizmaları aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır.

- 1- Adhesiv aşınma,
- 2- Abrasiv aşınma,
- 3- Tribooksidasyon aşınması,
- 4- Yorulma aşınması'dır.

Bu dört çeşit aşınma mekanizması yanında bazı özel şartlardan dolayı "Tribosüblimasyon" ve "Yayınma" gibi iki mekanizmadan daha bahsetmek mümkündür. Yukarıda belirtilen ve dört temel grupta toplanan bu aşınma mekanizmaları aşağıda ayrı ayrı açıklanmıştır.

5.3.1.1. Adhesiv Aşınma

Yapışma aşınması olarak da adlandırılan adhesiv aşınma, en sık rastlanan aşınma türü olmasına rağmen, genellikle hasarları hızlandırıcı etkide bulunmaz. Adhesiv aşınma bir metal yüzeyinin bir başka metal yüzeyindeki bağıl hareketi sırasında birbirlerine kaynamış veya yapışmış yüzeydeki pürüzlerin kırılması sonucu ortaya çıkar. Uygulamada, metal-metal aşınmasına benzer olarak, adhesiv aşınma özellikle metaller arasındaki kayma sürtünmesi nedeniyle meydana gelir ve aşınma parçacıkları yumuşak olan metalden kopar (Şekil 5.3).



ŞEKİL: 5.3. Adhesiv Aşınma [28,31,32].

Eğer iki metal aynı sertlikte ise aşınma her iki yüzeyde de oluşur. Metaller arasındaki yağlamanın

mükemmel olması, yüzeye etki eden yükün azaltılması ve malzemenin sertliğinin artırılması adhesiv aşınmayı azaltır. Sonuç olarak adhesiv aşınma; yüzeye etkiyen normal yük, kayma yolu ve aşınan malzemenin yüzey sertliği ile orantılıdır. Tablo 5.1'de adhesiv aşınmaya malzeme özelliklerinin etkisi özetle verilmiştir.

TABLO: 5.1. Malzeme Özelliklerinin Adhesiv Aşınmaya Etkisi [25,28,30]

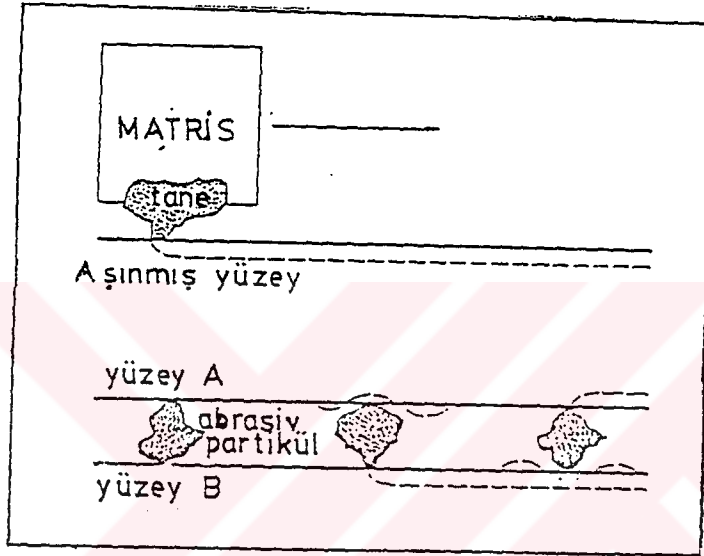
ÖZELLİKLER	ADHESİV AŞINMA
Oksitli Yüzey	Az
Kristal Yapı Kübik	Çok
Hegzagonal	Az
Yüksek Deformasyon Sertleşmesi	Çok
Yüksek Sertlik	Az
Yüksek Elastisite Modülü	Az
Yüksek Ergime Noktası	Az
Yüksek Yeniden Kristalleşme Sic.	Az
Küçük Atom Yarıçapı	Az

5.3.1.2. Abrasiv Aşınma

Yırtılma veya çizilme aşınması olarak da isimlendirilen abrasiv aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Abrasiv aşınma biri diğerinden daha sert ve pürüzlü olan metal yüzeylerinin birbirleriyle temas halindeyken kayması sırasında meydana gelir. Şekil 5.4'de sert bir malzemenin yumuşak bir malzemeden çapak şeklinde abrasiv aşınma, parçaları alışı görülmektedir. Sert parçacıkların yumuşak metale batması abrasiv aşınmaya neden olabilmektedir. Bu mekanizmaya örnek olarak, sisteme dışardan giren toz parçacıklarının veya bir motorda oluşan yanma ürünlerinin

sebebi olduğu aşınma tarzı verilebilir. Abrasiv aşınmayı üç gruba ayırmak mümkündür [28,31]. Bunlar;

- a)- Oymalı sürtünme aşınması (gouging wear),
- b)- Öğütmeli sürtünme aşınması (grinding wear),
- c)- Erozyon aşınması (erosive wear),



ŞEKİL: 5.4. Abrasiv Aşınma Mekanizması [30].

Oymalı sürtünme aşınması, yüzeyin aşırı deformasyonu sonucu meydana gelir. Aşırı yüklemeler etkisi ile meydana gelen oymalı sürtünme aşınmasına örnek olarak ağır koşullar altında çalışan kazıcı, kırıcı gibi maden araçlarında görülen aşınmalar verilebilir.

Öğütmeli sürtünme aşınması, ağır yükler altında aşınma parçalarının kırılarak küçük keskin köşeli parçacıklar oluşturup yüzeyi delerek ve çizerek malzeme kaybına sebep olması sonucu meydana gelir. Öğütmeli sürtünme aşınmasına örnek olarak bilyalı değirmenler gösterilebilir.

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

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,

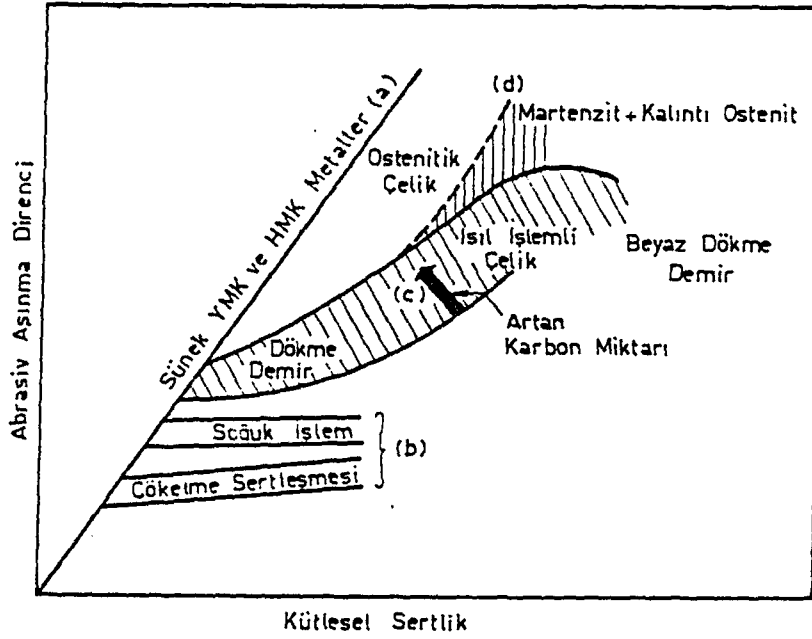
- a- Daha sert alaşım kullanmak,
- b- Sertlik artırmak amacıyla ısıtıl işlem uygulamak,
- c- Malzeme yüzeyini sert bir tabaka ile kaplamak,

(nitrasyon, elektrokaplama, metal pürtlütme vb. gibi yöntemler uygulanarak)tavsiye edilir. Bu önlemlerle abrasiv aşınma hızını azaltmak mümkündür. Şekil 5.5 de çeşitli malzemelerde sertlik ile abrasiv aşınma direnci arasındaki ilişki görülmektedir.

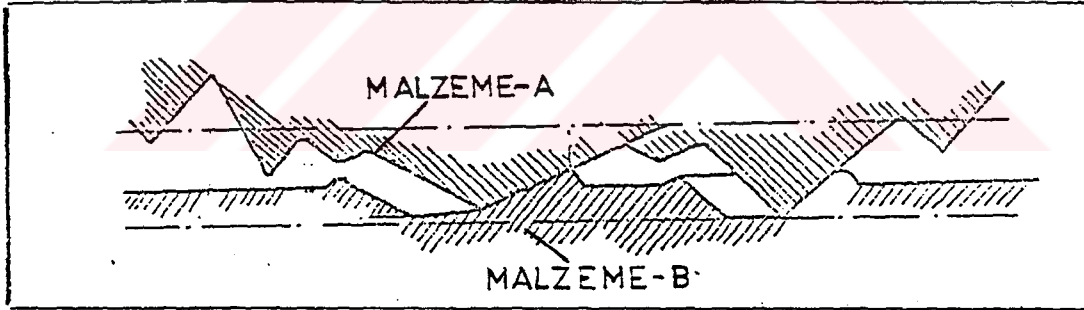
Abrasiv aşınma endüstriyel cihazlarda malzeme kayıplarının başlıca sebebidir. Aşındıran malzeme serbest halde iki metal arasında bulunuyorsa veya yalnız bir metal ile aşındıran sabit veya serbest taneler mevcut ise bu durumda;

- a- İki elemanlı abrasiv aşınma (Şekil 5.6)
- b- Üç elemanlı abrasiv aşınma (Şekil 5.7)

şeklinde gruplandırılması mümkündür.

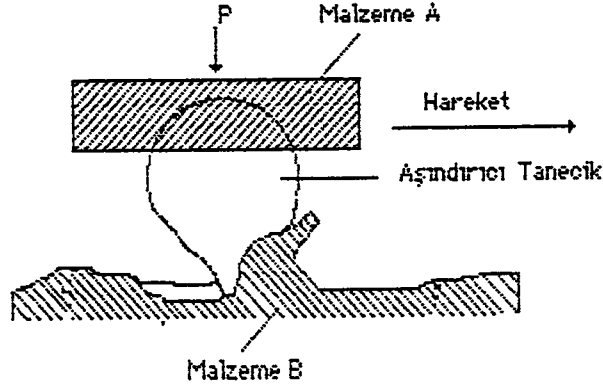


ŞEKİL: 5.5. Çeşitli Malzemelerde Kütlesel Sertliğin Abrasiv Aşınma Direncine Etkisi [28,31,33].



ŞEKİL: 5.6. İki Elemanlı Abrasiv Aşınma [30].

İki elemanlı abrasiv aşınma sürtünen elemanların doğrudan birbirleriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abrasiv aşınmada ise ana ve karşı malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilir (Şekil 5.7).



ŞEKİL: 5.7. Üç Elemanlı Abrasiv Aşınma [30].

Metal-metal sürtünmelerinde aşınma iki elemanlı abrasiv veya adhesiv olarak başlayıp üç elemanlı abrasiv olarak devam eder. Bu durumda araya giren toz, mineral taneleri çizilme sonucu serbest hale geçen mikro talaşlar ve parçalanmış oksit parçacıkları üçüncü elemanı (ara malzemeyi) oluşturabilir (Şekil 5.7). Serbest hale geçen mikro talaş parçacıkları genellikle ana malzemeden daha sert olduklarından (üç elemanlı abrasiv aşınma) aşınmayı hızlandırmaktadır. Endüstriyel makinalardaki en önemli aşınma türü olan abrasiv aşınmaya genel olarak aşağıda verilen yerlerde rastlanmaktadır.

- Traktör, grayder gibi tarım ve iş makinalarının bıçak ve tırnaklarında,
- Cevher işleme ve öğütme tesislerinde,
- Eleklerde ,
- Değirmenlerde,
- Nakletme makinalarında.

Bu gibi makina veya makina parçalarında yalnızca abrasiv aşınmadan söz edilebileceği gibi, bunlardan diğer aşınma türlerinin de birlikte görülmesi mümkündür.

5.3.1.3. Tribooksidasyon Aşınması

Tribooksidasyon denilince ana malzeme ile karşı malzeme arasındaki tribolojik zorlanmalardan dolayı meydana gelen kimyasal reaksiyon anlaşılır. Malzeme yüzeylerinin hava ile reaksiyona girerek oluşturduğu yüzey tabakaları (oksit tabakası) aşınmayı azaltmasına rağmen bu yüzey tabakalarının tribooksidasyon sonucu özelliklerinin değişmesi aşınmayı hızlandırmaktadır. Yağ gibi kimyasal maddeler bulunan ortamda çalışan makina parçalarının yüzeylerinde oluşan yüzey tabakalarının bir kısmının tribolojik zorlanmalarla kırılması ve aşındırıcı parçacıklar oluşturması aşınmayı hızlandırmaktadır. Tribooksidasyon özellikle metalik malzeme yüzeylerinde görülür.

5.3.1.4. Yorulma Aşınması

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

Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelir. Bu boşlukların zamanla yüzeye doğru ilerleyerek büyümesi yüzeyde küçük çukurların ortaya çıkmasına sebep olur. Bu tür aşınma daha ziyade dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeylerinde görülür.

Büyük oranda aşınmaya sebep olan yukarıdaki mekanizmalar dışında "Tribosüblimasyon" ve "Yayınma" mekanizmalarından da bahsetmek mümkündür. Bu iki mekanizma yüzeydeki

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

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

5.4. Aşınmayı Etkileyen Faktörler

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

a)- Ana malzemeye bağlı faktörler

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

b)- Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi ,

c)- Ortamın etkisi

- Sıcaklık
- Nem
- Atmosfer

d)- Servis koşulları

- Basınç
- Hız
- Kayma yolu

5.5. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Aşınma Direnci

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler için artan uygulama alanları ve pazar payı üstün darbe direnci ile combine edilmiş aşınma direncine dayanmaktadır. Ayrıca bazen tavlandıktan sonraki işleme olanağı da bir avantajdır.

Tablo 5.2.'da çeşitli malzemelerin öğütme ve yükleyici aşınma altındaki performansları tokluklarına dayanılarak verilmektedir.

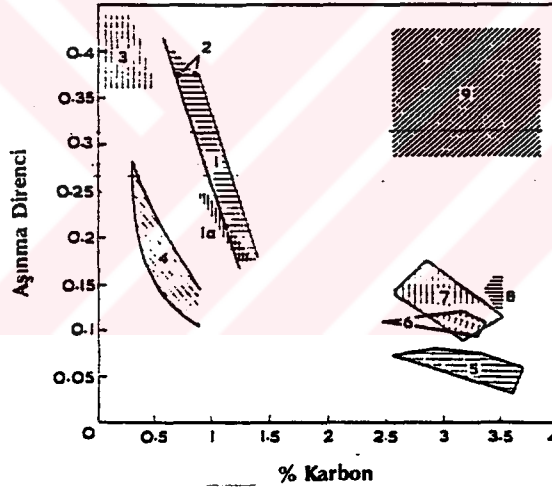
TABLO: 5.2. Çeşitli Malzemelerin Öğütme ve Yükleyici Aşınma Altında Performansı [6].

MALZEMENİN ADI	TOKLUK SIRASI	BAĞIL AŞINMA KAYBI	
		OYMA AŞINMASI	ÖĞÜTME AŞINMASI
Ostenitik Mn Çeliğı (%12Mn)	1	0.34-0.19	138-142
Martensitik Az Alaşımli Çelik	2	0.28-0.15	126-114
Ostenitik Mn Çeliğı (%6Mn-%1Mo)	3	0.25-0.17	114-120
Cr/Mo Çeliğı (%0.5-0.9)	4	-	126-130
Martensitik 6Cr/1Mo Çeliğı (%1C)	5	0.10	102-97
Mart.Yüksek Cr/Mo Beyaz D.D.	6	0.08-0.035	85-90
Martensitik 26 Cr Beyaz D.D.	7	0.17-0.009	96-100
Martensitik Az Alaşımli Cr/Ni D.D.	8	-	105-116
Perlitik Çil Uygulanmış D.D.	9	0.40	115-200

Yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirli bileşimindeki krom içeriği nedeni ile iyi bir korozyon direncine sahiptir. Mikroyapıdaki sert ötektik karbürler mükemmel aşınma direncinin nedenidir.

Mikroyapıdaki karbürlerin hacim oranı ve morfolojisi çok önemlidir. Genellikle mikroyapıdaki karbür oranı arttıkça aşınma direnci artmaktadır. Bununla birlikte matris çatlayan ve deforme olan karbürleri yeterli kuvvetle yerinde tutarsa karbürler aşınma direncini etkiler [34].

Şekil 5.8'de çeşitli malzemeler karbon içeriklerine ve mikroyapılarına göre gruplandırılmıştır. Bu iki faktör geniş bir malzeme grubunda aşınma direncini belirler.



- 1- % 12 Mn içeren çelik, 1a 6Mn/1Mo çeliği, 2-Perlitik çelik, 3-Su verilip, temperlenmiş ham çelik,
4-Su verilip temperlenmiş Cr/Mo çeliği, 5-Sertleştirilmiş 15Cr/Mo dökme demiri,
6- 12-20Cr/Mo dökme demirin döküm hali, 7-Sertleştirilmiş 26Cr dökme demiri,
8- 6Ni/9Cr dökme demiri, 9-Perlitik beyaz dökme demir

ŞEKİL: 5.8.Çeşitli Malzemelerin Karbon İçeriğine Göre Aşınma Direnci [6].

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

- 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 mikro çatlaklar oluşması ve çatlaman karbürlerin kopması,
- 5)- Karbürlerin yorulma nedeniyle çatlayıp kopması.

5.6. Yüksek Krom-Molibdenli 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 matrisde yer alan karbürlerin yapısıdır.

5.6.1. 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 [11,14].

5.6.2. 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 özelliklerle ferritik matrisde etkin olmaktadır.

Perlitik matris en düşük aşınma direncine sahip olduğu için beyaz dökme demirlerde perlitik yapı istenmez.

Matrisin aşınma direnci, aşınma sırasındaki gerilmelere bağlıdır.

Matrisin bileşimindeki karbon arttıkça mikro sertlik ve buna bağlı olarak aşınma direnci artar. Ancak düşük gerilmeli aşınma ortamlarında sertlik belli bir değere geldikten sonra mikrosertlik artışı aşınma direncini etkilemez [6,7,11,14].

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

M_s sıcaklığını aşırı yükseltecek bir işlem martensitik karbonunu azaltıp sertliğini düşüreceği için aşınma direncini düşürür. M_s sıcaklığı ile beraber M_f sıcaklığı da düşeceği için mikro yapıdaki kalıntı ostenit miktarı artar, sertlik düşer. Yüksek gerilmeler altında ostenit martensite dönüşerek hacimsel genleşmelerin oluşmasına ve bunun sonucu oluşan gerilmeler nedeniyle mikrogatlaklara neden olur [6,11,14,17].

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Deneyisel çalışmalarda bileşiminde genel olarak % 2.8 3.6 C, %1.8-3.0 Mo ,% 14.70-18.0 Cr, % 0.4-0.5 Ni, % 0.5-0.8 Si, % 0.5-0.8 Mn den oluşan yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demirler ile Ni-Hard IV kullanılmıştır. Tablo 6.1'de kullanılan malzemelerin spektral analiz ile belirlenen kimyasal bileşimleri ve Cr/C oranları verilmiştir.

6.2. Isıl İşlemler

Kimyasal bileşimleri Tablo 6.1'de verilen malzemelere döküm sonrasında sertleştirmek amacı ile önce ostenitleme işlemi uygulanmıştır. Ostenitleme kontrollü koşullarda iki kademeli olarak yapılmıştır. Örnekler önce 700°C'ye kadar iki saatte ısıtılmış ve bu sıcaklıkta yarım saat beklendikten sonra ostenitleme sıcaklığına çıkılmıştır. Ostenitleme 840°C-1100°C sıcaklıkları arasında 20 dakika-4 saat süresince yapılmıştır. Ostenitleme sonrasında farklı soğutma hızları elde etmek amacı ile örnekler suda, yağda, havada, fırında ve fanda soğutulmuştur. Daha sonra örnekler 200°C-500°C arasındaki sıcaklıklarda 4-6 saatlik sürelerde temperleme yapılmıştır. Tablo 6.1'de kimyasal bileşimi verilen örnekler uygulanan ısıtıl işlem koşulları Tablo 6.2'de belirtilmiştir.

TABLO: 6.1. Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Malzemelerin Spektral Analizleri İle Belirlenen Kimyasal Bileşimleri ve Cr/C Oranları

Örnek No	Sertlik, Rc	% Kimyasal Bileşim										Cr/C
		C	Mo	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	Cu	V	
1	64	3.43	2.91	14.87	0.46	0.53	0.50	0.03	0.02	0.15		4.33
2	66	3.34	2.89	14.85	0.47	0.53	0.49	0.29	0.03	0.15		4.46
3	68	3.21	2.74	14.36	0.44	0.51	0.47	0.02	0.02	0.15		4.47
4	62	3.40	2.89	14.76	0.47	0.54	0.50	0.03	0.02	0.15		4.34
5	65	3.22	2.80	14.37	0.45	0.51	0.46	0.03	0.02	0.16		4.46
6	61	3.23	2.62	14.72	0.43	0.57	0.50	0.02	0.02	0.14		4.56
7	63	3.12	2.85	14.91	0.46	0.49	0.54	0.03	0.03	0.16		4.78
8	63	2.82	2.73	14.28	0.45	0.52	0.48	0.02	0.03	0.16		5.09
9	63	3.04	2.80	14.42	0.44	0.51	0.48	0.02	0.03	0.16		4.74
10	62	3.04	2.81	14.76	0.46	0.50	0.54	0.04	0.02	0.16		4.85
11-25	60	3.56	2.78	15.11	0.50	0.88	0.59	0.02	0.02	0.15	0.10	4.24
26	64	3.38	2.28	18.50	0.38	0.75	0.61	0.02	0.02	0.07	0.08	5.47
27	65	1.58	0.37	12.36	0.32	0.82	0.69	0.08	0.03	0.11	0.04	7.82
28	42	2.34	0.38	9.80	3.57	1.39	0.58	0.04	0.01	0.22	0.05	4.18

11-25 nolu örnekler aynı kimyasal bileşimdeki malzeme-ye ait olup Tablo 6.2'de belirtilen farklı ısıl işlemler uygulanmıştır.

TABLO: 6.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Örneklerle Uygulanan Isıl İşlem Koşulları

Örnek No	Malzeme Adı, Ostenitleme Sıcaklığı ve Süresi	Su Verme Ortamı	Temperleme Sıcaklığı ve Süresi
1	15Cr3Mo/940 °C/20 dak	Fan ile Soğ.	-
2	15Cr3Mo/940 °C/1 saat	Fan ile Soğ.	-
3	15Cr3Mo/940°C/20 dak.	Fan ile Soğ.	-
4	15Cr3Mo/1000°C/0.5 saat	Fan ile Soğ.	-
5	15Cr3Mo/1000°C/20 dak.	Fan ile Soğ.	-
6	15Cr3Mo/1100 °C/2 saat, 1000°C/0.5 saat	Fan ile Soğ.	-
7	15Cr3Mo/1100 °C/2 saat, 1000°C/0.5 saat	Fan ile Soğ.	-
8	15Cr3Mo/1100 °C/2 saat, 1000°C/0.5 saat	Fan ile Soğ.	500 °C/6 saat
9	15Cr3Mo/1100 °C/2 saat, 1000°C/0.5 saat	Fan ile Soğ.	500 °C/6 saat
10	15Cr3Mo/1100 °C/2 saat, 1000°C/0.5 saat	Fan ile Soğ.	500 °C/6 saat
11	15Cr3Mo/1000 °C/2 saat	Hava	-
12	15Cr3Mo/1000 °C/2 saat	Su	-
13	15Cr3Mo/1000 °C/2 saat	Fırın	-
14	15Cr3Mo/1000 °C/2 saat	Yağ	-
15	15Cr3Mo/1000 °C/3 saat	Hava	-
16	15Cr3Mo/1000 °C/3 saat	Fırın	-
17	15Cr3Mo/1000 °C/4 saat	Su	-
18	15Cr3Mo/1000 °C/4 saat	Hava	-
19	15Cr3Mo/1000 °C/4 saat	Hava	200°C/4 saat
20	15Cr3Mo/1000 °C/4 saat	Hava	250°C/4 saat
21	15Cr3Mo/1000 °C/4 saat	Hava	300°C/4 saat
22	15Cr3Mo/1000 °C/4 saat	Hava	350°C/4 saat
23	15Cr3Mo/1000 °C/4 saat	Hava	400°C/4 saat
24	15Cr3Mo/1000 °C/4 saat	Hava	450°C/4 saat
25	15Cr3Mo/Döküm Hali	-	-
26	18Cr3Mo/lthal B.D.D.	-	-
27	12Cr'lu Beyaz Dökme Demir *	-	-
28	Ni-Hard IV	-	-

6.3. Metalografik Çalışmalar ve Sertlik Deneyleri

Tablo 6.1'de kimyasal bileşimlere ve Tablo 6.2'de ısıtılma işlem koşulları belirtilen malzemelerin mikroyapılarını saptamak amacı ile metalografik çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla örnekler optik mikroskop ve SEM'de incelenmiştir.

Örneklerin Misawa Seiki Seisakuho markalı Rockwell sertlik ölçüm cihazında Rockwell C cinsinden sertlikleri ölçülmüştür. Her örnek için ortalama 4 ölçüm yapılmış ve bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır.

6.4. Aşınma Deneyleri

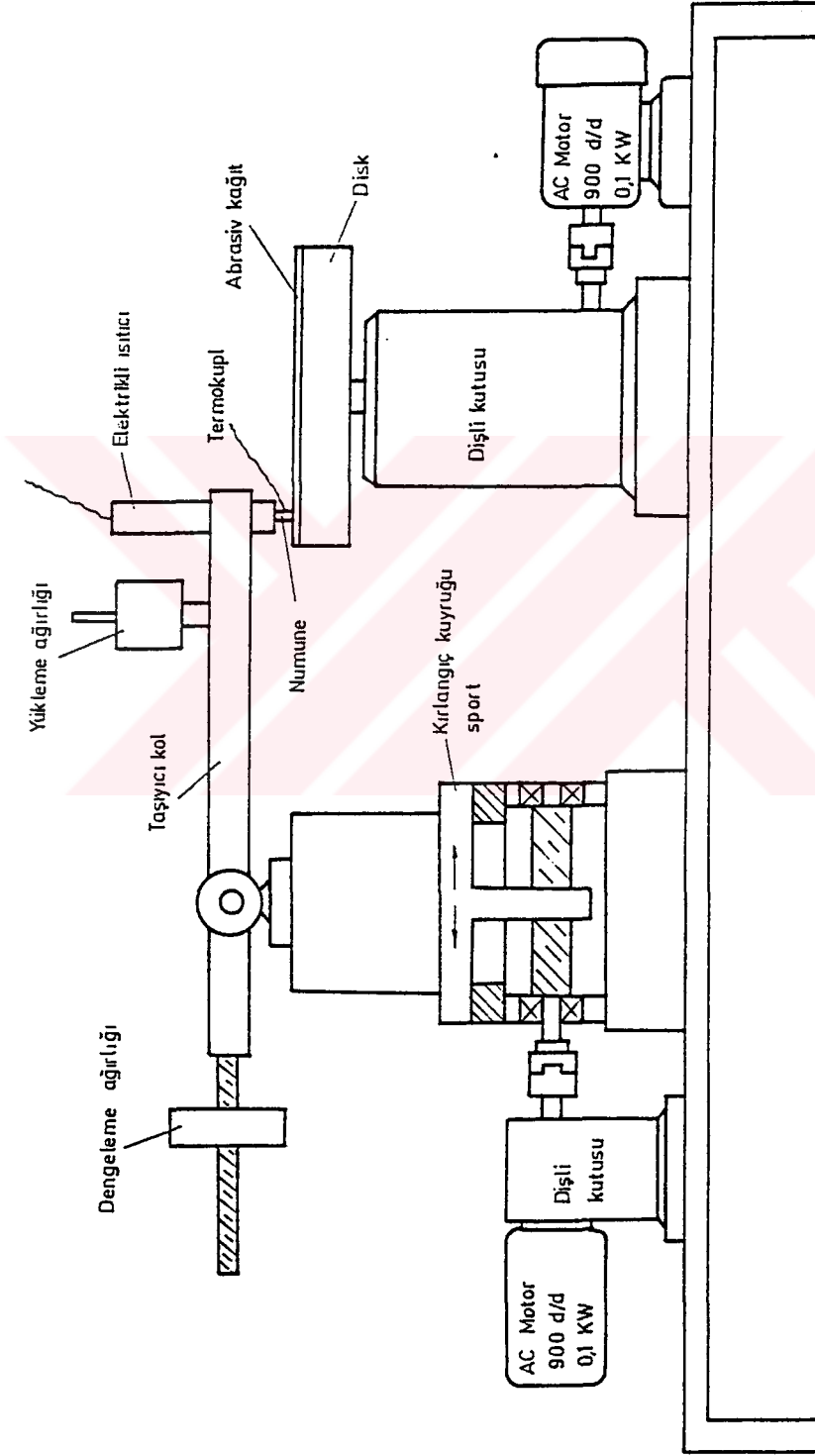
Aşınma deneyleri Şekil 6.1'de görülen abrasiv aşınma esasına uygun deney cihazında yapılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında, disk üzerine yerleştirilen aşındırma taşı ile yapılmıştır.

Her deneyden önce örnekler parlatılmıştır. Deneyden önce aşınma numuneleri 10^{-4} gr hassasiyete sahip terazide tartılmıştır. Daha sonra numuneler cihaz üzerindeki hazneye yerleştirilmiştir. Aşınma deneyleri 100 N'luk basma yükü veya 1.62 MPa basma gerilmesi altında yapılmıştır.

Deney sırasında aşınma diskinin hızı 100 dev/dak. olup aşınma deneyleri, 50 m ve 100 m kayma yolu için yapılmıştır.

Deneyler bittikten sonra numuneler tekrar tartılmış ve deney öncesi ile deney sonrasındaki ağırlık farkı hesaplanmıştır. Aşınmada oluşan ağırlık farkından (ΔG) yola çıkılarak bölüm 5'deki 5.1 ve 5.2 nolu formüller kullanılarak W_a (aşınma oranı) ve W_r aşınma direnci değerleri hesaplanmıştır.

Aşınma deneylerinden sonra örneklerin aşınan yüzeyleri SEM'de incelenmiştir.



ŞEKİL: 6.1. Aşınma Deneylerinin Yapıldığı Cihazın Şematik Görünüşü

BÖLÜM 7. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

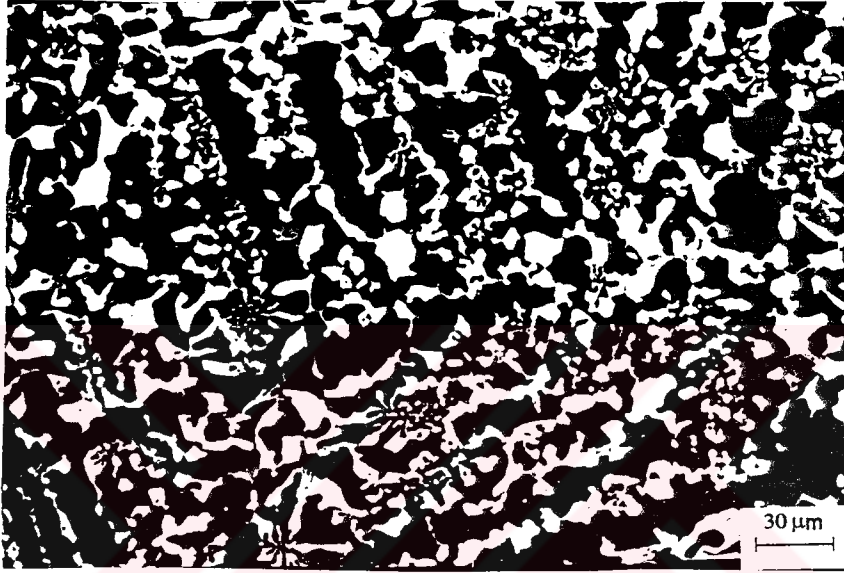
7.1. Metalografik İnceleme ve Sertlik Deneyi Sonuçları

Tablo 6.2'de verilen işlemler uygulanmış malzemelerin sertlik (R_c) değerleri Tablo 7.1'de mikroyapıları Şekil 7.1-28'e kadar fotoğraflarda verilmiştir.

TABLO: 7.1. Isıl İşlem Uygulanmış Örneklerin R_c Sertlik Değerleri

Örnek No	Cr/C	Sertlik Rc
1	4.33	64
2	4.46	66
3	4.47	68
4	4.34	62
5	4.46	65
6	4.56	61
7	4.78	63
8	5.09	63
9	4.74	63
10	4.85	62
11	4.24	60
12	4.24	61
13	4.24	56
14	4.24	57
15	4.24	65
16	4.24	58
17	4.24	65
18	4.24	64
19	4.24	62
20	4.24	61
21	4.24	60
22	4.24	58
23	4.24	58
24	4.24	52
25	4.24	64
26	5.47	64
27	7.82	65
28	4.18	42

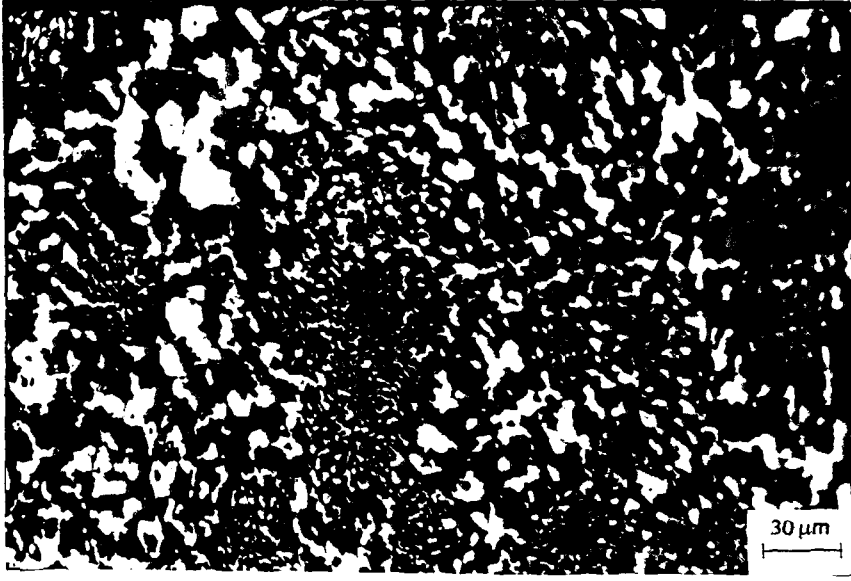
Şekil 7.1-7.28'deki optik mikroyapı fotoğraflarına göre beyaz dökme demirlerin (Örnek no:1-27) genellikle martensit+primer karbür, Ni-Hard IV olarak isimlendirilen 28 No'lu örneğin mikroyapısının (Şekil 7.28) östenit + primer karbürlerden ibaret olduğu saptanmıştır.



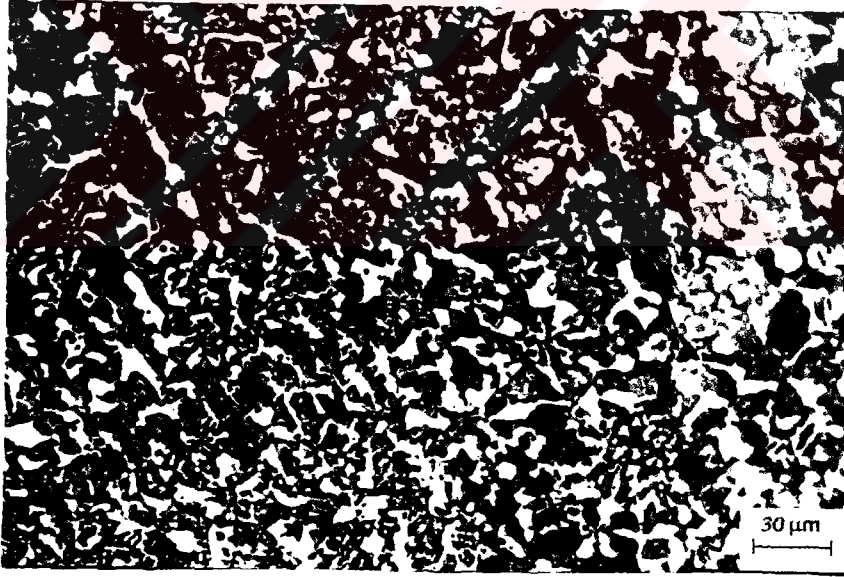
ŞEKİL: 7.1. 940°C'de 20 Dakika Östenitlenip Fanla Soğutulan Örnek No 1'in Mikro Yapısı



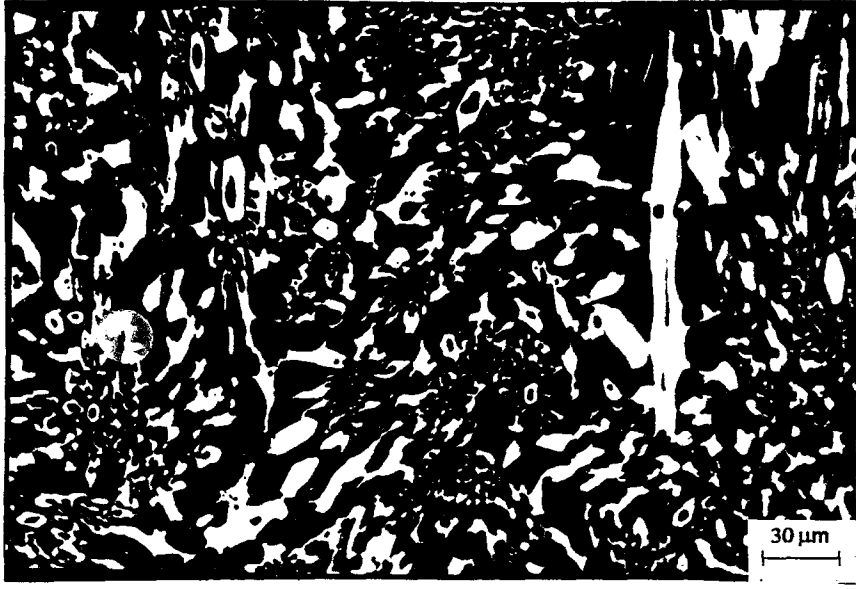
ŞEKİL: 7.2. 940°C'de 1 Saat Östenitlehip Fanla Soğutulan Örnek No 2'nin Mikro Yapısı



ŞEKİL: 7.3. 940°C'de 20 Dakika Ostenitleme Yapılıp
Fanla Soğutulan Örnek No 3'ün Mikro
Yapısı



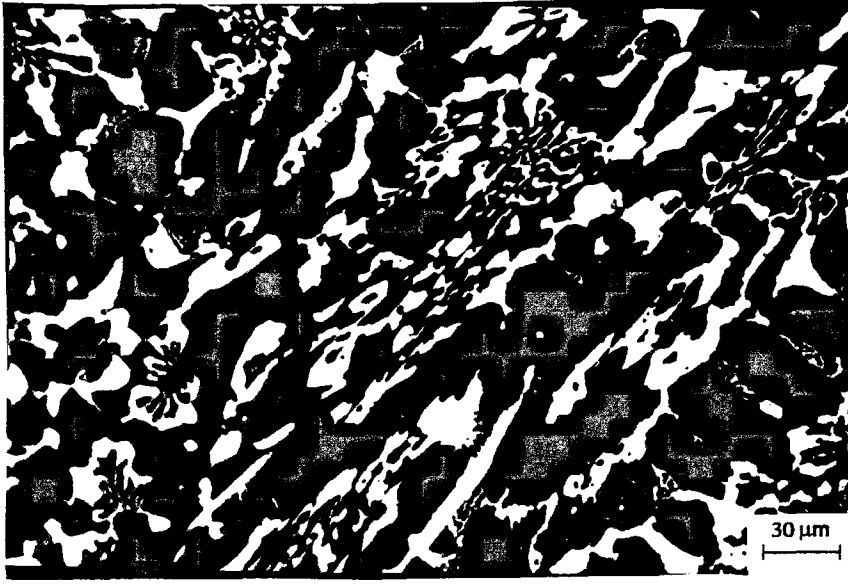
ŞEKİL: 7.4. 100°C'de 0.5 Saat Ostenitleme Yapılıp
Fanla Soğutulan Örnek No 4'ün Mikro
Yapısı



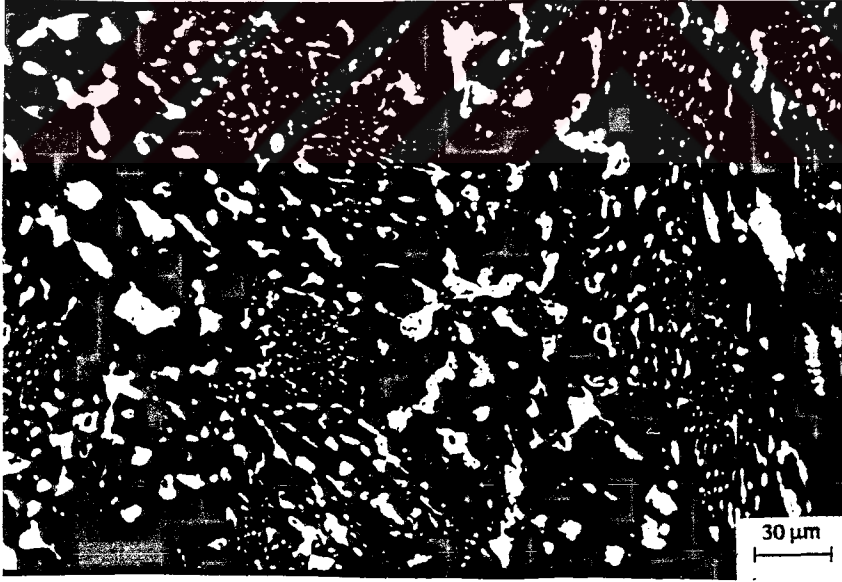
ŞEKİL: 7.5. 1000°C'de 20 Dakika Östenitleme Yapılıp Fanla Soğutulan Örnek no 5'in Mikroyapısı



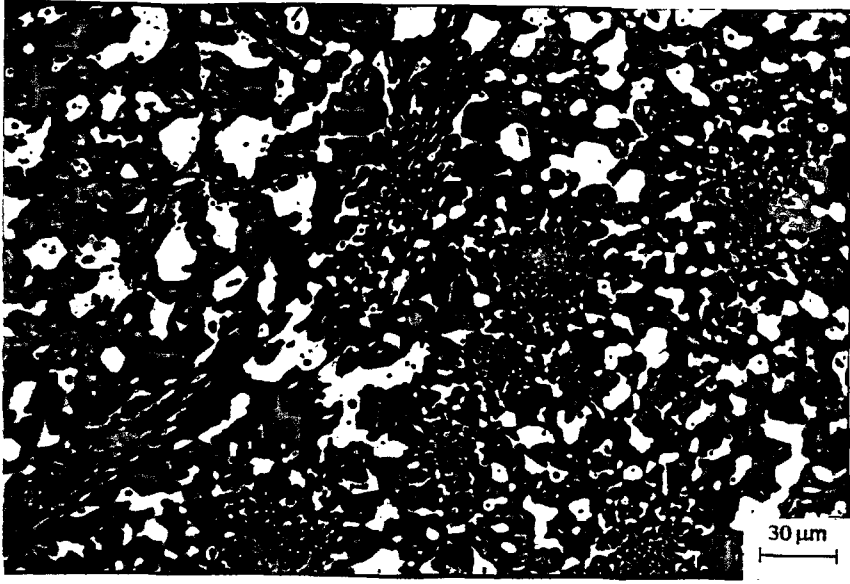
ŞEKİL: 7.6. 1100°C'de 2 Saat ve 1000°C'de 0.5 Saat Östenitleme Yapılıp Fanla Soğutulan Örnek No 6'nın Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.7. 1100°C'de 2 Saat ve 1000°C'de 0.5 Saat
Ostenitleme Yapılıp Fanla Soğutulan
Örnek No 7'nin Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.8. 1100°C'de 2 Saat ve 1000°C'de 0.5 Saat
Ostenitleme Yapılıp Fanla Soğutulduktan
Sonra 500°C'de 6 Saat Temperleme Yapılan
Örnek No 8'nin Mikroyapısı



ŞEKİL:7.9. 1100°C'de 2 Saat ve 1000°C'de 0.5 Saat
Ostenitleme Yapılıp Fanla Soğutulduktan
Sonra 500°C'de 6 Saat Temperleme Yapılan
Örnek No: 9'nun Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.10. 1100°C'de 2 Saat ve 1000°C'de 0.5
Saat Ostenitleme Yapılıp Fanla Soğu-
tulduktan Sonra 500°C'de 6 Saat Tem-
perleme Yapılan Örnek No:10'nun
Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.11. 1000°C'de 2 Saat Ostenitleme Yapılıp
Havada Su Verilen Örnek No 11'nin
Mikroyapısı



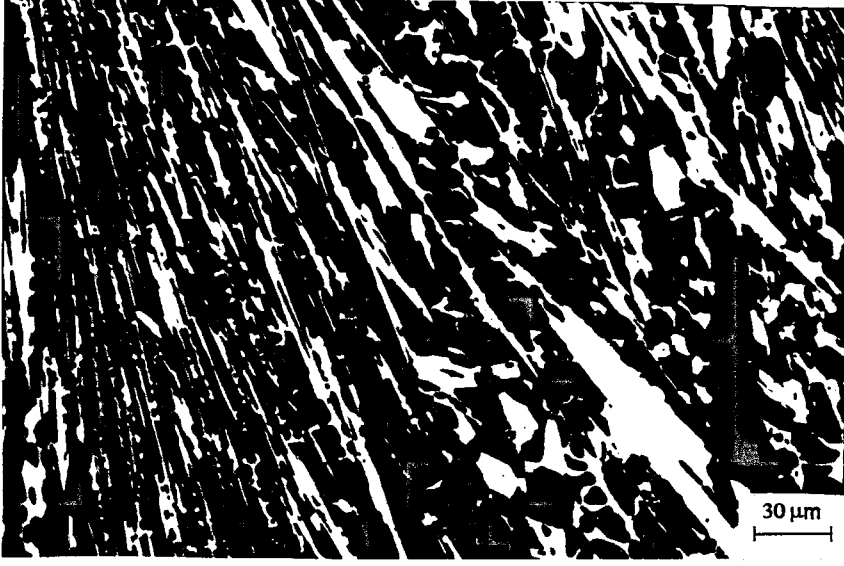
ŞEKİL: 7.12. 1000°C'de 2 Saat Ostenitleme Yapılıp
Suda Su Verilen Örnek No 12'nin
Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.13. 1000°C'de 2 Saat Ostenitleme Yapılıp Fırında Su Verilen Örnek No 13'nün Mikroyapısı



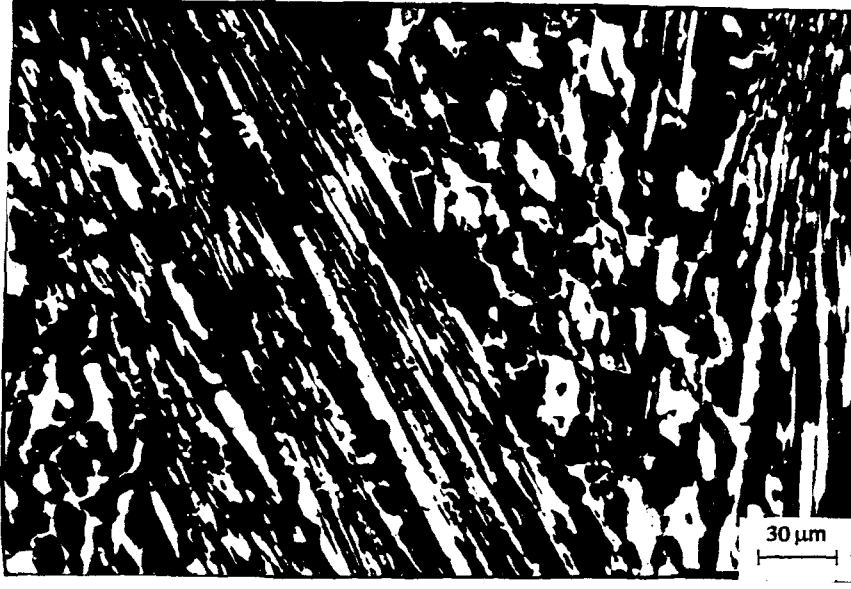
ŞEKİL: 7.14. 1000°C'de 2 Saat Ostenitleme Yapılıp Yağda Su Verilen Örnek No 14'nün Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.15. 1000°C'de 3 Saat Ostenitleme Yapılıp
Havada Su Verilen Örnek No 15'nin
Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.16. 1000°C'de 3 Saat Ostenitleme Yapılıp
Fırında Su Verilen Örnek No 16'nın
Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.17. 1000°C'de 4 Saat Ostenitleme Yapılıp
Suda Su Verilen Örnek No 17'nin
Mikroyapısı



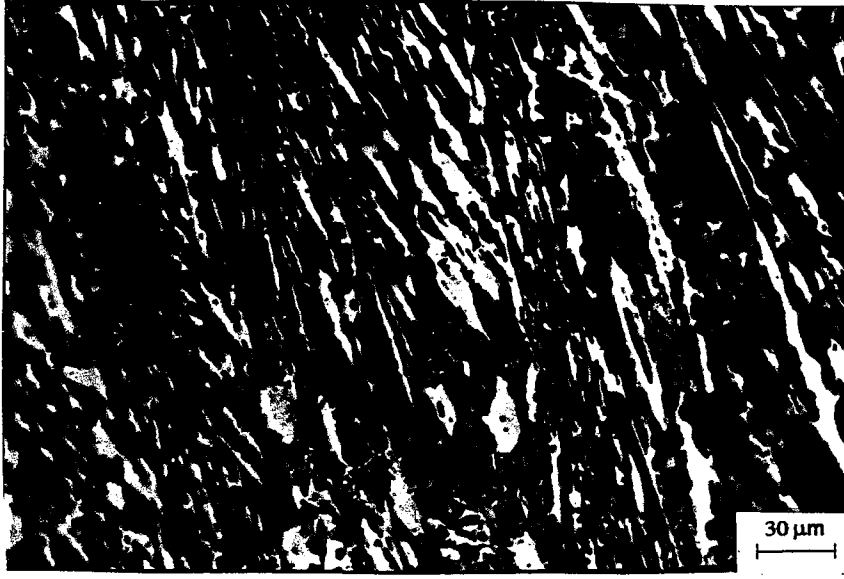
ŞEKİL: 7.18. 1000°C'de 4 Saat Ostenitleme Yapılıp
Havada Su Verilen Örnek No 18'nin
Mikroyapısı



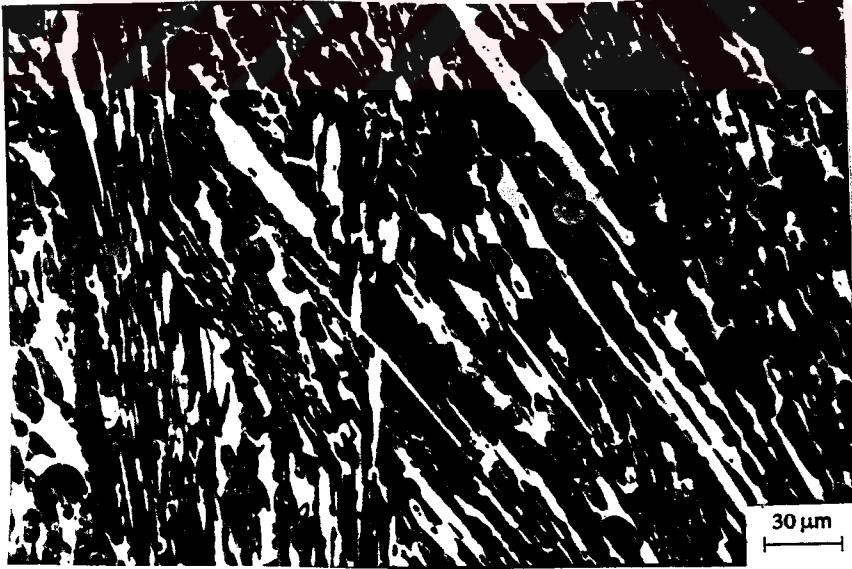
ŞEKİL: 7.19. 1000°C'de 4 Saat Ostenitleme Yapılıp
Havada Soğutulduktan Sonra 200°C'de
4 Saat Temperleme Yapılan Örnek No
19'nun Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.20. 1000°C'de 4 Saat Ostenitleme Yapılıp
Havada Soğutulduktan Sonra 250°C'de
4 Saat Temperleme Yapılan Örnek No
20'nin Mikroyapısı



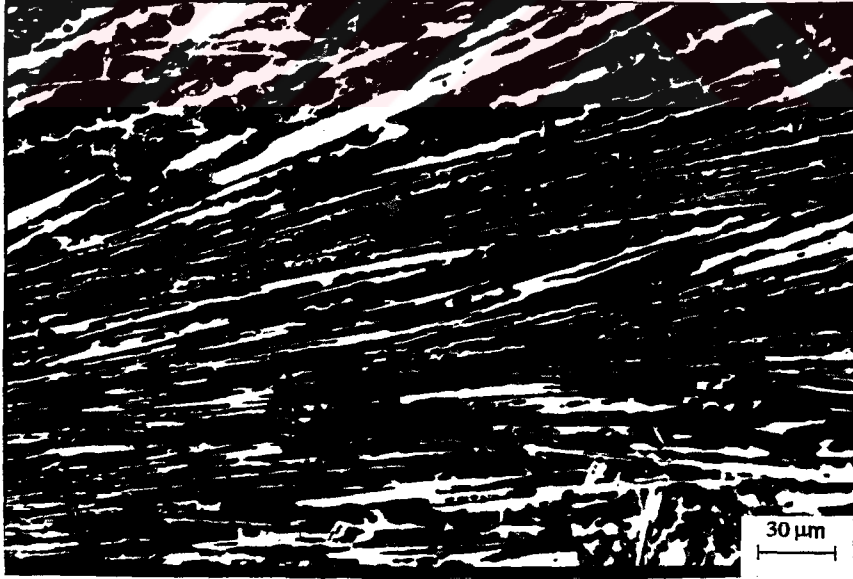
ŞEKİL: 7.21. 1000°C'de 4 Saat Ostenitleme Yapılıp
Havada Soğutulduktan Sonra 300°C'de
4 Saat Temperleme Yapılan Örnek No
21'nin Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.22. 1000°C'de 4 Saat Ostenitleme Yapılıp
Havada Soğutulduktan Sonra 350°C'de
4 Saat Temperleme Yapılan Örnek No
22'nin Mikroyapısı



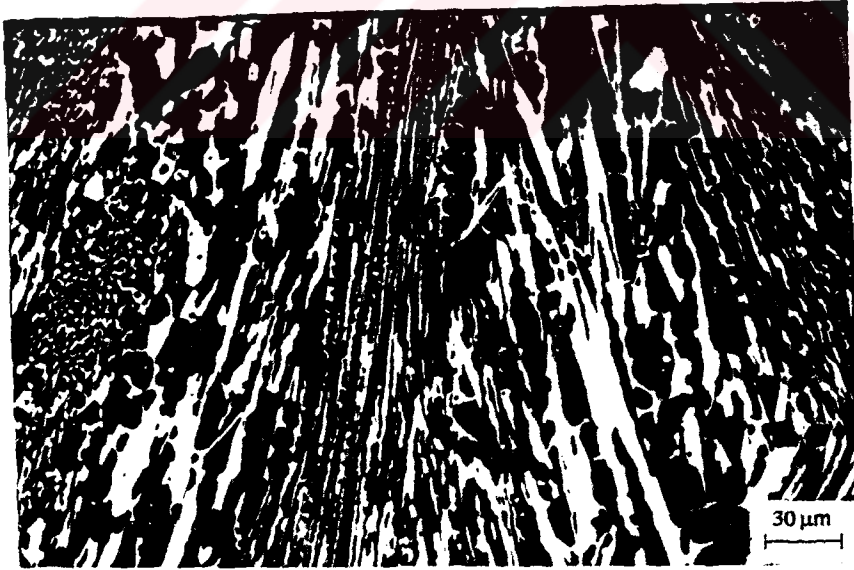
ŞEKİL: 7.23. 1000°C'de 4 Saat Ostenitleme Yapılıp
Havada Soğutulduktan Sonra 400°C'de
4 Saat Temperleme Yapılan Örnek No
23'nün Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.24. 1000°C'de 4 Saat Ostenitleme Yapılıp
Havada Soğutulduktan Sonra 450°C'de
4 Saat Temperleme Yapılan Örnek No
24'ün Mikroyapısı



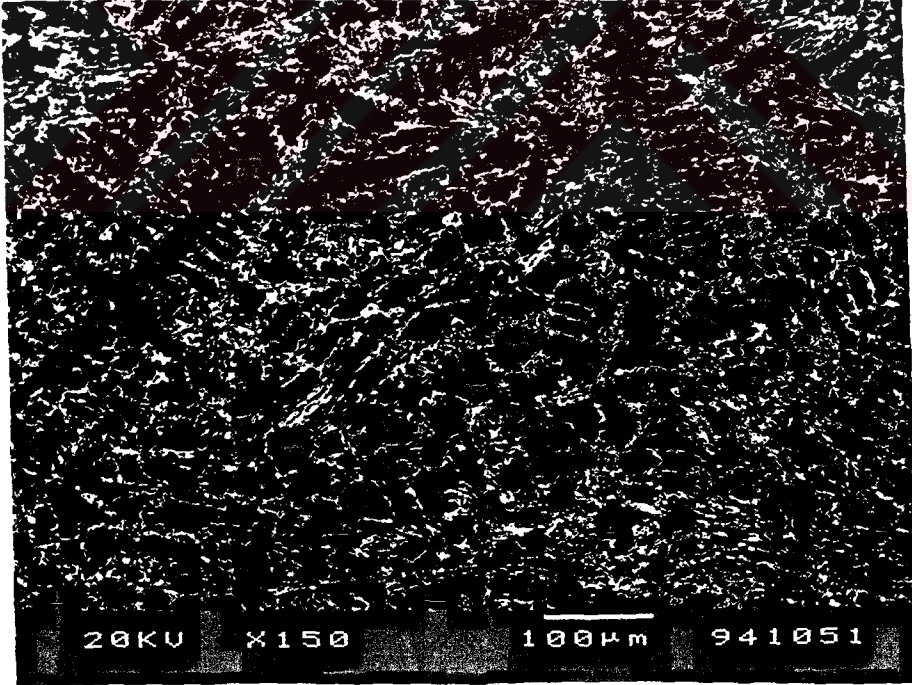
ŞEKİL: 7.25. Örnek No 25'nin Döküm Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.26. 18 Cr-3 Mo'li Beyaz Dökme Demirin
(Örnek No 26) Mikroyapısı

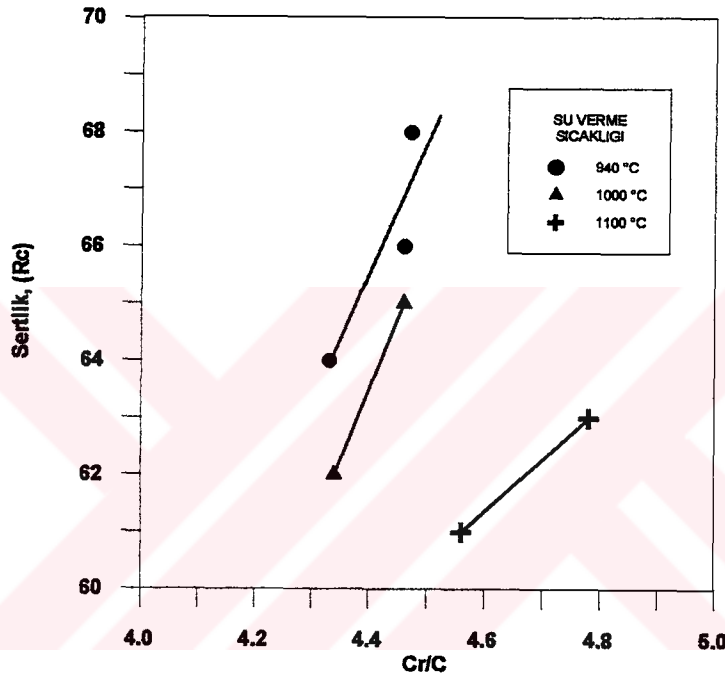


ŞEKİL: 7.27. 12 Cr'li Beyaz Dökme Demirin (Örnek No 27)
Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.28. Ni-Hard IV Beyaz Dökme Demirinin
(Örnek No 28) Mikroyapısı

Tablo 7.1'deki veriler yardımıyla çizilmiş olan Şekil 7.29'da Cr/C oranının su verilip fanda soğutulan örneklerin sertliğine etkisi görülmektedir. Cr/C oranı arttıkça örneklerin sertliği artmaktadır. (Şekil 7.29).



ŞEKİL: 7.29. Cr/C Oranının Su Verilip Fanda Soğutulan Örneklerin Sertliğine Etkisi.

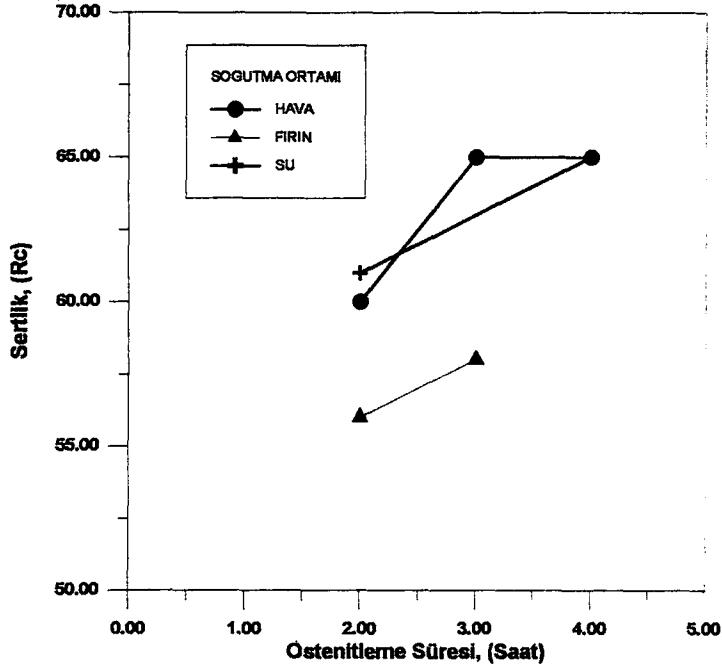
Sabit Cr/C oranı için ostenitleme sıcaklığının sertlik üzerindeki etkisi de Şekil 7.29'dan anlaşılmaktadır. Şekil 7.29'a göre ostenitleme sıcaklığı arttıkça sertlik düşme eğilimi göstermektedir. Su verme sıcaklığının sertlik üzerindeki etkisi ostenit içinde çözünen C ve Cr'nin çözünmesiyle ilgilidir. Başlangıçta yüksek karbon miktarı sertleşebilirliği ve su verme sonrasında oluşan martensitin sertliğini artırır. Bu olay karbondaki daha fazla artışın mikroyapıda kalıntı ostenit oluşturmaya kadar devam eder. Daha fazla karbon

artışı sertlik düşüsüne neden olur. Diğer bir değişle mikroyapıda kalıntı ostenit oluşumu ile sertlikte düşme görülür (Şekil 4.11). Beyaz dökme demirlerde su verme sonrasındaki sertliğe karbonun yanısıra krom da etki etmektedir. Krom miktarının artışıyla maksimum sertliğin elde edildiği ostenitleme sıcaklığı artmaktadır. Örneğin % 15 Cr içeren beyaz dökme demirler maksimum sertliğe 940-970°C arasında ulaşılmakta olup Şekil 7.29 buna uygunluk göstermektedir [6,7].

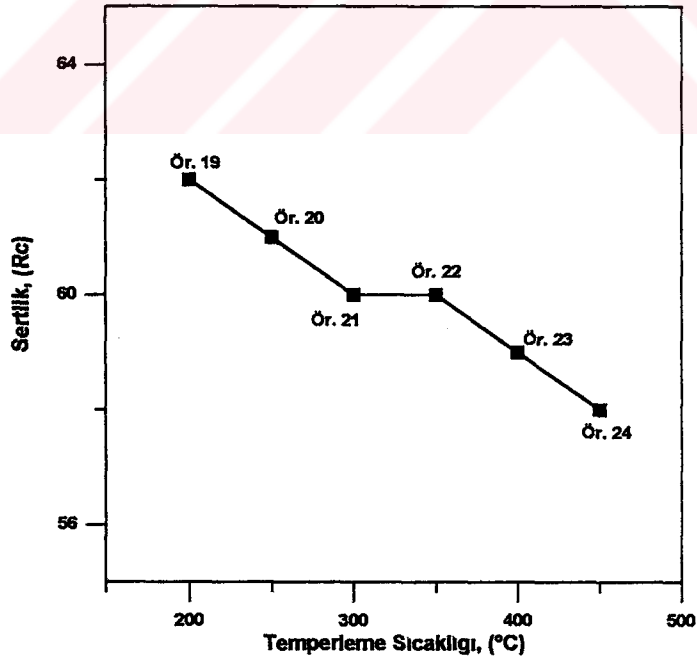
Örnek No: 11-18 için Tablo 7.1'deki değerlere göre çizilmiş olan Şekil 7.30'den ostenitleme süresi arttıkça sertliğin de arttığı anlaşılmaktadır. Bu olay ostenitleme süresinin artışıyla ostenitin kararlılığının azalması ve su vermeyle yapının tamamen martensite dönüşmesiyle ilgilidir [6.7].

Şekil 7.31'de, 18-24 nolu örneklerde Tablo 6.2'deki değerlere göre beklenildiği gibi temperleme sıcaklığının artışı ile sertlik azalmaktadır. Yüksek oranda kalıntı ostenit içeren alaşımlarda 400-600°C arasındaki sıcaklıklarda ikincil sertleşme olayı gözlenmiştir. Bu ikincil sertleşmenin nedeni kalıntı ostenitin kararlılığının azalmasıdır [6].

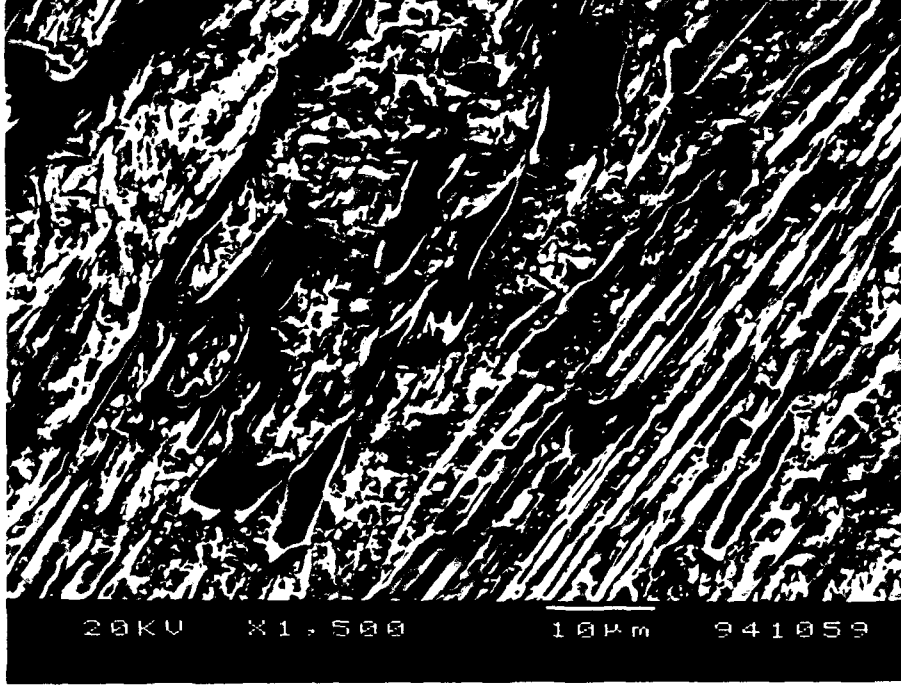
Temperlenmiş numunelerde daha önce belirtildiği gibi martensit ve karbür fazları mevcut olup Şekil 7.32'de bunların SEM'den alınan analizleri Tablo 7.2'de verilmiştir.



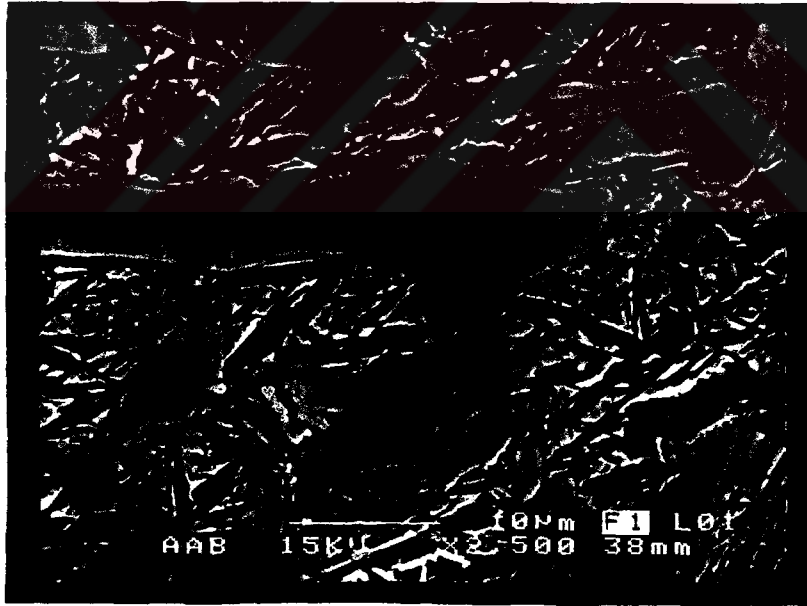
ŞEKİL: 7.30. Östenitleme Süresinin Örneklerin Sertliği Üzerindeki Etkisi



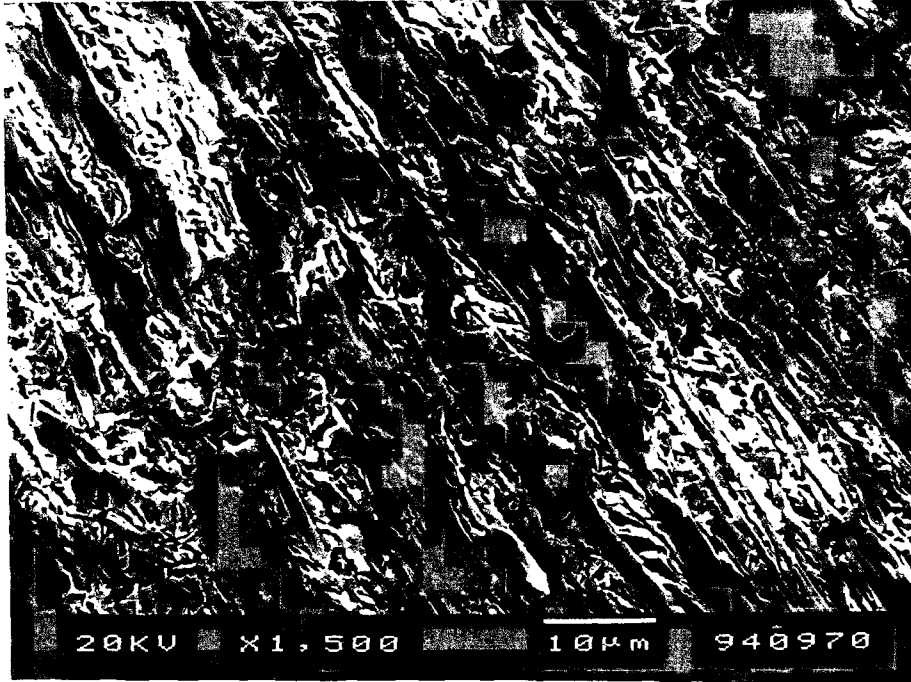
ŞEKİL: 7.31. Temperleme Sıcaklığının Isıl İşlem Uygulanan Örneklerin Sertliği Üzerindeki Etkisi



ŞEKİL: 7.32.a-1000°C'de 4 Saat Ostenitleme Yapılıp
Havada Soğutulduktan Sonra 200°C'de
4 Saat Temperleme Yapılan Örnek No 19'nun
Mikroyapısı



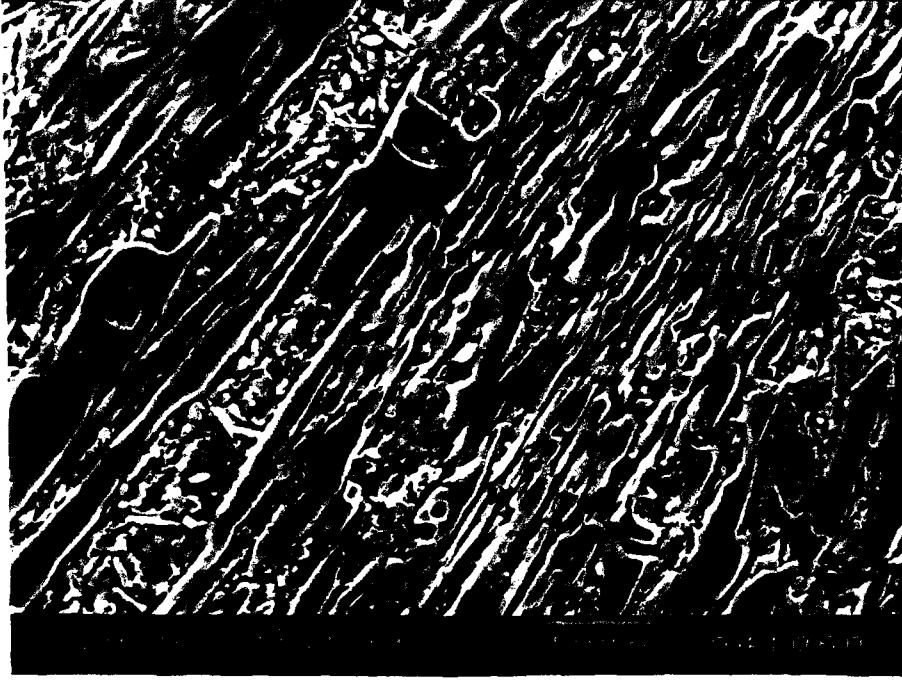
ŞEKİL: 7.32.b-1000°C'de 4 Saat Ostenitleme Yapılıp
Havada Soğutulduktan Sonra 250°C'de
4 Saat Temperleme Yapılan Örnek No
20'nin Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.32.c- 1000°C'de 4 Saat Ostenitleme Yapılıp
Havada Soğutulduktan Sonra 300°C'de
4 Saat Temperleme Yapılan Örnek No
21'nin Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.32.d- 1000°C'de 4 Saat Ostenitleme Yapılıp
Havada Soğutulduktan Sonra 350°C'de
4 Saat Temperleme Yapılan Örnek No
22'nin Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.32.e- 1000°C'de 4 Saat Ostenitleme Yapılıp
Havada Soğutulduktan Sonra 400°C'de
4 Saat Temperleme Yapılan Örnek No 23'
nün Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.32.f- 1000°C'de 4 Saat Ostenitleme Yapılıp
Havada Soğutulduktan Sonra 450°C'de
4 Saat Temperleme Yapılan Örnek No 24'ün
Mikroyapısı

Şekil 7.33'de ise Örnek NO:26'nın SEM fotoğrafı Tablo 7.3'de ise bu mikroyapıda bulunan fazların bileşimi verilmiştir.



ŞEKİL: 7.33. İthal Malzeme(Örnek No 26)'nın Mikroyapısı

Tablo 7.3'de örnek NO:26'nın mikroyapısında bulunan fazların bileşimleri verilmiştir.

Örnek NO:26 abrasiv aşınmaya dirençli üstün özelliklere sahip orjinal beyaz dökme demir olduğu için örnek no 1-25 söz konusu 26 nolu örneğin özelliklerini elde etmek amacı ile üretilmiştir. Bu açıdan bakıldığında mikroyapıları benzer olmasına rağmen orjinal olarak nitelendirilen fazların bileşimi Mo, Si, Cr, Ni ve Cu içerikleri açısından farklıdır.

Şekil 7.34, 7.35, 7.36'de soğuma koşullarının beyaz dökme demirin mikroyapısı üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Soğuma hızının düşmesiyle daha kaba yapılı beyaz dökme demir elde edilmektedir.

TABLO: 7.2. 250°C'de 4 Saat Temperlenmiş Beyaz Dökme Demir (Örnek NO:20) Mikroyapısında Bulunan Fazların Bileşimi (Kütlesel Sertlik=720 HV)

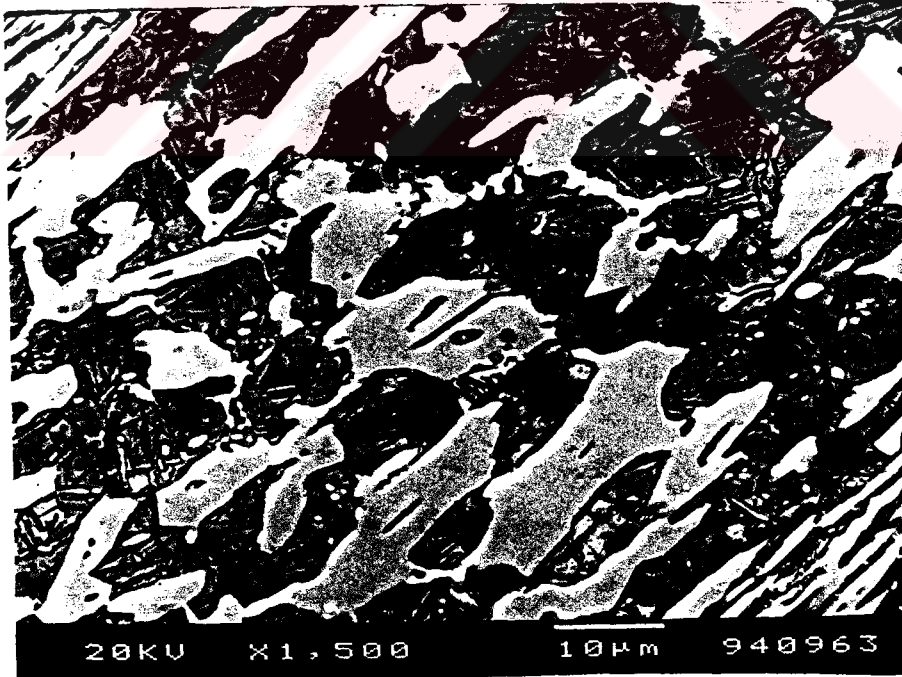
ELEMENT	KARBÜR (Sertlik=1200HV)		MATRİS (Sertlik=725HV)	
	% Atomik	% Ağırlık	% Atomik	% Ağırlık
Si	0.35	0.18	1.67	0.85
S	0.45	0.26	0.52	0.30
Mo	2.28	3.97	1.09	1.89
V	0.81	0.75	0.12	0.11
Cr	39.57	37.40	8.62	8.08
Mn	0.91	0.90	1.05	1.04
Fe	55.17	56.0	85.03	85.61
Co	-	-	-	-
Ni	0.23	0.25	0.62	0.65
Cu	0.25	0.29	1.29	1.47
P	-	-	-	-

TABLO: 7.3. Örnek NO: 26'nın Mikroyapısında Bulunan Fazların Bileşimleri (Kütlesel Sertlik=800 HV)

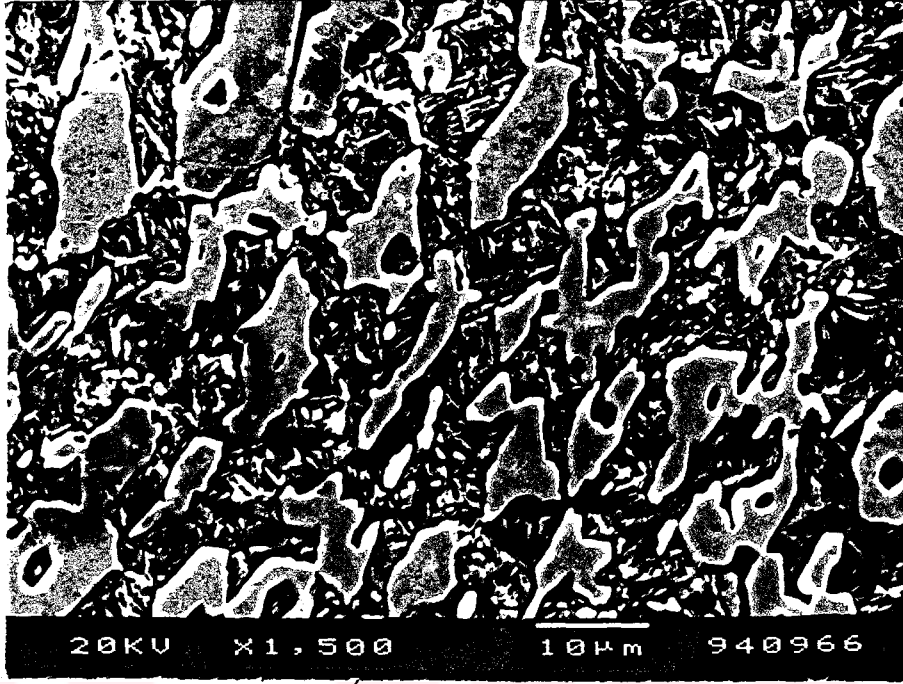
ELEMENT	KARBÜR (Sertlik=1550HV)		MATRİS (Sertlik=825HV)	
	% Atomik	% Ağırlık	% Atomik	% Ağırlık
Si	-	-	1.75	0.88
S	-	-	-	-
Mo	1.56	2.74	1.55	2.68
V	0.29	0.27	-	-
Cr	49.33	47.20	14.84	13.92
Mn	0.92	0.92	0.90	0.90
Fe	47.91	49.05	80.70	81.33
Co	-	-	-	-
Ni	-	-	0.18	0.19
Cu	-	-	0.09	0.10
P	-	-	-	-



ŞEKİL: 7.34. 1000°C'de 4 Saat Östenitleme Yapılıp
Suda Su Verilen Örnek No 12'nin
Mikroyapısı



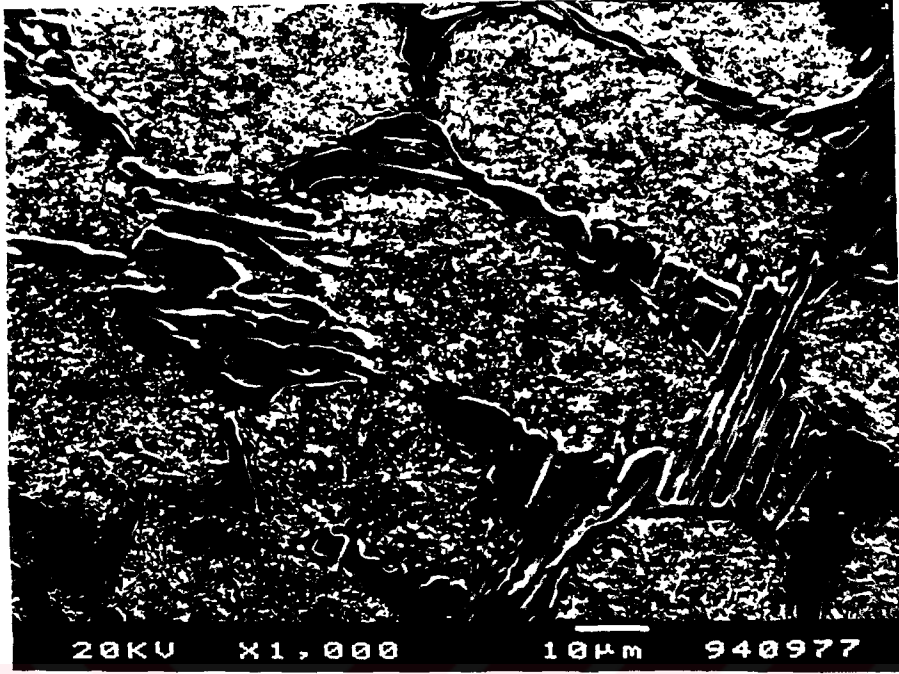
ŞEKİL: 7.35. 1000°C'de 2 Saat Östenitleme Yapılıp
Fırında Su Verilen Örnek-No 13'ün
Mikroyapısı



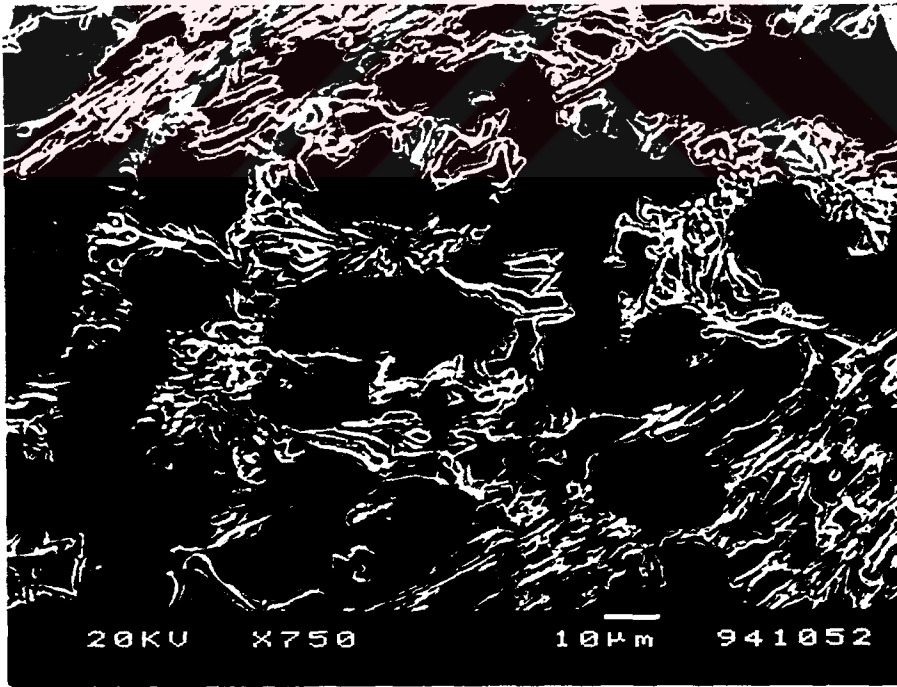
ŞEKİL: 7.36. 1000°C'de 2 Saat Ostenitleme Yapılıp Yağda Su Verilen Örnek No 14'ün Mikro-yapısı

Şekil 7.37'de Örnek No 27'nin SEM mikrografisi görülmektedir. Bu mikroyapıda karbürler tane sınırlarını segrege olmuştur.

Şekil 7.38'de Ni-Hard IV'ün SEM mikrografisi görülmektedir. Bu yapı diğerlerinden farklı olarak ostenit + primer karbürlerden ibarettir.



ŞEKİL: 7.37. Örnek No 27'nin (12 Cr'lu Beyaz Dökme Demir) Mikroyapısı



ŞEKİL: 7.38. Örnek No 28'in (Ni-Hard IV Beyaz Dökme Demiri) Mikroyapısı

7.2. Aşınma Deneyi Sonuçları ve İrdelenmesi

Tablo 6.1'de kimyasal bileşimleri verilen malzemelerin bir kısmı ile aşınma deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda Tablo 7.4'de verilen aşınma sonuçları elde edilmiştir.

TABLO: 7.4. Aşındırma Diski Üzerinde 1.62 kg/mm²'lik Baskı Altında Kayma Mesafesi S=50m ve S=100m İçin Yapılan Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Ağırlık Kaybı Değerleri

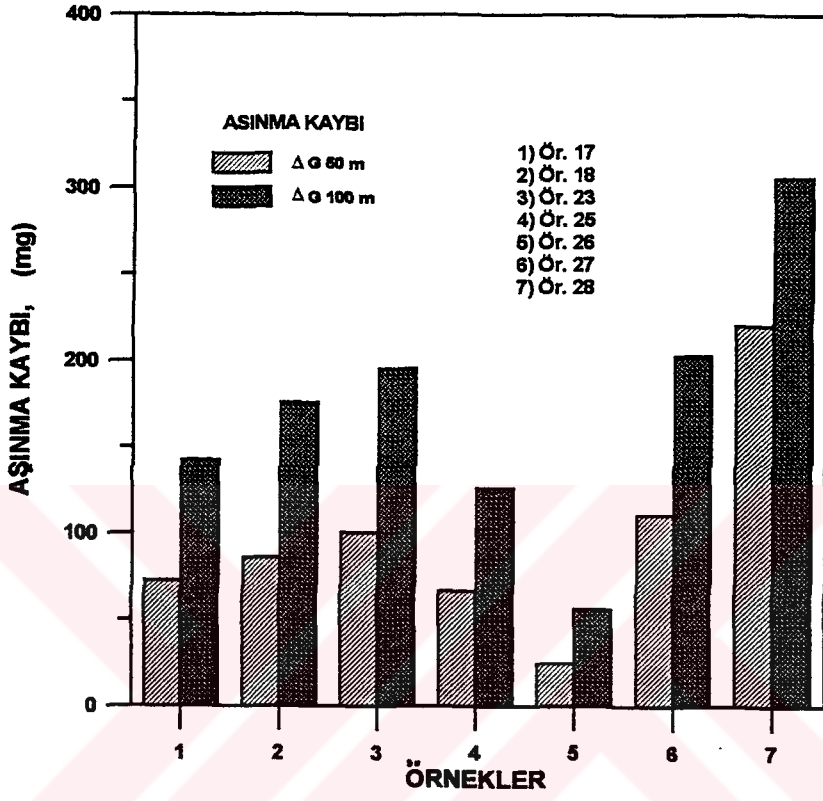
Örnek No	Sertlik, (Rc)	Aşınma Kaybı, ΔG (mg)			
		Kayma Mes.(50 m)		Kayma Mes.(100 m)	
		ΔG ₁	ΔG ₂	ΔG ₁	ΔG ₂
17	65	76.50	68.80	140.10	145.40
18	63	91.20	81.0	171.20	180.30
23	58	97.60	103.10	190.40	200.10
25	52	68.90	64.10	120.50	132.30
26	64	20.60	28.90	54.10	58.21
27	65	105.50	115.90	200.20	205.70
28	42	226.0	214.90	301.30	310.30

Tablo 7.4'deki değerler kullanılarak 5.1 ve 5.2 nolu denklemler ile hesaplanan ortalama aşınma oranları ve dirençleri Tablo 7.5'de verilmiştir.

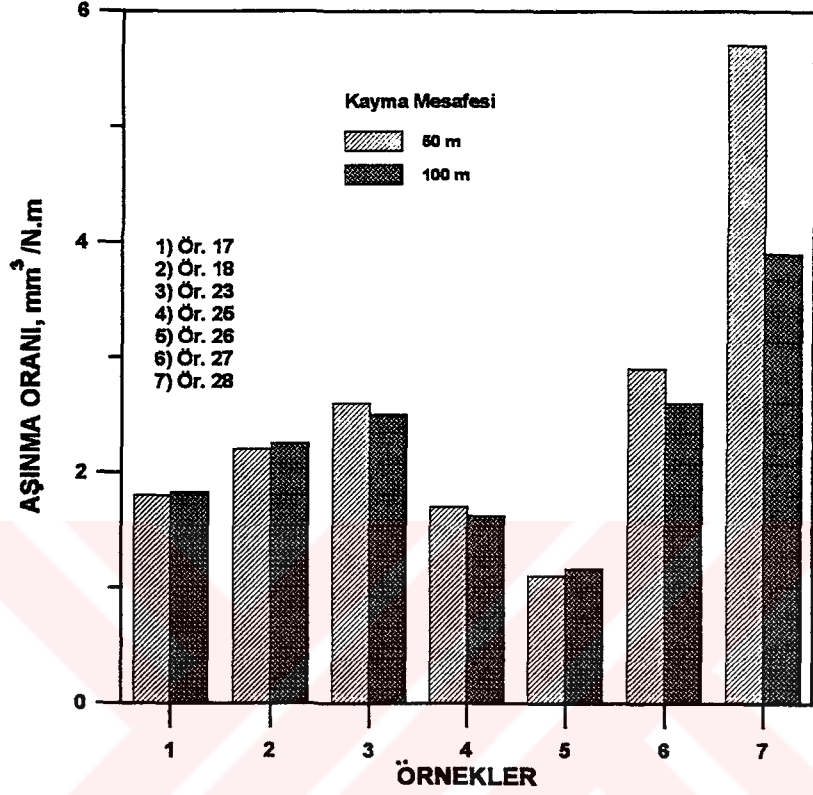
TABLO: 7.5. Aşınma Deneylerinde Kullanılan Malzemelerin Aşınma Oranları ve Aşınma Dirençleri

Örnek No	Sertlik, Rc	Cr/C	Kayma Mesafesi, 50 m.		Kayma Mesafesi, 100 m.	
			Aşınma Oranı, W_a	Aşınma Direnci, W_r	Aşınma Oranı, W_a	Aşınma Direnci, W_r
17	64	4.24	1.8×10^{-3}	538	1.83×10^{-3}	546
18	63	4.24	2.2×10^{-3}	455	2.25×10^{-3}	443
23	58	4.24	2.6×10^{-3}	385	2.50×10^{-3}	399
25	52	4.24	1.7×10^{-3}	588	1.62×10^{-3}	617
26	64	5.47	1.1×10^{-3}	913	1.16×10^{-3}	854
27	65	7.82	2.9×10^{-3}	352	2.60×10^{-3}	384
28	42	4.18	5.7×10^{-3}	177	3.90×10^{-3}	255

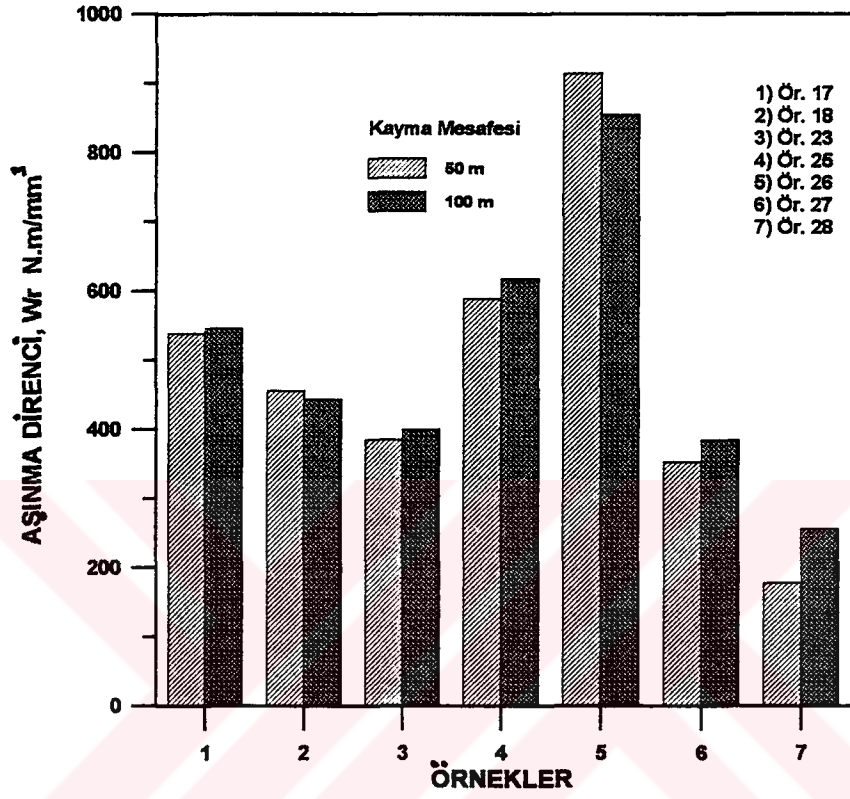
Şekil 7.39, 7.40, 7.41 'de Aşınma deneyi uygulanan malzemelerin aşınma kayıpları aşınma oranları ve aşınma dirençleri 50 ve 100 m'lik kayma mesafesi için bar diyagramı şeklinde gösterilmiştir.



ŞEKİL: 7.39. Aşınma Deneyi Yapılan Örneklerde Kayma Mesafesine Bağlı Olarak Aşınma Kaybı



ŞEKİL: 7.40. Aşınma Deneyi Yapılan Örneklerde Aşınma Oranının Kayma Mesafesine Bağlı Olarak Değişimi



ŞEKİL: 7.41. Aşınma Deneyi Yapılan Örneklerde Aşınma Direncinin Kayma Mesafesine Bağlı Olarak değişimi

Tablo 7.5'daki sonuçlar gözönüne alındığında sertliği 64 Rc olan ve özelliklerinin elde edilmesi amaçlanan örnek No 26 en yüksek aşınma direncine sahiptir. Örnek No 17,18,23,25 aynı Cr/C oranındaki dökümden alınmış malzemeler olup farklı ısıtıl işlem uygulanmış beyaz dökme demirlerdir. Buna göre ostenitleme ve/veya temperleme bu beyaz dökme demirin aşınma direncini olumsuz yönde etkilediği anlaşılmaktadır.

Hiçbir ısıtıl işlem uygulanmayan döküm yapısındaki örnek diğerlerinden daha düşük sertliğe sahip olmasına rağmen daha üstün aşınma direncine sahiptir. Bununla birlikte Örnek No 26'da daha düşük aşınma direncine sahiptir.

Isıtıl işlem uygulanan malzemelerin döküm yapısındaki malzemelerden daha düşük aşınma direncine sahip olmasının nedeni bileşim ve fazların farklılığından kaynaklanabilir.

Ayrıca ısıtıl işlem uygulanan malzemelerde ısıtıl işlem sırasında oluşan çatlaklar da aşınma direncini olumsuz yönde etkilemektedir.

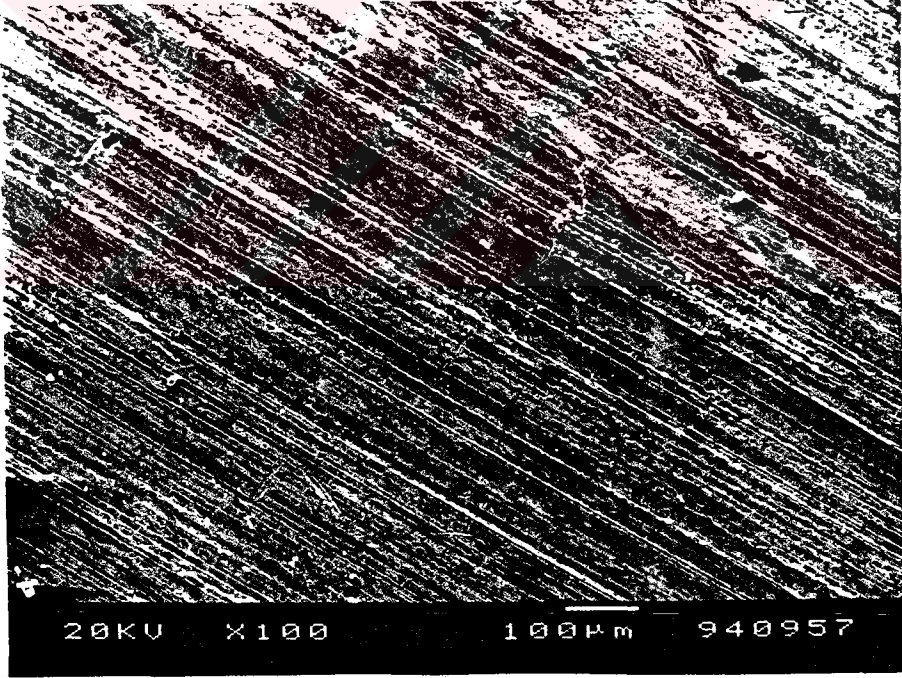
Aynı Cr/C oranına sahip örnekler içinde en düşük aşınma direnci 1000°C de 4 saat ostenitlenip havada su verilen ve 400°C'de 4 saat temperlenmiş malzemede (Örnek No 23) elde edilmiştir.

Tablo 7.1'de en düşük sertliğe sahip 28 nolu örnek olarak gösterilen ve Ni-Hard IV olarak adlandırılan malzeme, Tablo 7.5'de en düşük aşınma direncine sahiptir. Bu sonuç mikroyapıda sert martensit yerine daha düşük sertlikteki ostenit fazının bulunmasından kaynaklanmaktadır.

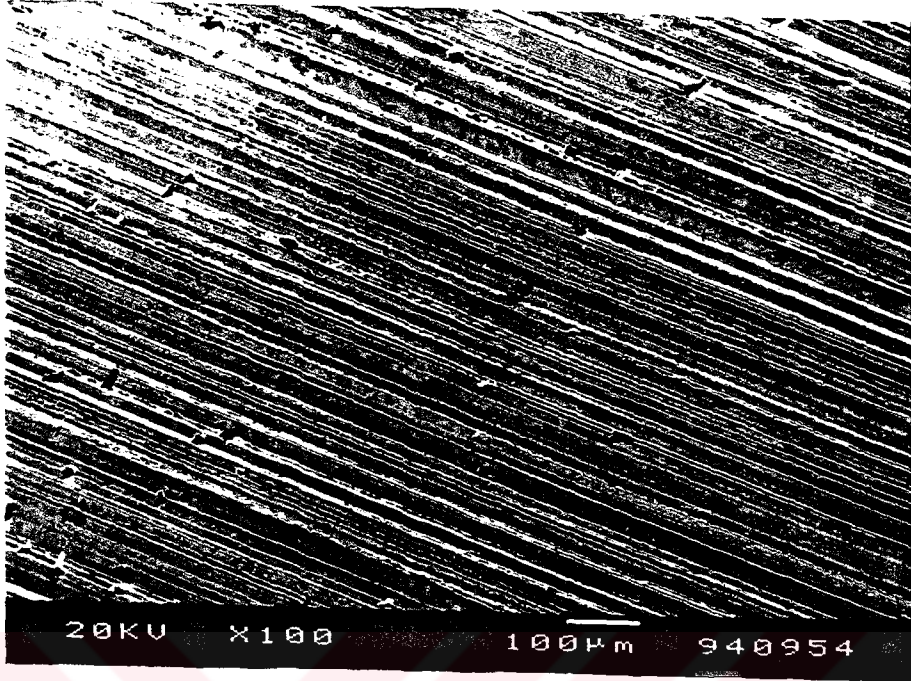
27 nolu örnek 26 nolu orjinal örnekten daha yüksek sertliğe sahip olmasına rağmen daha düşük aşınma direncine sahiptir. Bunun nedeni mikroyapıda daha az karbürlerin bulunması ve bu karbürlerin tane sınırlarında yoğunlaşmasıdır (Şekil 7.27 ve 7.38).

Şekil 7.42- 7.48'de Tablo 7.5''deki aşınma deneyi uygulanan örneklerin aşınma deneylerdinden sonraki SEM mikrografları verilmiştir.

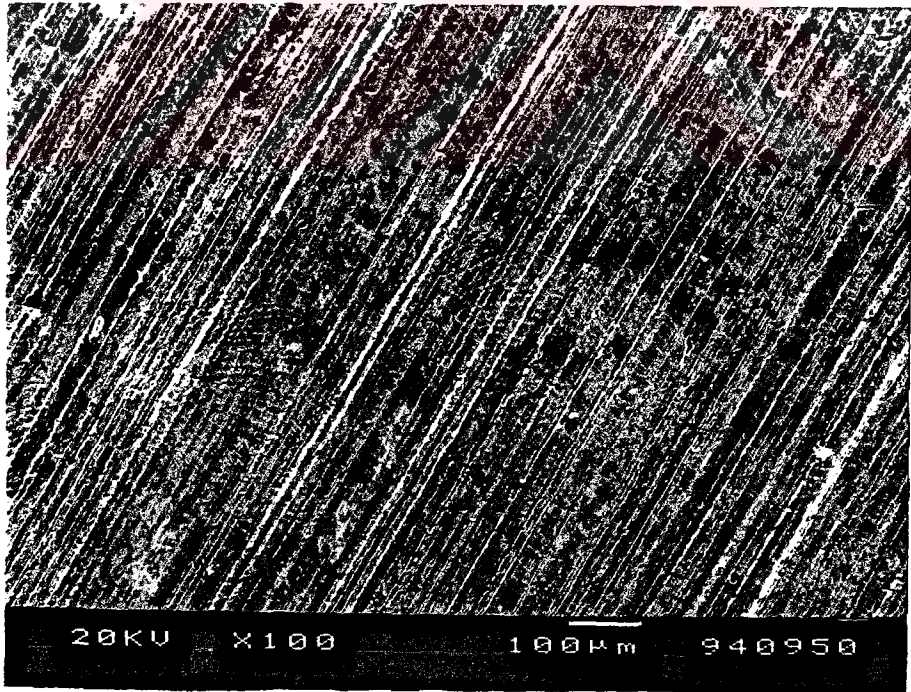
Aşınma deneyleri yapılan beyaz dökme demirlere ait Şekil 7.42-7.47 incelendiğinde aşınma direnci en düşük olan beyaz dökme demirlerin aşınma yüzeylerinin daha derin ve daha yoğun çizikli olduğu görülmektedir.



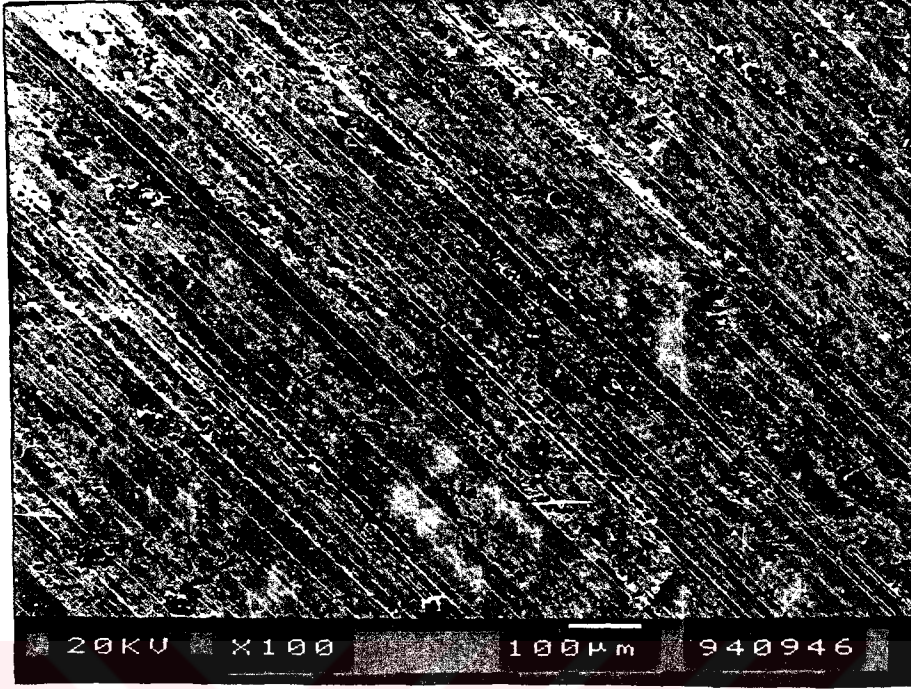
ŞEKİL: 7.42. Örnek NO: 17'nin Aşınmış Yüzeyi



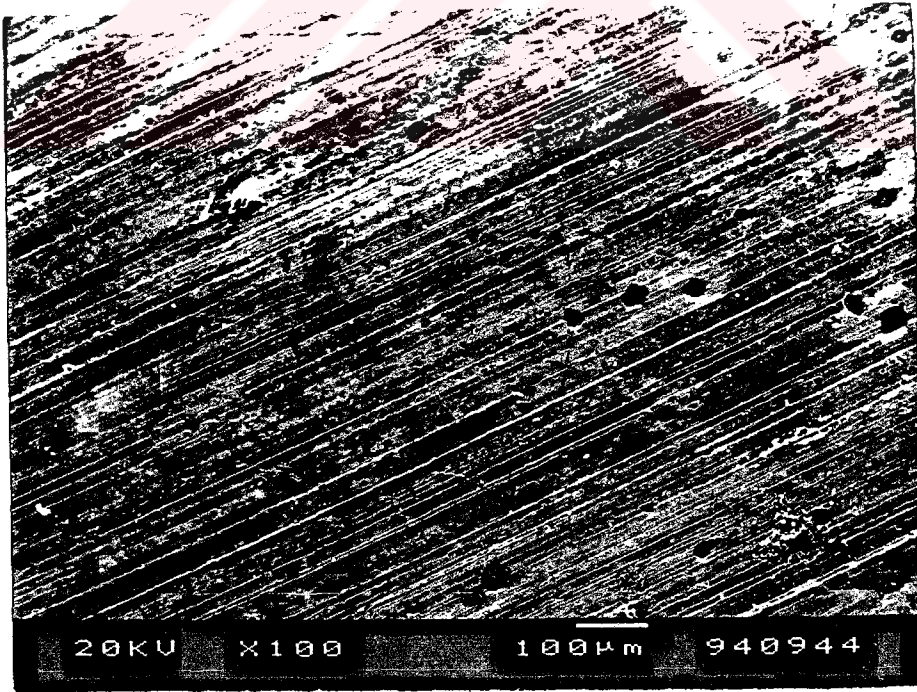
ŞEKİL: 7.43. Örnek NO: 18'in Aşınmış Yüzeyi



ŞEKİL: 7.44. Örnek NO: 23'un Aşınmış Yüzeyi



ŞEKİL: 7.45. Örnek NO: 25'in Aşınmış Yüzeyi



ŞEKİL: 7.46. Örnek NO: 26'nın Aşınmış yüzeyi

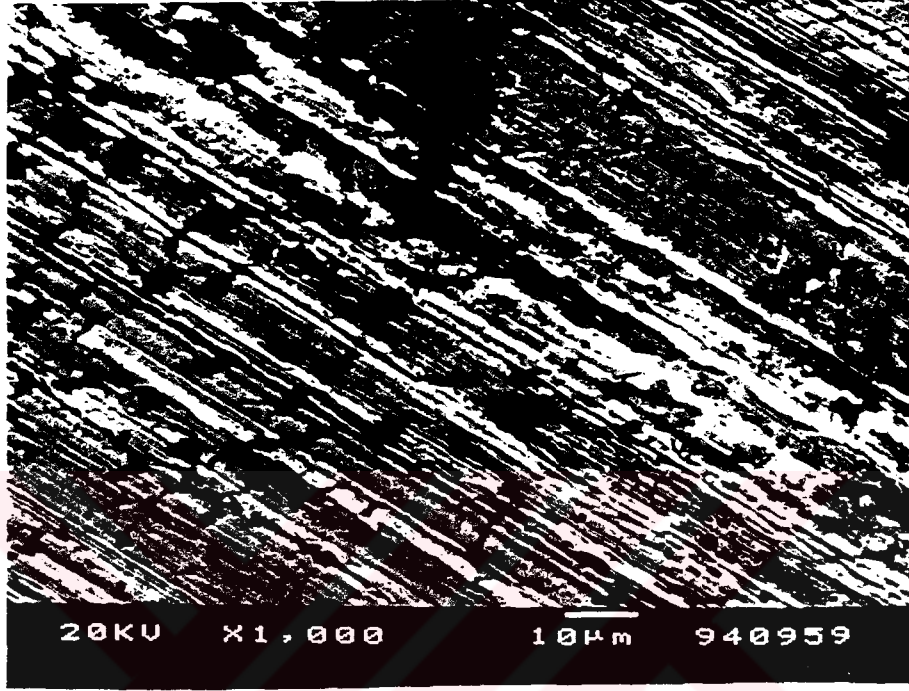


ŞEKİL: 7.47 Örnek NO: 27'nin Aşınmış Yüzeyi



ŞEKİL: 7.48. Örnek NO: 28'in Aşınmış Yüzeyi

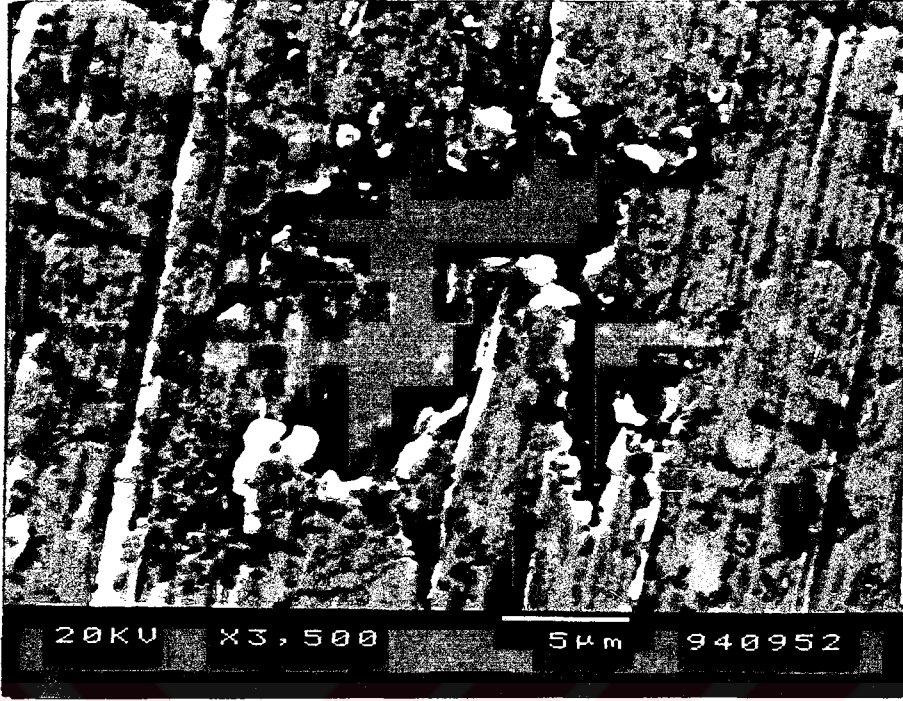
Şekil 7.49- 7.55'de ise aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinde meydana gelen hasarlar örnek olarak verilmiştir.



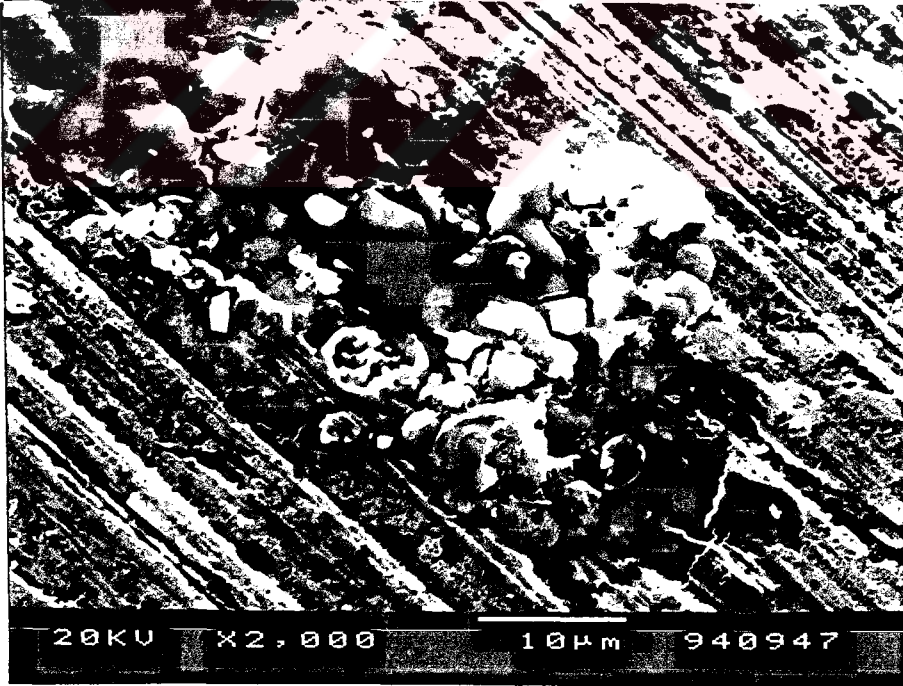
ŞEKİL: 7.49. Örnek NO: 17'nin Yüzeyinde Oluşan Hasar



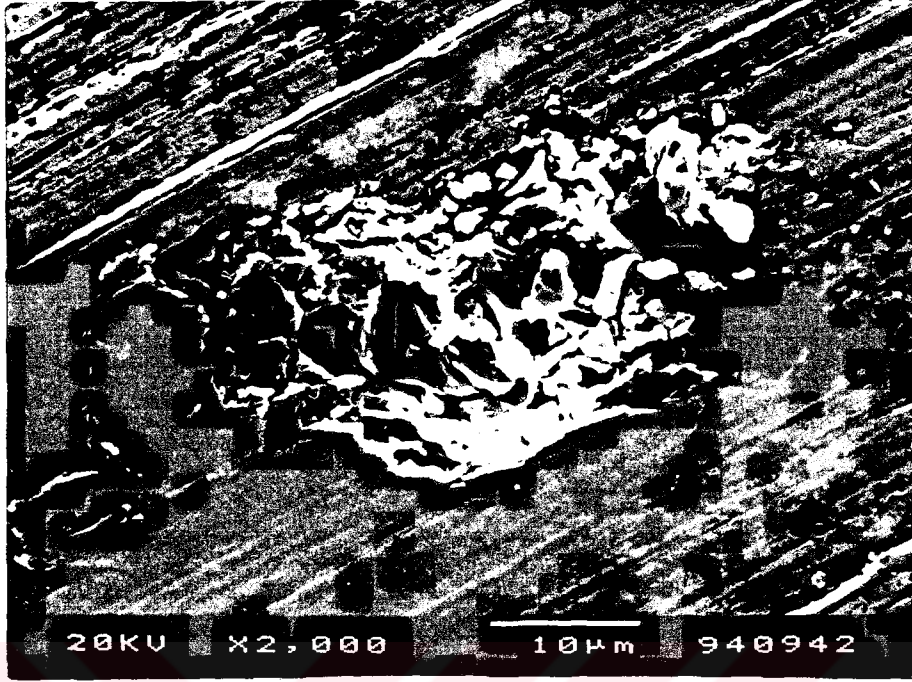
ŞEKİL: 7.50. Örnek NO: 18'in Yüzeyinde Oluşan Hasar



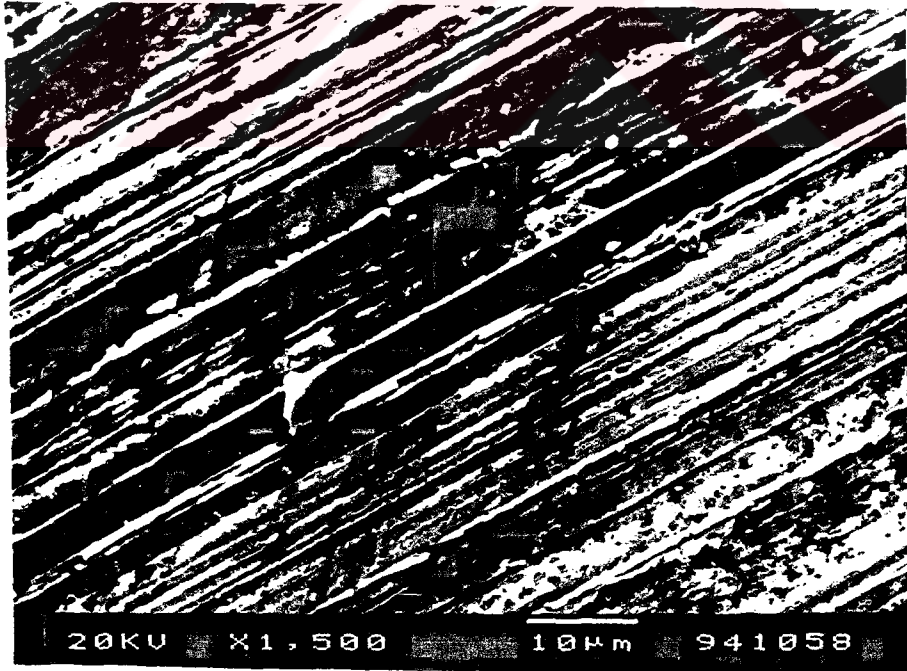
ŞEKİL: 7.51. Örnek NO: 23'ün Aşınma Yüzeyinde Oluşan Hasar



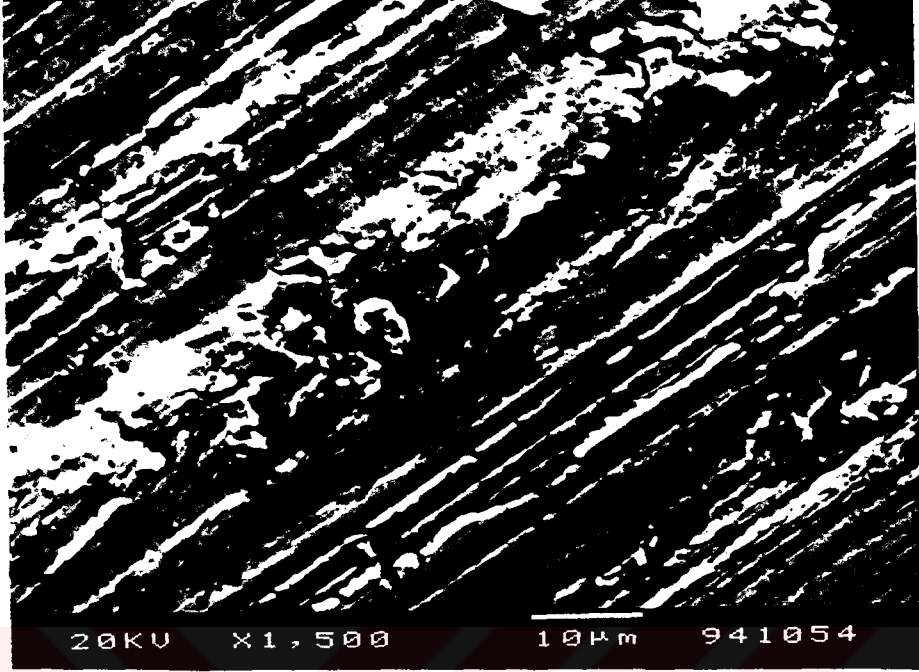
ŞEKİL: 7.52. Örnek NO: 25'nin Aşınma Yüzeyinde Oluşan Hasar



ŞEKİL: 7.53. Örnek NO: 26'nın Aşınma Yüzeyinde Oluşan Hasar



ŞEKİL: 7.54 Örnek NO: 27'nin Aşınma Yüzeyinde Oluşan Hasar



ŞEKİL: 7.55. Örnek NO: 28'in Aşınma Yüzeyinde
Oluşan Hasar

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada incelenen beyaz dökme demirlerin ve Ni-Hard IV malzemenin metalografik inceleme, sertlik ve aşınma deneylerinden aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir.

1)- Beyaz dökme demirlerde ostenitleme sıcaklığı arttıkça sertlik azalmaktadır. Cr/C oranı 4.5 mertebesinde iken (% 15 Cr, % 3.5 C) 940°C'deki ostenitleme sıcaklığında maksimum sertlik elde edilmektedir. Aynı zamanda ostenitleme süresinin artmasıyla da sertlik artmaktadır.

2)- Cr/C oranının 4.30-4.80 arasında değiştiği yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde Cr/C oranı arttıkça su verme sonrası sertlik artmaktadır.

Su verme sonrasında soğuma hızının azalmasıyla birlikte daha iri karbür yapısına sahip beyaz dökme demir elde edilmektedir. Soğuma hızı arttıkça malzemenin çatlama riski artmaktadır.

3)- İncelenen beyaz dökme demirler içinde Cr/C oranı 5.4 olan (% 18.5 Cr, % 3.4 C) malzeme hem yüksek sertliğe hem de en iyi aşınma direncine sahiptir.

4)- Cr/C oranı 4.24 olan beyaz dökme demirlere uygulanan ısı işlemler malzemenin sertliğini arttırmasına rağmen aşınma direncini düşürmüştür. Sertliği daha düşük olan döküm yapısında daha iyi aşınma direnci elde edilmiştir.

5)- Aynı sertliğe sahip beyaz dökme demirler içinde tane sınırlarında segregе olmuş ve daha az karbür içeren malzemenin aşınma direncinin en düşük olduğu saptanmıştır.

6)- İncelenen malzemeler arasında en düşük sertliğe sahip olan Ni-Hard aynı zamanda en düşük aşınma direncine sahiptir. Bunun nedeni bu malzemenin matris fazının düşük sertlikte olmasından kaynaklanmaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] The International Nickel Company, Inc, "Abrasion Resistant Coatings For handling Coal. Properties and Uses of the Ni-Hard Irons"(1978).
- [2] The International Nickel Company, Inc., "Engineering Properties and Applications of Ni-Hard" Fourth Edition, (1978).
- [3] AVNER, S.H., "Introduction to Physical Metallurgy" Mc Graw-Hill International Book Company, Second Edition (1983).
- [4] JINZHU, LIU, SHIZHUO, LI, YONGFA MAN, "Wear Resistance of Ni-Hard 4 and High-Chromium Cast Iron Re-Evaluated"Wear.166 (1993).
- [5] I.R.SARE, B.K.ARNOLD, "Gouging Abrasion of Wear-Resistant Alloy Cast Irons"Wear May, (1989).
- [6] FAIRHURST, W., ROHRIG.K., "Abrasion-Resistant High-Chromium White Cast Irons".
- [7] Metals Handbook 9th Edition Vol. 15 Casting.(1988)
- [8] Metals Handbook 10th Edition Vol.1,"Properties and Selection"(1978)
- [9] AYTEKİN, M.B., "Aşınmaya Dayanıklı Yüksek Kromlu ve Yüksek Karbonlu Çelik ve Dökme Demirlerin Metalurjik Özellikleri" İTÜ Kimya-Metalurji Fak. Metalurji Müh. Böl. Bitirme Ödevi (1981).
- [10] LAURENCE, H.P., "Fighting Wear in Agricultural and Off Road Equipment" Metall Progress August (1983).
- [11] TURENNE, S., LAVALLEE, F., MASOUNAVE, J., "Matrix Microstructure Effect On The Abrasion Wear Resistance of High-Chromium White Cast Iron"Journall of Materials Scince 24, (1989).
- [12] MINKOFF, I., "The Physical Metallurgy of Cast Iron" A Wiley-Interscience Publication (1983).

- [13] DEMELLO, D.B., BURAND CHARRE, M., "Abrasion Mechanisms of White Cast Iron and Influence of the Metallurgical Structure of V-Cr Cast Irons" Materials Science and Engineering, 78,(1986).
- [14] FUSHENG, H., CHAOCHANG, W., "Modifying High Cr-Mn-Cast Iron With Boron And Rare Earth-Si Alloy" Materials Science And Technology Sep. (1989).
- [15] NAIHENG. M., QICHANG R., QINGDE, Z., "Corrosion-Abrasion Wear Resistance of 28 % Cr White Cast Iron Containing Boron " Wear 132, (1989).
- [16] CHEN, X.H., CHANG, C.Z., LU,Z.C.,LIN,H.T., "Effect of Niobium on Wear resistance of 15%Cr White Cast Iron" Wear 166, (1993).
- [17] LAIRD II, G., NIELSEN, R.L., MACMILLAN, N.H., "On The Nature of Eutectic Carbides in Cr-Ni White Cast Irons" Metallurgical Transactions Volume 22-A, August, (1991).
- [18] LAIRD, II, G., BROWN, R.R., NIELSEN, R.L., "Factors Effecting Eutectic Solidification of Cr-Ni(Si-Mn) White Cast Irons" Materials Science And Technology July (1991).
- [19] JACKSON, R.S., "The Austenite Liquidus Surface and Constitutional Diagram For The Fe-Cr-C Metalstable System" Journal of the Iron and Steel Institute Feb. (1970).
- [20] KUO, K., "Carbides In Chromium, Molybdenum and Tungsten Steels", Journal of the Iron and Steel Institute Vol.173, April, (1953).
- [21] POWELL, G.L.F., LAIRD.II, G., "Structure, Nucleation, Growth and Morphology of Secondary Carbides in High Chromium and Cr-Ni White Cast Irons" Journal of Materials Science 27 (1992).
- [22] RANDLE, V., LAIRD II, G., "A Microtexture Study of Eutectic Carbides In White Cast Irons Using Electron Back-Scatter Diffraction" Journal of Materials Science 28 (1993).

- [23] KINZEL, A.B., CRAFTS, W., "The Alloys of Iron And Chromium" Vol. 1, Mc Graw-Hill Book Company, Inc. (1937).
- [24] DIN 50320, "Verschleiss", Dezember, (1979).
- [25] COLANGELO, V.J., HEISER, F.A., "Analysis of Metallurgical Failures", John Wiley and Sons, New York, (1974).
- [26] Metals Handbook, 8th Edition, Vol.10 "Failure Analysis and Prevention" ASM, (1975).
- [27] Metals Handbook, 9th Edition Vol. 11, "Failure Analysis and Prevention" ASM, (1986).
- [28] KAYALI, E.S., ÇİMENÖĞLU, H., "Hasar Analizi Semineri" TMMOB, Met.Müh.Odası, Haziran (1990).
- [29] ASTM Standards, G40-93, p.163.
- [30] ÇELİK, H., "Kaynak Edilebilen Kobalt ve Demir Esaslı Alaşımlarının Yüksek Sıcaklıktaki Aşınma Davranışları", Doktora Tezi, İTÜ (1991).
- [31] MILLER, A.E., "Wear in Steels", Journal of Metals, October, (1989).
- [32] KAYALI, E.S., ÇİMENÖĞLU, H., "Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları", İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul (1986).
- [33] SAE Information Report Handbook Supplement-J 965, "Abrasive Wear", (1978).
- [34] AFANASYEV, V.V., "Tool Steels" MIR Publishers, Moscow, (1978).

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANİSYON MERKEZİ**