

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERİN AŞINMA
DİRENCİNE ALAŞIM ELEMENTLERİ İLAVESİNİN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Cenk SAĞLAM**

Anabilim Dalı : Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Programı : Üretim Metalurji ve Tek. Müh.

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERİN AŞINMA
DİRENCİNE ALAŞIM ELEMENTLERİ İLAVESİNİN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Cenk SAĞLAM
(506061203)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 04 Haziran 2009

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Onuralp YÜCEL (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Filiz ŞAHİN (İTÜ)

Doç. Dr. Nilgün YAVUZ (İTÜ)

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca tez yönetimimi üstlenen ve benden hiçbir yardımı esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Onuralp YÜCEL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince benden çok değerli katkılarını esirgemeyen Ümit Döküm ve Sayın Selim ÖZAVAR'a çok teşekkür ederim.

İTÜ, Prof. Dr. Adnan Tekin Uygulama ve Araştırma Merkezinden Doç. Dr. Filiz Çınar ŞAHİN'e, Yrd. Doç. Dr. C. Bora Derin'e, Dr. M. Şeref SÖNMEZ'e ve Tekniker Hasan DİNÇER'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım boyunca kimyasal analizlerdeki yardımları için Kim. Müh. Z. İnci KOL'a, Kimyager M. Hakan MORCALI ve Kimyager Bihter ZEYTUNCU'ya teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi manevi her konuda beni destekleyen babam Tezcan SAĞLAM, annem Nilüfer SAĞLAM, kardeşim Tolga SAĞLAM'a ve tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak tüm tez dönemi sabırla yanımda olan Özlem BAYKOÇAK'a teşekkür ederim.

Mayıs, 2009

Cenk SAĞLAM

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|--|-----------|
| ÖNSÖZ..... | iii |
| İÇİNDEKİLER..... | v |
| ÇİZELGE LİSTESİ..... | vii |
| ŞEKİL LİSTESİ..... | ix |
| ÖZET..... | xiii |
| SUMMARY..... | xv |
| 1. GİRİŞ VE AMAÇ..... | 1 |
| 2. TEORİK İNCELEME..... | 3 |
| 2.1 Dökme Demirler..... | 3 |
| 2.2 Dökme Demirin Tanımı..... | 3 |
| 2.3 Dökme Demirin Sınıflandırması..... | 3 |
| 2.3.1 Gri dökme demir..... | 4 |
| 2.3.2 Küresel grafitli dökme demir..... | 4 |
| 2.3.3 Beyaz dökme demir..... | 4 |
| 2.3.4 Temper dökme demir..... | 5 |
| 2.3.5 Hızlı soğutulmuş (çil uygulanmış) dökme demir..... | 5 |
| 2.3.6 Özel dökme demir..... | 8 |
| 2.4 Dökme Demirlerin Kimyasal Bileşimi..... | 8 |
| 2.5 Dökme Demirlerin Bileşiminde Bulunan Elementler..... | 9 |
| 2.5.1 Karbon..... | 10 |
| 2.5.2 Silisyum..... | 10 |
| 2.5.3 Manganez..... | 11 |
| 2.5.4 Kükürt..... | 11 |
| 2.6 Dökme Demirlerin Mikroyapısı..... | 11 |
| 2.6.1 Grafit..... | 12 |
| 2.6.2 Sementit..... | 12 |
| 2.6.3 Ferrit..... | 13 |
| 2.6.4 Perlit..... | 13 |
| 2.6.5 Ostenit..... | 14 |
| 2.6.6 Ledeburit..... | 15 |
| 2.6.7 Steadit..... | 15 |
| 2.7 Yüksek Alaşımli Beyaz Dökme Demirler..... | 16 |
| 2.7.1 Yüksek kromlu beyaz dökme demirler..... | 18 |
| 2.7.2 Alaşım elementlerinin beyaz dökme demir üzerindeki etkileri..... | 20 |
| 2.7.3 Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ısıtım işlemi..... | 26 |
| 2.7.4 Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbürler..... | 26 |
| 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... | 29 |
| 3.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Hammaddeler..... | 29 |
| 3.2 Deneysel Çalışmalar ve Karakterizasyonda Kullanılan Cihazlar..... | 31 |
| 3.3 Karakterizasyon Çalışmaları..... | 32 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.3.1 | Sertlik Ölçümleri..... | 32 |
| 3.3.2 | Eğme mukavemeti ölçümleri..... | 33 |
| 3.3.3 | Aşınma test ölçümleri..... | 34 |
| 4. | DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI VE İRDELENMESİ..... | 35 |
| 4.1 | Kimyasal Bileşim Analizleri..... | 35 |
| 4.2 | Sertlik Analizleri..... | 36 |
| 4.3 | Aşınma Testi..... | 38 |
| 4.4 | 3 Nokta Eğme Testi..... | 40 |
| 4.5 | Metalografik İnceleme Sonuçları..... | 42 |
| 5. | GENEL SONUÇLAR..... | 49 |
| | KAYNAKLAR..... | 51 |
| | EKLER..... | 55 |
| | ÖZGEÇMİŞ..... | 68 |

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Çizelge 2.1: Alaşım-sız dökme demirlerin kimyasal bileşimleri..... | 9 |
| Çizelge 2.2 : Düşük karbonlu ve Martenzitik nikel-kromlu beyaz dökme demirlerin fiziksel özellikleri | 18 |
| Çizelge 2.3 : Standart martenzitik beyaz dökme demirlerin kimyasal bileşimleri.... | 19 |
| Çizelge 3.1 : Döküm alaşımlarının hazırlanmasında kullanılan hammaddeler ve ağırlıkları..... | 29 |
| Çizelge 3.2 : Kullanılan hammaddelerin safiyetleri | 30 |
| Çizelge 4.1 : Kimyasal bileşimler..... | 35 |
| Çizelge 4.2 : Sertlik ölçümü sonuçları..... | 36 |
| Çizelge 4.3 : Farklı bileşimlerdeki alaşımların eğme dayanımları | 40 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1: Çeşitli dökme demirlerin mikroyapıları. | 6 |
| Şekil 2.2: Dökme demirlerin sınıflandırılması ve mikroyapıları..... | 7 |
| Şekil 2.3: Değişik tipteki dökme demirlerin karbon ve silisyum miktarları..... | 8 |
| Şekil 2.4 :Temper dökme demirin mikroyapısındaki küresel grafitler..... | 12 |
| Şekil 2.5 : Döküm sonrası duktıl dökme demir. | 13 |
| Şekil 2.6 : Döküm sonrası gri dökme demirin mikroyapısı..... | 14 |
| Şekil 2.7 : Döküm sonrası ostenitik duktıl demir. | 15 |
| Şekil 2.8 : Döküm sonrası gri dökme demir mikroyapısı..... | 16 |
| Şekil 2.9 : Yüksek alaşımlı dökme demirlerin sınıflandırılması..... | 17 |
| Şekil 2.10 : Çeşitli karbür yapıcı elementlerin çil derinliğine olan etkisi | 20 |
| Şekil 2.11 : Düşük karbonlu beyaz dökme demirin sertliğine karbonun etkisi..... | 21 |
| Şekil 2.12 : Molibdenin beyaz dökme demirin sertleşebilirliğine olan etkisi | 22 |
| Şekil 2.13 : Molibdenin beyaz dökme demirin çekme dayanımı üzerindeki etkisi... | 23 |
| Şekil 2.14 : Bor miktarının çil derinliğine etkisi | 25 |
| Şekil 2.16 : C-Fe-Cr Denge diyagramı | 27 |
| Şekil 2.15 : Krom/Karbon oranı arasındaki ilişki..... | 27 |
| Şekil 3.1 : Vickers sertlik testinin şematik görünümü | 32 |
| Şekil 3.2 : 3 Nokta eğme testinin şematik gösterimi | 33 |
| Şekil 3.3 : 3 Nokta eğme testi numune boyutları..... | 33 |
| Şekil 3.4 : Tribo Tester aşınma cihazı | 34 |
| Şekil 4.1 : Döküm sonrası için bor miktarının sertliğe olan etkisi | 37 |
| Şekil 4.2 : Isıl işlem sonrası için bor miktarının sertliğe olan etkisi..... | 37 |
| Şekil 4.3 : Isıl işlem ve temperleme sonrası için bor miktarının sertliğe olan etkisi. | 38 |
| Şekil 4.4 : Alaşımdaki bor miktarının rölatif aşınma dayanımına olan etkisi | 39 |
| Şekil 4.5 : Alaşımdaki bor miktarının aşınma hacmine olan etkisi | 39 |
| Şekil 4.6 : Isıl işlem uygunlanmış numunler için alaşımdaki bor miktarının eğme dayanımına etkisi | 41 |
| Şekil 4.7 : Temperlenmiş numuneler için alaşımdaki bor miktarının eğme dayanımına etkisi..... | 41 |
| Şekil 4.8 : B0 numunesinin EPMA görüntüsü (750X)..... | 42 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.9 : B0 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (100X) | 43 |
| Şekil 4.10 : B02 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (100X) | 43 |
| Şekil 4.11 : B04 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (100X) | 44 |
| Şekil 4.12 : B06 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (100X) | 44 |
| Şekil 4.13 : B08 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (100X) | 45 |
| Şekil 4.14 : B0 numunesinin ısıtım işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (100x)..... | 46 |
| Şekil 4.15 : B02 numunesinin ısıtım işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)..... | 46 |
| Şekil 4.16 : B04 numunesinin ısıtım işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)..... | 47 |
| Şekil 4.17 : B06 numunesinin ısıtım işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)..... | 47 |
| Şekil 4.18 : B08 numunesinin ısıtım işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)..... | 48 |
| | |
| Şekil A. 1 : B0 numunesinin ısıtım işlem ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)..... | 55 |
| Şekil A. 2 : B005 numunesinin ısıtım işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (100X) | 55 |
| Şekil A. 3 : B005 numunesinin temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)... | 56 |
| Şekil A. 4 : B010 numunesinin ısıtım işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)..... | 56 |
| Şekil A. 5 : B010 numunesinin temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)... | 57 |
| Şekil A. 6 : B015 numunesinin ısıtım işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)..... | 57 |
| Şekil A. 7 : B015 numunesinin temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)... | 58 |
| Şekil A. 8 : B02 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (200X) | 58 |
| Şekil A. 9 : B02 numunesinin ısıtım işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)..... | 59 |
| Şekil A. 10 : B02 numunesinin ısıtım işlem ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)..... | 59 |
| Şekil A. 11 : B02 numunesinin ısıtım işlem ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)..... | 60 |
| Şekil A. 12 : B04 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (200X) | 60 |
| Şekil A. 13 : B04 numunesinin ısıtım işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)..... | 61 |
| Şekil A. 14 : B04 numunesinin ısıtım işlem ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)..... | 61 |
| Şekil A. 15 : B04 numunesinin ısıtım işlem ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)..... | 62 |
| Şekil A. 16 : B06 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (200X) | 62 |
| Şekil A. 17 : B06 numunesinin ısıtım işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)..... | 63 |
| Şekil A. 18 : B06 numunesinin ısıtım işlem ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)..... | 63 |
| Şekil A. 19 : B06 numunesinin ısıtım işlem ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)..... | 64 |
| Şekil A. 20 : B08 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (200X) | 64 |

| | |
|---|----|
| Şekil A. 21 : B08 numunesinin ısıtıl işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)..... | 65 |
| Şekil A. 22 : B08 numunesinin ısıtıl işlem ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)..... | 65 |
| Şekil A. 23 : B08 numunesinin ısıtıl işlem ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)..... | 66 |

YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERİN AŞINMA DİRENCİNE ALAŞIM ELEMENTLERİ İLAVESİNİN ETKİSİ

ÖZET

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler genel olarak iyi aşınma direnci ve tokluk özellikleri gösterirler. Bu nedenle geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Cevher kırıcıları, öğütücü değirmen bilyeleri, çeşitli astarlar, tarım alet ve makinaları, pistonlar ve dişlileri, çeşitli konveyörler, greyder bıçakları, pompalar, diskler, tuğla kalıpları, segmanlar ve çubuklar, madencilik ve mineral sanayi gibi yüksek aşınma direnci gerektiren yerlerde yüksek alaşımlı beyaz dökme demirler kullanılır.

Bu çalışmada farklı bileşimlerdeki yüksek kromlu beyaz dökme demirlere çeşitli karbür yapıcı alaşım elementleri ilavesi ve farklı ısıtma işlem uygulamaları ile aşınma direncinin artırılması hedeflenmiştir.

Deneyler için 350 kg kapasiteli indüksiyon ocağında 5 farklı döküm deneyi yapılmıştır. İlk döküm ferro-bor ilavesi olmadan yapılmıştır. Diğer 4 döküm de sarja sırasıyla % 0.1, % 0.27, % 0.38 ve % 0.56 bor bileşimine sahip olacak şekilde ferro-bor ilave edilerek alaşımlandırma yapılmıştır. Her bir döküm için döküm sonrası hallerinden birer numune alınmış, kalan parçalara 600 C sıcaklıkta 1 saat süreyle ısıtma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra parçalar temperleme işlemi için 350°C'de 8 saat bekletilmiştir.

Her bileşim için döküm, ısıtma işlem ve ısıtma işlem + temperleme sonrası halleri için ayrı ayrı metalografi numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Kantitatif elementel analizler kimyasal analiz, XRF analizi ve EPMA kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca farklı kesitlerde mikro sertlik taramaları yapılmıştır.

Deneyler sonucunda B02 kodlu alaşımda en yüksek eğme dayanımı (877 MPa) ve en yüksek aşınma direnci (en düşük aşınma hacmi 0.0010 mm³) elde edilmiştir. B08 kodlu alaşımda en yüksek sertlik değerine (68.9 HRc) ulaşılmıştır.

THE EFFECT OF THE ALLOYING ELEMENTS ON THE WEAR RESISTANCE OF HIGH CHROMIUM WHITE CAST IRON

SUMMARY

High chromium content white cast irons have generally good wear resistance and toughness properties. Due to their high wear resistance high chromium white cast irons have wide application areas. These types of cast irons generally used in slurry pumps, brick dies, several mine drilling equipments, discs, pistons and gears.

Abrasion of these kind of materials cause financial costs. For this reason the improvement of the materials wear resistance has a great importance. High chromium white cast iron is a material that suitable for these types of applications as it has excellent abrasion resistance.

Chromium carbide present in the structure of high chromium white cast iron is known to improve this material's mechanical strength and wear resistance.

According to the characteristics of high chromium cast iron, if its chemical composition can be controlled and proper heat treatment be adopted, it has perfect abrasion resistance and hardness. The previous researches have recognized that the abrasion resistance of these alloys is primarily determined by the features of the hard alloy carbides that form, such as the carbide volume fraction, primary carbide structure and the eutectic carbide orientation. The structure of the matrix that supports the carbides may be varied extensively by alloy selection.

In this study, high chromium white cast irons in different chemical composition were investigated to achieve better wear resistance. Effects of alloying elements (ferro-boron and ferro-cobalt) and heat treatment methods on wear resistance were studied. For every chemical composition, a specimen for metallographic research was prepared. Microstructure of the specimens was analyzed by optical microscope. Quantitative elemental analysis was performed by using XRD, XRF, EPMA and AAS. Moreover, micro hardness measurements were made on different cross-section areas. Moreover, wear resistance of the specimens was measured by using ball-cratering method.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler genel olarak iyi aşınma direnci ve tokluk özellikleri gösterirler. Bu nedenle geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Cevher kırıcıları, öğütücü değirmen bilyeleri, çeşitli astarlar, tarım alet ve makinaları, pistonlar ve dişlileri, çeşitli konveyörler, greyder bıçakları, pompalar, diskler, tuğla kalıpları, segmanlar ve çubuklar, madencilik ve mineral sanayi gibi yüksek abrasif aşınma direnci gerektiren yerlerde yüksek alaşımlı beyaz dökme demirler kullanılır [1].

Bu tip uygulamalarda kullanılan malzemelerin aşınması sonucunda maddi zararlar ve iş kayıpları meydana gelmektedir. Bu nedenle daha yüksek aşınma direncine sahip malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirler gösterdikleri mükemmel aşınma direnci ile bu amaca en uygun malzeme tiplerinden biridir [2].

Beyaz dökme demirler yaklaşık 100 senedir endüstriyel alanda aşınmaya dirençli malzeme olarak kullanılmaktadır. Üretim ve alaşımlandırma işlemlerinin geliştirilmesiyle uygulama alanları artmıştır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin yapısındaki sert krom karbürlerin malzemenin mekanik özellikleri ile aşınma direncini arttırdığı bilinmektedir [2].

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin karakteristiklerine bağlı olarak, kimyasal kompozisyonu kontrol altına alınır ve uygun ısıl işlem uygulanırsa, yüksek aşınma direnci ve sertlik değerlerine ulaşılabilir. Daha önce yapılan çalışmalarda aşınma direncinin öncelikle sert karbür alaşımları ile doğrudan ilgili olduğu tespit edilmiştir. Bu sert karbür alaşımlarının aşınma özelliklerini de karbür bileşimi, birincil karbür yapısı ve ötektik karbür oryantasyonu belirler. Karbürleri destekleyen matris yapısı da farklı alaşım elementleri seçimiyle geniş bir alanda değişim gösterir [1].

Bu çalışmada farklı bileşimlerdeki yüksek kromlu beyaz dökme demirlere çeşitli karbür yapıcı alaşım elementleri ilavesi ve farklı ısıl işlem uygulamaları ile aşınma

direncinin arttırılması hedeflenmektedir. Her bileşim için metalografi numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Kantitatif elementel analizler kimyasal analiz, X-ışınları analizi ve EPMA kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca farklı kesitler de mikro sertlik taramaları yapılmıştır. Numunelerin aşınma dirençleri de ball-cratering yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir.

2. TEORİK İNCELEME

2.1 Dökme Demirler

Döküm endüstrisinin en yüksek üretim miktarına sahip ürünü dökme demirlerdir. Demir alaşımları dökümcülüğü birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Bunların en önemlileri, alaşımı meydana getiren hammaddeler ucuzdur ve bulunması kolaydır, üretilen ürünler yüksek sertliğe sahip, yüksek aşınma direnci gösterirler, korozyona dayanıklıdırlar ve geniş bir aralıkta çok çeşitli ve farklı özelliklere sahip dökme demirler üretilmektedir [3].

2.2 Dökme Demirin Tanımı

Dökme demir ismi genel bir ailenin tanımı olup, geniş kapsamlı ve özellikleri çok farklı demir alaşımlarının tamamını kapsar. Dökme demir, sıcakta ve soğukta biçimlendirmeye elverişli olmayıp, döküldüğü şekilde kullanılan bir Demir-Karbon-Silisyum alaşımıdır. Bileşimindeki karbon % 4'e ve silisyum % 3.5'e kadar bulunabilir. [3]

Ötekiye yakın bileşimlerde erime sıcaklığı düşük ($1150 - 1250$ °C), katılma aralığı dar olur. Karbonun grafit olarak ayrışması sırasında hacim arttığından, malzemenin kendini çekmesi düşüktür (~% 1). Dökme demirin elde edilmesinde başlangıç malzemesi olarak genellikle yüksek fırın piki ve çelik hurdası kullanılır [4]. Dökme demir içinde karbon ve silisyumdan başka manganez, fosfor ve kükürt de bulunur. Özel hallerde nikel, krom, molibden, titanyum, alüminyum, bakır vb. elementlerden biri veya birkaçı da bulunabilir [3].

2.3 Dökme Demirin Sınıflandırması

Demir alaşımları, dökme demirler ve çelik dökümler olmak üzere iki ana bölüme ayrılırlar. Bileşiminde % 2' ye kadar karbon bulunan demir alaşımları çelik, % 2'den

çok karbon bulunan demir alaşımları dökme demir sınıfına girmektedir [3]. Şekil 2.2 'de dökme demirlerin sınıflandırılması ve temel mikroyapıları görülmektedir. Dökme demirlerin grafit ve mikroyapılarına göre beyaz dökme demir, gri dökme demir, küresel grafitli dökme demir ve temper dökme demir olarak sınıflandırılırlar.

2.3.1 Gri dökme demir

Grafitli dökme demir, alaşım katılaştığında bileşimindeki karbon, kısmen veya tamamen grafit halinde olan dökme demirdir. Kırılmış yüzeyi her zaman gri renktedir [3]. Şekil 2.1 a'da dökme demirin mikroyapısı görülmektedir. Grafitli dökme demir, bileşimindeki karbonun şekline göre aşağıdaki kısımlara ayrılır:

1. Lamel grafitli dökme demir : Lamel grafitli dökme demir, bileşimindeki grafit yaprağımsı lameller (tabaka-pul) şeklinde olan dökme demirlerdir.
2. Östenitik dökme demir : Östenitik dökme demir, uygun ve yüksek miktarda alaşım elementlerinden dolayı ana dokusu östenit olan ve içinde genellikle lamel veya küresel grafit bulunan dökme demirdir [3].

2.3.2 Küresel grafitli dökme demir

Küresel grafitli dökme demir, bileşimindeki grafit küresel şekilde olan dökme demirdir. Bu dökme demire, nodular veya sfero döküm de denir. Özel olarak elde edilen bu dökme demire, grafit yapısından dolayı bu ismi almıştır. Karbonun yaprağımsı lamelden, küre şekline dönüşmesini sağlamak amacıyla, ergimiş dökme demire az miktarda magnezyum veya seryum katılır. Küresel şekilli grafitler, dökme demire yumuşaklık kazandırır. Kırılmış yüzeyi parlak görünüşlüdür. Şekil 2.1 b'de küresel grafitli dökme demirin mikroyapısı görülmektedir.

2.3.3 Beyaz dökme demir

Beyaz dökme demir, alaşım katılaştığında, bileşimindeki karbon, sementit (Fe_3C) halinde olan dökme demirdir. Kırılmış yüzeyi beyaz kristal görünüşlüdür ve çok serttir [3]. Şekil 2.1 c' de beyaz dökme demirin mikroyapısı görülmektedir.

Beyaz dökme demirler yüksek aşınma direnci ve sertliğe sahiptirler. Bu özellikleriyle cevher kırıcıları, öğütücü değirmen bilyeleri, çeşitli astarlar, tarım alet ve makinaları,

pistonlar ve dişlileri, çeşitli konveyörler, greyder bıçakları, pompalar, diskler, tuğla kalıpları, segmanlar ve çubuklar, madencilik ve mineral sanayi gibi yüksek abrasif aşınma direnci gerektiren yerlerde kullanılırlar [5].

2.3.4 Temper dökme demir

Temper dökme demir, uygun kimyasal bileşimdeki sementit dokulu beyaz dökme demirin temperlemeye elverişli boyut ve biçimde dökülmüş ve sonradan ısı işlem (tavlama - temperleme) yapılarak bileşimindeki karbonu, rozet şekilli grafit kümeleri şekline getirilmiş bir dökme demirdir [3]. Şekil 2.1 d’de temper dökme demirin mikroyapısı görülmektedir.

Temper dökme demirin çeşitleri aşağıdaki gibidir :

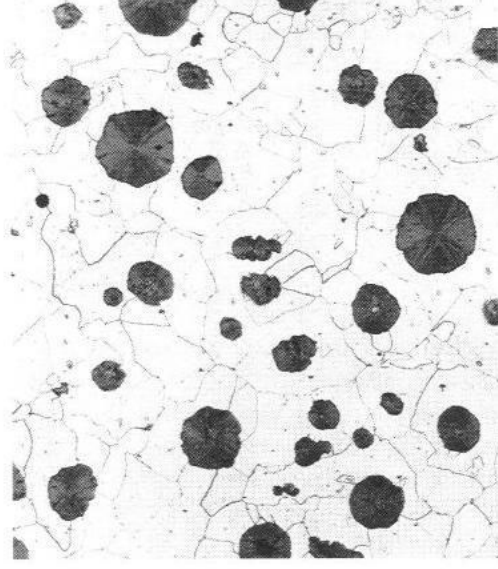
1. Siyah temper dökme demir : Siyah temper dökme demir, uygun kimyasal bileşimindeki sementit dokulu beyaz dökme demirin nötr bir ortamda uzun süre belli sıcaklıkta (östenit alanında) ısıtılmasıyla hazırlanan bir temper dökümdür. Kırılmış kesiti genellikle siyah renktedir [3].
2. Beyaz temper dökme demir : Beyaz dökme demir, uygun kimyasal bileşimdeki sementit dokulu beyaz dökme demirin, oksitleyici bir ortamda uzun süre belli sıcaklıkta (östenit alanında) ısıtılmasıyla hazırlanan bir temper dökümdür. Kırılmış kesiti genellikle beyaz renktedir [3].

2.3.5 Hızlı soğutulmuş (çil uygulanmış) dökme demir

Katılaşma sırasında normal gri dökme demirin yapısını verecek dökme demire, bazı kısımlarında soğumayı hızlandırmak için, özel yöntemler (çil) uygulayarak yapılan bir dökme demir çeşididir. Kırılmış yüzeyinin hızlı soğutulmuş kısımlarında beyaz, normal soğumuş kısımlarında esmer (grafitli) dökme demir yapısı görülür. Hızlı soğutulmuş dökme demir, sert ve dayanıklıdır [3].



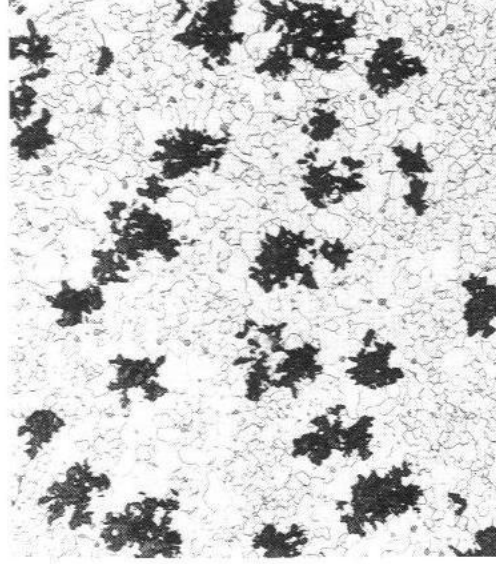
(a)



(b)

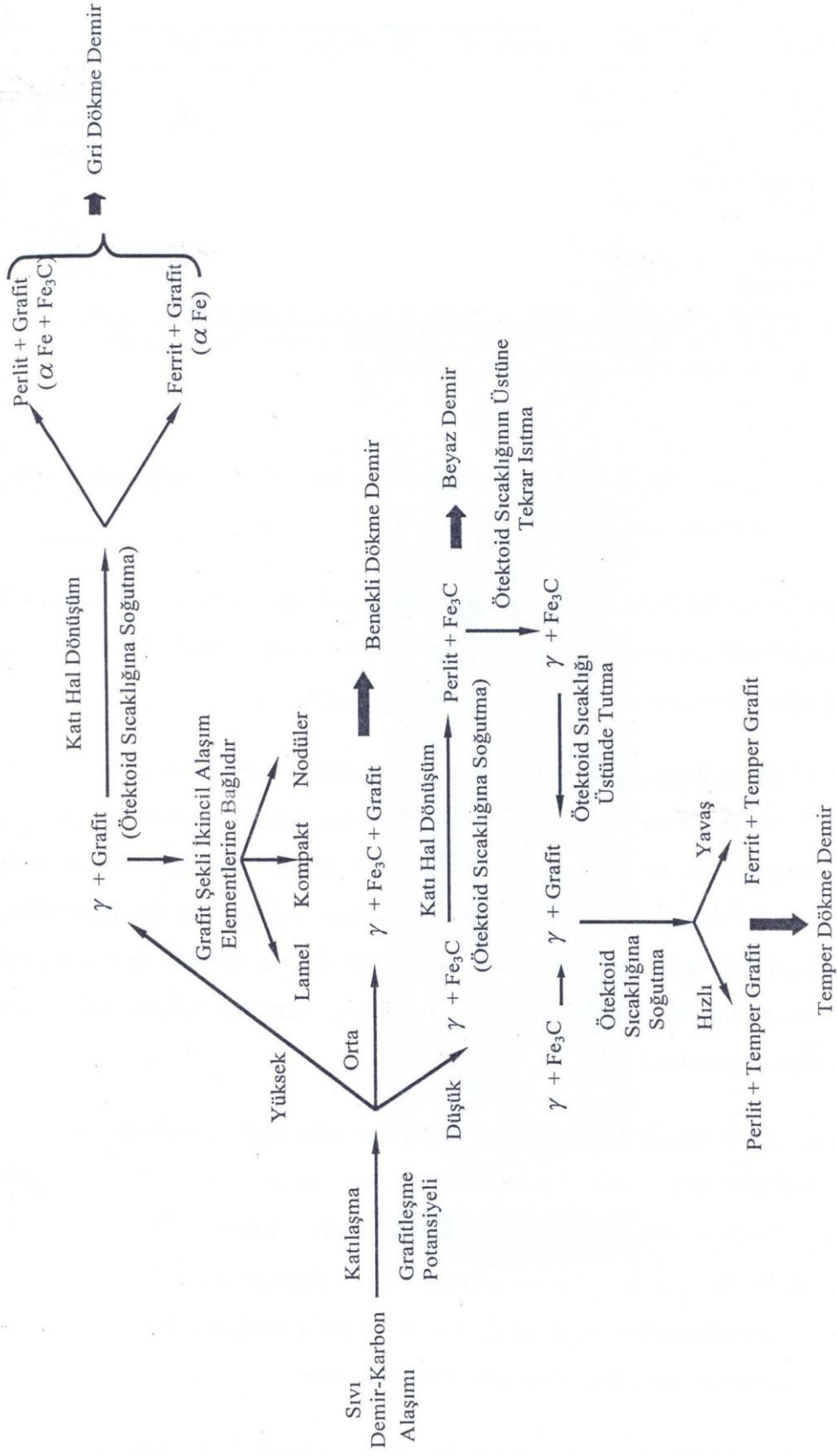


(c)



(d)

Şekil 2.1: Çeşitli dökme demirlerin mikroyapıları. (a) Gri dökme demir. (b) Nodüler dökme demir. (c) Beyaz dökme demir. (d) Temper dökme demir [6]



Şekil 2.2: Dökme demirlerin sınıflandırılması ve mikroyapıları [7]

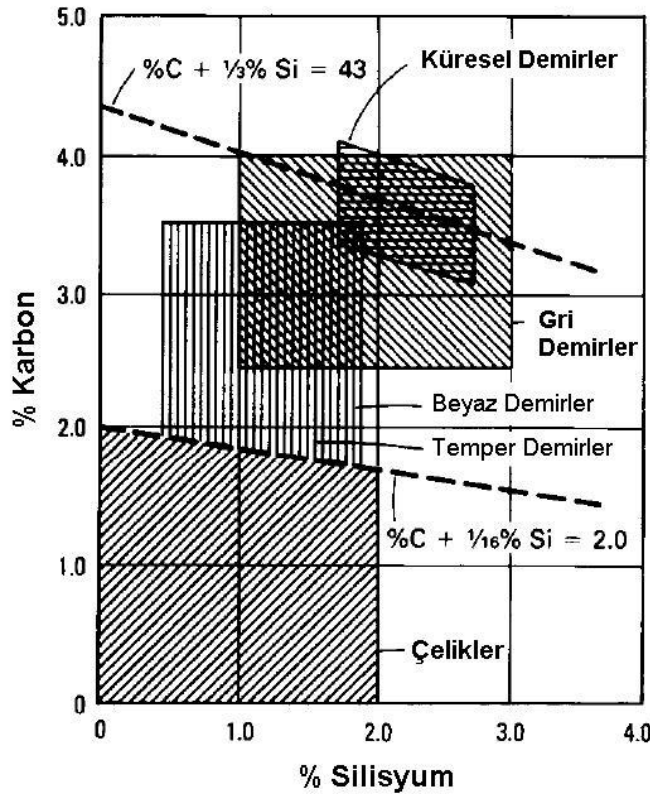
2.3.6 Özel dökme demir

Özel dökme demir, bileşiminde silisyum, manganez, fosfor ve kükürttten başka özel olarak alaşım elementleri katılmış olan dökme demirlerdir. İkiye ayrılırlar :

1. Az alaşımlı özel dökme demir : Özel olarak katılmış alaşım elementlerinin toplamı % 5'den az olan, özel dökme demirdir.
2. Yüksek alaşımlı özel dökme demir : Özel olarak katılmış alaşım elementlerinin toplamı % 5 'den çok olan, özel dökme demirdir [3].

2.4 Dökme Demirlerin Kimyasal Bileşimi

Demirin özellikleri ve kullanışı üzerine kimyasal bileşimin etkisi başlıca iki elemana bağlıdır: karbon ve silisyum. Dökme demirlerde karbon ve silisyum içerikleri, mikroyapı özelliklerini değiştirir [3]. Şekil 2.3'de değişik tipteki dökme demirlerdeki karbon ve silisyum miktarları görülmektedir.



Şekil 2.3: Değişik tipteki dökme demirlerin karbon ve silisyum miktarları [7]

Karbon ve silisyum içeriğinin yanında, bunların grafit oluşturma etkileri de dökme demirin yapısına etki eder. Her iki element de artan yüzdelerde grafit oluşumunu teşvik edici rol oynarlar [5]. Çizelge 2.1’de bazı alaşımsız dökme demirlerin kimyasal bileşim aralıkları görülmektedir.

Çizelge 2.1: Alaşımsız dökme demirlerin kimyasal bileşimleri [7]

| Dökme Demir Tipi | Bileşim, Ağ. % | | | | |
|---------------------|----------------|---------|----------|-----------|-----------|
| | C | Si | Mn | P | S |
| Gri | 2.5–4.0 | 1.0–3.0 | 0.2-1.0 | 0.002-1.0 | 0.02-0.25 |
| Küresel | 3.0–4.0 | 1.8-2.8 | 0.1-1.0 | 0.01-0.1 | 0.01-0.03 |
| Beyaz | 1.8–3.6 | 0.5-1.9 | 0.25-0.8 | 0.06-0.2 | 0.06-0.2 |
| Temper | 2.2–2.9 | 0.9-1.9 | 0.15-1.2 | 0.02-0.2 | 0.02-0.2 |

Karbon, dökme demirlerde, demir karbür (sementit - Fe_3C) halinde bulunursa bileşik karbonu, serbest olarak bulunursa grafitleri oluşturur. Dökme demirlerde grafitin oluşması için, bileşimde % 2’den fazla karbon olmasına gerekir [3]. Demir karbürü daha az stabil hale getiren grafitleştirici elementler, örneğin silisyum, grafit oluşumunu teşvik ederler [5].

2.5 Dökme Demirlerin Bileşiminde Bulunan Elementler

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

edilebilir. Bu tip dökme demirlere özel dökme demir veya alaşımlı dökme demir adı verilir [3].

2.5.1 Karbon

Dökme demirin bileşiminde bulunan karbon % 2-4 arasındadır. Karbon dökme demirin ergime sıcaklığını düşürür ve akıcılığını artırır. Karbon, dökme demirin bileşimine ve soğuma hızına bağlı olarak serbest karbon veya bileşik karbon (karbür) halinde bulunur. Bileşimde, serbest karbon bulunması, alaşımın grafitli olduğunu veya grafitleşmeyi artırıcı elementlerin bulunduğunu; bileşik karbon bulunması ise, alaşımın sementit olduğunu veya karbürleşmeyi artırıcı elementlerin bulunduğunu gösterir [3].

Dökme demir sıvı halde iken, bileşimindeki karbon, demirle bileşik halde (demir karbür – Fe_3C) olarak bulunur. Katılaştırma esnasında ve katılaştırmadan sonra karbonun östenit içinde tam olarak yayındığını kabul edersek, dökme demirin katılaştırılması ve yapısı basit demir-karbon ikili denge diyagramı vasıtasıyla kalitatif olarak anlaşılabilir. Soğuma anında demir bileşiği ayrışır ve karbonun bir kısmı grafit olarak serbest hale geçer. Bir kısmı da, gene demirle bileşik halinde kalır. Soğuma hızı artırılırsa, karbonun büyük bir kısmı demirle bileşik olarak kalır ve serbest hale geçemez [3,13].

Bileşimindeki karbonun büyük bir kısmı serbest karbon (grafit) halinde ayrışan dökme demirler, yumuşak olur. Karbonun bileşik halinde kaldığı dökme demirler ise, çok sert ve kırılgandır [3].

2.5.2 Silisyum

Dökme demirin bileşimindeki silisyum genellikle % 0.50-3.50 arasında değişir. Dökme demirin katılaşmasında karbonun bileşik halden, grafit halinde ayrılmasına yardım eder. Silisyumun, dökme demirin bileşiminde % 3.50 ile sınırlandırılması istenir. Çünkü bu değerden fazla bulunan silisyum, alaşımın sert ve kırılgan olmasına sebep olur. Dökme demirden istenilen özelliklerin sağlanabilmesi için silisyum miktarının doğru ayarlanması gerekir [3].

Silisyumun, karbon üzerindeki etkisi nedeniyle, ince kesitli veya küçük parçalar, silisyum miktarı fazla dökme demirden, kalın kesitli parçalar silisyum miktarı az

dökme demirden dökülürler. Bunun sebebi, ince kesitli parçalar hızlı soğuduklarından bileşimdeki karbon, bileşik halinde kalır. Dökülen parçalar sert ve kırılgan olur. Bu tip parçalarda silisyum oranı % 2-3 dür. Kalın kesitli parçalarda durum, bunun tam tersidir. Silisyum miktarı % 1 ile sınırlandırılır [3].

2.5.3 Manganez

Dökme demir içinde genel olarak % 0.50-1.00 arasında bulunur. Bileşimdeki karbonun, demirle bileşik halinde bulunmasına yardım ederek, dökme demirin sert ve kırılgan olmasına sebep olur. Dökme demirlerde manganez ile kükürdü birlikte ele almak gerekir. Çünkü manganez, kükürdün kötü etkilerini engelleyen bir elementtir. Kükürt ile birleşir ve mangansülfür (MnS) halinde cürufa karışır. Çok az miktarı yapı içinde kalır. Manganez miktarı, bileşimdeki kükürdün kötü etkilerini gidermek için gerekli miktardan daha fazla olmamalıdır, kısaca manganezin miktarı, bileşimdeki kükürt miktarına bağlıdır [3].

2.5.4 Kükürt

Karbonun, grafit halinde ayrışmasını güçleştirir. Dökme demirin bileşiminde, demirler birleşmiş olarak demir-sülfür ve manganezle birleşmiş olarak mangansülfür halinde bulunur. Kükürt, dökme demire ham demirden (pik) karışır. Bununda sebebi demir filizleri ve ham demirin yapımında kullanılan yakacaklardır [3].

Kalın kesitli parçalarda kükürt % 1.0 dan, ince kesitli parçalarda ise % 0.08 den az olduğu durumlarda, dökme demirin özelliklerini fazla etkilemez. Fakat bileşimde bu miktarlardan daha fazla kükürt olması, dökme demirin sertliğini artırır ve akıcılığını azaltır. Bunu sonucu olarak parçada gaz boşlukları oluşabilir [3].

2.6 Dökme Demirlerin Mikroyapısı

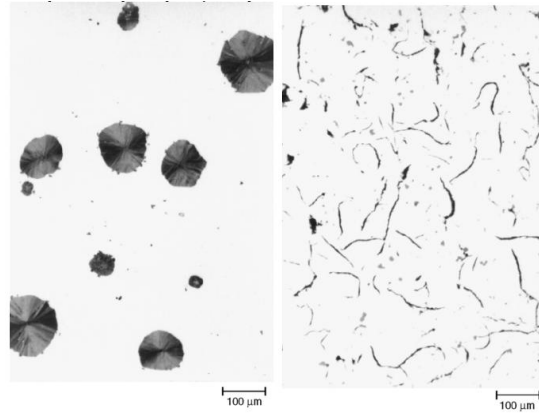
Dökme demirlerin metal özellikleri büyük ölçüde metalografik yapılarına bağlıdır. Dökme demirin yapısal bileşikleri ayrı tipte dökme demirlerin ve değişik şekilli grafitlerin oluşumuna neden olurlar. En önemli yapı bileşen ve türleri aşağıda verilmektedir [5]:

2.6.1 Grafit

Dökme demirlerde karbon, kimyasal bileşim ve soğuma hızına bağlı olarak, bileşik veya serbest halde bulunabilir. Gri dökme demirde katılaşmayla birlikte grafit lamelleri de oluşur ve düşük yoğunlukları nedeniyle toplam döküm hacminin % 6-17 sine erişebilirler. Dökme demirde lamel'den farklı şekilde de grafitler oluşabilir, örneğin beyaz dökme demirin ısı işleme ile temper karbonu veya rozet şekilli grafitler oluşabilir [5].

Grafit, gerek kristal şekli gerekse bağ kuvvetleri yönünden zayıftır. Bunun için grafitin şekli, büyüklüğü ve yapıdaki dağılımına göre dökme demirin özellikleri üzerinde büyük etkisi vardır [3].

Gri dökme demirde süneklik özelliğinin olmayışı lamel grafitler nedeniyledir. Temper dökme demir yapısındaki rozet şekilli grafitler veya küresel grafitli dökme demirdeki küre şekilli grafitler sünekliğe lameller kadar kötü etki etmez [5]. Şekil 2.4'te küresel ve yaprak şekilli grafitler görülmektedir.

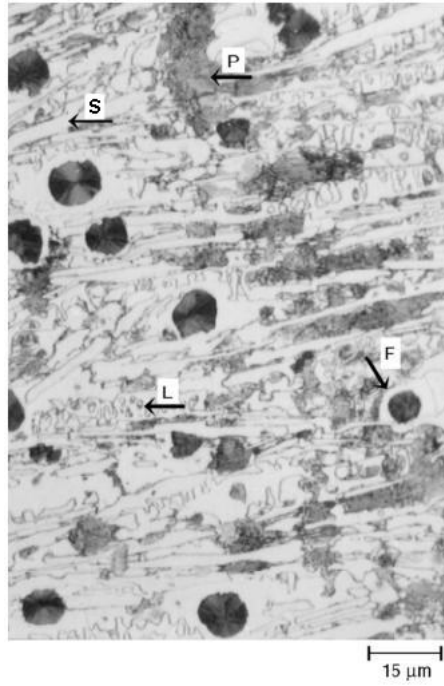


Şekil 2.4 :Temper dökme demirin mikroyapısındaki küresel grafitler (sol) ve gri dökme demirin mikroyapısındaki yaprak şekilli grafitler (sağ) [8]

2.6.2 Sementit

Dökme demirlerde karbon tamamen veya kısmen sementit halinde kimyasal olarak birleşmiş durumda bulunabilir. Serbest veya kitle şeklinde sementit, beyaz ve çil uygulanmış dökme demirlerin katılaşması esnasına oluşur. Sementit çok sert ve kırılgan olup, ana bileşenin oluşturduğu dökme demir tiplerine de bu özelliğini

yansıtır. Serbest halden başka perlit ve ledeburit içinde de bulunur [5]. Şekil 2.5'te sementit yapısı görülmektedir.



Şekil 2.5 : Döküm sonrası duktül dökme demir. S, sementit; L, ledeburit; P, perlit; F, ferrit [9]

2.6.3 Ferrit

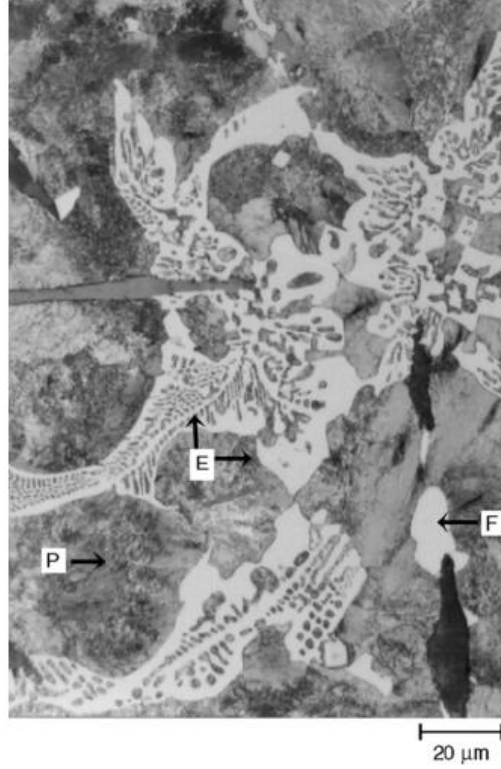
Oda sıcaklığında kübik hacim merkezli yapıda, demir ile az miktarda karbonun oluşturduğu nispeten yumuşak, sünek ve orta derecede mukavemetli bir katı eriyik olarak tariflenebilir. Dökme demirlerde ferrit bileşimindeki silisyumu içeren fazdır. Silisyum ferrit'i sertleştirir ve mukavemetini artırır [5].

Yapısal açıdan, dökme demirlerde ferrit ya serbest halde ya da perlit içinde oluşur. Dökme demirin karbonu serbest olarak oluşabiliyorsa, bileşimde grafitleştiriciler varsa ve soğuma yavaş ise serbest ferrit'in oluşma şansı yüksektir [5]. Şekil 2.5 ferrit yapısı görülmektedir.

2.6.4 Perlit

Dökme demirin soğuması anında ostenitin ötektoid sıcaklığında, ferrit ve sementite ayrışmasıyla bunların lameller halindeki karışımından meydana gelmiş bir yapıdır. Perlit orta sertlikte, yüksek dayanımlı ve esnek bir yapı olup aşınmaya karşı

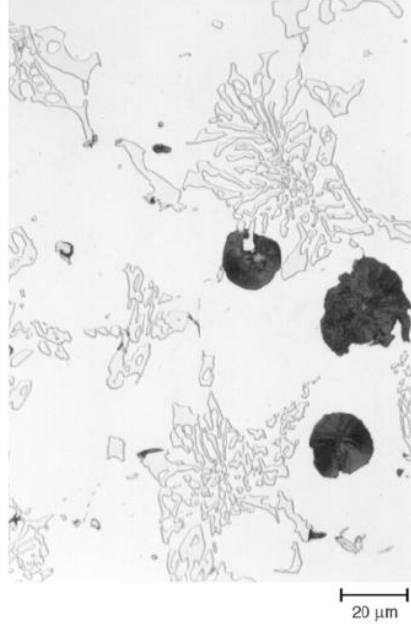
dayanıklıdır. Bu nedenle yüksek dayanımlı dökme demirlerin yapıları genellikle perlitiktir. Oluşan perlit miktarı grafitleşme mertebesine bağlıdır. Perlitik gri dökme demir yaklaşık olarak % 0.5-0.9 bileşik karbon içerir. Bileşik karbonun daha düşük oluşu ise genellikle serbest ferritin bulunduğunu işaret eder [3,5]. Şekil 2.6'da gri dökme demirdeki perlit yapısı görülmektedir.



Şekil 2.6 : Döküm sonrası gri dökme demirin mikroyapısı. E, ötektik; F, çökelmiş grafitteki ferrit; P, perlit [8].

2.6.5 Ostenit

Demirin yüksek sıcaklıklardaki allotropik şekli olan kübik yüzey merkezli demir ile karbonun meydana getirdiği, katılaşma esnasında oluşan ve yavaş soğuma ile perlit, ferrit veya ikisinin karışımına dönüşen bir katı eriyik olarak tanımlanabilir. Oda sıcaklığında mikroyapıda ostenitin bulunuşu, ancak dökme demirin özel olarak osteniti bu sıcaklıkta stabil hale getiren, nikel ile alaşımlandırılması ile mümkündür [5]. Şekil 2.7'de ostenit yapısı görülmektedir.



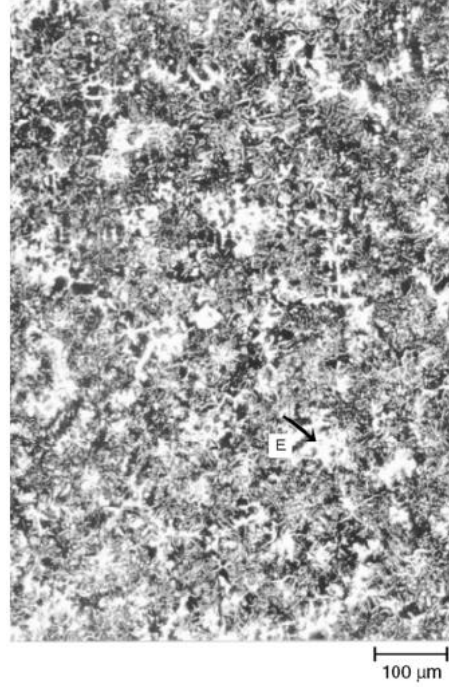
Şekil 2.7 : Döküm sonrası ostenitik duktül demir. Ostenit ve ötektik M7C3 tipi karbürler [8].

2.6.6 Ledeburit

Ostenit ile sementit karışımı bir yapıdır. Ledeburit, ötektik yapının özel adı olarak tanınır [5]. Şekil 2.5’de ledeburit yapısı görülmektedir.

2.6.7 Steadit

Dökme demirlerde, özellikle gri dökme demirlerde, mevcut fosfor, düşük ergime dereceli (954°C - 982°C) bir demir-demir karbür-demir fosfür ötektiği olan steadit şeklinde bulunur. Ötektik bileşim %10.2 P ve % 89.8 Fe’dir. Fosfor, katılaşmada en son katılan bölgelere toplandığından mikro yapıda steadit bölgeleri genellikle hücrel bir görünüme sahiptir. Demir fosfür de demir karbür gibi çok sert ve kırılgandır. Şekil 2.8’de gri dökme demirin ötektik yapısındaki steaditler görülmektedir [5, 8].



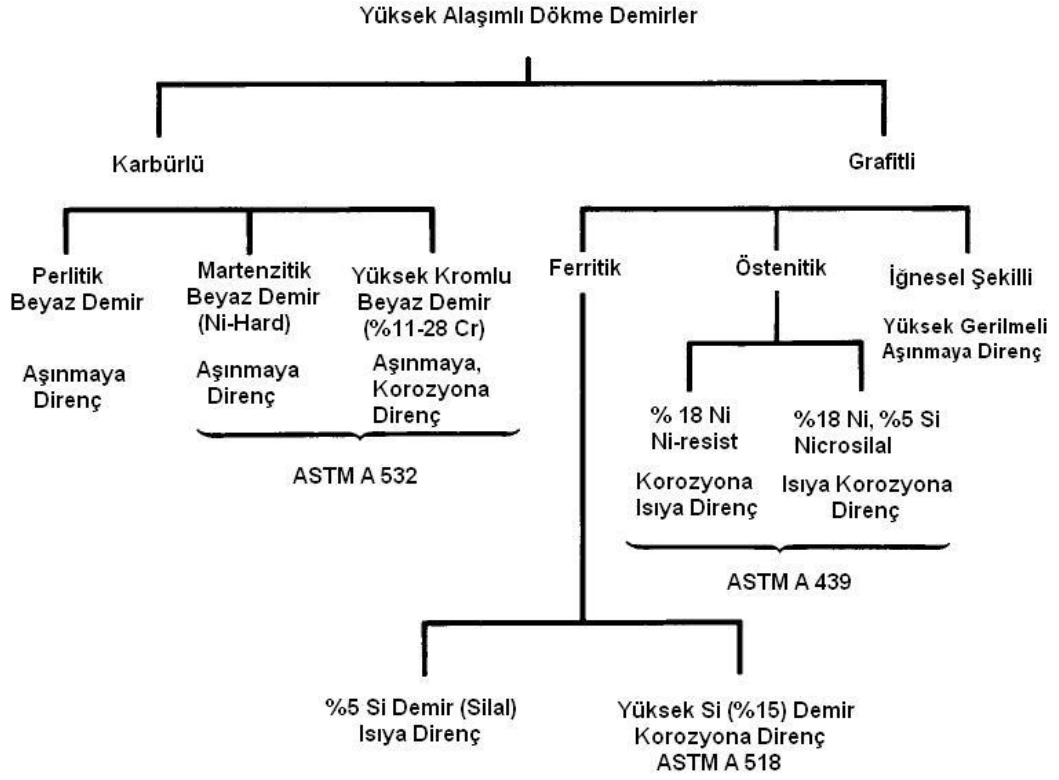
Şekil 2.8 : Döküm sonrası gri dökme demir mikroyapısı. E, fosforlu ötektik. Hücre sınırlarında beyaz steadit yapılar [8]

2.7 Yüksek Alaşımli Beyaz Dökme Demirler

Yüksek alaşımli dökme demirler, üretimi diğer sıradan dökme demirlerden ayrı olarak değerlendirilmesi gereken önemli bir malzeme grubudur. Bu tip dökme demirlerde alaşım miktarı % 4'den fazladır [7].

Yüksek alaşımli beyaz dökme demirler öncelikle aşınma direnci gerektiren uygulamalarda (Kırıcı, öğütücü, dişli parçaları vb.) kullanılırlar. Ayrıca yüksek alaşımli beyaz dökme demirin krom içeriği, korozyon direncini iyi yönde etkiler. Mikroyapıdaki birincil ve/veya ötektik karbürlerin geniş hacim oranı, kırıcı ve öğütücü parçaları için gerekli olan yüksek sertliği sağlar. Karbürleri destekleyen metalik matris de aşınma direnci ve mukavemet özelliklerinin geliştirilmesi için alaşım içeriği ve ısı işleme ile ayarlanabilir [7].

Alaşım içeriği % 4'ün altında olan düşük alaşımli beyaz dökme demirler, 350-550 HB arası sertliğe sahip olurken, yüksek alaşımli 450-850 HB sertliğe sahiptir. Şekil 2.9'da standart yüksek alaşımli dökme demirlerin sınıflandırılması görülmektedir [7].



Şekil 2.9 : Yüksek alaşımli dökme demirlerin sınıflandırılması [7]

ASTM A 532 sınıflandırması, aşınmaya dirençli martenzitik beyaz dökme demirleri kapsar. Çoğu döküm bu standartlara göre yapılırsa da, genelde her özel uygulama için belirli bir bileşim ayarlaması yapılarak döküm yapılır.

Yüksek alaşımli beyaz dökme demirler 2 ana gruba ayrılır:

1. Nikel-Krom beyaz dökme demirler : Düşük kromlu alaşımlardır, genellikle % 3-5 arası nikel ve % 1-4 arası krom içerirler.
2. Krom-Molibden beyaz dökme demirler : Genellikle % 11-23 arası krom, % 3'e kadar molibden içerirler. Sıklıkla da nikel ve bakırla alaşımlandırılır.

Çizelge 2.3'de standart martenzitik beyaz dökme demirlerin kimyasal bileşimleri görülmektedir.

Nikel-krom beyaz dökme demirler endüstriyel anlamda en eski yüksek alaşım grubudur. Nikel-krom beyaz dökme demirler (Ni-Hard) 50 seneyi aşan bir süredir kırma ve öğütme malzemesi olarak üretilmektedir.

Bu dökme demirlerde nikel birincil alaşım elementidir. Alaşıma % 3-5 oranında eklenen nikelin, ostenit matrisin perlite dönüşmesini engelleyici etkisi vardır. Ayrıca alaşıma % 1.4-4 oranında eklenen krom da nikelin grafitleştirme etkisini artırır. En uygun nikel-krom beyaz dökme demir alaşımının bileşimi, dökümün boyutları ve malzemenin çalışma şartlarına bağlıdır [7].

2.7.1 Yüksek kromlu beyaz dökme demirler

Yüksek aşınma dirençli beyaz dökme demirler kararlı karbür yapısı oluşturmak için krom ile alaşımlandırılırlar. Krom grafit yerine karbür yaparak, kararlı karbon zengini ötektik faz oluşturur. Genellikle Fe_3C ve Cr_7C_3 halinde olan karbürler karbür yapıcı elementlerin ilavesi ile daha kompleks yapılar olan $(Cr,Fe)_7C_3$ ve $(Fe,Cr)_3C$ 'a dönüşebilir. Beyaz dökme demirde yüksek krom miktarı (>%10) yapıda kararlı M_7C_3 karbürleri oluşturur [14,15,16].

Beyaz dökme demirler yüksek aşınma dirençlerinin yanında, kritik sıcaklığa yakın ($650^{\circ}C$) yüksek sıcaklık uygulamalarında da başarı ile kullanılabilir; zira bu sıcaklıklarda, beyaz dökme demirin sertliği adi karbon ve alçak alaşımlı çeliklerde olduğu gibi önemli oranda bir düşüş göstermez [5]. Çizelge 2.2'de düşük karbonlu ve martenzitik nikel-kromlu beyaz dökme demirlerin fiziksel özellikleri görülmektedir.

Çizelge 2.2 : Düşük karbonlu ve Martenzitik nikel-kromlu beyaz dökme demirlerin fiziksel özellikleri [9].

| Tanım | Yoğunluk (g/cm^3) | Termal genleşme katsayısı ($\mu m/m \cdot ^{\circ}C$) | Elektrik direnci ($\mu\Omega.m$) | Termal iletkenlik ($W/m.K$) |
|--|--------------------------|--|--|-------------------------------------|
| Düşük karbonlu beyaz dökme demir | 7.6 – 7.8 | 12 | 0.53 | 22 |
| Martenzitik Nikel- krom dökme demir | 7.6 – 7.8 | 8 – 9 | 0.80 | 30 |

Çizelge 2.3'de standart martenzitik beyaz dökme demirlerin ASTM A532 standardına göre kimyasal bileşimleri görülmektedir.

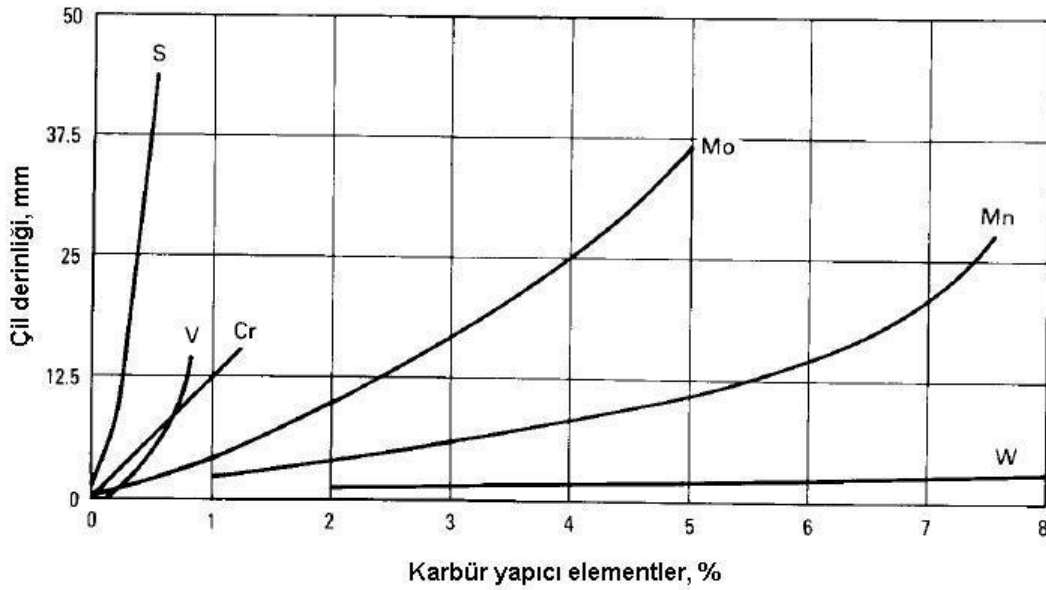
Çizelge 2.3 : Standart martenzitik beyaz dökme demirlerin kimyasal bileşimleri. (a) Bir bileşim aralığı yerine tek bir değer verilen yerlerde o değer maksimumu ifade etmektedir. (b) Toplam karbon) [9]

| Sınıf | Tip | Sembol | Bileşim (%) (a) | | | | | | | | |
|-------|-----|---------------|-----------------|---------|-----|------|---------|---------|---------|---------|------|
| | | | TK(b) | Mn | P | S | Si | Cr | Ni | Mo | Cu |
| I | A | Ni-Cr-HC | 3.0-3.6 | 1.3 | 0.3 | 0.15 | 0.8 | 1.4-4.0 | 3.3-5.0 | 1.0 | eser |
| I | B | Ni-Cr-LC | 2.5-3.0 | 1.3 | 0.3 | 0.15 | 0.8 | 1.4-4.0 | 3.3-5.0 | 1.0 | eser |
| I | C | Ni-Cr-GB | 2.9-3.7 | 1.3 | 0.3 | 0.15 | 0.8 | 1.1-1.5 | 2.7-4.0 | 1.0 | eser |
| I | D | Ni-Hi Cr | 2.5-3.6 | 1.3 | 0.1 | 0.15 | 1.0-2.2 | 7-11 | 5-7 | 1.0 | eser |
| II | A | % 12 Cr | 2.4-2.8 | 0.5-1.5 | 0.1 | 0.06 | 1.0 | 11-14 | 0.5 | 0.5-1.0 | 1.2 |
| II | B | % 15 Cr-Mo-LC | 2.4-2.8 | 0.5-1.5 | 0.1 | 0.06 | 1.0 | 14-18 | 0.5 | 1.0-3.0 | 1.2 |
| II | C | % 15 Cr-Mo-HC | 2.8-3.6 | 0.5-1.5 | 0.1 | 0.06 | 1.0 | 14-18 | 0.5 | 2.3-3.5 | 1.2 |
| II | D | % 20 Cr-Mo-LC | 2.0-2.6 | 0.5-1.5 | 0.1 | 0.06 | 1.0 | 18-23 | 1.5 | 1.5 | 1.2 |
| II | E | % 20 Cr-Mo-HC | 2.6-3.2 | 0.5-1.5 | 0.1 | 0.06 | 1.0 | 18-23 | 1.5 | 1.0-2.0 | 1.2 |
| III | A | % 25 Cr | 2.3-3.0 | 0.5-1.5 | 0.1 | 0.06 | 1.0 | 23-28 | 1.5 | 1.5 | 1.2 |

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler genel olarak iyi aşınma direnci ve tokluk özellikleri gösterirler. Bu nedenle geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Cevher kırıcıları, öğütücü değirmen bilyeleri, çeşitli astarlar, tarım alet ve makinaları, pistonlar ve dişlileri, çeşitli konveyörler, greyder bıçakları, pompalar, diskler, tuğla kalıpları, segmanlar ve çubuklar, madencilik ve mineral sanayi gibi yüksek aşınma direnci gerektiren yerlerde yüksek alaşımlı beyaz dökme demirler kullanılır [1,7].

2.7.2 Alaşım elementlerinin beyaz dökme demir üzerindeki etkileri

Birçok dökme demir tipinde alaşım elementlerinin (karbon ve silisyum da dâhil) malzemenin özelliklerine etkisi çok fazladır. Özellikle grafit ve karbürlerin miktar ve şekilleri, alaşım elementleri ile doğrudan ilgilidir. Genel olarak çok düşük miktarlarda alaşım elementi ilavesi çil derinliğinin artırılması, daha yüksek sertlik ve mukavemet için yeterlidir. Şekil 2.10'da çeşitli karbür yapıcı elementlerin çil derinliğine olan etkisi görülmektedir [9].

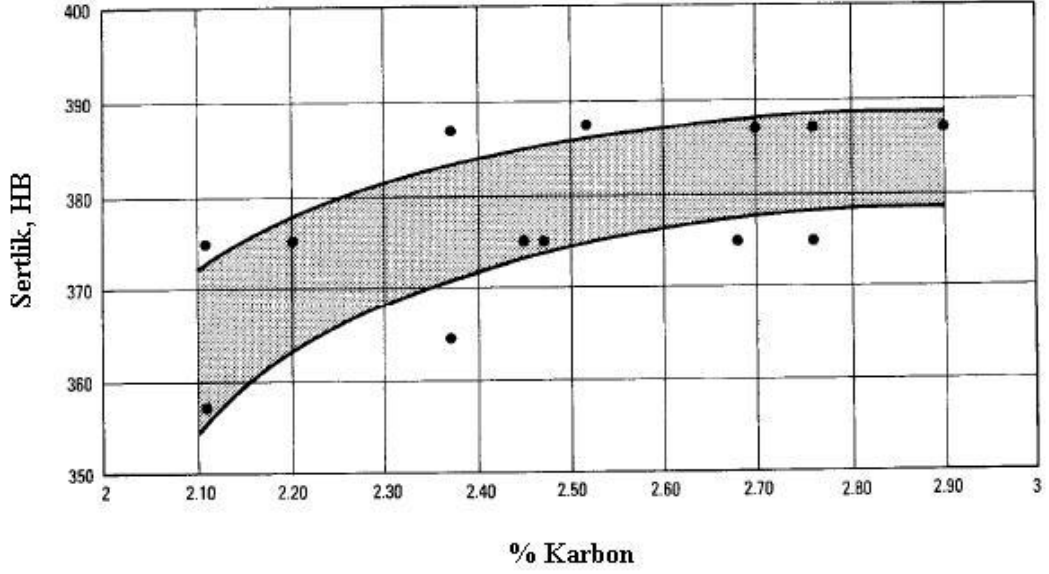


Şekil 2.10 : Çeşitli karbür yapıcı elementlerin çil derinliğine olan etkisi [9]

2.7.2.1 Karbon

Karbon, beyaz dökme demirin sertliğini artırır. Alaşım-sız veya düşük alaşımlı beyaz dökme demirlerde karbon içeriği normal olarak % 2.2 ile % 3.6 arasındadır. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ise bu sınır %2.2 'den ötektik bileşimin karbon içeriğine kadardır, bu da % 15 kromlu dökme demir için yaklaşık % 3.5 ve % 27 kromlu dökme demir için yaklaşık % 2.7 dir [9].

Değişen karbon içeriğinin düşük karbonlu beyaz dökme demirin sertliğine etkisi Şekil 2.11'da gösterilmiştir. Buna göre düşük karbonlu beyaz dökme demirlerin (~% 2.5) sertliği yaklaşık 375 HB (40 HRC) iken yüksek karbonlu beyaz dökme demirlerin (> % 3.5) sertliği yaklaşık 600 HB (57 HRC) dir.



Şekil 2.11 : Düşük karbonlu beyaz dökme demirin sertliğine karbonun etkisi

Beyaz dökme demirde, karbon kırılganlığı artırır. Katılaşma sırasında eğer silisyum içeriği yüksek ise karbon, grafit oluşum eğilimini artırır. Bu nedenle yüksek-karbonlu beyaz dökme demirlerde silisyum içeriğini % 1'in altında tutmak çok önemlidir [9].

2.7.2.2 Krom

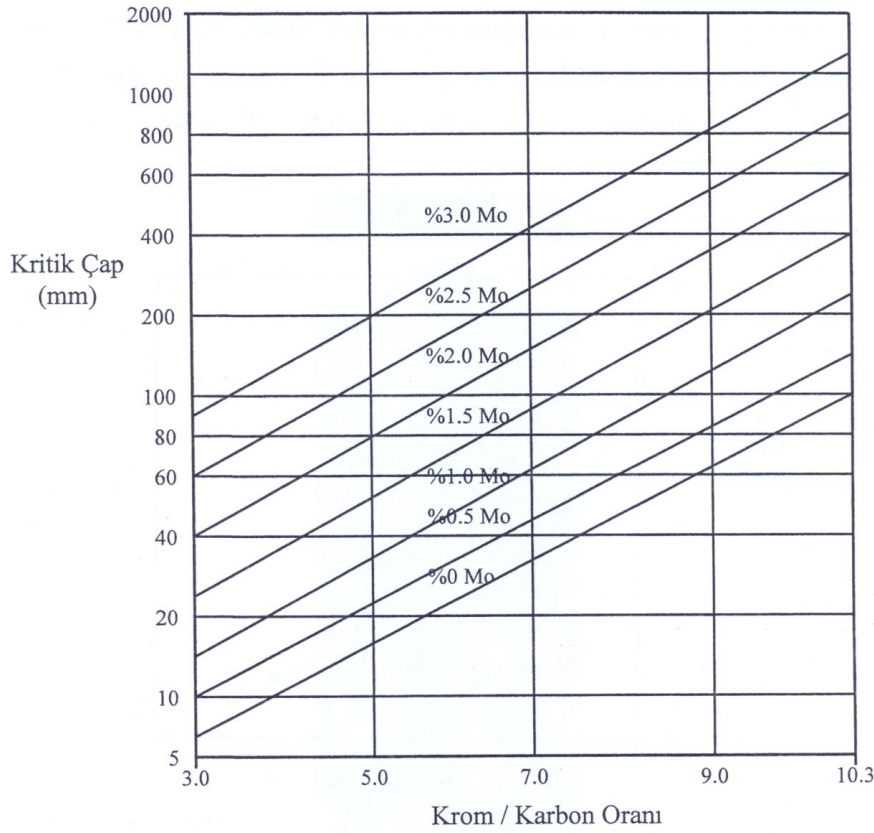
Kromun dökme demirlerde üç ana kullanım amacı vardır;

1. Karbür yapıcı olarak
2. Korozyon direnci sağlamak için
3. Yüksek sıcaklık uygulamalarında yapıyı kararlı hale getirmek için

Düşük seviyelerdeki krom ilavesinin (% 2- % 3) sertleştirme etkisi çok azdır ya da hiç yoktur. Bunun sebebi kromun büyük çoğunluğunun karbürler içinde bağlanmasıdır. Düşük krom miktarlarında, matris de M_3C karbürleri oluşur. Beyaz dökme demirde yüksek krom miktarı (>% 10) yapıda kararlı M_7C_3 karbürleri oluşturur. . Katılaşma karakteristikleri sebebiyle M_7C_3 karbürleri içeren ötektik altı demirler, M_3C karbürleri içeren demirlere oranla daha yüksek mukavemetli ve daha tokurlar [9].

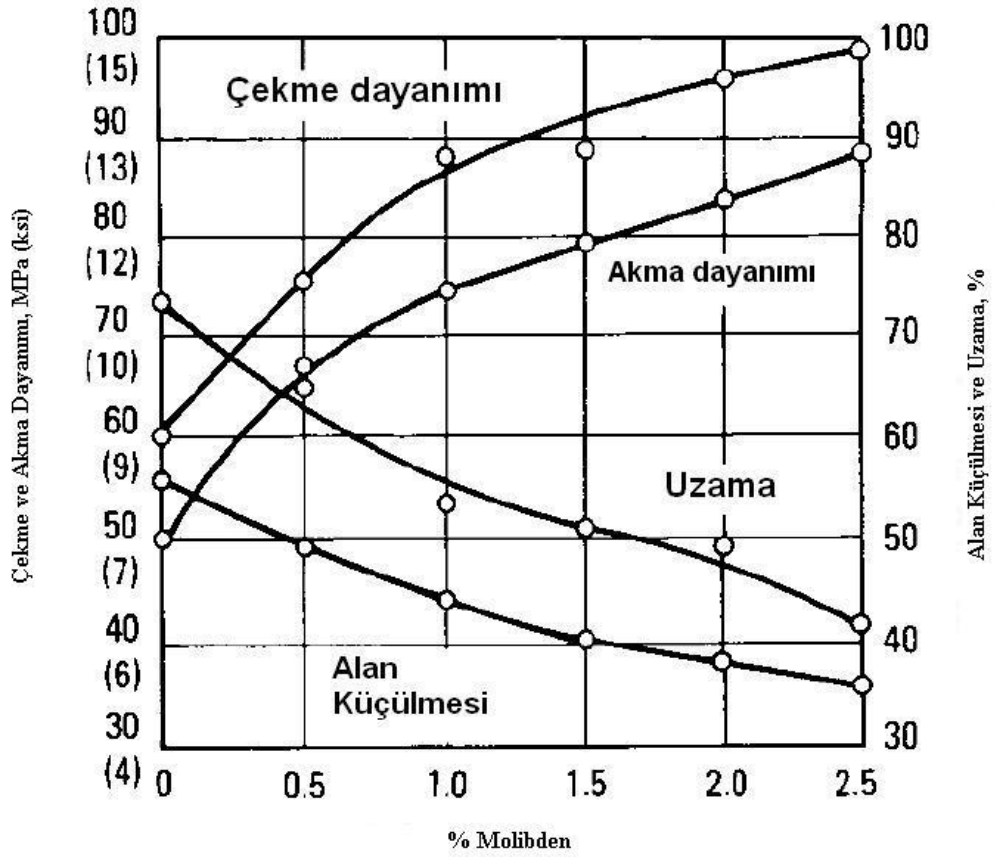
2.7.2.3 Molibden

Martensitik beyaz dökme demirler için yüksek aşınma direnci istenen yerlerde, % 0.5 - % 3 arası molibden ilavesi etkili bir biçimde perlit oluşumunu engeller. Molibden; bakır, krom ve nikel ile birlikte kullanıldığında etkisini artırır. Molibdenin bakır, nikel ve mangan'a göre üstün olan özelliği, kalıntı östenite sebep olmadan sertleşebilirliği arttırmasıdır [9,16]. Şekil 2.12'da farklı miktarlarda molibdenin yüksek-kromlu beyaz dökme demirlerin sertleşebilirliğine olan etkisi görülmektedir. Bu sertleşebilirlik havada sertleştirme için kritik çap olarak ölçülmüştür.



Şekil 2.12 : Molibdenin beyaz dökme demirin sertleşebilirliğine olan etkisi [9]

Molibden perlit engelleyici özellikleri sayesinde yüksek kromlu dökme demirlerde büyük avantaj sağlar. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde (% 12 - % 18) aşınma direncini arttırmak için kullanılır. % 1-4 molibden ilavesi, dökümler yavaş soğutulsa bile perlit oluşumunu engellemede çok etkilidir [9]. Şekil 2.13'de molibdenin çekme özelliklerine etkisi görülmektedir.



Şekil 2.13 : Molibdenin beyaz dökme demirin çekme dayanımı üzerindeki etkisi [9]

2.7.2.4 Vanadyum

Etkili bir karbür yapıcı elementtir ve çil derinliğini artırır. Çil derinliğindeki artışın miktarı döküm koşulları ve kesit boyu kadar, dökme demirin kimyasal bileşimine ve eklenen vanadyum miktarına bağlıdır. Vanadyumun ince kesitlerdeki güçlü çil etkisi, bileşime nikel ve bakır eklenerek ya da karbon veya silisyum artışı ile dengelenebilir. Karbür dengeleyici etkisinin yanı sıra, % 0.10 - % 0.50 arasında vanadyum ilavesi çil yapısını inceltir ve kaba taneli sütünsal yapıyı azaltır. Güçlü karbür yapıcı etkisi nedeniyle, sünek ve gri dökme demirlerde nadiren kullanılır [9].

2.7.2.5 Nikel

Nikel beyaz dökme demirde tamamen ostenitik fazda dağılmış halde bulunmaktadır. Silisyum gibi nikel de grafit oluşumunu destekler. Nikelin bu grafit oluşturucu etkisi krom ile birlikte olduğunda dengelenir. Yüksek kromlu dökme demirlerde nikel miktarı en fazla % 15 olabilir. Düşük kromlu dökme demirlere % 2.5'e kadar eklenen

nikel, yapıda daha sert ve ince perlit meydana getirir, bu da malzemenin aşınma direncini artırır. Yüksek miktarlardaki nikel ilavesi (% 4.5'e kadar) ile perlit oluşumu tamamen bastırılır ve martenzitik bir yapıya ulaşılır. Bu yapı Ni-Hard (standartlarda nikel-krom martenzitik dökme demir olarak geçer) tipi dökme demirlerin temel yapısıdır [9].

Ticari Ni-Hard sınıfı dökme demirlerden biri olan Ni-Hard IV, (% 1.0-2.2 Si, % 5-7 Ni ve % 7-11 Cr) döküm sonrası durumda, M_7C_3 ötektik karbürleri içeren bir martenzitik yapıya sahiptir. Eğer yapıda kalıntı ostenit bulunursa, alaşımın martenzit miktarı ve sertliği, soğutma işlemleri ve ya havada yeniden ostenitleme ile artırılabilir. Ni-Hard IV tipi dökme demirler iyi mukavemetleri, toklukları ve aşınma dirençleri sebebiyle genellikle pompa ve çimento hazırlama ekipmanlarında kullanılırlar [9].

Nikel yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde (% 12-28 Cr) perlit oluşumunu bastırmak için kullanılır. Nikel, molibden ile birlikte genellikle % 0.2-1.5 arasında ilave edilir. Bu miktardan fazla nikel ilavesi aşırı ostenit dengelenmesine meyilli bir durum yaratır ki bu da kalıntı ostenite yol açabilir. Büyük döküm parçalarında yavaş soğuma sebebi ile, martenzitik yapının elde edilmesi için kimyasal bileşimin kontrolü çok önemlidir [9].

2.7.2.6 Bakır

Yeteri miktarda ilave edilen bakır, hem düşük hem yüksek kromlu beyaz dökme demirde perlit oluşumunu engeller. Nikel ile kıyaslandığında etkisi nispeten daha azdır, bunun sebebi bakırın östenit içindeki kısıtlı çözülebilirliğidir. Bakır ilavesi % 2.5 ile sınırlandırılmalıdır. Bu sınırlama, bakırın Ni-Hard tipi dökme demirlerde tamamen nikelin yerini alamaması anlamına gelir [9].

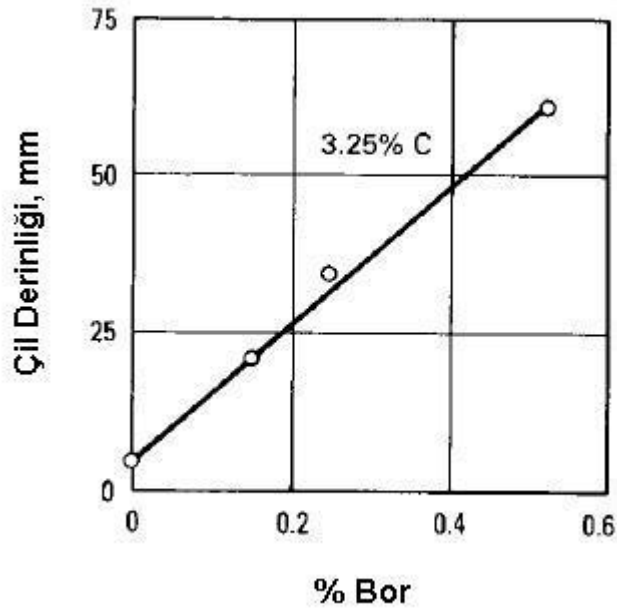
Bakır, perlit engelleyici etkisini en kuvvetli şekilde, % 0.5'ten % 2.0'ye molibden ilavesiyle birlikte kullanılmasıyla gösterir. Bu kombinasyonun sertleşebilirliği çok iyidir, bu da eğer bakır ve molibden birlikte eklenirse, aralarında karşılıklı bir etkileşim olduğunu gösterir. Martenzitik yüksek kromlu dökme demirlerde bakır miktarı % 1.2 ile sınırlandırılmıştır, daha yüksek oranda bakır ilavesi kalıntı ostenit oluşumuna neden olabilir. Bakır, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılacak bazı özel yüksek nikelli gri dökme demirlerde % 3-10

arasında eklenir. Bakır bu tip malzemelerde korozyon direncini özellikle oksidasyona olan direnci artırır [9].

2.7.2.7 Bor

Dökme demirlerde bor, ferrobör ilavesi ile verilir. Dökme demirlerin kompozisyonunda bulunan borun birkaç avantajı vardır. Bor, dökme demirde karbür yapıcıdır, karbür mikro sertliğinin çok yüksek seviyeler çıkmasını sağlar, böylece aşınma direnci oldukça artar, mikroyapıdaki karbürleri inceltir ve sürekli iğneler haline getirir. Katılaşma esnasında oluşan bu karbürler dökme demirin beyaz renkte olmasını sağlar [10,14,15].

Dökme demire % 0.03 e kadar bor ilavesi aşınma direncini iyileştirir. % 0.02-0.1 arasında bor ilavesi yapıdaki grafitleşmeyi önler, yüzey sertliğini artırır. Şekil 2.14'de bor miktarının % 3.25 karbonlu beyaz dökme demirin çil derinliğine olan etkisi görülmektedir.



Şekil 2.14 : Bor miktarının çil derinliğine etkisi [9].

Petrovic ve arkadaşları, % 13 krom ve % 2.3 karbon içeren beyaz dökme demire, % 0.26, % 0.39 ve % 0.59 oranında bor ekleyerek yapıdaki değişimleri gözlemlemişlerdir. Buna göre % 13 kromlu beyaz dökme demirde bor ihtivasi, alaşımın yapısındaki ötektik karbür hacmini artırmış aynı zamanda birincil fazların

hacmini azaltmıştır. Birincil faz da daha az dendrit oluşumu görülmüştür ve ötektik karbürler irileşmiştir [11].

2.7.3 Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ısıl işlem

Krom içeriği % 12-30 olan beyaz dökme demirler öğütme ve kumlama gibi yüksek aşınma direnci gereken yerlerde kullanılır. Bu demirler döküm halinde östenit matris içinde M_7C_3 tipi ötektik karbürler içerir. Bazı özel uygulamalar için bu dökme demirler döküm halinde kullanılabilir çünkü östenitik yapıda, aşınma oluşurken aynı anda östenit matris kendini yenileyen aşınma dayanımlı bir yüzey oluşturarak kullanım sertleşmesi sağlar [1].

Fakat, birçok uygulama için ısıl işlem uygulanmış martensitik mikroyapı, aşınma yüzeylerindeki ötektik karbürlere destek vererek aşınma dayanımını artırır. Bu tip dökme demirler, tamamen martensitik mikroyapı elde etmek için genellikle 950-1050 C arasında tutularak destabilize edilir. Bu sırada oluşan ikincil karbür çökmesiyle matrisdeki krom ve karbon içeriği düşer [1].

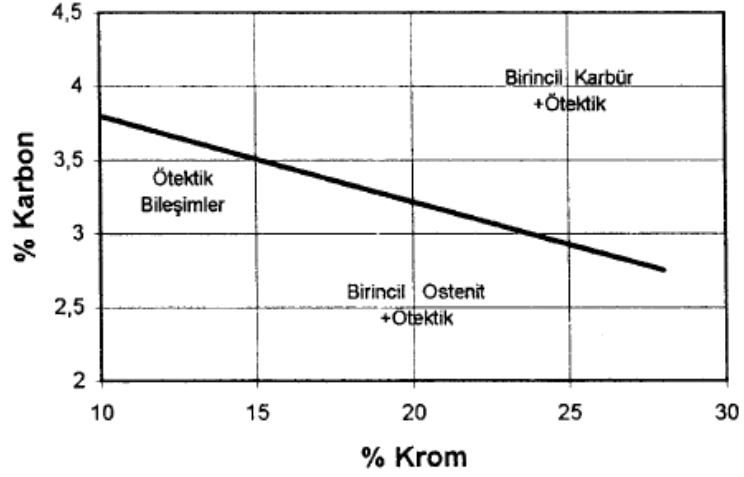
Bu stabilizasyon işleminden sonra sertleşebilirlik krom ve karbon içeriği ile belirlenir. Krom ve karbon birleşerek ötektik ve ikincil karbürleri oluşturur. Karbon içeriği sabit tutularak krom içeriği arttırılırsa sertlik artar [1].

2.7.4 Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde karbürler

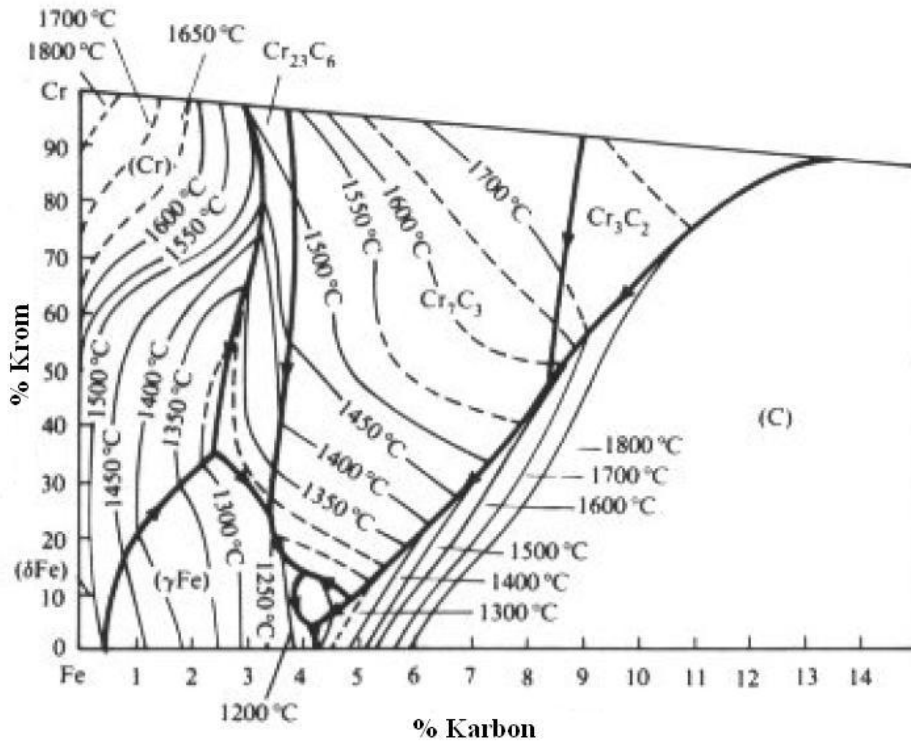
Yüksek kromlu beyaz dökme demirler yapıda bulunan krom karbürlerin etkisiyle çok yüksek sertliğe ve aşınma direncine sahiptirler. Mikroyapıda iki çeşit karbür bulunur; süreksiz ötektik karbürler ve ikincil karbürler. Karbürler mikroyapıda hacimce % 40-50 oranında bulunurlar. Şekil 2.15'de krom/karbon oranının yapıdaki karbürlerle ilişkisi görülmektedir. Karbürler mikroyapıda hacimce % 40-50 oranında bulunur, bunun dışında kalan kısım matristir. Oluşan bu karbürler demirdeki krom/karbon oranı ile belirlenir. Yapıdaki yüksek krom içeriği karbürleri kararlı hale getirir [12,18].

Alaşımly beyaz dökme demirler, aşınmaya karşı olan dirençlerini mikroyapı içindeki sert ötektik karbürlerden alır. Bu alaşımların aşınma dayanımı ve kırılma tokluğu bu sert karbürlerin, tip, oran ve morfolojisi ile dentritik ve ötektik matris yapısına bağlıdır. Aşınma direnci için kullanılan dökme demirlerin çoğunluğu ötektikaltı ve

birincil östenit fazında bulunurlar (Şekil 2.16). Katılaşmaları birincil östenitin çekirdeklenmesi ve büyümesini takiben östenit ve karburlu ötektik yapıya dönüşmesi şeklinde olur [12,19].



Şekil 2.15 : Krom/Karbon oranı arasındaki ilişki [12]



Şekil 2.16 : C-Fe-Cr Denge diyagramı [17,20]

Krom miktarı % 6'nın altında olursa ötektik karbür, sürekli ledebürit ötektik olarak büyüyen M_3C den oluşur. Ötektik M_3C karbürler, sürekli yapıları nedeniyle sınırlı kırılma dayanımına sahiptirler bu yüzden sadece darbe içermeyen, düşük kuvvetli mekanik aşınma uygulamalarında kullanılırlar. Krom miktarı % 8-10 arasındaki dökme demirlerde daha az sürekli dubleks ötektik karbürler oluşur. Bu karbürler M_3C karbür katmanları tarafından çevrelenmiş M_7C_3 yapısındadır. Bu sayede aşınma dayanımı artar. Krom miktarı % 12'nin üstüne çıktığında yapıda daha az irilikte ve lifli M_7C_3 karbürleri oluşur. M_7C_3 'ün daha yüksek sertliği ve süreksiz olan yapısı nedeniyle yüksek krom alaşımlarında daha fazla aşınma ve darbe direnci sağlanır [1,21]. C-Fe-Cr denge diyagramı Şekil 2.16'te görülmektedir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar için farklı bileşimlerde alaşım elementi içeren yüksek kromlu beyaz dökme demirler dökülmüş ve bu dökülen parçalar üzerinde analizler ve testler yapılarak alaşım elementleri ilavesinin beyaz dökme demir üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan tüm hammaddeler ve ekipmanların özellikleri ile deneysel çalışmanın bütün aşamaları bu bölümde anlatılmıştır.

3.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Hammaddeler

Deneysel çalışmalar için, bor katkı miktarı farklı 5 beyaz dökme demir alaşımının dökümü yapılmıştır. Bu dökme demirler içerdikleri bor miktarına göre B0, B005, B010, B015, B02, B04, B06, B08 şeklinde kodlanmıştır. Döküm için kullanılan hammaddeler ve bileşime katılan alaşımlandırma elementlerinin miktarları Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Döküm alaşımlarının hazırlanmasında kullanılan hammaddeler ve ağırlıkları (kg)

| Malzeme | B0 | B005 | B010 | B02 | B015 | B04 | B06 | B08 |
|----------------|-----|------|------|-----|------|-----|-----|-----|
| Ferro-Bor | - | 0.5 | 1 | 1.5 | 1.5 | 3 | 4.5 | 8 |
| Karbon | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Molibden | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 |
| Ferro-Mangan | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1.5 |
| Ferro-Silisyum | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1 |
| Krom | 15 | 10 | 10 | 10 | 10 | 15 | 10 | 15 |
| 430 SS Hurda* | 140 | 90 | 90 | 140 | 90 | 140 | 140 | 170 |

(*Ağırlıkça % 16-18oranında krom içeren 430 paslanmaz çelik)

Çizelge 3.2 : Kullanılan hammaddelerin safiyetleri

| % | C | Si | S | Al | B | Mo | Cr | Mn | Cu |
|---------------|---------------|-------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ferrobör | 0.65 | 0.22 | eser | 0.05 | 17.78 | eser | eser | eser | eser |
| Molibden | 0.001 | 0.001 | 0.001 | eser | eser | 99.96 | eser | eser | eser |
| Ferromanganez | 6.76 | 0.28 | 0.010 | eser | eser | eser | eser | 78.53 | eser |
| Krom | 0.012 | eser | 0.013 | 0.095 | eser | eser | 99.02 | eser | 0.002 |
| Ferrosilisyum | 0.195 | 75.08 | 0.005 | 2.05 | eser | eser | eser | eser | eser |
| Karbon | 99.1- 99.8 | eser | 0.01- 0.03 | eser | eser | eser | eser | eser | eser |

Çizelge 3.2’de döküm için kullanılan hammaddelerin safiyetleri görülmektedir.

B0 parçası ferrobör katılmamış alaşımı temsil etmektedir, B005 % 0,09, B010 % 0,18, B015 % 0,27, B02 % 0,2 B, B04 % 0,4 B, B06 % 0,6 B ve B08 %0,8 B içerikli şekilde sarj hazırlanarak döküm yapılmıştır.

Ergitme işlemi 350 kg kapasiteli INDUCTOTHERM marka, 250 kW güç aralığında ve 500-9.600 Hz frekans aralığında çalışan indüksiyon ocağında gerçekleştirilmiştir. 430 SS paslanmaz çelik hurda şarjıyla başlayan ergitme işlemine alaşım elementleri ferro alaşım şeklinde ilave edilmiştir. Sıcaklık kontrollü bir şekilde artırılarak , thermocouple ile döküm sıcaklığı sürekli ölçülmüştür. 1570 °C’ye ulaşan sıvı metal preslenmiş kum kalıplara dökülmüş ve soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra soğuyan parçalar yolluklarından ayrılmış ve yüzey temizleme işlemlerine tabi tutulmuştur.

Yüzey temizleme işlemlerinin ardından, döküm sonrası parçalardan birer numune alınmıştır. Daha sonra kalan parçalar fırına konmuş oda sıcaklığından 980°C ye çıkan fırında 1 saat tutularak ısıl işlem görmüşlerdir. Daha sonra bu parçalar 50000 m³ lük hava akımıyla 1.5°C/sn hızla soğutulmuşlardır. Isıl işlem görmüş parçalardan da birer

numune alınmış ve kalan parçalar 300⁰C de 6 saat tutularak temperlenmiştir. Temperlenmiş parçalardan da analizler için birer numune alınmıştır.

3.2 Deneysel Çalışmalar ve Karakterizasyonda Kullanılan Cihazlar

Farklı kimyasal bileşimlerde üretilen beyaz dökme demirler sertlik ölçümleri ve mikroyapı analizleri için Lam Plan MM 220 kesme makinesinde malzemenin mikroyapısını yansıtacak şekilde uygun bölgelerden kesilmiş ve Lam Plan 8008 Sıcak bakalite alma cihazında bakalite alınmıştır.

Bakalite alınan numuneler Lam Plan MM 8027 parlatma cihazında sertlik ölçümleri için parlatılarak hazırlanmıştır. Numuneler sertlik ölçümlerinin ardından Pikrik asit ile dağlanarak mikroyapı görüntüleri için hazır hale getirilmiştir.

Numunelerin sertlik ölçümleri Struers Duramin A300 marka mikro sertlik cihazında 1 kg yük uygulanarak en az 10 farklı bölgeden ölçülen değerlerin ortalamasının alınması ile tespit edilmiştir. Numunelerin mikroyapı görüntülerinde Optik mikroskop cihazı kullanılarak her bir numune için 3 farklı büyütme seçilerek elde edilmiştir.

Malzemelerin kalitatif faz analizleri İkinci nesil katı-hal dedektörüne sahip (Pixel Tech) PANalytical X'Pert Pro XRD cihazı ile yapılmıştır. XRD cihazı ile cevher, toz malzeme, metal plaka, ince film numunelerinin kalitatif faz analizleri, fazların kristal yapı analizleri, rietveld metodu yöntemi ile kantitatif faz analizleri gerçekleştirilmektedir.

Bakalite alınan numunelere CAMECA SX-100 marka Elektron MikroProb Analiz (EPMA) cihazı ile incelemeler yapılmıştır. EPMA tekniğinde oldukça kararlı (akım yoğunluğu, hızlandırma voltajı ve sabit demet çapı) bir elektron demetinin numuneye gödnerilmesi sonucunda meydana gelen demet-numune etkileşimiyle açığa çıkan karakteristik x-ışınlarının dalga boylarına sınıflandırılmasıyla elementek analiz yapılır. EDS tekniğine göre çok daha yüksek hassassyette kalitatif ve tam kantitatif analiz yapabilme yeteneği mevcuttur.

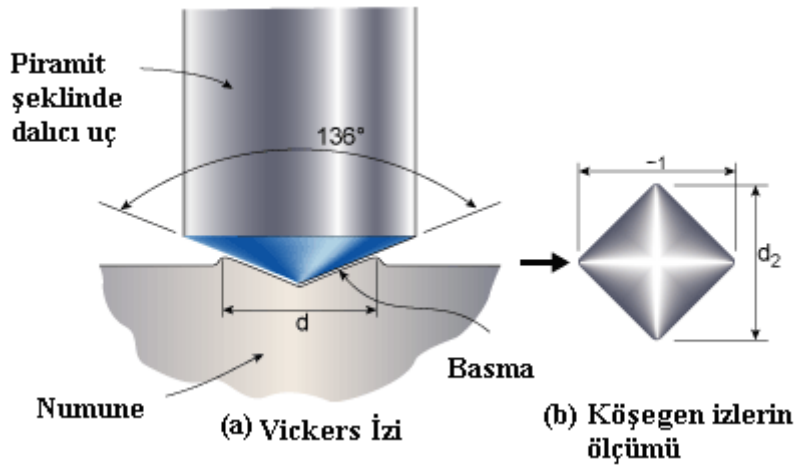
Döküm işlermlerinden sonra elde edilen parçalardan eğme deneyi için numuneler çıkartılmıştır. Malzemeler tel erozyon ile kesim işlemine tabi tutulmuşlardır. Elde

edilen numuneler Instron marka mekanik test cihazında eğme testine tabi tutulmuşlardır. Malzemelerin aşınma testleri Tribo Technic marka Tribo Tester aşınma cihazında yapılmıştır.

3.3 Karakterizasyon Çalışmaları

3.3.1 Sertlik Ölçümleri

Numunelerin sertlik ölçümleri döküm sonrası, ısıl işlem sonrası ve temperleme sonrası haller için ölçümleri Struers Duramin A300 marka mikro sertlik cihazında 1 kg yük uygulanarak en az 10 farklı noktadan sertlik ölçümleri olarak yapılmıştır.



Şekil 3.1 : Vickers sertlik testinin şematik görünümü

F= Yük (kgf)

d = d₁ ve d₂ ' nin aritmetik ortalaması (mm)

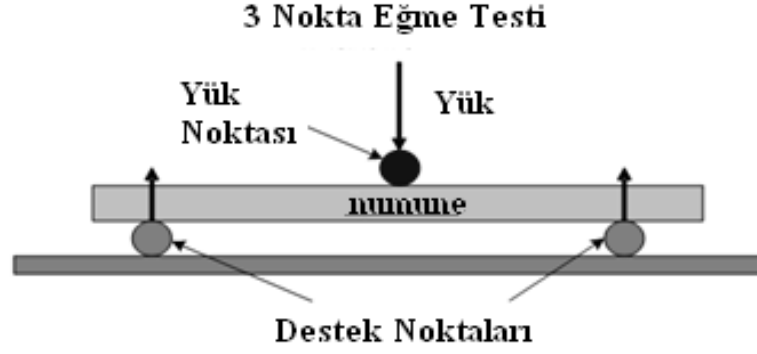
$$HV = 1.854 \frac{F}{d^2} \quad (3.1)$$

HV = Vickers sertlik

Vickers değeri olarak (3.1)'deki formülle hesaplanan sertlikler Rockwell C cinsine çevrilmiştir.

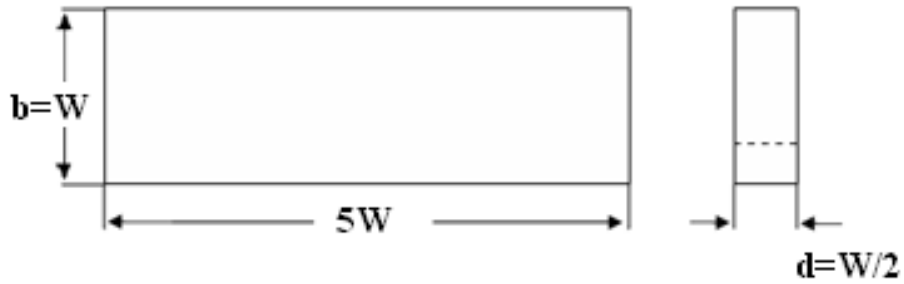
3.3.2 Eğme mukavemeti ölçümleri

Dökümü yapılan malzemelerin eğme mukavemetlerini belirlemek için, ASTM E 399 standartlarına göre uygun boyutta kesilen numunelere Instron marka Universal mekanik test cihazında 3-nokta eğme testi uygulanmıştır.



Şekil 3.2 : 3 Nokta eğme testinin şematik gösterimi

ASTM E 399 standartında verilen numune boyutunda ve deney düzeneğinde gerçekleştirilen testlerde her bileşimin döküm sonrası, ısıl işlem sonrası ve temperleme sonrası halleri için 3 adet numune kullanılmıştır. Yük uygulama hızı 1 mm/dak dır.



Şekil 3.3 : 3 Nokta eğme testi numune boyutları

Deneyler sonunda elde edilen kuvvet değerleri aşağıdaki formül ile eğme mukavemeti değerlerine çevrilir;

$$Egme\ Mukavemeti = \frac{3Pl}{2bd^2} \quad (3.2)$$

P: Uygulanan yük, l: Destekler arası mesafe, b: numune geniŐliđi, d: numune kalınlığı

3.3.3 AŞınma test lmleri

Altı farklı bileşimdeki numuneler temperleme sonrası halleri için Şekil 3.4'de görülen Tribo Technic marka Tribo Tester aşınma cihazında aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Test parametreleri 5 N yük, 5.0 mm/s kayma hızı, 5 mm iz mesafesi ve 25000 mm aşınma toplam yolu olarak belirlenmiŐti. Testler için 6 mm çapında almne aŐındırıcı top kullanılmıŐtur. Testler oda sıcaklığında ve % 40 nem oranına sahip ortamda yapılmıştır.



Şekil 3.4 : Tribo Tester aşınma cihazı

4. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

4.1 Kimyasal Bileşim Analizleri

Dökümleri yapıların farklı bileşimdeki beyaz dökme demirlerin kimyasal analizleri Çizelge 4.1’de görülmektedir.

Çizelge 4.1 : Kimyasal bileşimler

| Element (%) | B0 | B005 | B010 | B02 | B015 | B04 | B06 | B08 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| B | - | 0.08 | 0.10 | 0.10 | 0.13 | 0.27 | 0.38 | 0.56 |
| C | 4.18 | 3.67 | 3.69 | 3.83 | 3.73 | 4.09 | 4.06 | 3.92 |
| Mo | 1.87 | 1.64 | 1.63 | 2.07 | 1.64 | 1.70 | 1.80 | 2.18 |
| Si | 0.55 | 0.68 | 0.73 | 0.79 | 0.71 | 0.85 | 0.69 | 1.01 |
| Zn | 0.014 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.03 | - | 0.76 |
| Cu | 0.10 | 0.04 | 0.13 | 0.05 | 0.13 | - | 0.03 | 0.016 |
| Ni | 0.79 | 0.25 | 0.28 | 0.08 | 0.31 | 0.05 | 0.09 | 0.19 |
| Mn | 0.97 | 0.60 | 0.59 | 0.52 | 0.60 | 0.46 | 0.63 | 0.64 |
| Cr | 18.00 | 18.76 | 19.23 | 18.28 | 19.09 | 19.25 | 19.14 | 19.60 |
| V | 0.10 | 0.10 | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.07 | 0.10 |
| S | 0.045 | 0.02 | 0.20 | - | 0.02 | - | 0.011 | 0.021 |
| P | 0.062 | 0.23 | 0.023 | 0.118 | 0.02 | 0.095 | 0.078 | 0.034 |
| Kalan(Fe) | 73.31 | 73.92 | 73.27 | 73.94 | 73.48 | 72.97 | 72.80 | 70.07 |

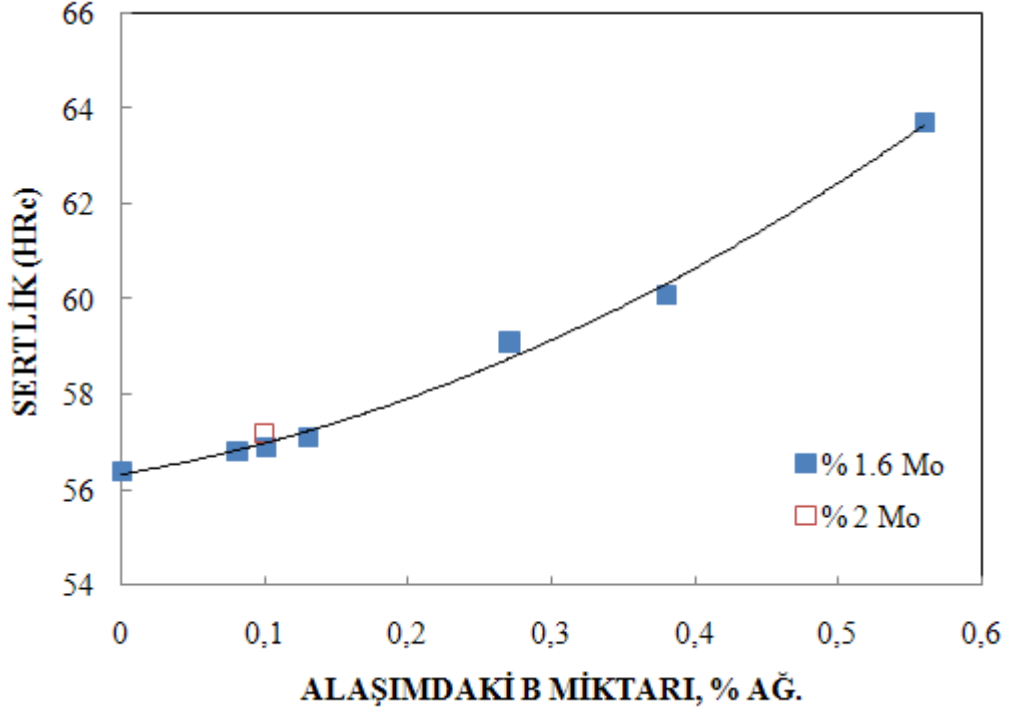
4.2 Sertlik Analizleri

Yüksek kromlu beyaz dökme demir parçalara döküm sonrası, ısıtım işlem sonrası ve ısıtım işlem ve temperleme sonrası halleri için 1 kg yük uygulanarak en az 10 farklı noktadan sertlik ölçümleri yapılmış ve bunların ortalaması alınmıştır. Bu parçaların sertlik analizi sonuçları (Rockwell C cinsinden) Çizelge 4.2’de görülmektedir.

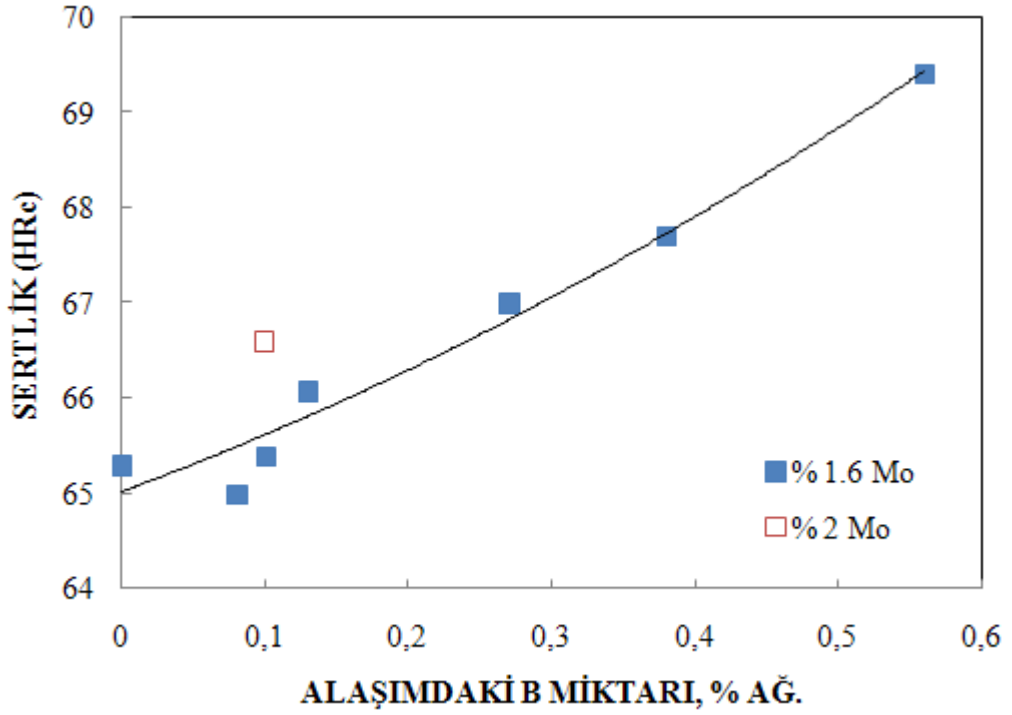
Çizelge 4.2 : Sertlik ölçümü sonuçları (HRc) (Her bir numunede yapılan 10 adet ölçümün ortalaması)

| Numune | B0 | B005 | B010 | B02 | B015 | B04 | B06 | B08 |
|--------------------------------------|------|-------|-------|------|-------|------|------|------|
| Döküm Sonrası | 56.4 | 56.8 | 56.9 | 57.2 | 57.1 | 59.1 | 60.1 | 63.7 |
| Isıtım işlem sonrası | 65.3 | 65 | 65.4 | 66.6 | 66.08 | 67.0 | 67.7 | 69.4 |
| Isıtım işlem + Temperleme Sonrası | 65.6 | 66.37 | 65.66 | 65.2 | 66.42 | 66.4 | 67.3 | 68.9 |

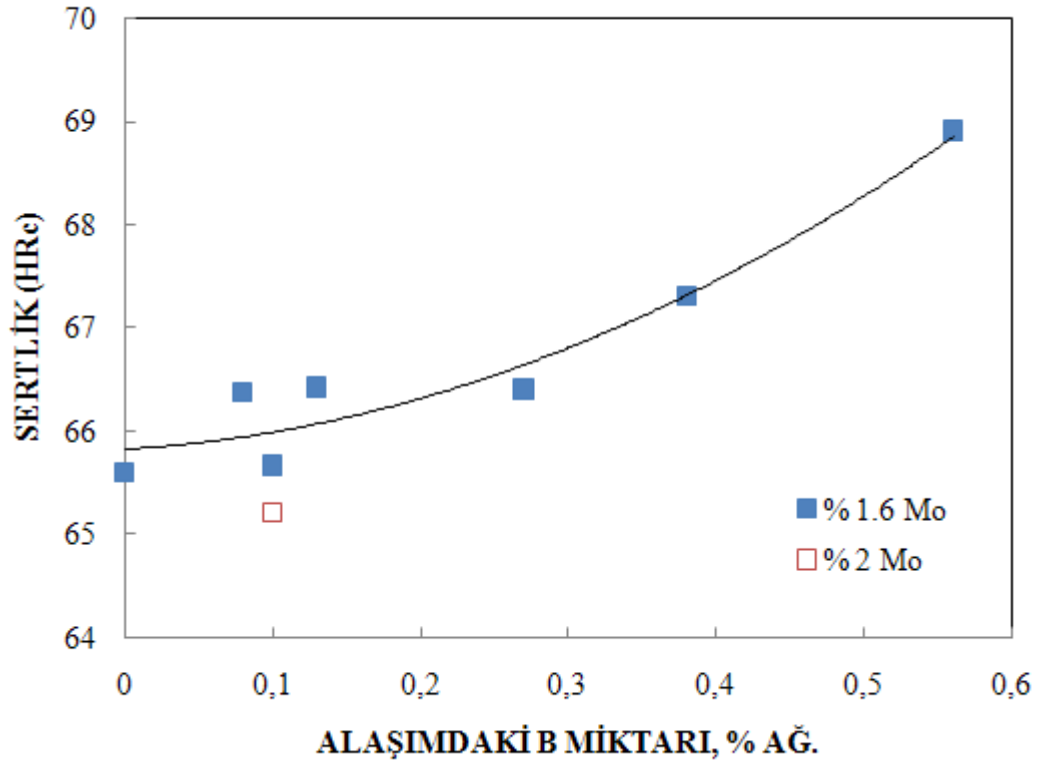
Alaşım elementleri ilavesinin sertliklere olan etkisi döküm sonrası için Şekil 4.1’de, ısıtım işlem sonrası için, Şekil 4.2’de, ısıtım işlem ve temperleme sonrası haller için ise Şekil 4.3’teki grafiklerde görülmektedir.



Şekil 4.1 : Döküm sonrası için bor miktarının sertliğe olan etkisi



Şekil 4.2 : Isıl işlem sonrası için bor miktarının sertliğe olan etkisi

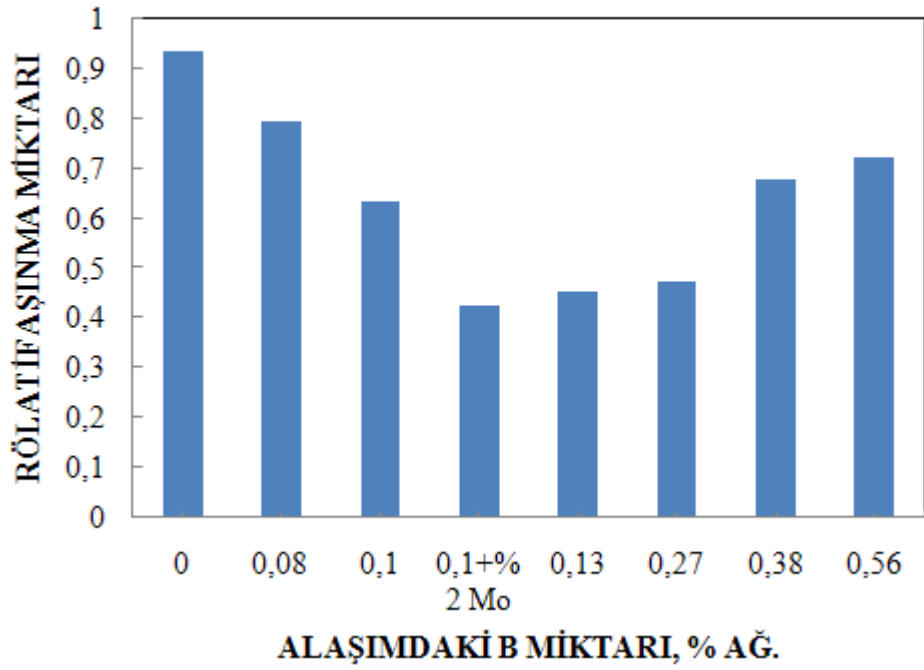


Şekil 4.3 : Isıl işlem ve temperleme sonrası için bor miktarının sertliğe olan etkisi

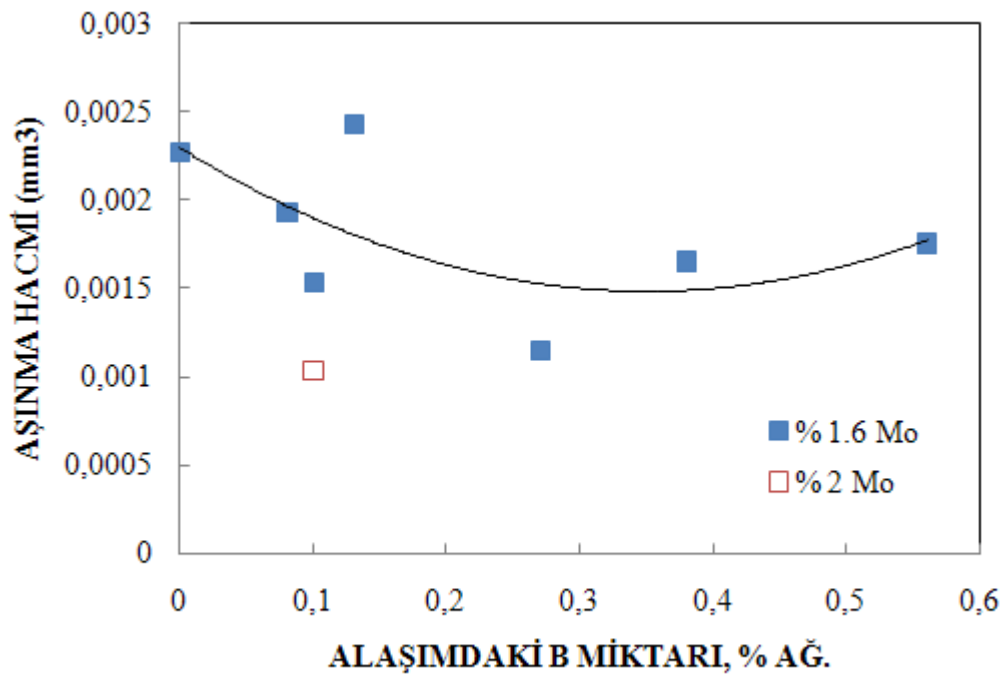
4.3 Aşınma Testi

Aşınma testleri için temperleme uygulanmış malzemelerden numuneler alınmıştır. Testler Oscillating Tribo Tester marka aşınma test cihazında yapılmıştır. Testler 5N yük altında, 25000 mm iz uzunluğu olacak şekilde, 5 mm/s kayma hızıyla yapılmıştır. Testlerde 6 mm çapında alümina top kullanılmıştır. Tüm testler oda sıcaklığında yapılmıştır. Şekil 4.4’de farklı bor miktarlarına sahip numunelerin rölatif aşınma miktarları görülmektedir.

Numuneler üzerinde açılan izler Veeco Dektak 6m marka Profilometre ile ölçülmüş ve aşınma hacimleri hesaplanmıştır. Bor miktarının aşınma hacmine olan etkisi Şekil 4.5’de görülmektedir.



Şekil 4.4 : Alaşımındaki bor miktarının rölative aşınma dayanımına olan etkisi



Şekil 4.5 : Alaşımındaki bor miktarının aşınma hacmine olan etkisi

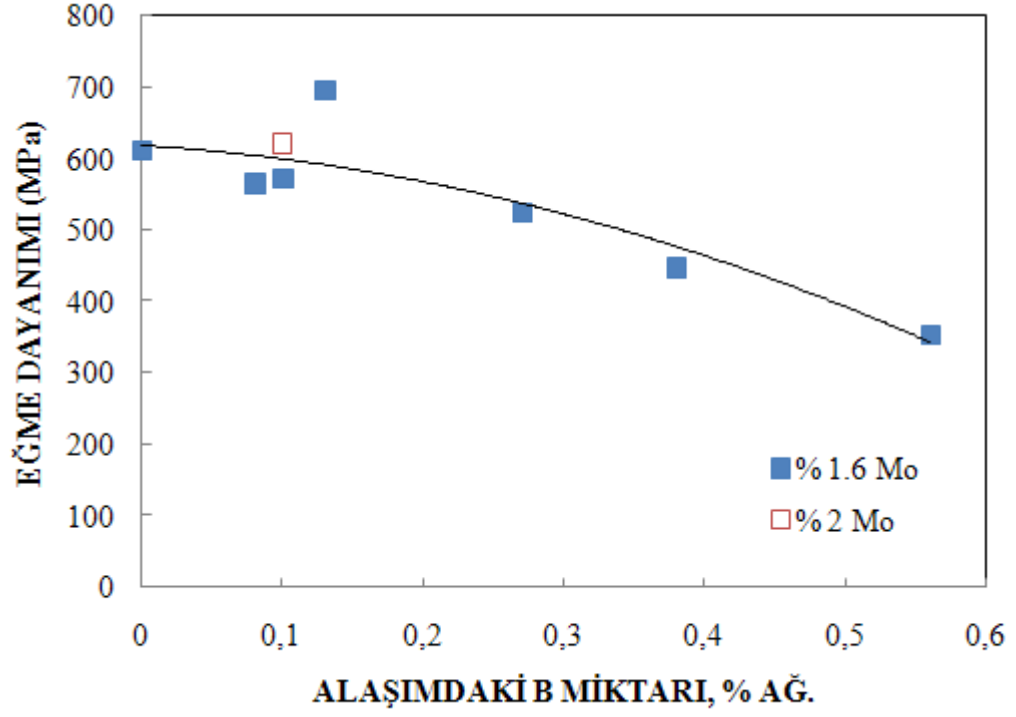
4.4 3 Nokta Eğme Testi

Üretilen farklı alaşımdaki malzemelerin eğme dayanımlarını tespit etmek için, ısıtılma işlem ve temperleme uygulanan her bir malzemedan ASTM E399-90 standartlarına uygun 3 nokta eğme numuneleri kesilmiştir. Eğme testleri INSTRON 1195 marka mekanik test cihazında yapılmıştır. 3 nokta eğme testinde destek noktaları üzerine yerleştirilen test numunesine orta noktasına gelecek şekilde yük uygulanmıştır. Numenin kırıldığı andaki yük kaydedilmiştir. Her bir numune için 3 er tane ayrı test yapıp ortalaması alınmıştır. Çizelge 4.3’de ısıtılma işlem ve temperleme uygulanmış alaşımların eğme dayanımları görülmektedir.

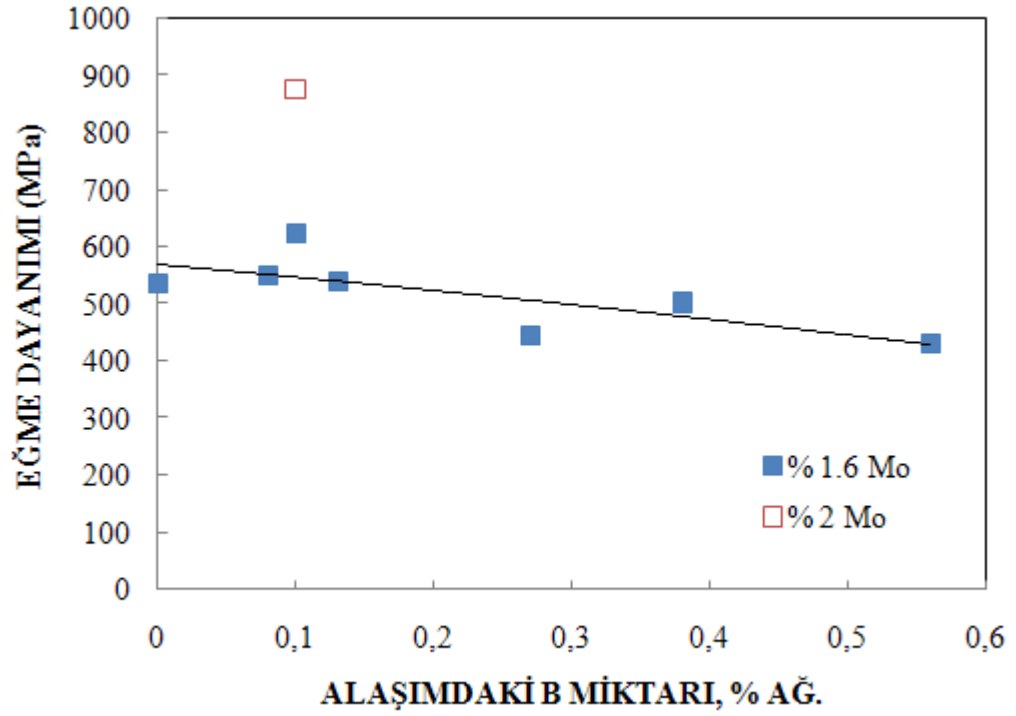
Çizelge 4.3 : Farklı bileşimlerdeki alaşımların eğme dayanımları

| Alaşım | Eğme Dayanımı (MPa) | |
|--------|---------------------|------------|
| | Isıl işlem | Temperleme |
| B0 | 612 | 535 |
| B005 | 566 | 549 |
| B010 | 571 | 623 |
| B02 | 620 | 877 |
| B015 | 695 | 538 |
| B04 | 524 | 443 |
| B06 | 448 | 502 |
| B08 | 355 | 430 |

Alaşımdaki bor miktarının ısıtılma işlem görmüş malzemelerin eğme dayanımına olan etkisi Şekil 4.6’de görülmektedir. Şekil 4.7’de bor miktarının temperlenmiş malzemelerin eğme dayanımına olan etkisi görülmektedir.



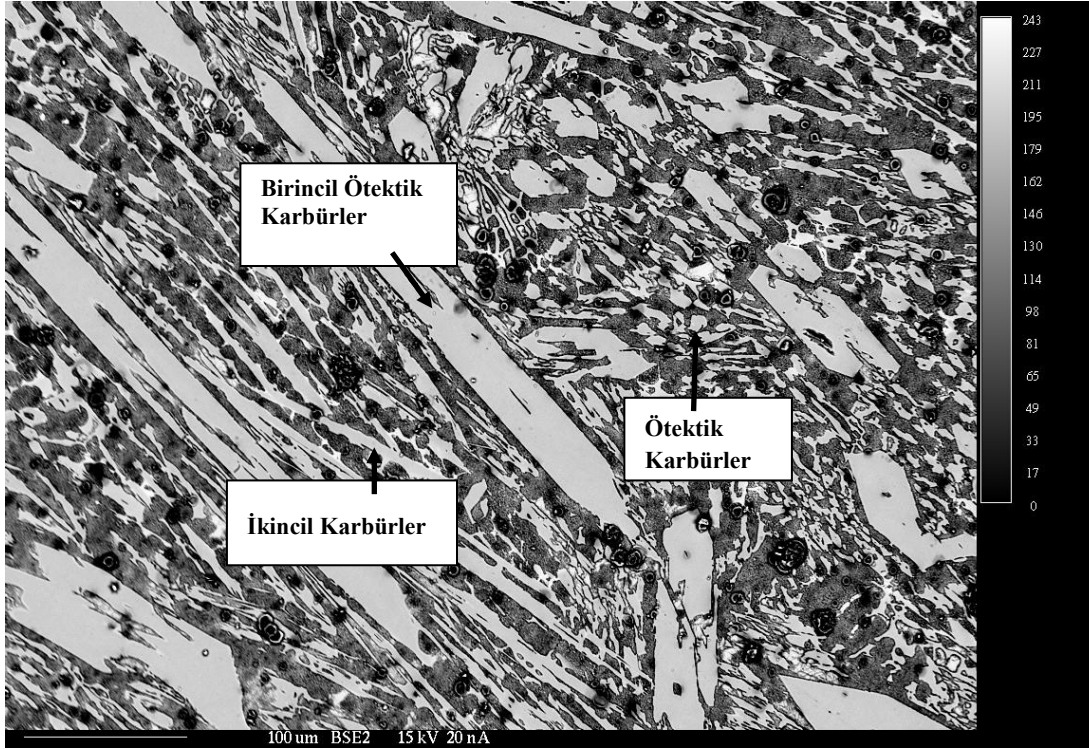
Şekil 4.6 : : Isıl işlem uygulanmış numunler için alaşımdaki bor miktarının eğme dayanımına etkisi



Şekil 4.7 : Temperlenmiş numuneler için alaşımdaki bor miktarının eğme dayanımına etkisi

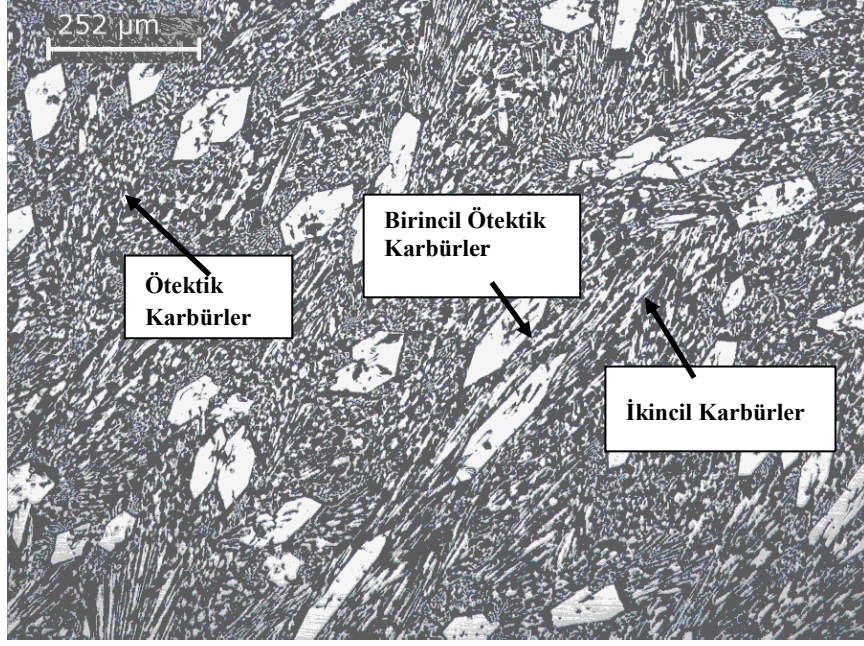
4.5 Metalografik İnceleme Sonuçları

Döküm sonrasında elde edilen parçaların mikroyapı görüntüleri döküm sonrası, ısıl işlem sonrası ve ısıl işlem ve temperleme sonrası halleri için aşağıda görülmektedir.

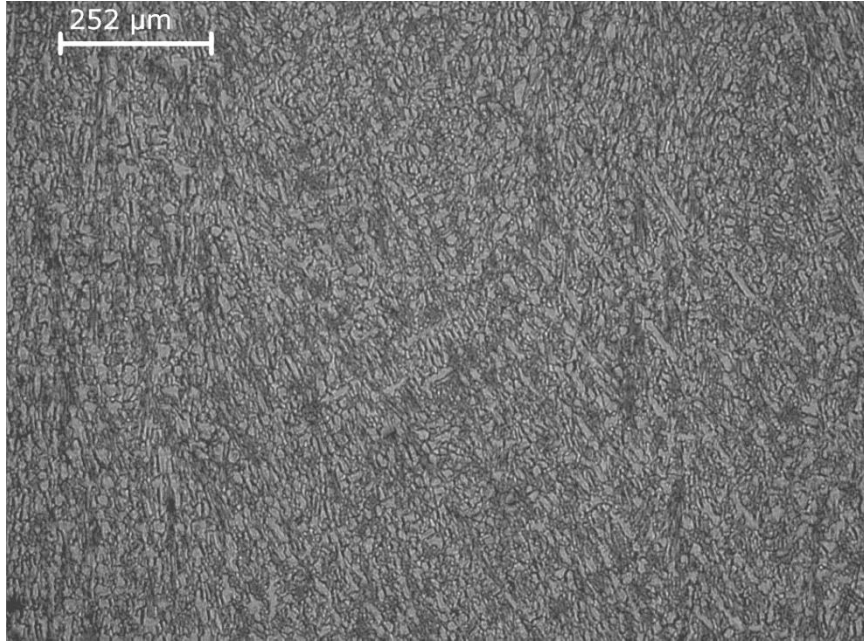


Şekil 4.8 : B0 numunesinin EPMA görüntüsü (750X)

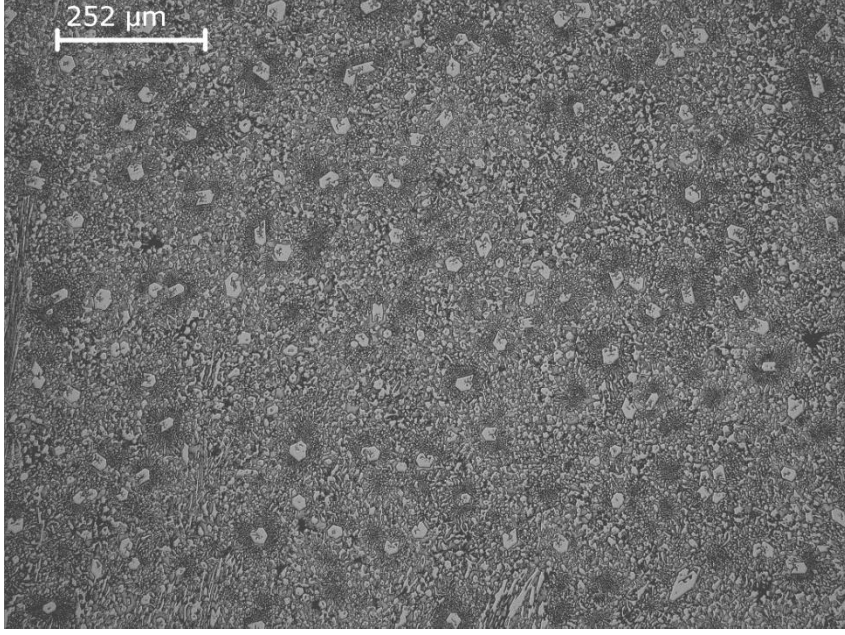
Şekil 4.8’da birincil ötektik M_7C_3 karbürleri, ötektik karbürler ve ikincil karbürler görülmektedir.



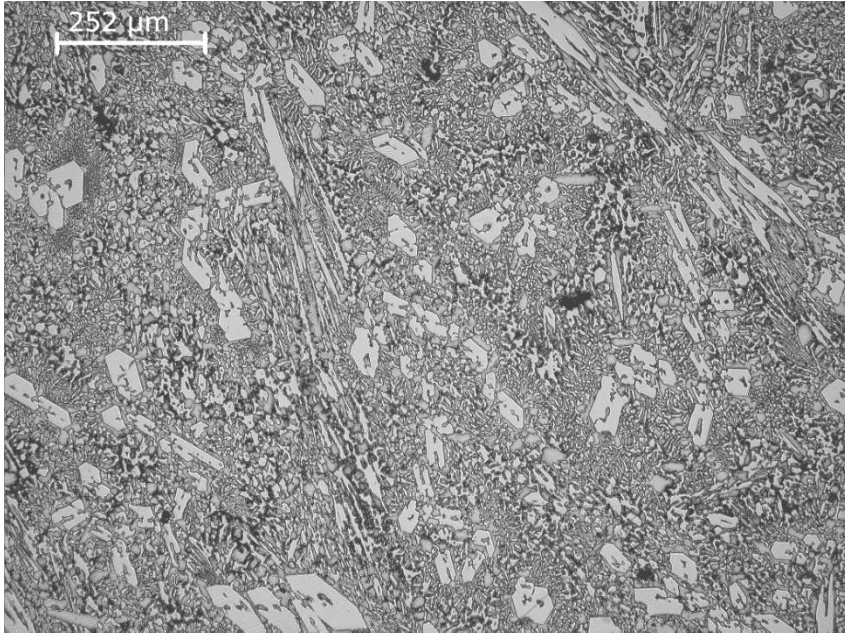
Şekil 4.9 : B0 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)



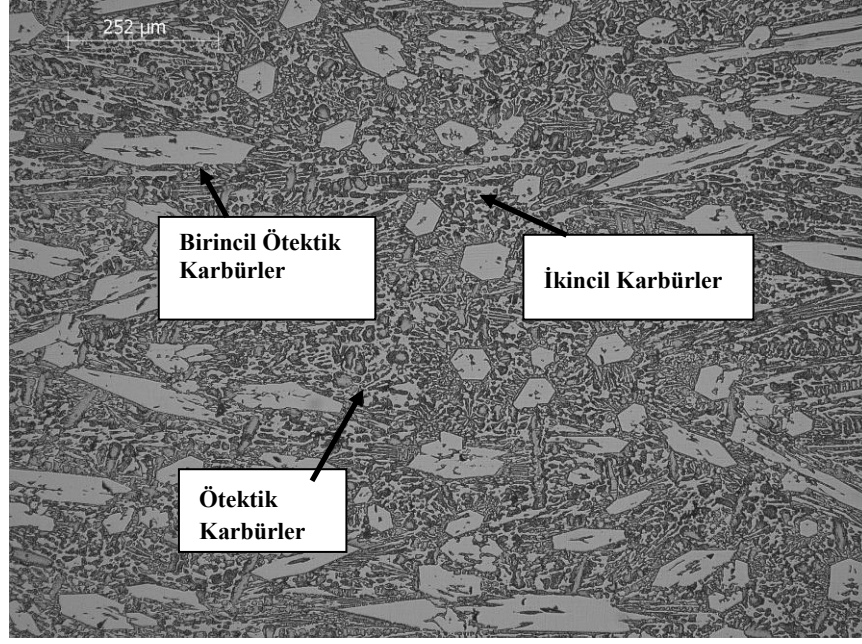
Şekil 4.10 : B02 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)



Şekil 4.11 : B04 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)



Şekil 4.12 : B06 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)

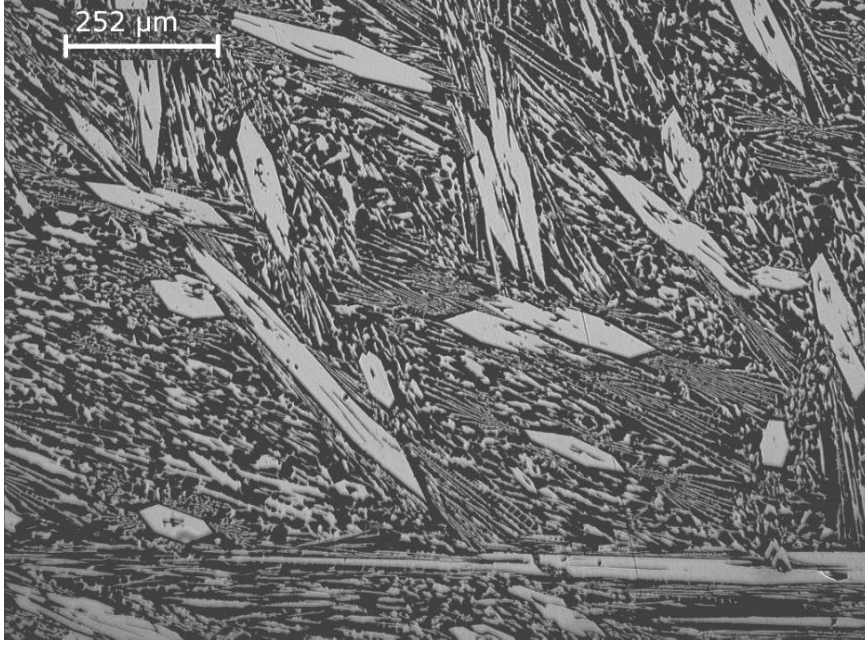


Şekil 4.13 : B08 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)

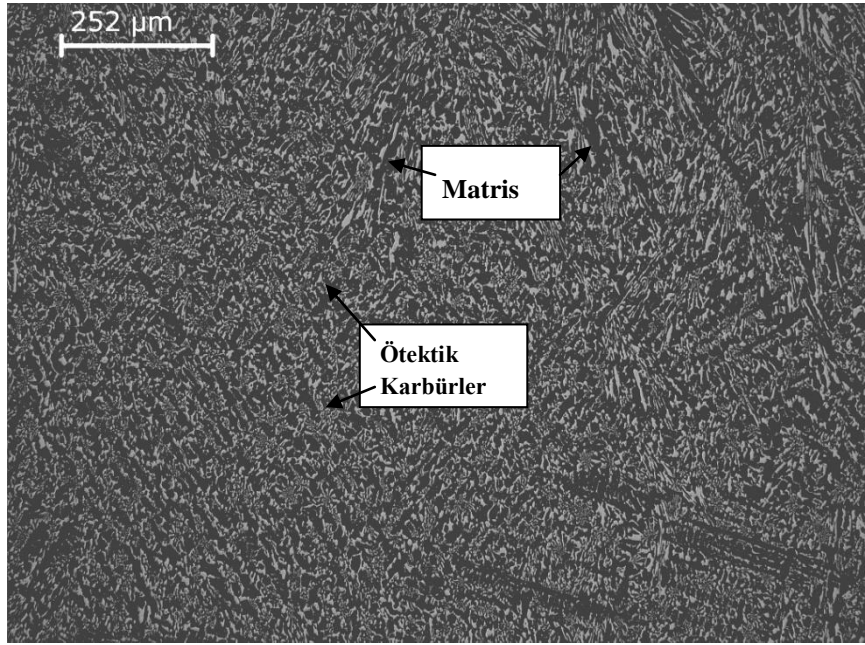
Bu 5 numunenin döküm sonrası mikroyapı görüntülerinde birincil ötektik karbürler, ikincil karbürler ve matris yapısı görülmektedir. M_7C_3 tipi ötektik karbürler hegzagonal yapıda altıgen parçalar halinde ve ikincil karbürler de ince uzun çubuklar halinde görülmektedir.

Alaşımındaki bor miktarı arttıkça, mikroyapıdaki karbür hacminin arttığı görülmektedir. Ötektik karbürler irileşmiş, ikincil karbürler de sürekli çubuklar ve ağımsı bir yapı almıştır. Bu da sertliği artırmıştır.

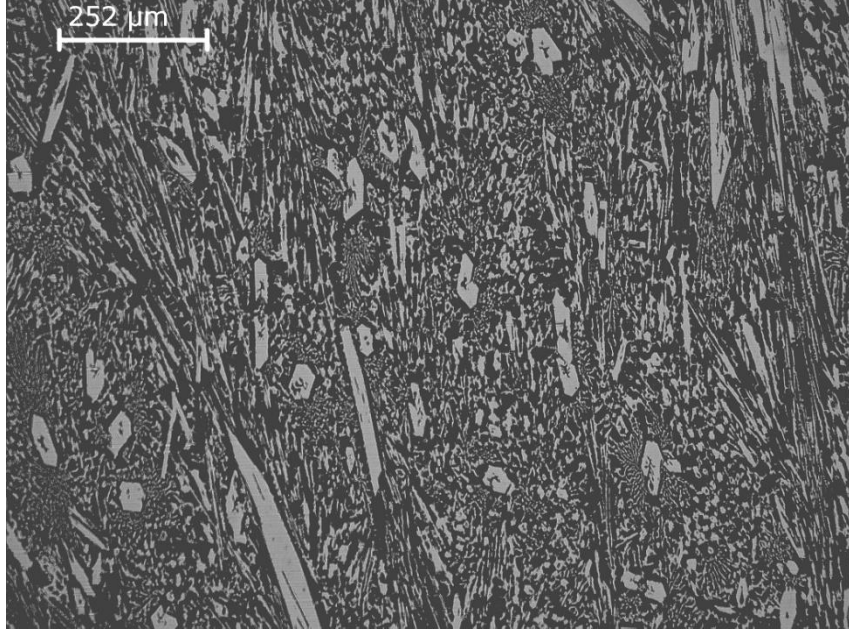
Numunelere ısıl işlem uygulandıktan sonraki mikroyapı görüntüleri aşağıda verilmiştir.



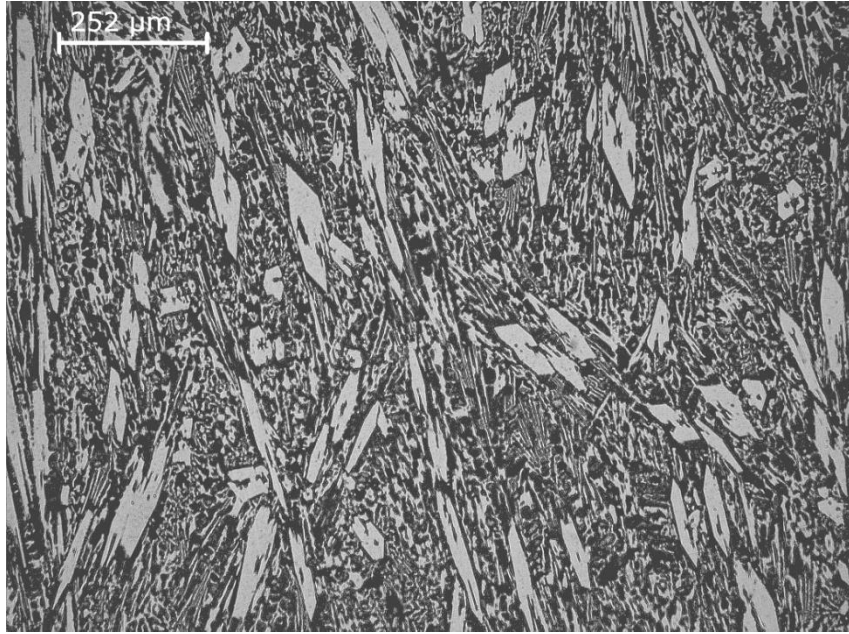
Şekil 4.14 : B0 numunesinin ısıt işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (100x)



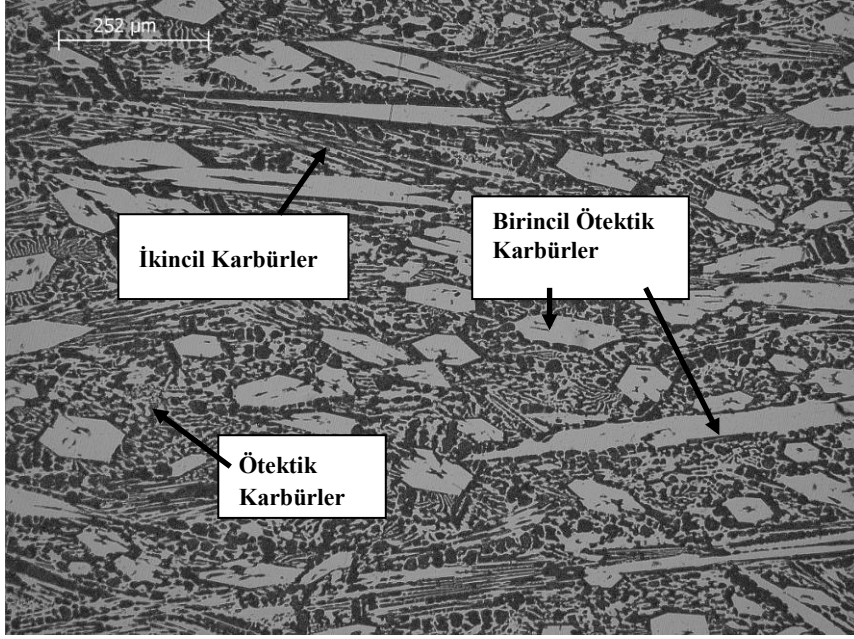
Şekil 4.15 : B02 numunesinin ısıt işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)



Şekil 4.16 : B04 numunesinin ısıt işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)



Şekil 4.17 : B06 numunesinin ısıt işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)



Şekil 4.18 : B08 numunesinin ısıt işlemler sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)

Bu 5 ısıt işlemler sonrası mikroyapı görüntülerine bakıldığında, ısıt işlemler sonrası tanelerin uzadığı görülmektedir. Döküm sonrasında olduğu gibi alaşımdaki artan bor miktarı ile birlikte karbür hacmi artmış, ikincil karbürler süresiz çubuklar yerine ağimsı bir yapıya dönüşmüş bu da sertliği artırmıştır.

Farklı büyütmelemlerdeki diğer mikroyapı görüntüleri ekler kısmında verilmiştir.

5. GENEL SONUÇLAR

1. Bu çalışmada, yüksek kromlu beyaz dökme demirin yapısına karbür yapıcı alaşım elementleri ilavesinin mekanik özellikler üzerine etkisi incelenmiştir.
2. Deneilerde ticari ismi BF204 olan ve % 3.6-3.8 C, % 0.6-0.9 Si, % 0.5-0.9 Mn, % 18.5-21 Cr, % 0.2-1.5 Mo içeren yüksek kromlu beyaz dökme demir kullanılmış ve ergitme sırasında alaşım elementleri ilave edilmiştir.
3. Hammadde olarak krom ve nikel taşıyan 430 SS paslanmaz çelik hurdası kullanılmış olup, alaşım olarak ferromolibden, ferromanganez, ferrosilisyum, ferrokrom ve bunun yanı sıra % 18 B içeren ferrobor ilavesi yapılmıştır. Hedeflenen bileşimleri elde edecek şekilde alaşımlandırılmıştır
4. Döküm işlemleri, endüstriyel boyutta üretim yapan bir dökümhanede yer alan 350 kg kapasiteli indüksiyon ocağında $1570^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ de gerçekleştirilmiştir. Sıvı metal, preslenmiş kum kapılara dökülmüştür.
5. Döküm sonrası elde edilen parçaların ısıt işlemleri 600°C 'de 1 saat, temperleme işlemleri ise 350°C 'de 8 saat tutularak gerçekleştirilmiştir. Döküm, ısıt işlem, ısıt işlem ve temperleme sonrasında elde edilen parçalar metalografik inceleme için uygun boyutlara getirilmiştir. Numuneler üzerinde yapılan incelemeler sonucunda sertlik değerleri ve mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir.
6. Numunelerin içerdiği bor miktarının sertliğe olan etkisi % 0.10 ile % 0.56 arasında bor ilavesi ile incelenmiştir, bor alaşımı ilavesi yapılmamış olan parçanın döküm sonrası sertliği 56.4 HRc iken bileşiminde % 0.56 bor bulunan parçanın (B08) sertliği 63.7 HRc' ye çıkmıştır.
7. Isıt işlem sonrası parçanın sertliği, bor ilavesi yapılmamış olan parçada 65.3 HRc iken bileşiminde % 0.56 bor bulunan parçada (B08) 69.4 HRc olarak ölçülmüştür.
8. Temperleme sonrası, ısıt işlem sonucu oluşan sertlik korunarak parça daha mukavemetli hale getirilmiştir.

9. Yapılan eğme deneyleri sonucunda en yüksek eğme dayanımı (877 MPa) B02 kodlu alaşımında elde edilmiştir.
10. Aşınma testleri sonucunda B02 kodlu alaşımın en fazla aşınma direnci (en düşük aşınma hacmi 0.0010 mm³) gösterdiği tespit edilmiştir.
11. Bor ilavesi ile yapıdaki karbür hacminin arttığı görülmüştür.
12. alışmalar sonucunda, DIN EN 10027-1 Standardına göre GX350CrMo20-2 olarak tanımlanan referans numunenin yapı ve özelliklerine ulaşılmıştır.

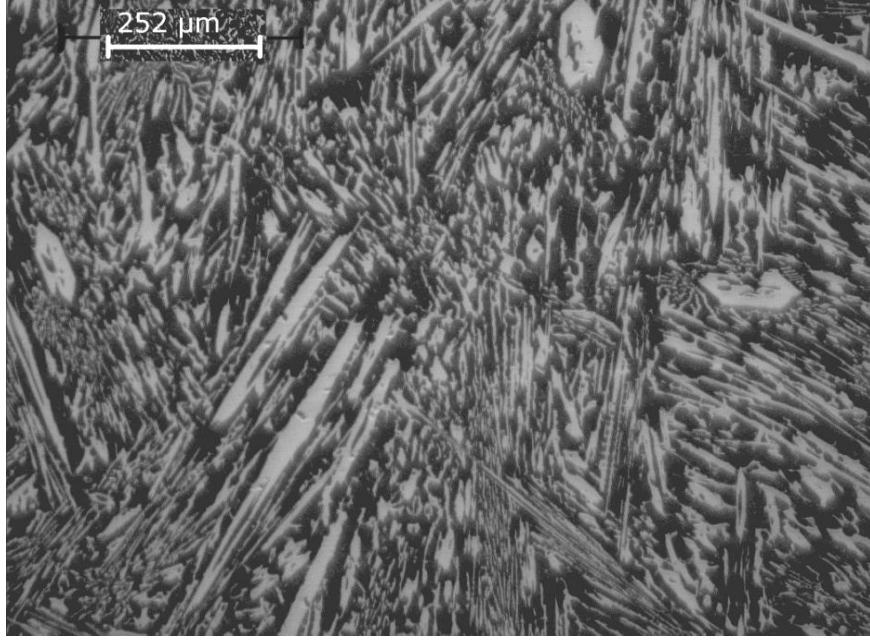
KAYNAKLAR

- [1] **John T. H. Pearce and David W. J. Elwell.** 1995. Efficient heat treatment of high chromium iron castings for abrasion-resistant applications. Cast Metals Development Ltd, International Conference
- [2] **C. Çetinkaya.** 2006. An investigation of the wear behaviors of white cast irons under different compositions. *Materials & Design* 27 437-445.
- [3] **Fidaner S., Çelik S., Doğmuş H., Süzen C., Duran A. D.** 1979. Genel Dökümcülük Bilgisi. Milli Eğitim Basımevi, istanbul
- [4] **Aran A.,**1989. Metal Döküm Teknolojisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Ofset Atölyesi.
- [5] **Çavuşoğlu E.** 1992. Döküm Teknolojisi I. İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi
- [6] **Url-1** <<http://www.owl.net.rice.edu>> alındığı tarih 12.04.2009
- [7] **Davis J. R.,** 1996. Classification and Basic Metallurgy of Cast Irons, Cast-Irons-ASM Speciality Handbook, pp. 3-15, ASM International, Materials Park, OH.
- [8] **Janina M. Radzikowska,** 2004. Metallography and Microstructures of Cast Iron, Metallography and Microstructures, Vol 9, ASM Handbook, pp 1282-1384, ASM International.
- [9] **Davis J. R.,** 1996. Classification and Basic Metallurgy of Cast Irons, Cast-Irons-ASM Speciality Handbook, pp. 150-179, ASM International, Materials Park, OH.
- [10] **Çalık A.,** 2004. Makine ve Metalurji Sanayinde Bor Kullanımı, II. Uluslararası Bor Sempozyumu.
- [11] **Petrovic S. T., Markovic S. and Pavlovic Z. A.,** 2003. The effect of boron on the stereological characteristics of the structural phases present in the structure of 13% Cr white iron, *Journal of Materials Science*, 3263-3268.

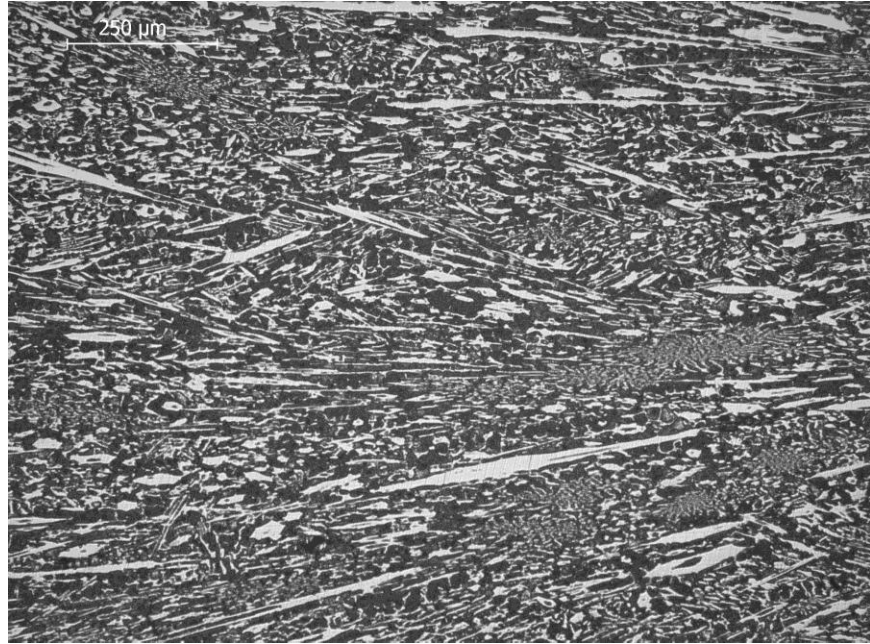
- [12] **Arıkan, Mustafa M.**, 1999. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin aşınma direncine alaşım elementlerinin ısıtılmasının etkisi, *Doktora Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [13] **Flemings M. C.**, 1976. Döküm ve katılaştırma tekniği. Mcgraw-Hill College, USA.
- [14] **Zhongli L. , Yanxiang L., Xiang C. and Kaihua H.**. 2008. Microstructure and mechanical properties of high boron white cast iron. *Materials Science and Engineering A* 486 112-116.
- [15] **Zhongli L., Xiang C., Yanxiang L., and Kaihua H.** 2008. Effect of Chromium on Microstructure and Properties of High Boron White Cast Iron. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*.
- [16] **J. W. Haohuai, S. Baoluo, Y. Hongshan, G. Shengji, and H. Sijiu.** 2007. Influence of secondary carbide precipitation and transformation on abrasion resistance of a 3Cr15Mo1V1.5 white iron. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, page 231.
- [17] **G.V. Raynor and V.G. Rivlin**, 1988. Phase equilibria in iron ternary alloys, *The Institute of Metals, London*, (No.4)
- [18] **S.I. Maldonado-Ruiz, D.I. Martinez, A. Velasco and R.Colas.** 2005. Wear of white cast irons by impact of direct reduced iron pellets. *WEAR* 259 361-366
- [19] **Chang K. K. , Sunghak L. And Jae-Young J.** 2006. Effects of heat treatment on wear resistance and fracture toughness of duo-cast materials composed of high-chromium white cast iron and low-chromium steel. *Metallurgical and Materials Transactions*, Volume 37A
- [20] **C.P. Tabrett and I.R. Sare.** 1997. The effect of heat treatment on the abrasion resistance of alloy white irons. *WEAR* 203-204
- [21] **Da L., Ligang L., Yunkun Z., Chunlei Y., Xuejun R., Yulin Y. and Qingxiang Y.** 2009. Phase diagram calculation of high chromium cast irons and influence of its chemical composition. *Materials and Design* 30 340-345

- [22] **Kootsookos A. and J.D. Gates.** 2008. The role of secondary carbide precipitation on the fracture toughness of a reduced carbon white iron. *Materials Science and Engineering A* 490 (2008) 313–318
- [23] **Schmidt + Clemens,** 1998. Marker V105, GX350CrMo20-2 (DIN EN 10027-1), Yüksek kromlu beyaz dökme demir.

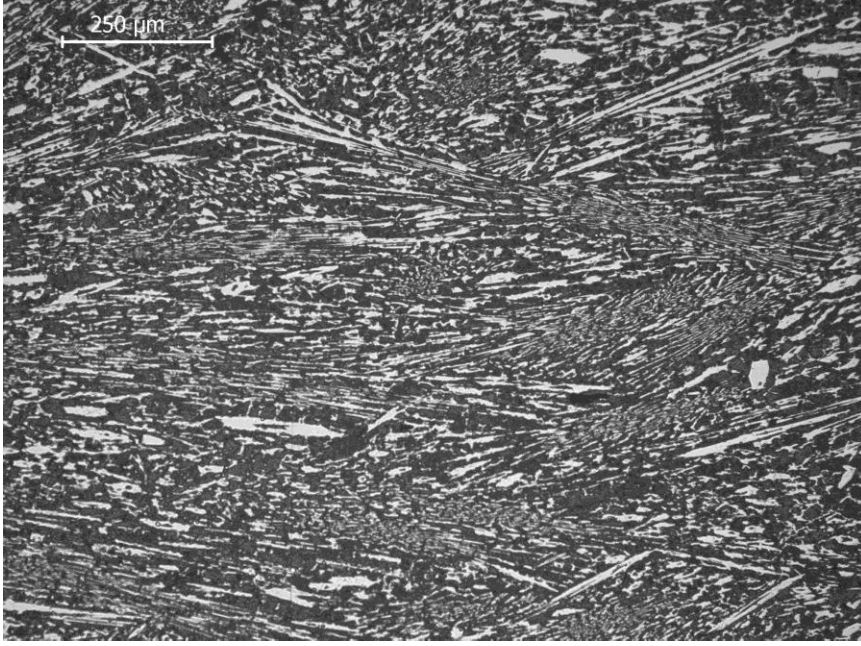
EKLER



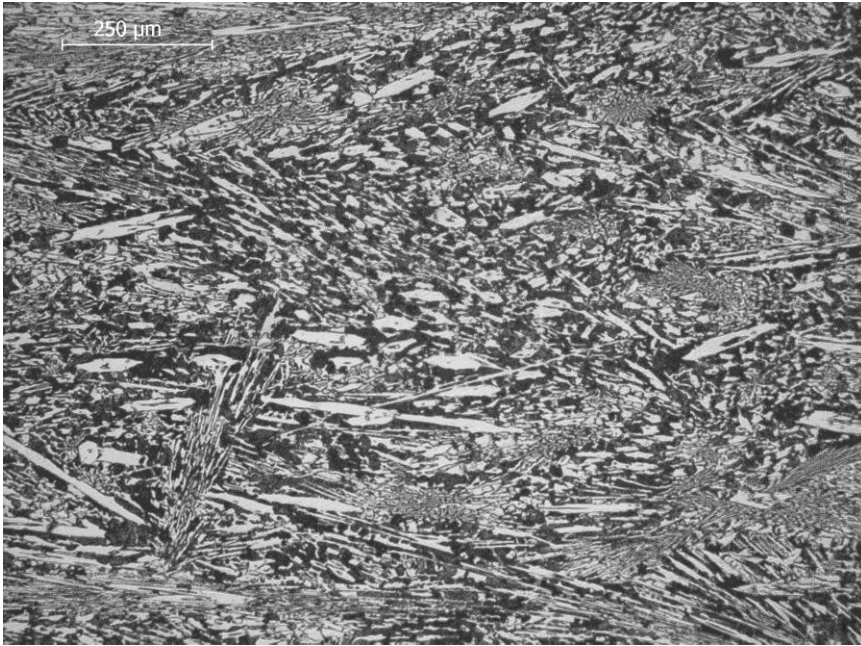
Şekil A. 1 : B0 numunesinin ısııl işlem ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)



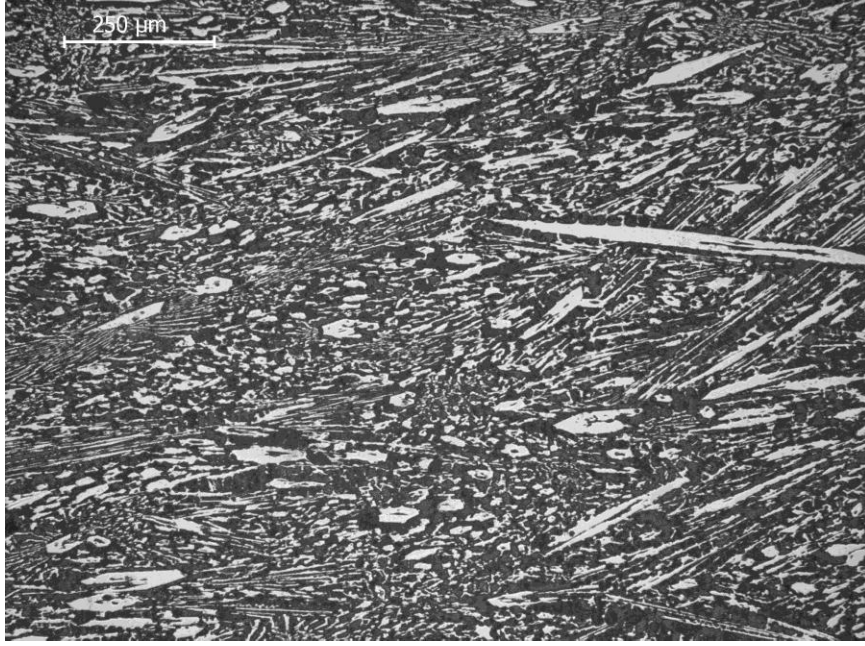
Şekil A. 2 : B005 numunesinin ısııl işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)



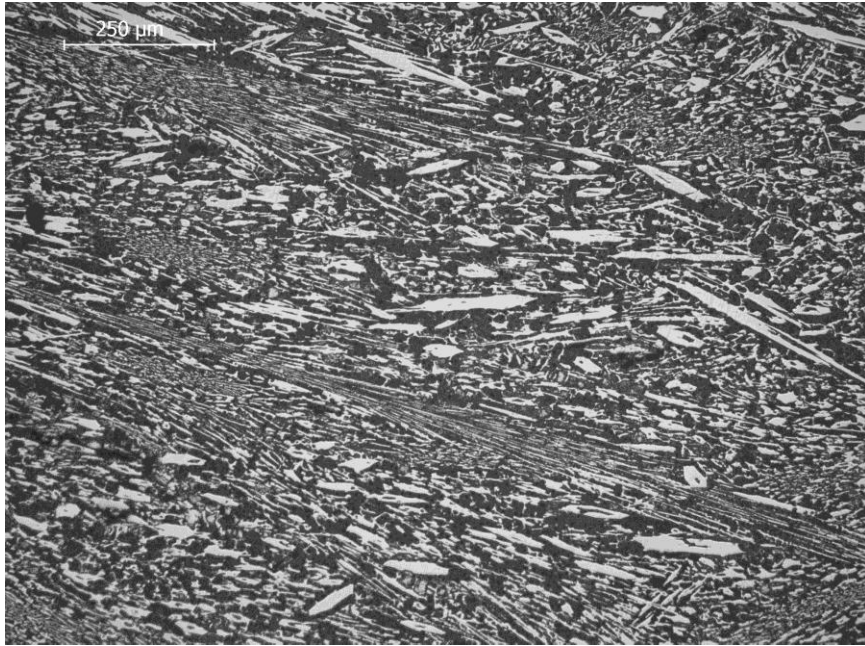
Şekil A. 3 : B005 numunesinin temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)



Şekil A. 4 : B010 numunesinin ısııl işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)



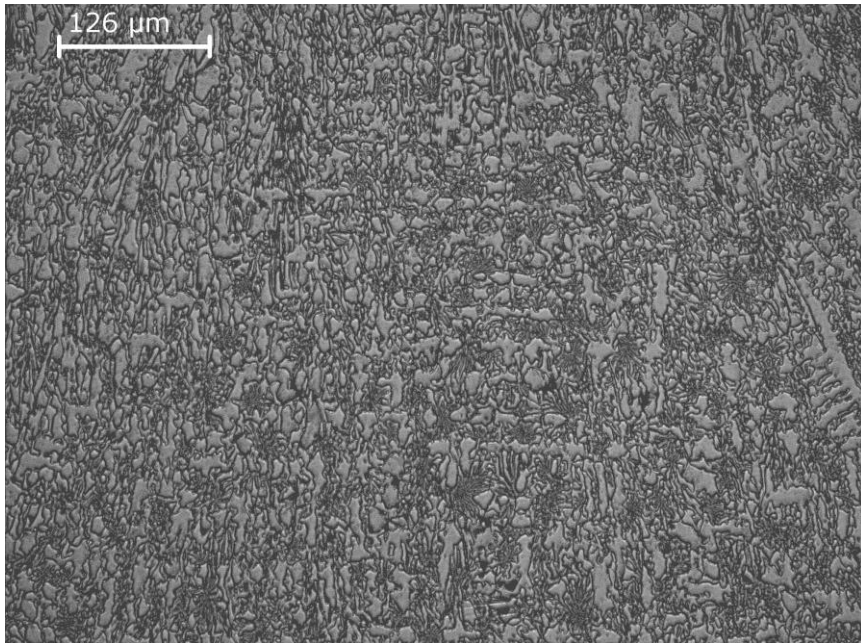
Şekil A. 5 : B010 numunesinin temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)



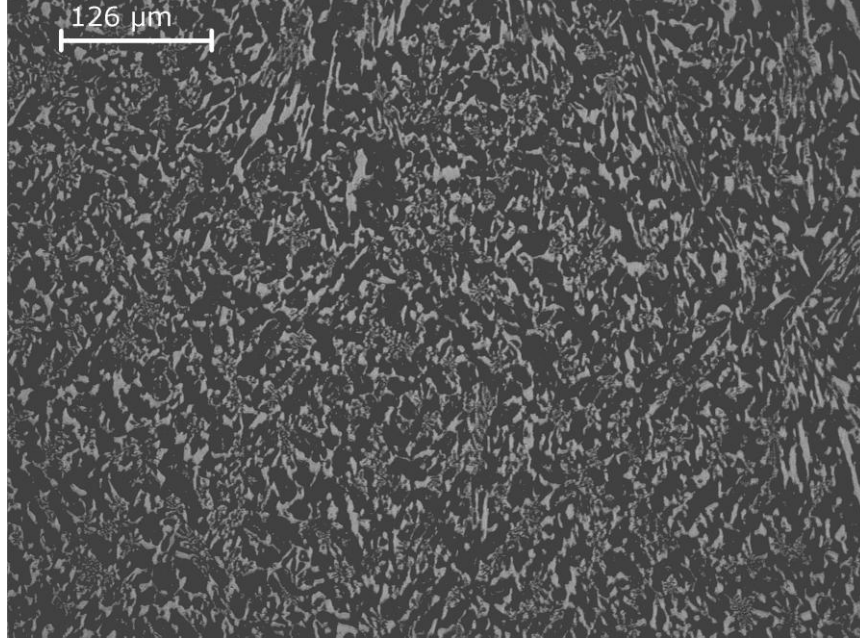
Şekil A. 6 : B015 numunesinin ısıt işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)



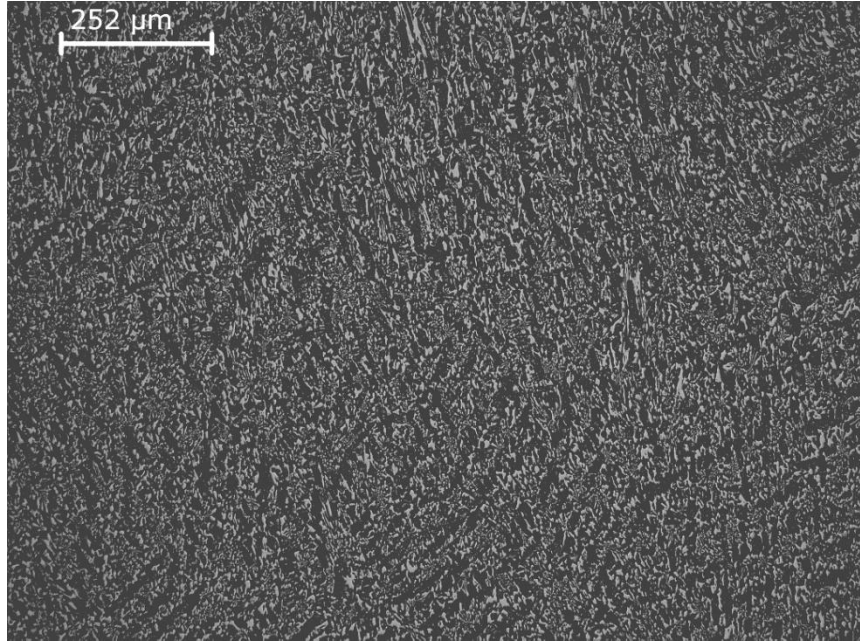
Şekil A. 7 : B015 numunesinin temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)



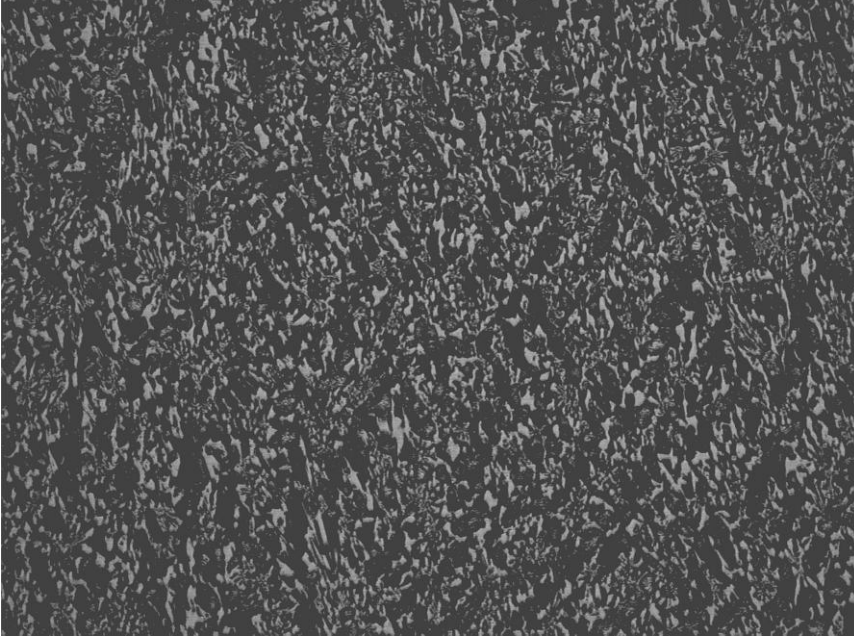
Şekil A. 8 : B02 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)



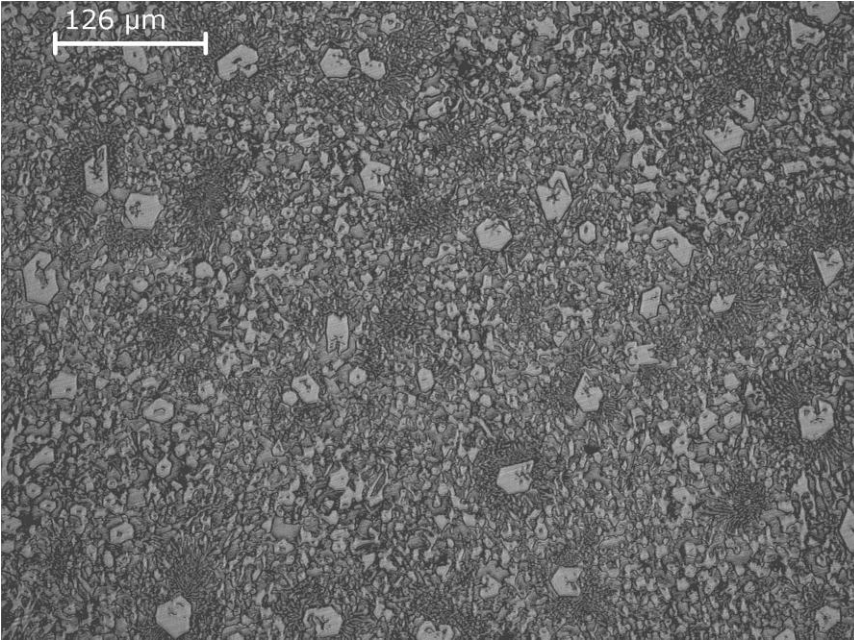
Şekil A. 9 : B02 numunesinin ısıt işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)



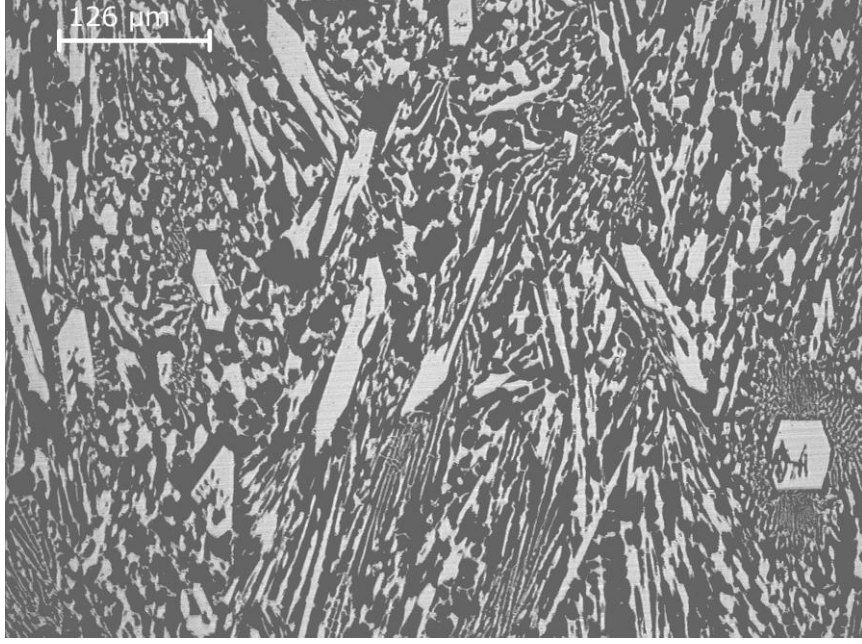
Şekil A. 10 : B02 numunesinin ısıt işlem ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)



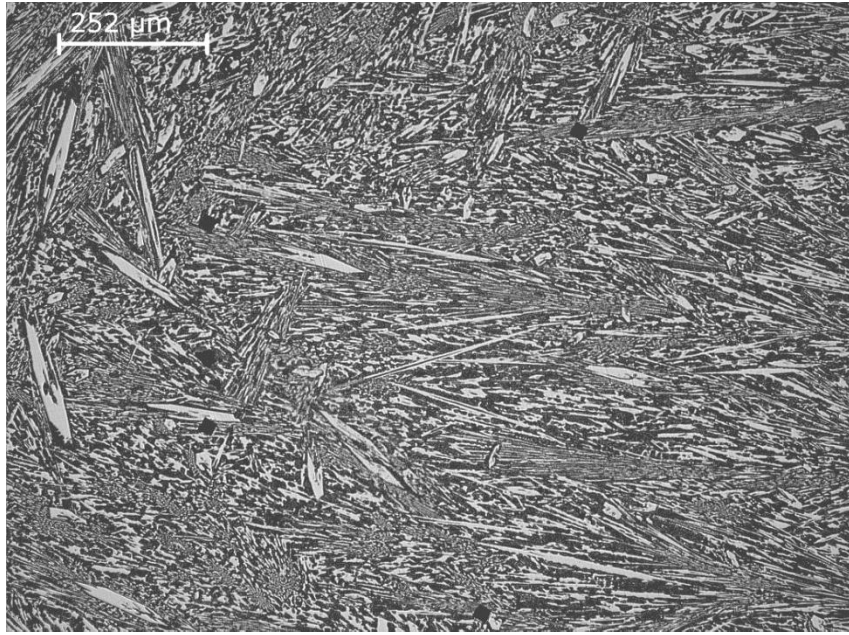
Şekil A. 11 : B02 numunesinin ısıt işlem ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)



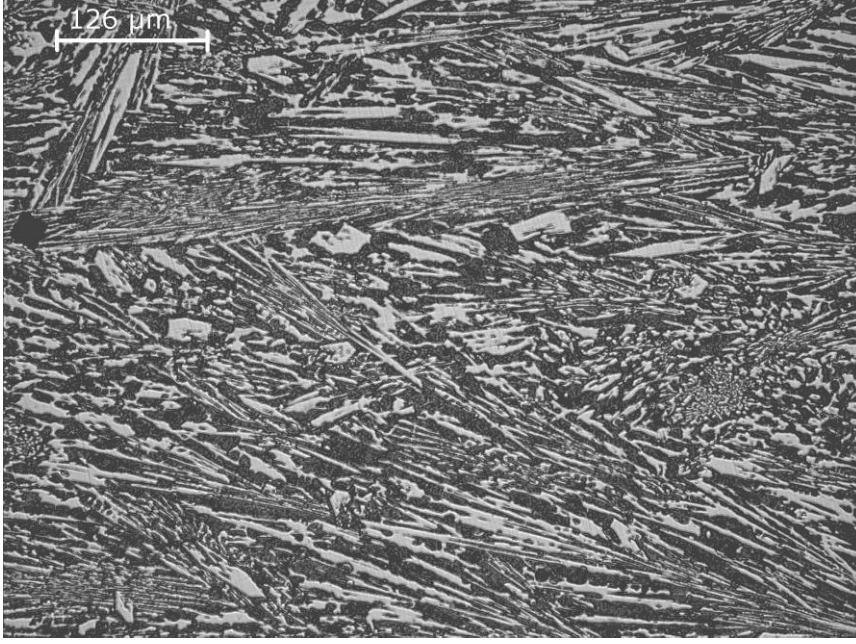
Şekil A. 12 : B04 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)



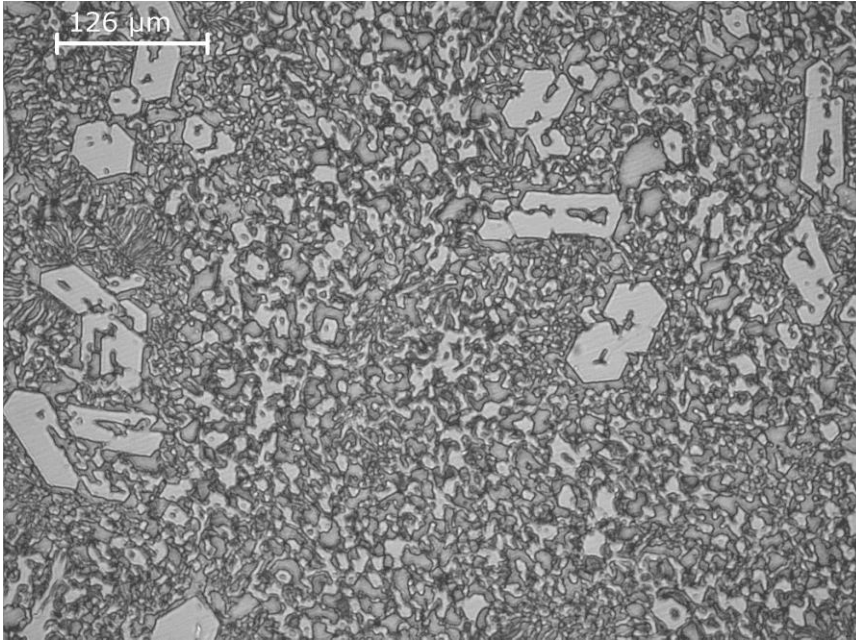
Şekil A. 13 : B04 numunesinin ısıı işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)



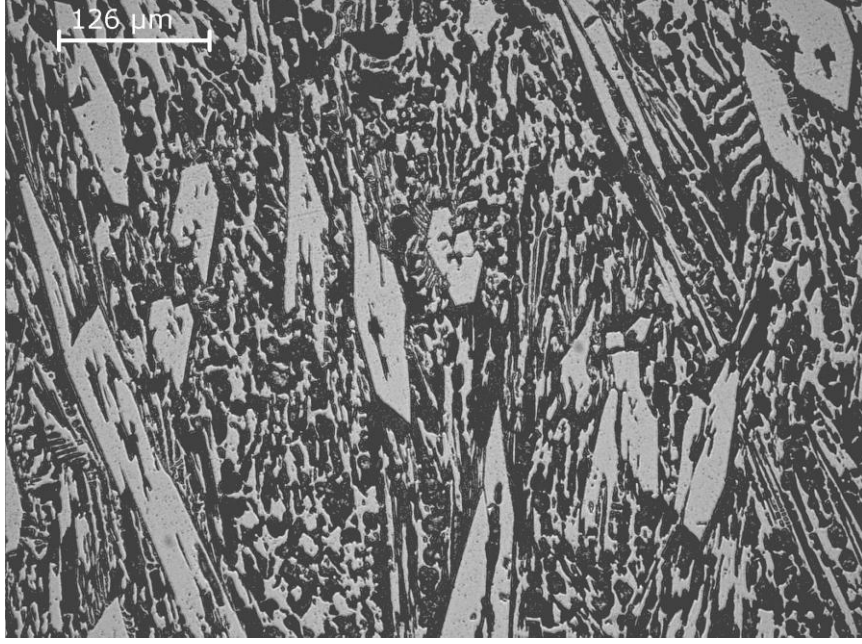
Şekil A. 14 : B04 numunesinin ısıı işlem ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)



Şekil A. 15 : B04 numunesinin ısıt işlem ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)



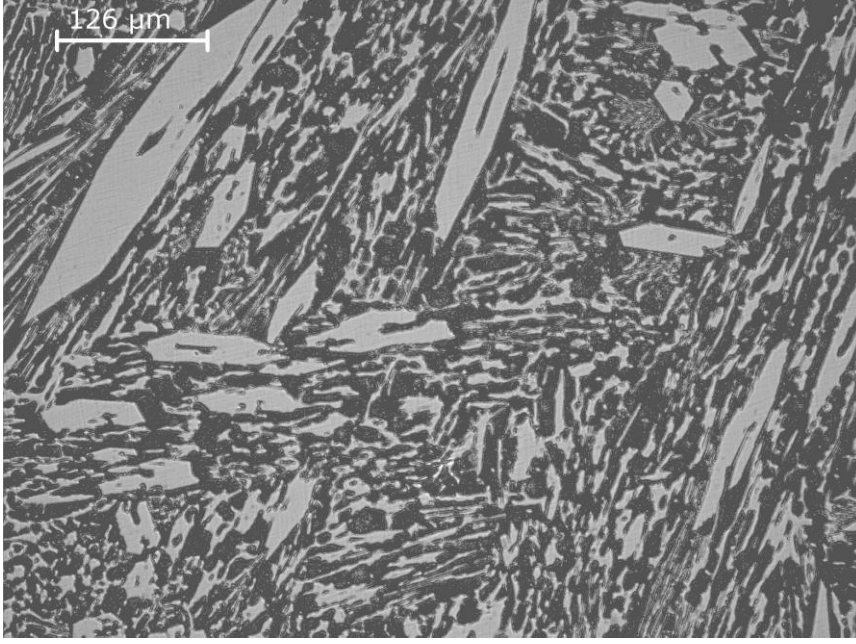
Şekil A. 16 : B06 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)



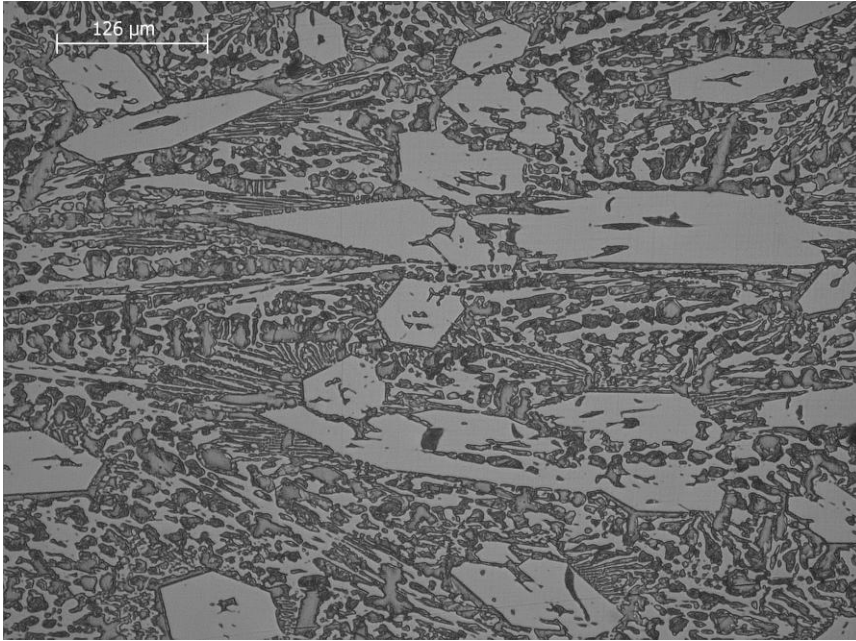
Şekil A. 17 : B06 numunesinin ısıı işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)



Şekil A. 18 : B06 numunesinin ısıı işlem ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)



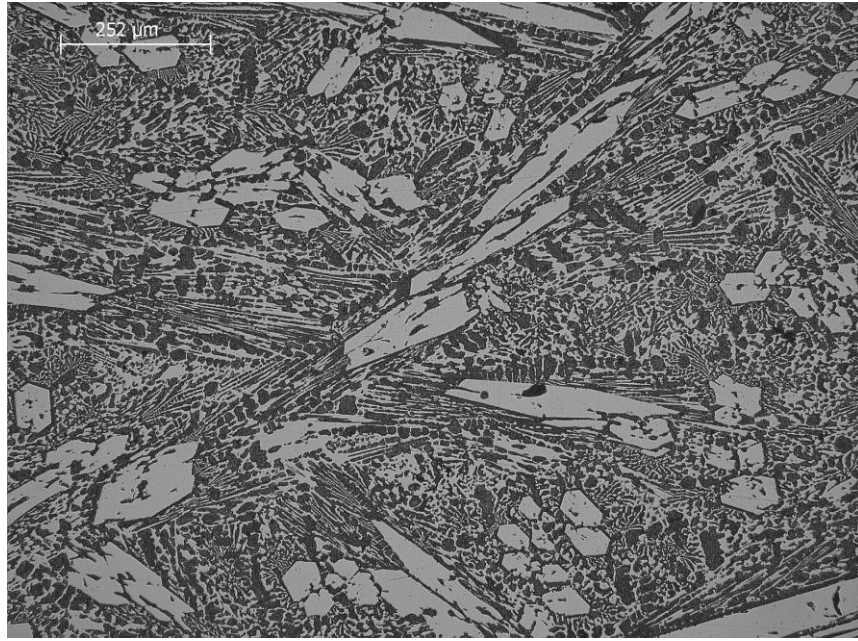
Şekil A. 19 : B06 numunesinin ısıt işlemler ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)



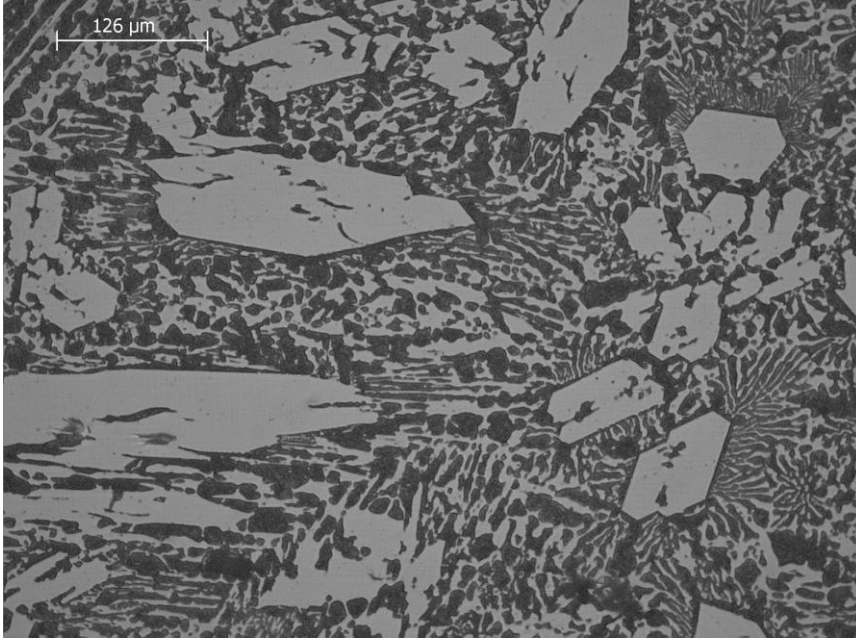
Şekil A. 20 : B08 numunesinin döküm sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)



Şekil A. 21 : B08 numunesinin ısıt işlem sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)



Şekil A. 22 : B08 numunesinin ısıt işlem ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (100X)



Şekil A. 23 : B08 numunesinin ısıt işlem ve temperleme sonrası mikroyapı görüntüsü (200X)

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Cenk SAĞLAM

Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul 21.10.1982

Eğitim : **M.Sc.** Met. ve Malz. Müh., İTÜ (Devam ediyor)

B.Sc. Met. ve Malz. Müh., İTÜ (2005)

Lise, Marmara Fen Lisesi (1999)