

**BORTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ
DÖKME DEMİRİN YÜKSEK SICAKLIK
AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
AZİZ DÖNGEL
DANIŞMAN
Doç. Dr. YILMAZ YALÇIN
METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI
OCAK 2008**

Bu tez çalışması "104M398" numaralı Tübitak projesi tarafından desteklenmiştir.

T.C
AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BORTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN
YÜKSEK

SICAKLIK AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

AZİZ DÖNGEL

DANIŞMAN

Doç. Dr. YILMAZ YALÇIN

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

OCAK 2008

ONAY SAYFASI

Doç. Dr. Yılmaz YALÇIN danışmanlığında, Aziz DÖNGEL tarafından hazırlanan “**Bortemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin yüksek sıcaklık aşınma davranışının incelenmesi**” başlıklı bu çalışma, lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca
15/02/2008
tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
Metal Eğitimi Anabilim Dalında
Yüksek Lisans tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

	Ünvanı, Adı, SOYADI	İmza
Jüri üyesi (Başkan)	Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN	
Jüri üyesi (Danışman)	Doç. Dr. Yılmaz YALÇIN	
Jüri üyesi	Doç. Dr. Şükrü TAKTAK	

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Zehra BOZKURT
Enstitü Müdürü

İÇİNDEKİLER	Sayfa
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
RESİMLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirler	4
2.1.1 Dökme Demirlerin Tanımı	4
2.1.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması	7
2.1.3 Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey Sertleştirme İşlemleri	9
2.1.3.1 Alev, İndüksiyon veya Lazerle Yüzey Sertleştirme	9
2.1.3.2 Nitrürleme	9
2.1.3.3 Alüminyumlama	10
2.1.3.4 Borlama	10
2.1.4 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları	10
2.2 Östemperleme	11
2.2.1 Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler	11
2.2.1.1 Östenitleme İşlemi	11
2.2.1.2 Östemperleme Isıl İşlemi	13
2.2.1.3 ÖKGDD'lerin Mekanik Özellikleri	16
2.2.1.4 ÖKGDD'lerin Avantaj ve Sınırlamaları	18
2.2.1.5 ÖKGDD'lerin Kullanım Alanları	19
2.3 Borlama	20
2.3.1 Bor Mineralleri	20
2.3.2 Borlamanın Tanımı	20
2.3.3 Borlama İşlemi	21
2.3.4 Borlama Yöntemleri	22
2.3.5 Borür Tabakasının Özellikleri	24
2.3.5.1 Borür Tabakasının Tribolojik Özellikleri	26
2.3.5.2 Borür Tabaka Kalınlığını Etkileyen Faktörler	26
2.3.5.3 Demir –Bor Denge Diyagramı	27
2.3.5.4 Borür Tabakasının Sertliği	28
2.3.5.5 Borür Tabakasının Aşınma Dayanımı	29
2.3.5.6 Borlamanın Endüstriyel Uygulamaları	30
2.4 Aşınma	32
2.4.1 Sürtünme ve Aşınma	32
2.4.1.1 Sürtünme	32
2.4.1.2 Aşınma	33
2.4.2 Aşınmayı Etkileyen Faktörler	35

2.4.3 Aşınma Mekanizmaları	36
2.4.3.1 Adezif Aşınma	36
2.4.3.2 Abrazif Aşınma	37
2.4.3.3 Yorulma Aşınması	39
2.4.3.4 Eroziv Aşınma	39
2.4.3.5 Öğütmeli Aşınma	41
2.4.3.6 Oymalı Aşınma	41
2.4.3.7 Korozif Aşınma	42
2.4.3.8 Kazımalı Aşınma	43
2.4.4 Malzemede Aşınmanın Ölçülmesi	44
2.4.4.1 Kalınlık Ölçme Metodu	44
2.4.4.2 Ağırlık Farkı İle Ölçme	45
2.4.4.3 Radyo İzotoplarla Ölçme Metodu	45
2.4.4.4 İz Değişiminin Ölçülmesi Metodu	45
3. MATERYAL ve METOD	46
3.1 Deneysel Malzeme ve Numuneler	46
3.1.1 Deneysel Malzemeler	46
3.1.2 Deney Numuneleri	47
3.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar ve Yöntem	48
3.2.1 Borlama ve Östemperleme Fırını	48
3.2.2 Borlama Potası	49
3.2.3 Borlama İşlemi	49
3.2.4 Bortemperleme İşlemi	50
3.2.5 Aşınma Deneyi	51
3.2.6 Metalografi Çalışmaları	52
3.2.7 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	52
4. BULGULAR	54
4.1 Giriş	54
4.2 Mikroyapısal Özellikler	54
4.2.1 Kaplama Tabakası	54
4.2.2 Matris Yapısı	56
4.3 Aşınma Özellikleri	63
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	77
5.1 Tartışma	77
5.2 Sonuçlar	80
5.3 Öneriler	81
6. KAYNAKLAR	82
7. ÖZGEÇMİŞ	88

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BORTEMPERELENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN YÜKSEK SICAKLIK AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Aziz DÖNGEL

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Yılmaz YALÇIN

Bu tez çalışmasında, bortemperlenmiş alaşımsız küresel grafitli dökme demirin mikroyapı özellikleri ve yüksek sıcaklık aşınma davranışları incelenmiştir. Y-blok dökümlerin ayaklarından kesilip işlenen aşınma numuneleri bortemperleme işlemine tabi tutulmuştur. Bortemperleme işlemi borlama ve temperleme olarak iki kademe uygulanmıştır. İlk kademe, paslanmaz çelik kutu içerisinde ticari Ekabor®2 tozuna gömülen numuneler 900 °C'de 1, 3 ve 5 saat süreyle borlandıktan sonra hızla temperleme fırında transfer edilmiştir. Borlanan numuneler ikinci kademe 250, 300, 350 ve 450 °C'deki tuz banyosu içinde 1 saat süreyle temperledikten sonra fırın dışındana alınıp soğutulmuş, bol suyla yıkanıp kurutulmuştur. Bortemperlenen aşınma numuneleri, aşınma cihazında bilye-disk (ball-on-disc) yöntemiyle farklı sıcaklıklarda (oda sıcaklığı, 150, 300 ve 450 °C) aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler, 10 N yük altında, 0,3 m/s kayma hızında ve 8 mm çapındaki Al₂O₃ bilyeye karşı 1000 m aşındırılmak suretiyle yapılmıştır. Aşınma deneyinden sonra, aşınma izleri SEM'de incelenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir. Aşınma izi içerisinde dikkat çeken önemli bölgelerden nokta analizleri alınarak aşınma özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda bortemperleme ile küresel grafitli dökme demir yüzeyinde sert bir borür tabakası elde edilirken matrisin ösferritik yapıda oluşması sağlanmıştır. Bortemperleme işlemi ile küresel grafitli dökme demirin aşınma dayanımı tatmin edici şekilde artmıştır. Tüm ortam sıcaklıklarında döküm yapısına göre daha düşük aşınma hızı elde edilmiştir. Aşınma izlerinin SEM'de incelenmesi ile aşınmanın küresel grafitlerin etrafında başladığı görülmüştür. Grafit kürelerinin üzerinde bulunan kaplama tabakası tekrarlı yüklemelerle yorulup kırılmakta ve kırılan borür tabakası daha sonra abrazyon aşınmaya neden olabilmektedir.

2008,98 sayfa

Anahtar kelimeler: Küresel Grafitli Dökme Demir, Bortemperleme, Mikro yapı, Yüksek Sıcaklık Aşınma Özellikleri

ABSTRACT

M.Sc

INVESTIGATION OF HIGH TEMPERATURE WEAR BEHAVIOR OF FOR BORO-TEMPERED DUCTILE IRON

Aziz DÖNGEL

Afyon Kocatepe University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Metal Education
Supervisor: Assoc. Prof. Yılmaz YALÇIN

In this thesis, the effects of boro-tempering heat treatment on microstructure and high temperature wear properties of ductile iron were investigated. Wear samples were machined from Y-block castings and subjected to boro-tempering heat treatment. In the case of boro-tempering, the samples were boronized in a solid medium containing commercial Ekabor[®]2 powder under atmospheric pressure at a temperature of 900 °C for 1, 3 and 5 h. This was followed by quenching in a molten salt bath at different temperatures of 250 °C, 300 °C, 350 °C, or 450 °C for 1 h. and finally, cooled down to room temperature in air. After the boro-tempering treatment, all samples were cleaned with water and dried. Boro-tempered samples were subjected to ball-on disc wear tests at the different ambient temperatures (room temperature, 150 °C, 300 °C and 450 °C). Alumina balls of 8 mm in diameter were used as an abrasive. The following conditions were chosen for wear tests; 10 N of load, 0.3 m/s of sliding speed and 1000 m of sliding distance. After the wear tests, wear tracks were examined by scanning electron microscopy (SEM) and EDX point analyses. Selected area of wear tracks were used for such analyses. Hard boride layer was produced on the surface of ductile iron by boro-tempering heat treatment while a matrix of ausferritic structure. Tribological tests indicated that boro-tempering treatment increased the wear resistance of ductile iron. Boro-tempered samples showed lower wear rate than that of as-cast ductile iron at all test temperatures. Worn surface examinations revealed that the wear started in the close vicinity of nodular graphite. As the coating layer on the graphite fractured under the alternating loading, resulting debris may cause abrasive wear.

2008,98 pages

Keywords: Ductile Iron, Boro-tempering, Microstructure, High Temperature Wear Properties

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sűresince benden bilgi, deneyim ve sabırlarımı hiçbir zaman esirgemeyen tez danıőmanım ve deęerli hocam Doç.Dr.Yılmaz YALÇIN'a sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

Tez çalıőmamda buldukları katkılarından dolayı sayın hocam Doç.Dr. Őűkrű TAKTAK, Arő. Grv. Sinan ULU, Arő. Grv. Yusuf KAYALI, Arő.Grv.Őűkrű ŐLKER, Arő.Grv.İbrahim GŪNEŐ, Őęr.Grv. Barıő GŐKE, Őęr.Grv. Muzaffer ERDOęAN'a teőekkűrlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca tűm Őęretim hayatım boyunca maddi, manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme ve Sayın Alaőım Dűkűm sahiplerinden Eyűp KŪŪK Beyefendi'ye de teőekkűrlerimi sunarım.

Aziz DÖNGEL

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

1. Simgeler

μ	Sürtünme Katsayısı
μ_k	Dinamik sürtünme katsayısı
μ_s	Statik sürtünme katsayısı
γ	Östenit
α	Ferrit
γ_{yk}	Yüksek karbonlu östenit
Ms	Martenzit başlangıç
Mf	Martenzit bitiş
Fn	Normal kuvvet
Fs	Teğetsel kuvvet (Sürtünme kuvveti)
T	Sıcaklık
t	Zaman

2. Kısaltmalar

KGDD	Küresel Grafitli Dökme Demir
ÖKGDD	Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir
BKGDD	Bortemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir
BCIRA	British Cast Iron Research Association
INCO	İnternational Nikel Company
AISI	Amerikan standartları enstitüsü
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
DDK	Dökme demir küresel grafitli
GGG	Küresel grafitli dökme demir
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
DIN	Alman standardı
MPa	Mega paskal
HRC	Rockwel sertliği
HV	Vickers sertliği
HB	Brinell serliği

ŞEKİLLER DİZİNİ		Sayfa
Şekil 2.1	Dökme demirlerin şematik olarak sınıflandırılması	4
Şekil 2.2	Östenitleme sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi	12
Şekil 2.3	Küresel grafitli dökme demir için östemperleme ısıl işlemi diyagramı	14
Şekil 2.4	Alaşımız KGDD'de (a)üstösferrit ve (b)altösferrit dönüşümleri için östemperleme süresiyle mikroyapıdaki değişimlerin ve proses aralığının şematik gösterimi	15
Şekil 2.5	Alt ve üst beynit oluşum mekanizması	16
Şekil 2.6	Çeşitli malzemelerle ÖKGDD 'lerin kırılma tokluğu-akma mukavemeti ilişkisinin karşılaştırılması	17
Şekil 2.7	İdealize edilmiş tokluk-östemperleme zaman eğrisine bağlı olarak ÖKGDD için bazı kullanım alanları	19
Şekil 2.8	Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması	22
Şekil 2.9	Demir esaslı malzemelerin borlanması ile oluşan ferrobör tabaka çeşitleri	25
Şekil 2.10	Fe-B ikili denge diyagramı	27
Şekil 2.11	950 °C sıcaklıkta 90 dakika borlanmış çeliklerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımı	29
Şekil 2.12	Statik ve dinamik sürtünme katsayıları	33
Şekil 2.13	Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterimi	35
Şekil 2.14	Adhezif aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi	35
Şekil 2.15	İki elemanlı abrazif aşınma	37
Şekil 2.16	Üç elemanlı abrazif aşınma	38
Şekil 2.17	Yorulma aşınmasının şematik gösterilişi	39
Şekil 2.18	Erozif aşınmanın şematik gösterilişi	40
Şekil 2.19	Öğütmeli aşınmanın şematik gösterilişi	41
Şekil 2.20	Korozif aşınmanın şematik gösterilişi	42
Şekil 2.21	Kazımalı aşınmanın şematik gösterilişi	44
Şekil 3.1	Y-Blok şeklindeki döküm malzemesinin boyutları ve resmi	46
Şekil 3.2	Deneyde kullanılan numune ölçüleri	47
Şekil 3.1	Borlama ve Östemperleme işlemlerinde kullanılan fırınlar	48
Şekil 3.2	Borlama deneylerinde kullanılan AISI 316 paslanmaz çelik kutunun geometrik şekli ve boyutları	48
Şekil 3.4	Borlama işleminin yapılış yönteminin şematik gösterimi	49
Şekil 3.5	Aşınma deneyi numunelerine uygulanan borstemperleme ısıl işlem çevriminin şematik gösterimi	50
Şekil 3.6	Bilye disk aşınma cihazının şematik gösterimi	51
Şekil 4.1	Tabaka kalınlığının borlama süresi ve temperleme sıcaklığı ile değişimi.	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

- Şekil 4.2 a) 1 saat, b) 3 saat ve c) 5 saat borlama süreleri için sürtünme katsayısının ortam sıcaklığı ve bor temperleme sıcaklığına bağlı olarak değişimi. 64
- Şekil 4.3 Farklı ortam sıcaklıklarında a) aşınma hızı-borlama süresi (temperleme sıcaklığı 300 °C) ve b) aşınma hızı-temperleme sıcaklığı (borlama süresi 3 saat) grafikleri. 66

RESİMLER DİZİNİ

		Sayfa
Resim 2.1	Alaşım-sız KGDD'nin dökülmüş haldeki mikroyapısı	8
Resim 3.1	Alaşım-sız KGDD'nin döküm haliyle mikroyapısı	47
Resim 3.2	Borlama ve Östemperleme işlemlerinde kullanılan fırınlar	48
Resim 3.3	Taramalı elektron mikroskobu	52
Resim 4.1	900 °C'de a) 1 saat, b) 3 saat ve c) 5 saat borlandıktan sonra 300 °C'de 1 saat temperlenen numunelere ait kesitten alınan optik mikroyapı fotoğrafları.	56
Resim 4.2	900 °C'de 3 saat borlanıp a) 250 °C, b) 300 °C, c) 350 °C ve d) 450 °C'de 1 saat temperlenen numunelerin kesitlerinden alınan optik mikroyapı fotoğrafları.	58
Resim 4.3	900 °C'de 3 saat borlanıp a) 250 °C, b) 300 °C, c) 350 °C ve d) 450 °C'de 1 saat temperlenen numunelerin kenardan ve merkezden alınmış SEM fotoğrafları.	60
Resim 4.4	900 °C'de a) 1 saat, b) 5 saat borlanıp 300 °C'de temperlenen numunelerin kenardan ve merkezden alınmış SEM fotoğrafları.	62
Resim 4.5	900 °C'de 1 saat süre ile borlanmış 250 °C'de (soldakiler) ve 300 °C'de (sağdakiler) bortemperlenmiş numunelerin a) 20 °C, b) 150 °C, c) 300 °C yapılmış aşınma deneylerinde oluşan aşınma izlerinin mikroyapı fotoğrafları.	67
Resim 4.6	900 °C'de 1 saat süre ile borlanmış 350 °C'de (soldakiler) ve 450 °C'de (sağdakiler) bortemperlenmiş numunelerin a) 20 °C, b) 150 °C, c) 300 °C yapılmış aşınma deneylerinde oluşan aşınma izlerinin mikroyapı fotoğrafları.	68
Resim 4.7	900 °C'de 3 saat borlamayı takiben 350 °C'de 1 saat temperlenen numunenin 10 N yük altında ve 0,3 m/s kayma hızında 1000 m aşındırılmış yüzey SEM fotoğrafı.	69
Resim 4.8	Bortemperlenmiş numunenin aşınma türünü gösteren SEM fotoğrafı. Borlama süresi 1 saat, temperleme sıcaklığı 300 °C, kayma hızı 0,3 m/s, yük 10 N	70
Resim 4.9	900 °C'de 3 saat borlandıktan sonra 300 °C'de 1 saat temperlenen numunenin 5 N yük altında 0,5 m/s kayma hızında 1000 m aşındırılmasıyla oluşan aşınma yüzeyinden alınan nokta analizi bölgeleri.	71
Resim 4.10	3 saat borlanıp 300 °C'de temperlenen numunelerin 450 °C ortam sıcaklığında aşındırılmasıyla elde edilen a) aşınma izi ve b) aşınan bölgenin kesit optik fotoğrafları.	73
Resim 4.11	a) 1 saat, b) 3 saat ve c) 5 saat borlanıp 300 °C'de temperlenen numunelerin 450 °C ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneyinden sonra kesitten ve yüzeyden alınan SEM fotoğrafları.	74
Resim 4.12	a) 1 saat, b) 3 saat ve c) 5 saat borlanıp 300 °C'de temperlenen numunelerin 450 °C ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneyinden sonra aşınma izinden alınan nokta analiz bölgeleri.	76

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Mikroyapı ve kırılma özelliklerine göre dökme demirlerin sınıflandırılması.	5
Çizelge 2.2 TSE standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.	8
Çizelge 2.3 Çeşitli malzemelerin yüzey sertlik değerleri.	28
Çizelge 3.1 Döküm malzemesinin kimyasal bileşimi.	46
Çizelge 4.1 Ölçülen sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerleri.	63
Çizelge 4.2 Resim 4.9’da görülen bölgelerden alınan nokta analiz sonuçları.	71
Çizelge 4.3 Resim 4.11’de görülen bölgelerden alınan nokta analiz sonuçları.	75

1. GİRİŞ

Endüstride yaygın olarak kullanılan malzemelerin başında çelik ve dökme demirler gelmektedir. Dökme demirler içerisinde ise küresel grafitli dökme demir (KGDD) özel bir öneme sahiptir. Zaten oldukça iyi özelliklere sahip KGDD'ler, östemperleme ısıl işlemi uygulanarak çok daha dikkat çekici bir malzeme haline gelmiştir. Bundan dolayı, östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir (ÖKGDD) pek çok mühendislik uygulamasında ısıl işlem görmüş çelik ve dövme çeliğin yerine kullanım potansiyeline erişmiştir. ÖKGDD, iyi süneklikle birlikte yüksek mukavemet (Gundlach 1983, Harding 1986), iyi aşınma direnci (Harding 1993, Yang 2005), iyi yorulma direnci (Putatunda 1993, Harding 1985) ve iyi kırılma tokluğuna (Hughes 1984, Putatunda 2001) sahiptir.

Ayrıca daha düşük malzeme maliyeti, daha düşük üretim maliyeti, düşük yoğunluk, daha iyi işlenebilirlik, daha yüksek titreşim sönümlenme kapasitesi ve tasarım esnekliği gibi birçok teknik ve ticari avantajları bulunmaktadır (Harding 1993). Tüm bu üstün özellikleri ve avantajları sayesinde otomotiv sektöründe, makine ve teçhizat alanında, tarım ve ormancılıkta, savunma sanayinde birçok yapısal parçanın üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Fuller 1984).

Malzemenin mikroyapısal ve mekanik özellikleri üzerine yüzlerce çalışma yapılmıştır ve hâla da yapılmaktadır. Yeni çalışmalar malzemenin mevcut özelliklerini daha da geliştirmeye odaklanmıştır. Bilindiği gibi mühendislik malzemelerinin yüzey özellikleri, aşınma, korozyon ve yorulma davranışlarını önemli oranda etkilemektedir. Bu nedenle, ÖKGDD'lere, karbürleme, nitrürleme, karbonitrürleme ve borlama gibi bazı yüzey modifikasyon işlemleri ile lazer yüzey ergitme (LSM) ve lazer yüzey sertleştirme (LSH) gibi modern yüzey mühendisliği tekniklerinin uygulanmasına yönelik çalışmalar başlatılmıştır (Roy 2001). En son çalışmalar ise ÖKGDD'in matris yapısını bozmadan düşük sıcaklık kaplama teknikleriyle yüzey özelliklerini geliştirmeye yönelmiştir (Cheng-Hsun 2006, Yin-Yu 2002).

Ancak yüzey modifikasyon işlemlerinin ÖKGDD malzemeye uygulanması mümkün olmamaktadır. Östemperleme işlemi genellikle martenzit başlama sıcaklığı (Ms) ile 450 °C arasında yapılmaktadır. Yüzey işlemleri ise östemperleme sıcaklığının üzerinde gerçekleştirildiği için ÖKGDD'e mükemmel özellikleri kazandıran ösferritik yapı bozulmaktadır. Diğer taraftan düşük sıcaklık yüzey kaplama işlemlerinin ise östemperleme işlemine ilave olarak kaplama işlemi gerektirmesi ve bunun da maliyeti arttırması bizi yeni arayışlara itmiştir.

Söz konusu olumsuzlukları aşmak için Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalında yapılan yüksek lisans çalışmalarında KGDD'e bortemperleme işlemi uygulanmıştır(Yazıcı 2006, Kayalı 2006).

Bortemperleme işlemi aslında iyi bilinen iki işlemin (borlama ve temperleme) birlikte uygulanmasından ibarettir. Bortemperleme işlemi uygulanan küresel grafitli dökme demir **“Bortemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir”** olarak isimlendirilmektedir. Bortemperlemenin amacı, yüzeyi sert, dolayısıyla aşınma ve korozyon direnci yüksek, matriste ise ösferritik yapı oluşturarak iyi süneklikle birlikte yüksek mukavemet ve kırılma tokluğuna sahip bir malzeme elde etmektir.

Bu tez çalışması, 104M398 nolu TÜBİTAK araştırma projesi kapsamı içerisinde gerçekleştirilmiştir (Yalçın 2007). Çalışmanın amacı, bortemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin (BKGDD) yüksek sıcaklıklardaki aşınma davranışının incelenmesidir.

Çalışmalarda standart Y-blok olarak dökülen alaşımsız küresel grafitli dökme demir malzeme kullanılmıştır. Y-blokların ayaklarından kesilip işlenen aşınma numuneleri bortemperleme işlemine tabi tutulmuştur. Bortemperleme işlemi borlama ve temperleme olarak iki kademede uygulanmıştır. İlk kademede, paslanmaz çelik kutu içerisinde ticari Ekabor[®]2 tozuna gömülen numuneler 900 °C'de 1, 3 ve 5 saat süreyle borlandıktan sonra hızla temperleme fırınına transfer edilmiştir. Borlanan numuneler ikinci kademede 250, 300, 350 ve 450 °C'deki tuz banyosu içinde 1 saat süreyle temperledikten sonra fırın dışına alınıp soğutulmuş, bol suyla yıkanıp kurutulmuştur.

Temperleme işlemi, %50 NaNO₃ + %50 KNO₃ karışımından oluşan ergimiş tuz banyosunda gerçekleştirilmiştir. Her bir bortemperleme şartı için üçer numune kullanılmıştır.

Bortemperlenen aşınma numuneleri, aşınma cihazında bilye-disk (ball-on-disc) yöntemiyle farklı sıcaklıklarda (oda sıcaklığı, 150, 300 ve 450 °C) aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler, 10 N yük altında, 0,3 m/s kayma hızında ve 8 mm çapındaki Al₂O₃ bilyeye karşı 1000 m aşındırılmak suretiyle yapılmıştır.

Aşınma deneyinden sonra, aşınma izleri SEM'de incelenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir. Aşınma izi içerisinde dikkat çeken önemli bölgelerden nokta analizleri alınarak aşınma özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda bortemperleme ile küresel grafitli dökme demir yüzeyinde sert bir borür tabakası elde edilirken matrisin ösferritik yapıda oluşması sağlanmıştır. Bortemperleme işlemi ile küresel grafitli dökme demirin aşınma dayanımı tatmin edici şekilde artmıştır. Tüm ortam sıcaklıklarında döküm yapısına göre daha düşük aşınma hızı elde edilmiştir.

Aşınma izlerinin SEM'de incelenmesi ile aşınmanın küresel grafitlerin etrafında başladığı görülmüştür. Grafit kürelerinin üzerinde bulunan kaplama tabakası tekrarlı yüklemelerle yorulup kırılmakta ve kırılan borür tabakası daha sonra abrazif aşınmaya neden olabilmektedir.

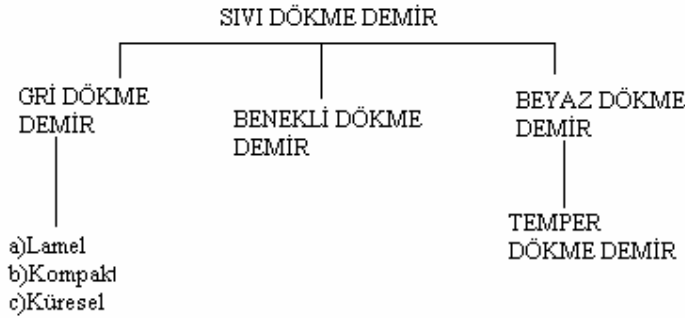
2. GENEL BİLGİLER

2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirler

2.1.1 Dökme Demirlerin Tanımı

Dökme demirler düşük sıcaklıkta ergirler, maliyetleri düşüktür ve döküme elverişlidirler. Aşınma dayanımları yüksek, basma dayanımları ise üstündür. Bu özellikleri sebebiyle geniş kullanım alanına sahiptirler. Dökme demirler içerisinde karbondan başka Mn, Si, S ve P vardır. Döküm içerisinde bulunan karbonun sementit yapmasından dolayı serttir ve biçimlendirmeye elverişli değildirler. Dökme demirde manganez fazla ise karbonun tamamı sementit yapar bu sebeple de sert ve rengi beyaz olur. Manganezi fazla olan dökme demirler kırık rengi beyaz olması sebebiyle Beyaz Dökme Demir adını alır. Silisyumu fazla olan dökme demirler de ise karbonun büyük bir kısmı serbest halde yani grafit halinde bulunur. Kesit kırılarak incelenecek olursa renk koyu ve siyaha yakın görülür. Bu sebeple silisyumu fazla olan dökme demirler. Esmer Dökme Demir veya Kır Dökme demir adını alırlar (Baydur 1998).

Yaygın olarak kullanılan dökme demir türleri, şematik olarak Şekil 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.1 Dökme demirlerin türlerinin şematik olarak sınıflandırılması.

Dökme demirlerin sınıflandırılması ilk olarak kırılgenliklerine göre yapılmıştır. Bu sınıflandırmada dökme demirler; Beyaz dökme demir ve Gri dökme demir olarak ikiye

ayrılmaktadır. Diğer bir sınıflandırma ise malzemenin mikroyapı ve kütleli özelliklerine göre yapılmaktadır. Dökme demirlerin mikroyapı ve kırılma özelliklerine göre sınıflandırılması Çizelge 2.1’de verilmektedir (Şen 1997).

Çizelge 2.1 Mikroyapı ve kırılma özelliklerine göre dökme demirlerin sınıflandırılması (Şen 1997).

Dökme Demir Sınıfları	Karbonca Zengin Faz	Matris ^(a)	Kırılma Rengi	Nihai Yapı Sebebi
<i>Gri Dökme Demir</i>	<i>Lamel Grafitli</i>	<i>P</i>	<i>Gri</i>	<i>Katılma</i>
<i>Küresel Grafitli Dökme Demir</i>	<i>Küresel Grafitli</i>	<i>F,P,O</i>	<i>Gümüş Gri</i>	<i>Katılma+Isıl İşlem</i>
<i>Kompakt Grafitli Dökme Demir</i>	<i>Kompakt Vermikülar</i>	<i>F,P</i>	<i>Gri</i>	<i>Katılma</i>
<i>Beyaz Dökme Demir</i>	<i>Fe₃C</i>	<i>P,M</i>	<i>Beyaz</i>	<i>Katılma+Isıl İşlem^(b)</i>
<i>Vermikülar Dökme Demir</i>	<i>Lamel Grafitli+ Fe₃C</i>	<i>P</i>	<i>Benekli</i>	<i>Katılma</i>
<i>Temper Dökme Demir</i>	<i>Temper Grafitli</i>	<i>F,P</i>	<i>Gümüş Gri</i>	<i>Isıl İşlem</i>
<i>Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir</i>	<i>Küresel Grafitli</i>	<i>B</i>	<i>Gümüş Gri</i>	<i>Isıl İşlem</i>

a) F; ferrit, P; perlit, Ö; östenit, M; martenzit, B; beynit,

b) Beyaz dökme demir genellikle ısıl işlemsizdir, fakat kalıntı gerilmeleri gidermek ve östenitik dönüşümü sağlamak için ısıl işlem yapılabilir.

Grafit şekline göre dökme demirler; Lamel grafitli, Küresel grafitli ve Temper grafitli olarak, matris yapısına göre ise; ferritik, perlitik, ferrit + perlitik, östenitik, martensitik ve beynitik dökme demirler olarak sınıflandırılmaktadır (Stafanescu 1990, Şen 1997).

Dökme demirler, döküm mikroyapılarına göre dört sınıfta toplanmaktadır.

1) Gri dökme demirler (GDD) ; En çok kullanılan dökme demir sınıfını oluşturmaktadır. Bileşimlerinde % 2,5–4 arasında karbon içeren gri dökme demirlerin içerdiği karbon oranının büyük bir kısmı serbest grafit lamelleri halinde bulunur. Gri dökme demirlerin mekanik özellikleri doğrudan doğruya döküm yapısına ve grafit morfolojisine bağlıdır. En düşük mukavemetli gri dökme demir grafit - ferrit karışımı

bir mikroyapıya sahiptir. Karbon miktarının artmasıyla birlikte malzemenin mukavemet ve sertlik değerlerinde artış gözlenmektedir. Gri dökme demirler, çok çeşitli özellikler göstermeleri sebebiyle geniş kullanım alanına sahiptirler. En önemli özellikleri, titreşim söndürme kabiliyeti, yüksek mukavemet ve ucuz olmalarıdır (Karsay 1990, Şen 1997).

2) Beyaz dökme demirler (BDD) ; Bu tür dökme demirlerde karbonun tamamı sementit ile bileşik haldedir ve mikroyapı sementit + perlitten oluşmaktadır. Ötektikaltı alaşımlar olan beyaz dökme demirler, hızlı soğuma şartlarında elde edilirler ve sert olduklarından aşınmaya karşı direnç gerektiren yerlerde kullanılırlar. Ancak, bileşimindeki sementitten dolayı, kırılığandır ve işlenmeleri zordur (Karsay 1990, Şen 1997).

3) Temper dökme demirler (TDD) ; Beyaz dökme demirin uygun sıcaklıklara tavlansak, yapısında bulunan sementit ve perlitin parçalanması sonucunda elde edilen dökme demirlerdir. Karbon içeriğinin büyük bir kısmını oluşturan ve temper grafit olarak bilinen düzensiz rozetler, ısıl işlem sırasında serbest kalan karbonun yavaş soğuması sonucunda oluşmaktadır. Temper dökme demir, ferritik ve perlitik olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Ticari uygulamalarda temper dökme demir denilince akla ferritik temper dökme demir gelmektedir. Ferritik temper dökme demir de kendi içinde beyaz temper döküm ve siyah temper döküm olmak üzere iki grupta toplayabiliriz. Beyaz temper döküm, oksitleyici bir ortamda elde edilir ve ferritik matris içerisinde temper grafitleri dağılmış haldedir. Siyah temper döküm, beyaz dökme demirin nötr bir ortamda tavlansak ile elde edilmekte ve üretim yöntemine bağlı olarak bünyesinde bir miktar bileşik karbon içermektedir. Perlitik temper dökme demirlerde bileşik karbon içerdiklerinden ferritik temper dökümlerden daha yüksek mukavemet gösterirler (Şen 1997).

4) Küresel grafitli dökme demirler (KGDD) ; Nodüler, sfero ve düktil demir gibi isimlerle de anılan bu tür dökme demirlerde karbon, grafit küreleri halindedir. Kupol ocaklarından alınan ve potalara dökülen eriyik dökme demir içerisine az miktarda seryum veya daha ucuz olan mağnezyum (% 0,1 kadar)katılarak dökme demir içindeki sementitin oluşumunu engelleyerek veya parçalayarak küresel şekilde grafit oluşumu

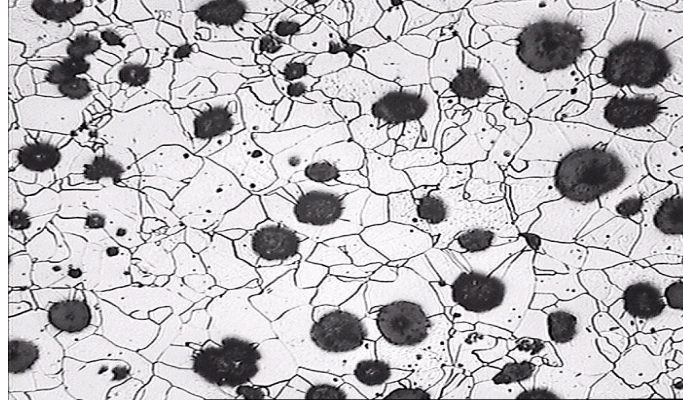
sağlanmaktadır. Küresel yapıdaki sementit fazı gayet homojen bir şekilde dağılmış haldedir. Nikel ve manganez dövülebilme özelliğini düşürmekle beraber dayanımını yükseltirler. Esmer dökme demire nazaran daha az manganez kullanılır. Çünkü küresel dökme demirde daha az miktarda küküt vardır. Silisyum ise dayanım, tokluk, aşınma direnci, makine işçiliğine elverişlilik ve elastikiyet kazandırır(Baydur 1998).

2.1.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Küresel grafitli dökme demir, birbirinden bağımsız olarak (British Cast Iron Research Association (BCIRA) ve International Nickel Company (INCO) tarafından geliştirilmiş ve ilk defa Amerikan Dökümcüler Cemiyetinin 1948'deki yıllık toplantısında döküm endüstrisi için yeni bir malzeme olarak tanıtılmıştır. Bu tip dökme demir için "sfero", "nodüler" ve "küresel grafitli dökme demir adları kullanılmıştır. Yurdumuzda kabul edilen daha çok Küresel Grafitli Dökme Demir tabiridir.

BCIRA yöntemi esas olarak, gri dökme demirle aynı bileşimde olan hiper ötektik dökme demirlere ergimiş halde seryum(Ce) ilavesinden ibarettir. Seryum'un büyük kısmı, bileşimdeki kükürdü gidermekte ve geri kalan yaklaşık % 0.02 Ce ise, grafitlerin lamel yerine küre şeklini almalarını sağlamaktadır. INCO yönteminde ise hipo ve hiper ötektik dökme demirlere benzer olarak magnezyum ilavesi yapılmaktadır. Bu yöntemlerin ilk tanıtılmasından sonra bugün hemen her yerde uygulanan magnezyum yöntemi daha ekonomik oluşu nedeni ile tercih edilmiştir.

Küresel grafitli dökme demir çeliğinkine benzer bir matris içinde dağılmış küre şekilli grafitlerden oluşan bir yapıya sahiptir (Resim 2.2). Yapı açısından gri dökme demirden tek ayrıcalığı grafitlerin şeklidir. Küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri grafit şekili ve büyük ölçüde matris yapısı tarafından etkilenmektedir. Küresel grafitli dökme demirler, gri dökme demirin başlıca avantajları (düşük ergime derecesi, iyi akışkanlık ve dövülebilme, mükemmel işlenebilme ve iyi kesme mukavemeti) ile çeliğin mühendislik yönünden avantajlarına (yüksek mukavemet, tokluk, süneklik, sıcak işlenebilme ve sertleşebilme) birleştiren yeni bir malzeme veya dökme demirler ailesi içinde yeni bir grubu oluşturmaktadır (Forrest 1987, Şen 1997).



Resim 2.1 Alaşımsız küresel grafitli dökme demirin dökülmüş haldeki mikroyapısı, (Dağlama %2 Nital) (Erdoğan 2007).

Küresel grafitli dökme demirler çeşitli normlara göre sınıflandırılmıştır. TSE (Türk Standartları Enstitüsü) standardına göre Küresel Grafitli Dökme demirlerin sınıflandırılması Çizelge 2.2’de verilmektedir. Burada, DDK sembolü dökme demir Küresel Grafitli anlamına gelmektedir (Şen 1997).

Çizelge 2.2 TSE standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması (Şen 1997).

Kısa Gösterilişi	Çekme Muk. (MPa)	Akma Muk. (MPa)	% Uzama	Sertlik HB	Mikroyapı
DDK 40	420	280	12	140-201	Daha çok ferritik
DDK 50	500	350	7	170-241	Ferrit + Perlit
DDK 60	600	400	3	192-269	Perlit + Ferrit
DDK 70	700	450	2	229-302	Daha çok perlitik
DDK 80	800	500	2	248-352	Perlitik
DDK 35.3	350	220	22	-	Ferritik
DDK 40.3	400	250	18	-	Ferritik

2.1.3 Küresel Grafitli Dökme Demirlere uygulanan yüzey sertleştirme işlemleri

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

2.1.3.1 Alev, İndüksiyon veya Lazerle Yüzey Sertleştirme

Bu yöntemlerde çok kısa sürelerde ısıtma sağlanabilmesi sebebiyle, DDK - 70 DDK - 80 perlitik küresel grafitli dökme demirler tercih edilmektedir. Ferrit içermeyen KGDD'ler, kolayca su alma kabiliyetine sahip olduklarından dolayı tamamen sertleşmemesi için östenitleme sıcaklığında çok kısa süre tutulurlar. Döküm haliyle ferritik matrise sahip olan KGDD'nin yüzeyini homojen olarak östenitik yapıya dönüştürmek için uzun süreler gerekmektedir. Bu sebeple, yüzey sertleştirme işleminde daha çok perlitik KGDD'ler tercih edilmektedir. Yüzeyde oluşturulan sert tabakanın derinliği çeliklerden farklı olarak, sertleşebilme kavramından çok, ısı geçişine bağlıdır. Yüzeyi sertleştirilmiş alaşımlı KGDD, artan sertleşebilirlik kabiliyetiyle birlikte artan kalıntı östenit mevcudiyetiyle daha düşük sertlik değerine sahip yüzeyler oluşmaktadır. Pratik olarak elde edilebilecek maksimum sertlik 60 HRC'dir (Stafanescu 1990, Karl 1990).

2.1.3.2 Nitrüleme

Nitrüleme işlemi, küresel grafitli dökme demirlerin, parçalanmış amonyak (NH_3) içerisinde 2-3 saat tutulması ile gerçekleşmektedir. Bu işlem sonucunda, 60 HRC sertlik elde edilebilmektedir. İşlem sonunda, küresel grafitli dökme demirlerin 108 devirde yapılan yorulma deneyleri sonucu göstermiş oldukları yorulma dirençleri, 172-210 N/mm^2 'den, 276-289 N/mm^2 'ye ulaşmaktadır (Şen 1997).

2.1.3.3 Alüminyumlama

Alüminyumlama işlemi, küresel grafitli dökme demirlerin 700 °C’de 20 dakika süre ile sıvı alüminyum banyosu içerisinde tutulmasıyla gerçekleşmektedir. Yüzeyi alüminyumlanmış küresel grafitli dökme demirlerin oksidasyona karşı dirençleri çok iyidir (Stafanescu 1990, Şen 1997).

2.1.3.4 Borlama

Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması, 750 – 1000 °C arasında katı, sıvı veya gaz ortamında 1–10 saat süre ile gerçekleşmektedir. Bor kaplanmış dökme demirler, çeliklere göre daha düşük sürtünme katsayısı değerine sahiptirler. Yüzey sertlikleri ise oluşan FeB ve Fe₂B fazları sebebiyle 1300–2000 kg/mm² değerine ulaşabilmektedirler. Hareketli makina parçalarında, kollarda ve birçok kalıpta, yüzeyi borlanmış küresel grafitli dökme demirler kullanılmaktadır (Sınha 1991, Şen 1997).

2.1.4 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları

Küresel grafitli dökme demirlerin, diğer dökme demirler ve çeliklere göre sahip olduğu üstün özellikleri sebebiyle, kullanım alanı ve üretim miktarı her geçen gün artmaktadır. Bu kullanım alanları içerisinde en çok payı otomotiv ve mimari uygulamalar almaktadır. Bunlardan bazıları; krank milleri, ön teker destek kolları, direksiyon bağlantılarının karmaşık şekilleri, fren diskleri, motor bağlantı rotaları, serbest kollar, tekerlek poyraları, güç iletim bağlantıları, turbo yuvaları ve manifoldları için yüksek sıcaklık uygulamaları ve yüksek güvenlik valfleri sayılabilir. Ayrıca küresel grafitli dökme demir için boru endüstrisinde diğer en büyük kullanım alanını teşkil etmektedir (Stafanescu 1990, Şen 1997).

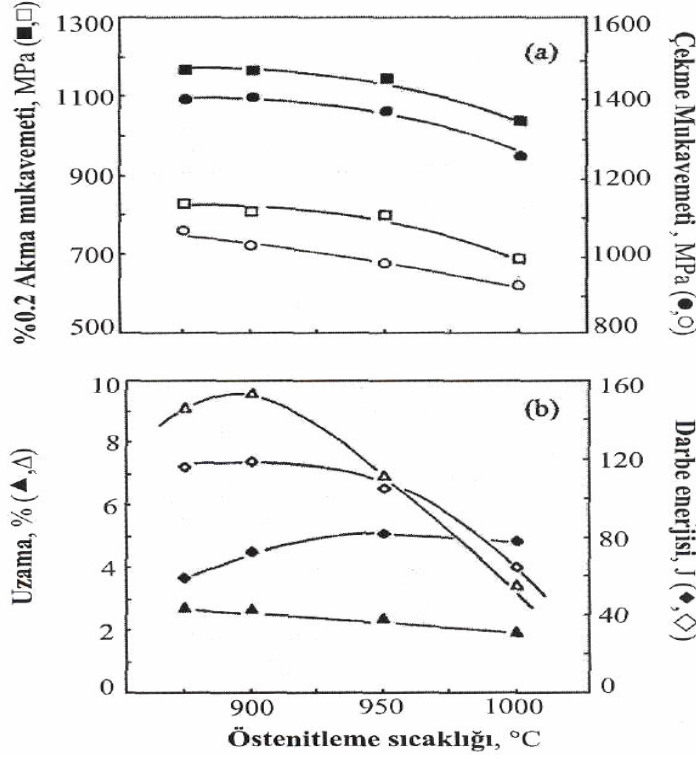
2.2 Östempereleme

2.2.1 Östemperelemiş Küresel Grafitli Dökme Demirler

Küresel grafitli dökme demirlerin ticari üretimlerinde, son dönemlerdeki en önemli gelişme, östempereleme olarak bilinen izotermal bir ısıtma işlemle matris yapının beyazlık yapıya dönüştürülmesidir. Verilen bir bileşimdeki küresel grafitli dökme demirin östempereleme sonucu elde edilecek mekanik özelliklerine, östenitleme süresi ve sıcaklığı, alaşım elementlerinin miktarı doğrudan etki etmektedir. Aynı zamanda nodüller, sfero ve düktil demir gibi isimlerle anılan bu tür dökme demirlerde karbon, grafit küreleri halindedir. KGDD'ler, aynı matris yapıdaki gri dökme demirlerin iyi dökülebilme, iyi işlenebilme gibi özelliklerinden daha iyi mekanik özellik sağlamaktadır. Yapılarındaki küresel grafitlerin yağlayıcı etkisi nedeniyle, krank mili, dişli gibi aşınma dayanımı gerektiren birçok uygulamada kullanılmaktadır. Çalışma koşullarında ani sıcaklık değişimlerine karşı küresel grafitli dökme demirler, gri dökme demirlere nazaran daha dirençlidir (Sağın 2007).

2.2.1.1 Östenitleme İşlemi

Östenitleme işlemi; parçaların genellikle 850–950 °C sıcaklıkları aralığında kesit kalınlığına bağlı olarak belirli bir süre ısıtma işlemidir. Yüksek östenitleme sıcaklığı östenit içerisindeki karbon miktarının artmasına neden olur. Bununla birlikte malzemenin sertleşmesinde de önemli rol oynar. Fakat östenitleme sıcaklığının artmasıyla östempereleme işlemi sırasında yapının ösferrite dönüşüm süresini arttırdığından mekanik özellikleride olumsuz etkiler bu ise istenmeyen bir durumdur (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Östenitleme sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi (■ ● ▲ ◆ 300 °C 'de östemperlenmiş, □ ○ △ ◇ 375 °C de östemperlenmiş) (Kayalı 2006).

Ayrıca östenitleme sıcaklığı, tüm parçanın ısınmasını ve östenitin karbona doymasını sağlayan gerekli östenitleme sıcaklığının elde edildiği östenitleme süresi, minimumda tutulmalı. Parça yüzeyinde ise dekarbürizasyonu ve pullanmayı engellemek için koruyucu bir atmosfer oluşturmak gerekmektedir. Östenitleme işleminde koruyucu atmosferli bir fırın yerine tuz banyosu kullanmak da mümkündür. Bu tuz banyosuna ait kimyasal bileşim aşağıda verilmiştir (Aslantaş 2003).

% 45NaCl + % 55KCl.....675–900 °C

% 20NaCl + % 80BaCl₂.....675–1000 °C

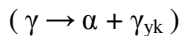
2.2.1.2 Östemperleme Isıl İşlemi

Östemperleme; malzemenin yüksek bir sıcaklıkta (850–950 °C) östenitlenmeden sonra 250–450 °C sıcaklık aralığındaki tuz banyosunda hızla su verilme ve dönüşümün tamamlanması için bu sıcaklıkta yeterli bir süre (0,5–4 s) tutulmasını takiben oda sıcaklığına soğutulması kademelerini kapsayan izotermal bir ısıl işlemdir (Şekil 3.2) (Rundman 1991, Yalçın 1997).

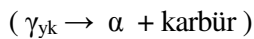
Östemperleme sıcaklığına su verme işlemi Şekil 2.3'den de takip edilebileceği gibi beynitik yapının elde edilebilmesi için ferritik ve perlitik dönüşüme izin vermeyecek derecede hızlı olmalı ve martenzit başlama (Ms) sıcaklığına varmadan kesilmelidir. KGDD'lerin östemperlenmesiyle ortaya çıkan mikroyapı çeliklerden farklıdır. Çeliklerde östemperleme sonucu mikroyapı ferrit ve karbürden oluşurken KGDD'de beynitik ferrit ve yüksek karbonlu östenitten oluşmaktadır. Ancak, yüksek silisyumlu çeliklerde de beynitik ferrit+yüksek karbonlu östenit yapısı elde edilebilmektedir. Bu da çeliklerde elde edilen klasik beynit yapısının oluşmasını silisyumun engellediğini göstermektedir. Görüldüğü gibi ÖKGDD yapısına da beynit demek kavram karışıklığına sebep olmakta. Bu nedenle bazı araştırmacılar ÖKGDD beynit yapısının “ ösferrit ” olarak isimlendirmenin daha doğru olacağını belirtmişlerdir (Kovacs 1990, Yalçın 1997).

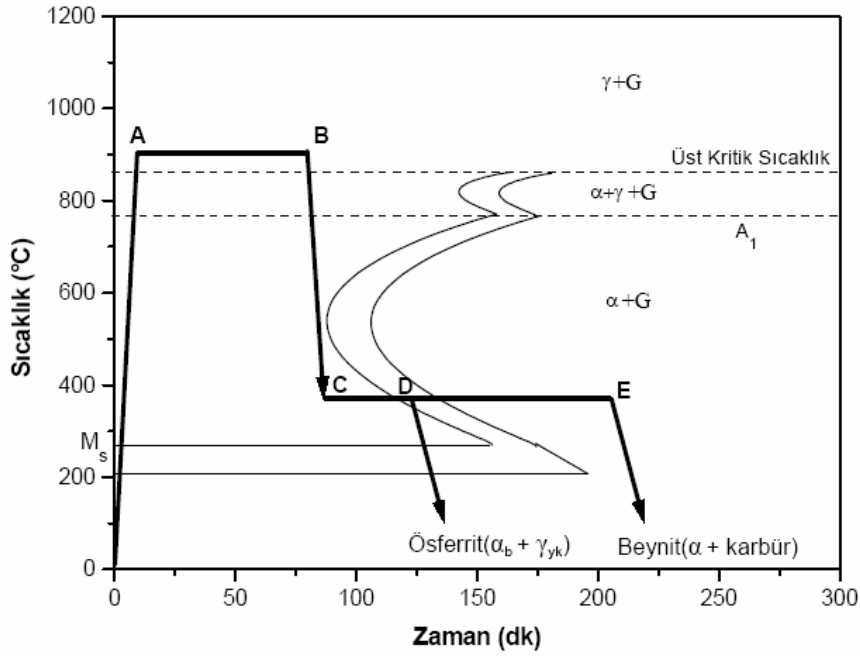
Dökme demirlerde östemperleme işlemi iki kademeli bir reaksiyonla gerçekleşmektedir (Şekil 3.2), (Yalçın 1997, Aslantaş 2003).

I. Kademe: Östenitin beynitik ferrit ve karbonca zengin östenite ayrışması (Yüksek karbonlu östenit + Asiküler ferrit)



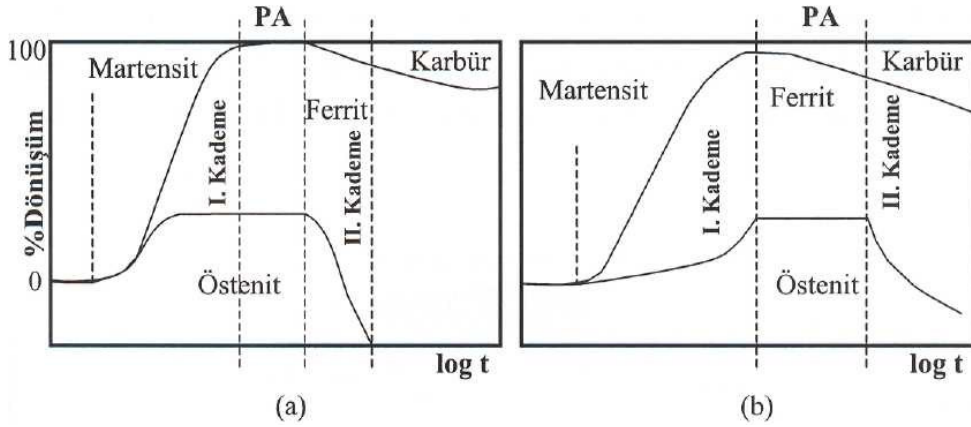
II. Kademe: Yüksek karbonlu östenitin ferrit ve karbüre ayrışması (Beynitik ferrit + Karbür)





Şekil 2.3 Küresel grafitli dökme demir için östemperleme ısıl işleminin şematik olarak gösterimi (Erdoğan 2007).

I. kademede beynitik ferrit arayüzey ve tane sınırlarında çekirdeklenir. Büyüyen ferrit fazından atılan karbon, östenit fazı içerisinde birikmekte. Böylelikle kararlı hale gelen östenitin ferrite dönüşümü engellenip I. reaksiyon tamamlanır. Östemperlemenin sürmesiyle yüksek karbonlu östenit termodinamik olarak daha kararlı olan ferrit ve karbüre ayrışmaya başlar. II. kademe reaksiyonun tamamlanmasıyla çeliklerde görülen ferrit ve karbürden oluşan klasik beynit yapısı elde edilir. ÖKGDD'lerde II. kademe reaksiyon tokluğu düşürdüğü için istenmez. Tamamlanmamış I. kademe reaksiyon da aynı şekilde arzu edilmez, çünkü oluşan düşük karbonlu kararsız östenit soğuma esnasında martenzite dönüşerek mekanik özellikleri olumsuz yönde etkiler. Dolayısıyla, I. reaksiyonun tamamlandığı, II. reaksiyonun ise henüz başlamadığı bir zaman dilimi optimum mekanik özelliklerin elde edildiği aralık olmakta ve "işlem aralığı" olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.4).

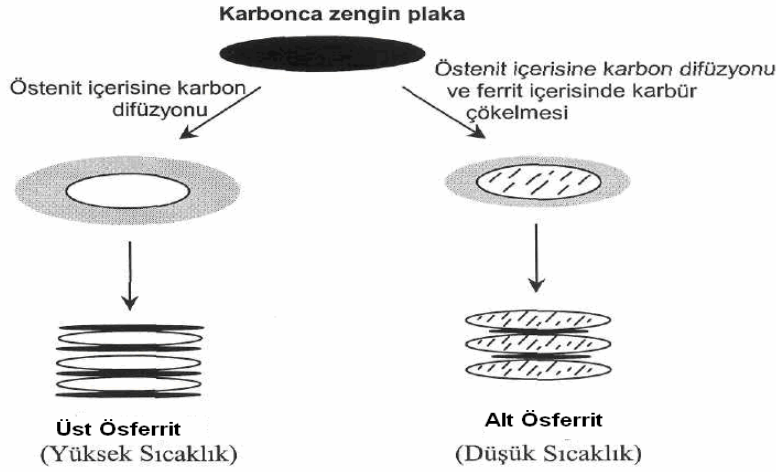


Şekil 2.4 Alaşımsız KGDD’de (a) Üst beynit ve (b) Alt beynit dönüşümleri için östemperleme süresiyle mikroyapıdaki değişimlerin ve işlem aralığının şematik olarak gösterimi (Aslantaş 2003).

Görüldüğü gibi arzu edilen tam östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin mikroyapısı ancak işlem aralığında elde edilmektedir. Östemperleme sıcaklığına bağlı olarak I. reaksiyon sonunda iki tür ösferrit yapısı oluşmaktadır (Yalçın 1997).

Yüksek östemperleme sıcaklıklarında ($> 330\text{ }^{\circ}\text{C}$) ferritin çekirdeklenme hızı düşük ve karbon difüzyon hızı daha yüksektir. Dolayısı ile karbonun çoğu büyüyen ferrit plakaları arasındaki östenite katılma fırsatı bulmaktadır. Böylece östenit karbonca zenginleşerek kararlı hale gelir. Sonuçta ferrit tabakaları ve % 40’a kadar yüksek karbonlu östenit içeren bu yapı üst ösferrit olarak adlandırılır (Aslantaş 2003).

Düşük östemperleme sıcaklıklarında ($235\text{--}330\text{ }^{\circ}\text{C}$) ise ferrit iğnelerinin büyüme hızı yüksek fakat karbon difüzyon hızı düşüktür. Bu nedenle beynitik ferrit karbona doymuş vaziyettedir. Östemperleme işleminin erken bir kademesinde bu karbon, ferrit iğneleri içine çökeler ve bu yapı beynitik karbür olarak isimlendirilir. Bu karbürden östenite az bir karbonun atılmasıyla östenitin ferrite dönüşmesi devam eder ve oda sıcaklığına soğumayı takiben geriye çok az miktarda yüksek karbonlu östenit kalır. Beynitik ferrit ve % 10’a kadar yüksek karbonlu östenit içeren bu yapı ise alt ösferrit olarak adlandırılmaktadır (Yalçın 1997). Şekil 2.5’de alt ve üst ösferrit oluşum mekanizması verilmiştir.



Şekil 2.5 Alt ve üst ösferrit oluşum mekanizması (Aslantaş 2003).

Östempereleme işlemi malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Daha düşük bir mukavemet ve sertliğin yanında daha büyük bir yüzde uzama ve kırılma tokluğu istiyorsak östempereleme sıcaklığı 350–400 °C arasında seçilmelidir (Yalçın 1997). Bunun tersine daha yüksek bir mukavemet ve daha büyük bir aşınma direnci istiyorsak östempereleme sıcaklığı 350 °C'nin altında seçilmelidir. Östenitleme işleminde olduğu gibi östempereleme işleminde de atmosfer kontrollü bir fırın ortamı gerekmektedir. Bunun için yine östempereleme işleminde de tuz banyoları kullanılmaktadır. Bu tuz banyoları nitrit ve nitrat tuzlarının karışımından hazırlanmaktadır.

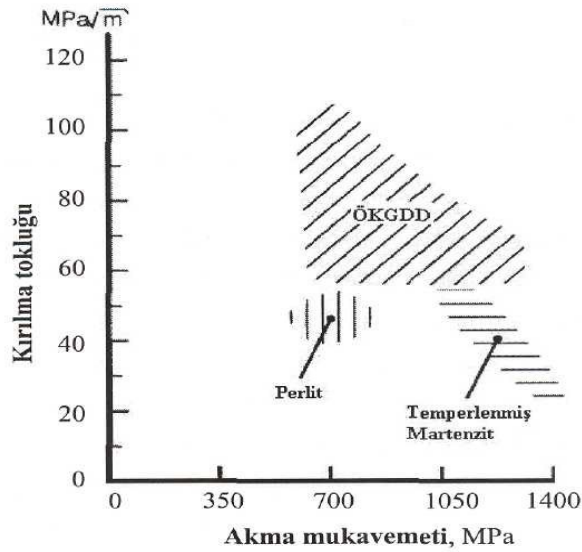
2.2.1.3 ÖKGDD'lerin Mekanik Özellikleri

ÖKGDD malzemeler % 1,7'lik bir uzama ile birlikte çekme mukavemetleri 1700 MPa'a kadar çıkabilir. Bununla birlikte elde edilen yüksek sertlik aşınma direncinin öncelikli olduğu alanlarda tercih edilirler. Pratik uygulamalarda iki farklı ÖKGDD malzeme kullanılmaktadır (Aslantaş 2003).

A) Genel itibariyle matriks alt ösferrit özelliği gösterir ve düşük östemperleme sıcaklıklarında elde edilen bir dökme demir yapısıdır. Bu dökme demirler yüksek sertliğe (> 400 HB) ve mukavemete sahiptirler. Bu nedenle dişlilerde ve yüksek temas gerilmelerine karşı direnç istenen uygulamalarda kullanılırlar.

B) Matriks'in üst ösferrit özelliği gösterdiği ve yüksek östemperleme sıcaklıklarında elde edilen bir yapıdır. Bu dökme demirin sertlik değerleri 260-360 HB arasında değişmektedir. Böylelikle yüksek bir tokluğa ve yorulma ömrüne sahip olunur.

Şekil 2.6'da geleneksel dökme demirler ile ÖKGDD malzemesine ait kırılma tokluğu-akma mukavemeti ilişkisi verilmiştir. Görüldüğü gibi ÖKGDD malzemesi diğer geleneksel dökme demirler ile aynı akma mukavemetine sahip olmakla birlikte daha büyük bir kırılma tokluğuna sahiptir.



Şekil 2.6 Çeşitli malzemelerle ÖKGDD'lerin kırılma tokluğu-akma mukavemeti ilişkisinin karşılaştırılması (Aslantaş 2003).

2.2.1.4 ÖKGDD'lerin Avantaj ve Sınırlamaları

ÖKGDD'ler sahip olduğu avantajlar sayesinde son yıllarda çelik malzemeler yerine yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bazı sınırlamalar da yok değildir. Ancak, teknik açıdan avantajları diğer malzemelere karşı rekabet gücünü artırmaktadır (Yalçın 1991).

Teknik avantajları;

- Yüksek çekme özellikleri yanında iyi tokluk, süneklik ve yorulma mukavemetine sahiptir.
- Aşınma ve çizilmeye karşı direnci yüksektir. Sürtünme katsayısı düşüktür. Yetersiz yağlama (hatta yağlamasız) bir ortamda hasara uğramadan 10 dakika çalışabilir.
- Çelikten % 40 daha hızlı titreşim sönümlenme kapasitesine sahiptir.
- Aynı boyutlardaki çelik dişliye göre % 10 daha hafiftir.
- Elastik modülü çeliğinkinden daha düşüktür. Dişlinin dişleri karşılaştığında temas alanı genişler. Dolayısıyla, temas gerilmeleri düşüktür ve bu dişlilerin oyuklanma yorulma problemini azaltır.
- Yapıda bulunan kalıntı östenit deformasyonla giderilebilir.
- Östemperlemeden önce iyi işlenebilirlik özelliği gösterir. Isıl işlem esnasında deformasyon daha azdır.
- Çentik hassasiyeti çelikten daha azdır. Bu yüzden yüzey işlemlerinin çelikteki kadar hassas olmasına gerek yoktur.

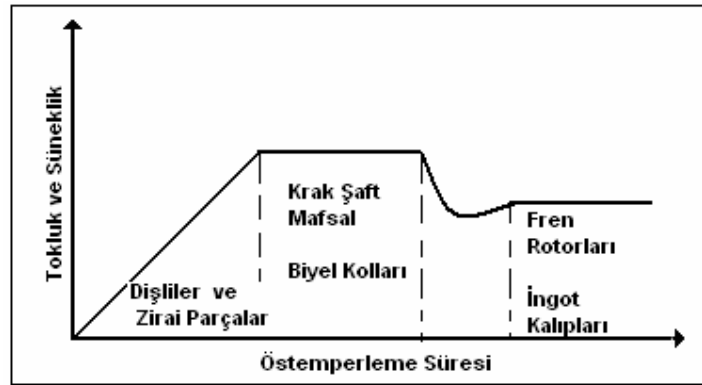
ÖKGDD'lerin sınırlamaları;

- En büyük problem östemperlemeden sonra işlenebilirliğin oldukça kötüleşmesidir. En sert sınıfı ancak taşlama tezgâh'ın da işlenebilir.
- Çelikten daha düşük elastik modül'e sahiptir. Bunun için daha fazla elastik deformasyona maruz kalır. Ancak bu özellik dişlilerde oyuklanma yorulma riskini azalttığından bazen faydalı da olabilmektedir.
- Östemperleme nispeten küçük parçalar için çok uygundur. Kalın kesitli parçalar alaşımlama gerektirdiğinden fazla ekonomik değildir.

- Diğer KGDD'ler gibi kaynak yapılabilir. Fakat eriyen ve ısının tesiri altındaki bölgeler, karbürler ve martenzit içerir. Her ikisi de sert ve kırılgan olduğundan malzemenin mekanik özelliklerini bozar.
- ÖKGDD kabul edilebilir darbe ve kırılma tokluğu değerlerine sahip olsa da dövme çeliklerinki kadar yüksek değildir.
- Servis şartlarında sıcaklık östempereleme sıcaklığına çıkacak olursa matris yapısının dönüşümü söz konusu olur ve bu mekanik özellikleri bozar.

2.2.1.5 ÖKGDD'lerin Kullanım Alanları

ÖKGDD son yıllarda daha önce dökme demirlerin kullanılmasının uygun olmadığı birçok alanda başarıyla kullanılmaya başlanmıştır. Beynit reaksiyonunun idealize kademelerine bağlı olarak bazı uygulamalar Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Bazı ziraat aletleri ve dişliler öncelikle aşınmaya maruz kalmaktadır. Dolayısıyla, bu tür parçaların mukavemet ve aşınma dirençleri yüksek olmak zorundadır. Buna karşılık krank mili, direksiyon kolu, piston kolu ve bir kısım dişlilerin darbeli veya alternatif yükler altında çalıştıkları bilinmektedir. Sertlik ve mukavemetin belki birinci dereceden etkili olmadığı bu tür uygulamalarda tokluk ve yorulma özellikleri son derece önemlidir. Görüldüğü gibi östempereleme şartları dizayn edilecek olan parçadan istenen mekanik özelliklere göre belirlenmelidir (Yalçın 1997).



Şekil 2.7 İdealize edilmiş tokluk-östempereleme zaman eğrisine bağlı olarak ÖKGDD için bazı kullanım alanları (Yalçın 1997).

2.3. Borlama

2.3.1 Bor Mineralleri

Bor, periyodik tablonun III A grubunda yer almaktadır. Bor elementinin atom numarası 5 ve atom ağırlığı 10,81 gram'dır. Bor atomunun yarıçapı, 0,46 Å ve ergime sıcaklığı 2092 °C'dir. Bor elementinin valansı +3 ve iyon yarıçapı 0,23 Å'dur. Bor, rombohedral kristal yapısına sahiptir ve latis parametreleri sırasıyla $a=1,093$ nm ve $c=2,381$ nm'dir. Ayrıca bor amorf yapıda da olabilmektedir (Şen 1997).

Elmasta en sert madde olan ve doğada serbest olarak bulunmayan bor oksijenle birleşerek bor tuzları yada silikatlar halinde bulunmaktadır. Yer kabuğunun yapısında ise % 0.001 (10 ppm) oranında bor bulunmakta olup. Doğada bulunan en yaygın bileşikler sodyum, kalsiyum, magnezyum bileşikleridir.

2.3.2 Borlamanın Tanımı

Metal veya alaşımlarının yüzeylerine bor elementinin yayındırıldığı ve borlama işlemi olarak isimlendirilen yöntem, ilk kez 1895 yılında Moisson tarafından Rusya'da uygulanmıştır (Matuschka, 1981).

Borlu tabaka veya tabakaların özelliklerini; malzeme bileşimi, borlama ortamındaki bor atomlarının kimyasal aktiviteleri, borlama işlem sıcaklığı ve süresi, ilave ısıl işlemler ve seçilen borlama yöntemi etkiler(Tsipas ve Rus 1987).

Borlama ile elde edilen en büyük kazanç sertliktir. Borlama ile karbon çeliklerinde 1800–2000 HV, alaşımlı çeliklerde 2500–2800 HV ve yüksek hız çeliklerinde 2800–3300 HV'lik yüzey sertlikleri elde edilir. Borun oksijene karşı ilgisi fazla olduğundan yüzeyde koruyucu ince bir oksit film tabakası oluşmakta ve bu oksit film tabakası yüzeyde katı yağlayıcı vazifesi görüp, sürtünmeli aşınma sırasında metal-metal temasını geciktirerek sürtünme katsayısını düşürmekte ve yüzeylerin birbirine kaynamasını engellemektedir. Borlamayla Wolfram karbürün sertliğine eş değer bir sertliği elde edilir(Özsoy 1991).

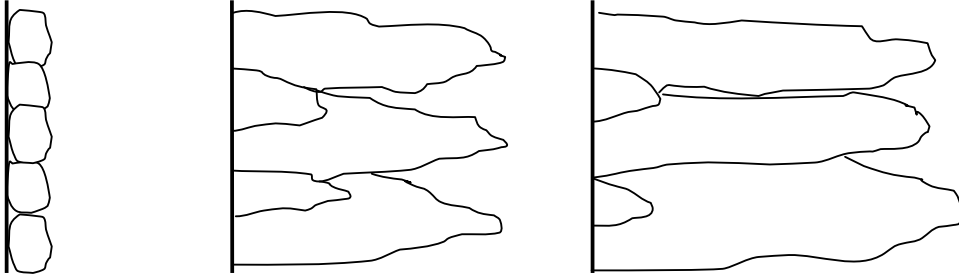
Tüm yüzey işlemleri yöntemlerinde olduğu gibi borlamada da işlem öncesi yapılması gereken bazı ön hazırlıklar söz konusudur. İşlemden önce iş parçasının üzerinde varsa bulunan yağ film tabakasının ve kesme sıvılarının tam anlamıyla temizlenmesi gerekir. İşlemin uygulanacağı yüzeyde paslanma varsa tel fırça ile parçanın temizlenmesi gerekir. Parça yüzeyinin düzgünlüğü borlama kalitesine etkisi olduğundan, yüzeyler mümkün olduğunca düzgün hale getirilerek işleme tabi tutulur. Borlama sonucu, parçaların boyutlarında elde edilen borür tabakası kalınlığının % 20-30'um oranında bir büyüme olduğundan, borlanacak işlem parçasında bu durum göz önünde bulundurularak ilk ölçümlendirme yapılmalıdır (Hunger ve Trute 1994). Borlama, metal ve alaşımların yüzeylerinde sertlik, aşınma direnci ve korozyon direncini artırırken, aynı zamanda bu özellikleri yüksek sıcaklıklarda korumak ve erozyon direncini artırmak amacıyla kullanılmaktadır (Şen 1997).

2.3.3 Borlama İşlemi

Borlama; termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Borlama, bor elementinin yüksek sıcaklıkta metal yüzeyine yayılması ile yüzeyde borür tabakası elde etme işlemidir. Demir borürler termal ve elektrik iletkenliği gibi özelliklerinden başka yüksek sertlik gibi tipik seramik özellikleri de gösteren bileşiklerdir. Tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları gibi mikro hatalar ile yüzey pürüzlülükleri ve çizikler gibi yüzeyin daha reaktif olduğu yerler borür tabakası oluşumu için başlangıç noktalarıdır. Bu noktalarda Fe_2B çekirdekleri oluşur ve gelişir (Bayça ve Şahin 2004).

Borlamanın birinci aşamasında borlayıcı ortam ve nesnenin yüzeyindeki reaksiyon bileşenleri arasında oluşur. Taneler yüzeyde çekirdek oluşturmaktadır. Borlama süresi ile çekirdek oluşumu artar ve ince bir bor tabakası elde edilir. Bor, Fe_2B ve FeB yapısında çeliğin yüzeyine yayılır. Borlama işlemi sırasında, ilk borür çekirdeği numunenin yüzeyinde oluşmaktadır, (Şekil 2.8) oluşan ilk borür çekirdeği numune içinde büyür. Bor atomları kafes yapının 001 doğrultusunda daha hızlı yayıldığı için FeB ve Fe_2B 001 boyunca yönelir. Bu yüzden borür taneleri 001 yönünde yüzeye dik daha hızlı büyür. Borür tanelerinin diğer yönlerde büyümesi daha yavaştır. Bu nedenle

kolonsal yapı oluşur. Önce Fe₂B fazı oluşur, ortamda yeterince bor konsantrasyonu varsa FeB fazı da oluşur. İlk önce oluşan Fe₂B fazı uzun bir sürede büyümektedir. Borür tabakaları çeliğin yüzeyinden içeriye doğru FeB_x, FeB, Fe₂B yapısında oluşur. Borlamanın son aşamasında sadece FeB fazı oluşur. FeB fazı Fe₂B fazından daha kısa sürede büyür. Bu yüzden FeB fazının dokusu Fe₂B fazı kadar güçlü değildir (Bayça ve Şahin 2004).

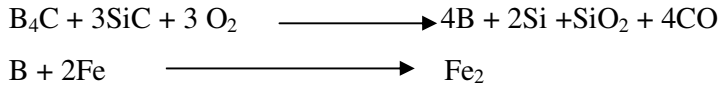


Şekil 2.8 Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması(Bayça ve Şahin 2004).

2.3.4 Borlama Yöntemleri

a) Katı (Paket) Borlama

Borlama ortamı olarak katı maddelerin kullanıldığı yöntemdir. B₄C, KBF₄ ve SiC içeren toz veya granülden oluşan bir karışım ile malzemenin etrafı sarılır. Bu işlem koruyucu atmosfer altında veya sıkı kapatılmış kutularda yapılır. Burada amaç borlama ortamına dışarıdan oksijen akışını kesmektir. Böylece reaksiyon ortamı korunmuş olur. İşlem sırasında ısıya dayanıklı malzemeden yapılmış kutular kullanılır. Borlama 800-1100 °C sıcaklık aralığında ve 2-10 saat süreyle inert bir atmosferde yapılır. Katı borlama işleminde yer alan reaksiyonlar şunlardır.



Katı borlamada kullanılan bor bileşikleri; borkarbür, ferrobor, elementer bordur. Bunlardan en çok kullanılanı, borkarbürdür. Aktivatör olarak sodyum borflorür, potasyum bor florür, baryum florür, sodyum karbonat, amonyum klorür ve redükleyici olarak silisyum karbür, grafit ve sodyum klorür gibi maddeler kullanılır. Borlama maddesinin tane boyutu küçüldükçe temas yüzeyi artar. Temas yüzeyinin artması yayınımlı kolaylaştırır, dolayısıyla borür tabakasının kalınlığı artar. (Bayça ve Şahin 2004).

En yaygın kullanılan bu yöntem, taban malzemesi üzerine bor veya boronkarbid bileşiminde aktivatörlerle paketlenmesiyle yapılan borlamadır. Metot yalnızca küçük boyutlu parçalara uygulanmaktadır. Demir dışı alaşımlardan Ti, Ni, Ta esaslı alaşımlar bu yöntemle borlanabilmekte ve bunların borürleri 3200 HV sertliğe kadar ulaşmaktadır. Bu yöntemde işlem parametrelerinin kontrolü çok zor olması sonucu, otomasyon mümkün olmayıp elle çalışma mecburiyeti getirmektedir ve atık ürünlerin çevreye verdiği zarar gibi dezavantajları mevcuttur. En yaygın kullanım şekli olan paket borlama olarak bilinen katı borlamada paket karışımları malzemenin cinsi de dikkate alınarak farklılık arz eder. Borlama, borlama etkeni (SiC'le ince ince toz haline getirme), aktivatör (BF₃ gazı) ve bir oksit azaltıcı (silika: asitle sulandırılmış kum) karışımından ibarettir (Karakan vd. 2002).

Tipik ticari borlama toz karışımlarının bileşimleri aşağıda verilmiştir (Sinha 1991, Şen 1997).

%5 B₄C, %90 SiC, %5 KBF₄

%50 B₄C,%45 SiC, %5 KBF₄

%85 B₄C,%15Na₂CO₃

%95 B₄C, %5 Na₂B₄O₇

%84 B₄C, % 16 Na₂B₄O₇

Amorf bor (%95–97)

%95 Amorf bor, %5 KBF₄

%79 B₄C, % 16 Na₂B₄O₇, %5 KBF₄

b) Sıvı Borlama

Metalik malzemelerin bor kompozisyonlu erimiş tuz banyosuna daldırılmalarıyla yapılmaktadır. Erimiş tuz banyosu değişik oranlarda B_4C , BaO , KCl , $NaCl$ içerir. BaO ilavesi difüzyonu önemli ölçüde iyileştirir. Oluşan demirbor tabakalarının tipik kalınlıkları 100-200 nm'dir. Ancak sıvı ortamda borlama işleminde mevcut olan zehirlilik, patlayıcılık, doğal ve çevresel kirlilik gibi dezavantajları kullanımını sınırlamaktadır (Karakan vd. 2002).

c) Gaz Borlama

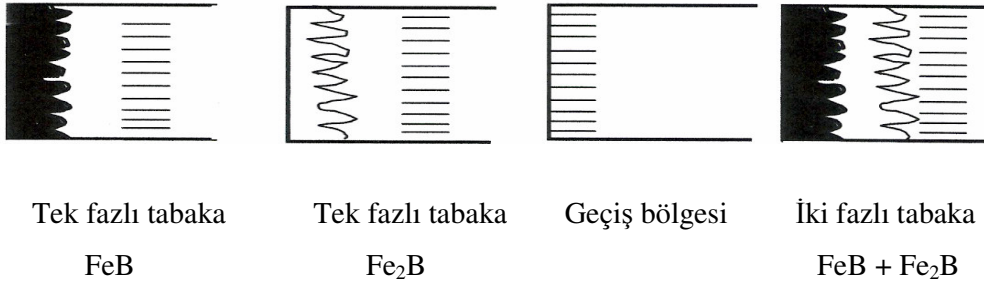
Boron hidritlerin termal parçalanması sonucu elde edilen buharla yapılan borlama işlemidir. Bu işlemde sıcaklık yükseltilebilir ve daha homojen difüzyon tabakası elde edilebilir. İşlem özellikle karışık şekilli parçaların borlanması ve homojen tabaka elde edilmek istendiğinde tercih edilen bir yöntemdir (Karakan vd. 2002).

d) Plazma Borlama

Demir esaslı ve demir dışı metalik malzemelere uygulanan, Ar , H_2 gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl_3 , B_2H_6 , BF_3 , $B(OCH_3)_3$ (trimetilborat) kullanarak, 800-1000 °C sıcaklıkta yaklaşık 10^{-2} Pa gibi bir düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan borlamadır. Mikroyapı ve demirbor tabakalarının büyümesi, işlem sıcaklığı, gaz karışım oranları, malzeme bileşimleri, işlem basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla kontrol edilebilmektedir (Karakan vd. 2002).

2.3.5 Borür Tabakasının Özellikleri

Borür tabakası borlama esnasında uygulanan yöntem, kullanılan borlama maddesi, borlanacak malzemenin cinsi ve işlem parametreleriyle oluşan borür tabakasının şekline ve özelliklerine etki eden faktörlerdir. Demir esaslı malzemelerin borlanmasıyla oluşan ferrobör tabakası çeşitleri Şekil 2.9'da görülmektedir. Borür tabakası ile metal arasındaki geçiş bölgesinde sertlik artışı meydana gelmektedir. Bu olay bor elementinin metalde alaşım elementi etkisi göstermesinden kaynaklanır (Bayça ve Şahin 2004).



Şekil 2.9 Demir esaslı malzemelerin borlanması ile oluşan ferrobor tabaka çeşitleri (Gürkan 2007).

Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertliği ve yüksek aşınma mukavemeti göstermektedir. Eğer aşırı bor mevcut yada malzeme çok fazla alaşıma sahipse Fe_2B fazı (% 8,84 B) yanında borca zengin FeB (% 16,25 B) fazı meydana gelebilir. Yüksek iç gerilmeye sahip olduğundan ve Fe_2B tabakasından kalkarak döküldüğünden FeB fazı arzu edilmez. Borlu tabakanın aşınma dayanımı, tabakanın tek veya çift fazlı olduğuna ve oluşum biçimine bağlıdır. En az aşınma Fe_2B fazında, en fazla aşınma ise daha sert (1800–2000 HV) olan FeB fazındaki tabakada meydana gelmektedir. Çünkü FeB fazı Fe_2B fazından daha gevrek bir yapıdadır. En yüksek aşınma dayanımının FeB içermeyen tabakalarda, yani sadece Fe_2B fazından oluşan tabakalarda elde edildiği deneylerle bulunmuştur. Borlama işleminde, borun yüzeye yayınması sonucu parçanın en üst yüzeyinde bileşik tabaka adı verilen borlu bölge, onun altında yayınma (difüzyon) bölgesi ve en iç kısımda ise çekirdek bölgesi yer alır. Yüzeyde borca zengin FeB en üstte oluşurken onun hemen altında daha homojen ve sünek olan Fe_2B olmak üzere iki demirborür fazı oluşur. Termal uzama katsayıları farklı olan bu iki faz birlikte istenmezler (Karakan vd. 2002).

2.3.5.1 Borür Tabakasının Tribolojik Özellikleri

Borlanmış çelikler yüksek sertliklerinden dolayı abrazif aşınmaya karşı çok iyi direnç gösterirler. Bu nitrülendirilen ya da karbürleştirilen çeliklerle kıyaslandığında mükemmel derecede fazladır. Abrazif aşınmanın meydana geldiği ve borlama ile önemli ölçüde düşürüldüğü sistemlere; pnömatik transport sistemleri, plastik işleme makinaları, haddeleme elemanları, pompalar, valfler vs. örnek olarak verilebilir. Adhezif aşınma

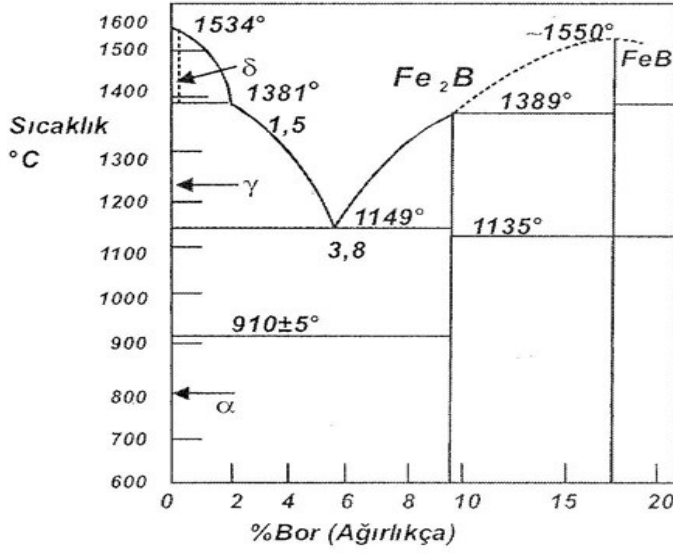
mukavemeti bakımından diğer yöntemlerden oldukça üstün olduğu görülmektedir. Burada, yüksek sıcaklıklardaki mukavemeti özellikle ön plana çıkmakta olup, borlu tabakaların iyi aşınma özelliği göstermesi sebebi ile çok az ya da hiç yağlayıcı kullanmaksızın çevreyi korumak için gelecekte önemli bir etken olacaktır. Borun oksijene karşı ilgisi fazla olduğu için yüzeyde koruyucu ince bir oksit filmi oluşturmakta ve bu oksit filmi yüzeyde yağlayıcı vazifesi göstererek sürtünmeli aşınma sırasında, sürtünme katsayısını düşürürken, yüzeylerin birbirine kaynamasını önler. Kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı borlu tabakaları etkilemez. Adhezif aşınma mukavemetleri demirbor tabakalarında Cr ve Mo ilavesiyle iyileştirilebilir. Abrazif aşınma Cr, Mo, V veya bunların hepsi üzerine vanadyum karbidlerin solüsyonlarıyla düşürülür. Yüzey yorulmasına karşı düşük mukavemet Mo ve V'la yükseltilir. Tribosidatif aşınma alaşım elementleriyle çok az etkilenir. Demir dışı metallerin borlanmasında özellikler Ti, Ta ve Ni metallerinin abrazif aşınma özelliklerinde çok büyük iyileşme gözlenmektedir. Ti ve Ta'ın aşınma mukavemetine olumlu yönde etki ettiği saptanmıştır (Karakan vd. 2002).

2.3.5.2 Borür Tabaka Kalınlığını Etkileyen Faktörler

Metal yüzeyinde borlama işlemi ile oluşturulan borür tabakasının kalınlığını etkileyen faktörler borlayıcı ortamın bileşimi ve ortam yoğunluğu, işlem sıcaklığı ve süresi, alt tabaka metal bileşimidir (Bayça ve Şahin 2004).

2.3.5.3 Demir-Bor Denge Diyagramı

Alaşımelerde, alaşım elementlerinin yeralan katı eriyiği veya arayer katı eriyiği olarak davranacakları Hume-Rothery kuralları çerçevesinde belirlenebilmektedir. Bu kurallar içerisinde en önemli olanı, atomik boyut faktörüdür (Yılmaz ve Şen 2004). Fe - B sisteminde borun atom çapı, demire kıyasla % 27 daha küçük olması sebebiyle, bu elementle katı eriyik yapabilmektedir. (Şekil 2.10). Demir alaşımlarında bor elementinin yeralan veya arayer katı çözeltileri yapabilecekleri iç sürtünme deneyleri ile belirlenmektedir (Delikanlı vd. 2003).



Şekil 2.10 Fe-B ikili denge diyagramı (Liao 1991).

Demir-bor denge diyagramında ağırlıkça % 8.83 bor oranında Fe_2B , yine ağırlıkça % 16.23 bor oranında FeB arabileşiği meydana gelmektedir. Ağırlıkça % 3,8 bor oranında ergime sıcaklığı 1149 °C olan ötektik faz oluşmaktadır (Şekil 2.10). Dolayısıyla borlanmış yüzey bu sıcaklığa kadar ısıdan etkilenmektedir (Atik 2001). Şekil 2.10'da demir-bor denge diyagramı gösterilmektedir. Diyagramda görülmeyen dengesiz Fe_3B ve FeB_2 gibi intermetalik bileşiklerin de oluşabildiğine birçok makalede rastlanmaktadır. İncelenen makalelerde, Fe_2B fazının ergime sıcaklığının 1389–1410 °C arasında ve FeB fazının ise 1540–1657 °C arasında yer aldığı görülmektedir (Şen 1997).

Dökme demirlere bor, ferrobör ilavesiyle verilir. Dökme demirlerin kompozisyonunda bulunan bor'un birkaç avantajı vardır. Bor dökme demirde karbür yapıcıdır. Katılma esnasında teşekkül eden bu karbürler dökme demirin beyaz renkli olmasını sağlar. Dökme demire % 0,03'e kadar bor ilave edilmesi aşınma direncini iyileştirir. % 1'e kadar çıkan oranlarda bor ilavesi, sinterlenmiş dökme demirin sinterlenme sıcaklığını büyük ölçüde düşürür. Dökme demirlere % 0,02-0,1 arasında bor katılması, dökme demirin yapısında grafitleşmeyi önler, yüzey sertliğini ve su alma derinliğini ilerletir. Temper dökme demirlere % 0,001 oranında bor ilavesi, dökme demirin tavlanması hızlandırır (Angın 2003).

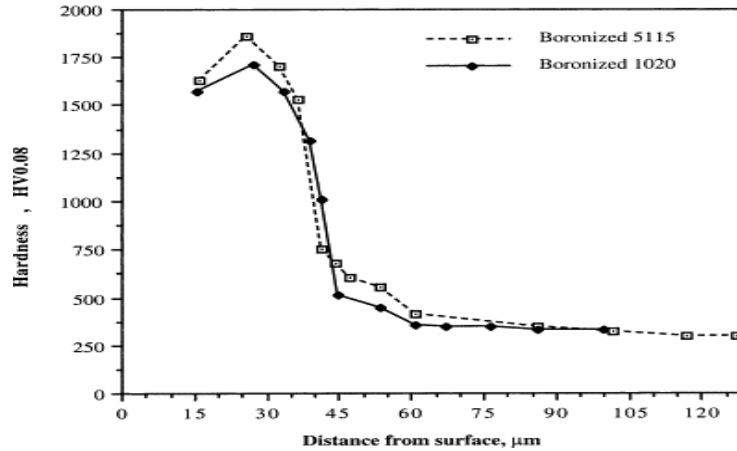
2.3.5.4 Borür Tabakasının Sertliği

Çelikler aşındırıcı ortamlarda kullanıldığında yüksek miktarda aşınır ve malzeme boyutları değişir. Takım çelikleri borlanırsa yüzeyde 10–200 nm kalınlığında demir borür tabakası elde edilir. Dış yüzeyinde demir borür tabakası oluşturulan çeliğin sertliği 1500–2200 HV'ye ulaşır. Bor Fe_2B ve FeB yapısında çeliğin yüzeyine yayılır. Bu yapı çizelge 2.3'den de görüldüğü gibi karbürürlü ve nitrürlü yüzeylerde daha serttir.

Çizelge 2.3 Çeşitli malzemelerin yüzey sertlik değerleri(Bayça ve Şahin 2004).

Malzeme	Mikro sertlik, kg/mm^2
Nitrülenmiş yüzey	610 – 940
Karbürlenmiş yüzey	700 – 820
Sert krom kaplı yüzey	950 – 1100
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900

Borlama sonucu oluşan tek faz Fe_2B tabakası 1800–2000 HV arasında sertliğe sahiptir. Fe_2B ve FeB oluşan İki fazlı tabakanın sertliği 1900–2400 HV arasındadır. İki fazlı tabakanın sertliği yüksektir. Borlanmış metallerde sertlik, yüzeyden içeriye doğru şekil 2.11'de görüldüğü gibi azalmaktadır.



Şekil 2.11 950 °C sıcaklıkta 90 dakika borlanmış çeliklerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımı (Bayça ve Şahin 2004).

2.3.5.5 Borür Tabakasının Aşınma Dayanımı

Makina parçalarının ve mekanizmaların ömrü ve güvenilirliği yüzey özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Korozyon, aşınma ve yorulma kırılmasının oluşumu yüzeyden başlar. Aşınma dayanımı ve sürtünme katsayısı bir sistem özelliği olmakla beraber malzeme sertliği ile doğrudan ilgilidir. Borlanmış tabakanın aşınma dayanımı, tabakanın tek veya çift fazlı oluşuna ve oluşum biçimine bağlıdır. En az aşınma Fe_2B fazında, en fazla aşınma ise daha sert olan FeB fazında olmaktadır. Çünkü daha sert olan FeB fazı, Fe_2B fazından daha gevrekler. Bor elementinin oksijene ilgisi yüksektir. Bu nedenle bor, yüzeyde koruyucu bir oksit tabakası oluşturmakta, bu oksit filmi yüzeyde yağlayıcı vazifesi görüp sürtünme katsayısını düşürerek yüzeylerin birbirine kaynamasını da önlemektedir. Borlanmamış çeliğin aşınma dayanımı 3,05 mg/devir iken borlanmış çeliğin aşınma dayanımı 0,0065 mg/devir olarak bulunmuştur. Buna göre borlanmış çeliğin aşınma dayanımı 500 kat daha fazladır (Bayça ve Şahin 2004).

Er ve Par yaptıkları çalışmada, borlanmış sade karbonlu AISI 1030 ve 1050 çeliklerinin işlemsiz hallerine göre yüzey sertlik ve abrazif aşınma dayanımlarında oluşan değişimleri incelediler. Borlama sonucu malzemelerin yüzey sertlik değerlerinin işlemsiz hallerine göre yaklaşık 8–10 kat arttığı görülmektedir. Ortalama borlu tabaka kalınlıkları incelendiğinde ise aynı malzeme için artan işlem süresinin tabaka kalınlığının düzenli olarak artmasına neden olduğu gözlenmiştir. İncelemeye alınan sade karbonlu çelik malzemelerde artan karbon miktarının elde edilen borür tabaka kalınlıklarını belirgin bir şekilde azalttığı buna karşılık yüzey sertlik değerlerinde ise az da olsa artışa neden olduğunu tespit ettiler. Sade karbonlu çelik numunelerle (AISI 1030 ve 1050) yapılan abrazif aşınma deney sonuçları incelendiğinde borlanmış çeliklerin alüminyum oksit aşındırıcısına karşı çok büyük oranlarda abrazif aşınma dayanımı kazanmış oldukları belirlenmiştir. Bu malzemelerin işlemsiz hallerinin aşınma davranışları incelendiğinde artan karbon miktarıyla artan yüzey sertliğinin abrazif aşınma dayanımını olumlu yönde etkilediğini gördüler. Aynı malzemede artan borlama işlem süresiyle, borlu tabaka kalınlığının artması aşınmanın azalmasına neden olurken; farklı karbon miktarına sahip iki malzeme karşılaştırıldığında elde edilen borür tabakalarının yaklaşık aynı aşınma davranışını sergiledikleri sonucuna varmışlardır (Er ve Par 2004).

2.3.5.6 Borlamanın Endüstriyel Uygulamaları

Bor ve bileşikleri özellikle çelik sanayinde üç önemli kullanım alanı bulmuştur. Bunlar;

1. Çelik üretiminde cüruf yapıcı.
2. Çeliklerde alaşım elementi olarak.
3. Çeliklerde yüzey kaplama ve sertleştirme ısıl işlemleri olarak kullanılmaktadır (Taşçı 1993).

Adhezif ve Abrazif aşınma şartlarında birçok kullanım alanı mevcuttur. Abrazif aşınmaya dirençli malzemeler olarak; vidalı sürücüler ve kovanlar, delinmiş veya dar ve küçük açılmış faturalar, makaralar, valf elemanları, şaftlar, tamamlayıcılar paslanmaz çelik malzemelerden üretilebilmekte ve ayrıca helikopter türbin çanakları borlanmış Ti-6Al-4V malzemedan üretilmektedir. Bu katagoriler ile ilgili diğer uygulama alanları şunlardır (Sinha 1991);

- DIN St 37 çeliğinden üretilen tel çekme aletleri, ringleri ve kovanlarında,
- Tekstil makinelerinde kullanılan dökme demir dramlarda,
- Su ayar vanalarının dörtlü kavrama besleyicilerinde (AISI 316 Ti çeliğinden),
- Ateşleme nozulları, girdaplı dönme elemanları ve kimya endüstrisinde petrol yataklı makinelerde enjektör başlarında,
- Çeşitli yüksek performanslı tekerlekler ve önemli motorlarda sürünme, sonsuz vida ve helisel dişlilerde.
- Doldurma elemanlarının nozulları,
- Ekstrüzyon sürücüler, kovanlar, nozulları, üretim makinelerinin dönüşümlü akım blokları (ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplı makinelerde),
- Plastik endüstrisinde, mineral takviyeli plastik granüllerin yükleme elemanları için kontrol plakaları ve bentleri, dövme kalıpları, basma ve sürme matrisleri, kavrama halkaları (takım çelikleri),
- Pres kalıpları, kesme şablonları, döverek kesme plaka muhafazaları(DIN St 37 çeliği),
- Seramik tuğla ve kapların kalıplanmasında kullanılan kalıplar, ekstrüzyon kovanları, iticileri ve ringleri (AISI 4140 çeliği),
- Ekstrüzyon tip'leri, geri dönüşümsüz valflar ve silindirler (Abrazif minerallerin ekstrüzyonu veya fiber glas takviyeli plastiklerin ekstrüzyonu için) (AISI 4150 çeliği),
- Demir dışı metallerin döküm besleyicileri (AISI H11 çeliği),
- Linyit kömür briketlerin taşıma levhaları.

2.4. Aşınma

2.4.1 Sürtünme ve Aşınma

Aşınma katı cisimlerin yüzeylerinden parçacıklar veya ince tabakaların ayrılması ile meydana gelen malzeme kaybı olarak tanımlanabilir. Aşınma mekanik bir etki sonucu meydana gelen ve yüzeyden ufak parçacıkların ayrılması olarak da tarif edilebilir. Yapılan tanımlamalara göre ortaya çıkan hasarın aşınma olarak değerlendirilebilmesi için aşağıdaki koşulları sağlaması gerekir (Keleştimur 1989).

- a) Mekanik bir etkinin olması,
- b) Sürtünmenin olması,
- c) Yavaş ve devamlı olması,
- d) Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- e) İstenmediği halde meydana gelmesi,

2.4.1.1 Sürtünme

Metaller arasındaki sürtünme olayları, basit görünmekle beraber, aslında çok karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu olayları, izah ve formüle etmek için tarihsel gelişim içerisinde, birçok teori ileri sürülmüştür (Moore 1975).

Amontons (1699), cisimleri rijit kabulederek, sürtünmenin izahını, “kayma esnasında parçaları, yüzey pürüzleri yüksekliğince kaldırmak için gerekli enerji” şeklinde yapmış ve bütün cisimler için sürtünme katsayısını 1/3 olarak vermiştir. Coulomb (1875), Amontons’un bulduğu sonuçları doğrulamış ve ayrıca sürtünme katsayısının hızdan bağımsız olduğunu da gözlemlemiştir (Şekil 2.12). Bunlara ilaveten Coulomb, statik sürtünme katsayısını kaymaya başlatma kuvveti ile kinetik sürtünme katsayısını da hareketi devam ettirme kuvveti ile tarif etmiştir (Gürkan 2007).

“Coulomb Kanunu” adı verilen bu teoriye göre:

- a) Sürtünme kuvveti, normal yükü orantılıdır,
- b) Sürtünme kuvveti, geometrik temas alanına bağlı değildir,
- c) Sürtünme kuvveti, kayma hızına bağlı değildir,
- d) Statik sürtünme katsayısı, dinamik sürtünme katsayısından daha büyüktür.

Bu değerlendirmeler sonucunda aşağıdaki matematiksel ifade çıkarılmıştır:

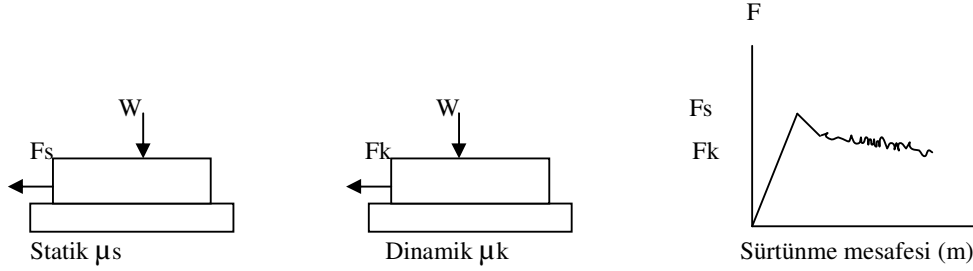
$$\mu = F_s / F_n$$

Burada;

μ : Sürtünme katsayısı

F_s : Teğetsel kuvvet (Sürtünme kuvveti)

F_n : Normal kuvvet



şekil 2.12 Statik ve dinamik sürtünme katsayıları (Kayalı vd. 1997).

Strang ve Lewis'in çalışmalarında ise, çok iyi işlenmiş yüzeylerde dahi sürtünme katsayısında artışlar olabildiği gözlemlenmiştir (Ulukan 1993).

2.4.1.2 Aşınma

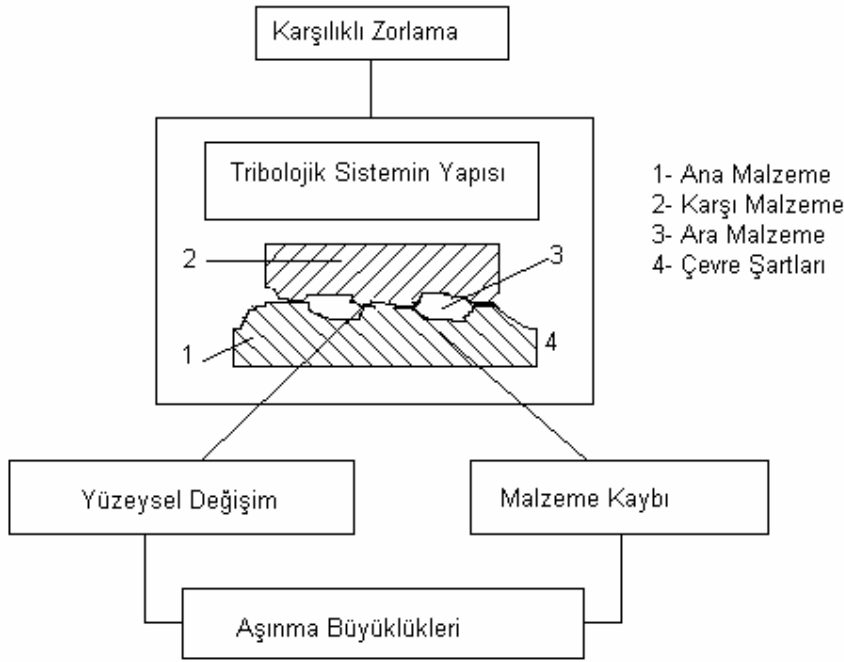
Aşınma genellikle temas eden yüzeylerden mekanik etkilerle malzeme kaybı olarak tanımlanır. Temas halinde bulunan katı yüzeylerde, malzeme kaybı üç şekilde gerçekleştirilebilir. Bunlar bölgesel erimeler, kimyasal çözünme ve yüzeyden fiziksel oluşan ayrılmalardır. Uygulamada aşınma kapsamına daha çok yüzeyden fiziksel anlamda ayrılan malzemenin sebep olduğu hasarlar dahil edilmektedir (Gürkan 2007).

Bir aşınma sisteminde;

- Ana malzeme (aşınan),
- Karşı malzeme (aşındıran),
- Ara malzeme,
- Yük,
- Hareket,

Aşınmanın temel unsurlarıdır.

Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte tribolojik sistem olarak adlandırılır. Bu tribolojik sistemin standartlara uygun şematik olarak gösterimi şekil 2.13’de görülmektedir. Aşınma sistemindeki önemli etkilerden biride çevre şartlarıdır. Sistem elemanlarının nem veya korozif etkilerle karşı karşıya kalması, aşınmayı hızlandırır. Birbirleriyle temas eden malzemelerde, temas sonucunda oluşan sürtünme uygun yağlama, filtreleme, uygun malzeme seçimi ve uygun tasarım gibi faktörlerle en aza indirilebilir, fakat kesinlikle tümüyle önlenemez. Aşınma çeşitli yönleri ile korozyona benzer. Aşınma da korozyon gibi bir yüzey olayı olduğundan, yüzeyi etkileyen her şey aşınma davranışını da etkiler. İstenmeden meydana gelen aşınma olayı, çeşitli makine ve teçhizatın kullanımı sırasında çok büyük ekonomik kayıplara (enerji, işgücü, malzeme vs.) neden olmaktadır. Örneğin ABD’de, işlem maliyeti 70 milyar dolar/yıl ve takım maliyeti ise 900 milyon dolar/yıl (1978) gibi çok yüksek değerlere ulaşmaktadır (Ülker 2006).



Şekil 2.13 Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterimi(Kayalı vd.1997).

Aşınma hasarları kapsamına giren yüzeyden malzeme kaybı, kayma, kırılma, talaş oluşumu, yorulma, kimyasal çözünme ve difüzyon yoluyla gerçekleşebilir. Aşınma

parçacıkları 0,01–0,02 μm arasında ise hafif aşınma, 1 μm 'den büyük ise şiddetli aşınma olarak kabul edilir.

2.4.2 Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınmayı etkileyen faktörleri şu şekilde sınıflandırabiliriz (Kayalı 1993).

1. Ana malzemeye bağlı faktörler: Malzemenin kristal yapısı, malzemenin sertliği, elastisite modülü, deformasyon davranışı, yüzey pürüzlülüğü ve malzemenin boyutu.
2. Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi.
3. Ortamın etkisi: Sıcaklık, nem, atmosfer.
4. Servis şartları: Basınç, hız, kayma yolu.

2.4.3 Aşınma Mekanizmaları

2.4.3.1 Adhezif Aşınma

Yapışma aşınması olarak da adlandırılan adhezif aşınma, en sık rastlanılan tür olmasına rağmen, genellikle hasarları hızlandırıcı etkide bulunmaz. Adhezif aşınma en genel olarak, karşılıklı etkileşim içerisinde birbirlerine göre göreceli olarak hareket eden iki yüzeyin birisinden bir parçacığın koparak diğer yüzeye yapışması sonucunda, bir yüzeyden diğer yüzeye olan malzeme taşınımı olarak tanımlanabilir (Ülker 2006).

İki ayrı metal yüzeyi basınç altında şekil 2.14'de olduğu gibi getirildiği zaman, iki ayrı yüzeyde bulunan karşılıklı çıkıntılar sürtünme, ısı, gerekse de soğuk kaynaklaşma etkisiyle birbirleriyle bağ yaparlar. Yüzeylerin birbirlerine karşı olarak yaptığı hareketin devam etmesiyle birleşen iki çıkıntı, bağ kuvvetinin en zayıf olduğu noktadan kopacaktır.



Şekil 2.14 Adhezif aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi (Güneş 2006).

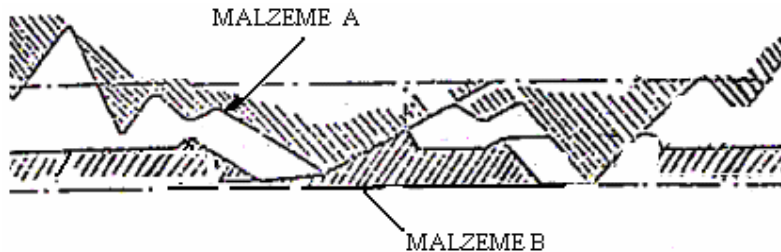
Adhezif aşınma, şu önlemlerden bir tanesinin kullanılmasıyla azaltılabilir :

- **Yağlama:** Adhezif aşınma, sıcaklığın bölgesel olarak arttığı bölgelerde meydana geldiğinden, iyi bir yağlamanın yapılmasıyla hem yüzeyler arasında sürtünme azaltılabilir hem de yağlayıcılar sistemden ısıyı uzaklaştırabilir.
- **Birbirleri içerisinde çözünmeyen metaller kullanmak:** Birbirleri içerisinde çözünmeyen iki metalin bir arada kullanılmasıyla, adhezif aşınmanın meydana gelişi tamamen ortadan kaldırılabilir.
- **Düz yüzeyler kullanmak:** Eğer birbirleriyle etkileşen yüzeylerde soğuk kaynaşmayı meydana getirecek şekilde karşılaşacak çıkıntılar yok ise, adhezif aşınma meydana gelmeyecektir.
- **Metal metal temasını önleme:** Metal yüzeylerde kimyasal filmler oluşturmak, aşınmayı engeller. Örneğin ; borlama

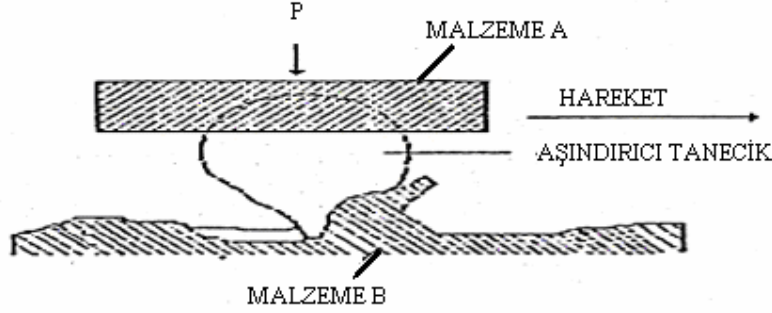
Adhezif aşınma yüzeye etkiyen normal yük, kayma yolu ve aşınan malzemenin yüzey sertliği ile orantılıdır (Kayalı vd. 1997).

2.4.3.2 Abrazif Aşınma

Yırtılma ve çizilme aşınması olarak da isimlendirilen abrazif aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Abrazif aşınma en genel olarak, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan partiküllerle basınç altında etkileşmesiyle, sert partiküllerin malzeme yüzeylerinden parçalar koparması şeklinde tanımlanır. Bu mekanizmaya örnek olarak, sisteme dışarıdan giren toz parçacıklarının veya bir motorda oluşan yanma ürünlerinin sebep olduğu aşınma şekli verilebilir (Gürkan 2007). Bu tip aşınmada sert ve keskin partiküller, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Bu aşınma iki elemanlı veya üç elemanlı olmak üzere aşağıda Şekil 2.15 ve 2.16'da görüldüğü gibi ikiye ayrılır.



Şekil 2.15 İki elemanlı abrazif aşınma (Kayalı vd.1997).



Şekil 2.16 Üç elemanlı abrazif aşınma(Kayalı vd.1997).

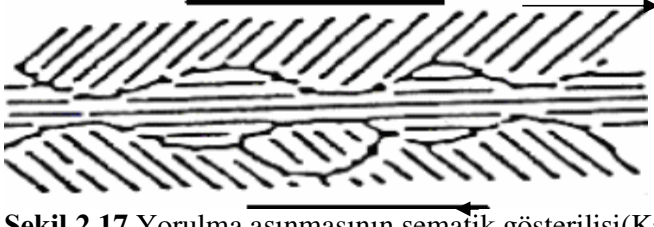
İki elemanlı abrazif aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbirleriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abrazif aşınmada ise, ana ve karşı malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeyden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilir. Abrazif aşınmayı etkileyen iki temel faktör, aşındırıcı partikül ile metal yüzeyi arasındaki sertlik farklılığı ve teması meydana getiren basıncın büyüklüğüdür. Abrazif aşınma hızı, malzeme yüzeyine etki eden normal yük azaltılarak düşürülebilir (Gürkan 2007).

Abrazif aşınmanın engellenmesinde veya abrazif aşınma hızının en aza indirilmesinde aşağıdaki yöntemlere başvurulabilir:

- **Yüzey sertliğini arttırmak:** Abrazif aşınmanın engellenmesinde veya aşınma hızının azaltılmasında en etkili yol, malzeme yüzey sertliğinin artırılmasıdır. Ancak bu yöntemin bazı malzemelere uygulanmasıyla daha büyük problemlerle karşılaşılır. Örneğin gevrek kırılma.
- **Abrazif parçacıkları uzaklaştırmak:** Abrazif aşınmaya sebebiyet veren sert partiküllerin sistemden uzaklaştırılması ile abrazif aşınma engellenebilir.
- **Aşınmış parçaları değiştirmek:** Abrazif aşınmaya uğrayacak parçanın kolay bir şekilde değiştirilmesine imkan verecek dizaynlar geliştirmek ile pratikte en çok kullanılan yöntemlerden birisidir.

2.4.3.3 Yorulma Aşınması

Değişken, tekrarlı yüklemeler sonucu meydana gelir. Tribolojik zorlanmalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden, yorulma aşınması birçok aşınma işleminde görülür. Neticede malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur, bu ise yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur (Gürkan 2007). Şekil 2.17’de yorulma aşınmasının şematik gösterilişi verilmiştir.



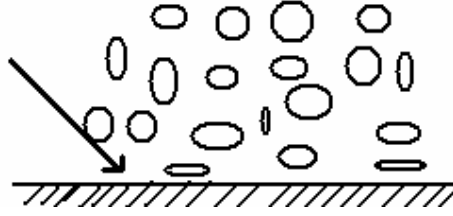
Şekil 2.17 Yorulma aşınmasının şematik gösterilişi(Kayalı vd. 1997).

Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde, plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelir. Bu boşlukların zamanla yüzeye doğru ilerleyerek büyümesi, yüzeyde küçük çukurların ortaya çıkmasına sebep olur. Bu tür aşınma daha çok dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeylerinde görülür (Kayalı vd. 1997).

2.4.3.4 Eroziyon Aşınma

Bir sıvı yada gaz akımı tarafından taşınan farklı geometrik boyut ve yapıdaki taneciklerin, temas da buldukları katı yüzeylerinde sürekli darbe etkisi yaparak oluşturdukları hasar erozyon aşınması olarak tarifedilmektedir. Bununla beraber, eroziyon aşınma; aşındırıcı taneciklerin ve bunları taşıyan akımın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin farklılık göstermesi yanı sıra, sadece sıvı yada gaz akımının kendisinin de aşındırıcı madde özelliği teşkil etmesi durumu sebebiyle bu mekanizmaların tek başına, kombineli ve yüksek sıcaklık uygulamalarında malzeme bıraktıkları hasar türleri farklılık göstermesi itibarıyla, püskürtme, yıkama, kavitezyon - erozyon, erozyon-korozyon, yağdırma ve termal aşınma mekanizmaları adları altında sınıflandırılmaktadır. Pratikte en çok bu aşınma türü, pnomatik iletim hatları ve ekipmanlarında, türbün çarklarında, hidrolik pompalarda kumlama makineleri ekipmanlarında ve püskürtme nozullarında karşımıza çıkar. Eroziyon aşınmaya maruz kalan parçaları korumak suretiyle işletme ömürlerinde kayda değer bir artış sağlamak mümkündür (Yıldızlı vd. 2003). Sıcaklık ve akış hızı arttıkça, aşınma hızlanır. Akış

halindeki sıvılarda ani basınç düşmesi ile oluşan gaz kabarcıkları da aşınmaya sebep olur. Örnek; gemi pervanelerinde çok görülür. Şekil 5.7’de erozif aşınma gösterilmiştir.



Şekil 2.18 Erozif aşınmanın şematik gösterilişi(Kayalı vd.1997).

Erozif aşınma, aşağıda belirtilen şekilde hasarların meydana gelmesi ile tanınabilir (Kayalı vd. 1997).

- **Sert olmayan malzeme yüzeylerinde oluşan kopma**

Örneğin fan pervanelerinin kullanımı sırasında, ortamda bulunan tozların ve sert partiküllerin pervanenin konkav tarafında hızlı bir şekilde yuvarlanmaları ve kaymaları sırasında bu aşınma türü oluşur.

- **Malzeme yüzeyinde kanalların veya yivlerin oluşması**

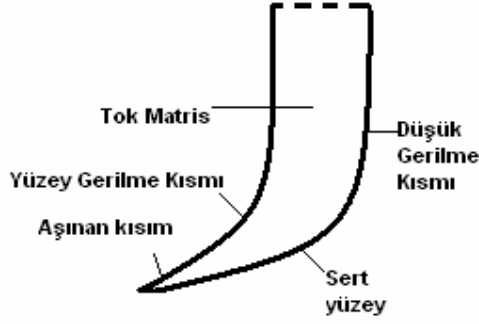
Bu tür aşınma hasarları, gazların veya sıvıların hızlı bir şekilde arttığı sistemlerde akış hızının veya yönünün değiştiği bölgelerde görülür.

- **Köşelerin yuvarlanması**

Erozif aşınma meydana geldiği pervane ve türbin kanatları gibi malzemelerin şekillerinde köşelerin yuvarlanması şeklinde değişiklikler meydana gelebilir.

2.4.3.5 Öğütmeli Aşınma

Öğütmeli aşınma, yüksek basınçlar altındaki partiküllerin metal yüzeyleri ile düşük hızlarda karşılaşmaları sonucunda, metal yüzeyinden parçacıkların kesilerek veya çok sayıda ufak çizikler açılarak kopartılması ile meydana gelir. Bu yüksek basınç ve düşük hız kombinasyonu, genellikle kepçe gibi ağır iş makinelerinin çalışma koşullarında meydana geldiği için, bu araçların kesici uç yüzeylerinde şekil 2.19’den da görüldüğü gibi bu hasar türü meydana gelir (Gürkan 2007).



Şekil 2.19 Öğütmeli aşınmanın şematik gösterilişi (Kayalı vd. 1997).

Öğütmeli aşınmaya diğer bir örnek ise, bilyalı değirmenler olarak gösterilebilir. Öğütmeli aşınmayı engellemek için malzeme sertliğini arttırmak, akla gelen ilk çözümdür. Ancak sertlik artarsa gevrek kırılma şansı da artacağı için bu yöntemin uygulanması mümkün değildir. Bu tip aşınmayı engellemek için yapılan girişimlerin başarısızlığa uğraması sonucu, malzemenin kontrollü olarak aşındırılması yoluna gidilmeye çalışılmıştır. Kontrollü aşınma ile malzeme kendi kendine bilerek, körleme sebebiyle meydana gelen performans düşüklüğünden kurtulabilmektedir (Kayalı vd. 1997).

2.4.3.6 Oymalı Aşınma

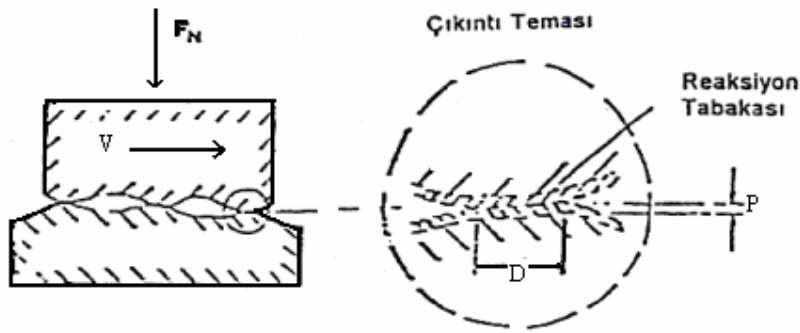
Oymalı aşınma malzeme yüzeyinin çok yüksek gerilmelerdeki çarpma durumlarında, yüzeyden bir parçanın kesilerek veya oyularak kopmasıyla meydana gelir. Bu tip aşınmaya genellikle hafriyat, madencilik, petrol kuyularını delme işlemi ve benzeri koşullarda çalışan malzemelerin kesme ve delme görevi yapan kısımlarında görülür. Bu işlemler sırasında sert abrazif parçacıkların çok yüksek gerilmeler altında malzeme yüzeyine çarpmaları ile yüzeylerde hızlı bir şekilde hasar oluşumu meydana gelir. Oymalı aşınma diğer aşınma türlerine göre çok daha hızlı olarak geliştiğinden, bu aşınmaya uğrayan parçaların yenileriyle değiştirilerek kullanılması daha ekonomik olmaktadır (Kayalı vd. 1997).

2.4.3.7 Korozif Aşınma

Korozif aşınma olayında çalışma ortamıyla parça yüzeyleri arasındaki etkileşim etkin rol oynamaktadır. Korozif aşınmada, Şekil 2.20’de görüldüğü gibi aşınma olayı iki kademedeyi gerçekleştirir:

1- Temas halindeki yüzeyler ortamla reaksiyona girerler ve yüzeyde reaksiyon ürünlerinden oluşan bir tabaka meydana gelir.

2- Daha sonra, temas noktasında çatlak oluşumu veya abrazif etkilerden dolayı reaksiyon tabakası hasara uğrar.



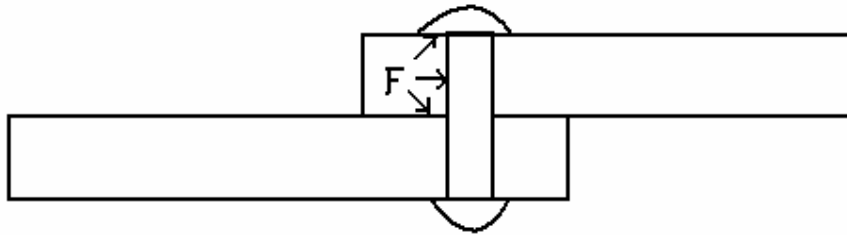
Şekil 2.20 Korozif aşınma mekanizması (Kayalı vd.1997).

Tribooksidasyon aşınması adı da verilen korozif aşınma durumunda, ana malzeme ile karşı malzeme arasındaki tribolojik zorlanmalardan dolayı meydana gelen kimyasal reaksiyon etkindir. Malzeme yüzeylerinin hava ile reaksiyona girerek oluşturduğu yüzey tabakaları (oksit tabakası) aşınmayı azaltmasına rağmen, bu yüzey tabakalarının tribooksidasyon sonucu özelliklerinin değişmesi, aşınmayı hızlandırmaktadır. Yağ vb. kimyasal maddeler bulunan ortamda çalışan makine parçalarının yüzeylerinde oluşan yüzey tabakalarının bir kısmının tribolojik zorlamalar ile kırılması sonucu aşındırıcı parçacıklar oluşturması, aşınmayı artırır. Tribooksidasyon aşınması, özellikle metalik malzeme yüzeylerinde görülür. Neticede malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur; bu ise, yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur. Büyük oranda aşınmaya sebep olan bu aşınma mekanizmaları dışında, “Tribosüblimasyon” ve “Yayınma” mekanizmalarından da bahsetmek mümkündür. Tribosüblimasyon, yüzeydeki sıcaklığın sürtünme ısıyla yükselmesi sonucu etkin hale geçer. Yayınma ise, tribolojik zorlanmada ama malzemenin üst yüzeylerindeki

atomların yayılma ile karşı malzemeye geçmesi sonucunda malzeme kaybının meydana gelmesidir (Kayalı vd. 1997).

2.4.3.8 Kazımalı Aşınma

Kazımalı aşınma, karşılaşılan yüzeylerde mikro kaynaşmanın meydana geldiği adhezif aşınmaya bir miktar benzemektedir. Aralarındaki fark ise, şu şekilde açıklanabilir: Adhezif aşınma, birbirleri üzerinde kayan yüzeylerde meydana gelirken, kazımalı aşınma birbirlerine göre hareket etmeyen yüzeylerde meydana gelir. Ancak kazımalı aşınma, çok düşük genlikteki hareketlerin (vibrasyon) meydana geldiği sistemlerde, Şekil 2.21'den de görüldüğü gibi mikro kaynaşmanın oluşması ile meydana gelir (Kayalı vd. 1997).



Şekil 2.21 Kazımalı aşınmanın şematik gösterilişi(Kayalı vd.1997).

Kazımalı aşınma vibrasyonlu ortamlarda çalışan somun, perçin gibi bağlantı elemanları ile birleştirilmiş sistemlerde, otomobil şaftlarının birleşme noktalarında ve yataklarda en yaygın olarak rastlanan hasar oluşum mekanizmasıdır. Kazımalı aşınmayı engellemek kolay değildir. Ancak bu aşınma mekanizmasının meydana getirdiği hasarlar, aşağıda verilen uygulamalarla en aza indirilebilir:

1. Vibrasyonun azaltılması veya giderilmesi.
2. Ara yüzeydeki kaymaları azaltmak veya gidermek.
3. Bağlantı noktalarında elastomer kullanmak.
4. Bağlantı noktalarının yağlanması.
5. Kırılmayı engellemek (Kayalı vd. 1997).

2.4.4 Malzemede Aşınmanın Ölçülmesi

2.4.4.1 Kalınlık Ölçme Metodu

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değerinin karşılaştırılması ile elde edilir. Kalınlık olarak tespit edilen değer, hacimsel olarak tespit edilip birim hacimdeki aşınma miktarı elde edilir. Kalınlık hassas ölçme aletleri ile 1µm duyarlılıkta ölçülebilir (Gürkan 2007).

2.4.4.2 Ağırlık Farkı İle Ölçme

Kullanılan ölçme aletinin hassas olması nedeniyle çok sık kullanılan bir metottur. Deney numunelerinin her ölçümü için, yerinden çıkarılıp ölçülmesi en büyük dezavantajdır. Ağırlık kaybının ölçülmesi için 10^{-4} veya 10^{-5} hassasiyetindeki teraziler kullanılır. Aşınma miktarı gram veya miligram olarak bulunur (Gürkan 2007).

2.4.4.3 Radyo İzotoplarla Ölçme Metodu

Sürtünmenin yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü α -parçacıkları ile bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınma miktarının yüksek derecede hassasiyetle ölçülmesi ve sistem içerisinde çalışma şartları değiştirmeden ölçü alınabilmesi en büyük avantajdır (Keleştimur 1989).

2.4.4.4 İz Değişiminin Ölçülmesi Metodu

Sürtünme yüzeyi bölge geometrisi belirgin bir izdir ve plastik deformasyon sonucu oluşur deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun değişimi ölçülerek sonuç bulunur. Uygulamalarda en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme aletleridir (Gürkan 2007).

3. MATERYAL VE METOT

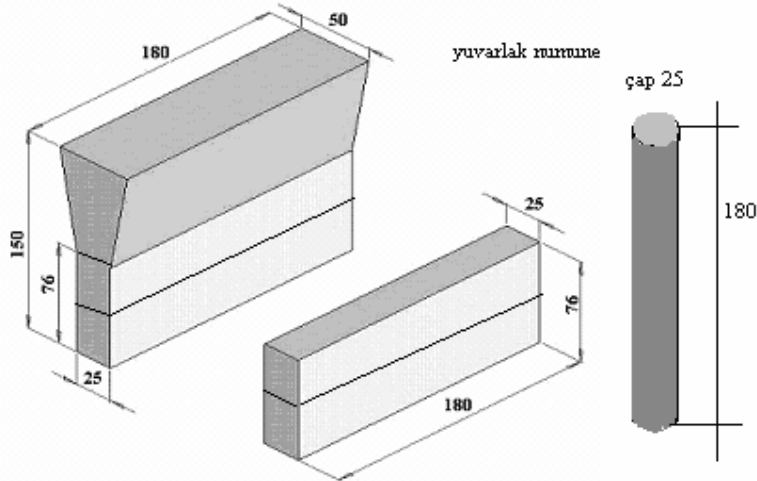
3.1 Deneysel Malzeme ve Numuneler

3.1.1 Deneysel Malzemeler

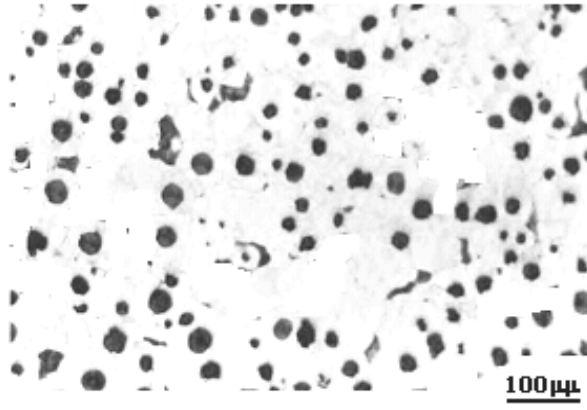
İncelenmiş olan Alaşımız Küresel Grafitli Dökme Demir malzemeler, DÖKTAŞ A.Ş tarafından Y-Blok şeklinde üretilmiştir(Şekil 3.1). Döküm malzemenin kimyasal bileşimi ise Çizelge 3.1’de verilmektedir ve mikroyapı fotoğrafı resim 3.12’de verilmiş olup mikroyapı çok az oranda perlit bulunan ferritik matriks içerisinde dağılmış olan küresel grafitlerden oluşmaktadır.

Çizelge 3.1 Döküm malzemesinin kimyasal bileşimi

Element	% C	%Si	%Mo	%Cr	%Cu	%Sn	%Mn	%Ti	%Mg	%P	%S
<i>Bileşim</i>	3.84	2.27	0.001	0.021	0.044	0.005	0.141	0.020	0.039	0.048	0.01



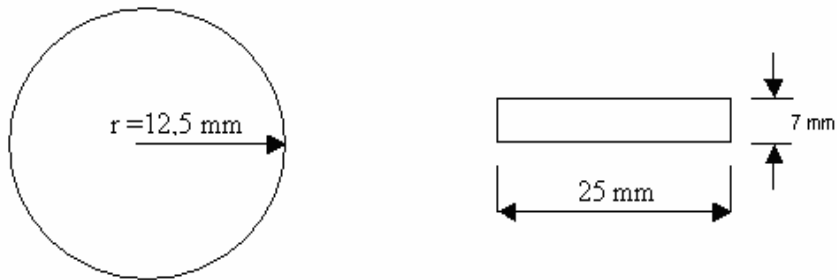
Şekil 6.1 Y-Blok şeklindeki döküm malzemesinin şekli ve boyutları.



Resim 3.1 Alaşımsız KGDD'in döküm haliyle mikroyapısı.

3.1.2 Deney Numuneleri

Numuneler 7 mm kalınlığında ve 25 mm çapında kesilerek borlama işlemi için 120 gridden başlanıp 1000 grid'lik zımparalama kademesine kadar zımparalanmış ve sonra parlatılmış olup kullanılan aşınma numunelerinin boyutları (Şekil 3.2'de) verilmiştir.



Şekil 3.2 Deneyde kullanılan numune ölçüleri.

3.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar ve Yöntem

3.2.1 Borlama ve Östempereleme Fırını

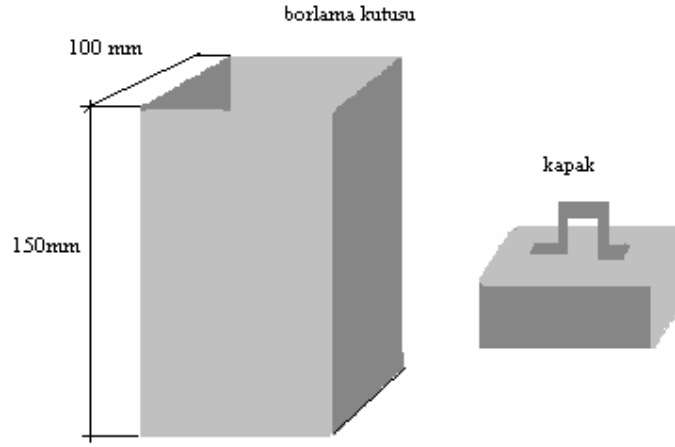
Borlama ve östempereleme işleminde resistanslı kuyu fırını kullanılmıştır. Kullanılan fırınlar Resim 3.2’de verilmiştir. Fırın atmosferik şartlara açık olup, fırının hassasiyeti ± 1 °C’dir. Östempereleme işleminde ise PID kontrollü kuyu fırın kullanılmıştır. Östempereleme fırının hassasiyeti ± 5 °C’dir. Tuz banyosu % 50 NaNO₃ + % 50 KNO₃ tuzlarının karışımından oluşmaktadır.



Resim 3.2 Borlama ve Östempereleme işlemlerinde kullanılan fırınlar.

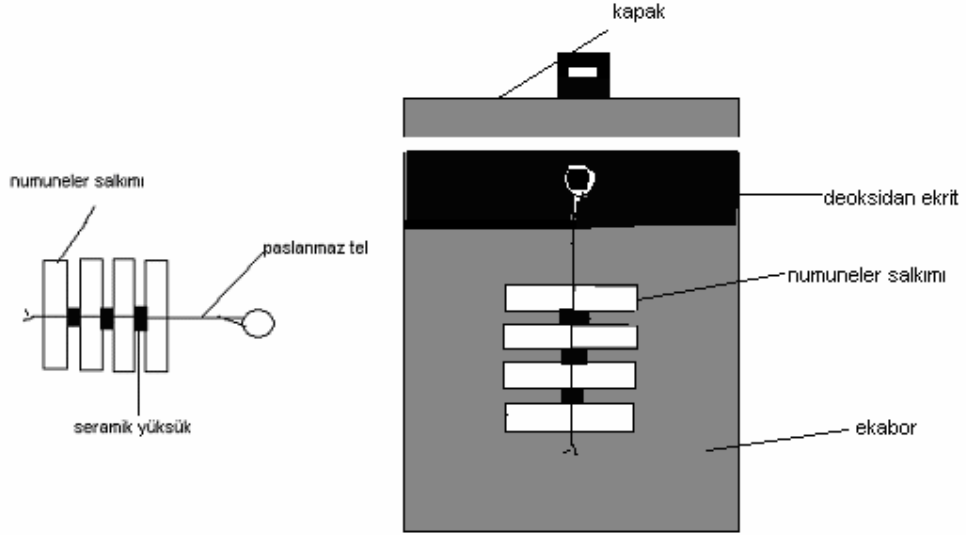
3.2.2 Borlama potası

Borlama işleminde, şekil ve boyutları Şekil ’de verilen paslanmaz çelikten yapılan kutu kullanılmıştır.



Şekil 3.3 Borlama deneylerinde kullanılan AISI 316 paslanmaz çelik kutunun geometrik şekli ve boyutları.

6.2.3 Borlama işlemi



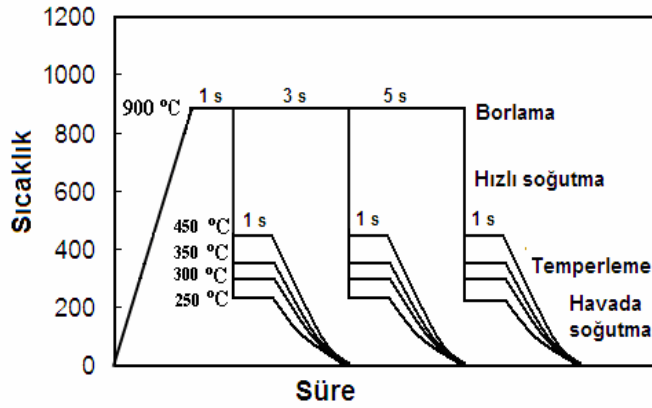
Şekil 3.4 Borlama işleminin yapılış yönteminin şematik gösterimi.

Sıvı ortamda borlama sırasında numune üzerinde yapışkan bor tuzları kaldığından ve östemperlenebilirliği azalttığı için kutu borlama tercih edilmiştir. Numuneler daha önce, borlama işleminde kullanılan paslanmaz çelik kutu içerisine yerleştirilken salkım haline getirilip aralarına seramik yüksük yerleştirilmiştir. Sonra ise numunelerin etrafı ticari Ekabor[®]2 tozu ile en üste deoksidan Ekrit tozu serilmiştir. Sıcaklığın ± 1 °C hassasite

kontrol edilebilebildiği 8 KW gücündeki elektrik direnç fırınına yerleştirilen kutu içerisinde 900 °C de 1, 3 ve 5 saat sürelerde borlananmıştır(Şekil 3.4).

3.2.4 Bortemperleme işlemi

Bortemperleme işlemi borlama, hızlı soğutma, temperleme ve oda sıcaklığına soğuma kademelerinden oluşmaktadır. Borlama işleminden sonra numuneler hızlı bir şekilde borlama fırınından alınarak paslanmaz çelik kutudan çıkarılmış ve 250, 300, 350 ve 450 °C'deki tuz banyosu içine atılmıştır. Tuz banyosunda 60 dakika bekletildikten sonra fırın dışına alınan numuneler oda sıcaklığına atmosfer şartlarında soğutulmuş ve bol suyla yıkayıp iyice kurutulmuştur. Etil alkolle alkollenip dış ortamdan dolayı etkilenmemesi için pamukla sarılıp tasniflendirme işlemi yapılmıştır. Aşınma deneylerinde kullanılan numunelere uygulanan şematik bortemperleme işlemi çevrimi Şekil 3.5'de verilmiştir.



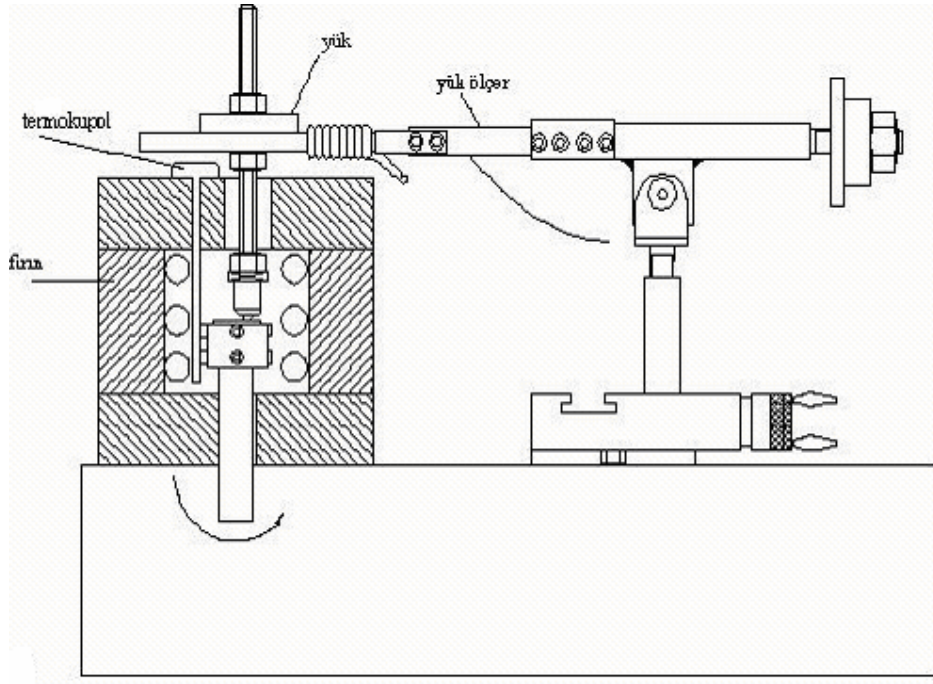
Şekil 3.5 Aşınma deneyi numunelerine uygulanan bortemperleme ısı işlem çevriminin şematik gösterimi.

3.2.5 Aşınma Deneyi

Bu çalışmada, bortemperlenen küresel grafitli dökme demir numuneler bilye-disk aşınma yöntemine tabi tutulmuştur. Numuneler 150, 300 ve 450 °C sıcaklığında, 10 N yük altında ve 0,3 m/s kayma hızında 1000 m aşındırılmıştır. Aşındırıcı olarak 8 mm çapında (Al₂O₃) alümina bilyeye karşı yüksek sıcaklıklarda kuru sürtünme şartlarında aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınma cihazına sıcaklığın ±1 °C hassasiyetle kontrol edilebileceği elektrik direnç fırınına yerleştirilmiştir. Deneylerin yapıldığı aşınma cihazı Şekil 3.6'da verilmiştir. Aşınma hızı, Mahr marka pürüzlülük cihazından elde edilen aşınma izleri kullanılarak aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

Aşınma hızı=Aşınan hacim miktarı/ (Uygulan yük x Kayma mesafesi), mm³/Nm

Her bir numune için izin profili çıkarılmış ve milimetrik kâğıt üzerinden kesit alanları hesaplanmıştır. Kesit alanının aşınma izinin çevre uzunluğu ile çarpılması neticesinde aşınan hacim miktarı belirlenmiştir.



Şekil 3.6 Bilye disk aşınma cihazının şematik gösterimi

3.2.6 Metalografi Çalışmaları

Aşınan test numunelerinden alınan parçaların kesitleri metalografik incelemeler için kullanılmıştır. Numuneler, sırasıyla 120 gridden, 1000 no'lu zımparalama kademesinden geçirildikten sonra, 3 µm'lik elmas pasta ile parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Parlatılan yüzeyler % 2'lik Nitale dağlanarak mikroyapıları ortaya çıkarılmış olup SEM numuneleri ise dağlanmamıştır. Mikroyapılar, Olympus BX-60 marka optik mikroskop ve Taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir. Tabaka kalınlıkları ise yine aynı optik mikroskoba takılı mikrometre yardımıyla ölçülmüştür. Tabaka kalınlığı, metalografi numunesinin dört yüzünden yapılan en az on ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

3.2.7 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)



Resim 3.3 Taramalı elektron mikroskobu

LEO 1430 VP model SEM cihazı W (Tungsten) filament ile çalışmaktadır. Cihaz üzerinde ikincil elektron (secondary electron), geri yansıyan elektron (backscattered electron) ve X-ışınları (EDX-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) detektörü bulunmaktadır. Cihaz görüntü üzerinde nokta, çizgi, alan ve haritalama yöntemleri ile kalitatif ve semi-kantitatif olarak elementer analizleri yapabilmektedir. Cihaz işletim yazılımında görüntü işleme imkânı sağlamaktadır. Cihaz “değişken basınç” prensibi ile çalışma yeteneğine sahiptir. Cihaz Resim 3.3’de verilmiştir. Aşınma izleri SEM’de incelenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir. Ayrıca dikkat çeken bölgelerden nokta analizi yapılmıştır.

4. BULGULAR

4.1 Giriş

Bu bölümde, öncelikle, Çizelge 3.1’de bileşimi verilen alaşımsız küresel grafitli dökme demirin (KGDD) bortemperleme ısıl işlemi neticesinde elde edilen mikroyapısal özellikleri verilmiştir. Daha sonra, seçilen şartlarda bortemperlenen numunelere uygulanan yüksek sıcaklık aşınma deney sonuçları verilip, elde edilen tüm sonuçlar tartışılmıştır.

4.2 Mikroyapısal Özellikler

Bortemperlenmiş numunelerin kesitinden yapılan metalografik inceleme neticesinde temel olarak iki bölgenin varlığı gözlemlenmiştir. Bunlar; kaplama tabakası ve matris yapısıdır.

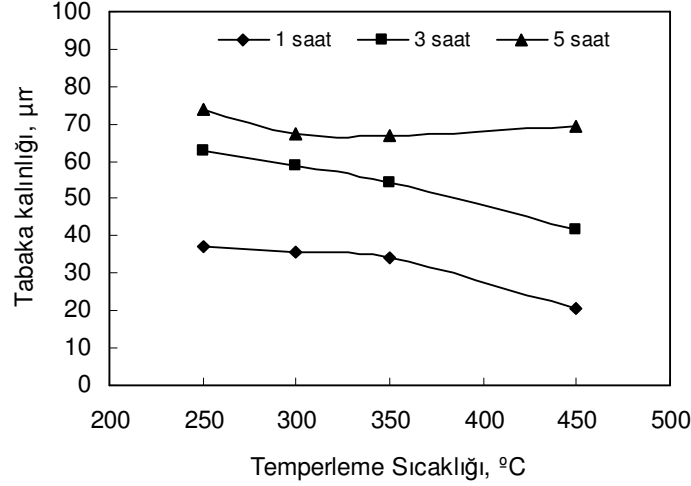
4.2.1 Kaplama Tabakası

Bortemperleme ısıl işlem koşulları tabaka bileşimini etkilemektedir. Genel olarak bortemperleme ısıl işlemi ile malzeme yüzeyinde Fe_2B ve FeB fazlarından oluşan bir borür tabakası oluşmaktadır. X-ışını analizlerinden, çalışılan şartlarda baskın fazın Fe_2B olduğu belirlenmiştir. Borlama süresinin 1 saatten 3 saate çıkarılmasıyla FeB fazının arttığı, buna karşılık sürenin daha fazla artırılmasıyla aynı eğilimin devam etmediği görülmüştür.

Kaplama tabakasını oluşturan fazların miktarlarını temperleme sıcaklığının da etkilediği tespit edilmiştir. Atan temperleme sıcaklığı ile FeB fazında azalma görülmüştür. Düşük borlama süresiyle yüksek temperleme sıcaklığının, oluşan FeB miktarının minimum seviyede kalmasına neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bortemperleme şartları, sadece kaplama tabakasının bileşimini değil kalınlığını da etkilemektedir. Bortemperleme şartlarına bağlı olarak ölçülen tabaka kalınlıklarının grafik olarak gösterimi Şekil 4.1’de verilmiştir.

Çalışılan bortemperleme şartlarında numune yüzeyinde oluşan tabaka kalınlığı 21 μm ile 74 μm arasında değişmektedir. Tabaka kalınlığının kuvvetle borlama süresine bağlı olduğu bununla birlikte temperleme sıcaklığı tarafından da etkilendiği anlaşılmaktadır. Görüldüğü üzere tüm temperleme sıcaklıklarında artan borlama süresi ile oluşan tabaka kalınlığı artmaktadır. Borlama, difüzyona dayalı bir işlem olduğu için atomik borun malzeme içine yayılması zamana bağlıdır ve artan borlama süresi ile tabaka kalınlığının artması beklenen bir davranıştır.



Şekil 4.1 Tabaka kalınlığının borlama süresi ve temperleme sıcaklığı ile değişimi.

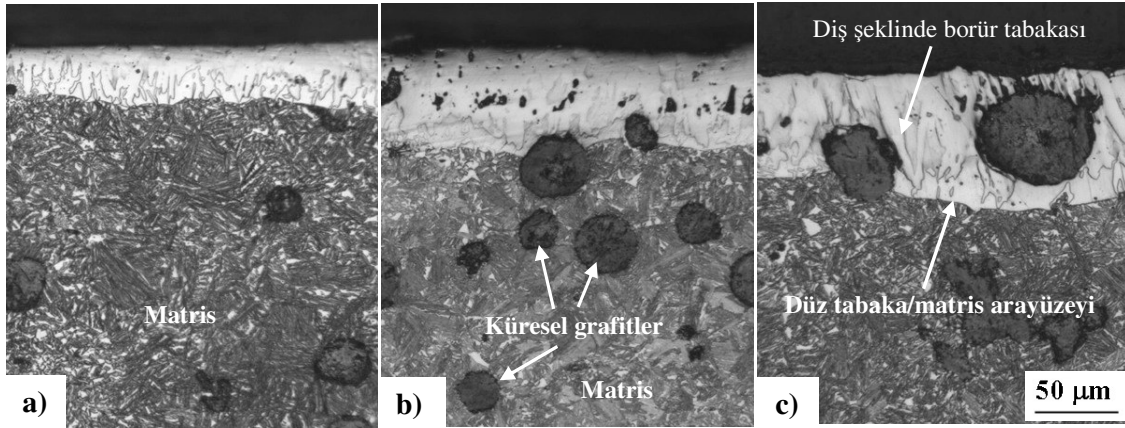
Borür tabaka kalınlığının temperleme sıcaklığına göre değişimi incelendiğinde borlama süresine bağlı olarak farklı davranışlar görülmektedir. 3 saatlik borlama süresi için artan temperleme sıcaklığı ile borür tabakasında sürekli bir azalma görülmektedir. Benzer davranış meyli 1 saatlik borlamada da sezilmektedir. Fakat tabaka kalınlığındaki azalma 350 °C'nin üzerinde gerçekleşmektedir. Borlama süresinin 5 saat seçilmesi durumunda, artan temperleme sıcaklığı ile tabaka kalınlığında hafif bir düşüştü sonra artma eğilimi görülmesine rağmen temperleme sıcaklığından fazla etkilenmediği sonucunu çıkarmak mümkündür. Burada özellikle dikkat çeken husus temperleme sıcaklığının tabaka kalınlığı üzerinde etkili olmasıdır.

4.2.2 Matris Yapısı

Metalografik olarak hazırlanan bortemperlenmiş numunelerin seçilmiş optik mikroyapı fotoğrafları Resim 4.1 ve Resim 4.2'de verilmiştir. Bütün bortemperleme şartlarında

çekilmiş optik mikroyapı fotoğrafları bulunmasına rağmen teze hepsi koyulmamış, sadece borlama süresi ve temperleme sıcaklığının etkisinin görülebileceği fotoğraflar kullanılmıştır. Resim 4.2’de borlama süresinin, Resim 4.3’te ise temperleme sıcaklığının mikroyapıya etkisini göstermektedir.

Bortemperlenmiş bütün numunelerde borür tabakası, kaplama-matris arayüzeyi ve matris açık bir şekilde ortaya çıkmıştır. Yüzeyle oluşan bor tabakası dişsel bir morfolojiye sahiptir ve tabaka/matris arayüzeyi çeliklerden farklı olarak oldukça düz görünmektedir. Resim 4.1, artan borlama süresiyle hem kaplama tabaka kalınlığındaki artışı hem de matris yapısındaki değişimi göstermektedir. Her üç borlama süresinde de, oluşan matris yapısının üst ösferrit yapısının karakteristiklerini taşıdığı görülmektedir. Oysa klasik östemperlemede 300 °C’de alt ösferrit matris yapısı elde edilmektedir.

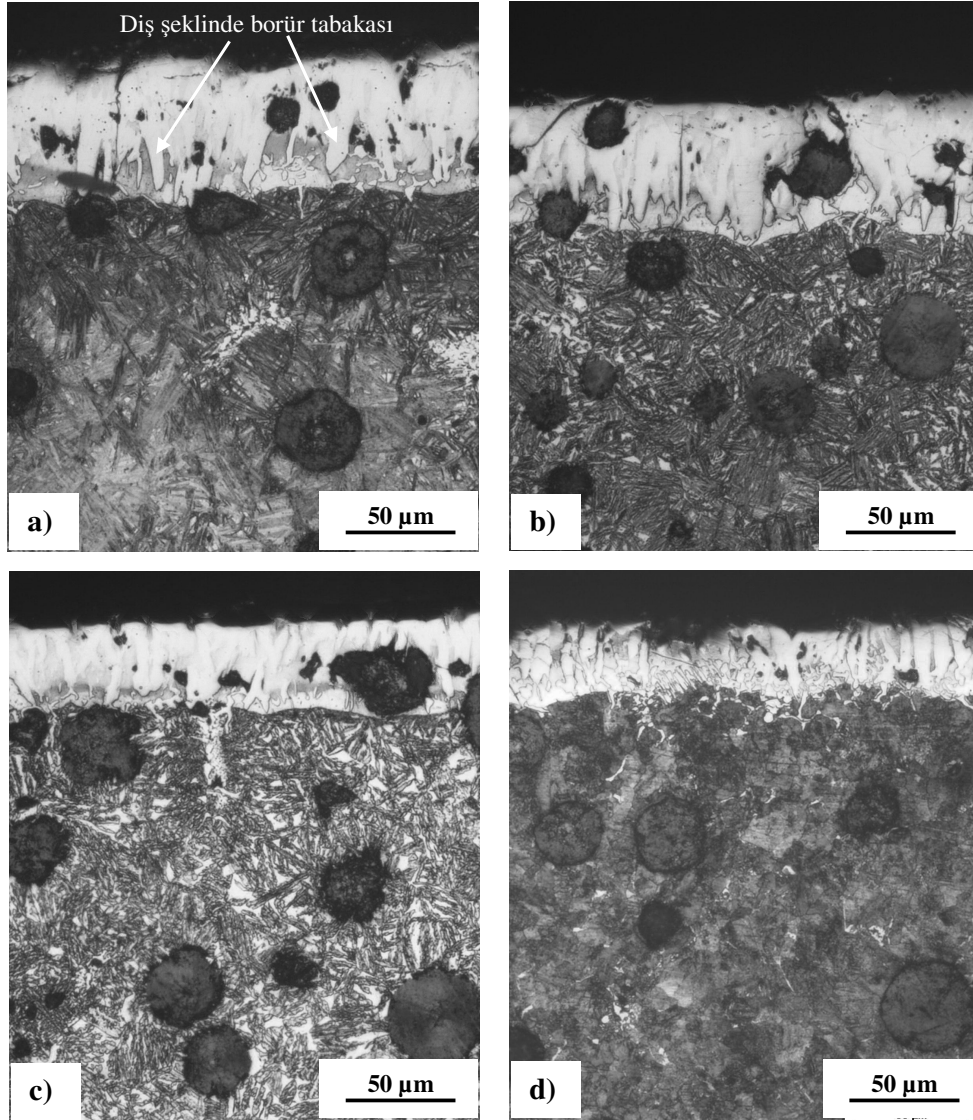


Resim 4.1 900 °C’de a) 1 saat, b) 3 saat ve c) 5 saat borlandıktan sonra 300 °C’de 1 saat temperlenen numunelere ait kesitten alınan optik mikroyapı fotoğrafları.

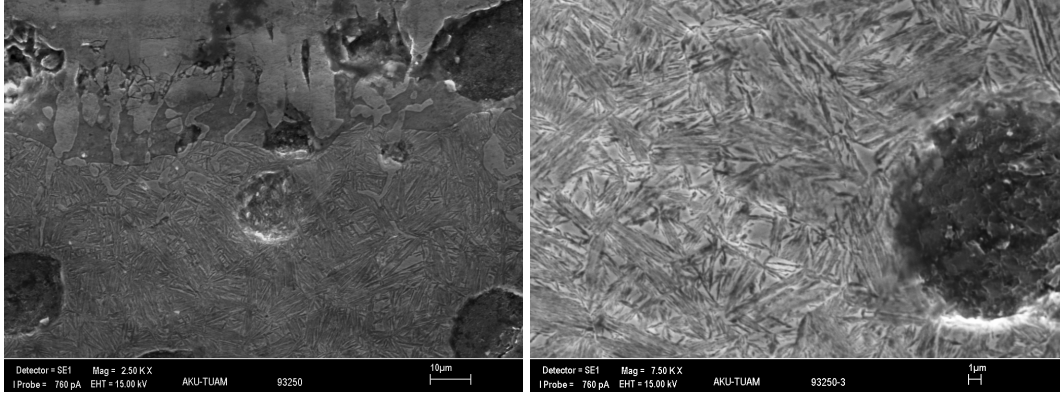
Temperleme sıcaklığının kaplama tabakasına ve matris mikroyapısına etkisi incelendiğinde (Resim 4.3) 3 saat borlama süresi için artan temperleme sıcaklığı ile tabaka kalınlığının azaldığı açıkça görülmektedir. Mikroyapı fotoğrafları matris yapısının borlama süresinden daha çok temperleme sıcaklığı tarafından belirlendiğini ortaya koymaktadır. 250 °C’de alt ösferrit, 300 ve 350 °C’lerde üst ösferrit ve 450 °C’de çok ince bir perlitik matris oluşmuştur.

Ancak optik mikroyapı fotoğraflarından matris yapının ayrıntılarını görebilmenin zorluğundan dolayı SEM fotoğraflarına ihtiyaç duyulmaktadır. SEM fotoğrafları, matrise geçiş bölgesini kapsayacak şekilde borür tabakasını görebilmek için numune kenarından

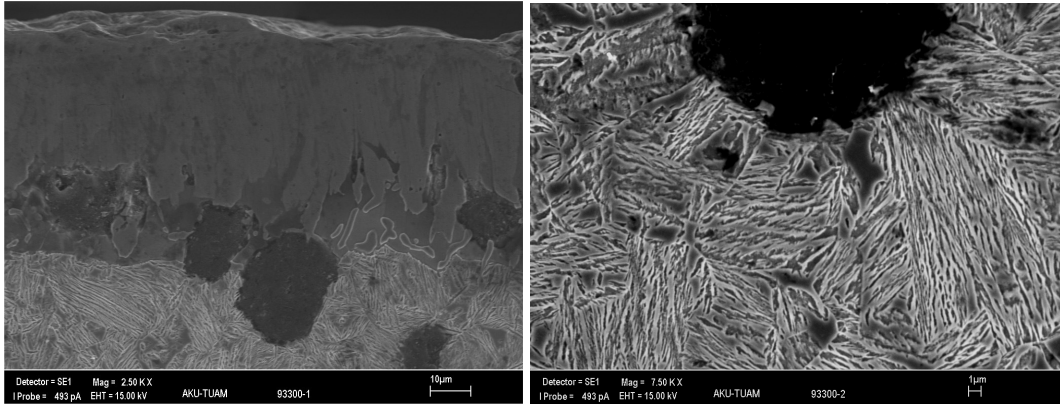
(soldakiler) ve matris yapısını görebilmek için numune merkezinden (sağdakiler) olmak üzere iki bölgeden alınmıştır Resim 4.3). Soldaki fotoğraflar yukarıdan aşağı borür tabakası ve geçiş bölgesinin sağdaki fotoğraflar ise matris yapının artan temperleme sıcaklığı ile değişimini göstermektedir. Burada borür tabakasının ve matrisin tüm karakteristiklerini belli bir bölgeden çekilen fotoğrafla belirlemek mümkün değildir. Bu nedenle fotoğrafların, borteemperleme şartlarında elde edilen mikroyapıların genel karakteristiğinin en iyi görülebildiği alandan alınmasına dikkat edilmiştir.



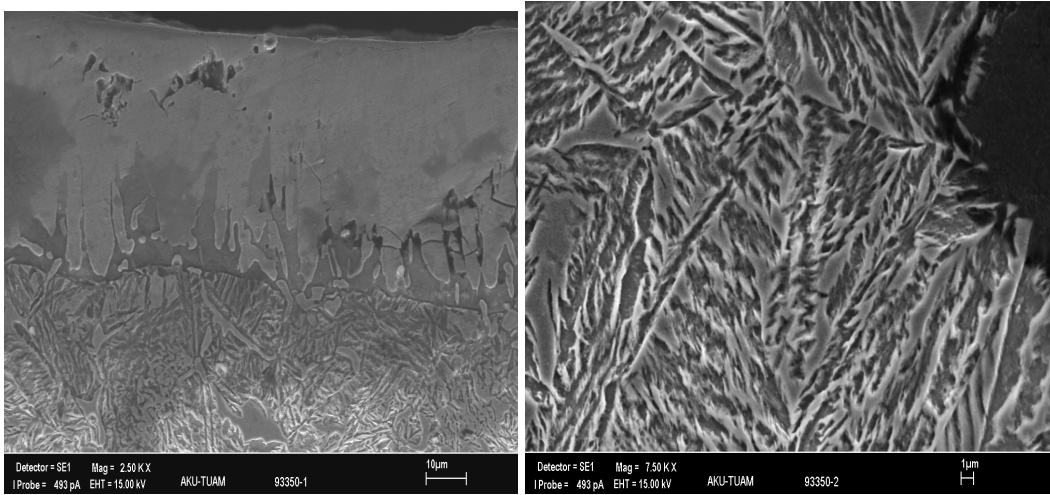
Resim 4.2 900 °C’de 3 saat borlanıp a) 250 °C, b) 300 °C, c) 350 °C ve d) 450 °C’de 1 saat temperlenen numunelerin kesitlerinden alınan optik mikroyapı fotoğrafları.



a)

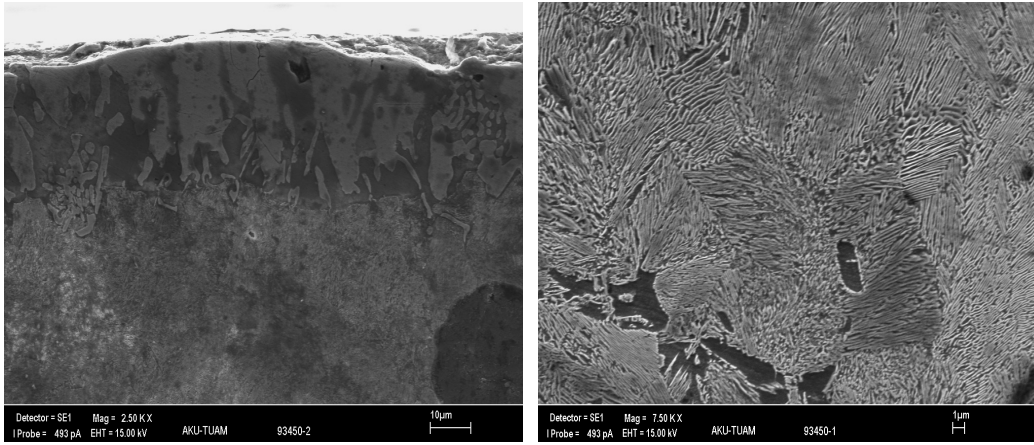


b)



c)

Resim 4.3 900 °C’de 3 saat borlanıp a) 250 °C, b) 300 °C, c) 350 °C ve d) 450 °C’de 1 saat temperlenen numunelerin kenardan ve merkezden alınmış SEM fotoğrafları.



d)

Resim 4.3 900 °C’de 3 saat borlanıp a) 250 °C, b) 300 °C, c) 350 °C ve d) 450 °C’de 1 saat temperlenen numunelerin kenardan ve merkezden alınmış SEM fotoğrafları.

Resim 4.3 incelendiğinde temperleme sıcaklığının borür tabakasının morfolojisini çok fazla değiştirmedini yani bütün temperleme sıcaklıklarında dişsel morfolojinin varlığı görülmektedir. 250 ve 300 °C’de temperlenen numunelerin borür tabakası-matris arasında kalan geçiş bölgesinin daha düzensiz olduğu buna karşılık 300 °C’de borür tabakasının daha yoğun ve daha az kusur içerdiği görülmektedir. 350 °C’de temperlenen numunede ise borür tabakası içinde süreksizlikler ve yer yer diş şeklindeki oluşumların çatladığı dikkat çekmektedir. 450 °C’de ise neredeyse ara bölgenin borür tabakası içine dağıldığı ve gri bölgenin tabaka yüzeyine kadar uzandığı görülmektedir.

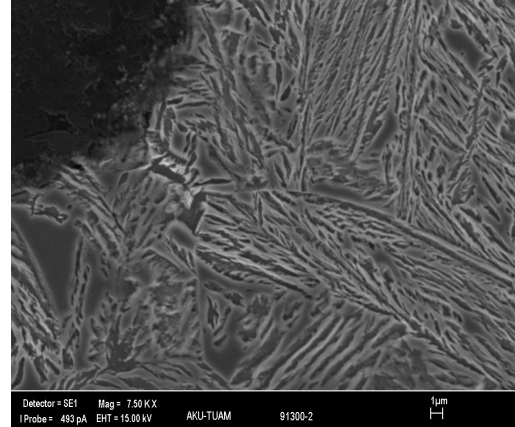
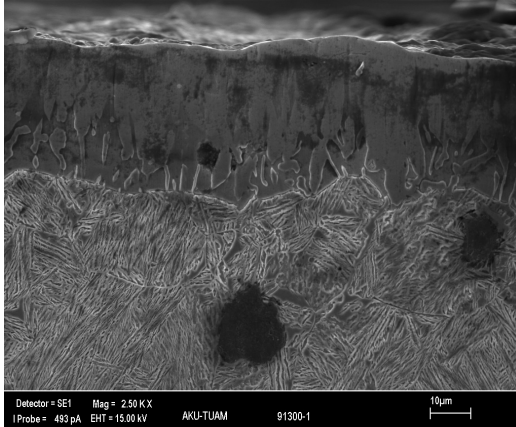
Merkezden çekilen SEM fotoğrafları incelendiğinde 450 °C’de perlitik, diğer sıcaklıklarda ise ösferritik mikroyapıların elde edildiği görülmektedir. 250 °C’de alt ösferrit 350 °C’de ise üst ösferrit yapısı net olarak ayrılabilir. Buna karşılık, şu ana kadar yapılan çalışmalarda optimum özelliklerin elde edildiği 300 °C’de ise üst ösferrit yapısının karakteristikleri ağır basmakta, üstelik yapının 350 °C’dekine göre oldukça ince olduğu dikkat çekmektedir.

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde 300-330 °C sıcaklık aralığı genellikle alt ve üst ösferritin birlikte bulunduğu sıcaklıklardır. Tam ösferritlenmiş yapılar daha çok 330-375 °C aralığında elde edilmektedir. Bilindiği gibi östemperleme sıcaklığı arttıkça (soğuma hızı düşmekte) dönüşüm için itici güç azalmaktadır. Borür tabakasının ısı iletim katsayısının düşük olması ($\lambda_{\text{FeB}} = 17,4 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{K}$, $\lambda_{\text{Fe}_2\text{B}} = 12 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{K}$, $\lambda_{\text{dökme demir}}$

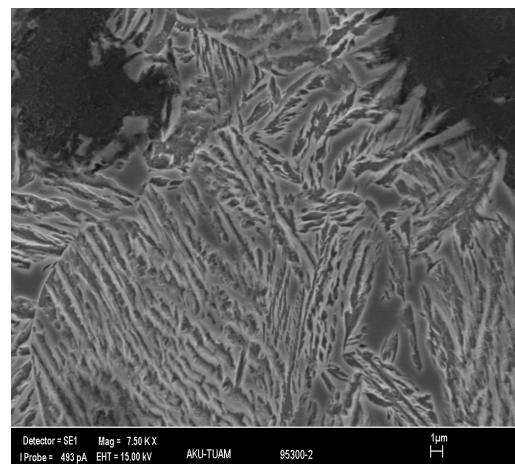
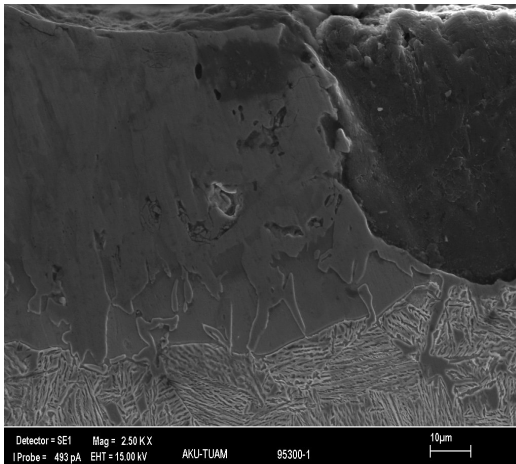
= 25-42 W/m. °K) artan östempereleme sıcaklığının etkisine benzer şekilde soğuma hızını düşürdüğü sanılmaktadır.

Böylece 330 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda elde edilebilen üst ösferritik yapı 300 °C'de elde edilebilmektedir. Aynı şekilde üst ösferrit-perlit geçiş sıcaklığı da düşmektedir. Sonuç olarak 300 °C'de tam ösferritlenmiş yapı elde edilirken 350 °C'deki mikroyapıda açıkça görülmemesine rağmen bir miktar kırılmalık reaksiyonunun oluşması muhtemeldir.

Resim 4.4'de 900 °C'de 1 ve 5 saat borlanmış ve 300 °C'de temperlenmiş numunelerin SEM fotoğrafları verilmiştir. Resim 4.3 b ve Resim 4.4 birlikte incelendiğinde borlama süresinin etkisi görülmektedir. Artan borlama süresiyle borür tabaka kalınlığının arttığı net olarak görülebilmektedir. 3 ve 5 saatlik borlama sürelerinde çok daha yoğun görümlü borür tabakalarının elde edilmesine karşılık 3 saatlik borlama süresinin 1 ve 5 saatlik borlamalara göre daha ince bir üst ösferrit yapısı oluşturmuştur.



a)



b)

Resim 4.4 900 °C’de **a)** 1 saat, **b)** 5 saat borlanıp 300 °C’de temperlenen numunelerin kenardan ve merkezden alınmış SEM fotoğrafları.

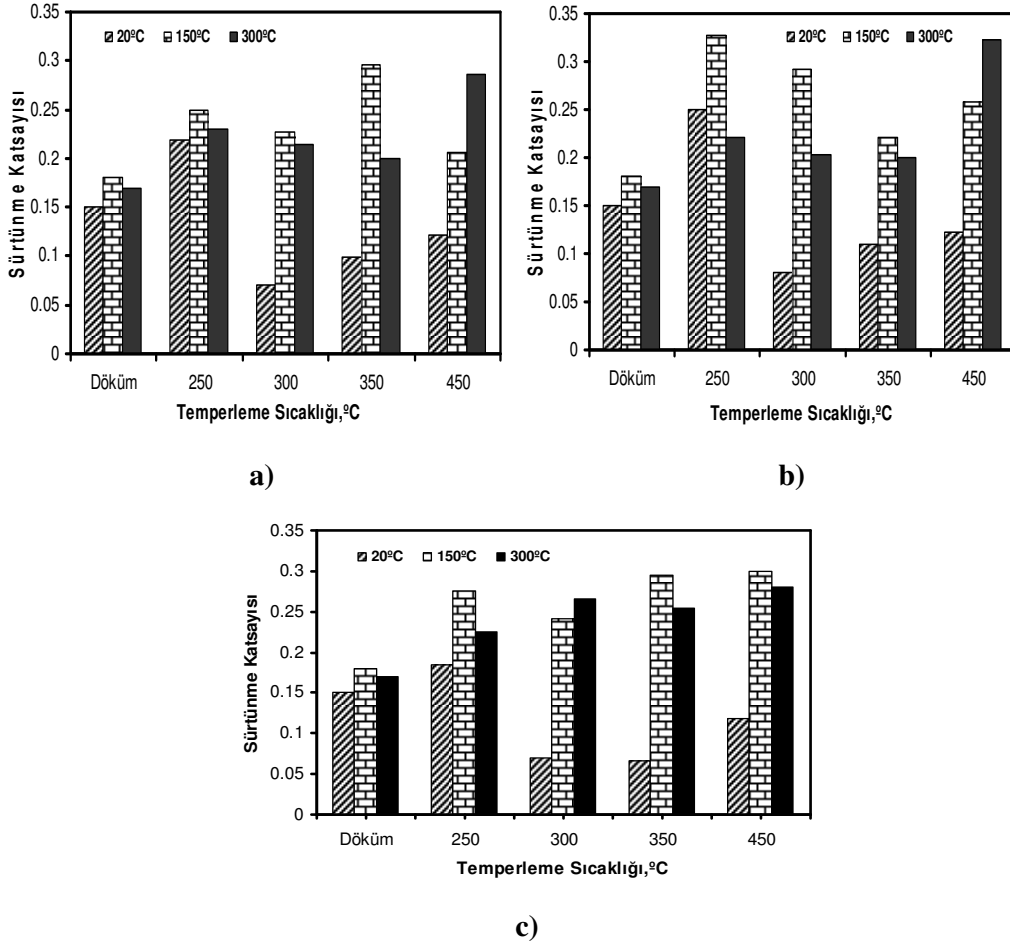
4.3 Aşınma Özellikleri

Bortemperleme işlemi uygulanacak aşınma numuneleri metalografik olarak hazırlanarak, yüzey pürüzlülükleri Perthometer M2 marka yüzey pürüzlülüğü cihazında ölçülmüştür. Deneye hazır aşınma numunelerinin ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin (Ra) 0,311 µm nin altında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, bortemperleme işlemi uygulanan numunelerin aşınma deneyi öncesi Ra değerleri de tespit edilmiştir. Bortemperleme işlemi ile Ra değerlerinin artmasına rağmen, borlama süresi ve temperleme sıcaklığı ile tutarlı bir ilişkisi kurulamamıştır. Bortemperlenen numuneler, 20 °C, 150 °C, 300 °C ve 450 °C ortam sıcaklıklarında 10 N yük altında ve 0,3 m/s kayma hızında 1000 m aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Aşındırıcı olarak 8 mm çapında Al₂O₃ bilye kullanılmıştır. Elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerleri ise çizelge 4.1’de verilmiştir. Teknik bir nedenden dolayı 450 °C ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneylerinde sürtünme katsayısı ölçülememiştir. Bortemperleme şartları ve ortam sıcaklığının sürtünme katsayısına ve aşınma hızına etkisini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de görülmektedir.

Çizelge 4.1 Ölçülen sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerleri.

Borlama Süresi, saat	Aşınma Ortamı Sıcaklığı, °C	Sürtünme Katsayısı (μ_k)				Aşınma Hızı x 10^{-6} , mm ³ /Nm			
		Yük 10 N							
		Bortemperleme sıcaklığı, °C							
		250	300	350	450	250	300	350	450
1	20	0,219	0,071	0,099	0,121	0,0137	0,0084	0,0222	0,1029
	150	0,25	0,227	0,296	0,206	0,0211	0,0208	0,0271	0,1611
	300	0,23	0,214	0,2	0,286	0,0372	0,0322	0,0351	0,2358
	450						0,0668		
3	20	0,25	0,081	0,109	0,123	0,0371	0,0269	0,0315	0,1441
	150	0,327	0,292	0,221	0,258	0,1044	0,0325	0,0946	0,1686
	300	0,221	0,204	0,2	0,232	0,1113	0,0357	0,121	0,1965
	450					0,0517	0,1316	0,0471	0,0288
5	20	0,185	0,07	0,067	0,118	0,0404	0,0449	0,0603	0,1275
	150	0,275	0,242	0,295	0,3	0,0504	0,0516	0,0795	0,1786
	300	0,225	0,266	0,255	0,28	0,0653	0,0723	0,1186	0,2146
	450						0,220		
Döküm Malzeme	20	0,15				0,394			
	150	0,18				0,398			
	300	0,17				0,455			
	450					0,524			

Şekil 4.2 incelendiğinde bortemperleme şartları ve ortam sıcaklığına bağlı olarak sürtünme katsayısının tutarlı bir ilişkisinin kurulamadığı görülmektedir. Bortemperlenmiş numunelerin oda sıcaklığındaki sürtünme katsayısı hariç döküm numunenin (ısıl işlemsiz KGDD) sürtünme katsayısından daha yüksektir. Borlanıp 250 °C’de temperlenen numunelerin ise döküm numuneden daha yüksek sürtünme katsayısı sergilediği dikkat çekmektedir. Ayrıca oda sıcaklığında yapılan aşınma deneylerinde 250 °C’den sonra artan temperleme sıcaklığı ile sürtünme katsayısında düzenli bir artış görülmektedir. Çoğu bortemperleme şartlarında en yüksek sürtünme katsayısının 150 °C ortam sıcaklığında elde edilmesi ise dikkate değer diğer bir sonuç olarak göze çarpmaktadır.



Şekil 4.2 a) 1 saat, b) 3 saat ve c) 5 saat borlama süreleri için sürtünme katsayısının ortam sıcaklığı ve borteemperleme sıcaklığına bağlı olarak değişimi.

Genel olarak yüksek sıcaklıklarda borteemperlenmiş numunelerin döküm numuneninkinden daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu söylenebilir. Borlama süresinin ise sürtünme katsayısına dikkate değer bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

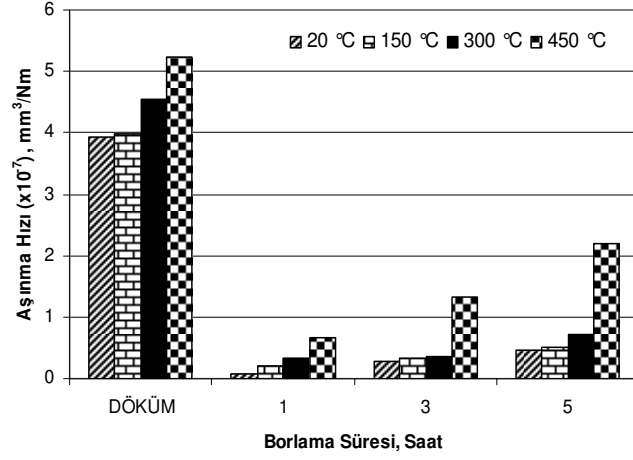
Farklı ortam sıcaklıklarında borlama süresi (Şekil 4.3 a) ve temperleme sıcaklığının (Şekil 4.3 b) aşınma hızına etkisi incelendiğinde oldukça tutarlı ilişkiler görülmektedir. Her şeyden önce borteemperlenmiş numunelerin tümünün bütün ortam sıcaklıklarında döküm numuneye göre daha düşük aşınma hızı gösterdiği dikkat çekmektedir. Bu, borteemperlenmiş numunelerin yüksek sıcaklıktaki aşınma direncinin döküm malzemenin oda sıcaklığındaki aşınma direncinden bile daha iyi olduğu anlamına geldiği için son derece önemli bir sonuçtur.

Grafiklerden hem borlama süresinin hem temperleme sıcaklığının farklı ortam sıcaklıklarında malzemenin aşınma hızı üzerine etki ettiği anlaşılmaktadır. Farklı

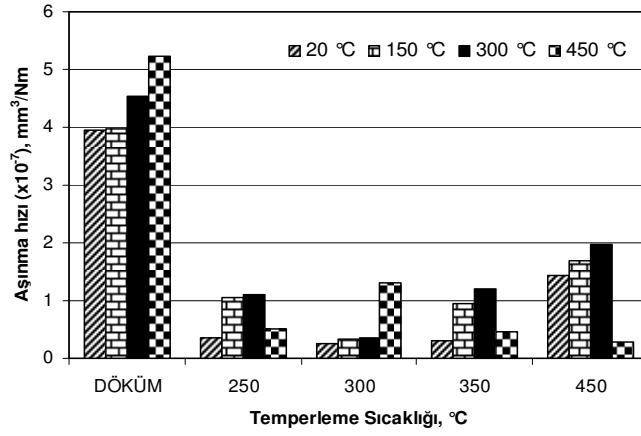
sürelerde borlanıp 300 °C'de temperlenen numunelerin ortam sıcaklığına bağlı olarak aşınma hızı davranışı incelendiğinde (Şekil 4.3 a) genel olarak artan borlama süresinin aşınma hızını az da olsa arttırdığı görülmektedir. Üstelik bu artış artan bortemperleme sıcaklığı ile daha belirgin olmaktadır.

Temperleme sıcaklığının etkisine bakılacak olursa tutarlı eğilimler görülmesine rağmen bazı tutarsızlıkların olduğu da bir gerçektir. 300 °C temperleme sıcaklığının dışında aşınma hızının artan ortam sıcaklığı ile önce artarak bir maksimuma çıktığı ve daha sonra azalma eğilimine girdiği görülmektedir. Bu azalma eğilimi 300 °C'lik ortam sıcaklığından sonra olmaktadır. 300 °C temperleme sıcaklığında ise 300 °C ortam sıcaklığına kadar aşınma hızı çok değişmemesine rağmen, ortam sıcaklığının 450 °C olması durumunda önemli derecede artmaktadır.

Bu verilerden de anlaşılmaktadır ki, tam ösferritik matris yapısına sahip bortemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma dirençleri döküm malzemeye göre oldukça iyidir. Özetlenecek olursa, 1-3 saat borlama işleminden sonra 300 °C'de temperlenen numunelerin 300 °C ortam sıcaklığına kadar çok iyi aşınma direncine sahip olduğu sonucunu çıkarmak yanlış olmayacaktır.



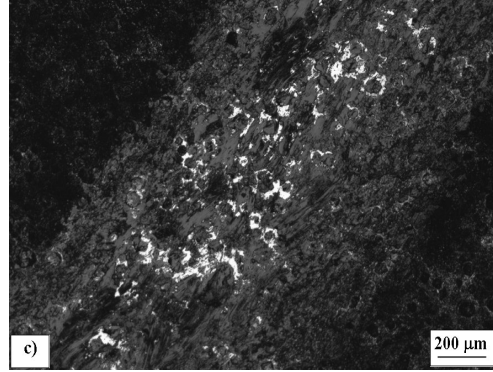
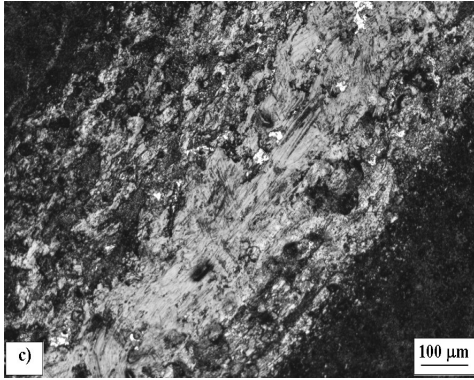
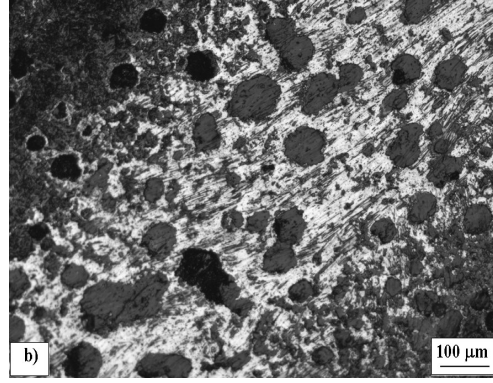
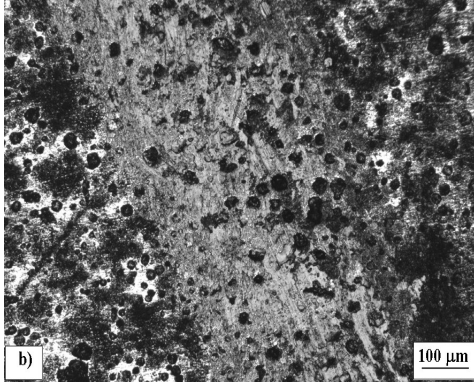
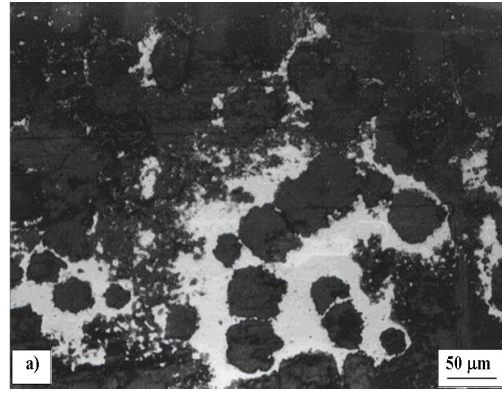
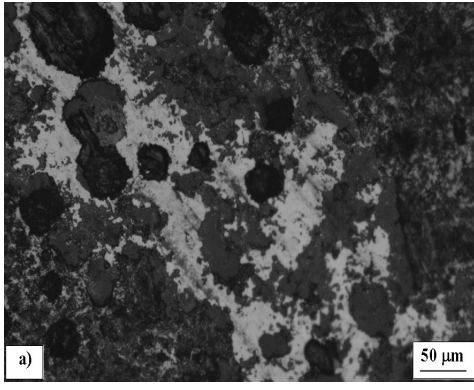
a)



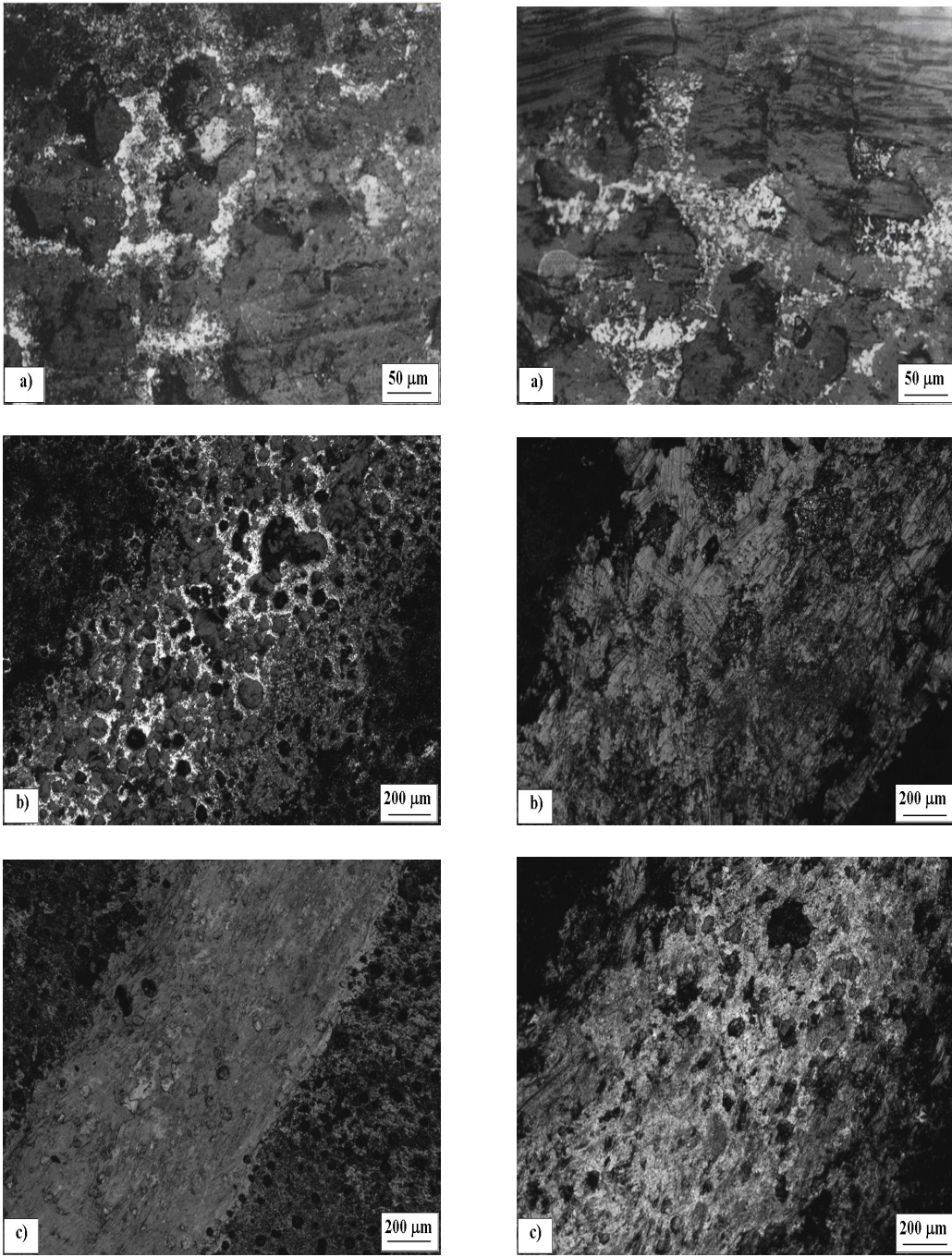
b)

Şekil 4.3 Farklı ortam sıcaklıklarında a) aşınma hızı-borlama süresi (temperleme sıcaklığı 300 °C) ve b) aşınma hızı-temperleme sıcaklığı (borlama süresi 3 saat) grafikleri.

Farklı ortam sıcaklıklarında aşınma deneyine tabi tutulan bortemperlenmiş numunelerin aşınma yüzeylerinden alınmış seçme optik fotoğrafları Resim 4.5 ve Resim 4.6'da verilmiştir. Alınan optik fotoğraflardan aşınma mekanizmasının çok net olmamakla birlikte aşınma yüzeyleri üzerinde adhezif aşınma karakteristikleri ve abrazif çizikler görülmektedir. Ortam sıcaklığının artmasıyla adhezif aşınma belirginleşmektedir.

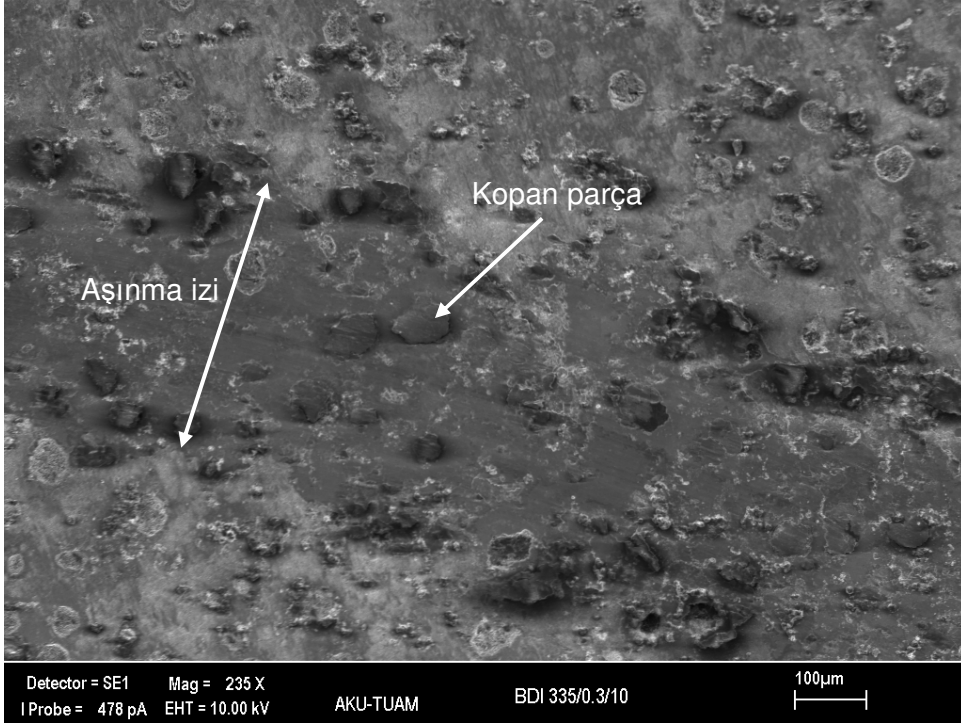


Resim 4.5 900 °C’de 1 saat süre ile borlanmış 250 °C’de (soldakiler) ve 300 °C’de (sağdakiler) bortemperlenmiş numunelerin **a)** 20 °C, **b)** 150 °C, **c)** 300 °C yapılmış aşınma deneylerinde oluşan aşınma izlerinin mikroyapı fotoğrafları.



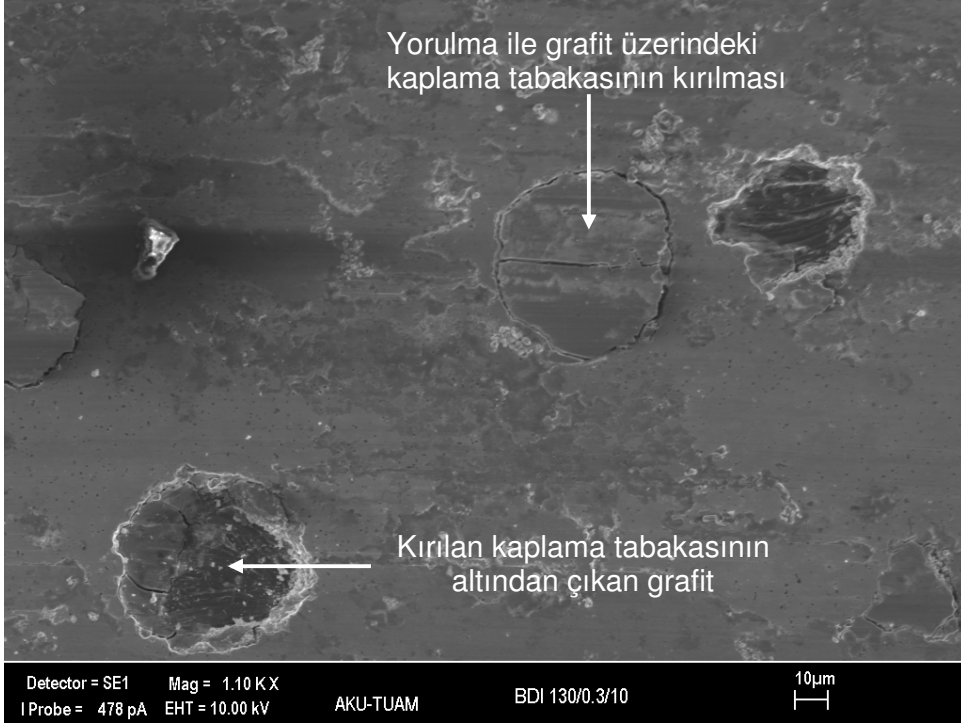
Resim 4.6 900 °C’de 1 saat süre ile borlanmış 350 °C’de (soldakiler) ve 450 °C’de (sağdakiler) bortemperlenmiş numunelerin **a)** 20 °C, **b)** 150 °C, **c)** 300 °C yapılmış aşınma deneylerinde oluşan aşınma izlerinin mikroyapı fotoğrafları.

Yapılan SEM analizlerinden BKGDD numunelerin abrazyon, adhezyon ve yorulma aşınması türünde aşınmaya maruz kaldığı belirlenmiştir (Resim 4.7 ve Resim 4.8). Aşınma olayı, deney şartlarına bakmaksızın, küresel grafitlerin etrafında cereyan etmektedir. Karşılıklı iki etki aşınma davranışında belirleyici olmaktadır. Yüzeye açık grafit küreleri bilye/yüzey arasında oluşan basıncın etkisiyle kırılıp yüzeye dağılmaktadır. Bu durumda aşınma direncinin artmasına katkı yapılmaktadır. Diğer taraftan yüzeye açık olmayan, kaplama tabakasının hemen altında bulunan grafit ise aşınma deneyi sırasında esnemekte ve tekrarlanan yüklemeler neticesinde kırılarak bir yorulma aşınmasına yol açmaktadır (Resim 4.8). Kopan sert demirborür parça iki yüzey arasında abrazif aşınmaya neden olmaktadır.

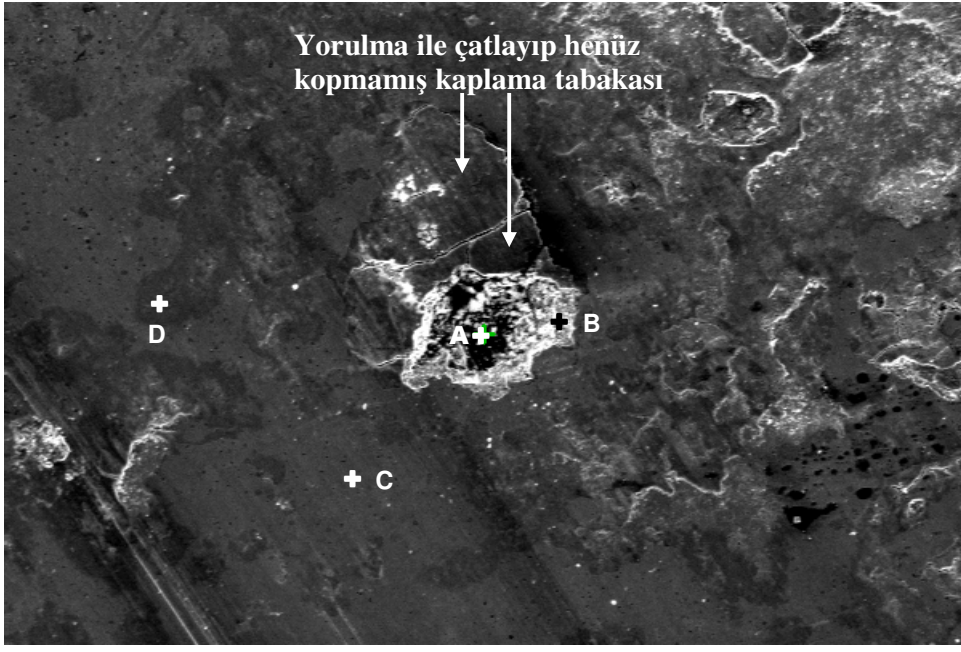


Resim 4.7 900 °C’de 3 saat borlamayı takiben 350 °C’de 1 saat temperlenen numunenin 10 N yük altında ve 0,3 m/s kayma hızında 1000 m aşındırılmış yüzey SEM fotoğrafı.

Oda sıcaklığında yapılan aşınma deneyinden sonra aşınma yüzeyinden nokta analizleri alınmıştır. Analizlerin alındığı noktalar Resim 4.9’da, sonuçlar ise Çizelge 4.2’de verilmiştir.



Resim 4.8 Bortemperlenmiş numunenin aşınma türünü gösteren SEM fotoğrafı. Borlama süresi 1 saat, temperleme sıcaklığı 300 °C, kayma hızı 0,3 m/s, yük 10 N.



Resim 4.9 900 °C’de 3 saat borlandıktan sonra 300 °C’de 1 saat temperlenen numunenin 5 N yük altında 0,5 m/s kayma hızında 1000 m aşındırılmasıyla oluşan aşınma yüzeyinden alınan nokta analizi bölgeleri.

Çizelge 4.2 Resim 4.9’da görülen bölgelerden alınan nokta analiz sonuçları.

Element	Seriler	A	B	C	D
Karbon	K serisi	74,5	3,61	1,39	0,86
Oksijen	K serisi	9,53	17,24	3,96	36,17
Demir	K serisi	15,97	79,15	94,65	62,97

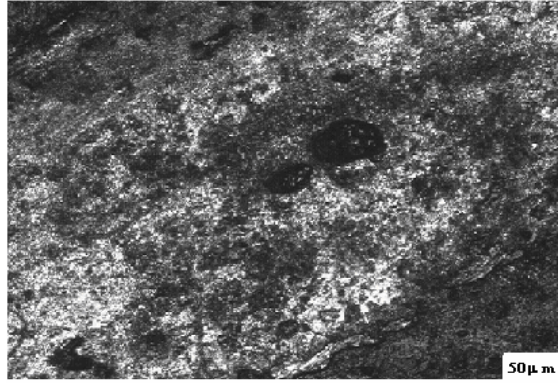
(A) noktasından alınan analizden bu bölgenin çok büyük oranda karbon içerdiği anlaşılmaktadır. Bu sonuç kaplama tabakası altındaki grafitin yorulma aşınması ile üzerindeki kaplama tabakasının kırılması sonucu yüzeye açıldığını göstermektedir. Çatlayan ama henüz yüzeyden kopmayan tabaka halen resimde görülmektedir.

(B) noktası yorulma ile grafit tabakasının kırılması sonucu açığa çıkan grafit/kaplama tabakası ara yüzeyini göstermektedir. Bu bölgede demirin oksitlendiği ve bir miktar grafit içerdiği anlaşılmaktadır. Çünkü alınan analizde yüksek oranda oksijen ve az miktarda karbon tespit edilmiştir. Bu bölgede bulunabilecek bor elementini bu analiz yöntemiyle tespit etmek mümkün değildir.

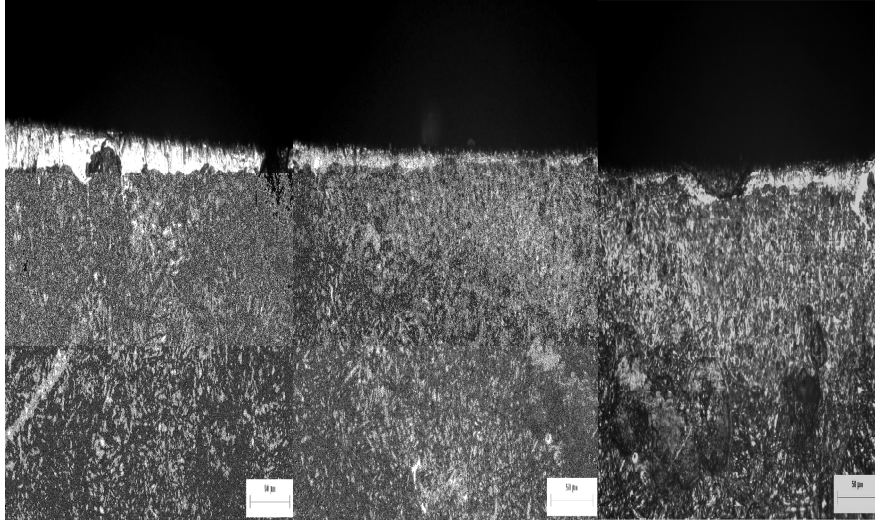
(C) noktası abrasif aşınma karakteristiklerini taşımaktadır. Bu bölgede kaplama tabakasının aşındığı fakat matrise ulaşılmadığı sanılmaktadır. Matrise ulaşılmış olsa idi analiz sonucunda silisyum ve manganez gibi küresel grafitli dökme demirde bulunan elementlerin de bulunması gerekirdi. Dikkat çeken nokta ise bu bölgenin oksitlenmemiş olmasıdır.

Analiz sonuçları (D) noktasının çok büyük oranda demiroksitten meydana geldiği ve grafitin ise hemen hemen hiç bulunmadığını ortaya koymaktadır. Yine bu bölgede borür tabakasının aşılıp matrise inildiğine dair bir veri elde edilmemiştir.

3 saat borlanıp 300 °C'de temperlenen numunelerin 450 °C ortam sıcaklığında aşındırılmasıyla elde edilen aşınma izi ve aşınan bölgenin kesit optik fotoğrafları Resim 4.10'da verilmiştir.



(a)



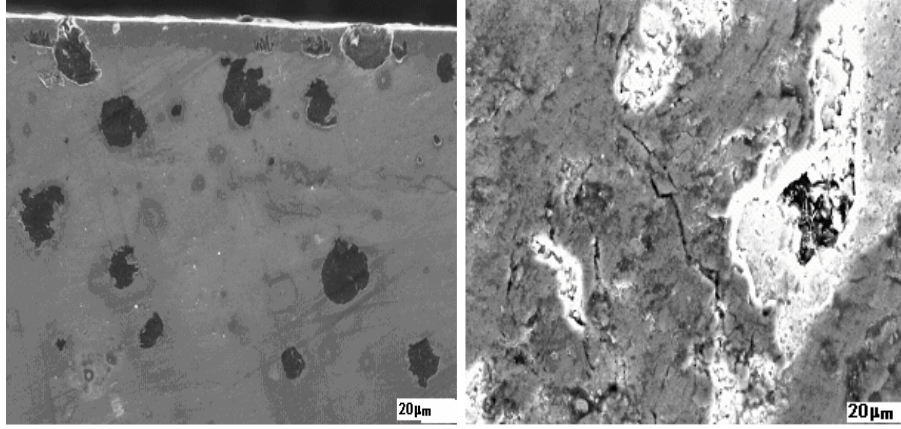
(b)

Resim 4.10 3 saat borlanıp 300 °C’de temperlenen numunelerin 450 °C ortam sıcaklığında aşındırılmasıyla elde edilen **a)** aşınma izi ve **b)** aşınan bölgenin kesit optik fotoğrafları.

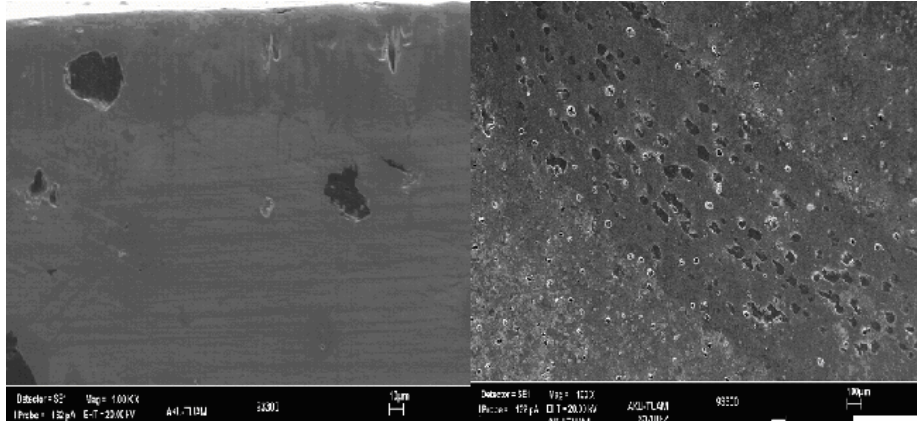
Fotoğraflar dikkatle incelenince optik fotoğraflardan yine aşınma türünü net olarak belirlemek mümkün olmamaktadır. Ancak yüksek sıcaklıkta (450 °C) yapılan aşınma izinde abrazif aşınmanın varlığına dair bir işarete rastlanmamıştır. Kesitten alınan fotoğrafta ise (Resim 4.10 b) çalışılan aşınma deneyi şartlarında borür tabakasının aşındığı ve neredeyse matrise ulaştığı görülmektedir.

Özellikle borlama süresinin etkisini görebilmek için yapılan bir dizi SEM çalışması ile kesitten ve yüzeyden alınan fotoğraflar Resim 4.11’de verilmiştir. Kesitler incelendiğinde borür tabakaları açıkça görülmektedir. Aşınma izlerine üstten bakıldığında aşınma bölgesinin derin çatlaklar içerdiği görülmektedir (Resim 4.11 a). 3

saat borlanıp 300 °C’de temperlenen numunenin aşınma izi çok yoğun çukurcuklar içermektedir (Resim 4.11b). Bu, 450 °C ortam sıcaklığında aşınma hızının neden yüksek olduğunu açıklamaktadır.

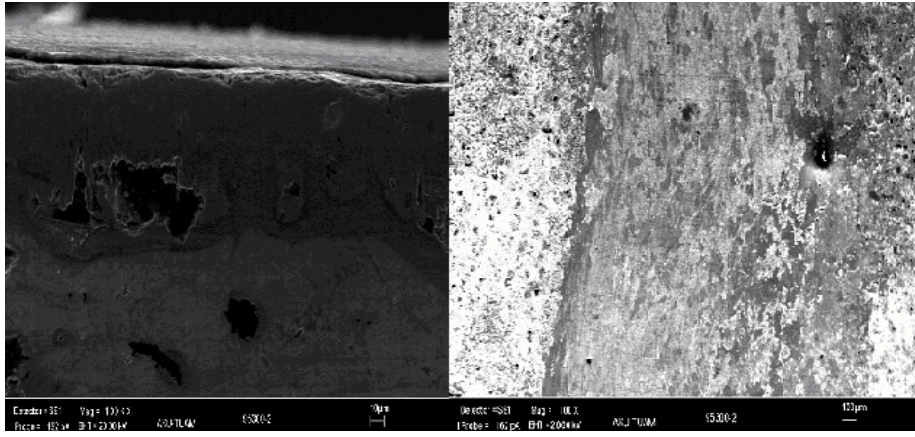


a)



b)

Resim 4.11 a) 1 saat, **b)** 3 saat ve **c)** 5 saat borlanıp 300 °C’de temperlenen numunelerin 450 °C ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneyinden sonra kesitten ve yüzeyden alınan SEM fotoğrafları.



c)

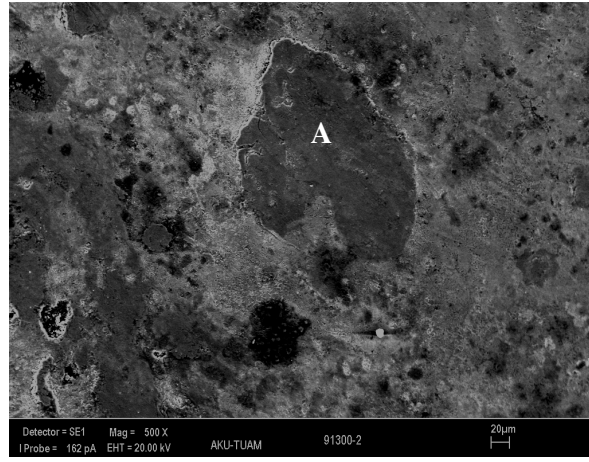
Resim 4.11 a) 1 saat, b) 3 saat ve c) 5 saat borlanıp 300 °C’de temperlenen numunelerin 450 °C ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneyinden sonra kesitten ve yüzeyden alınan SEM fotoğrafları.

Daha önce ada sıcaklığındaki aşınma karakteristiklerini belirleyebilmek için yapılan SEM ve nokta analizi çalışması 450 °C ortam sıcaklığındaki aşınma özelliklerini belirlemek için de yapılmıştır. Nokta analizlerinin yapıldığı bölgeler Resim 4.12’de, sonuçlar ise Çizelge 4.3’de verilmiştir.

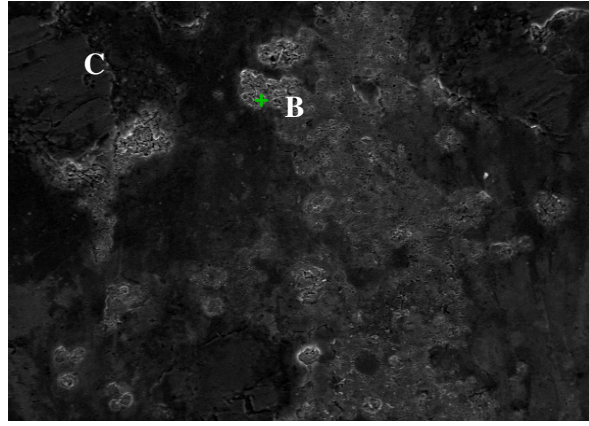
Çizelge 4.3 incelendiğinde **A**, **C**, **D** ve **E** bölgelerinde yüksek oranda oksijen belirlenmiştir. Aynı bölgelerde bir miktar silisyumun varlığı dikkat çekmektedir. Bu bölgelerde borür tabakasının kırıldığı ve tabakanın altındaki matrisin oksitlendiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.3 Resim 4.12 ’de görülen bölgelerden alınan nokta analiz sonuçları.

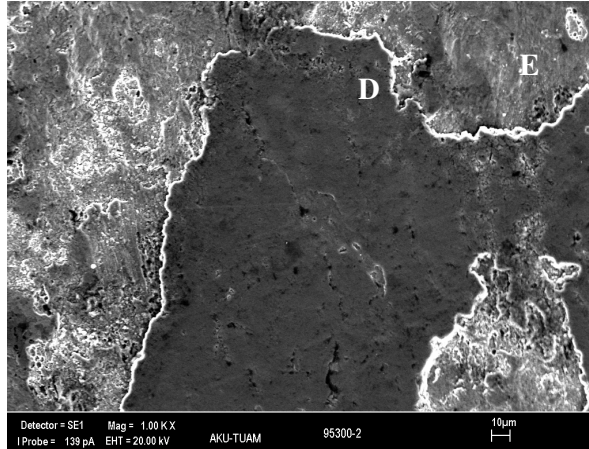
Element	A	B	C	D	E
Karbon	-	19,38	-	1,65	-
Oksijen	73,88	-	72,4	68,62	64,16
Demir	24,93	80,62	27,24	28,3	33,98
Silisyum	1,19	-	0,36	1,43	1,86



a)



b)



c)

Resim 4.12 a) 1 saat, b) 3 saat ve c) 5 saat borlanıp 300 °C’de temperlenen numunelerin 450 °C ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneyinden sonra aşınma izinden alınan nokta analiz bölgeleri.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1 Tartışma

Bilindiği gibi mühendislik malzemelerinin mekanik özellikleri büyük oranda yüzey koşullarına bağlıdır. Yüzey koşullarını değiştirmek için yaygın olarak kullanılan yöntemler yüzey sertleştirme işlemleri ve kaplamadır. Yüzey sertleştirme işlemleri genellikle yüksek sıcaklıklarda yapıldığından ösferritik yapıyı bozmadan işlemi gerçekleştirmek mümkün olmamaktadır. Kaplama ile yüzeyi sertleştirmek mümkündür, ancak kaplama işlemi östemperlenmiş malzemeye uygulanacağından ek maliyet getirmektedir.

Bortemperleme işlemi, yüzey sertliğini ösferritik içyapıyı bozmadan ve ikinci bir işleme gerek kalmadan artırmayı amaçlayan bir yöntemdir. Bu amaca ulaşabilmek için 900 °C'de katı ortamda borlanan numuneler hızla 250-450 °C aralığındaki tuz eriyiği içine alınarak 1 saat temperlenmiştir.

Malzemenin aşınma davranışı kaplama tabakasının özellikleri ve matris yapısına bağlı olarak değişecektir. Bir başka etkili faktör bileşimdir. Ancak bu çalışmada bileşim sabit tutulmuştur. Kaplama tabakasının özelliklerini ve matris yapısını ise etkileyebilecek faktörler borlama sıcaklık ve süresi ile temperleme sıcaklık ve süresidir.

Bortemperleme işlemi ile gerçektende ösferritik matris üzerinde yüzeyde bir kaplama tabakası elde edilmiştir. X-ışını analiz sonuçlarından kaplama tabakasının yüksek oranda Fe₂B ve az miktarda FeB'dan oluştuğu belirlenmiştir. Fe-B ikili denge diyagramına göre FeB fazının oluşabilmesi için ağırlıkça % 16'nın üzerinde bor'a ihtiyaç vardır. Dolayısıyla FeB ve Fe₂B fazının miktarı borlama sıcaklık ve süresine kuvvetle bağlıdır. Bu çalışmada borlama sıcaklığı sabit tutulduğundan, artan borlama süresi ile FeB fazı artmıştır. Diğer taraftan artan temperleme sıcaklığı ile FeB miktarında azalmalar gözlenmiştir.

Borlama süresi ve temperleme sıcaklığı kaplama tabakasının bileşimine etki ettiği gibi tabaka kalınlığını da etkilemektedir. Artan borlama süresi ile bütün temperleme sıcaklıklarında tabaka kalınlığının arttığı çok açıktır.

Bortemperleme işlemleri termokimyasal bir işlem olduğu için borlama aşamasında ortamdaki bor'un malzeme içine yayılması zaman almaktadır. Bununla birlikte 1 ve 3 saatlik borlama süreleri için temperleme sıcaklığının artmasıyla tabaka kalınlığının azalması beklenmeyen bir neticedir. Bu ise belirli şartlar altında kaplama tabakasının temperleme aşamasında kararlılığını koruyamadığı sonucuna götürmektedir.

Bortemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışı üzerine yapılmış bir çalışmaya henüz rastlanamamıştır. Bu konuda yapılmış tek çalışma bu tez çalışmasını kapsayan Yalçın ve arkadaşları tarafından yapılan TÜBİTAK projesidir (Yalçın 2007). Ne yazık ki, borlanmış küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışı üzerine bile çok az çalışma yapılmıştır (Şen 2002).

Malzemenin aşınma davranışını, mekanik özellikleri etkileyen faktörlerin yanında, kaplama tabakasının sürekliliği, tokluğu, matris ile arasındaki bağlanma kuvveti ve aşınma deney koşulları (yük, kayma hızı, kayma mesafesi, sıcaklık vb.) gibi özellikler de etkilemektedir.

Yapılan çalışmalar, bortemperleme ısıl işleminin küresel grafitli dökme demirlerin aşınma direncini arttırdığı hususunda hiçbir kuşku bırakmamıştır. Bununla birlikte bortemperleme şartları ve aşınma deney koşullarının sürtünme katsayısı ve aşınma hızına etkisi konusunda bazen tutarlı bazen tutarsız davranışlar gözlenmiştir.

Burada aşınma davranışını genel olarak incelemekte fayda vardır. Her şeyden önce malzeme yüzeyinde seramik karakterli son derece sert bir kaplama tabakası mevcuttur. Bununla birlikte borlanmış çeliklerden farklı olarak tabaka içerisine gömülmüş grafit küreleri bulunmaktadır. Bu nedenle küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışı ile çeliklerin aşınma davranışı arasında olabilecek fark grafitten kaynaklanacaktır. Yağlayıcı etkisinden dolayı grafitin dökme demirin aşınma direncini arttırdığı bilinmektedir.

Bununla birlikte bortemperlenmiş numunelerde nasıl etki edecek? Yine yağlama etkisiyle aşınma direncini arttıracak mı? Yoksa başka bir etki söz konusu mudur?

Yapılan SEM analizlerinden BKGDD numunelerin abrazyon, adhezyon ve yorulma aşınması türünde aşınmaya maruz kaldığı belirlenmiştir. Aşınma olayı, deney şartlarına

bakmaksızın, küresel grafitlerin etrafında cereyan etmektedir. Karşılıklı iki etki aşınma davranışında belirleyici olmaktadır. Yüzeye açık grafit küreleri bilye/yüzey arasında oluşan basıncın etkisiyle kırılıp yüzeye dağılmaktadır.

Bu durumda aşınma direncinin artmasına katkı yapılmaktadır. Diğer taraftan yüzeye açık olmayan, kaplama tabakasının hemen altında bulunan grafit ise aşınma deneyi sırasında esnemekte ve tekrarlanan yüklemeler neticesinde kırılarak bir yorulma aşınmasına yol açmaktadır. Kopan sert demirborür parça iki yüzey arasında abrazif aşınmaya neden olmaktadır.

5.2 Sonuçlar

900 °C 'de 1, 3 ve 5 saat borlamadan sonra 250, 300, 350 ve 450 °C 'lerde 1 saat temperlenen numunelerin mikroyapısal özellikleri ve aşınma davranışları üzerine yapılan çalışmalar ile aşağıdaki genel sonuçlara ulaşılmıştır.

- Bortemperleme ısııl işlemi küresel grafitli dökme demirin yüzeyinde FeB ve Fe₂B'dan oluşan iki fazlı bir kaplama tabakası oluşurmaktadır. Bortemperleme şartları fazların miktarına etki etmektedir. Genel olarak düşük borlama süresi ve yüksek temperleme sıcaklığı FeB fazının miktarını azaltmaktadır.
- Borür tabakanın altında oluşan matris, temperleme sıcaklığına bağlı olarak alt ösferrit, st ösferrit veya perlitik olabilmektedir. 250 °C'de alt ösferrit, 300 ve 350 °C'lerde st ösferrit ve 450 °C'de perlitik matris elde edilmiştir.
- Bortemperleme şartları ve ortam sıcaklığına bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi çok tutarlı sonuçlar vermemiştir. Oda sıcaklığı hariç diğer ortam sıcaklıklarında bortemperlenmiş numunelerin sürtünme katsayıları döküm malzemeden daha yüksektir. Neredeyse tüm bortemperleme şartlarında en yüksek sürtünme katsayısı 150 °C ortam sıcaklığında elde edilmiştir.
- Bortemperleme ısııl işlemi küresel grafitli dökme demirin aşınma direncini de etkilemektedir. Bortemperlenmiş numunelerin tümü, bütün ortam sıcaklıklarında döküm numuneye göre daha düşük aşınma hızına sahiptir.
- Ortam sıcaklığı aşınmaya olumsuz etki etmektedir. Artan ortam sıcaklığı aşınma hızını genellikle arttırmaktadır. Bu artış, borlama süresi ve temperleme sıcaklığının artmasıyla artmaktadır.
- Bortemperlenmiş numunelerin aşınması küresel grafitlerin etrafında başlamaktadır. Grafit kürelerinin üzerinde bulunan kaplama tabakası tekrarlı yüklemelerle yorulup kırılmaktadır. Yani yorulma aşınması oluşmaktadır. Kırılan borür tabakası ise abrazif aşınmaya neden olabilmektedir.

5.3 Öneriler

- Aşınma ile ilgili çalışmalarda mutlaka aşınma test cihazının çalışmanın yapıldığı birimde olması gerekmektedir.
- Bu çalışmada uygulanan yük, kayma hızı ve kayma mesafesi sabit tutulmuştur. Özellikle uygulanan yük ve kayma hızının yüksek sıcaklıklardaki aşınma davranışlarına etkisi incelenmelidir.
- Borür tabakasının ayrıntılı bir karakterizasyon çalışması yapılmalıdır. Yüzeiden merkeze doğru bor'un çizgisel elementel analizi yapılmalıdır. Tabaka ile matris arasındaki bağlanma incelenmeli ve aşınma davranışına etkisi araştırılmalıdır.
- Bortemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin yağlamalı ortamdaki aşınma davranışları incelenmeye değer görülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Angın, H, 2003 “Eti holding a.ş borlama işlemi ve endüstriyel Ferro bor ön fizibilite etüdü pp,16
- Aslantaş, K., 2003 “Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirden İmal Edilen Düz Dişlilerde Yüzey Yorulma Hasarlarının Analizi”, Doktora tezi Gazi Üni., Fen Bil. Ens., Ankara.
- Aslantaş K., Taşgetiren S., and Yalçın Y., 2004, “Austempering retards pitting failure in ductile iron spur gears”, Engineering Failure Analysis, 11, 935-941
- Atik, E., 2001, “Farklı bir yüzey sertleştirme yöntemi: Borlama” Makine Metal Dergisi, sayı:1.
- Bayça, S.U., Şahin S , 2004 “Borlama ” Mühendis ve Makine, Mayıs, Sayı 532.
- Baydur, G, 1998 “Malzeme” Anadolu üniversitesi Eskişehir, pp 157-16
- Bindal, C., 1991, “Az Alaşım ve Karbon Çeliklerinde Borlama ile Yüzeye Kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tespiti, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bil. Ens., İstanbul.
- Bozkurt, N., 1984, “Bor Yayınımıyla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme” İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Cheng-Hsun H., Jung-Kai Lu, Rung-Jie Tsai., 2006, Characteristics of duplex surface coatings on austempered ductile iron substrates, Surface & Coatings Technology 20, 5725–5732,
- Delikanlı, K., Çalık, A., Uzun, A. H., 2003, “Sade Karbonlu Bir Çeliğin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi” B.A.Ü., Fen Bilimler Ens. Der.,5.1., pp.99-110, Balıkesir.

- Erdoğan, M., 2007, “Çift Fazlı Matris Yapıya Sahip Küresel Grafitli Dökme Demirlerin İncelenmesi” Gazi üniv. Fen bil. Bap Projesi. Ankara. S.10–29
- Er, Ü. Par, B., 2004, “Bor Yayınımla Yüzeyi Sertleştirilmiş AISI 1030 ve AISI 1050 Çeliklerinin Abrazif Aşınma Dayanımlarının İncelenmesi” Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi C.XVII, S.1
- Forrest, R. D., 1987, “The Challenge an Opportunity Presented to the SG Iron Industry by the Development of Austempered Ductile Iron, BCIRA Report 1700.,
- Fuller, A.G.,1984,Austempered Ductile Irons-Present Applications, Materials&Design, 6, 127-130.
- Gundlach, R.B., 1983, Janowak J.F., Development of a ductile iron for commercial austempering, AFS Trans 94,377–88.
- Gürkan, M., 2007, “Östenitik ve martenzitik paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklık aşınma davranışlarının incelenmesi Afyonkocatepe Üniv, Fen bil entisüsü Y.lisans tezi, Afyon
- Güneş, İ., 2006 “plazma nitrürleme ile çelikler üzerinde kompleks kaplamaların oluşturulması” Afyonkocatepe Üniv, Fen bil entisüsü Y.lisans tezi ,Afyon
- Harding, R. A., 1993, “Opening up the Market for ADI”, Foundryman, pp. 197-208.
- Harding, R.A., 1985, Austempered ductile irons-gears, Materials&Design, 6, 177-184.
- Harding, R.A., 1986, Effect of Metallurgical Process Variables on Austempered Ductile Irons, Metals and Materials, 65-71.
- Harding, R. A., 1991, “Standarts and Specifications for Austempered Ductile Irons, BCIRA Technology.
- Hikmet ,Y., 1995, Metaller İçin Yüzey İşlemleri, KOSGEB, Ankara.

- Hunger, H.J.and Trute, G. 1994, “Boronizing to Produce Wear - Resistant Surface Layers”, Heat Treatment of Metals, Vol.2, pp. 31-39.
- Hughes, I.C.H., 1984, Austempered Ductile Irons-Their Properties and Significance, Materials&Design, 6, 124-126.
- Karl, B. R., 1990, “Heat Treating of Ductile Irons, Metals Handbook, 10th Edition, Vol.4, pp.682-692.
- Karsay, I. S., 1990, “Ductile Iron-Production Practices”, AFS, Second Edition, USA.
- Karakan, M., Alasaran, A., Çelik, A., 2002 “Plazma İle Termokimyasal Yüzey İşlemleri” Atatürk Üniv., Müh. Fak. Mak. Müh. Böl, Mak. Müh. Dergisi Sayı 510 Erzurum.
- Kayalı, E.S., 1993, “Sürtünme ve Aşınma”, Workshop on Antiwear Coatings, Tübitak, Gebze.
- Kayalı, E.S., Eruslu, N., Ürgen, M., Taptık, Y., Çimenoğlu, H., 1997, Hasar Analizi Seminer Notları 07-11 Nisan, İstanbul.
- Kayalı, Y., 2006, “Bortemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri ve aşınma davranışının araştırılması” Afyonkocatepe Üniversitesi, Fen bilimleri entisüsü Y.lisans tezi ,Afyon
- Keleştimur, M.H., 1989, Makine Yapı Çeliklerinde Abrasif Aşınma Direnci ve Yüzey Sertliğine Etkisi. Fırat Üniversitesi Fen Bil. Ens. Yük. Lisans Tezi, Elazığ
- Liao, P.K., 1991, Spear K.E Binary Alloy, Phase Diagrams, Metal Handbook 10th. Edition ASM International Vol.13 Section 2, USA PP:81
- Matuschka, A.G.V., 1980, “Boronizing” München, Wien: Hanser 100 s.
- Moore, D.F., 1975, “ Principles and Applications of Tribology”, Pergamon Press., Oxford.

- Putatunda, S.K., Bartosiewicz, L., Krause A.R., Singh, I., Alberts, F.A., 1993 Influence of microstructure on high cycle fatigue behavior of austempered ductile cast iron, *Mater. Charact.* 30, 221–234.
- Putatunda, S.K., 2001, Development of austempered ductile cast iron (ADI) with simultaneous high yield strength and fracture toughness by a novel two-step austempering process, *Materials Science and Engineering A315*, 70–80.
- Roya, Mana I., 2001, Laser surface engineering to improve wear resistance of austempered ductile iron, *Materials Science and Engineering A297*, 85–93.
- Rundman, K. B., 1991, “Heat Treating of ductile Irons”, *ASM Handbook*, Vol.4, pp.682-692.
- Özel, A., 1988, “Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Bir Östemperleme Çalışması”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özel, A., 1994, “GGG 40-80 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Östemperleme Isıl İşleminin Darbe Direnci ve Darbe Geçiş Sıcaklığına Etkisinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özsoy, A., 1991, “Çeliğin Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matris Özelliklerinin İyileştirilmesi”, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Sağın, A., 2002, “KGDD’nin östemperlenmesi ve östemperleme parametrelerine bakış” Y.T.Ü Kimya Metalurji fak. Metal Dünyası Sayı 110 . İstanbul.s 77-81
- Sinha, A. K., 1991, “Boriding (Boronising)”, *ASM Handbook*, Vol. 4, J. Heat Treating, pp. 437–447.
- Soydan, Y., 1996, “Katı Ortamda Bor Yayınımı ile Sertleştirilen Çelik Yüzeylerin “Aşınma Davranışları, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bil. Ens., İstanbul.
- Stafenescu, D. M., 1990, “Classification and Basic Metallurgy of Cast Iron”, *Metals Handbook*, 10th edition, ASM International, USA, pp. 3-55.

- Şen, U., 1997, “Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Bor Kaplanması ve Kaplama Özellikleri”, Doktora tezi İ.T.Ü., Fen Bil. Ens., İstanbul.
- Şen, U., Şen Ş. and Yılmaz F., 2004, “Structural characterization of boride layer on boronized ductile irons”, Surface and Coatings Technology, 176, pp. 222–228
- Şen, U., Şen Ş. and Yılmaz F., 2003, “Effect of copper on boride of boronized ductile cast irons”, Vacuum Technology, 72, pp. 199–204
- Taşcı, A., 1993, “Borlanmış çeliklerin Aşınma ve Korozyon Dayanımları”, Y.Lisans. Tezi-İTÜ. İstanbul.
- Tsipas, d.N., Rus,J., 1987, ”Boronizing of Alloy Steels”, Journal of Materials Science Letters, Vol.6,pp.118-120.
- Ulukan,L., 1993, “Makina Elemanları III”, Ders Notu, İstanbul.
- Ülker, Ş, 2006, “ Puls plazma nitrürleme cihazı tasarımı ve AISI 52100 Çeliğın plazma nitrürlenmesi” Afyonkocatepe Üniv, Fen bil entisüsü Y.lisans tezi pp 32-39
- Yalçın, Y., 1991, “Östempelenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Bakır Miktarı-Mikroyapı İlişkisi”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yalçın, Y., 1997, “ÖKGDD Dişli Üretim Teknolojisinin Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yalçın, Y., Yenihayat, Ö. F., Özel, A., Bindal, C., 1995, “Östenitleme Sıcaklığının Östempelenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Darbe Direncine ve Sertliğine Etkisi”, 6.Denizli Malzeme Sempozyumu, Pamukkale Üniv., Denizli, 87-94.
- Yalcin, Y., Taktak, Ş., Yazıcı, A.M., 2005, “Küresel grafitli dökme demirin ortempelenmesi”, 4. International Advanced Technologies Symposium, Selçuk Üniv, Konya, 934-940

- Yazıcı, A.M., 2006, Küresel Grafitli Dökme Demirin Bortemperlenmesi, (Yüksek Lisans Tezi), AKÜ Teknik Eğitim Fakültesi.
- Yalçın, Y., Taktak, Ş., Ulu, S., 2007, Bortemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Aşınma Davranışının İncelenmesi, TÜBİTAK Projesi, Proje No:104M398.
- Yang, J, Putatunda S.K., 2005, Effect of microstructure on abrasion wear behavior of austempered ductile cast iron (ADI) processed by a novel two-step austempering process, Materials Science and Engineering A 406, 217–228.
- Yıldızlı, K., Odabaş D., Nair, F., 2003, “Borlanmış AISI 1020 Çeliğinin Eroziyon Aşınma Davranışının İncelenmesi” Makine Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, 38039 , BAÜ Fen Bil. Enst. Derg. (2003). 5.1, Kayseri
- Yin-Yu, C., Da-Yung W., WeiTe, W., 2002, Catalysis Effect of Metal Doping on Wear Properties of Dimond-Like Carbon Films Deposited by a Cathodic-Arc Activated Deposition Process, Thin Solid Films, 420-421, 241-247.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	Aziz DÖNGEL
Doğum Yeri	ÇORUM
Doğum Tarihi	11.01.1976
Medeni Hali	Bekâr
Yabancı Dili	İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise	Çorum Merkez Endüstri Meslek Lisesi (1993).
Önlisans	Gazi Üniv. ÇMYO. Makine Böl (2000).
Lisans	Afyon Kocatepe Üniv. Metal Öğretmenliği (2005).
Yüksek Lisans	Afyon Kocatepe Üniv. FBE. Metal Eğitimi (2008).

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

YİBİTAŞ ÇİMENTO	1992–1993
KARADAYI MAKİNE	1997–1998
ER TAVUKÇULUK	2000–2006
ALAŞIM DÖKÜM	2006–2007

Diğer Konular

ISO 9001:2000 KALİTE YÖNETİM SİSTEMİ TEMEL EĞİTİM SERTİFİKASI
ISO 9001:2000 KALİTE YÖNETİM SİSTEMİ İÇ TEKTİKÇİ EĞİTİMİ
SERTİFİKASI