İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERE UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİNİN AŞINMA DİRENCİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Seçkin İzzet AKRAY

Anabilim Dalı: METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

Programı: MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERE UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİNİN AŞINMA DİRENCİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Seçkin İzzet AKRAY
(506041430)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih: 11 Haziran 2007

Tez Danışmanı: **Yard. Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN**
Diğer Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. E. Sabri KAYALI**
Prof. Dr. Mehmet KOZ

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Tez çalışmanın gerçekleştirilmesi sırasında, büyük sabır ve özveriyle beni destekleyen, sahip olduğu bilgi ve deneyimleri ile karşılaştığım bütün zorlukları çözümleyen, gösterdiği ilgi ve emek ile çalışmamın kısa sürede hedefine ulaşmasını sağlayan ve bana her konuda destek olan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN'a ve çalışmam süresince karşılaştığım güçlükleri çözümlememe yardımcı olan, yakın ilgisini daima hissettiğim saygıdeğer hocam Prof. Dr. E. Sabri KAYALI'ya en içten duygularımla teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam sırasında, çeşitli fikir, öneri ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU'na harcadığı zaman ve emekten dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen ve vakitlerini ayırarak çalışmalarıma destek vererek yönlendiren Arş. Gör. Özgür Çelik ve Arş. Gör. Hasan Güleryüz'e teşekkür ederim.

Her türlü maddi ve manevi özveride bulunarak bugünlere gelmemde büyük katkıları olan, her konuda beni daima destekleyen aileme, her zaman derin bir minnet ve şükran borçluyum.

Mayıs,2007 Seçkin İzzet AKRAY

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **ii**
İÇİNDEKİLER ..... **iii**
KISALTMALAR ..... **v**
TABLO LİSTESİ ..... **vi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**
ÖZET ..... **ix**
SUMMARY ..... **x**

1. GİRİŞ **1**
2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER **4**
2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması 6
2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey Sertleştirme İşlemleri 7
2.3. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları 7
3. ÖSTEMPERLEME ISIL İŞLEMİ **8**
3.1. Östemperleme Isıl İşlem Süreci 8
3.2. Östemperleme Sürecini Etkileyen Parametreler 13
3.2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Döküm Kalitesi 13
3.2.2. Östenitleme ve Östemperleme Parametrelerinin Etkisi 14
3.2.3. Alaşım Elementlerinin Etkisi 20
3.3. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri 24
3.3.1. Östenitleme Sıcaklığı ve Süresinin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi 24
3.3.2. Östemperleme Sıcaklığı ve Süresinin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi 25
4. BORLAMA **29**
4.1. Borlama İşleminin Genel Prensipleri ve Özellikleri 29
4.2. Demir Esaslı Malzemelerin Borlanması 33
4.2.1. Fe_2B ve FeB Fazlarının Özellikleri 33
4.3. Borlama Yöntemleri 34
4.3.1. Kutu Borlama 35
4.3.2. Pasta Borlama 36
4.3.3. Sıvı borlama 37
4.3.4. Gaz Borlama 37
4.4. Bor Kaplamaların Aşınma Özellikleri 38
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **40**
5.1. Deneysel Malzeme 40
5.2. Mikroyapısal Karakterizasyon 40

Sayfa No

5.3. Malzemeye Uygulanan Isıl İşlemler ve Yüzey İşlemleri 40
5.3.1. Östemperleme Isıl İşlemi 40
5.3.2. Borlama İşlemi 41
5.3.3. Borlama ve Östemperleme İşlemi 41
5.4. Mekanik Deneyler 41
5.4.1. Makro Sertlik Deneyleri 42
5.4.2. Mikro Sertlik Deneyleri 42
5.4.3. Aşınma Deneyleri 42
5.4.4. Korozyon Deneyleri 43

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME 44

6.1. Mikroyapı İncelemeleri 44
6.2. Mekanik Deneyler 52
6.2.1. Sertlik Deneyi Sonuçları 52
6.2.2. Aşınma Deneyleri 55
6.3. Korozyon Deneyleri 57

7. GENEL SONUÇLAR 61

KAYNAKLAR 63

ÖZGEÇMİŞ 66

KISALTMALAR

PVD :Fiziksel Buhar Biriktirme

CVD :Kimyasal Buhar Biriktirme

INCO :International Nickel Company

BCIRA :British Cast Iron Research Association

DDK :Dökme Demir Küresel Grafitli

IT :İzotermal Dönüşüm

UAV :Dönüşmemiş Östenit Hacim Oranı

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. İkincil elementlerin grafit yapısına etkileri 5
Tablo 2.2. Sfero dökme demirlerin ana yapılarına göre sertlik değerleri.....5
Tablo 2.3. TSE standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması 6
Tablo 2.4. DIN standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması 6
Tablo 3.1. Östenitleme sıcaklığına bağlı olarak östenitlenmiş (C_γ^o) ve östemperlenmiş (C_γ^{maks}) matriksteki dengesel karbon oranı 18
Tablo 4.1. Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması 31
Tablo 4.2. Fe_2B ve FeB fazlarının tipik özellikleri 34
Tablo 4.3. Kutu borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri 36
Tablo 4.4. Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri 38
Tablo 5.1. Bu tez çalışmasında kullanılan GGG 40 kalite küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimi.....40
Tablo 6.1. Bu çalışmada kullanılan GGG 40 kalite küresel grafitli dökme demirin mikroyapısal özellikleri 44

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Farklı derecelerde küreselleşmiş küresel grafitli dökme demirlerin parlatılmış haldeki optik mikroskop fotoğrafları...4
Şekil 2.2: Temperlenmiş küresel grafitli dökme demir yapıları.....5
Şekil 3.1: Küresel grafitli bir dökme demirin izotermal dönüşüm (IT) Diyagramı……..10
Şekil 3.2: Alt beynit (250-330°C) ve Üst beynit (330-400°C) oluşum mekanizması.....11
Şekil 3.3: Yüksek karbonlu östenit oranının östemperleme süresine bağlı olarak değişimi. 15
Şekil 3.4: Şematik Fe-C-Si faz diyagramı ve ferrit(α), östenit(γ) ve sementit (Fe_3C) fazları için serbest enerji eğrileri.....16
Şekil 3.5: Yarı kararlı γ/γ+α sınırlarıyla, martenzit başlama ve bitiş sıcaklıklarını gösteren FeC-Si (ağırlıkça %2.5 Si) denge diyagramı. 18
Şekil 3.6: 927 ^{o}C'de östenitlenmiş bir küresel grafitli dökme demirde çeşitli östemperleme sıcaklıkları ve sürelerinde $X_\gamma.C_\gamma$ ilişkisi.....19
Şekil 3.7: Östemperleme sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi. 27
Şekil 4.1: Fe-B ikili denge diyagramı.....29
Şekil 4.2: Farklı karbon bileşimlerine göre yüzeyde oluşan borür tabakalarının morfolojisi ve kalınlıkları. 31
Şekil 4.3: Konvansiyonel borlama sırasında borür tabakasının oluşum mekanizması.....32
Şekil 4.4: Kutu borlamanın şematik gösterimi 35
Şekil 4.5: Termokimyasal yöntemlerle kaplanmış çeliklerin abrasif aşınma davranışları.....39
Şekil 5.1: Karşıt hareketli aşınma deney cihazı.....43
Şekil 5.2: Aşınma izinin derinliği ve genişliğinin şematik olarak gösterimi. ...43
Şekil 6.1: Döküm halindeki GGG 40 kalite küresel grafitli dökme demirin döküm halindeki mikroyapısı.....44
Şekil 6.2: 250°C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.....46
Şekil 6.3: 300°C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.....47
Şekil 6.4: 350°C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.....49
Şekil 6.5: 400°C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.....50

Sayfa No

Şekil 6.6: 900°C'de 90 dk borlanmış numunenin parlatılmış haldeki mikroyapısı.....51
Şekil 6.7: 900 ^{o}C'de 90 dakika borlama yapıldıktan sonra 300 ^{o}C'de 2 saat östemperlenmiş numunenin optik mikroyapı fotoğrafı.....51
Şekil 6.8: Östemperleme süresine bağlı olarak sertliğin değişimi.....52
Şekil 6.9: Östemperleme süresine bağlı olarak mikro sertliğin değişimi.....53
Şekil 6.10: Östemperleme sıcaklığına bağlı olarak makro ve mikrosertlik değişimi.....54
Şekil 6.11: Döküm halinde borlanmış numunenin yüzeyinden matrikse doğru sertlik dağılımı.....54
Şekil 6.12: Borlanıp östemperlenmiş numunenin mikroyapı-mikrosertlik dağılım grafiği.....55
Şekil 6.13: İncelenen numunelerin aşınma hacminin ve relatif aşınma direncinin östemperleme sıcaklık ve süresine göre değişimi.....56
Şekil 6.14: İncelenen numunelerin korozyon deneyinde östemperlenmiş numunelerin ve borlama + östemperleme uygulanmış numunelerin % ağırlık kaybının korozyon süresine bağlı olarak değişimi.....58
Şekil 6.15: İncelenen numunelerin korozyon deneyinde östemperlenmiş numunelerin ve borlama + östemperleme uygulanmış numunelerin relatif korozyon direncinin korozyon süresine bağlı olarak değişimi.....59

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERE UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİNİN AŞINMA DİRENCİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler, dökme demirlerin yeni bir sınıfıdır ve özellikleri seçilen östemperleme parametrelerine bağlı olarak değişebilmektedir. Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir malzemelerinin çekici hale gelmesi, yüksek dayanımla birlikte iyi süneklik, iyi aşınma direnci ve yüksek yorulma direnci ve kırılma tokluğunun mükemmel kombinasyonu gibi benzersiz özelliklere sahip olmasına dayandırılmaktadır. Çeliklere göre, östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler; düşük malzeme maliyetine, düşük üretim maliyetine, düşük yoğunluğa, iyi işlenebilirliğe ve yüksek titreşim söndürme kabiliyetine sahiptir. Öte yandan yüzey işlemleriyle malzemelerin mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir. Aşınma sorununu minimuma indirmede etkili yöntemlerden biri olan borlama, yüksek sıcaklıkta ana metalin yüzeyinde borür tabakası oluşturulması işlemidir. Borlama işlemi, 800–1000°C sıcaklık aralığında, 1–10 saat sürelerde katı, pasta, sıvı veya gaz gibi çeşitli ortamlarda uygulanabilmektedir.

Bu çalışmada Aral Döküm tarafından üretilen GGG-40 kalite küresel grafitli dökme demirlere uygulanan çeşitli işlemlerin, malzemenin mikroyapısı, sertlik ve aşınma direnci gibi mekanik özellikleri ile korozyon özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, döküm halindeki alaşıma, östemperleme, borlama ve borlama-östemperleme işlemleri uygulanmıştır. Östemperleme işlemi, 900°C'de 90 dakika östenitleme sonrası malzemenin, 250-400°C sıcaklıklarda 5–640 dakika arasındaki 8 farklı süre tutulması şeklinde uygulanmıştır. Borlama işlemi için malzemelerin ticari Ekabor-3 içerisine gömüldükten sonra 900°C'de 90 dakika tutulduğu kutu borlama işlemi kullanılmıştır. Borlama ve östemperleme işlemini aynı anda yapıldığı uygulamada ise malzeme, 900°C'de 90 dakika borlandıktan sonra, seçilen östemperleme sıcaklık ve sürelerinde işlem gördükten sonra havada soğutulmuştur.

Östemperleme işlemi sonucu, mikroyapının östemperleme sıcaklığına bağlı olarak değişen morfoloji ve oranlarda beynitik ferrit ve kalıntı östenitten ibaret olduğu, optimum koşullarda yapılan östemperleme ile aşınma direncinin döküm haline göre 4.5 kat arttığı belirlenmiştir. Benzer şekilde borlama işlemi sonucu aşınma direnci, döküm haline göre 5 kat, borlamayı takiben yapılan östemperleme ile de 6.5 kat artmıştır. Ayrıca borlamayı takiben yapılan östemperleme ile aşınma direncinin, östemperleme işlemine göre 1.5 kat arttığı gözlemlenmiştir. Belirli borlama + östemperleme koşulları için (250°C'de 320 dakika ve 350°C'de 10 dakika), döküm hali, östemperleme uygulanmış ve borlama uygulanmış numuneler göre daha yüksek korozyon direnci elde edilebilmektedir. Bu artış miktarı, döküm haline göre % 25, borlama işlemine göre ise yaklaşık % 8 korozyon direncini ifade etmektedir. Söz konusu koşullarda yapılan borlama + östemperleme işlemi, sadece östemperleme işlemine göre korozyon direncini yaklaşık % 8 artırmıştır.

THE EFFECT OF COATINGS ON WEAR CHARACTERISTICS OF SPHERODIAL GRAPHITE CAST IRON

SUMMARY

Austempered ductile iron offers a special combination of properties: much higher strength, greater toughness, through hardenability, superior wear resistance with the same design flexibility as ductile iron.

By using surface treatment methods, materials' mechanical properties can be improved. Wear is always observed as one of the follow-up issue for machinery equipments which are exposed to friction. Boriding or boronizing is a thermo-diffusion surface hardening process in which boron atoms diffused into the surface of a work piece to form borides with the base material. The boriding process can be applied to a wide variety of ferrous, non-ferrous and cermet materials. The process involves heating of well cleaned material in the range of 800 to 1000°C, preferably for 1 to 10h in contact with a boronaceous solid powder or boronizing compound, paste, liquid or gaseous medium.

In this study, effects of various processes that are applied on the cast iron with GGG-40 quality spherical graphite produced by Aral Döküm on microstructure of the material, mechanical properties such as hardness, wear resistance and corrosion properties are observed. On this account, austempering, boriding and boriding-austempering processes are applied on the alloy as cast. Austempering procedure is fulfilled by the material's being held in different 8 durations between 5-640 minutes in the temperatures of 250,300,350 and 400°C after austenitizing for 90 minutes in 900°C. For boriding process, pack boriding is used in which the materials are held for 1-8 hours in 900°C after buried in commercial Ekabor-3. Whereas, in the procedure which boriding and austempering are applied together, material is cooled in the weather after it is borided for 90 minutes in 900°C that is followed by the operation done under the chosen austempering degrees and durations. Effects of the applied processes on physical, mechanical and corrosion properties, hardness and microhardness measurement, boride layer thickness, examinations of microstructure, opposite sided wear experience and corrosion experience are observed.

As a result of austempering, it is concluded that microstructure is consisted of bainitic ferrit and retained austenite which changes according to the temperature of austempering in various morphologies and rates, and that wear resistance in austempering under optimum circumstances is 4.5 times more than when it is as cast. Similarly, wear resistance increased 5 times after boriding, and 6.5 times after austempering followed by boriding. Moreover, it is observed in boriding that it is 1.5 times more than austempering processed before. Boriding followed by austempering performed in certain conditions yielded a 25% increment in corrosion resistance with respect to that of as cast ductile iron.

1. GİRİŞ

Küresel grafitli dökme demirler, çeliğin mekanik özelliklerine ve dökme demirin üretim özelliklerine sahip bir malzeme grubu olarak tanımlanmıştır. Küresel grafitli dökme demirler, gri dökme demirlerden yaklaşık iki kat daha fazla mukavemete sahip olup, çeliğe göre çok daha kolayca dökülebilmektedir. Üstelik üretimindeki büyük maliyet avantajı, kullanım alanını hem çelik hem de diğer dökme demirlere göre her geçen gün biraz daha genişletmiştir.

Dökme demir alanındaki ilk gelişme, aşılama işleminde başarıya ulaşılarak, gri dökme demir sınıfının, daha sonraki gelişme ise magnezyum ve seryum işlemlerinde başarı sağlanarak küresel grafitli dökme demir sınıfının kazanılmış olmasıdır. Günümüzde küresel grafitli dökme demirler özellikle otomotiv endüstrisinde başarıyla kullanılmaktadır. Küresel grafitli dökme demir teknolojisinin gelişmesine bağlı olarak, küresel grafitli dökme demirin mekanik özelliklerini daha da geliştirmenin yolları aranmıştır. Ancak, yapılan çalışmalarda, grafite küreselden başka bir morfoloji kazandırmanın imkansız olduğunun anlaşılması, araştırmacıları mekanik özellikleri, matriksin modifikasyonu yoluyla geliştirmek için çalışmaya itmiştir [1].

Bu çalışmalara bağlı olarak, östemperleme ısıl işleminin küresel grafitli dökme demirlere uygulanmasıyla dökme demire beynitik bir mikroyapı kazandırılarak "Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler" geliştirilmiştir.

Östemperleme işlemine bağlı olarak, küresel grafitli dökme demirlerin mukavemet, süneklik, tokluk ve aşınma direnci gibi mekanik özelliklerinde önemli artışların elde edilebileceği belirtilebilir.

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin östemperleme sürecinde meydana gelen mikroyapısal dönüşümleri, yapıları yanında alaşım elementlerinden kaynaklanan segregasyon sorunları, dökümün kesit kalınlığı gibi mekanik özelliklerini etkileyen faktörler ve pratikteki uygulama alanları hakkında da bugüne kadar pek çok makale yazılmıştır. Ancak yine de, alaşım elementlerinin mekanik

özelliklere etkilere başta olmak üzere, daha henüz açıklığa kavuşmamış pek çok noktalar vardır ve bu konu üzerindeki çalışmalar hızla sürmektedir [2].

Genel olarak bir malzemenin performansı, kütlesel ve yüzeysel özelliğine bağlıdır. Malzemenin yüzey özelliğindeki herhangi bir değişim, malzeme fonksiyonlarını büyük ölçüde etkilemektedir.

Son yıllarda malzeme yüzey özelliklerinin rolü, birçok çalışmanın konusunu oluşturmuştur. Yüzey enerjisi, yüzey gerilmesi, yüzeyin aktivitesi ve yüzeyle ilgili problemler bilimsel alanda büyük önem kazanmıştır. Metal ve alaşımlarının kütlesel ve yüzey özellikleri arasındaki ilişki uzun yıllardan beri araştırılmaktadır [1].

Yüzey işlemleri; malzemelerin sertlik, süneklik, yorulma, aşınma, korozyon, ısısal ve darbesel şok gibi mekanik ve tribolojik özelliklerinin bir veya birkaçını geliştirmek ve üretim maliyetini düşürmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu özellikler arasında, parçanın aşınma ve korozyona karşı direncinin arttırılması önem açısından ilk sırada yer almakta ve sanayide uygulanan işlemlerin büyük çoğunluğunun amacını teşkil etmektedir. Aşınma ve korozyon, dünyada her yıl önemli maddi kayıplara neden olmaktadır. Bu nedenle, son yıllarda yaygın olarak çalışılan başlıca konular arasında üretilen parçaların çevre şartlarında bozulmasını önleyecek kaplamaların gerçekleştirilmesi üzerine olmuştur. Bu amaçla, oksit, karbür borür ve nitrürlere dayanan sürekli kaplamalar büyük ilgi görmektedir [4].

Termokimyasal bir kaplama işlemi olan borlama, daldırma tekniği ile kaplamaya en uygun olan metodlardan bir tanesidir. Türkiye'nin dünyada en büyük bor rezervine sahip olan ülke olması sebebiyle [5] ve bor bileşiklerinin üstün özellikleri göz önüne alındığı takdirde, bor kaplamaların ülkemiz açısından önemi ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla, demir esaslı malzemelerin borlanması konusunda birçok araştırma yapılmıştır. Gelişmiş ülkelerin endüstrisinde bor kaplama yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çelikler üzerine borlama konusunda yüzlerce araştırma yapılmasına rağmen, dökme demirler konusunda çalışmalar sınırlı kalmıştır. Küresel grafitli dökme demirler, çeliklerin ve dökme demirlerin özelliklerini bir arada bulundurması sebebiyle kullanımı günümüzde artmıştır. Birçok sürtünmeli ortamda, küresel grafitli dökme demirlerin kullanım alanı bulması, bu malzemenin kütlesel özelliklerinin yanında yüzey özelliklerinin de önemli olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Bunun yanında,

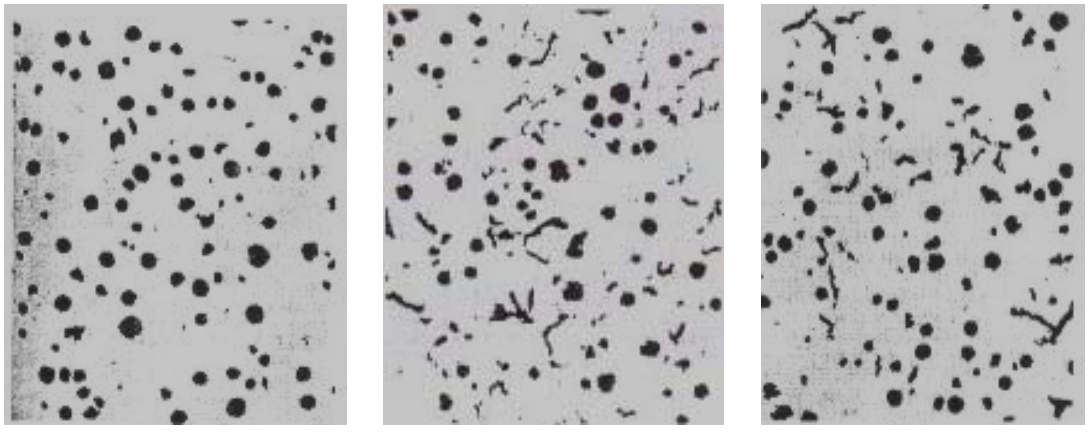
küresel grafitli dökme demirlerin yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla bazı kaplama teknikleri uygulanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, DIN1693 standardına uygun olarak dökülen GGG 40 kalite küresel grafitli dökme demir numuneler, 900 ^{o}C sıcaklıkta 90 dakika östenitlendikten sonra 250–300–350–400^{o}C' deki östemperleme banyosuna aktarılmış ve 5–10–20–40–80–160–320–640 dakika sürelerle östemperlendikten sonra havada soğutulmuştur. Ayrıca aynı numunelere östemperleme işlemi yapılmadan sadece borlama işlemi uygulanmıştır. Uygun olan östemperleme sıcaklığı ve östemperleme süresi seçilip, borlanan numuneye derhal östemperleme ısıl işlemi yapılarak dış yüzeyde borür tabakası, matrikste ise beynitik yapı elde edilmiştir.

Bu çalışmada, döküm hali, borlanmış, östemperlenmiş ve borlanıp östemperlenmiş numunelerin aşınma dayanımları kıyaslanarak, mikroyapı-aşınma direnci ilişkisinin saptanabilmesi için disk üzerinde bilya yöntemiyle aşınma deneylerinin yapılması amaçlanmıştır.

2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

Küresel grafitli dökme demirler, sfero, nodüler, ya da sünek dökme demir olara da bilinirler. Gri dökme demirlerden tek farkı içerdikleri grafitin küresel biçimde olmasıdır. Grafitlerin küresel biçimde olması, sfero dökme demirlere, daha fazla tokluk ve daha iyi mekanik özellikler sağlar. Toplam karbon miktarı gri dökme demirlerle aynıdır. Katılaşma sırasında grafitlerin küresel biçimde oluşmasını sağlayan, dökümden önce potaya ilave edilen Mg ya da Ce gibi elementlerdir. Bu elementlerin kükürde karşı ilgileri çok fazla olduğundan, küreleştirme işleminin iyi bir şekilde yapılabilmesi için eriyik metalin kükürt oranının %0.015'in altında olması gerekir. Alaşım elementlerinden çil oluşumu ve matris yapısında etki edenler birincil alaşım elementi olarak, grafit yapısı ve küreleşmeye etki eden elementler ise ikincil alaşım elementleri olarak adlandırılırlar. Tablo 2.1'de ikincil elementler ve grafit şekline olan etkileri verilmiştir. Küreleşme bileşimindeki alaşım elementi miktarlarına göre farklılıklar göstererek, belirli oranlarda oluşabilir. Şekil 2.1'de farklı derecelerde küreselleşme gösteren dökme demir yapıları gösterilmiştir .



(a) (b) (c)

Şekil 2.1: Farklı derecelerde küreselleşmiş küresel grafitli dökme demirlerin parlatılmış haldeki optik mikroskop fotoğrafları. (a) %99 küreselleşmiş (b) %80 küreselleşmiş (c) %50 küreselleşmiş [6].

Döküm malzemenin yapısındaki ferrit ve perlit miktarları, malzemenin kimyasal bileşimi ile soğuma hızına bağlıdır. En fazla %10 perlit içerenler, ferritik küresel grafitli dökme demir olarak adlandırılır. Küresel grafitli dökme demirler uygulanan ısıl işlemlere göre yapıları ferritik, perlitik veya martensitik olabilir.

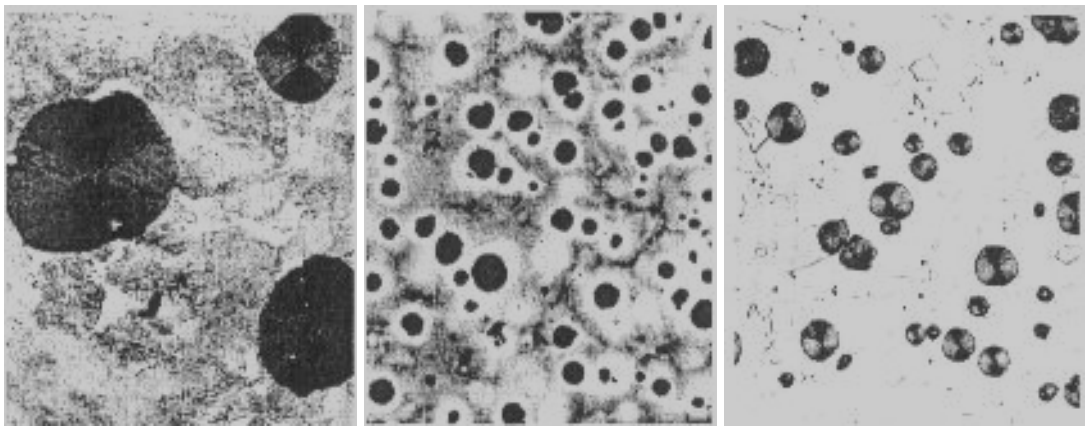
Tablo 2.1: İkincil elementlerin grafit yapısına etkileri [6].

Element Sınıfı	Element
Küreleştirici	Magnezyum, kalsiyum, nadir toprak metalleri (seryum, lantanyum, v.b.), yitriyum
Küreleşmeye Etkisiz	Demir, Karbon, alaşım elementleri
Küreleşmeyi Azaltıcı	Alüminyum, titanyum, arsenik, bizmut, telür, kurşun, kükürt, antimon

Küresel grafitli dökme demirler ana yapılarına göre Tablo 2.2'de verilen sertlik değerlerine erişebilirler. Oluşan yapılara ait mikroyapı fotoğrafları Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

Tablo 2.2: Sfero dökme demirlerin ana yapılarına göre sertlik değerleri [7].

Ana Yapı	Sertlik, HB
Ferritik	130
Ferritik (alaşımlı)	210
Perlitik	200
Perlitik (alaşımlı)	275
Martenzitik	320
Östenitik	130-160



(a) (b) (c)

Şekil 2.2: Temperlenmiş küresel grafitli dökme demir yapıları: (a) tam temperlenmiş ferritik yapı (x100), (b) kısmen temperlenmiş perlitik ve ferritik yapı (x100), (c) Normalize perlitik yapı (x500) [6].

2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Küresel grafitli dökme demirlerin elde edilmesinde iki ana yöntem vardır:

a) INCO (International Nickel Company) yöntemi
b) BCIRA (British Cast Iron Research Association) yöntemi

Küresel grafitli dökme demirlerin yapısındaki grafitler çeliğe benzer bir matris içerisinde dağılmış küresel partiküller halindedir. Grafitlerin küreler halinde oluşmasını sağlamak için, BCIRA yönteminde sıvı demire seryum (Ce) ilave edilmektedir. INCO yönteminde ise sıvı demire magnezyum (Mg) ilavesi yapılarak, grafitlerin küre şeklinin alması sağlanmaktadır [9].

Küresel grafitli dökme demirler çeşitli normlara göre sınıflandırılmaktadır. TSE (Türk Standartları Enstitüsü) ve Alman (DIN) standardına göre dökme demirlerin sınıflandırılması Tablo 2.3 ve Tablo 2.4'de verilmektedir. Burada DDK sembolü dökme demir küresel grafit anlamına gelmektedir.

Tablo 2.3: TSE standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması [10].

Kısa Gösterilişi	Çekme Dayanımı, kg/mm^2	Akma Dayanımı, kg/mm^2	Kopma uzaması, %	Sertlik, HB	Mikroyapı
DDK 40	42	28	12	140–201	Daha çok ferritik
DDK 50	50	35	7	170–241	Ferrit + Perlit
DDK 60	60	40	3	192–269	Perlit+Ferrit
DDK 70	70	45	2	229–302	Daha Çok Perlitik
DDK 80	80	50	2	248–352	Perlitik
DDK 35.3	35	22	22	-	Ferritik
DDK 40.3	40	25	18	-	Ferritik

(-) Darbeli çalışması öngörülen tiplerdir.

Tablo 2.4: DIN standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması [11].

Kısa Gösterilişi	Çekme Dayanımı, kg/mm^2	Akma Dayanımı, kg/mm^2	Kopma uzaması, %
GGG–40	40	25	15
GGG–50	50	32	7
GGG–60	60	38	3
GGG–70	70	44	4
GGG–80	80	50	2

2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey Sertleştirme İşlemleri

Küresel grafitli dökme demirlerin yüzey sertleştirme işlemleri alev, indüksiyon veya lazerle tavlama ve sertleştirme, nitrürleme ve borlamadan meydana gelmektedir.

i) Alev, indüksiyon veya lazerle yüzey sertleştirme

Bu yöntemler çok kısa sürede ısıtma sağlanabilmesi sebebiyle, GGG-70 ve GGG-80 tipi perlitik küresel grafitli dökme demirler tercih edilmektedir. Ferrit içermeyen küresel grafitli dökme demirler, kolayca su alabilme kabiliyetine sahip olduklarından dolayı tamamıyla sertleşmemesi için östenitleme sıcaklığında çok kısa tutulurlar.

ii) Nitrürleme

Nitrürleme, küresel grafitli dökme demirlerin parçalanmış amonyak içerisinde 2–3 saat tutulması ile gerçekleştirilir. Bu işlem sonucunda, 60 HRC sertlik elde edilebilmektedir. İşlem sonrasında, küresel grafitli dökme demirlerin 10^8 devire kadarki yapılan yorulma deneyleri sonucunda göstermiş oldukları yorulma dirençleri, 172–210 MPa'dan 276–289 MPa'ya ulaşmaktadır.

iii) Borlama

Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması, 750–1000°C arasında katı, sıvı veya gaz ortamda 1-10 saat süre ile gerçekleşmektedir. Borlanmış dökme demirler, çeliklerden daha düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Yüzey sertliği ise, FeB ve Fe_2B fazları sebebiyle, 1200–2000 HV arasındadır. Tekstil makinalarının dramlarında, hareketli makine parçalarında, kollarda ve birçok kalıpta, yüzeyi borlanmış küresel grafitli dökme demirler kullanılmaktadır [13].

2.3. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları

Küresel grafitli dökme demirlerin, diğer dökme demir ve çeliklere göre avantajları nedeniyle, kullanım alanları ve üretim miktarları her geçen gün biraz daha artmakta olup, en yaygın kullanım otomotiv ve mimari uygulamalarındadır. Örneğin, krank milleri, ön teker destek kolları, direksiyon bağlantıları, fren diskleri, motor bağlantı rotları, güç iletim bağlantıları ve manifoltları için yüksek güvenlik valfleri sayılabilir. Küresel grafitli dökme demir boru endüstrisi, diğer en büyük kullanım alanını teşkil etmektedir. Ayrıca, madencilik ve metalurji sektöründe, kırıcı gövdelerde, sıcak hadde merdanesi, kalıp, ergitme ve curuf potalarında da kullanılmaktadır [8,11].

3. ÖSTEMPERLEME ISIL İŞLEMİ

3.1. Östemperleme Isıl İşlem Süreci

Geleneksel östemperleme prosesinde döküm malzeme 850-950^{o}C sıcaklık aralığında tamamen östenit (γ) matris elde edilene kadar yeterli süre (genellikle 1–2 saat) bekletilir. Bunun ardından 250-400^{o}C sıcaklık aralığına hızla soğutulur ve seçilen sıcaklıkta 1–4 saat süreyle bekletilir, daha sonra oda sıcaklığına havada soğutulur.

Küresel grafitli dökme demirlerde gerçekleştirilen östemperleme ısıl işleminin asıl amacı, yüksek karbonlu östenitin eşlik ettiği, karbürsüz ferritten meydana gelmiş asiküler (beynitik) bir matriks yapısı oluşturmaktır [2].

Östemperleme iki basamaklı bir ısıl işlemdir. İlk aşama östenitleme aşamasıdır. Östenitleme işlemi 20 dakika ile 4 saat arasında değişen bir sürede gerçekleştirilmektedir [1]. Bu aşamada, 850–950°C'lik bir sıcaklık aralığında döküm matriks tamamen östenite dönüştürülür. Östenitin karbon miktarı östenitleme sıcaklığı ve küresel grafitli dökme demirin bileşimine bağlıdır.

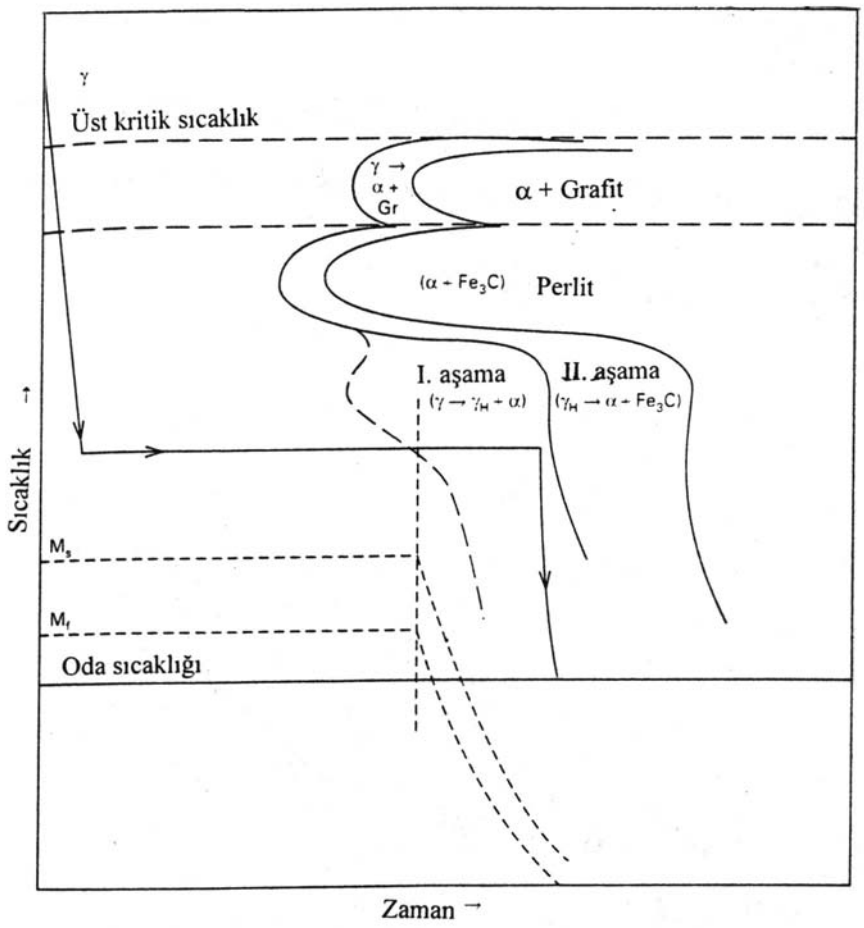
Östemperleme işleminin ikinci aşaması, 250–400°C arasında değişen bir sıcaklık aralığındaki östemperleme sıcaklığına çabuk soğutma ve bu sıcaklıkta 1 ile 4 saat arasında değişen bir süre tutmaktır [15]. Çabuk soğutma izotermal bir tuz banyosuna hızlı bir şekilde daldırılarak gerçekleştirilir [16]. Çalışılan sıcaklığa bağlı olarak östemperleme işlemi, yüksek karbonlu bir östenit içinde beynitik ferrit ya da beynitik ferrit karbür matriks yapısı meydana getirir. Karbon seviyesi, östeniti termal olarak kararlı hale getirmeye yetecek kadar yüksektir. Bu yüzden östemperleme işleminin sonundaki havada soğutmada östenit kalıntı östenit olarak kalır [15].

Östenitleme sıcaklığından östemperleme sıcaklığındaki izotermal tuz banyosuna geçiş, perlitik ve ferritik dönüşüme meydan vermeyecek kadar hızlı olmalıdır [2]. Alaşımsız küresel grafitli dökme demir, perlit dönüşümünü önlemek için yaklaşık 20 saniye içinde östenitleme sıcaklığından östemperleme banyosuna aktarılmalıdır. %0.5 Mo bu süreyi 2 dakikaya, %5 Mo ve %2,37 Ni ilavesi ise 10 dakikaya çıkartmaktadır. Böylece daha kalın parçalar östemperlenebilir.

Küresel grafitli dökme demirin östemperlenmesi sonucu elde edilen beynit yapısı ile çeliklerdeki izotermal tavlama ya da sürekli soğuma ile elde edilen beynit yapısı farklı dönüşüm süreçlerinin sonucunda meydana gelirler. Çeliklerden elde edilen beynit yapısı, martenzit ve perlit oluşum sıcaklıkları arasında meydana gelmektedir. Buna göre çeliklerde alt beynit ve üst beynit olarak iki ayrı beynit yapısı tanımlanmıştır. Alt ve üst beynit yapıları arasındaki esas farklılık, her iki yapının oluşum sıcaklıkları ile ferrit ve karbür fazının konumundan ileri gelir. Alt beynit, martenzit dönüşüm sıcaklığına yakın sıcaklıklarda oluşmaktadır ve sementit, ferrit tabakçıklarının içinde bulunmaktadır. Ayrıca alt beynit yapısında ε-karbür gibi karbürlerde bulunur. Üst beynit yapısı ise perlit oluşum bölgesine yakın sıcaklıklarda meydana gelir ve sementit, ferrit tabakçıklarının arasında bulunmaktadır. Ferrit ve sementit fazlarının beynit içinde bulunma şekline bağlı olarak alt beynit tok, üst beynit ise gevrek karakterdedir [16].

Küresel grafitli dökme demirin östemperlenmesi sonucu oluşan beynit yapısı ise iki aşamalı bir dönüşüm sürecinin ürünüdür. Küresel grafitli dökme demirin izotermal banyoda tutulması esnasında oluşan beynitik yapı, çelikte oluşan beynit yapısından farklı olması açısından (çeliklerdeki beynitik yapı sementit içeren ferrit tabakalarından oluşur) "ausferrit" olarak isimlendirilir ve iki aşamalı bir dönüşüm sürecinin ürünü olarak östemperleme sıcaklık aralığında meydana gelir. Bu aşamalar şunlardır:

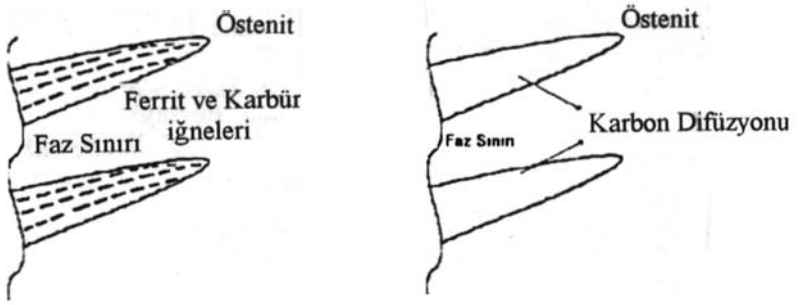
1. Çoğu zaman beynitik ferritin, ferrit-küre (matriks-nodül) ara yüzeyinde çekirdekleşmesi ve daha sonra,
2. Küçüklüğü büyük ölçüde östemperleme sıcaklığının bir fonksiyonu olan beynitik ferritin östenit içinde büyümesi. Beynitik ferritin büyümesi esnasında ferrit tabakçıklarının bünyesindeki karbonun bir kısmı östenite doğru yayınır. Sonuçta artan östemperleme süresine bağlı olarak, östenit karbonca zenginleşir ve böylece kararlılığı yükselir. Karbonca zenginlemiş östenit, "yüksek karbonlu östenit" olarak bilinir [2,16]. Şekil 3.1, östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin üretimini belirten bir işlem dizisi ile birlikte, küresel grafitli bir dökme demir için IT (İzotermal Dönüşüm) diyagramını göstermektedir. Şekilde, M_s sıcaklığının hemen üzerindeki bir izotermal işlem sonrası oluşan beynit yapısı alt beynit, perlitik dönüşüm sıcaklığının hemen altında ve alt beynit oluşum sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta oluşan yapı ise üst beynit olarak adlandırılır [16,17].



Şekil 3.1: Küresel grafitli bir dökme demirin izotermal dönüşüm (IT) diyagramı [17].

İzotermal dönüşümü takip eden mikroyapı büyük ölçüde östemperleme sıcaklığa T_A'ya bağlıdır [18]. Yaklaşık 330 ^oC'nin altındaki (240–330 ^oC sıcaklık aralığı) düşük bir östemperleme sıcaklığı T_A, östenitin çok aşırı soğumasına ve karbonun difüzyon hızının düşük olmasına sebep olur. Bu yüzden, beynitik ferritten östenite doğru yayınan karbon miktarı çok azdır ve karbonun geri kalanı ferrit tabakçıklarında sementit (Fe_3C) olarak çökelir (Şekil 3.2a)[2]. Sonuçta, ferrit tabakçıklarının çekirdekleşme hız, ferrit tabakçıklarının büyüme hızından daha yüksek olduğu için 240–330 ^oC sıcaklık aralığındaki izotermal dönüşüm "alt beynit" olarak bilinen yapıyı ortaya çıkartır. Bu yapı, her ne kadar beynitik ferrit ve yüksek C'lu östenitten ibaret olarak kabul edilse de, ok düşük oranda martenzit içermektedir [18]. Maksimum tokluğun elde edildiği şartlarda %10 ile 20 oranında yüksek karbonlu östenit ihtiva eder [11]. Benzer şekilde, komşu ferrit tabakçıklarının arasında oluşan iğne şeklindeki yüksek karbonlu östenit bölgesi de ince bir görünümdedir [16,18].

330–400 ^{o}C sıcaklık aralığında değişen daha yüksek östemperleme sıcaklıklarında karbonun difüzyon hızı bir önceki duruma göre (östemperleme sıcaklığı T_A'nın 240–330 ^{o}C arasında değiştiği durum) oldukça yüksektir ve böylece karbon büyüyen ferrit tabakçıklarından östenite doğru hızla yayınabilir. Bu durum, özellikle büyüyen ferrit tabakçıkları arasındaki östenitin karbonca zenginleşmesine sebep olur[24]. Östemperleme sıcaklığının yükselmiş olması, martenzit oranını düşürürken kalıntı östenit miktarını arttırır [19]. Bütün bu değişiklikler hep birlikte "üst beynit" yapısının oluşmasına sebep olur (Şekil 3.2b) [2,19]. Dönüşüm süresi ilerledikçe, östenitin karbon miktarı artar ve beynit reaksiyonunun itici gücü azalır. Bu esnada yapıda bulunan yüksek silisyum miktarı (%2–3 Si), karbür oluşumunu engeller [17]. Ayrıca, yüksek karbon oranı M_s(martenzit başlangıç sıcaklığı) sıcaklığını düşürür ve bu yüzden ortam sıcaklığına soğuma esnasında östenit kararlı bir surumdadır. Üst beynit yapısında, östemperleme sıcaklığı T_A 330–440 ^{o}C aralığında bir değer aldığı için nihai mikroyapı, alt beynit yapısına göre daha kaba ve karbürsüz ferrit tabakçıkları ve kalıntı östenit yapısından ibarettir [18]. Yüksek karbonlu östenit, kütlesel bir şekle sahiptir (blocky austenite), yapı rasgele dağılmış durumdadır ve maksimum tokluğu elde edildiği şartlarda %45 oranında bulunduğu bildirilmiştir [16,18].



(a) (b)

Şekil 3.2: (a) Alt beynit (250-330°C) ve (b) Üst beynit (330-400°C) oluşum mekanizması [2].

330–400°C arasında östemperlenen ve üst beynit yapısı gösteren bir küresel grafitli dökme demir parça ise, yüksek süneklik ve toklukla ilişkili olarak nispeten yüksek mukavemet, orta derecede bir sertlik değeri gösterir. Maksimum aşınma direnci ve deformasyon sertleşmesi, ortamda yüksek miktarda kalıntı östenit olduğunda, yani üst beynit yapısı gösteren bir malzemede görülür [1].

Östenit karbon bileşimi Fe-C denge diyagramındaki maksimum karbon çözünürlüğü oranına (%1.7–2) ulaştığında yüksek karbonlu östenit, ferrit ve karbüre ayrışır. Sonuç olarak küresel grafitli dökme demirlerde izotermal işlem sırasında meydana gelen dönüşümler östemperleme zamanına bağlı olarak iki aşamalı bir reaksiyon ile meydana gelmektedir [11].

Östemperleme işlemi esnasında mikroyapıda meydana gelen değişimler, bir alt beynit yapısının (Şekil 3.2a) ve bir üst beynit yapısının (Şekil 3.2b) değişen östemperleme sıcaklığına bağlı olarak ortaya çıkmasını sağlar [19].

Birinci aşamada (numunen izotermal işlem banyosuna daldırılması ile başlamıştır), düşük karbonlu östenit, yüksek östemperleme sıcaklıklarında beynitik ferrit (α) ve yüksek karbonlu östenite (γ_{yk}) düşük östemperleme sıcaklıklarında ise beynitik ferrit/karbür ve yüksek karbonlu östenite dönüşür. Östemperleme işleminin birinci aşaması,

$$\gamma \rightarrow \alpha + \gamma_{yk} \quad \text{.....} \quad \textbf{(3.1)}$$

eşitliği ile ifade etmek mümkündür [2]. Bu işlem süresinin artması ile daha sonra I. aşamada oluşan yüksek karbonlu östenit, östemperleme prosesinin II. aşamasında,

$$\gamma_{yk} \rightarrow \alpha + Fe_3C(karbür) \quad \text{.....} \quad \textbf{(3.2)}$$

reaksiyonu gereğince termodinamik olarak daha kararlı ola ferrit ve karbüre (Fe_3C) ayrışır [20].

I. aşamanın sonunda ferrit oluşumundan dolayı, östenit karbonca doyar ve oda sıcaklığına soğuma sırasında martenzite dönüşemeyecek kadar kararlı bir hal alarak "tam östemperlenmiş" küresel grafitli dökme demir yapısını oluşturur. Oysa I. aşamanın herhangi bir yerinde östemperleme işlemine son verildiğinde (yani östemperleme süresi azaltıldığında) yapıdaki östenit henüz karbonca doygunluğa erişmediği için oda sıcaklığına soğuma sırasında martenzite dönüşecektir.

I. aşama sonunda ortaya çıkan mikroyapı, karbürsüz ferrit ve yüksek karbonlu östenitten ibarettir. (Kovacs tarafından I. aşama ürünleri "ausferrite" olarak adlandırılır) [16,17].

I. aşamada martenzitin mevcudiyeti ve II. aşamada ise ürün olarak karbürün oluşması mekanik özelliklere zararlıdır [19,20]. Karbür oluşumun özellikle mukavemet, süneklik ve tokluğu düşürmesinden dolayı II. aşama ürünleri kullanışlı değildir [16]. Maksimum mekanik özelliklere, yapıda %60–80 oranında beynitik ferrit ve %20–40 oranında kalıntı östenit olduğunda ulaşılmaktadır. Başlangıçta oluşan ferrit tabakçıklarının sayısı, şekli ve boyutu I. aşama ile belirlenir. Dolayısıyla, faydalı nihai mikroyapıyı kontrol edebilmek ve arzulanan özellikleri elde edebilmek için I. kademeyi kontrol etmek gerekir. Bu kademenin kontrolü, seçilen östemperleme sıcaklığında östemperleme süresinin kontrolüyle gerçekleşir [19].

3.2. Östemperleme Sürecini Etkileyen Parametreler

Östemperleme ısıl işlemin küresel grafitli dökme demirler üzerindeki başarılı uygulamaları, bu malzemelerin pek çok alanda kullanımını yaygınlaştırmıştır. Östemperleme ısıl işlemin boyunca meydana gelen oluşumlar konu olmuş, bu araştırmalar sonunda daha mükemmel yapılı östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir üretmek mümkün olmuştur.

Östemperleme, dökümden sonra ısıl işleme çok iyi kalite ve işlem kontrolü gerektiren bir süreçtir. Dökümün kalitesi, alaşım elementlerinin segregasyonu, östenitleme süresi ve sıcaklığı, östemperleme süre ve sıcaklığı işleme tabi tutulan malzemenin boyutları östemperlemeyi etkileyen parametrelerdendir.

3.2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Döküm Kalitesi

Östemperleme ısıl işlemine tabi tutulacak olan küresel grafitli dökme demir malzeme, ne kadar temiz ve homojen olursa, ısıl işlem şartlarının etkisini kontrol etmek ve sonuçta elde edilecek mekanik özellikleri iyileştirmek o kadar kolay olur.

Küresel grafitli dökme demir malzemenin katılaşması sonrasında Cr, P, Mn ve Mo elementleri tane sınırlarına segregasyona neden olurlar [21]. Kesit kalınlaştıkça soğuma hızı düşeceği için segregasyon artar. Yapıda fosfor miktarı çoksa fosfür/karbür kompleksinin artması ve martenzit oluşumunun teşvik edilmesi söz konusu olur. Bu olay özellikle sünekliğin azalmasına v engel mekanik özelliklerin kötüleşmesine neden olur [21,22]. Alaşım elementlerinin segregasyonu, yapıdaki

küresel grafit sayısını arttırarak azaltılabilir. Etkin bir rafinasyon işlemiyle, östemperleme sonucu özellikler iyileştirilmiş olur.

Küresel grafitli dökme demirin özellikleri, mikroyapısından büyük ölçüden etkilenmektedir. Bu malzemelerde mikroyapı üç temel unsurdan oluşur:

- Matris yapısının fazları ve dağılımı,
- Grafit tanelerinin boyutu, şekli ve sayısı,
- Döküm sonrası yapıda oluşan hatalar (karbürler, segregasyonlar, mikro gözenekler vs.)

Küresel grafitli dökme demirlerde, grafitin şekli nedeniyle darbe etkisi ve yorulma dayancı gri dökme demirlere ve diğer grafitli dökme demirlere göre daha yüksektir. Matris yapının içeriği mekanik özellikler üzerinde çok büyük etki yapar. Bu nedenle alaşım elementlerinin yapıda homojen olarak bulunması ve segrege olmaması istenir. Yapılan araştırmalar bu konuyu destekler niteliktedir.

Alaşım elementi içeren demir-karbon sistemlerinde, bir taraftan sıvı fazdan katı faza geçiş sırasında gerekli enerjiye ihtiyacı, diğer taraftan karbonun termodinamik aktivitesiyle alaşım elementlerinin arasındaki ilişki, alaşım elementlerinin segregasyonunu arttırır. Buna rağmen katılaşma sırasındaki tüm alaşım elementlerinin segrege olacağını kabul edemeyiz. Fakat segregasyonun başlaması hem katılaşma sırasında hem de sıvı faz içinde sıvı ve katı çözelti arasındaki dengenin termodinamiğine bağlıdır [21].

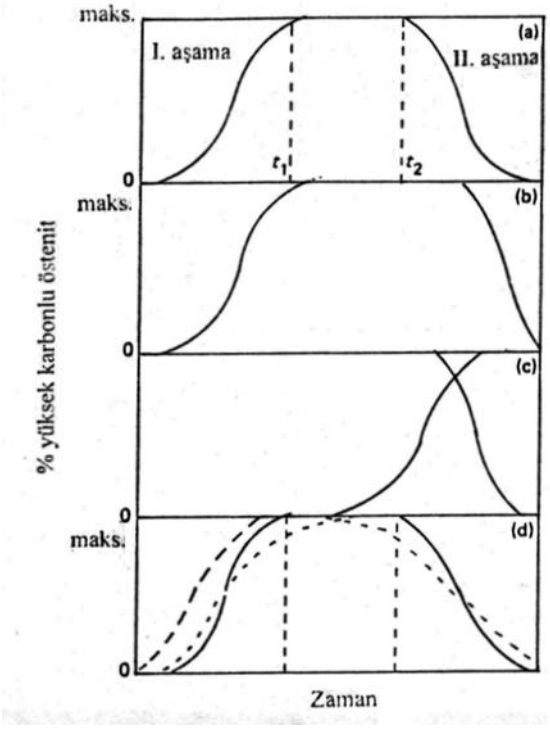
3.2.2. Östenitleme ve Östemperleme Parametrelerinin Etkisi

Küresel grafitli dökme demirlere beynitik mikroyapı kazandırmak amacı ile yapılan, östenitleme ve östemperleme koşullarının küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısı üzerindeki etkileri aşağıda belirtilmiştir.

Östemperleme işleminin ilk adımı olan östenitleme, küresel grafitli dökme demir malzemenin 850 ^{o}C üzerindeki sıcaklıklarda (850 ^{o}C ile 950 ^{o}C arasında), döküm halindeki matriks yapısının, östenit içinde grafit kürecikleri ve üniform karbon içeriğine sahip bir yapıya tamamen dönüşünceye kadar tutulmasını içerir. Östenitleme sıcaklığında meydana gelen herhangi bir artma ya da azalma, östemperleme safhasında, özellikle dönüşümün itici gücü üzerine etki ederek mekanik özelliklerin belirlenmesinde etkisi bir rol oynar.

Östenitleme sıcaklığının düşürülmesi, I. aşama reaksiyonu için itici gücü arttırır ancak, II. aşama reaksiyonu üzerinde çok küçük bir etkisi vardır. Sonuçta işlem (proses) aralığı daha genişler. Bu yüzden, segregasyon bölgelerinde, I. aşama reaksiyonunun yavaşlatılması ile daha yüksek östenitleme sıcaklıklarında kapanmış olan işlem (proses) aralığı, östenitleme sıcaklığının düşürülmesi ve mekanik özelliklerdeki olumlu gelişmeler ile beraber yeniden açılır. Üstelik östenitleme sıcaklığının düşürülmesi ile işlem aralığına daha kısa östemperleme süreleri sonucunda ulaşılır ve östemperlemeden sonra elde edilen mikroyapı daha kararlıdır ve daha az martenzit ihtiva eder (Şekil 3.3).

Östenitleme sıcaklığı ve süresi arttıkça sertlik artar. Daha yüksek östenitleme sıcaklığı ve süresinin östenit oluşumunu hızlandırdığı, östenit tanelerinin büyümesine ve östemperleme sürecinde daha uzun beynitik ferrit tabakçıkları ve kaba bir mikroyapının oluşmasına neden olacağı yönünde bulgular vardır [16].



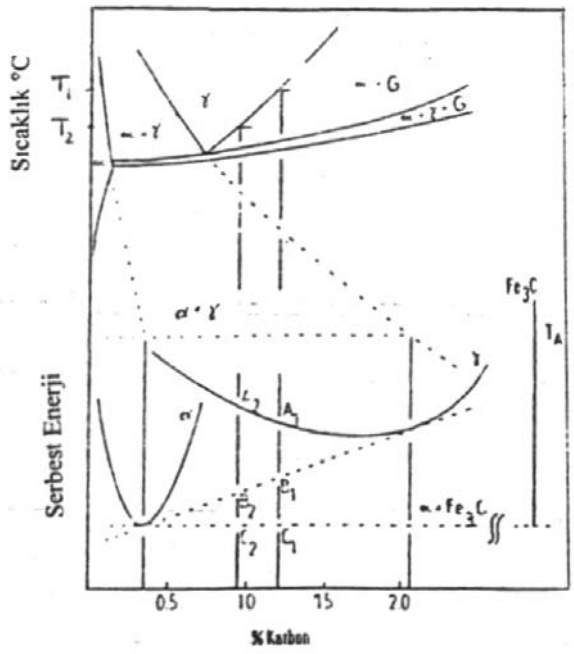
a) Östemperleme sürecinde oluşan normal bir işlem aralığı,
b) Alaşım elementlerinin segregasyon etkisiyle genişlemiş işlem aralığı,
c) Alaşım elementlerinin segregasyon etkisiyle kapanmış işlem aralığı
d) Farklı etkilere işlem aralığının değişimi.
   ___ Geniş bir işlem aralığı,
   ….. Alaşım segregasyon etkisiyle kapanmış bir işlem aralığı,
   ----- Düşük östenitleme sıcaklığı etkisi ile yeniden açılmış işlem aralığı

Şekil 3.3: Yüksek karbonlu östenit oranının östemperleme süresine bağlı olarak değişimi [16].

Östenitleme sıcaklığı yükseldikçe, östenit içindeki karbon çözünürlüğü artar ancak östenit reaksiyonu hızı tüm östemperleme prosesi boyunca düşer. [16,17,23]. Östenitleme sıcaklığının azaltılması ise östemperleme sıcaklıklarında dönüşüm hızını yükseltir [23].

Östenitleme sıcaklığının azaltılması I. aşama reaksiyonu için itici güç arttırması, Şekil 3.4'te verilen şematik Fe-C faz diyagramı ve ferrit (α), ve östenit (γ) ve sementit (Fe_3C) fazları için serbest enerji eğrisinden görülebilir [24]. İtici gücün artması daha hızlı dönüşüme yol açan daha fazla çekirdeğin oluşmasını sağlar. Bunun sonucunda beynit oluşumu artar ve büyüyen ferrit tabakçıklarından östenite daha fazla karbon atılır [11].

Şekil 3.4 östemperleme sırasındaki dengeyi ve yararlı dengeyi kontrol eden termodinamik parametreleri göstermektedir. Östenitleme işlemi 850–950 ^oC arasındaki bir sıcaklıkta döküm halindeki yapının, östenit içinde grafit kürecikleri ve üniform karbon içeriğine sahip bir yapıya tamamen dönüşünceye kadar tutulması ile gerçekleşir [23]. Östenitlemeden sonra, östenitin karbon miktarı, ardışık olarak östenitleme sıcaklıkları T_1 ve T_2 için denge değerleri olarak C_1 ve C_2 şeklinde tanımlanmıştır. I. aşama reaksiyonu için itici güç, serbest enerji farkı A_1-B_1 ile tanımlanmıştır [24].



Şekil 3.4: Şematik Fe-C-Si faz diyagramı ve ferrit(α), östenit(γ) ve sementit(Fe_3C) fazları için serbest enerji eğrileri [24].

Yarı kararlı östeniti ısıl olarak kararlı kılacak ve oda sıcaklığına soğuma esnasında martenzit oluşumunu engelleyecek karbon miktarı %1.9-%2.1 arasında değişmektedir [23]. Östenitleme sıcaklığı yükseldikçe yarı kararlı östeniti dengeleyecek bu karbon oranı azalır. Böylece, yüksek sıcaklıklarda östenitlenmiş numunelerin %1.9-%2.1 arasında değişen bu orana ulaşarak ısıl olarak kararlı hale gelmesi daha kısa sürede gerçekleşir. Bu da II. aşama reaksiyonun daha kısa zamanda oluşması demektir [11].

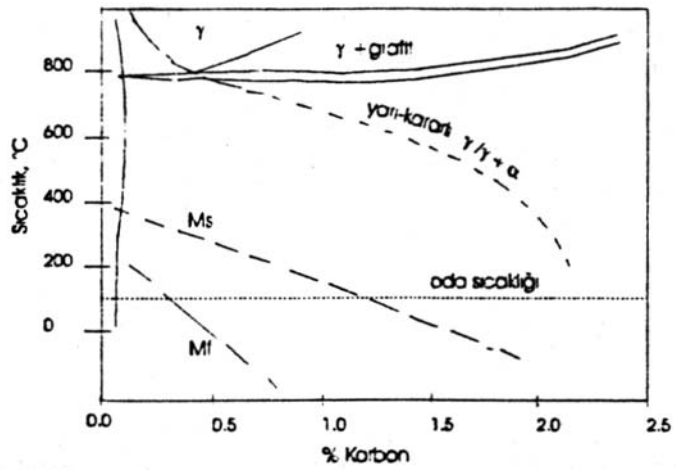
Östemperleme sıcaklığı, nihai mikroyapının birinci belirleyicisidir. Östemperleme sıcaklığı ve süresi, beynit oluşum morfolojisinin yanı sıra matriksteki toplam karbon miktarının, martenzit oluşumunu ve yüksek karbonlu östenit miktarını etkiler. [16,17]. İşlem aralığı daraldığında ya da kapalı olduğunda östemperleme süresi önem kazanır. Martenzit oluşumu, düşük östemperleme sıcaklıklarında ve kısa izotermal işlem sürelerinde daha fazladır. Östemperleme süresinin çok kısa olduğu durumlarda, dönüşmemiş östenit ihtiva ettiği düşük karbon miktarı yüzünden havada soğuma sırasında martenzite dönüşmeden kalır [16]. Östemperleme süresi daha da fazla arttığı zaman, yüksek karbonlu östenit beynitik ferrit ve karbüre ayrışır. Sonuçta, östemperleme süresi arttıkça martenzit miktarı azalır ancak, beynitik ferrit ve kalıntı östenit miktarları artar. Yüksek karbonlu östenit miktarı, östemperleme süresindeki artışın başlangıcında maksimuma ulaşırken östemperleme süresindeki artış devam ettikçe, bu maksimum değerden azalma gösterir [11]. Maksimum mekanik özeliklere, yapıda %60–80 arasında beynitik ferrit ve %20–40 kalıntı östenit olduğu durumda ulaşılır [19].

Alt ve üst beynit yapılarının östemperleme sıcaklığına bağlı olarak ortaya çıkmasının dışında, östemperleme sıcaklığı, I. ve II. aşama reaksiyonlarının oluşum hızını da etkiler [16]. Beynit oluşumunun başlangıcı olan I. aşamada ferritin östenit tane sınırlarında ve grafit kürelerinin etrafında çekirdekleşmesi esnasında, içindeki karbonu difüzyon ile dışarı atarak östeniti zenginleştirmesi optimum özelliklerin elde edildiği bir yapıyı ortaya çıkartır. Optimum özelliklerin elde edildiği bu yapının kontrolü ancak I. aşama reaksiyonunun kontrolü ile mümkündür. Bu noktada, I. aşama reaksiyonunun hızını belirlemede östenitlenmiş karbon oranı (C_γ^o) ile östemperlenmiş matriksin karbon oranı (C_γ^{maks}) arasındaki fark önemli bir faktördür. Buna göre (C_γ^{maks}- C_γ^o) arasındaki oran artarken I. aşama reaksiyon hızı artmaktadır. Bu değer azaldığında ise yapıdaki dönüşmemiş östenit miktarı artmaktadır. C_γ^o değeri

(östemperlenmiş matriksin karbon oranı) östemperleme sıcaklığı ile C_γ^{maks} değeri de (östemperlenmiş matriksin karbon oranı) östemperleme sıcaklığı ile kontrol edilir. Östenitleme sıcaklığı arttıkça östenitlenmiş matriksin karbon oranı C_γ^o artar.(Tablo 3.1), buna karşılık östemperleme sıcaklığının artmasıyla birlikte, östemperlenmiş matriksin karbon oranı(C_γ^{maks}) azalmaktadır (Şekil 3.5) ve karbonun difüzyonu daha hızlıdır [11].

Tablo 3.1: Östenitleme sıcaklığına bağlı olarak östenitlenmiş (C_γ^o) ve östemperlenmiş (C_γ^{maks}) matriksteki dengesel karbon oranı[11].

Östenitleme Sıcaklığı, °C	C_γ^o	C_γ^{maks}
850	0.73	2.29
900	0.87	2.26
950	1.05	2.11



Şekil 3.5: Yarı kararlı γ/γ+α sınırlarıyla, martenzit başlama ve bitiş sıcaklıklarını gösteren FeC-Si (ağırlıkça %2.5 Si) denge diyagramı [11].

Alt beynit morfolojisinin etkin olduğu düşük östemperleme sıcaklıklarında ise östenitteki maksimum karbon çözünürlüğü (C_γ^{maks}) fazla ve karbonun difüzyon hızı düşüktür. Fakat ferritin çekirdeklenme hızı yüksek olduğundan, difüzyon mesafesi küçülecek ve I. kademe reaksiyonunun hızı artacaktır. Sonuç olarak I. kademe reaksiyonunun hızı, yüksek sıcaklıklarda difüzyon hızıyla, düşük östemperleme sıcaklıklarında ise difüzyon mesafesi ile kontrol edilmektedir [11].

II. aşama reaksiyonda ise, II. aşama reaksiyonun hızı, östemperleme sıcaklığına olduğu kadar küresel grafitli dökme demirlerin bileşimine de güçlü bir şekilde bağlıdır. II. aşama esnasında, yüksek karbonlu östenit beynitik ferrit ve karbüre

ayrıştığı için, östemperleme sıcaklığı azaldıkça karbür oluşumu daha uzun bir östemperleme süresi gerektirir. Bu nedenle, mekanik özelliklerde östemperleme süresi ile meydana gelen değişiklikler yavaş yavaş meydana gelmektedir [19].

Fazlar kuralına göre [16]:

$$X_\gamma = \frac{\left(C_\gamma^o - C_\alpha\right)}{\left(C_\gamma^{maks} - C_\gamma\right)} \quad \text{.....} \quad \textbf{(3.3)}$$

olmaktadır. Burada,

X_γ, X_γ: Östenitin hacim oranı (%)

C_γ^o, Östenitlenmiş matriksin karbon oranı (%)

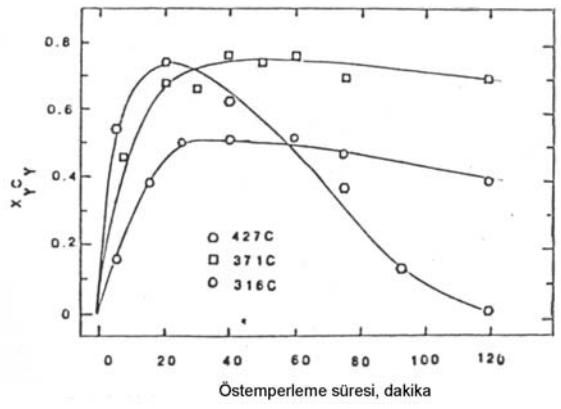
C_α, C_α: Ferritin karbon oranı (%)

C_γ^{maks}, Östemperlenmiş matriksin karbon oranı (%)

C_γ, İşlemin herhangi bir anındaki östenitlenmiş matriksin karbon oranı (%) olarak tanımlanmaktadır [16].

Yüksek östemperleme sıcaklıklarında C_γ^{maks} (östemperlenmiş matriksin karbon oranı) değerinin küçülmesine bağlı olarak X_γ (östenitin hacim oranı) değeri artar, düşük östemperleme sıcaklıklarında ise östenitin hacim oranı azalır [16]. C_γ. X_γ çarpımı östenit fazındaki toplam karbon oranını verir. Bu değer, C_γ^o değerine eşit olmalıdır. Östemperleme işlemi sırasında karbonun bir kısmı yapıda karbür olarak veya ferrit fazında aşırı doymuş durumda ise, C_γ. $X_\gamma < C_\gamma^o$ olacaktır.

Şekil 3.6'da az alaşımlı bir dökme demirin 371 ^oC ve 427^oC'de östemperlenmesinde C_γ. X_γ çarpımının yaklaşık 0.8 değerine eriştiği görülmektedir. Oysa 316 ^oC'de östemperleme işleminde bu çarpım yaklaşık 0.5 değerinde kalmıştır. Böylece 371 ^oC ve 427 ^oC'de çok az veya hiç karbür oluşmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.6: 927 ^oC'de östenitlenmiş bir küresel grafitli dökme demirde çeşitli östemperleme sıcaklıkları ve sürelerinde $X_\gamma.C_\gamma$ ilişkisi [11].

427 ^{o}C'de X_{γ}. C_{γ} (östenit fazındaki toplam karbon miktarı) ifadesinin yaklaşık 0.8 değerinde maksimuma ulaşması ve II. kademe reaksiyonunun tamamlanarak sıfıra doğru düşmesi çok kısa bir sürede, 371 ^{o}C' de ise daha uzun bir sürede gerçekleşmektedir. Dolayısıyla, östemperleme sıcaklığının artmasıyla II. reaksiyonun hızının arttığı ve reaksiyonun çok kısa bir sürede tamamlandığı söylenebilir [11].

Veriler, kalıntı östenit miktarlarının östenitleme sıcaklığı ile östemperleme sıcaklığı ve zamanına göre bağımlılık gösterdiğine işaret etmektedir. Ancak bağımlılığın ölçüsü malzemenin bileşiminde kullanılan bakır yüzdesi ile de değişmektedir. Bu nedenledir ki, her sınıf malzemenin davranışlarına göre ayrı ayrı olarak daha sonra da malzemeler arasında genel bir ilişki arayışına yönelerek inceleme yöntemi tercih edilmiştir.

Hemen hemen her östemperleme zamanı için, kalıntı östenit miktarı 300 ^{o}C'de bir minimum değere düşmekte ve daha sonra ise östemperleme sıcaklığıyla birlikte artışa geçerek 350 ^{o}C'de östemperleme sıcaklığında bir maksimum değere ulaşmaktadır. Östemperleme sıcaklığının daha da arttırılması karşısında bir kalıntı östenit yüzdesi'nin ani bir şekilde azaldığı gözlemlenmektedir. Ayrıca herhangi bir şart altında ölçülen kalıntı östenit miktarının östenitleme sıcaklığına da bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Östenitleme sıcaklığının 850 ^{o}C'den 900 ^{o}C'ye yükseltilmesiyle birlikte kalıntı östeniti miktarında da önemli bir artış ölçülmektedir. Örneğin, 850°C'de östenitlenmiş ve 250°C ve 350°C'de östemperlenmiş bir malzemenin kalıntı östenit miktarı zamana bağlı olarak sırasıyla, %19–31 ve %34–38 aralıklarında değişmekte iken 900°C'de östenitlenmiş ve 250°C ile 350°C'de östemperlenmiş dökme demirin kalıntı östenit miktarının sırasıyla, %38–48 ve %38–50 aralıklarında değiştiği gözlemlenmektedir [29].

3.2.3. Alaşım Elementlerinin Etkisi

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin mikroyapısı ve mekanik özellikleri, kimyasal bileşimi ile yakından ilişkilidir [25]. Alaşım elementleri ile dökme demirin basit kalınlığı arasında basit bir ilişki vardır. Çünkü alaşımsız küresel grafitli dökme demirlerin östemperlenebilirliği (sertleşebilirliği) zayıf olduğu için kullanımları ince kesitler için sınırlandırılmıştır [19]. Alaşım elementleri hem sertleşebilirliği arttırmak hem de östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir malzemeleri ekonomik açıdan daha etkili kılabilmek için düşük oranda küresel grafitli dökme demir yapısına katılır.

Alaşım elementlerinin düşük oranda küresel grafitli dökme demir yapısına katılmasının sebebi, sadece "yeterli sertleşebilirlik (östemperlenebilirlik)" hedeflenmesidir. Çünkü alaşımlamanın aşırı oranda yapılması daha yüksek östemperleme sürelerini gerektirir. Kalın kesitli bir döküm söz konusu olduğunda alaşım elementlerinin ilavesi, ısıl işlem esnasında östenitleme sıcaklığından östemperleme sıcaklığına soğutulurken, küresel grafitli dökme demirin perlit oluşumundan sakınılabilecek şekilde yeterli sertleşebilirliğe ulaşabileceği seviyede olmalıdır. İlave alaşım elementlerinin beyniti dönüşüm üzerinde hiçbir ters etkisi olmamalıdır [26,27].

Küresel grafitli dökme demirlerin dönüşüm sırasında yapıda perlit oluşmaksızın östemperlenebilmeleri "östemperlenebilirlik" olarak adlandırılmıştır. Voigt ve Loper isimli bilim adamları tarafından yapılan çalışmalar sonucunda, başarılı bir östemperleme için, küresel grafitli dökme demir parçaların kritik çap (D_c) değerlerinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitliğin kullanılabileceği sonucu ortaya çıkmıştır [28]:

$$D_c = 124C_\gamma^o + 27(\%Si) + 22(\%Mn) + 16(\%Ni) + 25(\%Mo) - 1.68x10^{-4}T_A^2$$
$$+ 2(\%2Cu)(\%Ni) + 62(\%2Cu)(\%Mn) + 88(\%Ni)(\%Mo) + 11(\%Mn)(\%Cu)$$
$$+ 127(\%Mn)(\%Mo) - 20(\%Mn)(\%Ni) - 137 \quad \text{..... (3.4)}$$

Burada,

D_c, Kritik çap veya kesit kalınlığı (mm),

C_γ^o, Östenitleme sıcaklığında matriksin karbon bileşimi (%),

T_A, Östemperleme sıcaklığı (^oC) olarak verilmiştir.

Östenitlenmiş matriksin karbon içeriği (C_γ^o) değeri, östenitleme sıcaklığı (T_γ) ve küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimine bağlıdır [28].

Eşitlik 3.4'den de görüldüğü gibi, alaşım elementi ilavesi genel olarak kritik çapı dolayısıyla küresel grafitli dökme demirin östemperlenebilirliğini arttırma eğilimindedir. Bu etki, TTT diyagramının sağa doğru kayması, dolayısıyla östenitleme sıcaklığından östemperleme sıcaklığına soğuma sırasında perlit oluşumuna izin vermeyecek kritik soğuma hızının artmasıyla açıklanabilir [16].

Alaşım elementlerinin ilavesi (nikel, bakır ya da molibden), beynit içinde önemli morfolojik değişikliklere sebep olmaz. Herhangi bir östemperleme sıcaklığı için

mukayese yapıldığında, alaşımsız küresel grafitli dökme demirlerde oluşmuş beynitin morfolojisi ile alaşımsız küresel grafitli dökme demirlerde oluşmuş beynitin morfolojisi arasında büyük bir fark vardır. Alaşım elementlerinin ilavesi, hiç şüphesiz beynit morfolojisini değiştirir. Ancak, alaşımlamaya devam edilirse (aşırı alaşımlama) martenzit (kısa östemperleme süreleri için) ya da dönüşmemiş (reaksiyona girmemiş) östenit hacmi (UAV) gibi heterojenliğe sebep olur [26].

Küresel grafitli dökme demir bileşiminde genelde bulunan elementlerden bazılarının östemperleme ısıl işlemine etkileri aşağıda detaylı şekilde incelenmiştir.

Karbon: İstenen katılaşma şartlarının sağlanabilmesi için küresel grafitli dökme demirlerde bileşimi genellikle %3.6'dan daha az oranda bulunur. Karbon oranının artması küresel grafitlerin hacim oranının artmasına neden olurken mekanik özellikleri olumsuz yönde etkiler [16].

Silisyum: Si miktarı arttıkça bir küresel grafitli dökme demirin östemperlenebilirliği açısından önemli olan kritik çap (D_c) değeri artar. Silisyum miktarındaki %0.3'lük bir artış D_c'yi 7.6 mm arttırır. Silisyum miktarı yaklaşık %2.7 değerini aştığında, östenit hacim oranı (X_γ) değeri azalır. Silisyum, belirli bir östenitleme sıcaklığında östenitteki karbonun çözünürlülüğünü düşürür [28]. Östenitleme sırasında dönüşüm hızını azaltır [25]. Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir içinde, yüksek kaliteli küresel grafitli bir dökme demirde bulunduğu kadar bulunur (%1.8 ile %2.8 arasında). Karbonu östenitte çözündüren anahtar elementtir. Yani östenit %2 kadar yüksek karbona sahiptir. Böylece nihai eşsiz mikroyapı oluşur [11]. Küresel grafitli dökme demir bileşimindeki silisyum, demir karbür oluşum hızını azaltır, artan silisyum miktarına bağlı olarak, östenitten beynitik ferrit oluşum hızı azalır [28]. Küresel grafitli dökme demir mikroyapısında küresel grafitlere yakın bölgelerde yüksek oranda bulunur [16].

Manganez: Manganez hücreler arası bölgelerde yoğun şekilde segrege olarak bu bölgelerde karbür oluşumunu teşvik eder ve östemperleme reaksiyonunu geciktirir [19]. Küresel grafitli dökme demir bileşiminde manganez arttıkça, östenitteki karbon çözünürlüğü ve östenitin kararlılığı artar. Östenit dönüşümü esnasında, karbon difüzyonunu azaltır; bu, östeniti zenginleştirmek için gereklidir [28]. Manganez, yapıda önemli miktarda kalıntı östenit kalmasına sebep olur. %0.3 ile sınırlandırılır, çünkü daha fazlası süneklik ve tokluğu düşürür sertleşebilirliği arttırır [16].

Fosfor: Bütün küresel grafitli dökme demirlerin sünekliğini düşürmesinden dolayı istenmez [11].

Molibden: Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler yaygın olarak kullanılan bir alaşım elementidir. Sertleşebilirliği arttıran en etkili elementtir [26]. Özellikle bakır ile bu etkisi güçlüdür. Fakat sertleşebilirliğe katkısı bakırdan on kat daha fazladır. Östemperleme süresini kısaltır. Bu manganez ile molibden arasındaki en önemli farktır. Özellikle kalın kesitli dökümlerde molibden karbürler oluşur. Mevcut bu molibden karbürlerin etkisi, küre sayısının arttırılması ile azaltılabilir [11]. Hücreler arası bölgelerde, tıpkı manganez gibi güçlü segregasyon eğilimine sahiptir. [16]. Mekanik özelliklere etkisi de manganezin etkisi gibidir. Ancak, manganezden farklı olarak, molibden östeniti değil ferriti kararlı yapana bir elementtir [26]. Yüksek molibden seviyelerinde güçlü segregasyon eğiliminden dolayı %0.3 ile sınırlandırılmalıdır. Molibden miktarı arttıkça kalıntı östenitin hacim oranı düşer[25].

Bakır: Alaşım elementi olarak bakır kullanımının en önemli sertleşebilirliği arttırmasıdır. Beynitik dönüşümün II. aşamasını yavaşlatır. Dolayısıyla işlem aralığının daha genişlemesine neden olur. Molibden ile birlikte kullanıldığında, sertleşebilirliğe etkisi ikisinin ayrı ayrı kullanılması durumundaki etkiden daha fazladır [26]. Alt beynit yapısında karbür oluşumunu engellediği bildirilmiştir. Bu yüzden artan bakır miktarı ile kalıntı östenitin hacim oranı artar. Genellikle %1 dolayında kullanılır. Ferritte çözünürlüğün az olmasından dolayı, nadiren %1.5 oranında kullanılır [16,25].

Nikel: Özellikle I. kademede olmak üzere beynitik dönüşüm hızını yavaşlatır. Yüksek nikel oranının, segregasyon etkisine bağlı olarak yapının farklı yerlerinde farklı beynitik dönüşüm hızına sebep olacağı bildirilmiştir. Bu nedenle, nikelin manganez gibi bir elementle birlikte kullanımının segregasyon eğilimini dengeleyeceği ve sonuç olarak homojen bir beynitik dönüşüm elde edilebileceği belirtilmiştir [26]. Östemperleme süresinin arttırır. En önemlisi, tokluğu azaltmaksızın istenen nihai mikroyapı ve özellikleri elde etmek için östemperleme sıcaklığında daha uzun tutma süresine imkan vererek yüksek karbonlu östeniti kararlı kılar. Krom vanadyum gibi çeliklerde sertleşebilirliğe büyük katkılarda olan elementlerin ise, karbür oluşturma eğilimlerinde dolayı döke demirlerde kullanımı yaygın değildir [16].

3.3. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri

3.3.1. Östenitleme Sıcaklığı ve Süresinin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi

Östenitleme sıcaklığının mekanik özelliklere olan etkisi, östemperleme sıcaklığına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Darwish ve Elliott [16] tarafından yapılan çalışmalarda, düşük östemperleme sıcaklıklarında alt beynit meydana geldiği esnada, östenitleme sıcaklığının mukavemet ve süneklik üzerine etkisinin yeterince önemli olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuca benzer şekilde, üst beynit bölgesinde östenitleme sıcaklığının mukavemet özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Ancak, artan östenitleme sıcaklığı ile uzama ve darbe direnci değerleri sürekli azalma göstermiştir. Sertlik de artan östenitleme sıcaklığı ile beraber azalmaktadır.

Hamid ve diğerleri [30] tarafından yapılmış bir diğer çalışmada ise, östenitleme sıcaklığının süneklik üzerindeki etkisi yeterince önemli bulunmamakla beraber, yine de östenitleme sıcaklığında 920°C'den 870°C'ye meydana gelen bir azalmanın, sünekliği arttıracağı ve standartta (ASTM A897M) belirtilmiş olan yüksek sünekliğe sahip östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin üretiminde dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca östenitleme sıcaklığını azaltmanın işlem (proses) aralığının kapanma sıcaklığını arttırdığı ve kapanma noktasını daha erken östemperleme sürelerine çekerek, işlem aralığını da daralttığı yine aynı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.

Östenitleme sıcaklığı östenitin karbon miktarını, östenit tane boyutunu ve matriksin kimyasal homojenliğini etkiler. Bu faktörlerin östemperleme hızı üzerindeki etkisi, östemperlenmiş mikroyapıyı kontrol eder. Örneğin, östenitleme sıcaklığının arttırılması;

- Östemperlenmiş yapıyı iyileştirir. Dolayısıyla beynitik ferrit tabakçıklarının uzunluğu artar, sayıları ve dağılımlarındaki düzgünlük azalır,
- Kalıntı östenitin hacim oranını arttırır,
- İki tip kalıntı östenit yapısının oluşmasına sebep olur. Komşu ferrit tabakçıkları arasında meydana gelen ve düşük östenitleme sıcaklıklarında baskın durumda olan ince bir film şeklindeki östenit yapısı ve farklı yönlerde büyüyen ferrit tarafından çevrelenmiş östenitle birlikte bulunan ve artan östenitleme sıcaklığı ile artan kütlesel şekilli bir östenit yapısı oluşur,
- Hücreler arası bölgelerde ve kütlesel şekilli bölgelerin merkezinde martenzit oluşumunu arttırır.

Östenitleme sıcaklığının bir ısıl işlem parametresi olarak önemi; özellikle yüksek östemperleme sıcaklıkları için; düşük bir östemperleme sıcaklığı seçilmesinin mekanik özellikleri, özellikle süneklik ve darbe enerjisi değerlerinin arttırmasından kaynaklanmaktadır [19].

Östenitleme sıcaklığının artması östenitin karbon bileşimin artmasına ve östemperleme sürecinde reaksiyon hızının yavaşlamasına neden olmaktadır. Ayrıca küresel grafitli dökme demirler yapısındaki ferrit, perlit ve grafit gibi bileşenlerin miktarı da östenitleme süresini etkiler. Perlitik matrikse sahip yarı kararlı bir sistemde (Fe-Fe_3C) östenitleme süresi daha kısadır. Grafit kürelerinin sayısının fazla olması da östenitleme sürecini kısaltmasına rağmen, etkisi perlitik matriks kadar fazla değildir [16].

Luo ve diğerleri [31], küresel grafitli dökme demirlerin abrazif aşınma özellikleri üzerinde yaptıkları bir çalışmada, su verilmiş küresel grafitli dökme demir ve çeliğin aşınma performanslarının yüksek östenit sıcaklıklarında östenitlendiklerinde daha iyi olduğu belirtilmiştir.

3.3.2. Östemperleme Sıcaklığı ve Süresinin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi

Hem östenitleme sıcaklığı, hem östemperleme sıcaklığı hem de östemperleme süresinin östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri üzerinde etkisi vardır. Ancak östenitleme sıcaklığının mekanik özellikler üzerindeki etkisi östemperleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Dolaysı ile, östemperleme sıcaklığı ve süresinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi, östenitleme sıcaklığına göre daha önemli olmaktadır. Önceden seçilmiş östemperleme ve östenitleme sıcaklıkları için mekanik özelliklerin optimum seviyeye getirilebilmesi için östemperleme süresinin doğru seçilmesi gerekir. Benzer şekilde, östemperleme sıcaklığının doğru seçimi de üretile östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin sınıfını belirtmesi açısından önemlidir [19].

Önceden bilindiği üzere, östemperleme ısıl işlemi 250–400°C arasındaki bir sıcaklıkta yapılır. Yaklaşık 330°C' nin altındaki sıcaklıklarda elde edilen yapı alt beynit, 330°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda elde edilen yapı ise üst beynittir. Alt beynit yapısı yüksek mukavemetli sert bir yapı iken, üst beynit yapısı nispeten daha az mukavemetli fakat daha sünek ve daha tok bir yapıdır.

Düşük östemperleme sıcaklıklarında oluşan alt beynit yapısı yüksek mukavemet göstermektedir [16,19]. Pek çok faktör, bu yüksek mukavemet dislokasyon hareketlerinin engelleyerek yardımcı olmaktadır. Bu faktörler şunlardır:

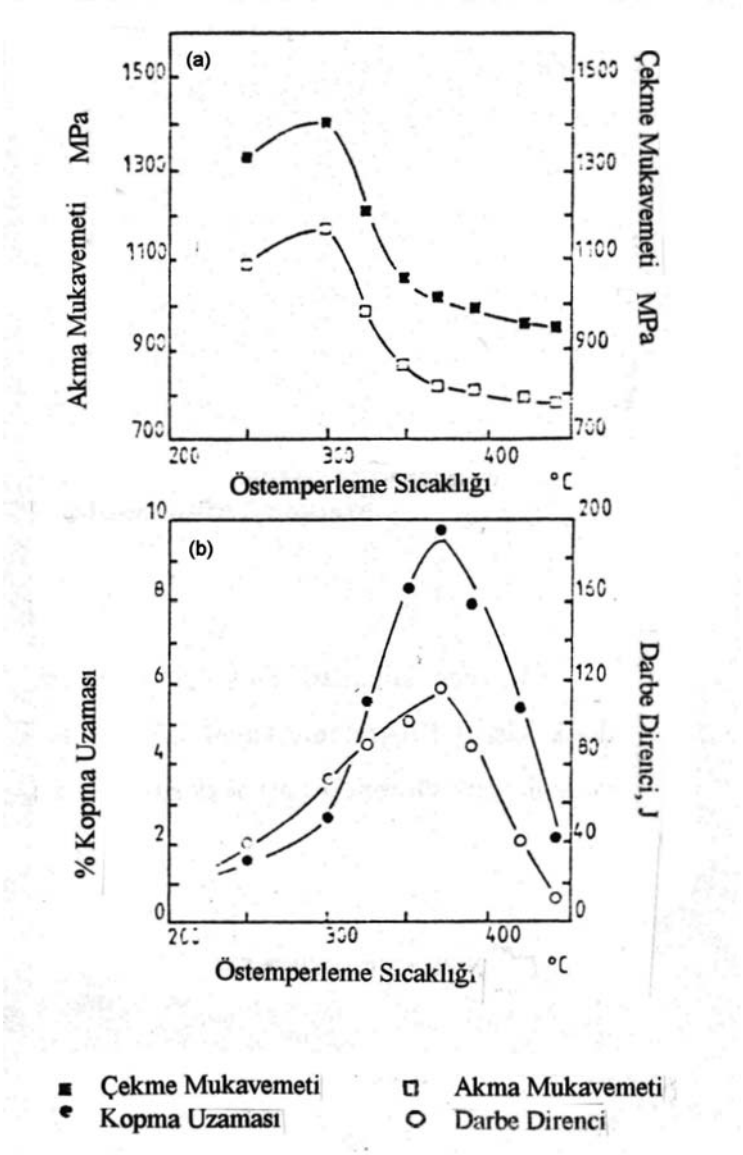
- İnce yapılı ferrit iğnecikleri,
- Ferrit içerisinde çökelen karbürler ve düşük seviyelerde kalıntı östenit,
- Yüksek dislokasyon yoğunluğu ve
- Karbonca aşırı doymuş ferritin kafes distorsiyonudur.

İğne benzeri alt beynit morfolojisi, karbürler, düşük seviyelerdeki kalıntı östenit ve dönüşmemiş östenitten kaynaklanan az miktardaki martenzit, düşük östemperleme sıcaklıklarında görülen düşük sünekliğe sahip olurlar.

Ghaderi ve diğerleri [32], yaptıkları çalışmada, aynı östemperleme ve östenitleme sıcaklığında artan östemperleme süresi ile sertliğin düştüğünü tespit etmişlerdir.

Östemperleme sıcaklığı yükseldikçe (sıcaklık 330–450°C aralığında bir değer ulaştığında), martenzit miktarı azalır ve kalıntı östenit miktarı artar ve alt beynit morfolojisi üst beynit morfolojisine dönüşür. Üst beynit yapısı, kaba, pürüzsüz ve ferritik-östenitik bir yapı olup, alt beynit yapısına göre daha büyük hacim içinde kalıntı östenit ihtiva eder ve azalmış bir mukavemete karşılık artmış bir sünekliğe ve tokluğa sahiptir. Yüksek östemperleme sıcaklıklarında işlem aralığı kapalıyken, süneklik ve tokluk hızlı bir şekilde düşerken mukavemet neredeyse sabit kalır. Yine yüksek östemperleme sıcaklıklarında, I. aşama reaksiyonu için itici güç azalırken II. aşama reaksiyonu için itici güç artar ve sonuçta mukavemette biraz düşme olur. [19,30]. Şekil 3.7'de östemperleme sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi görülmektedir.

Östemperleme süresinin seçimi çok önemli bir parametredir. Östemperleme süresi, belirli östenitleme ve östemperleme sıcaklıkları için mekanik özellikleri optimize etmek amacıyla seçilir. Mekanik özelliklerin östemperleme süresi ile değişimi, östemperlenmiş yapı geliştikçe mevcut fazların miktarı ve doğasındaki gelişmelere bağlıdır. Östemperleme süresinin artmasıyla birlikte mukavemet, süneklik ve darbe direnci artarken sertlik azalır. Kısa östemperleme sürelerinde mekanik özelliklerde görülen düşük değerler, büyük oranda martenzitten kaynaklanır. Bu martenzit östemperleme sıcaklığından oda sıcaklığına soğuma esnasında dönüşmemiş karbonlu östenitten ileri gelir.



Şekil 3.7: Östemperleme sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi [19].

Östemperleme süresi arttıkça martenzit miktarı azalır, anca beynitik ferrit ve yüksek karbonlu östenit miktarları artar. Bu duruma paralel olarak, mekanik özelliklerde bir artış olmasına rağmen bu artış sürekli olmaz. Uzun östemperleme sürelerinde mukavemet neredeyse sabit kalırken süneklik ve darbe direnci değerleri II. aşama reaksiyonunun oluşmasına paralel keskin bir şekilde azalır. II. aşama reaksiyonu ilerledikçe, yapıdaki yüksek karbonlu kalıntı östenit miktarı azalır.

Üst beynit aralığında östemperleme sıcaklığı azaldıkça, ikinci aşama reaksiyonu daha uzun bir östemperle süresi gerektirir ve genelde östemperleme süresine bağlı olarak mekanik özellikleri değişimi daha yavaş gerçekleşir. Genel olarak kırılma tokluğu artan östemperleme sıcaklıklarıyla birlikte darbe direncine benzer şekilde artmaktadır.

Yorulma mukavemeti ile çekme mukavemet arasında östemperleme süresine bağlı olarak bir ilişki görülmemiştir. Yorulma mukavemeti östemperleme sıcaklığına bağlı olarak önemli bir değişiklik göstermemektedir. Diğer taraftan sertliğin yorulma mukavemetini belirlemede en önemli parametre olduğu ve artan sertlikle yorulma mukavemetinin azaldığı vurgulanmıştır. Grafit kürelerinin ortalama çapı azaldıkça, grafit kürelerinin çentik etkisi azalmakta ve yorulma mukavemeti yükselmektedir [16,30].

Bartosiewicz ve diğerleri[16], 288, 330, 379 ve 400°C'de yapılan östemperleme sonrası östenit tane boyutunun 111 μm olduğu, 400 ^{o}C'deki östemperleme işlemiyle yorulma mukavemetinin 417 MPa olarak elde etmektedirler.

Luo ve diğerleri [31], yaptıkları çalışmalarda, küresel grafitli dökme demirlerin yüksek karbonlu çeliğin aşınma dirençlerinin östemperleme sıcaklığındaki bir artış ile artabileceğini bulmuşlardır. Ayrıca, aynı çalışmada küresel grafitli dökme demirlerin matriks yapısından önemli ölçüde etkilenerek ve sahip olduğu tahrip edici özellikteki grafit fazı ile birlikte aşınma direncinin benzer matrikse sahip çeliğin aşınma direncine göre daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Üstelik su verilmiş yapıların östemperlenmiş yapıya göre daha yüksek abrazif dirence sahip olduğu yine araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.

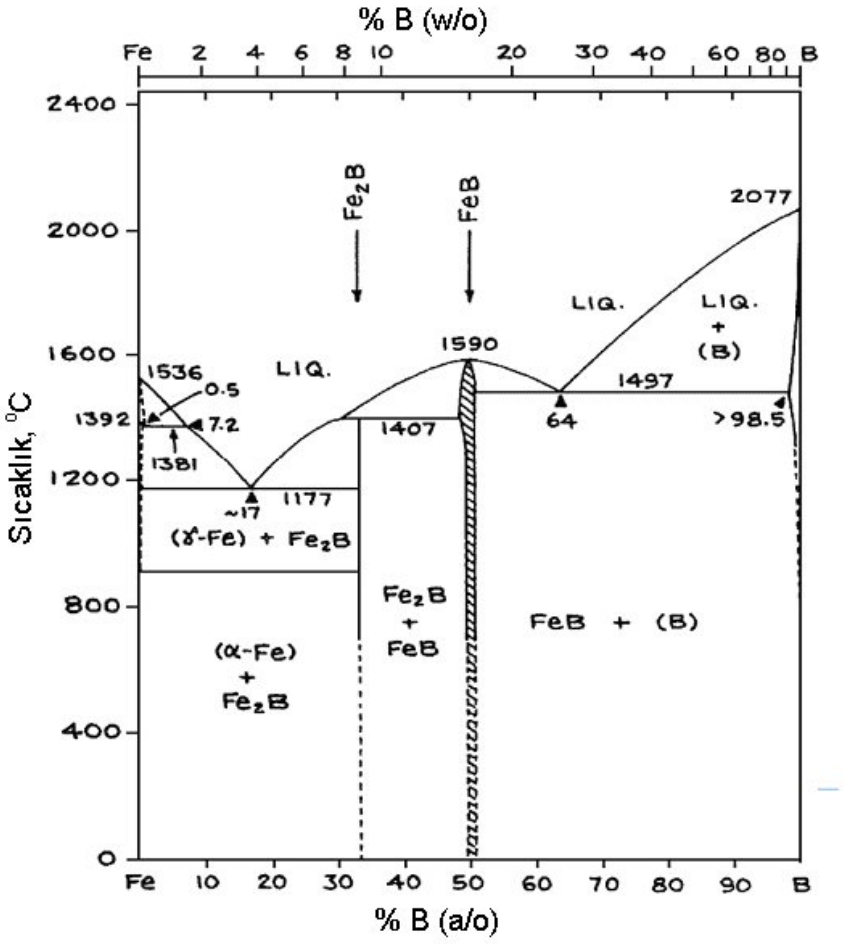
Şahin ve diğerleri [33], yaptıkları çalışmada aynı östemperleme ve östenitleme sıcaklığında fakat farklı zaman sürelerinde yapılan östemperleme işlemi sonucunda daha uzun sürede östemperlenen numunenin daha fazla aşındığını fakat sertliğinin ise östemperleme süresinin artmasıyla birlikte düştüğünü belirtmişlerdir.

Hemanthu [34], yaptığı çalışmada, aynı numune üzerinde ve aynı östenitleme sıcaklığında östemperleme süresinin ve östemperleme sıcaklığının artışıyla beraber aşınma hacminin de arttığını tespit etmiştir.

4. BORLAMA

4.1. Borlama İşleminin Genel Prensipleri ve Özellikleri

Borlama, yüksek bir sıcaklıkta bor atomlarının difüzyonu sonucu ana metal yüzeyinde borür tabakası oluşturmaya dayanan ve karbürleme ve nitrürlemeye gibi difüzyon kontrollü termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Günümüzde çelik gibi Fe-C alaşımlarının dışında, sermetler, demir dışı malzemeler ve seramik malzemelere de uygulanmakla birlikte, kullanım alanı olarak çelikler ilk sırada yer almaktadır. Borlama sonucunda yüzeyde farklı bileşimlerde borür tabakası oluşabilmektedir. Bu farklı tabakaları oluşturan borürlerin özellikleri Şekil 4.1'de verilen Fe-B denge diyagramı yardımıyla incelenebilir.



Şekil 4.1: Fe-B ikili denge diyagramı [46].

Periyodik tablonun IIIA grubunda yer alan borun, atom numarası 5, atom ağırlığı 10.81 g ve atom çapı 0.46Å'dür. Ergime sıcaklığı 2092°C olan bor, rombohedral kristal yapısına sahiptir. [43]. Borun atom çapının demirden %27 daha düşük olması sebebiyle bor, demir içinde çözünerek arayer katı çözelti oluşturmaktadır [44].

Fe-B ikili denge diyagramının α-Fe fazına yakın bölgesi, son 50 yıl içerisinde birçok kez değişikliğe uğramış, fakat yapılan son çalışmalarda, borun α-Fe ve γ-Fe fazları içerisinde %0.5B (a/o) kadar çözündüğü saptanmıştır. Ancak δ-Fe fazı içerisindeki çözünürlüğü tam olarak tespit edilememiştir. Ayrıca ilk çalışmalarda α-Fe ile Fe_2B arasında bir peritektik reaksiyonun varlığından bahsedilirken son çalışmalarda bu reaksiyonun olmadığı görülmüştür. Fe-B ikili denge diyagramında, %7.2 B (a/o) bileşimine kadar 1394°C'de δ-Fe'den γ+sıvıya dönüşen bir metatektik reaksiyon yer almaktadır. Fe-B denge diyagramı incelenecek olursa (Şekil 4.1), yaklaşık olarak %17B bileşiminde ve 1177°C'de, sıvının γ-Fe ile Fe_2B bileşiğine dönüştüğü bir ötektik reaksiyon, %33B bileşiminde Fe_2B bileşiğinin %50 B bileşiminde ise FeB bileşiğinin yer aldığı görülmektedir. Fe_2B fazının ergime sıcaklığı ~1407°C, FeB fazının ergime sıcaklığı ise ~1590°C'dir [44].

Borlama, 800–1000°C sıcaklık aralığında 1–10 saat sürelerde katı, pasta, sıvı veya gaz gibi çeşitli ortamlarda uygulanabilmektedir. Teknolojik gelişmelerle birlikte plazma borlama, akışkan yataklı fırında borlama gibi yeni teknikler de kullanılmaktadır. Ayrıca PVD (fiziksel buhar biriktirme), CVD (kimyasal buhar biriktirme), iyon biriktirme, plazma sprey yöntemleri de borlama amacıyla kullanılan yöntemlerdir [35].

Borlama, metal ve alaşımların yüzeylerinde sertlik, aşınma direnci ve korozyon direncini arttırırken, aynı zamanda bu özellikleri yüksek sıcaklıklarda korumak ve erozyon direncini de arttırmak amacıyla da kullanılmaktadır [36].

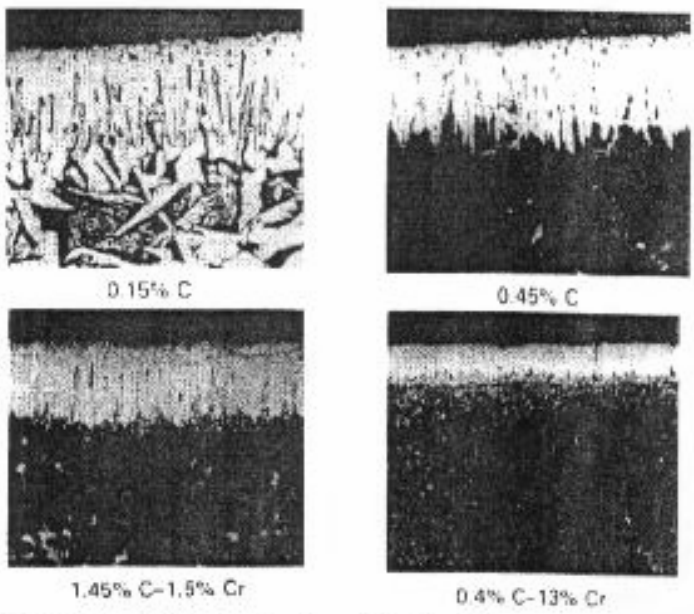
Borlama işlemi sonucunda oluşan borür fazları, borlama ortamının aktif bor konsantrasyonuna bağlı olarak, yüzey çizikleri ve pürüzlülükleri gibi makro hataların, tane sınırları ve dislokasyonlar gibi mikro hataların bulunduğu bölgelerde başlamaktadır. Özellikle düşük aktif bor konsantrasyonunun bulunduğu ortamlarda, bu bölgeler borür fazının oluşabildiği yegâne yerlerdir [37].

Borlama sonucu oluşan borür fazlarının en önemli özelliği yüksek sertlik (1400–1500 HV) ve yüksek ergime sıcaklığına (1400–1600 ^{o}C) sahip olmasıdır. Oluşan bu

sertlik, çelik türü demir esaslı malzemelerde 650°C'ye kadar kalıcıdır. Diğer yüzey sertleştirme işlemleriyle karşılaştırıldığında borlama yoluyla yüzeyde daha sert bir yapı elde edilir [35]. Tablo 4.1'de farklı yüzey işlemleri sonucu elde edilen mikrosertlik değerleri, borlama sonucu elde edilen mikrosertlik değerleriyle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çeliklerde karbon oranına bağlı olarak oluşan borür tabakası morfolojisi ve kalınlıkları ise Şekil 4.2'de verilmiştir.

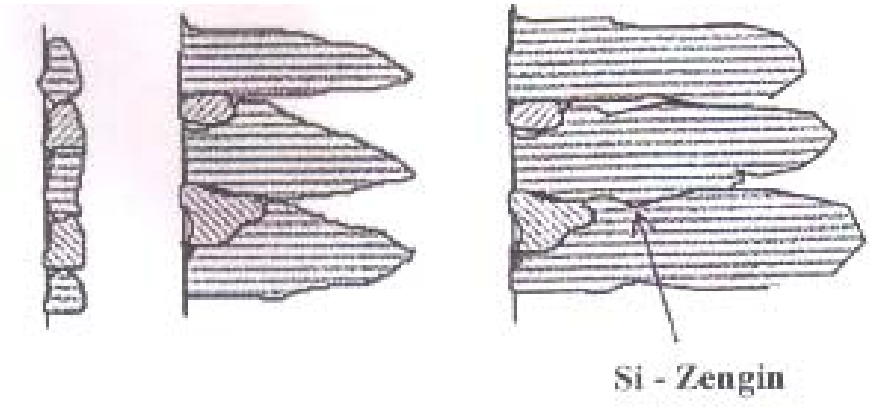
Tablo 4.1: Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması [38].

Malzeme	Mikrosertlik (kg/mm^2 veya HV)
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540–600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 çeliği	630–700
Yüksek hız takım çeliği BM42	900–910
Nitrürlenmiş çelik	650–1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650–950
Sert krom kaplama	1000–1200
Sementit karbürler, WC+Co	1160–1820(30 kg)
Al_2O_3+ZrO_2 seramikler	1483(30 kg)
Al_2O_3+TiC+ZrO_2 seramikler	1730(30 kg)
Sialon seramikler	1768(30 kg)
TiC	3500
SiC	4000
Elmas	10000



Şekil 4.2: Farklı karbon bileşimlerine göre yüzeyde oluşan borür tabakalarının morfolojisi ve kalınlıkları [35].

Fe-B ikili diyagramında artan bor yüzdeleriyle birlikte Fe_2B fazından FeB faz bölgesine geçilmektedir. Şekil 4.3'de konvansiyonel borlama sırasında borür tabakasının oluşum mekanizması şematik olarak verilmiştir.



(a) (b) (c)

Şekil 4.3: Konvansiyonel borlama sırasında borür tabakasının oluşum mekanizması (a) Çekirdeklenme aşaması (b) ve (c) <001> oryantasyonunda büyüme aşaması [39].

Yapılan araştırmalarda, borür tabakasının oluşumu konusunda genel olarak savunulan nokta, işlemin difüzyon kontrollü olmasıdır. Bu sebeple, bazen termokimyasal terimi yerine termodifüzyon kelimesi de kullanılmaktadır. Fakat borlama ile ilgili olarak farklı büyüme mekanizmaları da öne sürülmektedir [39].

Borlama işleminde karakteristik özelliklerin sayısı oldukça azdır. Bunlar arasında en önemlisi borür tabakasının çok yüksek sertlik (1450-2000 HV) ve ergime sıcaklığına sahip olmasıdır. Borür tabakasının yüksek sertlik değeri ve düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahip olması, aşınma direncinin oldukça yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu özellikler, kalıp imalatında ana malzemenin işlenmesi sırasında kolaylık, düşük maliyet ve orijinal yapıya göre mekanik özellikler açısından çok daha üstün özellikler sağlamaktadır. Borür tabakasının bazı avantajları aşağıda verilmektedir;

- Borür tabakasının sertliği yüksek sıcaklıklarda (550^oC-600^oC) korunmaktadır.
- Borlama, özellikle sertleşebilir birçok çelik grubuyla kıyaslanabilir yüzey özelliklerinin elde edilebildiği bir işlemdir.
- Borlanmış yüzeyler çok yüksek sıcaklıklarda (850°C) orta özellikte oksidasyon direncine ve oldukça yüksek ergimiş metal korozyon direncine sahiptir.
- Borlama işlemi yağlayıcı kullanımını azaltmakta, soğuk birleşme eğilimini ve sürtünme katsayısının düşürmektedir [13,36].

Borlama işlemi, birçok avantajın yanında bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir:

- Borlama tekniği, esnek değildir ve gaz ortamında sementasyon ve plazma nitrasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre maliyeti daha yüksektir. Gaz karbürizasyonu ve plazma nitrasyonu daha esnek tekniklerdir. Bu teknikler, daha az işçilik ve daha düşük maliyet gerektirir. Ayrıca, bu işlemlerin kısa sürede ve daha kolay gerçekleşmesi borlamaya göre avantajlar sağlamaktadır. Bu sebeple, yüksek sertlik, dış ortamlara karşı yüksek aşınma direnci ve yüksek korozyon direncinin arzu edildiği durumlarda borlama işlemi tercih edilmektedir.
- Takımlar borlandıktan sonra çoğu zaman bir sertleştirmeye veya temperlemeye tabi tutulmaktadır. Bu işlemlerde, bor tabakasının özelliklerinin korunması için inert atmosfer veya vakum gerekmektedir [13].

4.2. Demir Esaslı Malzemelerin Borlanması

Borlama işlemiyle demir esaslı malzemelerin yüzeylerinin sertleştirilmesi konusunda ilk çalışmalar, Moissan tarafından 1895 yılında yapılmış ve daha sonra devam etmiştir. Hızla gelişme gösteren borlama işlemi günümüzde aşınmaya dirençli yüzey oluşturmak için oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [40].

Endüstriyel olarak borlama işlemi, alüminyum ve silisyum içeren yatak çelikleri haricinde yüzeyi sertleştirilmiş, temperlenmiş, takım ve paslanmaz çelikler gibi yapısal çeliklere, döküm çeliklerine, Armco (ticari saflıkta) demire, gri ve küresel grafitli dökme demirlere, sinterlenmiş demir ve çeliklere uygulanabilmektedir.

Borlama işleminde hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın, karbon çeliklerinde yüzeyde iki çeşit borür fazı oluşabilmektedir. Bunlar en dış yüzeyde FeB fazı, FeB fazı ile matris arasında oluşan Fe_2B fazı şeklindedir [41].

Bejar ve Moreno [42], yaptıkları çalışmada, farklı borlama sıcaklıklarında ve sürelerinde çeliklerin aşınma dayanımlarını mikrosertliklerini ölçmüşlerdir. Bu çalışmaya göre artan borlama sıcaklığı ile bor tabakasının kalınlığı artmıştır. Sertliğin yüzeyden içeriye doğru azaldığı ve FeB fazının daha sert olduğunu saptamışlardır. Ayrıca artan borlama sıcaklığı ile aşınma dayanımının daha da iyileştiğini belirtmişlerdir.

4.2.1. Fe_2B ve FeB Fazlarının Özellikleri

Difüzyon yönüne bağlı olarak, kolonsal yapı sergileyen tek fazlı Fe_2B fazı, çift fazlı FeB+Fe_2B fazına göre daha çok tercih edilmektedir. Gerçekte FeB ve Fe_2B fazları

birbirine basma ve çekme gerilmeleri uygulamakta ve çoğu zaman bu gerilmeler sebebiyle, iki faz arasında çatlaklar oluşmaktadır. Bu etki mekanik zorlamalar altında borür tabakasının tabaka tabaka kalkmasına neden olur. Termal şok veya mekanik etkiler altında ayrılmalar ve tabaka halinde kalkmalar meydana gelmektedir. Bu sebeple, minimum FeB içeriğine sahip kaplama tabakaları elde edilmeye çalışılmaktadır.

Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucunda, Fe_2B fazının hakim olduğu diş yapısında benzer kolonsal bir yapının oluşması da tercih edilmektedir. Çift fazlı FeB+Fe_2B tabakası, vakum veya tuz banyosunda 800 ^oC sıcaklık civarında uzun süre ısıl işleme tabi tutulduğu takdirde, tek fazlı Fe_2B fazı elde edilebilmektedir. Fe_2B ve FeB fazlarının tipik özellikleri Tablo 4.2'de verilmektedir [13].

Tablo 4.2: Fe_2B ve FeB fazlarının tipik özellikleri [13, 44].

Özellik	Fe_2B	FeB
Kristal Yapı	Hacim Merkezli Tetragonal	Ortorombik
Latis Parametresi A^o	a=5.078, c=4.28	a=4.053, b=5.495, c=2.946
Mikrosertlik (GPa)	18–20	19–21
Elastisite Modülü (GPa)	280–295	590
Bor İçeriği (%Ağırlıkça)	8.83	16.23
Yoğunluk (g/cm^3)	7.43	6.75
Termal Genleşme Katsayısı ($ppm/^oC$)	7.65 (200–600°C) 4.25 (100–800°C)	23 (200–600°C)
Ergime Sıcaklığı (^oC)	1389–1410	1540–1657
Termal İletkenlik ($W/m.^oK$)	30.1 (20°C'de)	12.0 (20°C'de)
Elektriksel Direnç (10^{-6} Ω.cm)	38	80
Renk	Gri	Gri

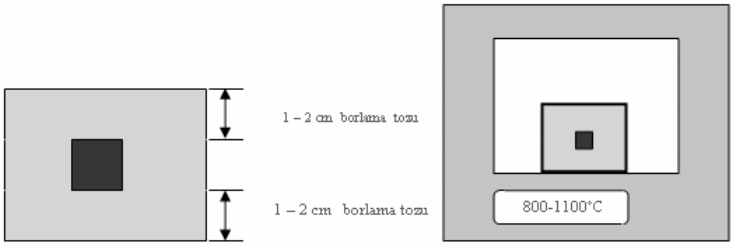
4.3. Borlama Yöntemleri

Borlama işlemi teknolojide birçok yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler, iki ana grupta toplanmaktadır.

a) Termokimyasal yöntemler (kutu borlama, pasta borlama, sıvı borlama ve gaz borlama),
b) Termokimyasal olmayan yöntemler (fiziksel buhar biriktirme (PVD),kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey kaplama vb. yöntemler)Bu teknikler içerisinde en çok kullanılanları, termokimyasal yöntemlerdir. Termokimyasal bor kaplama işlemi sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak bor atomunun metale difüzyonuna dayanan bir kaplama yöntemidir. Termokimyasal bor kaplama yöntemleri dört ana grup altında toplanmaktadır [13].

4.3.1. Kutu Borlama

Borlama ortamı olarak katı maddelerin kullanıldığı yöntemdir. Toz veya granürden oluşan bir karışım ile malzemenin etrafı sarılır. Bu işlem koruyucu atmosfer altında veya sıkı kapatılmış kutularda yapılır (Şekil 4.4). Burada amaç borlama ortamına dışarıdan oksijen akışını kesmektir. İşlem sırasında ısıya dayanıklı malzemeden yapılmış kutular kullanılır. Borlama 800–1000°C sıcaklık aralığında ve 2–10 saat süreyle inert bir atmosferde yapılır. Kutu borlama işlemi, elle kolayca gerçekleştirilmesi, emniyetli olması, faz bileşimlerinin değişiminin çok az olması ve bu yöntemde çok az ekipmana gerek duyulması sebebiyle çok kullanılan bir tekniktir. Proses kutulamayı, ısıtmayı ve temizlemeyi içermektedir. Kaplanacak malzeme 3-5mm kalınlıkta toz karışımı ile çevrelenerek borlama yapılmaktadır. Kutu borlamada, çok farklı borlama bileşenleri kullanılabilmektedir. Bu bileşenler; katı bor sağlayıcılar, akışkan sağlayıcılar ve aktivatörlerdir. Yaygın olarak kullanılan bor sağlayıcılar; bor karbür (B_4C), ferrobor (Fe-B) ve amorf bordur. (B). Ferrobor ve amorf bor çok iyi bor sağlayıcılardır ve kalın borür tabakası oluştururlar, ayrıca, bor karbürden çok daha pahalıdırlar. Katı ortamda bor sağlayıcıların bazı özellikleri Tablo 4.3'de verilmektedir. SiC ve Al_2O_3 reaksiyonda yer almaz ve akışkanlık sağlayarak, dolgu malzemesi olarak kullanılır. Ayrıca SiC, bor miktarını kontrol eder ve borlama ajanlarının kaybını önler. $NaBF_4$, KBF_4,$(NH_4)_3BF_4$, NH_4Cl, Na_2CO_3, BaF_2 ve $Na_2B_4O_7$ borlama aktivatörleri olarak kullanılmaktadır. Bunların haricinde bazı ticari bor sağlayıcılar da borlama amacıyla kullanılmaktadır(Örneğin Ekabor tozu gibi). Amorf bor ve Al_2O_3 ile yapılan borlamalarda tabaka kalınlığı düşük fakat her tarafta homojen olmaktadır. Bor karbür kullanılması durumunda, bor karbürle birlikte kalsiyum klorür, baryum klorür, borik asit ilave edildiği zaman kaplama elde edilememekte, sodyum klorür, HCl, amonyum klorür ve özellikle boraks kullanıldığı zaman kaplama gerçekleştirilebilmektedir [13].



(a) (b)

Şekil 4.4: Kutu borlamanın şematik gösterimi (a) Kutu Hazırlama ve (b) Kutunun fırında ısıtılması [47].

Tablo 4.3: Kutu borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri [40].

İsim	Formül	Molekül Ağırlığı (g)	Teorik Bor Miktarı(%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Amorf Bor	B	10.82	95–97	2050
Ferro-Bor	-	-	17–19	-
Bor Karbür	B_4C	55.29	77.28	2450

Tipik ticari borlama toz karışımlarının bileşimleri aşağıda verilmektedir.

- %5 B_4C, %90 SiC, %5 KBF_4
- %50 B_4C, %45 SiC, %5 KBF_4
- %85 B_4C, %15 Na_2CO_3
- %95B_4C, %5$Na_2B_4O_7$
- %84B_4C, %16$Na_2B_4O_7$
- Amorf bor (%95–97)
- %95 Amorf bor, %5 KBF_4

Kutu borlamada kullanılan pota, borlama işlemi boyunca bor ajanlarının kaybını önlemek için kurşunla kaplanarak tüm malzemeler doldurulduktan sonra ağız kısmı demir curufu veya beton ile kapatılmaktadır. Pota veya kutu, yüksek iç gerilmeler, çatlaklar ve kalkmalara sebebiyet vermemesi ve yeniden toz ilavesiyle (%20–50) borlamaya devam edilebilmesi açısından fırın hacminin %60'ını geçmemelidir [13].

4.3.2. Pasta Borlama

Pasta borlama, kutu borlamanın zor ve pahalı olduğu veya fazla zaman kaybının olduğu durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, %45 B_4C (200–400 mesh tane boyutu) ve %55 kriyolit (Na_3AlF_6 flaks ilaveli) veya geleneksel borlama toz karışımı B_4C+SiC+KBF_4 iyi bir bağlayıcı ajan ile (bütil asetatta çözünmüş nitroselüloz, metil selülozun sulu çözeltisi veya hidrolize edilmiş etil silikat) gerçekleştirilmektedir. Hazırlanan borlayıcı karışım malzemenin yüzeyine püskürtülerek veya spreylenerek 1–2 mm civarında tabaka oluşturulmakta ve kurutulmaktadır. İşlem, demir esaslı malzemelere geleneksel fırınlarda 800–1000°C sıcaklık aralığında 5 saat süreyle uygulanmaktadır. Bu işlemde koruyucu atmosfer olarak argon, NH_3, veya N_2 kullanılmaktadır. 1000°C'de 20 dakika süreyle yapılan pasta borlama işleminde 50 μm kalınlığa ulaşılabilmektedir. Bu yöntem, büyük parçaların veya seçilmiş alanların borlanması için oldukça elverişlidir [13].

4.3.3. Sıvı Borlama

Bileşikleri, aktivatör ve redükleyici maddelerden oluşan erimiş tuza, iş parçasının daldırılması yöntemidir. Daldırma süresi borlama süresidir. Borlama işlemi 900–1100°C sıcaklıkta ve 2–9 saat süre ile yapılır. Bu yöntemin dezavantajı sıcaklıktır. Sıcaklığın 850°C nin altına düşmesi durumunda erimiş boraksın akıcılığı azalacağından borlama imkansız hale gelecektir. Sıvı ortam borlaması sırasında borlanan metal ile redükleyici madde arasında galvanik pil oluşur. Aktif bor oluşumu sırasında metal yüzeyinde katodik bir reaksiyon olurken, redükleyici madde yüzeyinde anodik bir reaksiyon olmaktadır. Bu işlemin oluşması için; borlanacak metal ile redükleyici madde taneleri arasında elektrokimyasal farkın bulunması gerekir. Bu yöntemde borlama banyosu sıvı haldedir. Borlama işlemi 670 – 1000°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. Sıvı ortamda borlama, iki ana grupta toplanır;

a) Elektrolitik sıvı borlama ve
b) Elektrolizle sıvı borlama yöntemleridir.

Bu yöntemlerin birçok dezavantajı vardır; Bunlar,

- Tuz kalıntılarının malzeme üzerinde kalması ve ortamda reaksiyona girmeyen borun varlığı zaman ve para kaybına yol açar.
- Borlama işleminin başarıyla yürütülmesi için banyo viskozitesinin arttırılması gereklidir ve bu sebeple tuz ilavesi yapılmaktadır. Bu da işlemin maliyetini arttırmaktadır.
- İşlem için malzemeyi korozif ortamlardan koruyacak fırınlara ihtiyaç vardır [13].

4.3.4. Gaz Borlama

BCl_3, H_2 ve N_2 gaz karışımı atmosferinde yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen borlama prosesidir.

Borür tabakasının morfolojisi demir esaslı malzemeler için;

a) Dış tabakalarda ortorombik FeB fazı
b) İç tabakalarda hacim merkezli tetragonal Fe_2B fazı teşekkül eder.

Alaşımlı çelik malzemelerde alaşım elementleri borür oluşumunu inhibe eder ve alaşım miktarıyla birlikte oluşan FeB oranı artar. Paslanmaz çelikler borlama işlemleri için nispeten daha az elverişlidir.

Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri Tablo 4.4'te verilmektedir.

Tablo 4.4: Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri [40].

Gazlar	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı, g	Teorik Bor Miktarı, %	Donma Noktası, °C
Bor Tri Florid	BF_3	67.82	15.95	—128.8
Bor Tri Klorid	BCl_3	117.9	9.23	—107.3
Bor Tri Bromit	BBr_3	250.57	4.32	—46
Di-Boran	B_2O_3	26.69	39.08	—165.5
Bor Tri Metil	$(CH_3)_3B$	55.92	19.35	—161.5
Bor Tri Etil	$(C_2H_5)_3B$	98.01	11.04	—94.0

4.4. Bor Kaplamaların Aşınma Özellikleri

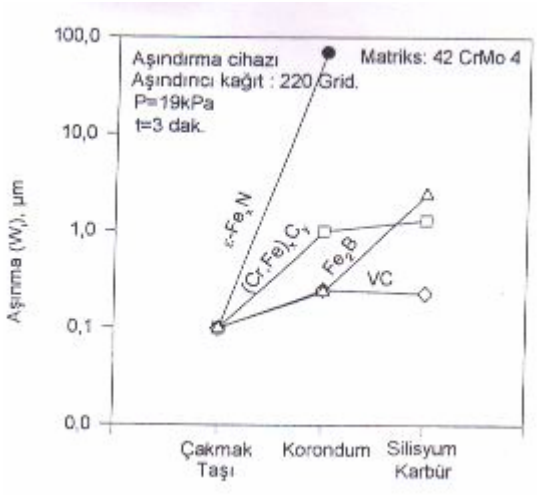
Bor kaplamalar, oldukça sert kaplamalardır ve yüksek aşınma direncine ihtiyaç duyulan yerlerde, yani tribolojik uygulamalarda kullanılmaktadır. Tribolojik uygulamalara en çok kullanılan bor kaplamalar, demir borür ve titanyum diborür kaplamalardır. Demir borür kaplamalar, çok yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı sağlayan özelliklerinden dolayı fren sistemlerinde kullanılabilmektedirler.

Borlanmış çelikler üzerinde birçok aşınma deneyinin yapıldığı belirtilirken, dökme demirlerin borlanması ve aşınma karakteristikleri hakkında yapılan çalışmalar sınırlı kalmaktadır.

Eyre [45], bazı çelikleri karbürleme ve borlama, gri dökme demiri ise borlama işlemine tabi tutarak, bu malzemelerin aşınma davranışlarını incelemiştir. Normalize edilmiş EN8 malzemesinin 8.5 kg yük altında 1800 m kayma mesafesinde yapılan aşınma deneyinde, metalik aşınmanın meydana geldiğini ve borlanmamış EN8 malzemenin aşınma miktarının ihmal edilebilir seviyede olduğunu tespit etmiştir.

AISI 4140, AISI D21 VE AISI M2 çelikleri üzerinde yapılan çalışmalarda termokimyasal yöntem kullanılarak maksimum 20–30 μm, ancak demir esaslı malzemelerin bor kaplanmasında oldukça yüksek tabaka kalınlığı elde edilebildiğini ve abrasif aşınma deneylerinde, kaplamaların sertliğine bağlı olarak aşındırıcı malzemenin sertliğinin yüksek olması durumunda aşınmanın da o derece yüksek olacağını söylemektedir. Termokimyasal olarak yapılan ε-Fe_xN, $(Cr,Fe)_xC_y$, Fe_2B ve VC kaplamaların aşınma davranışları Şekil 4.5'de verilmektedir. Şekilde bor kaplamalar (Fe_2B), ε-Fe_xN, $(Cr,Fe)_xC_y$ kaplamalar göre flint ve krondum karşısında çok daha yüksek aşınma direncine sahip iken, silisyum karbüre karşı yapılan

deneylerde belirgin bir şekilde aşınmaktadır. Bu kaplamalar arasında en iyi sonucu VC sergilemektedir. CVD, PVD ve termokimyasal yöntemlerle oluşturulan VC ve Fe_2B kaplamaların çok iyi abrasif aşınma direncine sahip olduğunu da belirtmektedir.



Şekil 4.5: Termokimyasal yöntemlerle kaplanmış çeliklerin abrasif aşınma davranışları [45].

Allaoui ve diğerleri [46], borlama işlemini tuz banyosunda yapmışlardır ve aşınma deneylerinde pin on disk yöntemini kullanmışlardır. Yaptıkları aşınma deneyleri sonucunda aşınma dayanımının bor tabakasının mikroyapısına bağlı olarak değiştiği sonucuna varmışlardır. Aşınma deney sonuçlarında sürtünme katsayısının 0,15'ten 0,65'e kadar değiştiğini belirtmişlerdir. En iyi şartın ise boraks-SiC banyosunda tek fazlı bor tabakası oluşturularak elde edildiği sonucuna varmışlardır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Deneysel Malzeme

Deneysel çalışmalarda, kimyasal bileşim aralığı Tablo 5.1'de verilen GGG 40 kalite küresel grafitli dökme demir kullanılmıştır. Üretici Aral Döküm firmasınca 600 x 700 x 80 mm ebatlarındaki bloklar halinde dökülen malzemeler, deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere kesilerek 32x20x5 mm ebatlarında numuneler haline getirilmiştir.

Tablo 5.1: Bu tez çalışmasında kullanılan GGG 40 kalite küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimi [11].

Kimyasal bileşim, % ağ.								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Sn	Mg
3.86	1.42	0.076	0.038	0.010	0.03	0.02	0.0003	0.063

5.2. Mikroyapısal Karakterizasyon

Mikroyapısal karakterizasyon çalışmaları, Leica marka optik mikroskop kullanılarak yapılmıştır. Bu amaçla, uygun boyutlarda kesildikten sonra soğuk yöntemle kalıplanan numuneler, sırasıyla 120-1200 meş boyutundaki zımparalar ile zımparalanmış, % 99.98'lik Al_2O_3 ve 1 μm boyutundaki elmas pasta ile parlatılmış ve % 2 Nital ile dağlanarak optik mikroskop incelemelerine hazır hale getirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri, Leica marka optik mikroskopla yapılmıştır.

5.3. Malzemeye Uygulanan Isıl İşlemler ve Yüzey İşlemleri

Bu tez çalışmasında, numunelere, östemperleme, borlama, borlama + östemperleme olmak üzere üç farklı işlem uygulanmıştır. İzleyen bölümlerde her bir işlemin uygulanışı detaylı olarak anlatılmaktadır.

5.3.1. Östemperleme Isıl İşlemi

Östemperleme, iki aşamada uygulanan bir ısıl işlem sürecidir. İşlemin birinci aşamasında, östenitlenen numuneler, ikinci aşamada izotermal olarak tavlanarak östemperlenir. Bu amaçla numuneler, 900°C'de 90 dakika süreyle östenitlendikten

sonra, östemperleme için hızlıca, sabit sıcaklıktaki bir tuz banyosuna aktarılmış, bu sıcaklıkta 5, 10, 20, 40, 80, 160, 320 ve 640 dakika süreyle tutulmuş, daha sonra çıkarılıp havada soğutularak östemperleme işlemi tamamlanmıştır. Östenitleme işlemi Nabertherm marka PID sıcaklık kontrollü bir elektrik dirençli fırında gerçekleştirilmiş, işlem sırasında malzemeler, yüzeylerinden karbon kaybını önlemek amacıyla grafit tozuna gömülmüştür. Östemperleme işlemi, 250, 300, 350 ve 400°C olmak üzere 4 farklı sıcaklıkta yapılmıştır. Tuz banyosu, Nabertherm marka dikey bir fırın içerisine paslanmaz çelik bir pota yerleştirilmiş ve pota içerisine AS135 olarak bilinen ticari ısıl işlem tuzu konularak oluşturulmuştur. Tuz banyosunun sıcaklığı, östemperleme sırasında Ni-NiCr bir termokupl ile sürekli olarak kontrol edilmiştir.

5.3.2. Borlama İşlemi

Borlama işleminden önce, yüzeyleri 1200 meş zımpara seviyesine kadar zımparalanarak temizlenmiştir. Çelik kutular içerisine konulan ticari Ekabor 3 tozu içerisine gömülen numuneler, bu şekilde 900°C sıcaklıktaki fırına konulmuş ve bu sıcaklıkta 90 dakika bekletildikten sonra, çıkarılarak havada soğutulmuştur.

5.3.3. Borlama ve Östemperleme İşlemi

Deneysel çalışmalar kapsamında seçilen bazı numuneler, borlama işlemini takiben, havada soğutmak yerine sabit sıcaklıktaki tuz banyosuna aktarılarak östemperlenmiştir. Bu amaçla seçilen borlama sıcaklığı ve süresi, 900°C ve 90 dakikadır. Östemperleme sıcaklık ve süresi ise, ileride detayları verilecek olan, östemperlenmiş numunelerin sertlik ve aşınma deneyi sonuçlarına göre, 250°C'de 320 dakika, 300°C'de 80 dakika, 350°C'de 10 dakika ve 400°C'de 640 dakika olarak belirlenmiştir. Uygun borlama ve östemperleme sıcaklık ve süresi seçildikten sonra numuneler, borlama işlemindeki gibi çelik kutuda Ekabor 3 tozu içerisine gömülerek 900°C'de 90 dakika borlanmıştır. Fırından alınan numuneler hızlıca tuz banyosuna aktarılmış, öngörülen sıcaklık ve sürelerde östemperlendikten sonra, havada soğutulmuştur.

5.4. Mekanik Deneyler

İncelenen numunelerin mekanik özellikleri, detayları aşağıda açıklanan sertlik, mikrosertlik ve aşınma deneyleri ile belirlenmiştir.

5.4.1. Makro Sertlik Deneyleri

Makro sertlik ölçümleri, Indentec marka sertlik cihazında Rockwell C deneyi esaslarına (150 kg yük, konik elmas batıcı uç) uygun olarak yapılmıştır. Her numune üzerinde 4 ölçüm alınmış ve bunların aritmatik ortalamaları, numunenin sertlik değeri olarak ifade edilmiştir.

5.4.2. Mikro Sertlik Deneyleri

Mikrosertlik deneyleri, temelde iki amaç için yapılmıştır: Birincisi, numunelerin matriksinin mikrosertlik değerini belirleyerek, makro sertlik değeriyle karşılaştırma olanağı elde etmek, ikincisi, borlama ve borlama + östemperleme işlemleri sonucu, yüzeyden itibaren sertlik değişimini belirlemektir. Mikrosertlik deneyleri, Shimadzu HMV-2 modeli mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak 0.5 kg yük altında 30 saniye bekleme süresi koşullarında yapılmıştır. Her numune üzerinden dört ölçüm alınmış ve aritmetik ortalamaları numunenin mikrosertlik değeri olarak ifade edilmiştir.

Borlama ve borlama + östemperleme uygulanan numunelerde, bor tabakasından matrikse doğru mikrosertlik dağılımları CSM marka mikrosertlik cihazında vickers batıcı uç ve 0.15 kg yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

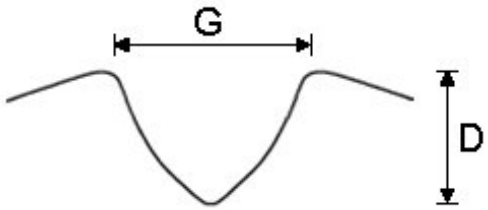
5.4.3. Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri, Şekil 5.1'de görülen karşıt hareketli aşınma cihazında ve kuru ortamda gerçekleştirilmiştir. Karşı hareketli aşınma deneylerinde, aşındırıcı bir bilya, düz bir yüzey üzerinde (numune), yatay eksende ve belirli bir genlikte sağa ve sola periyodik olarak hareket etmektedir. Deneylerde aşındırıcı bilya olarak 10 mm çapında Al_2O_3 bilya kullanılmış, deneyler, 10 mm genlik (aşınma izinin uzunluğu), 0.023 m/s aşınma hızında, 500 g yük altında ve toplam kayma mesafesi 50 m olacak şekilde yapılmıştır. Aşınma deneyleri sırasında ortamın bağıl nemi %40 ±5 ve ortam sıcaklığı 20°C±2 aralığında kontrol edilmiş, ayrıca deneyler sırasında sürtünme kuvveti kaydedilerek, kararlı hal sürtünme katsayısı hesaplanmıştır.



Şekil 5.1: Karşıt hareketli aşınma deney cihazı.

Numunelerin aşınma direncini belirlemek amacıyla, deney sırasında yüzeyde oluşan aşınma izinin (Şekil 5.2) derinliği ve genişliği Veeco Dektak 6M modeli yüzey profilometresi yardımıyla belirlenmiş ve Eşitlik 5.1 ile aşınma hacmi hesaplanmıştır. İz derinliği ve genişliğinin ölçülmesinde Yüzey Profilometresi kullanılmıştır.



Şekil 5.2: Aşınma izinin derinliği ve genişliğinin şematik olarak gösterimi.

$$V = \frac{\pi}{4} L.W.D \quad \text{.....} \quad \textbf{(5.1)}$$

V : Aşınma hacmi
L : Aşınma izinin uzunluğu (10 mm)
W : Aşınma izinin genişliği
D : Aşınma izinin derinliği olarak tanımlanmıştır.

5.4.4. Korozyon Deneyleri

Korozyon deneyleri, numuneleri 1M HNO_3 çözeltisine daldırarak, belirli aralıklarla ağırlık kayıplarının ölçülmesi esasına göre yapılmıştır. Döküm hali, östemperlenmiş, borlama uygulanmış, borlama+östemperleme uygulanmış numuneler farklı kaplardaki çözeltilerde toplam 4 gün süreyle tutulmuş ve 24 saat arayla, numunelerin ağırlıkları ölçülmüştür. Ağırlık ölçümünden önce saf suyla yıkanıp kurutulmuş, ağırlık ölçümünden sonra, aynı çözeltiye daldırılarak deneylere devam edilmiştir.

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

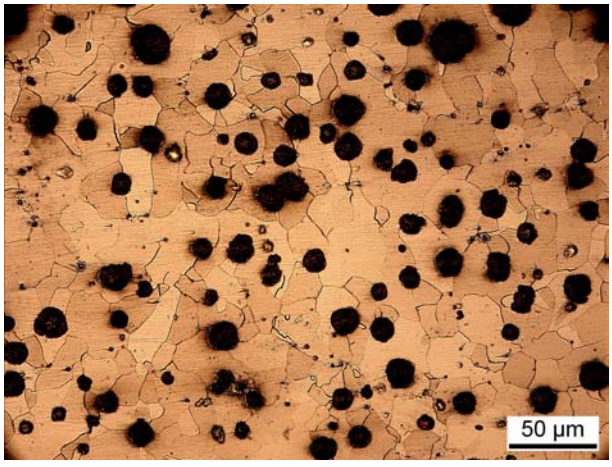
Bu tez çalışması kapsamında kimyasal bileşimi Tablo 5.1'de verilen GGG 40 kalite küresel grafitli dökme demir numunelere uygulanan östemperleme, borlama, borlama +östemperleme işlemleri sonrası yapılan mikroyapı incelemeleri, sertlik, mikrosertlik ve aşınma deneyleri ile, korozyon deneylerinin sonuçları izleyen bölümlerde verilmiştir.

6.1. Mikroyapı İncelemeleri

Bu çalışmada kullanılan GGG 40 kalite küresel grafitli dökme demirin döküm halindeki mikroyapısı Şekil 6.1'de verilmiştir. Şekil 6.1'den görüldüğü gibi döküm halindeki küresel grafitli dökme demirin mikroyapısı, ferritik bir matriks ve küresel morfolojide grafitlerden oluşmaktadır. Döküm halindeki numunenin kanitatif metalografi sonuçları Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1: Bu çalışmada kullanılan GGG 40 kalite küresel grafitli dökme demirin mikroyapısal özellikleri.

Küre Sayısı $1/mm^2$	Küresellik, %	Küre Alanı, %
140	85	6.21



Şekil 6.1: Döküm halindeki GGG 40 kalite küresel grafitli dökme demirin döküm halindeki mikroyapısı.

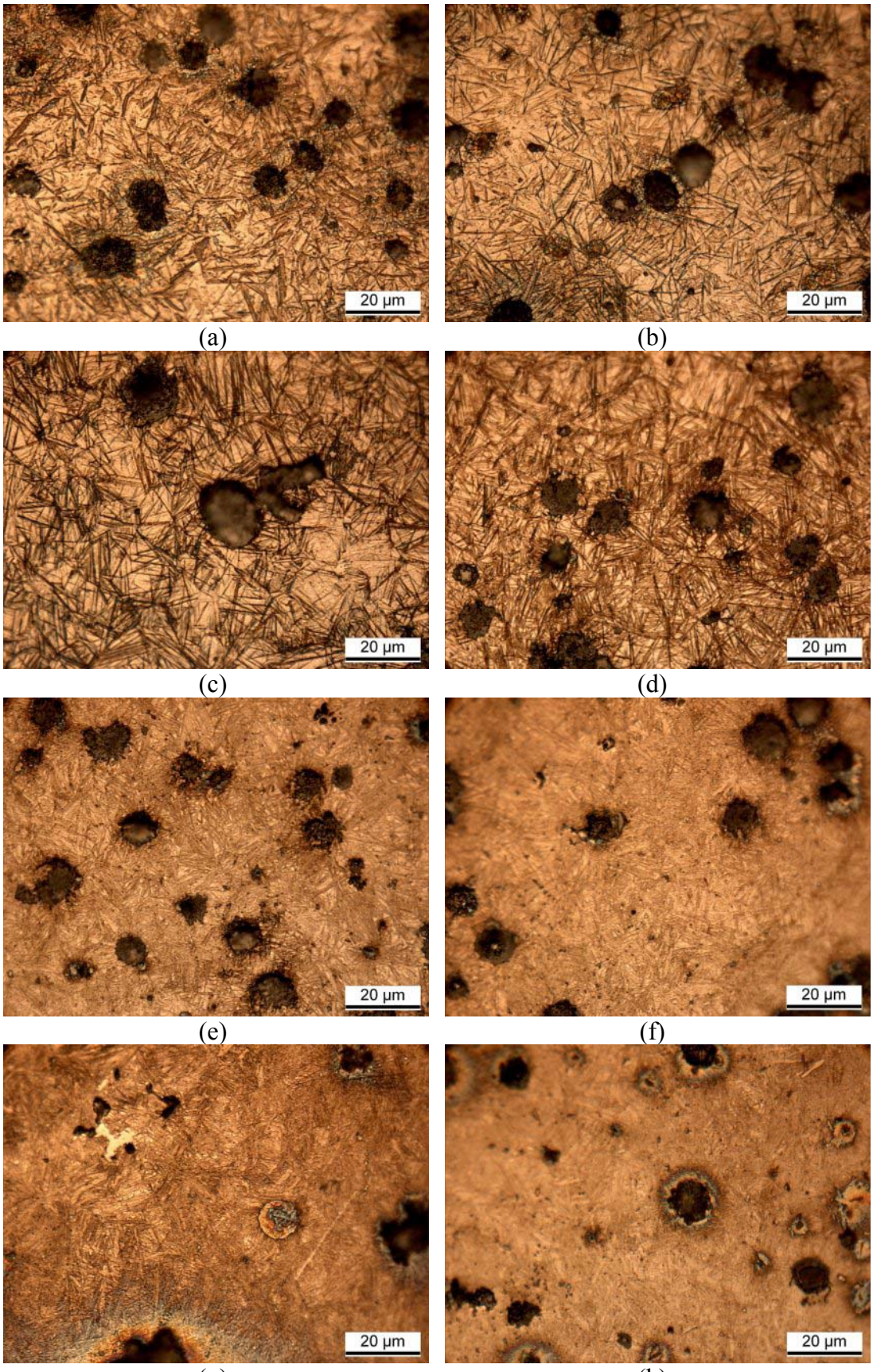
Östemperleme süresinin ve sıcaklığının mekanik özellikler üzerinde etkisini belirlemek amacıyla, küresel grafitli dökme demir numuneler, 900°C'de 90 dakika östenitlendikten sonra, 250, 300, 350 ve 400^{o}C sıcaklıkta, 5, 10, 20, 40, 80, 160, 320 ve 640 dakika sürelerde östemperlenmiştir. Şekil 6.2-6.5'de, farklı sıcaklıklarında östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları görülmektedir.

Östemperleme sonucu elde edilen mikroyapıların, genel olarak iğnesel morfolojide beynitik ferrit, kalıntı östenit (açık renk bölgeler) ve küresel grafitlerden ibaret olduğu görülmekte, söz konusu fazların morfoloji ve dağılımı, östemperleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, 250 ve 300°C'lerde nispeten ince ve iğnesel görünümdeki beynitik ferrit, 350 ve 400°C'lerde daha kaba ve tüylü bir görünümdedir.

Putatunda ve diğerleri [48], yaptıkları çalışmada, östemperlenmiş mikroyapının koyu renk iğnesel ferrit ve parlak kalıntı östenitten oluştuğunu ve grafit kürelerinin kalıntı östenit içerisinde dağılmış olduklarını gözlemlemişlerdir. Östemperleme sıcaklığının artmasıyla birlikte östenitin ve ferritin sürekli olarak kalınlaştığını fark etmişlerdir. Düşük östemperleme sıcaklıklarında ise ince ferrit ve östenitin varlığını tespit etmişlerdir. Diğer yandan yüksek östemperleme sıcaklıklarında kaba ve tüylü (feathery) ferrit yapısıyla karşılaşmışlardır. Östemperleme sıcaklığının artmasıyla ferritin hacim yüzdesi düşmekte ve buna bağlı olarak kalıntı östenitin hacim yüzdesi artmaktadır. Östemperleme sıcaklığının artmasıyla birlikte östenitin karbon yüzdesi de artmaktadır. Östemperleme sırasında ferrit iğneleri östenitin dışında çekirdekleşmeye başlamışlardır.

Çakır ve diğerleri [49], yaptıkları çalışmada kalıntı östenit yüzdesinin östemperleme zamanının azalmasıyla birlikte arttığını gözlemlemişlerdir. Öte yandan östemperleme sıcaklığının artmasıyla birlikte kalıntı östenit yüzdesi artmıştır.

Eric ve diğerleri [50], yaptıkları çalışmada, uzun östemperleme sürelerinde kalıntı östenitin yüzdesinin azaldığını ve iğnesel beynitik ferritin daha baskın olduğunu gözlemlemişlerdir. 3 saat östemperleme süresinden sonra iğnesel beynitik ferritte ve blok halindeki kalıntı östenitte artış olmuştur. Fakat 6 saat östemperleme süresinden sonra az miktarlarda kalıntı östenit, kaba beynit (üst beynit görünümlü) ve iğnesel ferritin bir arada bulunduğunu gözlemlemişlerdir.



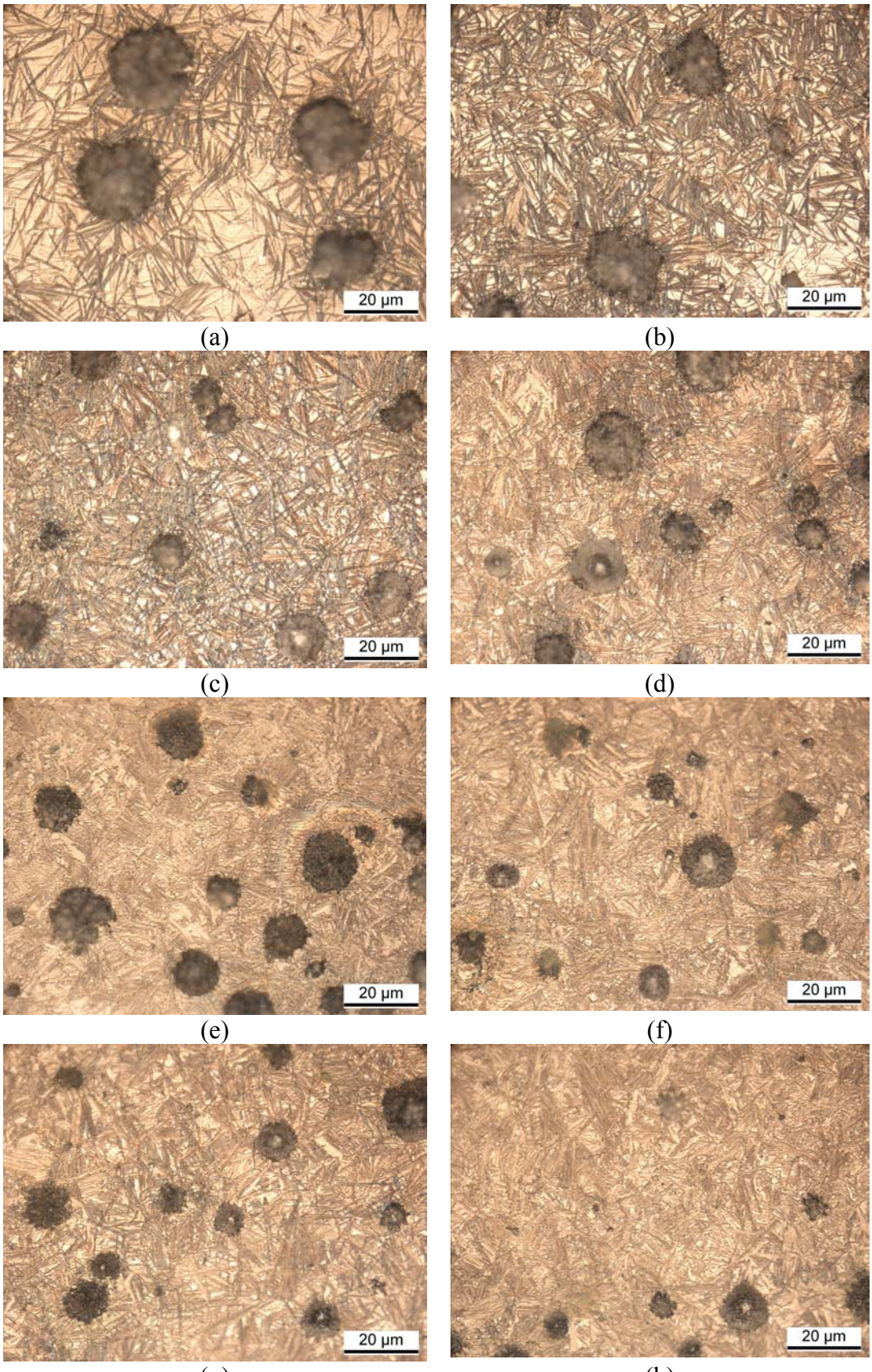
(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

(g) (h)

Şekil 6.2: 250°C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.
(a) 5 dk, (b) 10 dk (c) 20 dk, (d) 40 dk (e) 80 dk, (f) 160 dk (g) 320 dk, (h) 640 dk



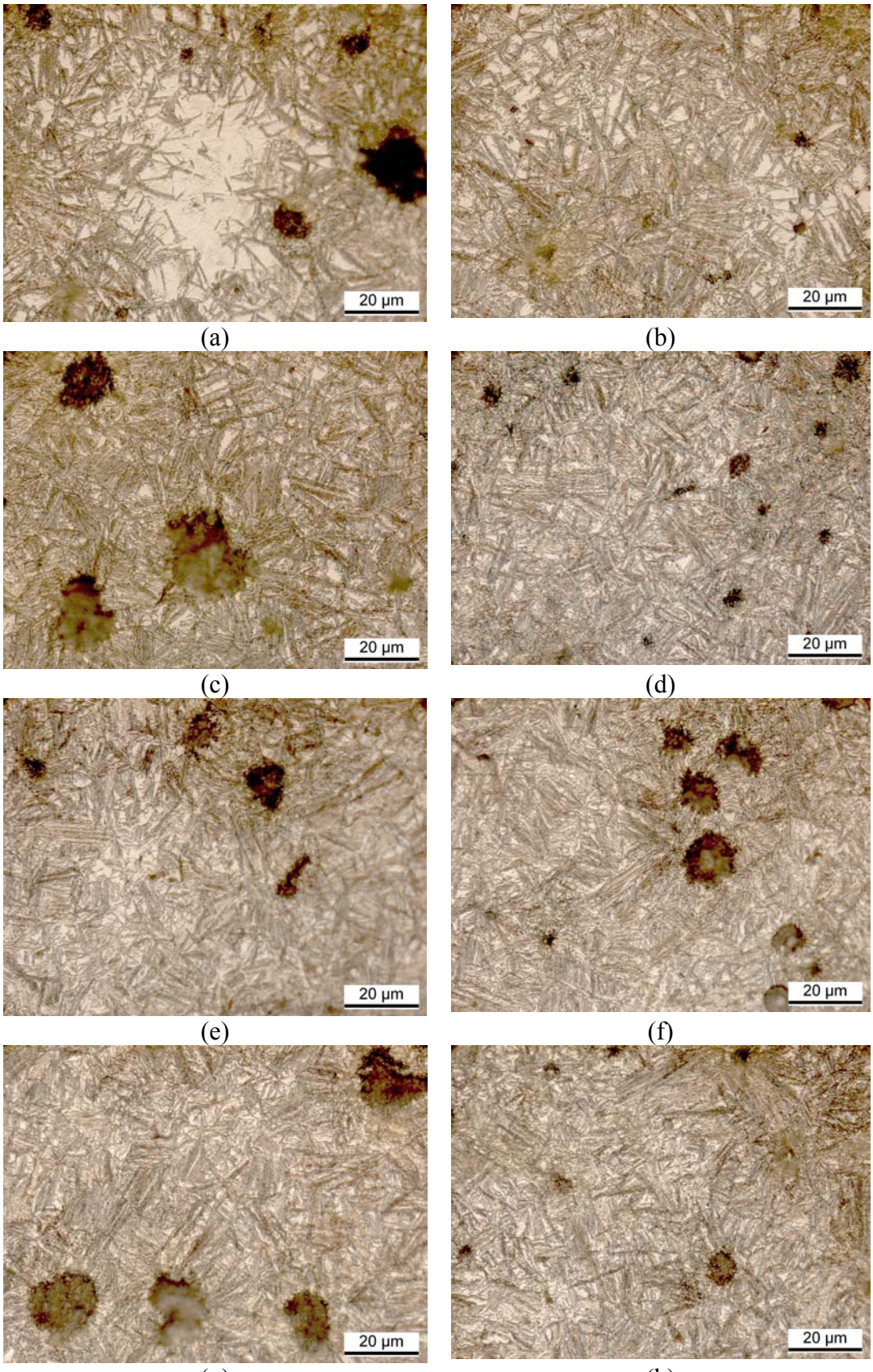
Şekil 6.3: 300°C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.
(a) 5 dk, (b) 10 dk (c) 20 dk, (d) 40 dk (e) 80 dk, (f) 160 dk (g) 320 dk, (h) 640 dk

Çetin ve Gül [51], yaptıkları çalışmada, 250–400°C aralığına 1.88°C/dak. hızda soğutulan döküm halindeki ferritik ve perlitik küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısı iğnesel ferrit morfolojisine sahipken, 400°C'de östemperlenen numunelerde iğnesel ferrit kabalaşmakta ve kenar kalınlığı arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca hücrelerarası bölgede reaksiyona girmeyen bölgeler görülmüş olup, bu bölgeler, blok halindeki kalıntı östenit bölgeleri olarak tanımlanmıştır. Yüksek östemperleme sıcaklığında (400°C) östenit daha az aşırı soğumaya uğrar ve bunun sonucunda, ferrit iğnelerinin çekirdeklenme hızı düşer, ferrit hacim oranı azalır ve matriks içerisinde kalıntı östenit hacim oranı artar. Yüksek sıcaklıklarda östemperleme prosesi sonucu kalıntı östenit hacim oranı maksimum ~% 40'a kadar çıkabilmektedir. Üst östemperleme sıcaklığında karbonun difüzyon hızı çok yüksektir ve buna bağlı olarak da ferrit iğnelerinin büyüme hızı oldukça yüksektir.

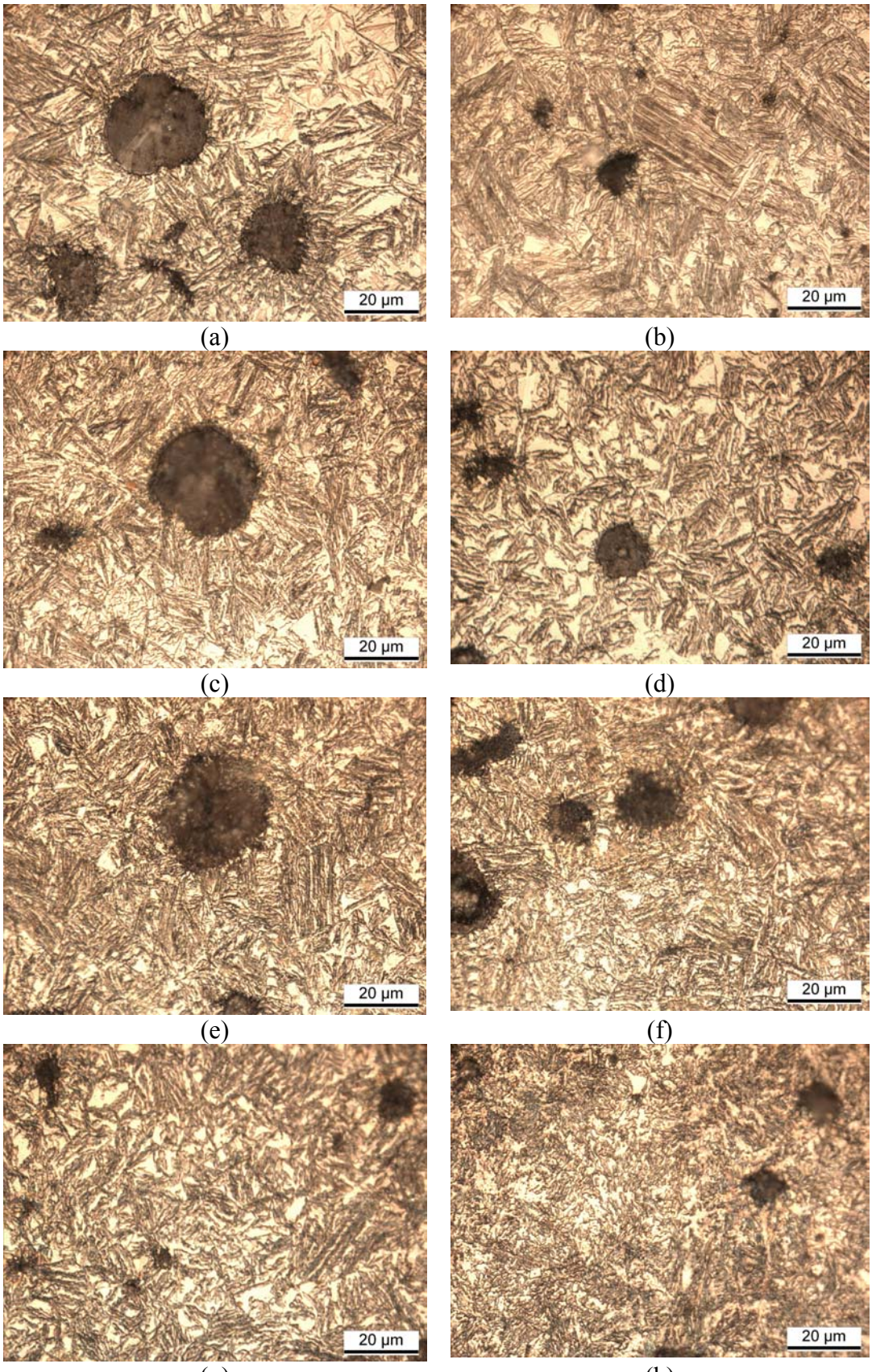
250 ve 300°C sıcaklıklarda uygulanan östemperleme işlemi ile matriksin alt beynitik yapı kazandığı ve ferrit iğnelerinin grafit küreleri etrafında çekirdekleşmeye başladıkları ve sonuçta, ötektik hücre sınırlarında bir miktar dönüşmemiş östenitin kaldığı anlaşılmaktadır [16]. Bu sıcaklılarda yapılan östemperleme işlemiyle birlikte beynit iğnesel görünümdedir. Sürenin artmasıyla birlikte yapıdaki beynit fazı artmakta ve kalıntı östenit miktarı düşmektedir. Kısa östemperleme sürelerinde östenitin tamamı beynite dönüşmek için yeteri kadar vakit bulamadığından, yapıda bir miktar kalıntı östenit kalmaktadır.

350 ve 400°C sıcaklıklarda uygulanan östemperleme işlemi ile de matriksin üst beynitik yapı kazandığı ve ferrit iğnelerinin daha kaba olduğu görülmektedir. Her sıcaklık için yapıda beynit iğnelerinin artan süre ile daha çok sıklaştığı görülmektedir.

Borlama işlemi uygulanan numunelerin kesitinin parlatılmış haldeki optik mikroskop fotoğrafları Şekil 6.6'da verilmiştir. 900°C'de 90 dakika süreyle yapılan borlama işlemiyle yüzeyde yaklaşık 30 μm kalınlığında bir borür tabakası oluşmuştur. Literatürde, oluşan borür tabakasının FeB ve Fe_2B olmak üzere iki fazdan meydana geldiği ve dış yüzeyde FeB fazının, bunun hemen altında ise Fe_2B fazının bulunduğu, Fe_2B fazı ile matriks arasında ise bir geçiş bölgesinin varlığı belirtilmektedir [38].



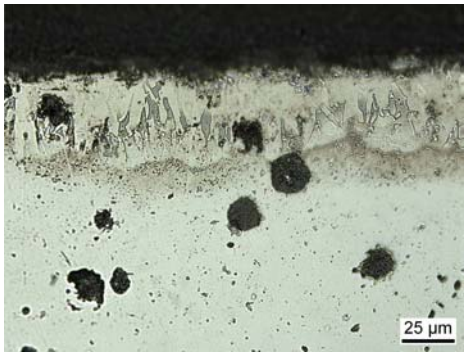
Şekil 6.4: 350°C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.
(a) 5 dk, (b) 10 dk (c) 20 dk, (d) 40 dk (e) 80 dk, (f) 160 dk (g) 320 dk, (h) 640 dk



Şekil 6.5: 400°C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.
(a) 5 dk, (b) 10 dk (c) 20 dk, (d) 40 dk (e) 80 dk, (f) 160 dk (g) 320 dk, (h) 640 dk

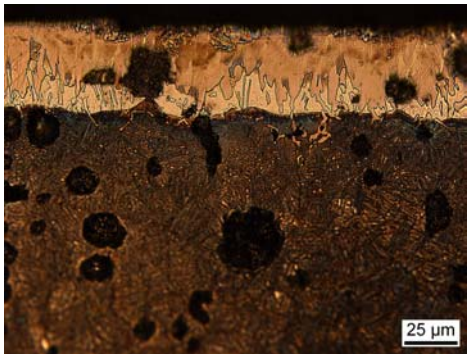
Özbek ve diğerleri [52], AISI 316L paslanmaz çeliğe farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde borlama uygulayarak farklı kalınlıklarda borür tabakası elde etmişlerdir. Çeliğin yüzeyinde oluşan borür tabakasında 3 farklı bölge gözlemlemişlerdir. 1. bölge borür fazlarını içeren bölge (Fe_2B, CrB, Ni_3B), 2. bölge demir ile bor katı çözelti bölgesi, 3. bölge ise bordan etkilenmeyen bölgedir.

Uslu ve diğerleri [53]yaptıkları çalışmada, yüzeyde FeB ve Fe_2B fazlarını elde etmişleridir. En dış yüzeyde FeB, matriks ile FeB fazı arasında Fe_2B fazı ve matriksten oluştuğunu görmüşlerdir.



Şekil 6.6: 900 ^{o}C'de 90 dk borlanmış numunenin parlatılmış haldeki mikroyapısı.

Farklı numunelere, östemperleme ve borlama uygulandıktan sonra bu iki işlem aynı anda uygulanmıştır. Bu amaçla borlama sıcaklığı (aynı zamanda östenitleme sıcaklığı), daha önce östemperleme işlemleri için de kullanılan 900°C'de 90 dakikadır. Östemperleme sıcaklığı ise, östemperlenmiş numunelerin aşınma deneyi sonuçlarına göre, her bir sıcaklık için en iyi aşınma direnci veren koşul olarak belirlenmiştir. Şekil 6.7'da örnek olarak 900°C'de 90 dakika borlama uygulandıktan (östenitleme yapıldıktan) sonra 300°C'de 80 dakika süreyle östemperlenen numunenin kesitinin dağlanmış haldeki optik mikroyapısı verilmiştir.



Şekil 6.7: 900 ^{o}C'de 90 dakika borlama yapıldıktan sonra 300 ^{o}C'de 2 saat östemperlenmiş numunenin optik mikroyapı fotoğrafı.

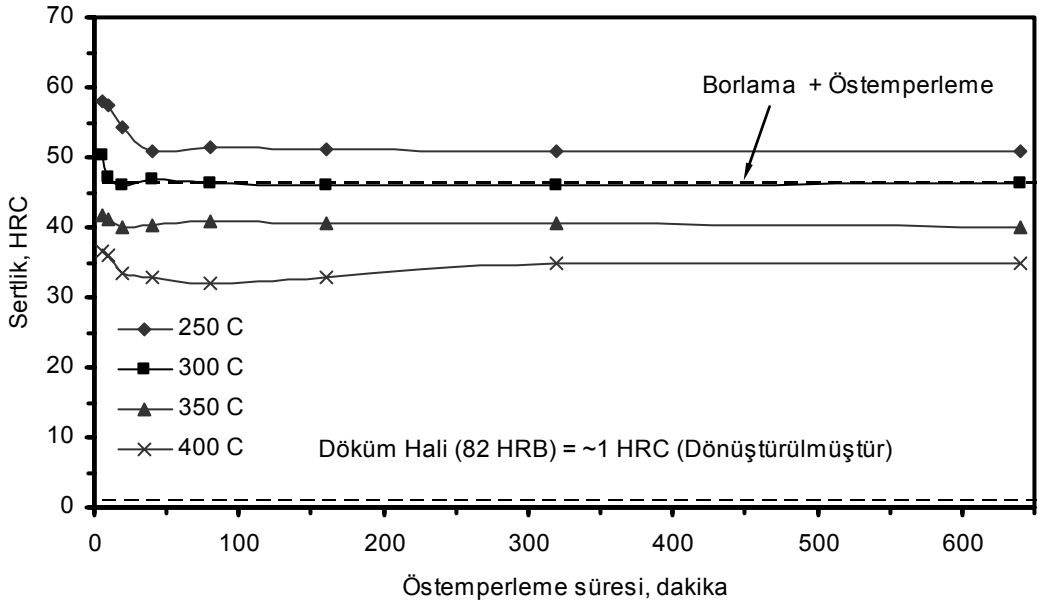
Şekil 6.7'den de görüldüğü üzere numunenin yüzeyinde yaklaşık 30 μm kalınlığında bor tabakası oluşmuştur ve tabakanın hemen altında da beynit fazı oluşmuştur. Bor tabakasında küresel grafitlerin varlığı dikkat çekmektedir. Östemperleme sıcaklığı 300 ^{o}C olarak seçildiğinden dolayı, matriks mikroyapısı beynitik ferrit yapısındadır.

6.2. Mekanik Deneyler

6.2.1. Sertlik Deneyi Sonuçları

Döküm halindeki ve östemperleme uygulanmış GGG 40 kalite küresel grafitli dökme demir numunelerin sertlik deney sonuçları Şekil 6.8'de görülmektedir.

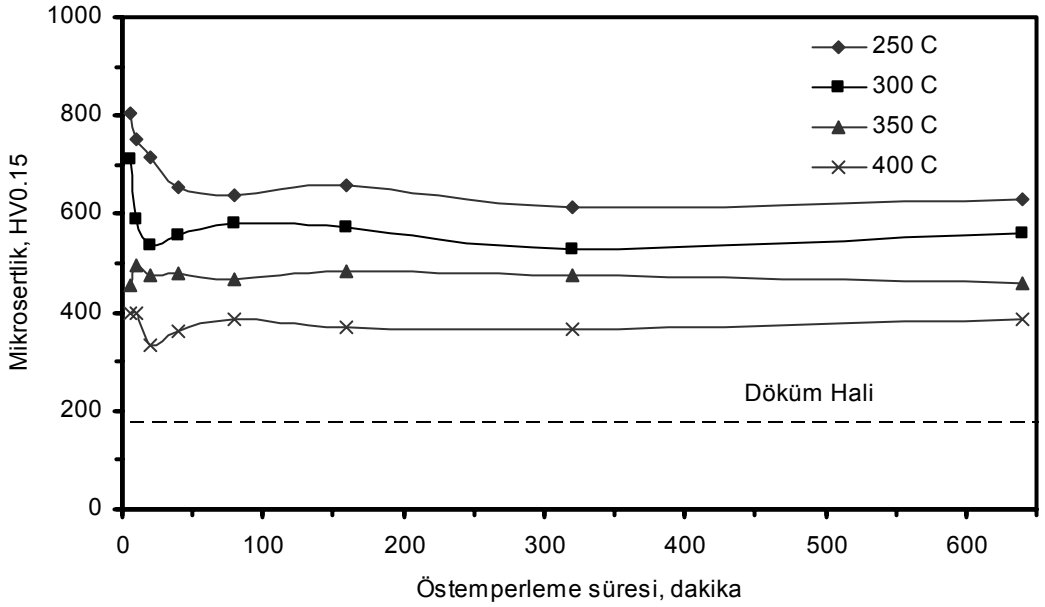
Şekil 6.8'den de görüldüğü gibi östemperleme sıcaklığının artışıyla birlikte sertlik düşmektedir. Ayrıca östemperleme süresinin ilerlemesiyle birlikte sertlik belli bir süreden sonra yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Bu süre 250°C östemperleme sıcaklığı için 40 dakika, 300°C östemperleme sıcaklığı için 80 dakika, 350°C östemperleme sıcaklığı için 20 dakika, 400°C östemperleme sıcaklığı için 40 dakikadır. En yüksek sertlik (58 HRC) 250°C sıcaklıkta 5 dakika süreyle östemperlenen numunede, en düşük sertlik ise (32 HRC) ise 400°C'de 80dakika östemperlenen numunede elde edilmiştir.Borlamayı takiben östemperlenmiş (300°C'de 80 dakika) numunenin sertliği, bu koşulda sadece östemperlenen numune sertliği ile aynı değerdedir (46 HRC) (Şekil 6.8).



Şekil 6.8: Östemperleme süresine bağlı olarak sertliğin değişimi.

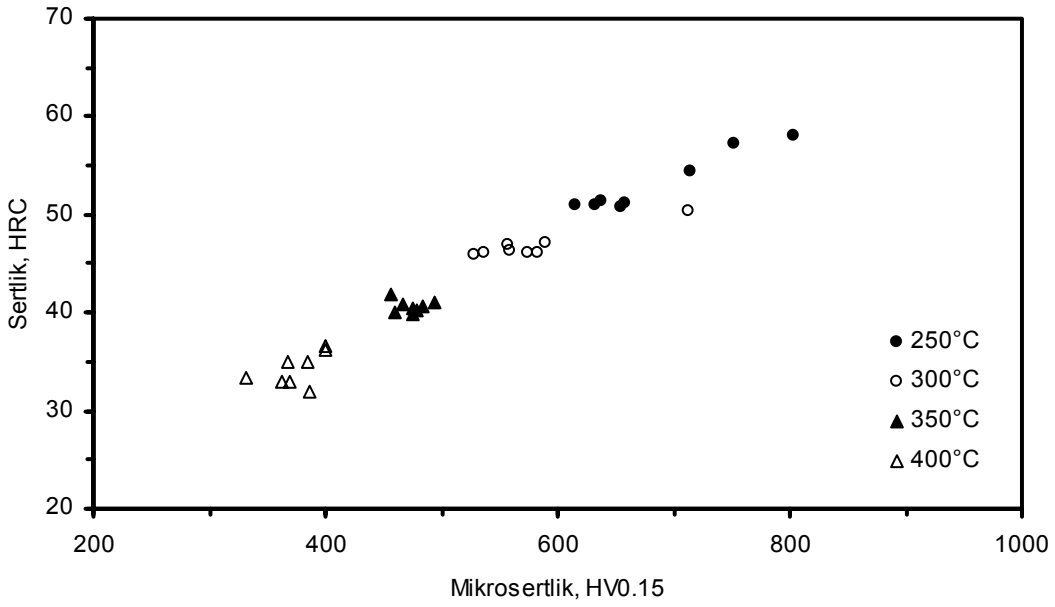
Şekil 6.8'den görüldüğü gibi östemperleme ısıl işlemiyle birlikte sertlik, döküm haline göre artmaktadır. Östemperleme işlemiyle sertliğin artması, izotermal işlem sırasında meydana gelen mikroyapısal dönüşümün bir sonucudur. 250^{o}C ve 300^{o}C'de oluşan alt beynit morfolojisinin sertliği, 350°C ve 400°C'de oluşan üst beynitin sertliğinden daha yüksek olarak elde edilmiştir.

Östemperlenmiş numunelerde, mikrosertlik ölçümleri de yapılmıştır. Özellikle Beynitik ferrit fazı üzerinden gerçekleştirilen mikrosertlik ölçümlerinin amacı, makro sertlik değerleri ile bir karşılaştırma yapmak ve makro sertlik değerlerinin belirlenmesinde, beynitik ferrit fazının dışında olası diğer mikroyapısal oluşumların etkisinin denetlenmesi (doymamış östenit bölgelerinde martenzit oluşumu gibi) içindir. Şekil 6.9'da görüldüğü üzere oluşan beynit fazının mikrosertliği, artan östemperleme sıcaklıklarıyla beraber düşmektedir fakat belli bir östemperleme süresinden sonra sertlik önemli ölçüde değişmemektedir. Her östemperleme sıcaklığı için kısa östemperleme sürelerinde yüksek mikrosertlik değerleri elde edilmektedir.



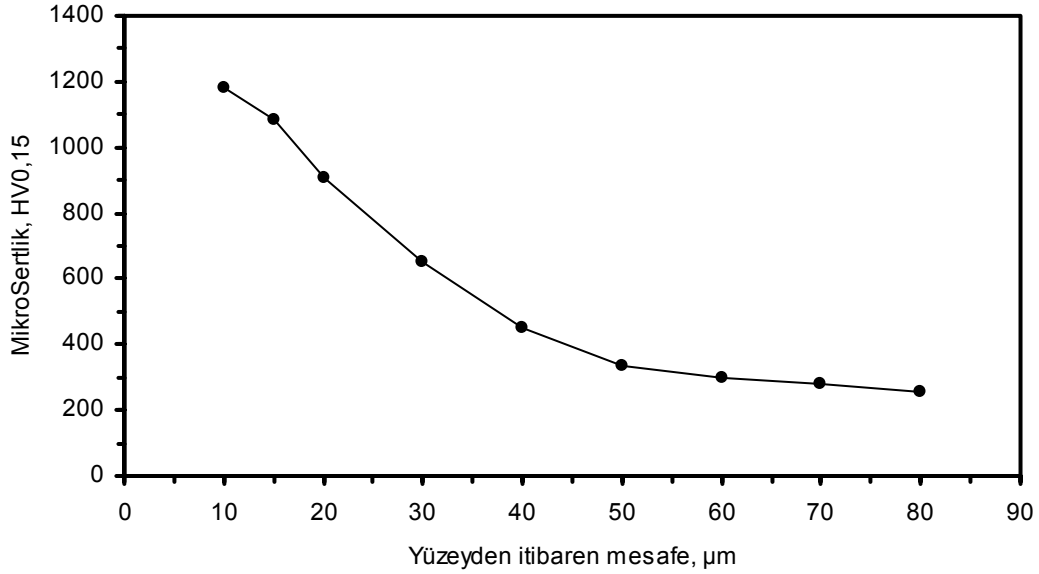
Şekil 6.9: Östemperleme süresine bağlı olarak mikro sertliğin değişimi.

Östemperleme sıcaklığına bağlı olarak makro ve mikrosertlik değişimi Şekil 6.10'da verilmiştir. Makro ve mikrosertlik değerlerinin lineer olarak değişmesi, malzemenin makro sertliğinin büyük ölçüde beynitik ferrit fazının sertliği ile kontrol edildiğini göstermektedir.



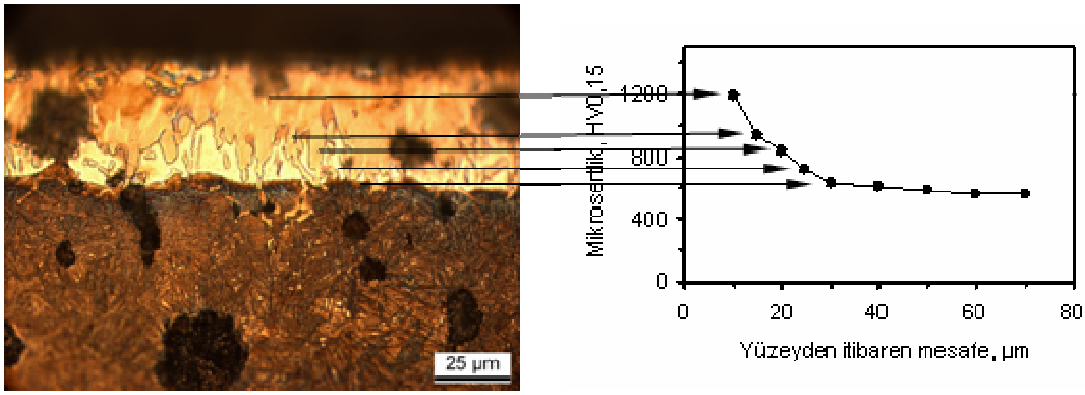
Şekil 6.10: Östemperleme sıcaklığına bağlı olarak makro ve mikrosertlik değişimi.

Şekil 6.11'de, borlanma uygulanmış numunenin mikrosertlik değerinin, borlama tabakasından matrikse doğru değişimi görülmektedir. Beklendiği gibi, borlama tabaksından matrikse doğru mesafe arttıkça mikrosertlik değerleri azalmıştır. Yüzeyden 10 μm içeride en yüksek mikrosertlik 1183 HV olarak ölçülmüş iken, matrikste bu değer yaklaşık 296 HV değerine düşmüştür (Şekil 6.11).



Şekil 6.11: Döküm halinde borlanmış numunenin yüzeyinden matrikse doğru sertlik dağılımı.

Benzer şekilde borlama işlemini takiben 300°C'de 80 dakika süreyle östemperlenen numunede de yüzeyden içeriye doğru sertlik taraması yapılmış ve yüzeyin 10 µm altında 1180 HV değeriyle en yüksek sertlik, matrikste ise 550 HV sertlik değeri elde edilmiştir (Şekil 6.12). Görüldüğü gibi, borlama ve borlama + östemperleme işlemleriyle yüzeyde ulaşılan sertlik değerleri aynı olup, matriksde östemperleme sonucu oluşan beynitik ferrit morfolojisinin sertliği beklendiği gibi daha yüksek olarak ölçülmüştür. Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması sonucu elde edilen sertlik dağılımı, dökme demirin bileşimine, borlama sıcaklık ve süresine bağlı olarak değişmektedir [45].



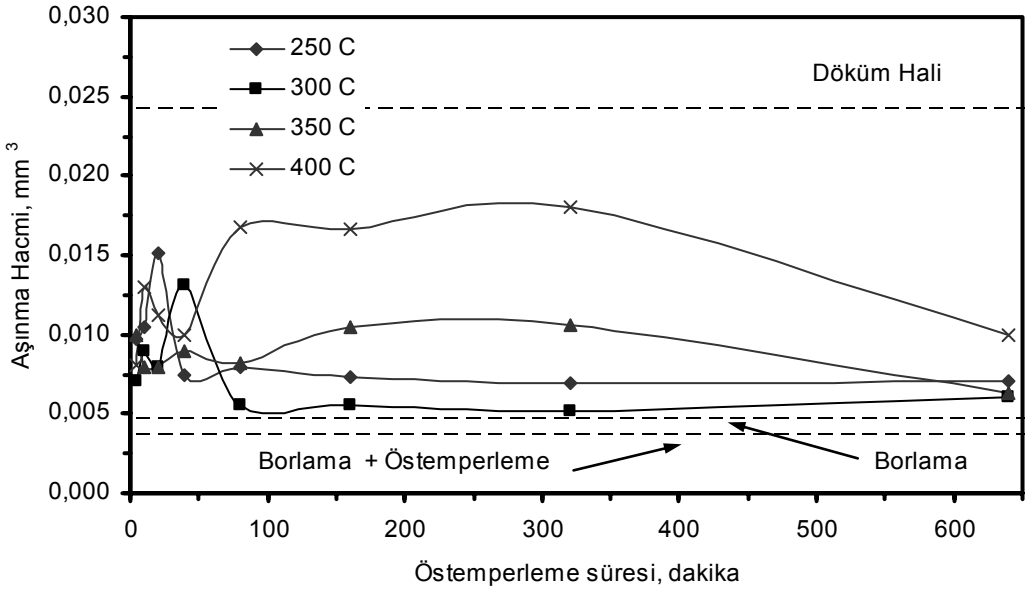
Şekil 6.12: Borlanıp östemperlenmiş numunenin mikroyapı-mikrosertlik dağılım grafiği.

6.2.2. Aşınma Deneyleri

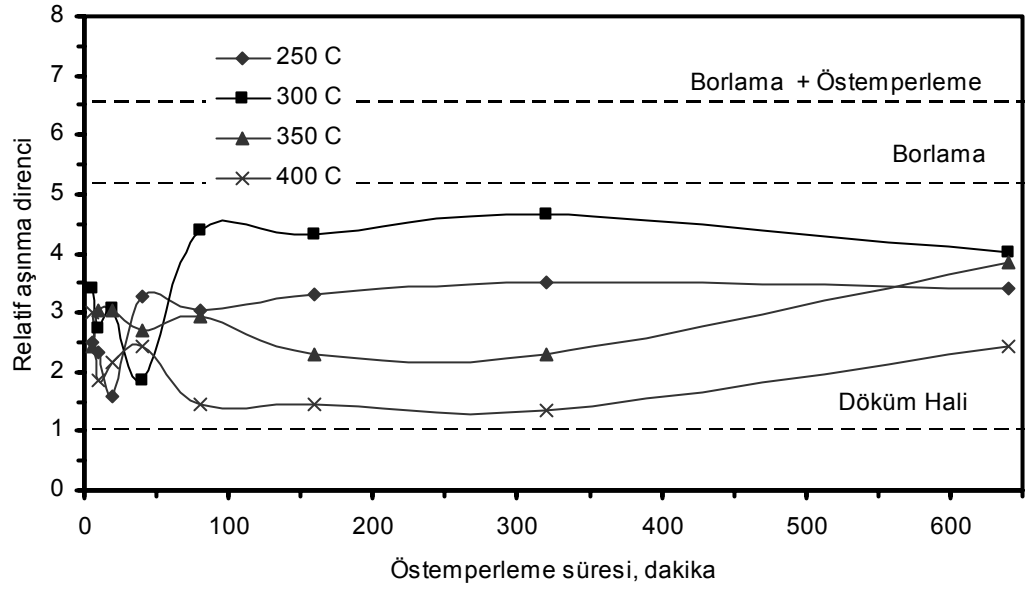
Döküm hali, östemperlenmiş, borlama uygulanmış, borlama ve östemperleme uygulanmış numunelerin, aşınma hacminin östemperleme süresine bağlı olarak değişimi Şekil 6.13'de gösterilmiştir.

Şekil 6.13a'da görüldüğü gibi östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin aşınma hacminin, döküm halindeki küresel grafitli dökme demirin aşınma hacmine göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Yani östemperleme işlemiyle birlikte küresel grafitli dökme demirin aşınma direnci artmıştır. Öte yandan, 250°C ve 300°C sıcaklıkta yapılan östemperleme işlemiyle oluşan mikroyapının (iğnesel beynitik ferrit), 350°C ve 400°C sıcaklıkta yapılan östemperleme işlemiyle oluşan mikroyapıdan (kaba ve tüylü görünümlü üst beynit) daha iyi aşınma direncine sahip olduğu görülmektedir. Farklı işlemler uygulanan numunelerin aşınma direncini, döküm halindeki küresel grafitli dökme demirin aşınma direnciyle kıyaslamalı olarak ifade etmek amacıyla, numunelerin relatif aşınma direnci hesaplanmıştır. Bu amaçla, döküm halindeki

numunenin aşınma direnci 1 olarak kabul edilmiş ve diğer numunelerin aşınma direnci döküm halindeki numuneyle kıyaslanmıştır (Şekil 6.13b). Buna göre, borlama işlemiyle, döküm halindeki küresel grafitli dökme demirin aşınma direnci yaklaşık 5 kat arttırılabilirken, borlama + östemperleme işlemiyle bu artış yaklaşık 6.5 kat düzeyindedir.



(a)



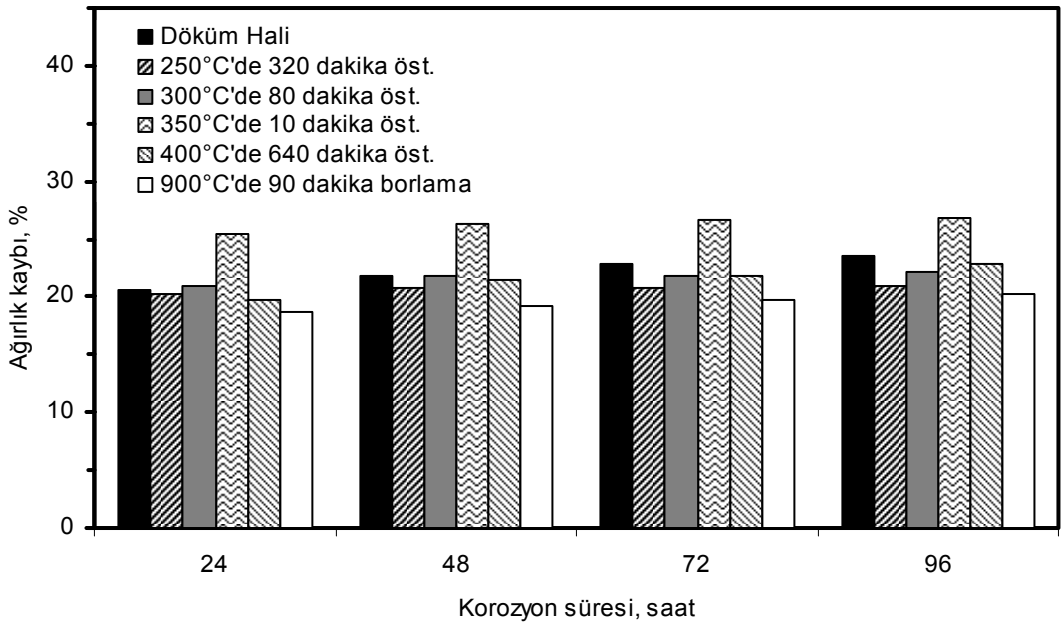
(b)

Şekil 6.13: İncelenen numunelerin (a) aşınma hacminin ve (b) relatif aşınma direncinin östemperleme sıcaklık ve süresine göre değişimi.

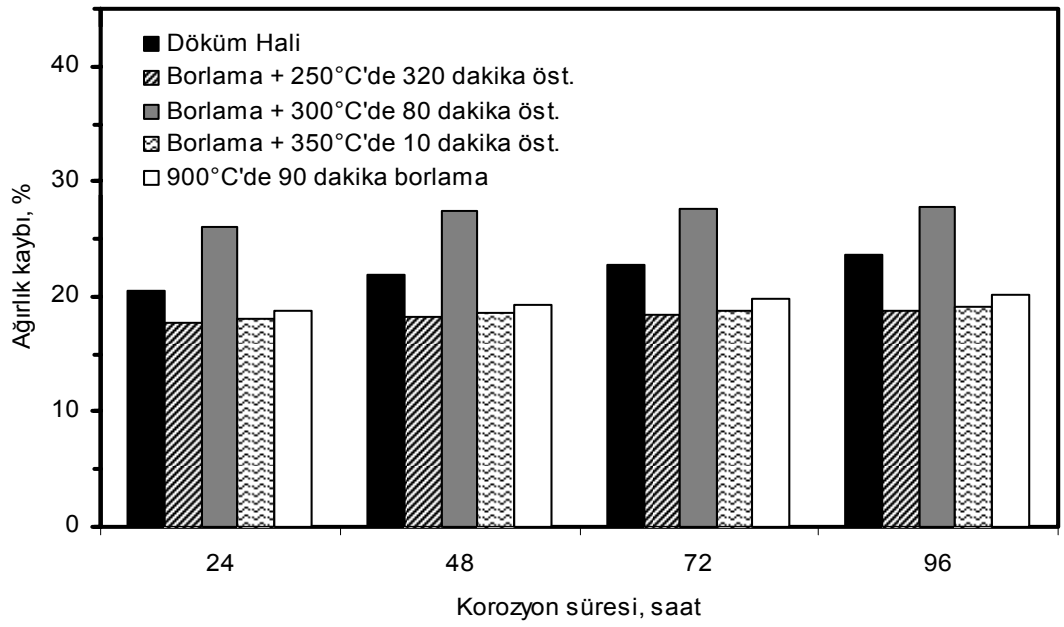
Optimum koşullarda yapılan östemperleme işlemiyle (300°C'de 80 dakika) ile aşınma direncinin döküm haline göre yaklaşık 4.5 kat arttığı belirlenmiştir. Ancak, gerek borlama gerekse borlama ve östemperleme uygulanan numuneler, sadece östemperleme uygulanan numunelerden daha yüksek aşınma direncine sahiptir. Borlama ve östemperleme sonucu aşınma direncindeki artış, optimum koşullarda östemperlenen numuneye göre yaklaşık 1.5 kat düzeyindedir. Dolayısıyla yapılan aşınma deneylerinin sonucunda borlanıp östemperlenmiş numunenin aşınmaya karşı en dirençli malzeme olduğu tespit edilmiştir.

6.3. Korozyon Deneyleri

Korozyon deneyinde, döküm halindeki ve borlama uygulanmış numunelerin yanı sıra borlama uygulandıktan sonra östemperlenen bazı numuneler kullanılmıştır. Borlama + östemperleme için seçilen östemperleme sıcaklık ve süreleri, aşınma deneyleri sonunda her bir sıcaklık için en yüksek aşınma direnci sağlayan östemperleme sıcaklık ve sürelerdir. Bu koşullar, 250°C'de 320 dakika, 300°C'de 80 dakika ve 350°C'de 10 dakikadır. Korozyon deneyine tabi tutulan östemperlenen numunelerin % ağırlık kaybının korozyon süresine bağlı olarak değişimi, döküm hali ve borlama uygulanmış numunelerinkiyle karşılaştırmalı olarak Şekil 6.14a'da, borlama + östemperleme uygulanan numunelerin % ağırlık kaybının korozyon süresine bağlı olarak değişimi ise, döküm hali ve borlama uygulanmış numunelerinkiyle karşılaştırmalı olarak Şekil 6.14b'de verilmiştir. Farklı işlemler uygulanan numunelerin korozyon direncini, döküm halindeki küresel grafitli dökme demirin korozyon direnciyle kıyaslamalı olarak ifade etmek amacıyla, numunelerin relatif korozyon direnci hesaplanmıştır. Bu amaçla, döküm halindeki numunenin korozyon direnci 1 olarak kabul edilmiş ve diğer numunelerin korozyon direnci döküm halindeki numuneyle kıyaslanmıştır (Şekil 6.15). 4 gün süren korozyon deneyleri sonucu, korozyon direnci en yüksek numune, borlamayı takiben 250°C'de 320 dakika süreyle östemperlenen numunedir. Korozyona direnci en düşük numune ise, 900°C'de 90 dakika borlama uygulandıktan sonra 300°C'de 80 dakika östemperlenen numune olmuştur. Aşınma deneylerinde, döküm halinden oldukça iyi performans gösteren östemperlenmiş, borlanmış, borlanmış + östemperlenmiş numunelerin korozyon direnci ile döküm halindeki numunenin korozyon direnci birbirine yakındır.

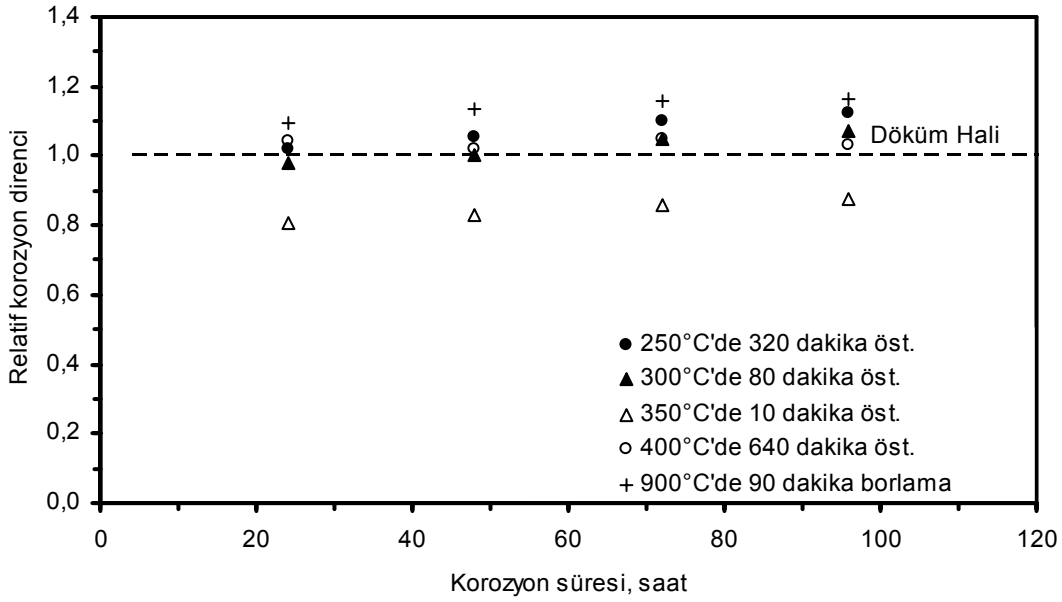


(a)

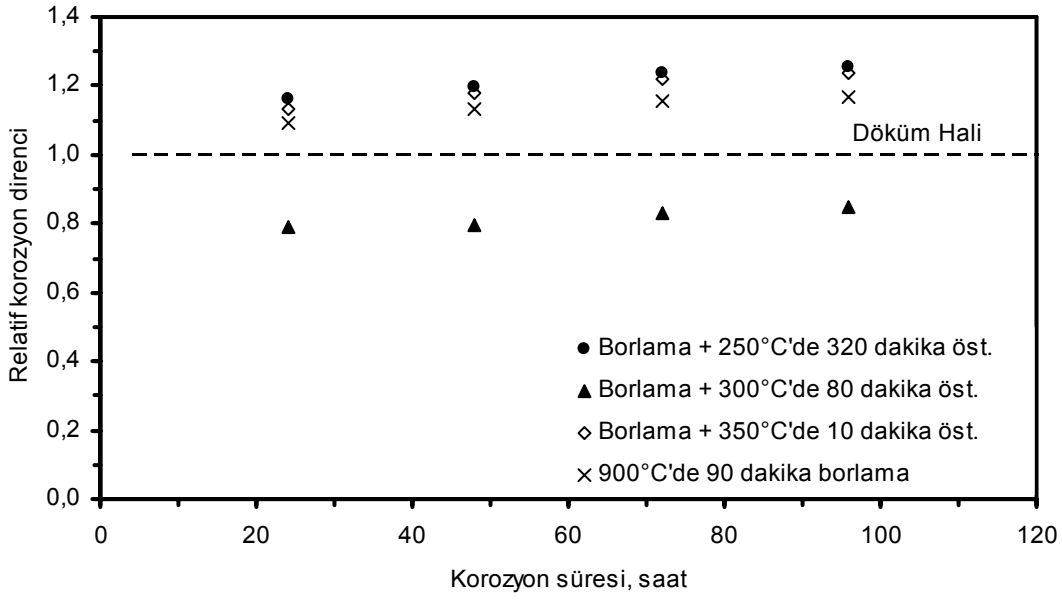


(b)

Şekil 6.14: İncelenen numunelerin korozyon deneyinde (a) östemperlenmiş numunelerin ve (b) borlama + östemperleme uygulanmış numunelerin % ağırlık kaybının korozyon süresine bağlı olarak değişimi.



(a)



(b)

Şekil 6.15: İncelenen numunelerin korozyon deneyinde (a) östemperlenmiş numunelerin ve (b) borlama + östemperleme uygulanmış numunelerin relatif korozyon direncinin korozyon süresine bağlı olarak değişimi.

300°C 80 dakika borlanıp östemperlenen numune, en yüksek aşınma direncine sahipken en düşük korozyon direnci gösteren malzeme olmuştur. Sadece östemperleme uygulanan numuneler içinde, 350°C'de 10 dakika östemperlenen numune, döküm halindekinden daha düşük korozyon direncine sahipken, diğer östemperleme koşulları döküm haline göre % 20'ye varan oranda korozyon drenci artışı sergilemektedir. Borlama + östemperleme uygulanan numuneler içinde ise,

borlamayı takiben 300°C'de 80 dakika östemperlenen numune, döküm haline göre daha düşük korozyon direncine sahipken, diğer işlem koşulları döküm halindekinden daha yüksek (yaklaşık %10-15) korozyon direncine sahiptir. Borlama işlemi ile döküm haline göre % 14, 250°C'de 320 dakika östemperlenen numuneye göre % 4, 300°C'de 80 dakika östemperlenen numuneye göre %8, 350°C'de 10 dakika östemperlenen numuneye göre %24 oranında korozyon direncinde artış sağlanmıştır. Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, borlamayı takiben 250°C'de 320 dakika ve 350°C'de 10 dakika östemperlenen numunelerin, incelenen numuneler içinde en yüksek korozyon direncini verdiği görülmüştür. Bu koşullar, döküm haline göre % 25, borlama işlemine göre ise yaklaşık % 8 korozyon direncini ifade etmektedir. Borlamayı takiben 250°C'de 320 dakika ve 350°C'de 10 dakika östemperlenen numunelerin sadece östemperleme işlemine göre korozyon direncini yaklaşık % 8 arttırdığı görülmektedir (Şekil 6.14).

7. GENEL SONUÇLAR

GGG 40 kalite küresel grafitli dökme demir numunelere uygulanan östenitleme, östemperleme, borlama, borlama sonrası östemperleme ısıl işlemleri sonucu yapılan metalografik çalışmalar, sertlik, aşınma ve korozyon deneylerinden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. GGG 40 kalite küresel grafitli dökme demir, döküm halindeki ferritik bir matrikse sahiptir. 250°C, 300°C, 350°C ve 400°C sıcaklıklarda yapılan östemperleme işlemiyle birlikte küresel grafitli dökme demirin yapısı, farklı morfolojilerde beynitik ferrit ve kalıntı östenitten ibaret mikroyapı elde edilmiştir. 250 ^{o}C ve 300 ^{o}C sıcaklıklarda yapılan östemperleme, nispeten ince ve iğnesel görünümlü alt beynit mikroyapısı sağlarken, 350°C ve 400°C sıcaklıklarda yapılan östemperleme işlemi sonucu daha kaba ve tüylü (feathery) morfolojide üst beynit mikroyapısı oluşmaktadır. 900°C'de 90 dakika süreyle yapılan borlama işlemi ile yüzeyde 30 μm kalınlığında borür tabakası oluşmaktadır. Borlamayı takiben 300°C'de 80 dakika yapılan östemperleme işlemiyle yüzeyde yine yaklaşık 30 μm kalınlığında borür tabakası, matrikste ise iğnesel morfolojide beynitik ferrit ile karakterize edilen östemperleme mikroyapısı elde edilmiştir.

2. Sertlik deneyleri sonucunda en yüksek sertlik 250°C'de 5 dakika süreyle östemperlenen numunede, en düşük sertlik ise, 400°C'de 80 dakika östemperlenen numunede elde edilmiştir. Döküm halindeki numuneye uygulanan östemperleme işlemiyle birlikte numunenin sertliği 58 HRC değerine ulaşmıştır (250°C'de 5 dakika östemperleme ile). Östemperleme sıcaklığının artmasıyla birlikte sertlik azalmıştır ve her östemperleme sıcaklığı için belli bir zaman sonra sertlik yaklaşık olarak sabit kalmıştır.

3. Aşınma deneyleri sonucunda en fazla aşınma kaybının döküm hali numunede en az aşınma kaybının da borlanıp östemperlenmiş numunede olduğu tespit edilmiş, dolayısıyla östemperleme işlemiyle döküm halindeki numunenin aşınma direnci

artmaktadır. 250°C ve 300°C sıcaklıklarda yapılan östemperleme işlemiyle oluşan alt beynit yapısının 350°C ve 400°C'de yapılan östemperleme işlemiyle oluşan üst beynit yapısına göre daha iyi aşınma direncine sahiptir. En iyi aşınma direnci, 900°C'de 90 dakika borlamayı takiben 300°C'de 80 dakika süreyle östemperlenen numunede elde edilmiştir.

4. Belirli borlama + östemperleme koşulları için (250°C'de 320 dakika ve 350°C'de 10 dakika), döküm hali, östemperleme uygulanmış ve borlama uygulanmış numuneler göre daha yüksek korozyon direnci elde edilebilmektedir. Bu artış miktarı, döküm haline göre % 25, borlama işlemine göre ise yaklaşık % 8 korozyon direncini ifade etmektedir. Söz konusu koşullarda yapılan borlama + östemperleme işlemi, sadece östemperleme işlemine göre korozyon direncini yaklaşık % 8 artırmıştır.

KAYNAKLAR

[1] **ASM Handbook,** Casting, Vol. 15, Formerly Tenth Edition, ASM Int.

[2] **Ghang, C. H. Shih, T.S.,** Study on Isothermal Transformation of Austempered Ductile Iron, AFS Transactions, Vol. 119, (1994).

[3] **Bindal, C.,** 1991, Az Alaşımlı Çelikler ve Ticari Karbon Çeliklerinde Borlama ile Yüzeye Kaplanan Borür Tipi Seramik Kompozitlerin Bazı Özelliklerinin Tespiti, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[4] **Hocking, M. G., Vasantasree, V., Sidky, P. S.,** Metalic and Ceramic Coatings, John Villey & Sons Inc., Newyork, pp.1, (1989).

[5] **Oğuz, A.,** Hafif Dirençli ve Dayanıklı Bor Cevheri , Bilim Teknik Dergisi, TUBİTAK, 319, (1994).

[6] **Stefanescu, D. M.,** Chairman., Casting, ASM Handbook formerly 9. Edition, Metals Handbook., Volume 15: Ferrous Casting Alloys, Ductile Iron., ASM International, United States , (1992).

[7] **Erinç, N.,** Cam Kalıp Malzemeleri (Dökme Demirler), Araştırma Genel Müdürlüğü Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş., (1986).

[8] **Stafanescu, D. M.,** Classification and Basic Metallurgy of Cast Iron, Metals Handbook, 10th Edition, ASM International, USA, pp.3-55, (1990).

[9] **Forrest, R. D.,** The Challenge an Oppurtunity Presented to the SG Iron Industry by the Development of Austempered Ductile Iron, BCIRA Report 1700, July (1987).

[10] Cast Iron v.s. Steel: The Difference in Austempering, Heat Treatment, May (1985).

[11] **Özel, A.,**1994, GGG 40-80 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Östemperleme Isıl İşleminin Darbe Direnci ve Geçiş Sıcaklığına Darbe Etkisinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[12] **Çavuşoğlu, E. N.,** "Döküm Teknolojisi I", İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümuşsuyu, (1981).

[13] **Sinha, A.K.,** Boriding, ASM Handbook, Vol.4, J. Heat Treating, pp.437-447,(1991).

[14] **Metals Handbook,** "Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, Vol 1, Tenth Edition, ASM International, (1990).

[15] **Darwish, N., Eliot, R.,** Austempering of Low Manganese Ductile Irons, Part 1 Processing Window, Materials Science and Technology, Vol. 9, (1993).

[16] **Baydoğan, M.,** 1996, GGG 60 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirde Östemperleme Isıl İşleminin Çekme, Yorulma ve Aşınma Özelliklerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

[17] **ASM Handbook**, Heat Treating, Vol. 4, Tenth Edition, ASM International,(1991).

[18] **Grech, M., Young, J.M.,** Influence of Austempering Temperature on the Characteristics of Austempered Ductile Iron Alloyed with Cu and Ni, AFS Transactions, Vol 90, (1990).

[19] **Darwish, N., Elliott, R.,** Austempering of Low Manganese Ductile Irons, Part 3 Variation of Mechanical Properties With Heat Treatment Conditions, Materials Science and Technology, Vol. 9, (1993).

[20] **Hamid Ali, A.S. Elliott, R.,** Austempering of an an Mn-Mo-Cu Alloyed Ductile Iron, Part 1 Austempering Kinetics and Process Window, Materials Science and Technology, Vol.12, (1966).

[21] **Morgan H.L.,** Introduction to Foundary Production and Control of Austempered Ductile Irons, the British Foundaryman's, 98-108, (1987).

[22] **Dorazil, E.,** High Strength Austempered Ductile Cast Iron, Ellis Horwood Limited, England, 226 p., (1991).

[23] **Darwish, N., Elliott, R.,** Austempering of Low Manganese Ductile Irons, Part 2 Influence of Austenitizing Temperature, Materials Science and Technology, Vol.9, (1993).

[24] **Bayati, H., Elliott, R., Lorimer, G.W.,** Influence of Austenitizing Temperature on Austempering Kinetics of high manganese alloyed ductile cast iron, Materials Science and Technology, Vol.11, (1995).

[25] **MI, Y.,** Effect of Cu, Mo, Si on the Content of Retained Austenite of Austempered Ductile Iron, Scripta Metallurgica et Materilia, Vol. 32, (1994).

[26] **Krishnaraj D., Narasimhan, H.N.L., Seshan, S.,** Structure and Properties of ADI as Affected by Low Alloy Editions, AFS Transactions, Vol. 100, (1992).

[27] **Bahmani, M., Elliott, R.,** Effect of Pearlite formation on Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron, Materials Science and Technology, Vol. 10,(1994).

[28] **Hamid Ali,A.S., Uzlov, K.I., Darwish, N., Elliott, R.,** Austempering of Low Manganese Ductile Irons, Part 4 Relationships Betwen Mechanical Properties and Microstructure, Metarials Science and Technology, Vol.10, (1994).

[29] **Yalçın, Y.,** 1991, Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Bakır Miktarı Mikroyapı İlişkisi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[30] **Hamid Ali,A.S., Uzlov, K.I., Darwish, N., Elliott, R.,** Influence of Austenitising Temperature on Austempering of an Mn-Mo-Cu Alloyed Ductile Iron, Part 2 Mechanical Properties, Materials Science and Technology, Vol. 13, (1997).

[31] **Luo, Q., Xie, J., Song, Y.,** Effects of Microstructures on the Abrasive Wear Behaviour of Spheridoal Cast Iron, Wear, Vol.184, (1995).

[32] **Ghaderi, A. R., Nili Ahmadabadi ,M., Ghasemi H. M.,** Effect of Graphite Morphologies on the Tribological Behavior of Austempered Cast İron, (2003).

[33] **Şahin, Y., Erdoğan, M., Kılıçlı V**, Wear Behavior of Austempered Ductile Irons With Dual Matrix Structures, (2006).

[34] **Hemanthu, J.,** Wear Characteristics of Austempered Chilled Ductile İron, (1999).

[35] **Yapar, U., Başman, G., Arısoy, C.F., Şeşen, M.K.,** Çeliklerde Borlama Yoluyla Yüzey Sertleştirme, Metal Dünyası, 115, 69-74, (2002).

[36] What is Boronising? Lindberg Heat Treating Company Seramic Consulting Group, 12, (1995).

[37] **Carbucicchio, M. Badini, C. and Sambago, G.,** On the Early Stages of High Purity Iron Boriding with Crystalline Boron Powder, Materials Science, 15, 1483-1490, (1997).

[38] **Şen U.,** 1997, Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Borlanması ve Özellikleri, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[39] **Xu. C.H., Gao, W. And Yang, Y.L.,** Superplastic Boronizing of a Low Alloy Steel-Microstructural Aspects, J. Materials Processing Technology, 108, 349-355, (2001).

[40] **Graf, A., Matushcka, W.,** Borieren, Carl Hanser Verlag, München, Wien, pp. 1-87, (1977).

[41] **Goeuriot, F.P., Thevenot, J., Driver, H**., Surface Treatment of Steels: Borudif: a New Boriding Process, Thin Solid Films, 78, pp.67-76, (1981).

[42] **Bejar, M.A., Moreno, E.,** Abrasive Wear Resistance of Boronized Carbon and Low-Alloy Steels, (2005).

[43] **Vlack, W.,** Elements of Materials Science and Engineering, Addison Wesley Published Company Inc, USA, (1985).

[44] **Liao, P.**K., Spear , K.E., B-Fe (Boron – Iron) Binary Diagrams of Binary Iron Alloys, pp. 41-47.

[45] **Eyre, T.S.,** Effect of Boronising on Friction and Wear of Ferrous Metals, Wear,34,pp.383-197, (1975).

[46] **Allaoui, O., Bouaouadja, N., Saindernan, G.,** Characterization of Boronized Layers on a XC38 Steel, 2006.

[47] Mühendis ve Makine, Mayıs 2004 - Sayı 532

[48] **Putatunda, K. S.,Kesani, S., Tackett R., Lawes, G.,** Development of Austenite Free ADI (Austempered Ductile Cast İron), 2006.

[49] **Çakır, M., Bayram , A., Işık,Y., Salar, B.,** The Effects of Austempering Temperature and Time onto the Machinability of Austempered Ductile Iron, 2005.

[50] **Erić, O., Rajnović, D. , Zec, S., Sidjanin, L., Jovanović, T., M.,** Microstructure and Fracture of Alloyed Austempered Ductile Iron, 2006.

[51] **Çetin, M., Gül, F.,** Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Abrasiv Aşınma Davranışına Östemperleme İşleminde Soğutmanın Etkisi, 2006.

[52] **Özbek I., Konduk, B. A., Bindal, C., Üçışık, A., H**., Characterization of Borided AISI 316L Stainless Steel Implant, 2002.

[53] **Uslu, I., Cömert, H., İpek, M., Özdemir, O., Bindal, C.,** Evaluation of Borides Formed on AISI P20 Steel, 2005.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Adana'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Mersin'de tamamladı. 2000 yılında Mersin Türkmen Koleji'nden mezun oldu. 2000 yılında Y.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümüne girdi. 2005 yılında lisans öğrenimini tamamlayarak, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsüne girmeye hak kazandı ve Enstitünün Metalurji Mühendisliği Bölümü, Malzeme Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başladı.