

**BORTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİ ve AŞINMA DAVRANIŞININ
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Yusuf KAYALI

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Yılmaz YALÇIN

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Ocak 2006

“Bu tez çalışması “104M398” numaralı Tübitak projesi tarafından desteklenmiştir.”

**T.C.
AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**BORTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİ ve AŞINMA DAVRANIŞININ
ARAŞTIRILMASI**

Yusuf KAYALI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Metal Anabilim Dalı**

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Yılmaz YALÇIN**

**AFYON
2006**

TEZ SINAV SONUÇ FORMU

Yusuf KAYALI 'nın yüksek lisans tezi olarak hazırladığı “Bortemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Mekanik Özellikleri ve Aşınma Davranışının Araştırılması” başlıklı bu çalışma, lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

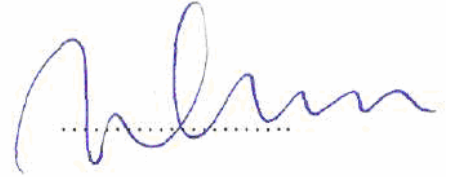
30/01/2006

İMZA

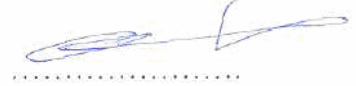
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Galip SAİD
(Başkan)



Jüri Üyesi : Doç.Dr. Süleyman TAŞGETİREN



Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Yılmaz YALÇIN
(Danışman)



Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...14.02.2006.....Gün
ve .2006/01-14sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN

Bortemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Mekanik Özellikleri ve Aşınma Davranışının Araştırılması

ÖZET

Bu çalışmada, bortemperlenmiş alaşımsız küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri ve aşınma davranışları araştırılmıştır. Bortemperleme 900 °C 'de 1, 3 ve 5 saat katı ortamda borlamayı takiben 300, 350 ve 450 °C sıcaklıklardaki tuz banyosunda 60 dakika tutularak gerçekleştirilmiştir. Temperleme işlemini takiben numuneler oda sıcaklığında soğutulmuş ve bol su ile yıkanarak kurutulmuştur. Bortemperlenmiş numunelerin mikroyapı karakterisyonları optik mikroskop ve X-ışını difraksiyon analizi ile incelenmiştir. Borür tabakasının kalınlığı ve yüzeyden matrise kadar olan sertlik değişimi tespit edilmiştir. Ayrıca, bortemperlenmiş numuneler çekme, darbe, sertlik gibi çeşitli mekanik testlere tabi tutulmuştur. Aşınma deneylerinde, bilye-disk metodu kullanılmış, deneyler yağlamasız ortamda ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Deneyler 10 N yük altında ve 0,3 m/s kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Sürtünme kuvveti bir yük ölçer (loadcell) yardımıyla ölçülmüş ve deneyler esnasında sürtünme katsayısı olarak kaydedilmiştir. Aşınma izleri optik mikroskop ile incelenmiş, aşınma hacmi ve hızı yüzey profilometre cihazı yardımıyla hesaplanmıştır.

Optimum özellikler bortemperleme ısı işlemiyle elde edilmiştir. Bortemperleme, küresel grafitli dökme demire borlamadan daha yüksek darbe tokluğu ve östemperlemeden daha yüksek yüzey sertliği kazandırmıştır. Bortemperlenen küresel grafitli dökme demir, borlanan ve östemperlenen numunelere göre daha düşük sürtünme katsayısı ve aşınma hızı göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Küresel grafitli dökme demir, borlama, östemperleme, bortemperleme, sürtünme ve aşınma

Investigation of Mechanical Properties and Wear Behaviour of Borontempered Ductile Iron

ABSTRACT

In this study, mechanical properties and wear behaviour of borontempered ductile iron are investigated. Borontempering is carried out by boronizing at 900 °C for 1, 3 and 5 hours in powder medium, followed by quenching in salt bath at temperatures 300, 350 and 450 °C for an hour. After tempering process, the specimens are cooled at room temperature and then dried and washed with water. Microstructure analyses of the borontempered specimens are performed using the optical microscopy and x-ray diffraction. Boride layer thickness and the variation of its hardness from surface to matrix are determined. The borontempered specimens are subjected to tensile, impact and hardness tests. Wear experiments are performed by means of ball on disc method in unlubricated condition and at room temperature. Experiments are carried out under 10 N load and at 0.3 m/s sliding rate. Friction coefficient is measured by using a load cell which is attached to wear test machine. Wear tracks are examined with the optical microscopy. Amount of wear debris volume and wear rate are calculated by using profilometer results.

Optimum properties are obtained by borontempering heat treatment. Borontempering gives higher impact toughness than that of boronizing and higher surface hardness than that of austempering. Borontempered ductile iron shows lower friction coefficient and wear rate than that of boronized and austempered ductile iron.

Keywords: Ductile iron, boriding, austempering, borontempering, friction and wear

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ.....	IX
SİMGELER LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ	1
2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER	4
2.1 Dökme Demirlerin Tanımı ve Sınıflandırılması	4
2.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması	8
2.3 Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey Sertleştirme İşlemleri.....	10
2.3.1 Alev, İndüksiyon veya Lazerle Yüzey Sertleştirme.....	10
2.3.2 Nitrürleme	10
2.3.3 Alüminyumlama.....	11
2.3.4 Borlama	11
2.4 Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Isıl İşlemler.....	12
2.4.1 Yumuşak Tavlama.....	12
2.4.2 Normalizasyon (Perlitleştirme)	13
2.4.3 Çiftli Normalizasyon.....	13
2.4.4 Sertleştirme Isıl İşlemi	13
2.4.5 Martemperleme (Tuz banyosunda sertleştirme)	13
2.4.6 Ostemperleme (Ara kademesi ısıl işlemi)	14
2.5 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları	14
3. BORLAMA.....	16
3.1 Borlamanın Tanımı	16
3.1.1 Borlama İşleminin Avantajları	16
3.1.2 Borlama İşleminin Dezavantajları.....	18

3.2 Borlama Yöntemleri.....	19
3.2.1 Kutu Borlama.....	19
3.2.2 Pasta Borlama.....	21
3.2.3 Sıvı Borlama	22
3.2.4 Gaz Borlama.....	23
3.3 Borlanabilen Malzemeler ve Borürlerin Özellikleri	24
3.3.1 Borürlerin Özellikleri	24
3.3.2 Demir-Bor Denge Diyagramı.....	27
3.3.3 Fe ₂ B ve FeB Fazlarının Özellikleri	28
3.3.4 Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması.....	29
3.3.5 Borür Tabaka Yapılarının Sınıflandırılması.....	32
3.3.6 Borür Tabakasının Karakteristik Özellikleri	35
3.4 Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulama Alanları.....	36
4. ÖSTEMPERLEME.....	38
4.1 Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler	38
4.1.1 Östenitleme İşlemi	38
4.1.2 Östemperleme Isıl İşlemi.....	39
4.2 ÖKGDD'lerin Mekanik Özellikleri	44
4.3 ÖKGDD'in Standardları.....	47
4.4 ÖKGDD'lerin Avantaj ve Dezavantajları	48
4.5 ÖKGDD'lerin Kullanım Alanları.....	50
5. AŞINMA.....	52
5.1 Aşınma Özellikleri.....	52
5.2 Aşınma Çeşitleri	52
5.2.1 Adhesiv Aşınma.....	54
5.2.2 Abrasiv Aşınma	55
5.2.3 Yorulma Aşınması	57
5.2.4 Kimyasal Aşınma	57
5.3 Bor Kaplamaların Aşınma Özellikleri.....	58
5.4 ÖKGDD'in Aşınma Özellikleri.....	61

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	63
6.1 Deneysel Malzeme ve Numuneler	63
6.1.1 Deneysel Malzemeler	63
6.1.2 Deney Numuneleri	64
6.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar ve Yöntem	65
6.2.1 Borlama ve Östemperleme Fırını	65
6.2.2 Borlama Potası	66
6.2.3 Borlama İşlemi	66
6.2.4 Bortemperleme İşlemi	67
6.2.5 Darbe Deneyi	67
6.2.6 Çekme Deneyi	67
6.2.7 Sertlik Deneyi	68
6.2.8 Aşınma Deneyi	68
6.2.9 Metalografî Çalışmaları	69
6.2.10 X-Işınları Difraksiyon Analizi	69
7. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ	70
7.1 Giriş	70
7.2 Metalografik İnceleme	70
7.3 X-Işınları Difraksiyon Analizi	76
7.4 Mikro Sertlik Ölçümleri	80
7.5 Mekanik Özellikleri	83
7.6 Aşınma Özellikleri	87
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	95
8.1 Sonuçlar	96
8.2 Öneriler	96
KAYNAKLAR	97
TEŞEKKÜR	101
ÖZGEÇMİŞ	102

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>sayfa</u>
2.1 Dökme demirlerin mikroyapılarına göre sınıflandırılması.....	5
3.1 Fe-B ikili denge diyagramı.....	27
3.2 Borür tabakasında, FeB ve hemen altında yer alan Fe ₂ B bölgesinin kolonsal olarak büyüme mekanizması.....	31
3.3 900°C’de 5 saat süreyle katı ortamda borlanmış AISI sıcak iş takım çeliğinin malzeme yüzeyinde oluşan borür tabakası ve matris içerisindeki B ve Fe dağılımını gösteren X-ışınları difraksiyon analiz paterni.....	32
3.4 Borür tabakalarının türleri.....	33
3.5 Borür tabaka kalınlığının belirlenmesi.....	35
4.1 Östenitleme sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi.....	39
4.2 Küresel grafitli dökme demir için izotermal dönüşüm diyagramı.....	41
4.3 Alaşımsız KGDD’de (a) üst beynit ve (b) alt beynit dönüşümleri için östemperleme süresiyle mikroyapıdaki değişimlerin ve proses aralığının şematik gösterimi.....	42
4.4 Alt ve üst beynit oluşum mekanizması	43
4.5 Östemperleme sıcaklık ve süresinin alaşımsız KGDD’lerin çekme ve %0,1 akma mukavemetine etkisi.....	43
4.6 900°C de östenitleme yapılmış KGDD malzemedede Östemperleme sıcaklığının çekme mukavemeti ve % uzama üzerindeki etkisi.....	44
4.7 Dökme demir ve çeliklere uygulanan ısıtma işlem neticesinde çekme mukavemeti ile yüzde uzama arasındaki ilişki idealize edilmiş tokluk-östemperleme zaman eğrisine bağlı olarak.....	46
4.8 Çeşitli malzemelerle ÖKGDD’lerin kırılma tokluğu-akma mukavemeti ilişkisinin karşılaştırılması.....	46
4.9 İdealize edilmiş tokluk-östemperleme zaman eğrisine bağlı olarak ÖKGDD için bazı kullanım alanları.....	50

5.1	Tribolojik bir sistemin şematik olarak gösterilmesi.....	53
5.2	Aşınmanın temel mekanizmaları.....	54
5.3	Adhesiv aşınmada yapışma mekanizmasının ideal bir modeli.....	55
5.4	Normalize edilmiş ve borlanmış EN8 çeliğinin 8.5 kg. yük altındaki aşınma davranışı.....	59
5.5	Normalize edilmiş, sementasyona tabi tutulmuş ve bor kaplanmış EN1A çeliğinin aşınma davranışı.....	60
5.6	Yumuşak çelik yüzeylerine ve farklı borür fazı içeren yüzey tabakalarına ait aşınma oranları.....	60
5.7	Yuvarlanmalı-kayma teması sonucu ağırlık kaybı ile yük çevrim sayısı arasındaki ilişki.....	62
6.1	Y-Blok şeklindeki döküm malzemesinin boyutları ve resmi.....	63
6.2	Alaşimsız KGDD'in döküm haliyle mikroyapısı.....	64
6.3	Mekanik deneylerde kullanılan numunelerin şekil ve boyutları.....	65
6.4	Borlama ve Östemperleme işlemlerinde kullanılan fırınlar.....	65
6.5	Borlama deneylerinde kullanılan AISI 316 paslanmaz çelik potanın geometrik şekli ve boyutları.....	66
6.6	Borlama işleminin yapılış yönteminin şematik gösterimi.....	66
6.7	Charpy deneyinde kullanılan cihazın şekli.....	67
6.8	Instron tek eksenli çekme cihazı.....	68
6.9	Aşınma deney sisteminin görünümü.....	69
7.1	900°C sıcaklıkta 1 saat süre ile borlanıp a) 300°C, b)350°C ve 450°C 'de Bortemperlenmiş numunenin optik mikroyapı fotoğrafları....	72
7.2	900°C sıcaklıkta 3 saat süre ile borlanıp a) 300°C, b)350°C ve 450°C 'de Bortemperlenmiş numunenin optik mikroyapı fotoğrafları....	73
7.3	900°C sıcaklıkta 5 saat süre ile borlanıp a) 300°C, b)350°C ve 450°C 'de Bortemperlenmiş numunenin optik mikroyapı fotoğrafları....	74
7.4	Borlama süresinin ve temperleme sıcaklığının tabaka kalınlığına etkisi.....	75
7.5	900°C sıcaklıkta 1 saat süre borlanıp, 300°C 'de bortemperlenmiş numunenin x-ışınları difraksiyon paterni.....	77

7.6	900°C sıcaklıkta 3 saat borlanıp a) 300 °C, b) 350 °C ve c) 450°C’de bortemperlenmiş numunenin x-ışınları difraksiyon paterni.....	78
7.7	900°C sıcaklıkta 5 saat borlanıp a) 300 °C, b) 350 °C ve c) 450°C’de bortemperlenmiş numunenin x-ışınları difraksiyon paterni.....	79
7.8	Yüzeyden matrise sertlik dağılımı.....	82
7.9	Bortemperleme şartlarına bağlı olarak çekme mukavemeti, %0,2 akma mukavemeti ve % uzamadaki değişim grafiği.....	85
7.10	Bortemperleme şartlarının darbe enerjisine etkisi.....	86
7.11	900 °C ’de 1 saat süre borlanıp, 300 °C ’de bortemperlenen numunenin aşınma deneyi uygulamadan önce ölçülen yüzey pürüzlülük eğrisi.....	87
7.12	900 °C ’de 1 saat süre borlanıp, 300 ’de bortemperlenen numunenin, 10N yük altında aşınma süresine bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi.....	88
7.13	900 °C ’de 3 saat süre borlanıp, 300 °C ’de bortemperlenen numunenin 10N yük altında aşınma süresine bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi.....	88
7.14	900 °C ’de 5 saat süre borlanıp, 450 °C ’de bortemperlenen numunenin 10N yük altında aşınma süresine bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi.....	89
7.15	Bortemperleme şartlarının a) sürtünme katsayısına, b) aşınma hızına etkisi.....	89
7.16	İşlemsiz malzemenin yüzeyine uygulanan aşınma deneylerinde oluşan izlerin mikroyapı görüntüleri.....	92
7.17	900°C ’de 1 saat süre ile borlanıp, 300°C, 350°C ve 450°C’de bortemperlenen malzemenin yüzeyine uygulanan aşınma deneylerinde oluşan izlerin mikroyapı görüntüleri.....	93
7.18	900°C ’de a) 3 saat, b) 5 saat süre ile borlanmış, 450°C ’de bortemperlenmiş numunelerin aşınma izi optik fotoğrafları	94
7.19	Aşındırıcı WC-Co bilyenin aşınma yüzeyi optik mikroskop fotoğrafı	94

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>sayfa</u>
2.1 Mikroyapı ve kırılma özelliklerine göre dökme demirlerin sınıflandırılması.....	6
2.2 Fe TSE standartına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	9
2.3 DIN standartına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	9
3.1 Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması.....	17
3.2 Kutu borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri.....	21
3.3 Sıvı borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin özellikleri....	22
3.4 Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri.....	24
3.5 Çeşitli metal borürlerin bazı özellikleri.....	26
3.6 Fe ₂ B ve FeB fazlarının tipik özellikleri.....	29
3.7 Borlama işlemine tabi tutulmuş bazı demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları.....	37
4.1 KGDD ve çeliklere ait mekanik özelliklerin karşılaştırılması.....	47
4.2 ÖKGDD için ASTM A 897M-90 (metrik) standardı.....	48
4.3 KGDD ve dövme çelik dişli üretimi için enerji tüketimi.....	49
5.1 Döküm ve farklı sıcaklıkta östemperlenmiş malzemelerin farklı yükler altında ağırlık kaybı değerleri.....	61
6.1 Alaşımsız KGDD in kimyasal bileşimi.....	63
6.2 Döküm malzemesinin mekanik özellikleri.....	64
7.1 Borlama süresi ve temperleme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.....	75
7.2 Farklı bortemperleme şartlarında numune yüzeyinde elde edilen FeB ve Fe ₂ B fazlarının difraksiyon açıları.....	77
7.3 Bortemperleme şartlarına bağlı olarak numunelerin yüzeyinden itibaren sertlik dağılımları.....	81

7.4	Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen mekanik özellikler.....	84
7.5	Aşınma deneyine tabii tutulan numunelerin aşınma deneyi öncesi yüzey pürüzlülük değerleri.....	87
7.6	Sürtünme katsayısı ve aşınma hızı sonuçları.....	88

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
-----------------	-----------------

μ_k	Sürtünme Katsayısı
---------	--------------------

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
--------------------	-----------------

KDGG	Küresel Grafitli Dökme Demir
------	------------------------------

ÖKGDD	Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir
-------	---

BKGDD	Bortemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir
-------	--

TSE	Türk Standartları Enstitüsü
-----	-----------------------------

HRC	Rockwel sertliği
-----	------------------

HV	Vickers sertliği
----	------------------

HB	Brinell serliği
----	-----------------

CVD	Kimyasal buhar biriktirme
-----	---------------------------

PVD	Fiziksel buhar biriktirme
-----	---------------------------

Ms	Martenzit başlangıç
----	---------------------

Mf	Martenzit bitiş
----	-----------------

T	Sıcaklık
---	----------

t	Zaman
---	-------

L	Hasar iz genişliği
---	--------------------

R	Aşındırıcı bilye yarıçapı
---	---------------------------

d	Hasar derinliği
---	-----------------

S	Hasar alanı
---	-------------

1. GİRİŞ

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir (ÖKGDD) terimi, östemperleme ısı işlemiyle esasen beynitik içyapının elde edildiği küresel grafitli dökme demir (KGDD) sınıfını tanımlar. ÖKGDD aynı sünekliğe sahip standart KGDD göre iki kat daha mukavemetli olabilir. Kimyasal bileşim ve seçilen ısı işlem koşullarına bağlı olarak çekme mukavemeti 800 MPa (%10'nun üzerinde uzama) ile 1400 MPa'ı aşan değerler arasında olabilmektedir. Malzeme aynı zamanda daha yüksek darbe tokluğu, yorulma mukavemeti ve aşınma direnci göstermektedir. Bu iyi özellikler iğnesel, karbürsüz ferrit ve yüksek orandaki kalıntı östenitten oluşan mikroyapı ile doğrudan ilişkilidir (Yalçın vd. 2005).

ÖKGDD'in çekme mukavemeti, kırılma tokluğu, yorulma özellikleri, aşınma ve oyuklanma direnci gibi mekanik özelliklerini inceleyen birçok araştırma yapılmıştır (Aslantaş vd. 2004). Özelliklerinin çok geniş bir aralıkta değişmesinden dolayı, bu malzemenin kullanım potansiyeli de oldukça geniştir. Birçok teknik ve ticari avantajlara sahip olması da başarılı uygulamaların sayısının artışında önemli bir rol oynamaktadır. ÖKGDD parçalar otomotiv, kamyon, ziraat, endüstri, demiryolu, inşaat ve askeri uygulamalarda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Yalçın vd. 2005).

Diğer taraftan, yüzeyleri sert seramik kaplanmış çeşitli mühendislik parçalarının kullanımı son yıllarda çarpıcı bir şekilde artmıştır. Bu eğilim, aşırı uygulama koşullarında kullanmak için daha yüksek performansa sahip malzemelere olan ihtiyacın artışını yansıtmaktadır. Borlama, bor atomlarının difüzyonu ile malzeme yüzeyinde borürlerin (FeB and Fe_2B) oluşturulduğu termo-kimyasal bir yüzey işlemidir (Bindal vd. 1999). Malzemenin dış yüzeyindeki borür tabakası malzeme içine uzanan bir difüzyon bölgesiyle desteklenmektedir. Borlama endüstriyel olarak, yapı çelikleri, dökme çelikler gibi çoğu demir esaslı ve demir dışı metallere uygulanabilmektedir (Yalçın vd. 2005). Küresel grafitli ve gri dökme demirler de başarılı bir şekilde borlanabilmektedir (Şen 1997).

Borlama, tuz banyosu, pasta ve kutu borlama gibi klasik yöntemlerle ve gelişmiş tekniklerle (plazma destekli borlama) yapılabilmektedir (Şen 2003). Çoğu oksit olmayan borürlerin kuvvetli kovalent bağ yapısına sahip olmasının, yüksek ergime sıcaklığı, elastisite ve sertlik değerlerine neden olduğu düşünülmektedir. Çeliklerin yüzeyinde oluşan demir borürlerin sertliği 1600 HV değerinin üzerindedir. Borlama, çizilme, aşınma ve korozyona karşı direnci geliştirmektedir (Şen vd. 2004). Östemperleme ısısal işlemi, KGDD'e yüksek mukavemet, kırılma tokluğu ve yorulma direnci gibi üstün özellikler kazandırırken, borlama işlemi ise mükemmel aşınma direnci, yüksek yüzey sertliği ve korozyon direnci sağlamaktadır. Böylece, eğer, iki ısısal işlem yani borlama ve östemperleme birleştirilebilirse, yüksek mukavemete, sertliğe ve yüksek aşınma direncine sahip bir KGDD üretililebilecektir. Bu yeni ısısal işlemi biz **“bortemperleme”** olarak adlandırdık. Çalışmanın amacı, yeni bir yöntem olan bortemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin (BKGDD) mekanik özelliklerini ve aşınma davranışlarını tesbit etmektir.

Deneysel çalışmalarda alaşımsız küresel grafitli dökme demir malzemeler kullanılmıştır. Y-blokların ayaklarından çıkarılan çekme, darbe ve aşınma deney numuneleri bortemperleme ısısal işlemine tabi tutulmuştur. Çekme deneyi yapılarak malzemenin mukavemet ve süneklik özellikleri, darbe deneyi ile darbe tokluğu ve aşınma deneyi ile malzemenin aşınmaya karşı dirençlerini belirlemeye çalışılmıştır. Bortemperleme işlemi üç aşamada gerçekleştirilmiştir; (1) ticari bor tozu, Ekabor içerisine gömülen numuneler 900°C 'de 1,3 ve 5 saat borlandıktan sonra (2) hızla nötr tuz banyosuna (300, 350 ve 450°C) atılarak 1 saat süreyle temperlenmiş ve nihayet (3) havada soğumaya bırakılmıştır. BKGDD'in çekme, darbe deney numuneleri kırılarak, çekme, akma mukavemetleri ve çentiksiz darbe dirençleri tespit edilmiştir. Kırılan darbe deney numunelerinden kesilen kısımları mikroyapısal incelemeler (mikroyapı, kaplama tabakası kalınlığı ve morfolojisi) ve yüzeyden itibaren mikrosertlik değişiminin belirlenmesinde kullanılmıştır. Darbe deney numunelerinden arta kalan kısımlar kaplama tabakasının karakterizasyonu için XRD analizinde değerlendirilmiştir. BKGDD'in aşınma numuneleri aşınma cihazında ball-on-disc yönteminde oda sıcaklığında tek bir yük altında aşınma testine tabi tutulup Aşınma hızları profilometre ile aşınma iz

profilinden hesaplanmıştır. Sürtünme katsayıları da aşınma koluna bağlı hassas bir yük ölçer (loadcell) yardımıyla işlem esnasında bulunmuştur.

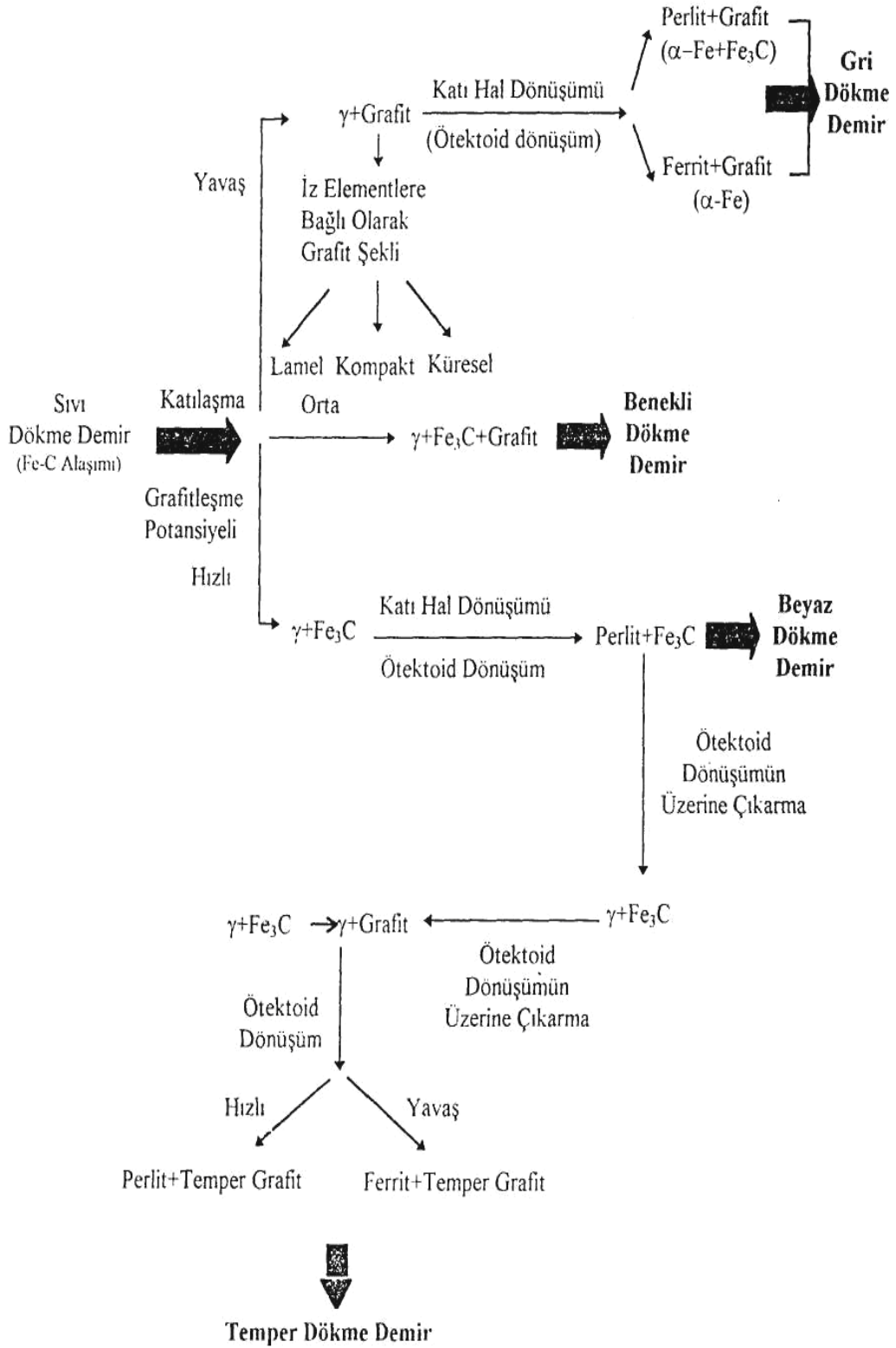
2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

2.1 Dökme Demirlerin Tanımı ve Sınıflandırılması

Dökme demirler, çeliğe benzer demirli alaşımların geniş bir sınıfıdır. Fe-C faz diyagramında ostenit fazının maksimum çözünürlüğü olan %2 'nin üzerinde karbon içeren demir-karbon alaşımıdır. Yüksek karbon içeriğinin dökme demirlerin gevrekleşmesine sebep olması nedeniyle ticari olarak kullanımı açısından karbon miktarı genellikle %2,5–4 oranları arasında tutulmaktadır. Dökme demirlerin bileşiminde genellikle C ve Si oranı çok yüksektir. Yarı kararlı durum, ötektikte karbonca zengin Fe_3C fazını içerirken kararlı durum ötektikte grafit fazını içermektedir (Stafanescu 1990).

Dökme demirlerin plastik şekil alma kabiliyetleri çok düşüktür. Bu sebeple şekil değiştirme işlemine tabi tutulmazlar. Bununla beraber, dökme demirler kolayca ergitilebilirler ve çok karmaşık şekilli parçaların üretilmesine imkân tanırırlar. Bilinen dökme demirler, çeliklerden daha düşük mukavemet özellikleri sergilerken, çeliklere nazaran maliyetleri çok daha düşüktür (Karsay 1979, Şen 1997).

Dökme demirlerin sınıflandırılması genellikle mikroyapıya göre yapılmaktadır. Dökme demirlerin mikroyapısını, bileşimindeki karbon miktarı, alaşım elementi veya empürite miktarı, katılaşma sırasında veya sonrasında soğuma hızı ve döküm sonrası ısıtma işlemi gibi dört faktör etkilemektedir (Karsay 1979, Şen 1997). Yaygın olarak kullanılan dökme demir türleri, yapıları ve üretimleri şematik olarak Şekil 2.1 'de verilmektedir. İki temel ötektik türü olan; kararlı ostenit + grafit veya yarı kararlı ostenit + sementit (Fe_3C) 'in mukavemet, sertlik, süneklik ve tokluk gibi mekanik özellikleri arasında oldukça büyük farklılıklar bulunmaktadır. Bu yüzden, dökme demirlerin metalurji sektöründeki üretim alanı, miktarı, işlenmesi ve istenilen mekanik özellikleri için dikkat edilmesi gereken başlıca özelliği ötektik morfolojisidir (Stafanescu 1990).



Şekil 2.1 Dökme demirlerin mikroyapılarına göre sınıflandırılması (Stafenescu 1990, Şen 1997).

Dökme demirlerin sınıflandırılması ilk olarak kırılmalıklarına göre yapılmıştır. Bu sınıflandırmada dökme demirler; beyaz dökme demir ve gri dökme demir olarak ikiye ayrılmaktadır. Diğer bir sınıflandırma ise malzemenin mikroyapı ve kütleel özelliklerine göre yapılmaktadır. Dökme demirlerin mikroyapı ve kırılma özelliklerine göre sınıflandırılması Tablo 2.1 'de verilmektedir (Şen 1997).

Tablo 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
Gri dökme demir Küresel grafitli dökme demir	Lamel grafitli Küresel grafitli	P F,P,O	Gri Gümüş gri	Katılma Katılma + ısı işlem
Kompakt grafitli dökme demir	Kompakt vermiküler grafitli	F,P	Gri	Katılma
Beyaz dökme demir	Fe ₃ C	P,M	Beyaz	Katılma + ısı işlem ^(b)
Vermiküler grafitli dökme demir	Lamel grafitli + Fe ₃ C	P	Benekli	Katılma
Temper dökme demir	Temper grafitli	F,P	Gümüş gri	Isıl işlem
Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir.	Küresel grafitli	B	Gümüş gri	Isıl işlem

a) F; ferrit, P; perlit, O; ostenit, M; martenzit, B; beynit, b) Beyaz dökme demir genellikle ısı işlemisizdir, fakat kalıntı gerilmeleri gidermek ve ostenitik dönüşümü sağlamak için ısı işlem yapılabilir.

Grafit şekline göre dökme demirler; lamel grafitli, küresel grafitli ve temper grafitli olarak, matris yapısına göre ise; ferritik, perlitik, ferrit+perlitik, ostenitik, martensitik ve beynitik dökme demirler olarak sınıflandırılmaktadır (Stafanescu 1990, Şen 1997).

Ayrıca, dökme demirlerin farklı bir sınıflandırılması da; geleneksel dökme demirler ve özel dökme demirler şeklindedir. Geleneksel dökme demirler, genel uygulama amaçlı kullanılan alaşımsız veya düşük alaşımlı dökme demirlerdir. Özel dökme demirler ise, özel uygulamalar için kullanılan yüksek alaşımlı dökme demirlerdir (Stafanescu 1990, Şen 1997).

Dökme demirler, döküm mikroyapılarına göre dört sınıfta toplanmaktadır (Şen 1997).

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 1979, 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, kırılgandır ve işlenmeleri zordur (Karsay 1979, 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, ısıt 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 demirin 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 bağılı olarak bünyesinde bir miktar bileşik karbon içermektedir. Perlitik temper dökme demirler de bileşik karbon içerdiklerinden ferritik temper dökümlerden daha yüksek mukavemet gösterirler (Şen 1997).

4) Küresel grafitli dökme demirler (KGDD); Aynı zamanda nodüler, sfero ve düktıl demir gibi isimlerle de anılan bu tür dökme demirlerde karbon, grafit küreleri halindedir. Karbonun lamelden küre haline geçişini sağlamak için ergimiş demir, döküm öncesinde aşılama işlemine tabi tutulmaktadır. Küreler katılma sırasında oluşturulduğu için temper dökme demirden farklıdır. Ayrıca grafit şeklinin lamel yerine küre oluşu da, dökme demire süneklik ve mukavemet kazandırmaktadır. Küresel grafitli dökme demirlerde grafitlerin küresel olması, lamel yapılı grafitlerin keskin köşelerinde gerilim yükselmesi ve çatlak oluşmasını engellemektedir (Şen 1997).

2.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Küresel grafitli dökme demirlerin elde edilmesinde iki ana yöntem vardır:

- a) INCO (International Nickel Company) yöntemi,
- b) BCIRA (British Cast Iron Research Association) yöntemi (Forrest 1987).

Küresel grafitli dökme demirlerin yapısındaki grafitler çeliğe benzer bir matris içerisinde dağılmış küresel partiküller halindedir. Grafitlerin küreler halinde oluşmasını sağlamak için, BCIRA yönteminde sıvı demire seryum (Ce) ilave edilmektedir. Seryumun büyük bir kısmı dökme demir bileşimindeki kükürdü giderirken, geriye kalan yaklaşık % 0.02 Ce, grafitlerin lamel yerine küre şeklini almasını sağlamaktadır. INCO yönteminde ise sıvı demire magnezyum (Mg) ilavesi yapılarak, grafitlerin küre şeklini alması sağlanmaktadır (Forrest 1987, Şen 1997).

Küresel grafitli dökme demirler çeşitli normlara göre sınıflandırılmaktadır. TSE (Türk Standartları Enstitüsü) ve Alman (DIN) standardına göre dökme demirlerin sınıflandırılması Tablo 2.2 ve 2.3 'de verilmektedir. Burada, DDK sembolü dökme demir küresel grafitli anlamına gelmektedir (Şen 1997).

Tablo 2.2 TSE standartına 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	Ferit + 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

Tablo 2.3 DIN standartına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması (Özel 1994).

Kısa Gösterilişi	Çekme Muk. (MPa)	Akma Muk. (MPa)	% Uzama
GGG-40	400	250	15
GGG-50	500	320	7
GGG-60	600	380	3
GGG-70	700	440	4
GGG-80	800	500	2

Mühendislik malzemeleri içerisinde küresel grafitli dökme demirler, demir esaslı malzemeler içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. İyi dökülebilirlik ve yüksek mukavemetin yanında, küre şekilli grafitler, yapıda yağlayıcı görevi görmektedir. Küresel grafitli dökme demirden yapılmış krank milleri, merdaneler ve dişliler aşınmaya dirençli karbon çeliğine alternatif olmuşlardır (Özel 1994).

2.3 Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey Sertleştirme İşlemleri

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

2.3.1 Alev, İndüksiyon veya Lazerle Yüzey Sertleştirme

Bu yöntemlerde çok kısa sürelerde ısıtma sağlanabilmesi sebebiyle, GGG–70 ve GGG–80 tipi perlitik küresel grafitli dökme demirler tercih edilmektedir. Ferrit içermeyen küresel grafitli dökme demirler, kolayca su alabilme kabiliyetine sahip olduklarından dolayı tamamıyla sertleşmemesi için ostenitleme sıcaklığında çok kısa süre tutulurlar. Döküm haliyle ferritik matrise sahip olan küresel grafitli dökme demirlerin yüzeyini homojen olarak ostenitik yapıya dönüştürmek için uzun süreler gerekmektedir. Bu sebeple, yüzey sertleştirme işleminde daha çok perlitik küresel grafitli dökme demirler tercih edilmektedir. Yüzeyde oluşturulan sert tabakanın derinliği çeliklerden farklı olarak, sertleşebilirlik kavramından çok, ısı geçişine bağlıdır. Yüzeyi sertleştirilmiş alaşımlı küresel grafitli dökme demirler, artan sertleşebilirlik kabiliyetiyle birlikte artan kalıntı ostenit mevcudiyeti sebebiyle daha düşük sertlik değerine sahip yüzeyler sergilemektedir. Bu gibi problemlerin çözülmesi için, 0 °C'nin altındaki soğutma işlemleri uygulanmaktadır. Pratik olarak elde edilebilecek maksimum sertlik 60 HRC'dir (Stafanescu 1990, Karl 1990).

2.3.2 Nitrürleme

Nitrürleme işlemi, küresel grafitli dökme demirlerin, parçalanmış amonyak(NH_3) içerisinde 2–3 saat tutulması ile gerçekleştirilmektedir. Bu işlem sonucunda, 60 HRC sertlik elde edilebilmektedir. İşlem sonrasında, küresel grafitli dökme demirlerin 108 devirde yapılan yorulma deneyleri sonucunda göstermiş oldukları yorulma dayanımları, 172–210 N/mm²'den, 276–289 N/mm²'ye ulaşmaktadır (Şen 1997).

Yapılan nitrürleme çalışmalarında, bazı arzu edilmeyen sonuçlarla karşılaşmaktadır. Bunlardan çoğu, kimyasal bileşimle ilgilidir. Silisyum, azotun difüzyon hızını yavaşlattığından, nitrürleme ile yüzeyi sertleştirilecek olan küresel grafitli dökme demirlerin içerdiği silisyum miktarının düşük tutulması önerilmektedir. Aynı şekilde titanyumun da düşük konsantrasyon da olması istenmektedir. Bunun sebebi, titanyumun azotla bileşik yaparak yüzeyi sertleştirmeyi engellemesidir. Krom, azotu birarada toplayıp biriktirdiğinden ve bu sebeple, dökümün sertlik ve sünekliğini düşürdüğünden dolayı alaşım elementi olarak tercih edilmemektedir. İşlem, 550–600 °C’de gerçekleştirilmektedir. 0,1 mm sertlik derinliğinde, 1100 HV’lık sertlik değeri elde edilmektedir. Yüzey sertliğini artırmak için %0,5–1,0 arasında alüminyum, nikel ve molibdenin alaşım elementi olarak ilave edilmesinin faydalı sonuçlar verdiği görülmektedir (Stafanescu 1990, Karl 1990).

2.3.3 Alüminyumlama

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

2.3.4 Borlama

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

2.4 Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Isıl İşlemler

2.4.1 Yumuşak Tavlama

Bu ısıtıl işlemin amacı döküm durumunda mevcut olan karbürlerin çözölmelerinin ve ferritik kolay işlenebilen bir ana dokunun sağlanmasıdır.

Ferritleştirici tavlama, bu ısıtıl işlemdede, östenit-ferrit dönüşümü alt ve üst kritik sıcaklıkları büyük bir öneme sahip olduklarında, aşağıda silisyum miktarına bağlı olarak verilmişlerdir(İzgiz 1988):

$$\text{Alt kritik sıcaklık } A_{1,1} = 738 + 18 (\text{Si})^{1.75}$$

$$\text{Üst kritik sıcaklık } A_{1,2} = 738 + 5 (\text{Si})^2$$

Karbürlerin çözölmelerinin sağlanması için, 100 °C/saatlik bir ısıtma hızı ile 900 °C'ye parça ısıtılır. Bu sıcaklıkta 2 saat ve 25 mm den sonraki her 25 mm et kalınlığı için 1 saat bekletilir. Daha sonra, alt kritik sıcaklığın 55 °C altına kadar parçalar fırında soğutulur. Bu sıcaklıkta tekrar 5 saat bekletilen parçalar, sonra havaya alınarak oda sıcaklığına kadar soğutulurlar.

Düşük miktarlarda perlitli stabilleştirici, bakır ve mangan gibi elementler mevcut ise, uzun bekletme sürelerine gerek kalmaksızın ferritleştirme yapılır.

Bu işlemdede 900 °C'de 2 saat bırakılan parça, mangan miktarına bağlı olarak, % 0.1 Mn için 55 °C/saat, % 0.5 Mn için 25 °C/saat 'lik soğutma hızı ile kritik dönüşüm bölgesi altındaki bir sıcaklığa, 595 °C inilir ve sonra parça havada soğumaya terk edilir. Döküm parçasının karbürleri ihtiva etmediği bilindiği takdirde, alt kritik sıcaklığın altında ferritleştirme işlemi uygulanır. Bunun için alt kritik sıcaklığın 55 °C altındaki sıcaklığa çıkarılan döküm parçası 5 saat ve her 25 mm et kalınlığı 1 saat daha bu sıcaklıkta bırakılır ve akabinde yavaş bir soğuma hızı ile 595 °C'ye fırında soğutulur ve daha sonra dışarı alınarak havada soğumaya terk edilir(İzgiz 1988).

2.4.2 Normalizasyon (Perlitleştirme)

Ana doku karbür ihtiva etmiyorsa, normalizasyon sıcaklığı, üst kritik sıcaklığın 30 °C üzerinde seçilir. Karbürler mevcut ise, bu sıcaklık 900 °C olarak alınmalıdır. Parçanın bırakma süresi ilk 25 mm kalınlık için 1 saat, sonraki her 25 mm için yine 1 saattir. Bu sıcaklıktan parçanın soğutulması, eğer parça kalınlığı 38 mm fazla ise hava sirkülasyonu içinde, değilse durgun havada yapılmalıdır.

Et kalınlığı 60 mm'nin üzerinde olan parçalar su duşu ile soğutulabilir. Parçalara normalizasyon işleminden sonra, 595 °C'de 5 saat gerilim giderici tavlama işlemine tabi tutulmaları genelde uygulanan bir yöntemdir. 315 °C'ye kadar soğutma hızı 55 °C / saat olarak alınmalıdır(İzgiz 1988).

2.4.3 Çiftli Normalizasyon

Normalizasyon ısıtılmasının bir diğer şekli olan bu işlemle akma sınırı %2, sertlik değeri %10 daha düşmekte buna karşın uzama değeri ortalama %50, çentik mukavemeti %50–150 artmaktadır.

Bu işlem, 1 kademedede 925 °C'de yapılan homojenleştirme tavlamasından ve bunu takip eden üst kritik sıcaklığın 30 °C üzerinde kısa süre bırakma ve sonra bilinen normalizasyon ısıtılmasından ibarettir(İzgiz 1988).

2.4.4 Sertleştirme Isıl işlemi

Üst kritik sıcaklığın 50 °C üzerinde östenitleştirilir, parça ferritleştirmede olduğu gibi et kalınlığına bağlı olarak bu sıcaklıkta bırakılır ve sıcaklığı azami 95 °C olan yağda soğutulur. 25 mm et kalınlıkları üzerinde yağda soğuma sonu dokuda ferrit bulunabilir. Sertleştirmeyi meneviş ısıtılmasından ibarettir, böylece süneklik özellikleri artırılır(İzgiz 1988).

2.4.5 Martemperleme (Tuz banyosunda sertleştirme)

Çeliklerde olduğu gibi KGDD'lerde de bu ısıtılma işlemi uygulanır. Östenitleştirme sonrası, Ms-sıcaklığının 50 °C üzerinde parça bir tuz banyosunda belli bir süre

bırakılır. Bu işlem esnasında aynı zamanda parçada ısı dengesi sağlanır ve sonra havada soğutulur. Bu işlem sonrası doku martenzitik olup, işlemin gayesi komplike tasarımlı parçalarda yüksek mukavemet ve süneklik özelliklerinin beraberce varolmasını sağlamaktır(İzgiz 1988).

2.4.6 Östemperleme (Ara kademesi ısıl işlemi)

Bu ısıl işlem ile aşınmaya dayanıklı ve yüksek sertlik, mukavemet özelliklerinde iğnemsî (Acicular) beynitik doku elde edilir. Kimyasal analiz yönünden parçaların nikel ve molibden ihtiva etmeleri gerekli olup, ısıl işlem östenitleştirme ile başlar. Bundan sonra parça, 260–480 °C'leri arasındaki bir tuz banyosunda beynit dönüşümü sağlanıncaya kadar bırakılır ve havada soğutulur. Erişilen sertlik değerleri 275–375 HB arasındadır. Isıl işlem sıcaklığı düştükçe, sertlik değeri artar(İzgiz 1988, Yalçın 1997).

2.5 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları

Küresel grafitli dökme demirlerin, diğer dökme demirler ve çeliklere göre sahip olduğu bazı üstün özellikleri sebebiyle, kullanım alanları ve üretim miktarları her geçen zaman biraz daha artmaktadır. Küresel grafitli dökme demirlerin bazı avantajları aşağıda sıralanmaktadır (Stafanescu 1990, Özel 1994, Şen 1997)

- Küresel grafitli dökme demirler çeliklere göre %10 daha hafiftirler,
- Küresel grafitli dökme demirlerden yapılan dişliler, çeliklerden daha sessiz çalışmaktadır. Yapıdaki grafit, sönüm kapasitesinin %40 artmasını sağlamaktadır,
- Küresel grafitli dökme demirlerin çelikten daha az çentik duyarlılığı vardır. Bu yüzden yüzey işlemlerinin çeliklerde olduğu kadar hassas yapılmasına gerek yoktur,
- Hammadde olarak küresel grafitli dökme demirler, çeliklerden daha ucuzdur,
- Küresel grafitli dökme demirlerden yapılmış dişliler, son şeklini verecek şekilde dökülebilir. Örneğin, döküm işlemi sırasında dişler oluşturulabilir,

- Küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirliği, tavlannış çelikten oldukça iyidir. Bu nedenle pahalı işleme takımlarının sarfiyatı da az olmaktadır,
- Küresel grafitli dökme demir dişlilerin üretiminde kullanılan enerji, elik dişlilerin üretiminde kullanılan enerjiden daha az olmaktadır. Bu sayede %50'ye ulaşan enerji tasarrufu sağlanabilmektedir,
- Küresel grafitli dökme demirler, bünyesinde bulunan serbest grafit sayesinde çeliklere göre düşük sürtünme katsayısı ve düşük aşınma hızı sergilemektedir.

Belirtilen bu üstün özellikleri sebebiyle, küresel grafitli dökme demirler birçok kullanım alanına sahiptir. Bu kullanım alanları içerisinde en çok payı otomotiv ve mimari uygulamalar almaktadır. Bunlardan bazıları; krank milleri, n teker destek kolları, direksiyon bağlantılarının kompleks şekilleri, fren diskleri, motor bağlantı rotları, serbest kollar, tekerlek poyraları, güç iletim bağlantıları, turbo yuvaları ve manifoldları için yüksek sıcaklık uygulamaları ve bir çok uygulama için yüksek güvenlik valfleri sayılabilir. Ayrıca küresel grafitli dökme demir boru endüstrisi, diğer en büyük kullanım alanını teşkil etmektedir (Stafanescu 1990, şen 1997). Bunun yanında, madencilik ve metalürji sektöründe, kırıcı gövdelerde, sıcak hadde merdanelerinde, kalıplarda, ergitme ve cüruf potalarında da kullanılmaktadır (zel 1991).

3. BORLAMA

3.1 Borlamanın Tanımı

Borlama; Demir ve demir dışı birçok alaşım ve seramik malzemelere uygulanabilen termokimyasal bir yüzey sertleştirme ısı işlemidir (Çalık ve Özsoy 2002). Bor kaplama, yüzeyde bileşik oluşturacak şekilde bor atomlarının difüzyonu olarak da bilinmektedir (Fichtl vd. 1987).

Borlama işlemi, yüzeyi iyi temizlenmiş malzemelere 700–1000 °C sıcaklık aralığında, 1–10 saat sürelerde katı, pasta, sıvı veya gaz gibi çeşitli ortamlarda uygulanabilmektedir. Son teknolojik gelişmelerle birlikte gaz ortamında termokimyasal borlama metodlarının dışında, plazma borlama ve akışkan yataкта borlama gibi yeni olan teknikler de kullanılmaktadır. Ayrıca termokimyasal olmayan fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey ve iyon biriktirme yöntemleri de borlama amacıyla kullanılan yöntemlerdir (Oğuz 1994, Şen 1997).

Borlama, metal ve alaşımların yüzeylerinde sertlik, aşınma direnci ve korozyon direncini artırırken, aynı zamanda bu özellikleri yüksek sıcaklıklarda korumak ve erozyon direncini de artırmak amacıyla kullanılmaktadır (Şen 1997). Borlama işlemi, endüstriyel olarak daha çok demir esaslı alaşımlara uygulanmaktadır (Soydan 1996).

3.1.1 Borlama İşleminin Avantajları

Borlama işleminde karakteristik özelliklerin sayısı oldukça azdır. Bunlar arasında en önemlisi borür tabakasının çok yüksek sertlik (1450-5000 HV) ve ergime sıcaklığına sahip olmasıdır (Sinha 1991). Demir esaslı malzemelerde kaplama tabakasının sertliği alt kritik sıcaklığa kadar (650 °C) kalıcıdır (Şen 1997). Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme yöntemleri olan sementasyon ve nitrasyona göre çok daha yüksektir. Borlama işlemi ile sertleştirilmiş takım çeliklerinin yüzey sertlikleri,

elektrolitik sert krom kaplamaların ve tungsten karbürün sertlik değerlerine ulaşabilmektedir. Bor kaplanmış çeliklerin tipik yüzey sertlikleri ve diğer sert metallerle karşılaştırılması Tablo 3.1 'de verilmektedir (Sinha 1991, Şen 1997).

Tablo 3.1 Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması (Şen 1997).

Malzeme	Mikrosertlik (Kg/mm ² veya HV)
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 kalıp çeliği	630-700
Yüksek hız takım çeliği BM42	900-910
Nitrürlenmiş çelik	650-1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
Sementit karbürler, WC+Co	1160-1820(30kg)
Al ₂ O ₃ +ZrO ₂ seramikler	1483(30kg)
Al ₂ O ₃ +TiC+ZrO ₂ seramikler	1730(30kg)
Sialon seramikler	1768(30kg)
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Elmas	~10000

Borür tabakasının yüksek sertlik değeri ve düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahip olması, aşınma direncinin oldukça yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu özellikler, kalıp imalatında ana malzemenin işlenmesi sırasında kolaylık, maliyetinde ucuzluk ve orjinal yapıya göre mekanik özellikler açısından çok daha üstün özellikler sağlamaktadır (Şen 1997).

Borür tabakasının bazı avantajları aşağıda verilmektedir;

- Borür tabakasının sertliği yüksek sıcaklıklarda (550°C–600°C) korunmaktadır (Sinha 1991).
- Borlama, özellikle sertleşebilir birçok çelik grubuyla kıyaslanabilir yüzey özelliklerinin elde edilebildiği bir işlemdir (Sinha 1991).
- Borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin oksidan olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerin erozyon dirençlerini artırmaktadır.

Bu özellikleri sebebiyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Sinha 1991).

Borlama işlemi ile düşük alaşımlı çeliklerin, H_2SO_4 , H_3PO_4 ve HCl gibi asitlere karşı direncini artırmak mümkündür. Örneğin; borlanmış ostenitik paslanmaz çeliklerin HCl asit ortamlarına karşı dayanıklılığı çok iyidir (Şen 1997).

- Borlanmış yüzeyler çok yüksek sıcaklıklarda (850 °C) orta özellikte oksidasyon direncine ve oldukça yüksek ergimiş metal korozyon direncine sahiptir (Sinha 1991).
- Borlanan parça, oksidan ve koroziv ortamlarda üstün bir yorulma ömrüne sahiptir (Sinha 1991).
- Borlama işlemi yağlayıcı kullanımını azaltmakta, soğuk birleşme eğilimini ve sürtünme katsayısını düşürmektedir (Şen 1997).

3.1.2 Borlama İşleminin Dezavantajları

Borlama işlemi, birçok avantajının yanında bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir. Bunlar sıralanacak olursa; Borlama tekniği, esnek değildir ve gaz ortamında sementasyon ve plazma nitrasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre maliyeti daha yüksektir. Gaz karbürizasyonu ve plazma nitrasyonu daha esnek tekniklerdir. Bu teknikler, daha az işçilik ve daha düşük maliyet gerektirir. Ayrıca, bu işlemlerin kısa sürede ve daha kolay gerçekleşmesi borlamaya göre avantajlar sağlamaktadır. Bu sebeple, yüksek sertlik, dış ortamlara karşı yüksek aşınma direnci ve yüksek korozyon direncinin arzu edildiği durumlarda borlama işlemi tercih edilmektedir (Şen 1997).

Borlamaya tabi tutulan malzemelerde bor tabaka kalınlığının %5-20 'si oranında boyutsal olarak artış gözlenmektedir. Örneğin, 25 μm 'lik bir tabaka kalınlığı, 1,25–6,25 μm 'lik bir büyümeye neden olmaktadır. Bu kalınlık artışı borlanan malzemenin cinsine ve borlama şartlarına bağlıdır (Şen 1997).

Çok hassas toleranslarla çalışmak gerektiği zaman, elmas takımlarla kaplama işlenmesi mümkündür, fakat yüzeyin geleneksel tekniklerle işlenmesi kaplama

tabakasında kırılmalara neden olmaktadır. Bu da kaplama kalitesinde bozulmalara ve çatlamalara yol açmaktadır (Şen 1997).

Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde (2000N) sementasyon ve nitrasyonla kıyaslandığı zaman, çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği sebebiyle, dişli üretiminde bir sınırlama söz konusudur (Şen 1997).

Takımlar borlandıktan sonra çoğu zaman bir sertleştirmeye ve temperlemeye tabi tutulmaktadır. Bu işlemlerde, bor tabakasının özelliklerinin korunması için inert atmosfer veya vakum gerekmektedir (Sinha 1991).

3.2 Borlama Yöntemleri

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

a) Termokimyasal yöntemler (kutu borlama, pasta borlama, sıvı borlama ve gaz borlama) (Sinha 1991),

b) Termokimyasal olmayan yöntemler (fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma spreycaplama vb. yöntemler) (Sinha 1997, Fichtl vd. 1987).

Bu teknikler içerisinde en çok kullanılanları, termokimyasal yöntemlerdir. Termokimyasal bor kaplama işlemi sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak bor atomunun metale difüzyonuna dayanan bir kaplama yöntemidir (Sinha 1997, Fichtl vd. 1987). Termokimyasal bor kaplama yöntemleri dört ana grup altında toplanmaktadır (Şen 1997).

3.2.1 Kutu Borlama

Kutu borlama işlemi, elle kolayca gerçekleştirilmesi, emniyetli olması, faz bileşimlerinin değişiminin çok az olması ve bu yöntemde çok az ekipmana gereksinimi olması sebebiyle çok kullanılan bir tekniktir (Şen 1997). Kutu Borlama,

borlanacak malzemenin toz karışımı şeklinde bor verici ortam içerisinde belirli sıcaklık ve sürelerde bekletilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Borlanacak parçanın etrafı yeterli miktarda borlama tozuyla kaplanarak üst kısma dolgu malzemesi (SiC olabilir) doldurulup kapak hava girişi engellenecek şekilde kapatılır. Kutu borlamada da çok farklı bor bileşenleri kullanılabilir. Bu bileşenler; katı bor kaynağı, akışkanlar ve aktivatörlerdir (Karlı 2005).

Hazırlanan kutular, işlem sıcaklığına getirilmiş fırına yerleştirilir. İşlem sıcaklığı 800–1050 °C arasında genellikle 900 °C, borlama süresi 1–8 saat arasında seçilmektedir. İşlem süreleri; sıcaklığın yanında, kullanılan borlama bileşiminin ne kadar reaktif olduğuna da bağlıdır (Karlı 2005).

Yaygın olarak kullanılan bor kaynakları; bor karbür (B_4C), ferrobor ve amorf bordur. Ferrobor ve amorf bor çok iyi bor kaynakları olup kalın borür tabakası oluştururlar. Katı ortamda bor sağlayıcıların bazı özellikleri Tablo 2.2 'de verilmektedir. Akışkan olarak SiC ve Al_2O_3 , aktivatör olarak $NaBF_4$, KBF_4 , $(NH_4)_3BF_4$, NH_4Cl , Na_2CO_3 , BaF_2 ve $Na_2B_4O_7$ kullanılmaktadır. Bu malzemelerin haricinde değişik ticari tozlar (örneğin ekabor tozu gibi) borlayıcı ortam olarak kullanılmaktadır (Karlı 2005, Şen 1997).

Borlama maddesinin tane boyutu küçüldükçe temas yüzeyi artar. Temas yüzeyinin artması yayılımı kolaylaştırır, dolayısıyla borür tabakasının kalınlığı artar. Borlama, kaynaklı birleştirmelerde de başarı ile uygulanabilmektedir. AISI 1040 ve AISI 8620 çeliklerinde kaynak birleştirmelerde uygulanan katı borlama yöntemi ile kaynak bölgesinde de yeterli miktarda borür tabakası elde edilmiştir (Meriç ve Şahin 2002).

Tablo 3.2 Kutu borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri (Graf ve Matushcka 1977).

İsim	Formül	Molekül Ağırlığı(Gr.)	Teorik Bor Miktarı(%)	Ergime Sıcaklığı(°C)
Amorf Bor	B	10.82	95-97	2050
Ferro-Bor	-	-	17-19	-
Bor Karbür	B ₄ C	55.29	77.28	2450

Tipik ticari borlama toz karışımlarının bileşimleri aşağıda verilmektedir (Sınha 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

3.2.2 Pasta Borlama

Pasta borlama, kutu borlamanın zor ve daha pahalı olduğu veya fazla zaman kaybının olduğu durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Hazırlanan borlayıcı karışım, malzemenin yüzeyine püskürtülerek 1–2mm civarında tabaka oluşturulmakta ve kurutulmaktadır. İşlem, demir esaslı malzemelere geleneksel fırınlarda 800–1000 °C sıcaklık aralığında 5 saat süreyle uygulanmaktadır. Bu işlemde koruyucu atmosfer olarak Ar, NH₃, veya N₂ kullanılmaktadır. Pasta borlama işleminde 1000 °C’de 20 dakika süre sonunda 50µm kaplama kalınlığı elde edilebilmektedir. Büyük parçaların veya seçilmiş alanların borlanması için oldukça elverişlidir (Karşlı 2005).

3.2.3 Sıvı Borlama

Bu yöntemde borlama banyosu sıvı haldedir. Borlama işlemi 670–1000 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. Sıvı ortamda borlama, elektrolitik sıvı borlama ve elektrolizle sıvı borlama olarak iki ana grupta toplanmaktadır (Karşlı 2005).

Tablo 3.3 Sıvı borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin özellikleri (Karşlı 2005).

Malzeme	Formülü	Molekül Ağırlığı	Teorik Bor Miktarı (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	381.42	11.35	-
Susuz boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	201.26	21.50	741
Metaborikasit	HBO_2	43.83	24.69	
Sodyum borflorür	NaBF_4	109.81	9.85	
Borikasit(susuz)	B_2O_3	69.64	31.07	450
Borkarbür	B_4C	55.29	78.28	2450

Demir esaslı malzemelerin elektrolitik sıvı borlama işlemi, 900–950 °C sıcaklık aralığında, boraks esaslı eriyiklere %30 B_4C ilavesi yapılarak gerçekleştirilmektedir. Borlama işlemi aynı zamanda, %55 boraks, %40–50 ferrobor ve % 4–5 ferro-alüminyum ilavesiyle de yapılmaktadır. Nikel alaşımlarının borlanması, KBF_4/KF tuz banyosu, 670 °C'nin altındaki uygulamalarda 75/25 oranında kullanılarak düşünülen kalınlıkta bor tabakası elde edilebilmektedir. Aynı zamanda daha yüksek sıcaklıklarda demir esaslı malzemeler için de iyi sonuçlar sağlanmaktadır. %55 boraks, %45 B_4C karışımı ve 1/1 oranında NaCl ve BaCl_2 kullanılarak çok yüksek tabaka kalınlıkları elde edilmektedir. Sıvı borlama ayrıca, boraks, ferro-silis, borik asit ve sodyum sülfat (NaSO_4) esaslı tuz banyolarında da gerçekleştirilmektedir (Karşlı 2005).

Yüksek frekanslı akımlarla yapılan borlama işlemi sırasında yüksek ısı, borlama süresini önemli ölçüde düşürmektedir ve çok derin difüzyon kaplamaları elde edilmektedir. U8 çelik parça üzerinde yapılan borlama çalışmasında, %50 kriyolit, %50 bor karbür (200–400 mesh) 1200 °C'ye ısıtılarak borlama işlemi gerçekleştirilmektedir ve 200 °C'de kaplama 1 saat kurutulmaktadır. Bu

yöntemde, 1 dakika sonrasında 35 µm, 2 dakika sonrasında 80 µm ve 3 dakika sonunda 125 µm tabaka kalınlığı elde edilmektedir. Yani ısıtma süresi, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında 200–300 kez daha azalmaktadır. Benzer sonuçlar Ck 45 çeliğinin borlanması sırasında da görülmektedir. Yüzey tabakasının sertliği, 1000 HV değerine sahiptir ve X-ışınları çalışmalarında, demir borür ve bor karbür fazları elde edilmektedir (Şen 1997).

3.2.4 Gaz Borlama

Borlama ortamının gaz fazında olduğu borlama işlemidir. Borlama işlemi Ar ve H₂ gazlarının ve bir evapotartörde gaz haline getirilmiş bir bor kaynağının (BCl₃ gibi) belirli karışımının, dış ortama kapalı paslanmaz çelik bir odadaki numune üzerine püskürtülmesiyle yapılır. Gaz borlama işleminde kullanılan bor taşıyabilen gazlar, bor halojenler veya bor hidrürlerdir. Gaz borlamada en çok kullanılan ortamlar aşağıda verilmektedir (Karlı 2005).

- Diborane (B₂H₆)-H₂ karışımı,
- Bor halid-H₂/veya (75/25 N₂-H₂) gaz karışımı,
- (CH₃)₃B ve (C₂H₅)₃B gibi organik bor bileşikleri.

(B₂H₆)-H₂ karışımı, zehirli ve patlayıcı olma özellikleri sebebiyle ticari olarak kullanılmamaktadır. Fakat B₂H₆:H₂ oranı 1:75 ve gaz akış hızı 75–100 litre/saat olduğunda, aşınma direnci ve sertliği yüksek olan bor kaplamalar elde edilmektedir. BBr₃, çok pahalı ve suyla olan kuvvetli reaksiyonu ayrıca yüksek sıcaklıkta kararlılığının ayarlanması için BF₃’ e ihtiyaç duyulması sebebiyle kullanım açısından tercih edilmemektedir. Gaz borlama işlemi için en çok BCl₃ tercih edilmektedir. Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri Tablo 3.4 ’de verilmektedir (Sinha 1991, Şen 1997).

Tablo 3.4 Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri (Şen 1997).

Gazlar	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı(gr.)	Teorik Bor Miktarı(%)	Donma Noktası(°C)
Bor Tri Florid	BF ₃	67.82	15.95	-128.8
Bor Tri Klorid	BCl ₃	117.9	9.23	-107.3
Bor Tri Bromit	BBr ₃	250.57	4.32	- 46.0
Di-Boran	B ₂ O ₃	26.69	39.08	-165.5
Bor Tri Metil	(CH ₃) ₃ B	55.92	19.35	-161.5
Bor Tri Etil	(C ₂ H ₅) ₃ B	98.01	11.04	- 94.0

3.3 Borlanabilen Malzemeler ve Borürlerin Özellikleri

Borlama işlemi, sade karbonlu çelikler, düşük alaşımlı çelikler, takım çelikleri ve paslanmaz çelikler gibi birçok çelik grubuna ve dökme demirlere uygulanabilmektedir. Buna ilaveten, nikel, kobalt, molibden ve titanyum esaslı alaşımlara da uygulanmaktadır. Ayrıca, sinterlenmiş karbürlerin yüzeyleri borlanarak, aşınma dirençleri artırılabilir. Yumuşak kobalt ve nikel bağlayıcıların yüzeylerinde borür fazları oluşturmak mümkün olup, son yıllarda seramiklere de bor kaplamalar uygulanmaktadır (Wang ve Fischer 1993).

Kırılgan borür fazları oluşturmaları sebebiyle, alüminyum, silisyum ve azotlu yatak çelikleri, borlama için uygun malzemeler değildir. Aynı şekilde, içerdikleri kükürt ve kurşun gibi alaşım elementlerinin borür tabakasının kalkmasına ve çatlamasına sebep olması nedeniyle bu çeliklerin borlanması tavsiye edilmemektedir (Sinha 1991, Şen 2004).

3.3.1 Borürlerin Özellikleri

Bor, periyodik tabloda birçok elementle bileşik oluşturmaktadır. Borürlerin çoğu, kuvvetli kovalent bağ yapısına sahiptir ve oldukça yüksek ergime sıcaklığı, elastisite modülü ve sertlik değerleri sergilemektedir (Reymond 1991).

Seramikler içerisinde borürlerin termal genleşme katsayıları orta seviyelerdedir. Genelde borürlerin ısı iletkenlik katsayıları ve termal şok dirençleri oldukça

yüksektir. Borürler diğer seramiklerle kıyaslandıkları zaman, son yıllarda yapılan çalışmalarda, yüksek sertlik ve mukavemet değerleri sergilemelerine rağmen gerçekte orta derecede mukavemet ve tokluk değerlerine sahiptirler. Birçok borür, 5–80 $\mu\Omega\text{-cm}$ aralığında elektriksel dirence sahiptir ve seramikler arasında iyi elektriksel iletkenlik gösterir. Borürlerin manyetik özellikleri incelendiğinde, diamanyetik özellikten kuvvetli ferromanyetik özelliğe değiştiği fakat birçok borürün oda sıcaklığında zayıf paramanyetik özellik gösterdiği görülmektedir. Borürlerin kimyasal dirençleri, birçok seramiğe nazaran oldukça yüksektir (Reymond 1991).

Borürlerin oluşumu, büyük ölçüde bileşik yaptığı atomla arasındaki atomik boyut faktörüne ve elektrokimyasal etkiye bağlıdır. Bir borürün oluşması sırasında, dış yörünge elektronları, dağınık sp^2 ve sp^3 elektron konfigürasyonların da yerleşebilmektedir. Bu durum, kuvvetli kovalent bağ yapısının oluşumunda önemli bir karakteristiktir, sp^2 ve sp^3 yapılarındaki değişimin rolü, bor ile reaksiyona giren atomların elektron verme kabiliyetlerine bağlıdır. Çeşitli borür yapılarının oluşumu, s^2p , sp , sp^2 ve sp^3 elektron konfigürasyonlarının kombinasyonlarındaki değişimle açıklanmaktadır (Reymond 1991).

Bütün borürleri üç ana grupta toplayabiliriz.

- (1) dış yörüngede bulunan s seviyesindeki elektronlara sahip olan elementlerin yapmış oldukları borürler. Bu grupta yer alan elementler, alkali (I-A) ve toprak alkali (II-A) elementleridir.
- (2) d iç yörüngelerine sahip olan elementlerin oluşturduğu borürler. Bu elementler, geçiş metalleri (III-B ile VIII-B arasındaki gruplar), lantanitler (nadir toprak elementleri) ve aktinitlerdir.
- (3) s, p valans elektronlarına sahip elementler tarafından oluşturulan borürler (BN ve BP) (Şen 1997).

Bağlardaki kovalentlik derecesi arttığı zaman, borürlerin ergime sıcaklığı, elastik modülü ve sertliği artmaktadır. Çoğu metal borürler Tablo 3.5 'de görüldüğü gibi yüksek ergime sıcaklıklarına sahiptir. Monoborürler ve diborürlerde stokiometrik olmama, bor zincirleriyle veya latis boşluklarıyla artmakta, ancak metal

boşluklarından etkilenmemektedir. Benzer kristal yapıları ve latis parametrelerinde olan borürler katı çözeltili oluşturmaktadır. Tablo 3.5 'de çeşitli metal borürlerin bazı özellikleri verilmektedir (Şen 1997).

Alternatif olarak borürler, kristallo-kimyasal olarak iki grupta sınıflandırılmaktadır;

(1) düşük bor konsantrasyonuna sahip borürler (M_4B , M_3B , M_2B , M_3B_2 , MB ve M_3B_4 gibi. M = metal),

(2) yüksek bor konsantrasyonuna sahip borürler (MB_2 , MB_4 , MB_6 , MB_{12} , MB_{49} , MB_{66-100} gibi). Düşük bor konsantrasyonuna sahip borürlerin yapıları latis parametreleriyle belirlenirken, yüksek bor konsantrasyonuna sahip borürlerin yapıları ihtiva ettikleri B-B bağ yapısındaki bor elementlerine bağlıdır (Şen 1997).

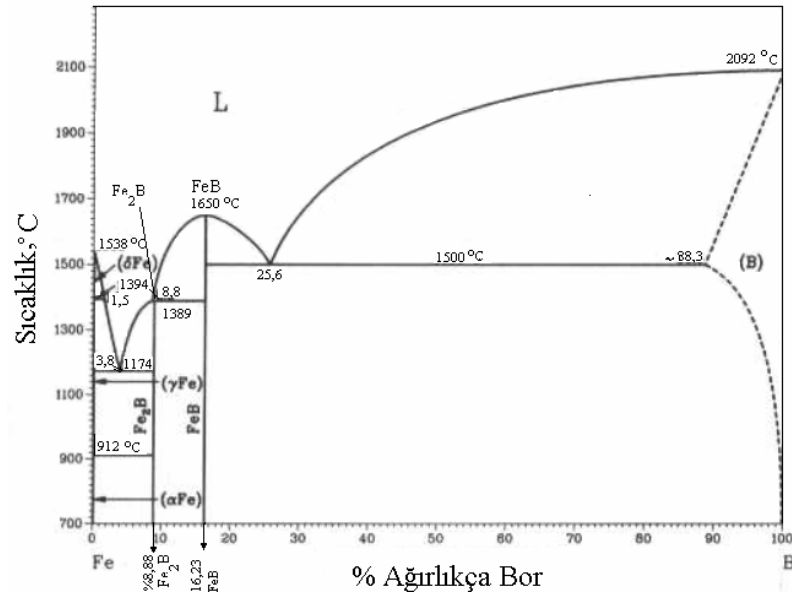
Tablo 3.5 Çeşitli metal borürlerin bazı özellikleri (Şen 1997).

Borür	Kristal Yapı	Teorik Yoğun. (gr/cm ³)	Erg. Sckl. (°C)	Termal Genleşme (10 ⁻⁶ /°K)	Termal İletkenlik (W/m.°K)	Sertlik (GPa)	Elas. Mod (GPa)	Elk. Direnç (10 ⁴ Ωcm)
Co ₃ B	Ortog.	8013	1110	...	17	11.3	...	28
Co ₂ B	Tetra.	8.05	1260	...	14	11.3	...	33
CoB	Ortog.	7.32	...	...	17	11.3	...	76
Cr ₂ B	Ortog.	6.58	1870	14.2 (27-1027°C)	10.9(20°C)	13.2	...	107
CrB	Tetra.	6.14	...	12.3(27-1027°C)	20.1(20°C)	11.8	...	46
Fe ₂ B	Tetra.	7.34	1410	...	17.4	13.1-17.7	284	38
FeB	Ortog.	6.73	1650	~12(400-1000°C)	12(20°C)	16.2-18.6	343	80
Mn ₂ B	Tetra.	7.18	1580	...	6.6	17.7	...	40
MnB	Ortog.	6.36	1890	...	7.7	20.1	...	57
Mo ₂ B	Tetra.	9.23	2280	5(25-500°C)	...	24.5	...	40
MoB ₂	Hegz.	7.99	2375	7.7(300-900°C)	...	11.8	...	45
Mo ₂ B ₃	Ortog.	7.45	2140	8.6(27-1027°C)	~50(20°C)	23	672	26
NbB	Ortog.	7.57	2917	12.9(27-1027°C)	15.6(27°C)	21.5	...	40
NbB ₂	Hegz.	7.00	3036	8(27-1027°C)	23.5(1027°C)	25.5	637	26
Nb ₃ B ₄	Ortog.	7.28	2935	9.9(27-1027°C)	20.5(27°C)	22.5	...	34
NiB	Ortog.	7.17	1590	...	21.9	15.2	...	50
Ni ₂ B	Tetrag.	8.05	1225	...	54.8	14	...	14
TiB	Ortog.	4.56	2190	...	...	22.7	...	40
TiB ₂	Hegz.	4.52	3225	...	64.4(27°C)	33-25.5	551	9
W ₂ B	Tetrag.	17.09	2670	6.7	...	23.7	...	...
WB	Ortog.	...	2665	~6.9(20-2205°C)	...	36.3	...	...
W ₂ B ₃	Ortog.	13.17	2365	7.8(27-1027°C)	~52(20°C)	26.1-24.5	775	22
ZrB ₂	Hegz.	6.10	3245	55.9(27-1027°C)	57.9(27°C)	22.1-17.9	343-500	10

3.3.2 Demir-Bor Faz Diyagramı

Bor, periyodik tablonun IIIA grubunda yer almaktadır. Bor elementinin atom numarası 5 ve atom ağırlığı 10,81 gram'dır. Bor atomunun yarıçapı, 0,46Å° ve ergime sıcaklığı 2092 °C 'dir. Bor elementinin valansı +3 ve iyon yarıçapı 0,23Å° 'dur. Bor, rombohedral kristal yapısına sahiptir ve latis parametreleri sırasıyla a=1,093 nm ve c=2,381 nm'dir (Vlack 1985). Ayrıca bor amorf yapıda da olabilmektedir (Şen 1997).

Alaşımlarda, alaşım elementlerinin yer alan katı eriyiği veya ara yer katı eriyiği olarak davranacakları Hume-Rothery kuralları çerçevesinde belirlenebilmektedir. Bu kurallar içerisinde en önemli olanı, atomik boyut faktörüdür (Yılmaz ve Şen 1996). Fe-B sisteminde borun atom çapı, demire kıyasla %27 daha küçük olması sebebiyle, bu elementle katı eriyik yapabilmektedir (Şekil 3.1). Demir alaşımlarında bor elementinin yer alan veya ara yer katı çözeltileri yapabilecekleri iç sürtünme deneyleri ile belirlenmektedir (Delikanlı vd. 2003).



Şekil 3.1 Fe-B ikili faz diyagramı (Atik 2001).

Demir-bor denge diyagramında ağırlıkça % 8.83 bor oranında Fe₂B, yine ağırlıkça % 16.23 bor oranında FeB arabileşikleri meydana gelmektedir. Ağırlıkça % 3,8 bor oranında ergime sıcaklığı 1174 °C olan ötektik faz oluşmaktadır (Şekil 3.1). Dolayısıyla borlanmış yüzey bu sıcaklığa kadar ısıdan etkilenmektedir (Atik 2001). Şekil 3.1'de demir-bor faz 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).

3.3.3 Fe_2B ve FeB Fazlarının Özellikleri

Difüzyon yönüne bağlı olarak, kolonsal yapı sergileyen tek fazlı Fe_2B fazı, çift fazlı $\text{Fe}_2\text{B}+\text{FeB}$ fazlarına göre daha çok tercih edilmektedir. Gerçekte FeB ve Fe_2B fazları birbirlerine basma ve çekme gerilmeleri uygulamakta ve çoğu zaman bu gerilmeler sebebiyle, iki faz arasında çatlaklar oluşmaktadır. Bu etki mekanik zorlamalar altında borür tabakasının tabaka tabaka kalkmasına neden olmaktadır. Termal şok veya mekanik etkiler altında ayrılmalar ve tabaka halinde kalkmalar meydana gelmektedir. Bu sebeple, minimum FeB içeriğine sahip kaplama tabakaları elde edilmeye çalışılmaktadır (Sinha 1991, Şen 1997).

Genellikle, borür tabakalarının tribolojik özelliklerinin belirlenmesinde mikroyapıya bağlı olarak açıklamalar yapılmaktadır. Çift fazlı $\text{FeB}+\text{Fe}_2\text{B}$ tabakası, tek fazlı Fe_2B tabakasına göre iyi özelliklere sahip değildir. Çift fazlı tabakalarda yüzeyin hemen altında porozite oluşumu mümkün olmaktadır. Bor kaplamalarda, borür tabakasının ince olması durumunda, porozite oluşumu ve tabakanın kalkma riskinin az olduğu düşünülmektedir (Şen 1997).

Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucunda, Fe_2B fazının hakim olduğu dış yapısına benzer kolonsal bir yapının oluşması da tercih edilmektedir. Çift fazlı $\text{Fe}_2\text{B}+\text{FeB}$ tabakası, vakum veya tuz banyosunda 800 °C sıcaklık civarında uzun süre ısıtılma tabi tutulduğu takdirde, tek fazlı Fe_2B fazı elde edilebilmektedir. Fe_2B ve FeB fazlarının tipik özellikleri Tablo 3.6 'de verilmektedir (Reymond 1991, Şen 1997). Fe_2B ve FeB fazlarının Tablo 3.6 'de verilen özellikleri bir çok makalede farklı değerler almaktadır (Reymond 1991, Şen 1997).

Tablo 3.6 Fe₂B ve FeB fazlarının tipik özellikleri (Reymond 1991, Şen 1997).

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Kristal Yapı	Hacim Merkezli Tetragonal	Ortorombik
Latis Parametresi (Å)	a=5.078, c=4.28	a=4.053, b=5.495, c=2.946
Mikrosertlik (GPa)	18-20	19-21
Elastisite Modülü (GPa)	280-295	590
Bor içeriği (%Ağırlıkça)	8.83	16.23
Yoğunluk (gr/cm ³)	7.43	6.75
Termal Genleşme Katsayısı (ppm/°C)	7.65 (200-600°C) 4.25 (100-800°C)	23 (200-600°C)
Ergime Sıcaklığı (°C)	1389-1410	1540-1657
Termal İletkenlik (W/m.°K)	30.1 (20°C)	12.0 (20°C)
Elektriksel Direnç (10 ⁻⁶ Ω.cm)	38	80
Renk	Gri	Gri

3.3.4 Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması

Demir borürler, seramiklerin (yüksek sertlik) ve metallerin termal ve elektriksel iletkenlik gibi genel özelliklerini birarada bulunduran çok ilginç bileşiklerdir (Palombarini ve Carbućicchio 1987).

Genellikle sade karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin termo-kimyasal yöntemlerle borlanması sırasında oluşan borürlerin, kolonsal kümecikler halinde büyüdüğü görülmektedir. Oluşan borür tabakasında en dış yüzeyde FeB fazı, matrise doğru Fe₂B fazı ve iç kısımda geçiş bölgesi yer almaktadır. FeB fazı ile Fe₂B ve Fe₂B ile matris arayüzeyindeki yapının kolonsal olduğu bilinmektedir. Ancak, yüksek alaşımlı çeliklerde arayüzey yapısının kolonsal yerine düz bir çizgi halinde olduğu belirtilmektedir (Palombarini ve Carbućicchio 1984, Şen 1997).

Borlama işlemi sonucunda oluşan borür fazları, borlama ortamının aktif bor konsantrasyonuna bağlı olarak, yüzey çizikleri ve pürüzlülükleri gibi makro hataların, tane sınırları ve dislokasyonlar gibi mikro hataların bulunduğu bölgelerde başlamaktadır. Özellikle düşük aktif bor konsantrasyonunun bulunduğu ortamlarda, bu bölgeler borür fazının oluşabildiği yegane yerlerdir (Şen 1997). Yapılan araştırmalarda, ilk oluşan borür fazının Fe₂B olduğu, fakat

Mösbauer elektron spektroskopu ile yapılan ölçümlerde Fe_2B fazı üzerinde FeB fazının bulunduğu ve en dış yüzeyde ise FeB_{1+x} fazının yer aldığı görülmektedir. Araştırmacı ilk çalışmalarında, en dış yüzeyde bulunan fazın FeB_x olduğunu (Carbucicchio vd. 1980) ancak daha sonra yapmış olduğu çalışmalarda, bu fazın FeB_{1+x} şeklinde ve buradaki x katsayısının 1'den büyük olduğunu (muhtemelen $x=2$) belirtmektedir. Bu durumda, bor difüzyonunun Fe_2B ile matris ve FeB ile Fe_2B arasında gerçekleştiği görülmektedir. Kaplama yüzeyinden iç kısımlara doğru gidildikçe Fe_2B fazının ağırlık kazandığı düşünülmektedir. Bu konuyla ilgili olarak yapılan çalışmada, yüzeyden belirli oranlarda tabakalar kaldırılarak yapılan X-ışınları analizlerinde bu durum kanıtlanmaktadır (Şen 1997).

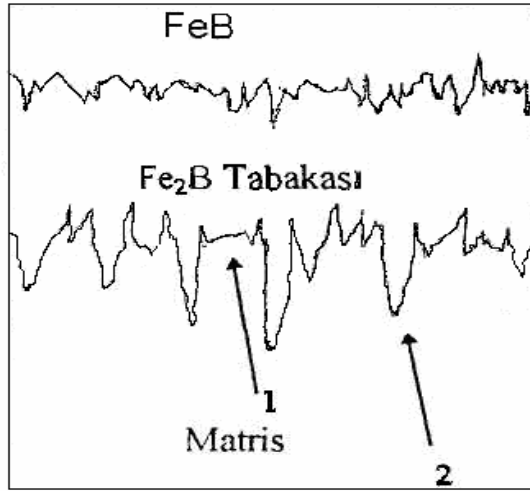
Yapılan araştırmalarda, borür tabakasının oluşumu konusunda genel olarak savunulan ortak nokta, işlemin difüzyon kontrollü olmasıdır (Şen 1997). Bu sebeple, bazen termokimyasal terimi yerine termodifüzyon kelimesi de kullanılmaktadır. Birçok araştırmada, hacim merkezli tetragonal yapıya sahip Fe_2B fazının çoğu zaman yüzeye dik olan $[001]$ yönünde, borun en kolay difüzyonlanabildiğini açıklamaktadır. Borun $[001]$ yönünde kolonsal olarak büyümesi konusunda bir fikir ileri sürülmüşse de, bu durumun kuvvetli kolonsallık olmaması durumunda (002) oryantasyonunun daha etkin olarak ortaya çıktığı ve bu görüşün ağırlık kazandığı görülmektedir (Şen 1997).

Bor kaynağından borür ve ana metal arayüzeyine sürekli olarak yayılan bor atomları, bor tabakasına dik doğrultuda Fe_2B kristalleri oluşturmakta ve bu kristaller kolonsal bir şekilde içeriye doğru ilerlemektedir. Difüzyon esaslı büyüme mekanizması, Fe_2B fazının kuvvetli bir şekilde tercihli yönlenmeye sahip olmasına rağmen, $\text{Fe}_2\text{B}/\text{Fe}$ arayüzeyinde düşük veya ihmal edilebilir bir kolonsallaşma göstererek, büyümesini veya kristalloğrafik bir tekstürün olmadığı durumda ara yüzeydeki kolonsallaşmayı açıklamada yetersiz kalmaktadır. Bu konuda kolonların ucundan büyüme mekanizmasının daha geçerli olduğu ileri sürülmektedir.

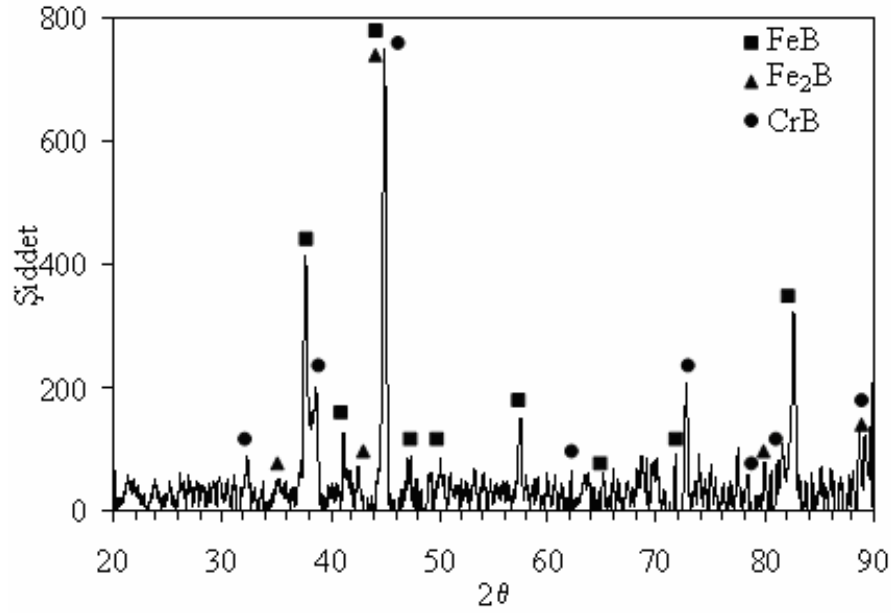
Uçtan büyüme mekanizmasına göre, ana malzemenin bileşimine ve işlem şartlarına bağlı olarak, başlangıçta oluşan Fe_2B çekirdeği iğnesel bir şekilde

büyümekte ve bor gradyanı boyunca ilerlemektedir. Bu durumda Fe_2B çekirdeğinin ucu etrafında oluşan bölgesel yüksek gerilim alanları ve distorsiyonları, tabakanın kolonsal olarak büyümesini sağlamaktadır. Uçtan büyüme mekanizmasında Şekil 3.2 'de görüldüğü gibi, demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan tabaka ile matris arayüzündeki kolonsallık 2 noktasında 1 noktasına kıyasla daha yüksektir (Palombarini ve Carbuicchio 1987).

Demir esaslı malzemelerin borlama işlemi sonrasında çok fazlı borür tabakasında, FeB fazının büyüme mekanizması, matrisin hemen üzerinde oluşan Fe_2B fazı ile benzerlik gösterebilmektedir. Aynı tabaka için FeB/ Fe_2B arayüzündeki kolonsallığın Fe_2B /matris ara yüzündekine nazaran daha az olması dikkate değerdir. Fe_2B fazı nispeten sünek olan bir malzeme üzerinde büyüyen bir faz iken, FeB fazı daha sert bir tabaka üzerinde büyümektedir. FeB/ Fe_2B arayüzündeki kolonsallığın az olmasının nedeni buna bağlanabilir ve daha sert bir FeB fazı elde edilmektedir. Matris ve borür tabakası içerisinde bor dağılımı Şekil 3.3 'de gösterilmektedir (Güneş vd. 2005).



Şekil 3.2 Borür tabakasında, FeB ve hemen altında yer alan Fe_2B bölgesinin kolonsal olarak büyüme mekanizması (Palombarini ve Carbuicchio 1987).

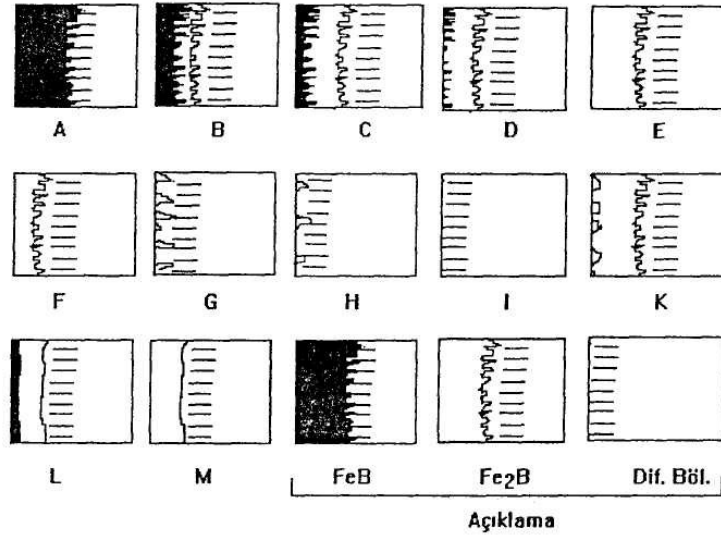


Şekil 3.3 900 °C 'de 5 saat süreyle katı ortamda borlanmış AISI sıcak iş takım çeliğinin malzeme yüzeyinde oluşan borür tabakası ve matris içerisindeki B ve Fe dağılımını gösteren X-ışınları difraksiyon analiz paterni (Güneş vd. 2005).

3.3.5 Borür Tabaka Yapılarının Sınıflandırılması

Borlama ortamlarının, borlama işlemi için uygun olup olmadıklarını anlamak için, işleme tabi tutulacak parçaların metalografik olarak incelenmeleri gerekmektedir. Metalografik olarak iyice parlatılmış olan bir yüzeyde borlama işleminin olup olmadığı, kaplama tabakasının FeB ve Fe₂B fazlarının yanısıra porozite içerip içermedikleri kolaylıkla tesbit edilebilmektedir. Bununla birlikte, borür tabakasının kalınlığı, yapısı (kolonsal veya düz) ve kalitesi belirlenebilmektedir (Şen 1997).

Şekil 3.4'de görüldüğü gibi geçerli olabilecek bir sınıflandırma sistemi geliştirilmiştir. Bu sınıflandırmayı kaplama tabakalarının bileşim ve belirleyici görünümlerine bağlı olarak yapılmıştır (Şen 1997).



Şekil 3.4 Borür tabakalarının türleri (Şen 1997).

- A: Çoğunlukla FeB fazından oluşan tek fazlı tabaka
- B: Fe₂B ve FeB fazından oluşan iki fazlı tabaka
- C: FeB tabakasının B'ye göre daha ince olduğu iki fazlı tabaka
- D: Fe₂B fazı birbirinden ayrı ve kolonsal yapılı olduğu, iki fazlı tabaka.
- E: Çoğunlukla Fe₂B fazından oluşan, belirgin kolonsal yapılı tek fazlı tabaka.
- F: Çoğunlukla Fe₂B fazından oluşan ve daha az belirgin kolonsal yapılı tek fazlı tabaka,
- G: Birbirinden bağımsız bireysel Fe₂B kolonları
- H: Birbirinden uzak ve bağımsız bireysel Fe₂B kolonları
- I: Fe₂B Difüzyonu
- K: Dejenere tabaka
- L: FeB ve Fe₂B fazından oluşan, kolonsal yapıda olmayan düzgün karakterli iki fazlı tabaka,
- M: Fe₂B fazından oluşan ve kolonsal yapıda olmayan düzgün karakterli tek fazlı tabaka,

Bu tabaka türlerinin görünüşlerinden, kaplama yapısının özelliklerini belirlemek mümkün değildir. Malzemenin yüzeyinde oluşan borür tabakasının kolonsal yapılı olması tamamen tabakanın görünüşü hakkında bilgi vermektedir. Oluşturulan bu

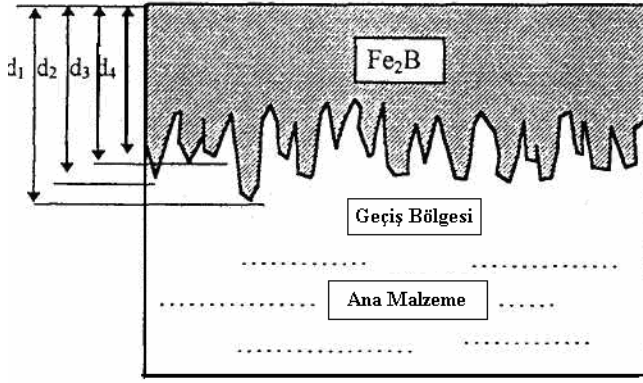
sınıflandırma sistemi borür tabakasının görünüşünü karakterize etmek ve borlama işleminin uygun olup olmadığına karar vermek için olanak sağlamaktadır (Şen 1997). Her bir tabaka türü aşağıda verildiği gibi karakterize edilmektedir:

Endüstride E ve F grubu borürler ve bu borürleri sağlayan borlama ortamları tercih edilmektedir. Mineraller tarafından aşınmaya maruz kalınması durumunda D tipi borür tabakası istenmektedir. Tek fazlı borür tabakası (Fe_2B) birçok avantaja sahiptir. Bunlardan bir kaçı arasında, kırılğan olmaması, borlama sonrası ısıtıl işlem sırasında kaplama tabakasının matrinden ayrılmayacak kadar yapışma mukavemetine sahip olması ve kaplamanın özellikleri yer almaktadır (Şen 1997).

Borür tabakasının kalınlığı borlanan malzemenin cinsine, borlama ortamının bileşimine, işlem süresine ve borlama sıcaklığına bağılı olarak değişmektedir. Genellikle erozif aşınmaya maruz kalan tabakaların kalın, adhesiv aşınmaya maruz kalan parçaların ince kaplanmış olması istenmektedir (Sinha 1991).

Teorik olarak adhesiv aşınmayı önlemek için $5\mu\text{m}$ 'lik tabaka kalınlığı yeterli olabilmektedir. Ancak alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerde kolonsal karakterli tabaka yapısı oluşması sebebiyle $5\mu\text{m}$ 'lik bir tabakanın elde edilmesi mümkün olmamaktadır. Alaşımlı çeliklerde ise (örneğin takım çeliklerinde) tabaka kalınlığının $75\text{--}100\ \mu\text{m}$ 'yi geçmemesi önerilmektedir. Alaşım elementlerinin varlığı bor yayılımını zorlaştırarak tabaka kalınlığını olumsuz yönde etkilemektedir (Şen 1997).

Borür tabakalarının kolonsal ve değişken karakterli bir yapıda olmaları sebebiyle tabaka kalınlıklarının belirlenmesinde güçlükler çıkmakta ve bu nedenle de farklı tanımlamalar yapılmaktadır. Literatürde tabaka kalınlığı, genellikle kolonsal yapının dış yüzeyle karşılaştırılması ve kolonların yüzeye bağılı olarak ortalama mesafelerinin alınması ile hesaplanmaktadır (Şekil 3.5) (Şen 1997).



$$d = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (3.1)$$

Şekil 3.5 Borür tabaka kalınlığının belirlenmesi (Şen 1997).

3.3.6 Borür Tabakasının Karakteristik Özellikleri

Borür tabakalarının çatlaması konusunda yapılan araştırmalar sonucunda, FeB ve Fe₂B fazlarının farklı ısıl genişleme katsayılarına sahip olması sebebiyle çatlak oluşumuna neden oldukları görülmektedir. Bu iki faz arasında yüzeye paralel çatlakların yanında yüzeye dik olarak ilerleyen çatlaklar da yer almaktadır. Bunun haricinde takım çeliklerine uygulanan borlama işlemi sonrasında çok kalın tek fazlı kaplamalarda da darbeli gerilmeler altında çalışılması durumunda çatlaklar oluşmaktadır. Çalışmalar sonucunda FeB ve Fe₂B arayüzeyinde, FeB fazının çekme gerilmelerine Fe₂B fazının ise basma gerilmelerine maruz kaldığı görülmektedir (Şen 1997).

Borlama işleminin en önemli amaçlarından biri de malzemeye yüksek aşınma direnci ve yüzey sertliği kazandırmaktır. Genel olarak bor kaplamaların sertliğinin belirlenmesinde vickers mikrosertlik ve knob sertlik testleri uygulanmaktadır. Sertlik ölçümleri, tabaka kalınlığı ve faz yapısına bağlı olarak 25-200 gr yüklerle gerçekleştirilmektedir. Borlama işleminde elde edilen kaplama tabakalarında genellikle FeB ve Fe₂B fazları mevcut olup, FeB fazı Fe₂B fazına nazaran daha sert ve gevrek, bu yüzden FeB fazı için düşük yükler tercih edilmektedir. Borür tabakasının sertliğini belirlemek için iki ayrı yöntem önerilmiştir. Bunlar sırasıyla, sertlik deneylerinin malzeme yüzeyine dik ya da büyüme yönünde artan yükler kullanılarak gerçekleştirilmesi ve sabit yük kullanılarak gerçekleştirilmesidir. Ölçümlerde, sabit yük olarak, 100 gr kullanıldığı belirtilmektedir. Çeliklerde borür tabakasının sertliğinin 2000 kg/mm² vickers değerine ulaştığı hatta bunun üzerine çıktığı bilinmektedir (Şen 1997).

Ancak sertlik ölçümlerinin metalografik olarak çok iyi hazırlanmış numuneler üzerinde yapılması gerektiği önem taşımaktadır. Borür tabakasının bir özelliği de, borlama sonrasında ısıtıl işlem görmesi durumunda sertliğini 900 °C sıcaklığa kadar muhafaza edebilmesidir (Şen 1997).

Borun oksijene karşı ilgisi fazla olduğundan yüzeyde koruyucu ince bir oksit filmi oluşturmakta ve bu oksit filmi yüzeyde yağlayıcı vazifesi görerek sürtünmeli aşınma esnasında sürtünme katsayısını düşürürken yüzeylerin birbirine kaynamasını önlemektedir. Kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı semente edilmiş tabakanın yumuşamasına neden olurken borlu tabakaya etki etmemektedir (Şen 1997).

3.4 Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulama Alanları

Bor kaplanmış malzemeler, göstermiş oldukları üstün özellikler sebebiyle çok geniş bir endüstriyel kullanım alanına sahiptir (Şen 1997). Özellikle adhesiv ve abrasiv aşınma şartlarında birçok kullanım alanı mevcuttur. Bunlar;

DIN St 37 çeliğinden üretilen tel çekme aletleri, ringleri ve kovanlarında, Tekstil makinelerin de kullanılan dökme demir dramlarda su ayar vanalarının dörtlü kavrama besleyicilerinde (AISI316 Ti çeliğinden), ateşleme nozülleri, girdaplı dönme elemanları ve kimya endüstrisinde petrol yakıtlı makinalarda enjektör başlarında, önemli motorlarda sürme, sonsuz vida ve helisel dişlilerde.

Abrasiv 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 kanatçıkları borlanmış Ti-6Al-4V malzemedan üretilmektedir (Şen 1997).

Plastik endüstrisinde, mineral takviyeli plastik granüllerin yükleme elemanları için kontrol plakaları ve bentleri, dövme kalıpları (arabalar için aksesuar parçaların performanslı olarak üretilmeleri için), basma ve sürme matrisleri, kavrama halkaları (takım çelikleri), pres kalıpları, kesme şablonları, döverek

kesme plaka muhafazaları (DIN St37 çeliği) vida ve silindirik dişliler, konik dişliler (AISI 4317 çeliği), seramik tuğla ve kaplama kalıplanmasın da kullanılan kalıplar, ekstrüzyon kovanları, iticileri ve ringleri (AISI 4140 çeliği), borlanan parçalar, basınçlı döküm kalıpları, blok bükücüler, blok sürücüler, boru klipsleri, presleme şekillendirme sürücüler, çeşitli tipte basınçlı soğuk şekillendirme kafaları, bükme, ekstrüzyon, damgalama, presleme, dövme, çekme, ve germe kafalarında kullanılmaktadır. Çok bileşenli borlamaların kullanım alanlarına örnek olarak, bor-kromlama işleminin ostenitik paslanmaz çeliklerin, bor-krom-titanyumlama ise plastik makinelerinin parçalarında aşınma direncini artırması söylenebilir. Borlama işlemine tabi tutulmuş bazı demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları Tablo 3.7 'da verilmektedir (Şen 1997).

Tablo 3.7 Borlama işlemine tabi tutulmuş bazı demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları (Şen 1997).

Altlık Malzemeler		Uygulama Alanları
AISI	DIN	
	St 37	Kovanlar, Sürgüler, Nözüller, Taşıma Tüpleri, Besleyiciler, Bıçaklar, Yardımcı Elemanlar
1020	C15, Ck 15	Dişli Sürücüler, Pompa Şaftları,
1043	C45	Aşındırıcı Diskler, Pinler
H10	X32CrMoV33	Sıcak Şekillendirme İçin Alt ve Üst Kalıplar, Besleyiciler
H11	X38CrMoV51	Vanalar, Enjeksiyon Silindirleri, Çıkıcılar
H13	X40CrMoV51	Ağzlar, İngot Kalıpları, Sıcak Dövme için Alt ve Üst Kalıplar, Matrisler ve Diskler
4140	42CrMo4	Basma Takım ve Kalıplan, Ekstrüzyon Amaçlı Vidalı Sürücüler, Merdaneler, Ekstrüzyon Baraları ve Geri Dönüşsüz Valfler
302	X12CrNi188	Vida Yuvaları ve Kovanları
316	X5CrNiMo1810	Plastik ve Kauçuk Endüstrisinde Kullanılan Delinmiş veya Fatura Açılmış Yuvalar
KGDD		Tekstil makineleri için Parçalar, Mandreller, Kalıplar, Kollar
	X45NiCrMo4	Kalibre Kalıplar, Basınç Pedleri ve Kalıpları
D2	X155CrVMo121	Çekme Kalıpları, Soğuk Haddelme için Merdaneler

4. ÖSTEMPERLEME

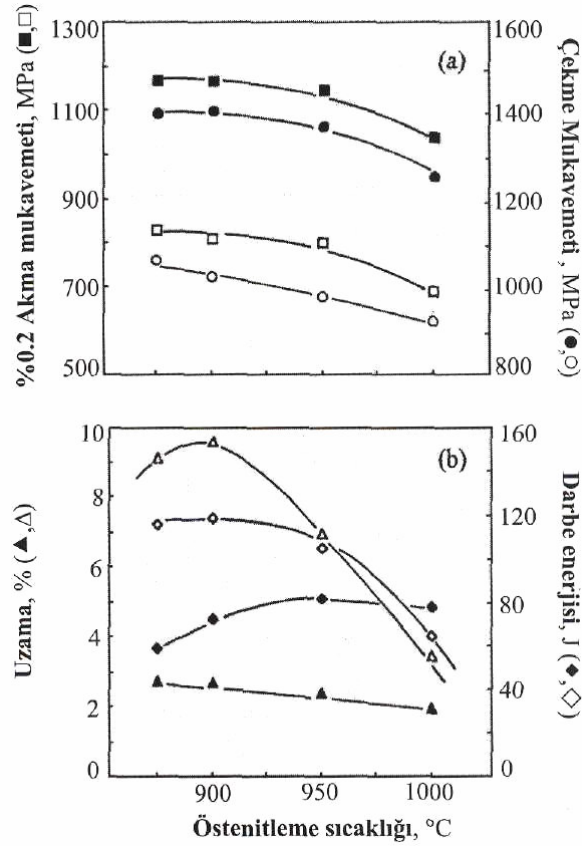
4.1 Östempirlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler

Östempirlleme işleml ilkl kez Davenport ve Bain tarafından geliştirilmiş ve 1930 'larda çeliğe uygulanmıştır. Kısa bir süre sonra (1930–1940) metalurjistler gri dökme demire Ni, Mo, Cu ve Mn gibi alaşım elementlerini ilave ederek perlitik dönüşümü kısmen de olsa engellemişler ve bugünün östempirlenmiş yapısına benzer asiküler yapıyı elde etmişlerdir. KGDD 'in geliştirilmesinden hemen sonra hem alaşım elementi ilavesiyle hem de östempirlleme ısıl işlemlle benzer yapı bu malzemede de sağlanmışır. Bu konuda International Harvester ve General Motors firmaları 1960 'lara kadar çalışmalarını sürdürmüş ancak o yıllarda böyle bir malzemeye ihtiyacın sınırlı olmasından ve tekniğin henüz tamamen kontrol altına alınamamasından dolayı ÖKGDD'in endüstriyel kullanımı yeterli gelişmeyi gösterememiştir (Yalçın 1997).

1970 'lerin ortasında Finlandiya'da Kymi Kymmene ve ABD'de General Motors firmaları ÖKGDD dişlisini dövme çelik dişlisinin yerine kullanmışlardır. Yapılan bu işlem endüstriyel uygulamaların konuya olan ilgisini birden arttırarak malzemeye olan talebin de artmasına neden olmuştur. Büyüme hızı %16 olarak tahmin edilen malzemenin yıllık üretim miktarının 1998 yılında 160.000 tona ulaşmıştır(Yalçın 1997).

4.1.1 Östenitleme İşlemi

Östenitleme işlemi; parçaların genellikle 850~950 °C sıcaklıkları aralığında kesit kalınlığına bağılı olarak belirli bir süre ısıtılma işlemidir. Yüksek östenitleme sıcaklığı östenit içerisindeki kalıntı ostenit miktarının artmasına neden olur. Bununla birlikte malzemenin sertleştirilebilirliğinin de artmasında önemli rol oynar. Fakat östenitleme sıcaklığının artması, östempirlleme işlemi sırasında yapının ausferrite dönüşüm süresini arttırdığından ve mekanik özellikleri olumsuz etkilediğinden istenmez (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Östenitleme sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi.(■ ● ▲ ◆300 °C 'de östempelenmiş, □ ○ △ ◇ 375 °C'de östempelenmiş) (Aslantaş 2003).

Ayrıca östenitleme sıcaklığı, tüm parçanın ısınmasını ve östenitin karbona doymasını sağlayacak gerekli östenit sıcaklığının elde edildiği östenitleme süresi, minimum tutulmalıdır. Parça yüzeyinde 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

4.1.2 Östempereleme Isıl İşlemi

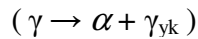
Östempereleme; malzemenin yüksek bir sıcaklıkta (850–950 °C) östenitlenmesinden sonra 250–450 °C sıcaklık aralığındaki tuz banyosunda hızla su verilmesini ve

dönüşümün tamamlanması için bu sıcaklıkta yeterli bir süre (0,5–4 saat) tutulmasını takiben oda sıcaklığına soğutulması kademelerini kapsayan izotermal bir ısıtma işlemidir (Şekil 4.2) (Rundman 1991, Yalçın 1997).

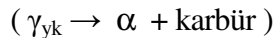
Östemperleme sıcaklığına su verme işlemi Şekil 4.2 'den de takip edilebileceği gibi beynitik yapının elde edilebilmesi için ferritik ve perlitik dönüşüme izin vermeyecek derecede hızlı olmalı ve martensit başlama (Ms) sıcaklığına varmadan kesilmelidir. KGDD'lerin östemperlenmesiyle ortaya çıkan mikroyapı 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 olmaktadır. Bu nedenle bazı araştırmacılar ÖKGDD beynit yapısının “ ausferrit ” olarak isimlendirilmesinin daha doğru olacağını belirtmektedirler (Kovacs 1990, Yalçın 1997).

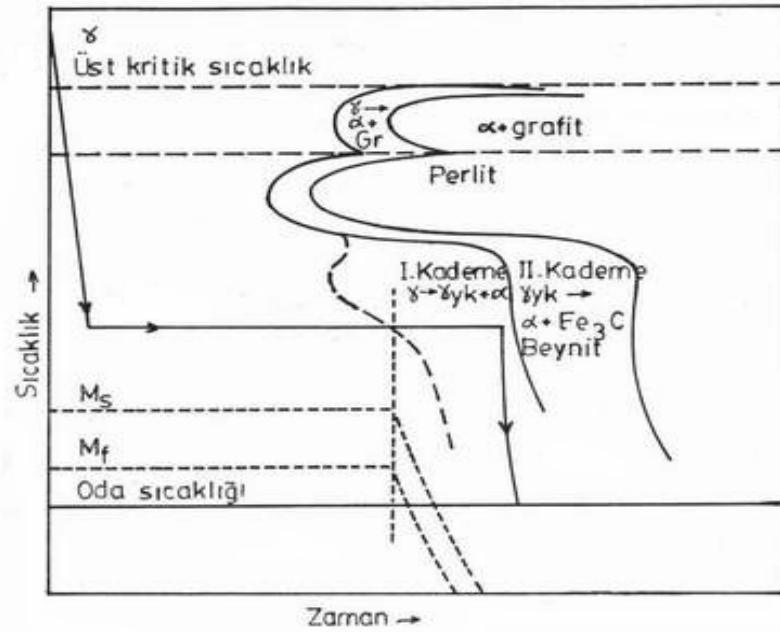
Dökme demirlerde östemperleme prosesi iki kademeli bir reaksiyon sonucu gerçekleşmektedir (Şekil 4.3) (Yalçın 1997, Aslantaş 2003).

I. Kademe: Östenitin beynitik ferrit ve karbonca zengin östenite ayrışması



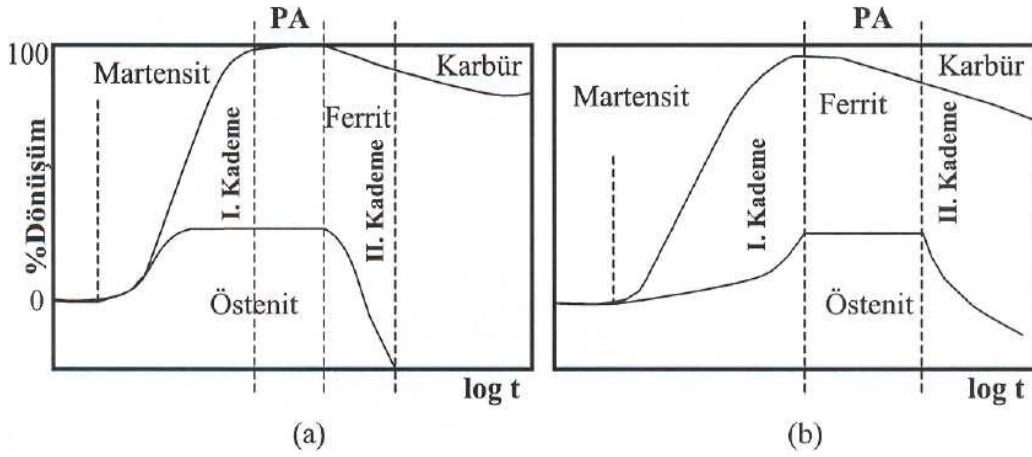
II. Kademe: Yüksek karbonlu östenitin ferrit ve karbüre ayrışması





Şekil 4.2 Küresel grafitli dökme demir için izotermal dönüşüm diyagramı (Yalçın 1997).

Prosesin I. kademesinde beynitik ferrit arayüzey ve tane sınırlarında çekirdeklenir. Büyüyen ferrit fazından atılan karbon, östenit fazı içerisinde birikir. Böylelikle kararlı hale gelen östenitin ferrite dönüşümü engellenerek 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 martensite 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 "proses aralığı" olarak adlandırılmaktadır (Şekil 4.3).



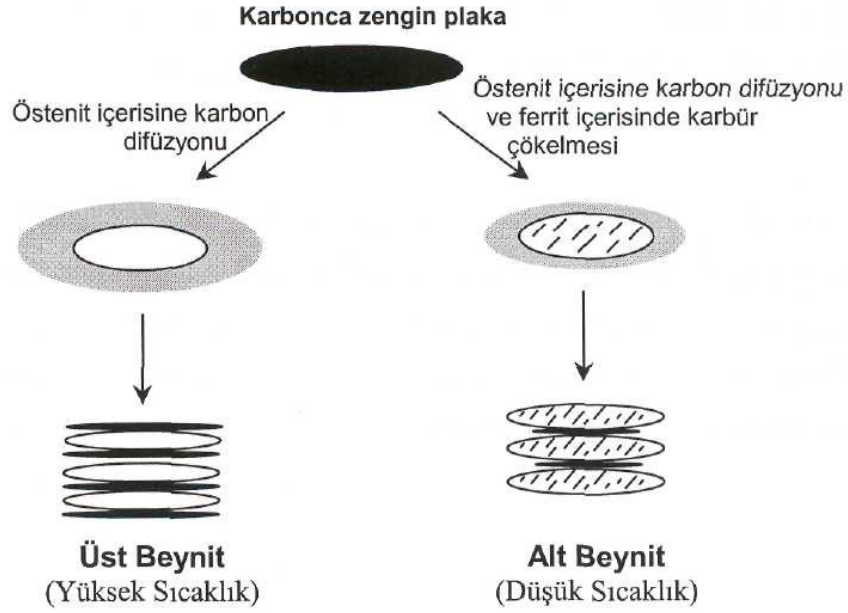
Şekil 4.3 Alaşımsız KGDD’de (a) üst beynit ve (b) alt beynit dönüşümleri için östemperleme süresiyle mikroyapıdaki değişimlerin ve proses aralığının şematik gösterimi (Aslantaş 2003).

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

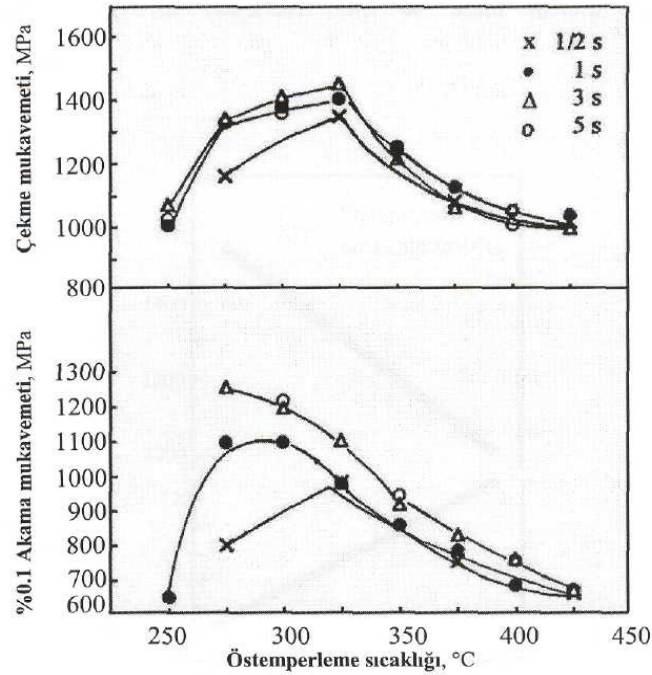
Yüksek östemperleme sıcaklıklarında ($>330\text{ }^{\circ}\text{C}$) ferritin çekirdeklenme hızı düşük ve karbon difüzyon hızı daha yüksektir. Dolayısı ile karbonun çoğu büyüyen ferrit plakaları arasındaki östenite atılma fırsatı bulmaktadır. Böylece östenit karbonca zenginleşerek kararlı hale gelir. Sonuçta ferrit tabakaları ve %40’a kadar yüksek karbonlu östenit içeren bu yapı üst beynit 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 çöker 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 beynit olarak adlandırılmaktadır (Yalçın 1997).

Sonuçta beynitik ferrit ve %10 kadar yüksek karbonlu östenit içeren bu yapı alt beynit olarak adlandırılır (Yalçın 1997). Şekil 4.4 'de alt ve üst beynit oluşum mekanizması verilmiştir.



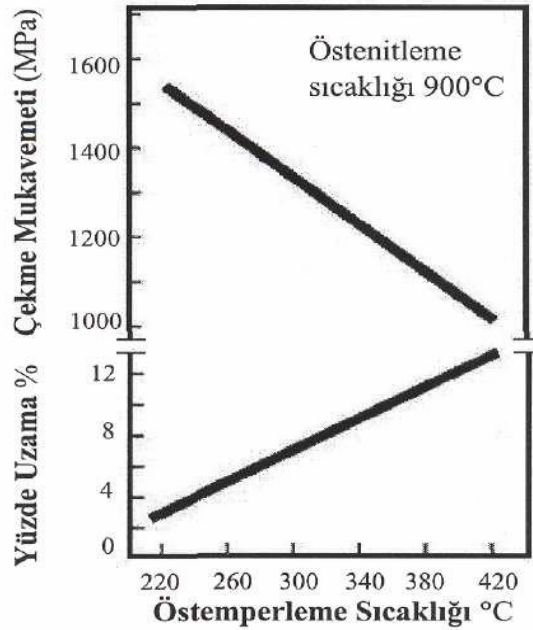
Şekil 4.4 Alt ve üst beynit oluşum mekanizması (Aslantaş 2003).



Şekil 4.5 Östempirleme sıcaklık ve süresinin alaşımsız KGDD lerde çekme ve %0,1 akma mukavemeti üzerindeki etkisi (Aslantaş 2003).

Östempereleme işlemleri malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir (Şekil 4.5). 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.

Şekil 4.6 'da 900 °C'de östenitlenmiş KGDD malzemenin farklı östempereleme sıcaklıklarındaki çekme mukavemeti ve yüzde uzama miktarları verilmiştir. 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.



Şekil 4.6 900 °C'de östenitleme yapılmış KGDD malzemede Östempereleme sıcaklığının çekme mukavemeti ve % uzama üzerindeki etkisi (Aslantaş 2003)

4.2 ÖKGDD' lerin Mekanik Özellikleri

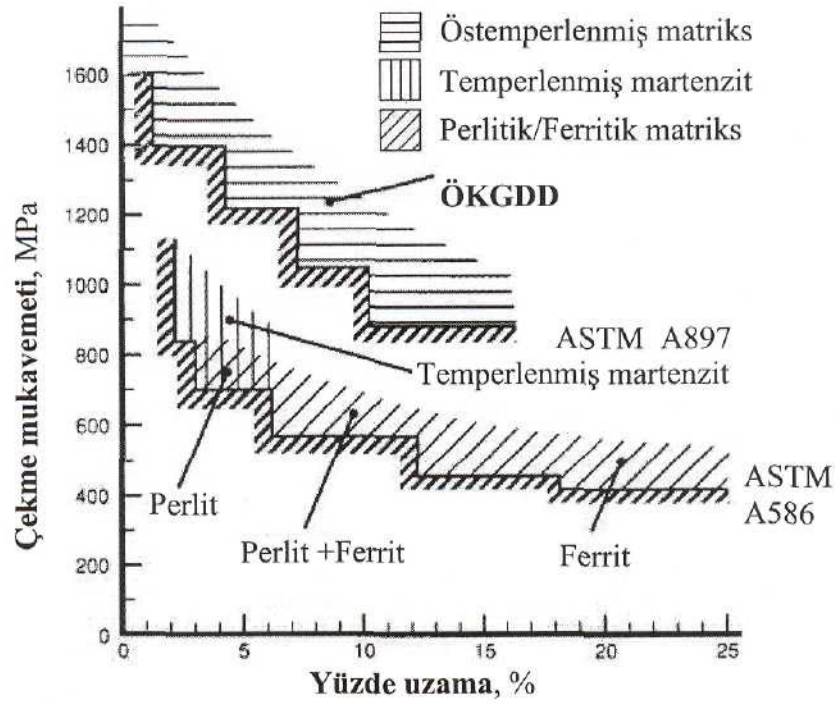
ÖKGDD malzemeler %1,7 'lik bir uzama ile birlikte çekme mukavemetleri 1700 MPa 'a kadar çıkabilir. Bununla birlikte elde edilen yüksek sertlik aşınma

direncinin öncelikli olduğu alanlarda tercih edilirler. Pratik uygulamalarda iki farklı ÖKGDD malzeme kullanılmaktadır (Aslantaş 2003).

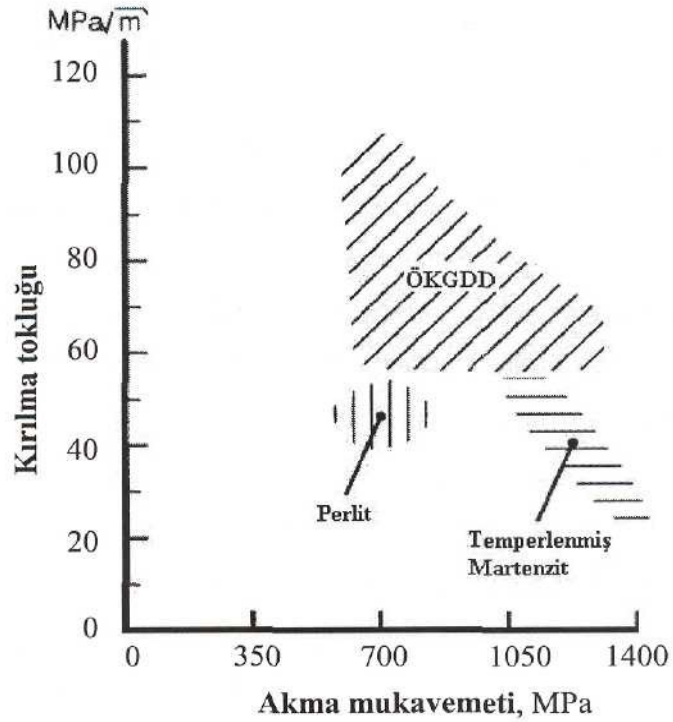
- Genel itibariyle matriks alt beynit özelliği gösterir ve düşük östemperleme sıcaklıklarında elde edilen bir dökme demir yapısıdır. Bu dökme demirler yüksek sertliğe (>400 HB) ve mukavemete sahiptirler. Bu nedenle dişlilerde ve yüksek temas gerilmelerine karşı direnç istenen uygulamalarda kullanılırlar.
- Matriks'in üst beynit özelliği gösterdiği ve yüksek östemperleme sıcaklıklarında elde edilen bir yapıdır. Bu dökme demirin sertlik değerleri 260-360HB arasında değişmektedir. Böylece yüksek bir tokluğa ve yorulma ömrüne sahiptirler.

Şekil 4.7 'da geleneksel dökme demir ile ÖKGDD arasındaki çekme mukavemeti-yüzde uzama ilişkisi verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere uygulanan ısıtma işlemi neticesinde malzeme mukavemeti iki hatta üç kat arttırılabilmektedir. Kırılma tokluğu açısından ÖKGDD malzemeler diğer dökme demir malzemelerle karşılaştırıldığında oldukça iyidir.

Şekil 4.8 '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 4.7 Dökme demir ve çeliklere uygulanan ısıt işlemin neticesinde çekme mukavemeti ile yüzde uzama arasındaki ilişki (Aslantaş 2003).



Şekil 4.8 Çeşitli malzemelerle ÖKGDD 'lerin kırılma tokluğu-akma mukavemeti ilişkisinin karşılaştırılması (Aslantaş 2003).

Huges tarafından ortaya konulan bir çalışmada çelik, KGDD ve ÖKGDD malzemelerine ait çekme mukavemeti, akma mukavemeti, yüzde uzama ve sertlik özelliklerine dair bir karşılaştırma yapılmıştır (Tablo 4. 1). Elde edilen bu değerler incelendiğinde östemperleme ısı işleminin küresel grafitli dökme demirlerin akma ve çekme mukavemetlerini önemli derecede arttırdığı görülebilir. Östemperleme işlemi sonunda elde edilen mekanik özelliklerin, sertleştirme işlemi uygulanmış çeliğin mekanik özelliklerine yakın olduğu da çıkarılabilecek diğer bir sonuçtur.

Tablo 4.1 KGDD ve çeliklere ait mekanik özelliklerin karşılaştırılması (Aslantaş 2003).

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama %	Sertlik HB
KGDD (Perlitik-Feritik)	400-960	250-610	28-3	130-300
KGDD (Sertleştirilmiş ve Temp)	600-1300	500-1100	5-1	300-400
ÖKGDD	800-1600	600-1400	16-1	250-555
Çelik (Sertleştirilmiş ve Temp)	700-1800	450-1450	25-8	210-510

4.3 ÖKGDD 'in Standartları

ÖKGDD 'lerin standardizasyonunda farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bu nedenle Amerika, Japonya, Almanya ve İsveç gibi ülkeler kendi ulusal standartları oluşturmuşlardır. Hatta Kymmene (Finlandiya), George Fischer ve Sulzer Brothers (İsviçre) ve Advanced Cast Products (ABD) gibi şirketler kendi geliştirdikleri standartları kullanmaktadırlar. Amerikan standardı ASTM A 897M-90 hemen hemen diğer tüm standartları kapsamı yönüyle en yaygın kabul gören ÖKGDD standardı durumundadır. ASTM standardında beş ÖKGDD sınıfı yer almakta ve her bir sınıfta minimum çekme ve akma mukavemeti ile % uzama değerleri verilmektedir. Standard ayrıca, minimum çentiksiz darbe direnci ile tipik brinell sertlik değerlerini de içermektedir (Tablo 4.2)

Tablo 4.2 ÖKGDD için ASTM A 897M-90 (metrik) standardı (Harding 1991, Yalçın 1991, Yalçın 1997).

Sınıf	Min Çekme Muk.(MPa)	Min. Akma Muk. (MPa)	Min. % Uzama	Min. Çentiksiz Darbe Enerjisi,J	Sertlik, HB	Sertlik, HV
850/550/10	850	550	10	100	269-321	282-339
1050/700/7	1050	700	7	80	302-363	317-382
1200/850/4	1200	850	4	60	341-444	360-467
1400/1100/1	1400	1100	1	35	388-477	407-503
1600/1300/-	1600	1300	-	-	444-555	467-583

4.4 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 ve ticari olmak üzere iki grup altında toplanabilecek olan avantajları diğer malzemelerle rekabet edebilme imkanı sağlamaktadır (Yalçın 1991).

A. 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 sönümleme kapasitesine sahiptir. Dolayısıyla, ÖKGDD parçalar çelikten daha az gürültüyle çalışır.
- 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 östenitin deformasyonla (dişliler çalışırken de olabilir) martensite dönüşmesiyle sert ve aşınmaya dirençli bir yüzey elde edilebilir.
- 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.

B. Ticari avantajları;

- Ham malzeme maliyeti düşüktür. Östemperleme ısı işlemleri daha basit ve kısadır. Hatalı östemperlenen parçalar yeniden östemperlenir.
- Dökümün yatırım maliyeti dövmeğe göre daha düşüktür ve işlem esnekliği daha fazladır.
- Östemperlemeden önce (hatta bazı durumlarda sonra) işlenebilirliği iyidir. Bu hem üretimi hızlandırır hemde kesici takım ömrünü arttırır. Fiat'ın araştırmasında hipoid dişli üretimi için 18CrMo4 çelik taslak yerine ferritik düktil demir taslak kullanılması alet maliyetinde %75 azalma sağlamıştır (Yalçın 1997).
- Kompleks parçalar bile nihai-şekle uygun şekillendirilebilir. Bu işlemeyi azaltacağından maliyeti düşürür.
- Karbürleşmiş dövme çeliğe göre ÖKGDD dişli için enerji tüketimi %50 daha azdır (Tablo 4.2).

Tablo 4.3 KGDD ve dövme çelik dişli üretimi için enerji tüketimi (Harding 1993).

İşlem	Enerji tüketimi kWh/t	
	KGDD	Dövme Çelik
Taslak Üretimi	2500	4500
Tavlama	-	500
Östemperleme	600	-
Yüzey Sertleştirme	-	800-1200
TOPLAM	3100	5800-6200
Tasarruf : % 46-50		

ÖKGDD'lerin yukarıda sayılan teknik ve ticari avantajlarının yanında bazı sınırlamalar söz konusudur. Bunları aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür;

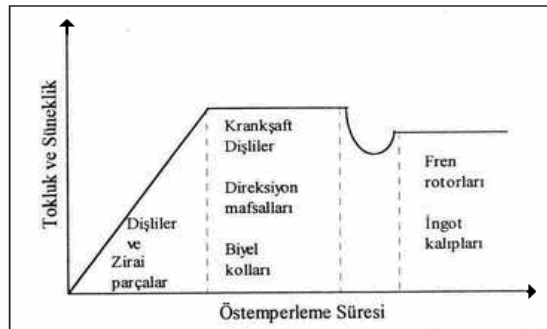
- En büyük problem östemperlemeden sonra işlenebilirliğin oldukça kötüleşmesidir. En sert sınıfı ancak taşlama tezgahında işlenebilir.
- Çelikten daha düşük elastik modüle sahiptir. Bunun için daha fazla elastik deformasyona maruz kalır. Ancak bu özellik dişlilerde oyuklanma yorulma riskini azalttığından bazen faydalı da olabilmektedir.
- Östemperleme işlemi küçük parçalar için çok daha 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 östemperleme sıcaklığına çıkacak olursa matriks yapısının dönüşümü söz konusu olur ve bu mekanik özellikleri bozar.

4.5 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 4.9'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 ve/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 östemperleme şartları dizayn edilecek parçadan istenen mekanik özelliklere göre belirlenmelidir (Yalçın 1997).

1) Savunma sanayisi: Zırh, mermiler, roket gövdeleri, tank paletleri, motor rotorları, süspansiyon kolları, gergi kolu.



Şekil 4.9 İdealize edilmiş tokluk-östemperleme zaman eğrisine bağlı olarak ÖKGDD için bazı kullanım alanları (Yalçın 1997).

- 2) **Otomotiv ve kamyon:** Krank mili, ekzantrik mili, tekerlek mili, kumanda mili çatalı, zaman dişlileri, ayna ve pinyon dişlisi, diferansiyel kutusu, direksiyon yatağı, direksiyon kolu, krank kolu, kontrol kolları, kavrama kolları, dingil, süspansiyon kolları, tahrik flanşları, kamyon tekerlek göbeği, amortisör, fren parçaları, dizel piston başı.
- 3) **Ziraat ve konstrüksiyon:** Kazma uçları, gübreleme bıçakların, tırpan koruyucusu, pulluk, pulluk bıçakları, mısır öğütme plakaları, kar kürüme ayağı, pompa kamları, hidrolik pompa parçası, pompa rotoru, merdaneler, ezme çekicileri, kepçeler, gövdeler, palet çeneleri, aşınma kılavuzları, kaygan kavrama parçaları, dişli çarklar, tekerlek göbekleri,
- 4) **Makine ve teçhizat:** Güç iletim dişlileri, zincir dişli çarklar, dişli çarklar, sondaj dişlileri, yataklar, kamlar, haddeler ve kılavuzlar, krank milleri, kamalar, taşıyıcı hat tutucuları, taşıyıcı zincirleri, taşıyıcı mafsalları, maden aşındırma parçaları, kalıplar, ızgaralar, kompresör, pompa parçaları, tekstil makineleri.
- 5) **Demiryolu parçaları:** Travers plakaları, dingil tutucuları, şok absorplayıcılar, vagon tekerleri, fren sürgüsü, aşınma pabuçları, fren blokları, koruyucu kapaklar, yaylı tutucular, motor parçaları.

5. AŞINMA

5.1 Aşınma Özellikleri

Aşınma denildiğinde ilk akla gelen, katı cisimlerin yüzeylerinden çeşitli etkenler altında sürekli malzeme kayıplarının ortaya çıkmasıdır. DIN 50320 ve ASTM G40–93 standartlarına göre aşınma, “ kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması neticesinde, mekanik etkenler ile yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu istenmeyen yüzey bozulmasının meydana gelmesi” şeklinde tanımlanmaktadır. Katı cisimlerin yüzeylerinin oksitlerle ya da yağlayıcılarla kaplanması durumunda dahi, oksit filminin mekanik yük altında parçalandığı ve yağlayıcının absorpsiyonunun zayıf olduğu yerlerde, yer yer katı-katı teması olmaktadır. Bu temaslar aşınmaya neden olmaktadır (Şen 1997).

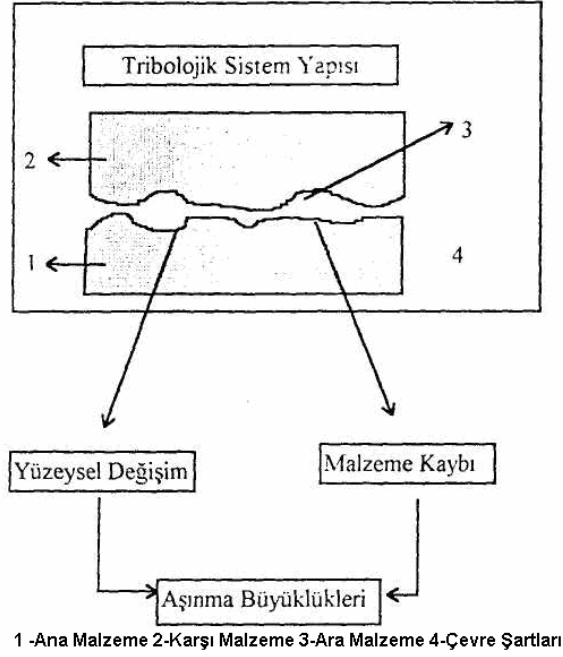
Bir aşınma sisteminde temel unsurlar olarak,

- 1- Ana malzeme (aşınan),
- 2- Karşı malzeme(aşındıran),
- 3- Ara malzeme,
- 4- Yük ve
- 5- Hareketi

saymak mümkündür. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte tribolojik sistem olarak adlandırılmaktadır ve Şekil 5,1’da böyle bir sistemin şematik olarak gösterilişi verilmektedir (Mimaroğlu ve Yılmaz 1997).

5.2 Aşınma Çeşitleri

Çeşitli makina ve teçhizatın kullanımı esnasında kırılma kadar tehlikeli bir problem olmasa bile, aşınma çok büyük ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Sanayileşmiş ülkelerde, aşınma nedeniyle Gayri Safı Milli Hâsıla’nın(GSMH) %7 ’sine eş değer bir harcamanın yapıldığı tahmin edilmektedir (Şen 1997).

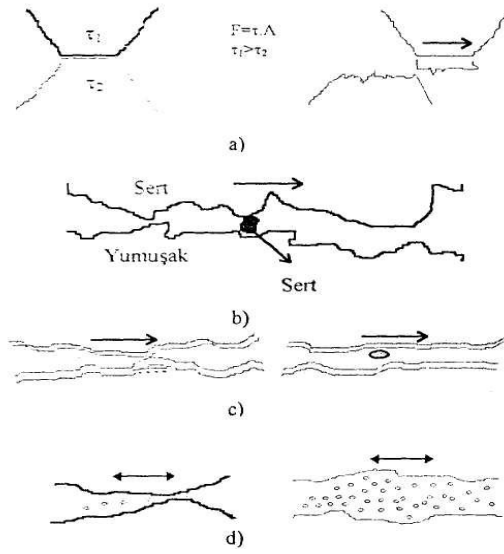


Şekil 5.1 Tribolojik bir sistemin şematik olarak gösterilmesi (Şen 1997).

Aşınma olayının ilk çağlarda dahi bilinen bir mühendislik olayı olduğu ve ilk çağ insanlarının yarış için kullanılan at arabalarının dingillerini domuz yağı ile yağlayıp sürtünmeyi ve dolayısıyla aşınmayı azaltmaya çalıştıkları ifade edilmektedir. Kullanılan alaşım, aşınmanın meydana geldiği ortam şartları ve aşındırıcı ortamın cinsine göre, metaller ve alaşımlarının aşınmasının çok değişik mekanizmalar sonucunda oluştuğu belirtilmektedir. Aşınma mekanizmalarını dört ana grupta toplayabiliriz. Bunlar;

- 1) Adhesiv aşınma,
- 2) Abrasiv aşınma,
- 3) Yorulma aşınması ve
- 4) Kimyasal aşınma

şeklinde olduğunu ifade etmiştir. Şematik olarak aşınma mekanizmaları Şekil 5.2 'de gösterilmektedir. Gerçekte temas eden yüzeylerde birden çok aşınma mekanizmasının etkili olduğu da belirtilmektedir (Şen 1997).



Şekil 5.2 Aşınmanın temel mekanizmaları, (a) Adhesiv aşınma, (b) Abrasiv aşınma, (c) Yorulmalı aşınma ve (d) Kimyasal aşınma (Şen 1997).

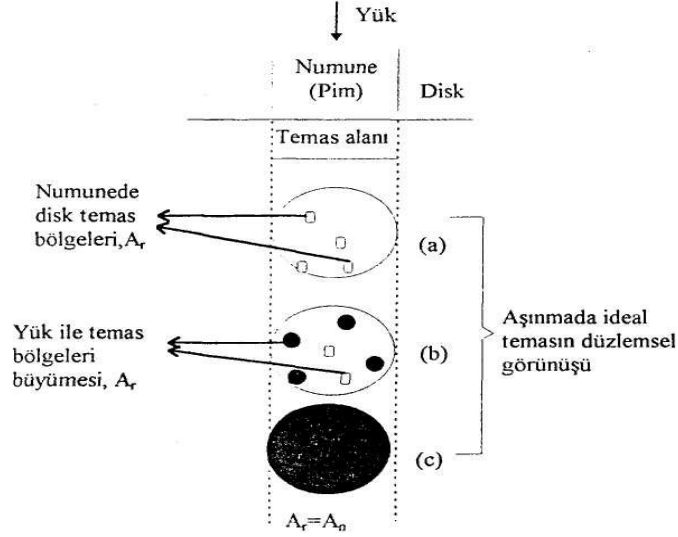
5.2.1 Adhesiv Aşınma

Temas halinde olan iki yüzeyin üzerinde bulunan pürüzlülüklerin bir araya gelmesi durumunda bu pürüzlülükler birbirlerine kuvvetlice bağlanmakta ve kaynaklanmaktadır. (Şekil 5.2a). Yüzeylerin birbirleri üzerinde yatay hareketleri, daha yumuşak olan malzemenin yüzey pürüzlülüklerinde dağılmalara ve malzemenin kalkmasına sebep olmaktadır. Adhesiv aşınmada, koruyucu yüzey filmleri veya yüzeyde bulunan yabancı maddeler, malzeme yüzeyinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Adhesiv aşınma teorisi Jahanmir tarafından şu şekilde kritize edilmektedir;

- Empiriterler ve boşluklar sebebiyle arayüzey ana malzemedan muhtemelen farklıdır ve daha mukavemetlidir,
- Sık sık görülen sert yüzeyin aşınması, aşınma parçaçıklarının oluşması için gerekli olan enerji, gerçekte bu parçaların oluşturulması için gerekli olan enerjinin yaklaşık olarak 2/3'ü kadardır.

Şekil 5.3 'de disk üzerinde pim yöntemi ile yapılan aşınma deneyinde, numunenin ideal bir aşınma davranışı gösterdiği özetlenmektedir. Şekilde gösterildiği gibi, metal yüzeyleri birbirine temas ettirildiğinde gerçek temas alanı A_r , genelde çok küçüktür. Gerçek temas alanlarındaki yüksek bölgesel

basınç, hareketsiz durumda bile yüzeyler arasındaki metalik temas alanlarını bir anlamda dövme ile birleştirmektedir. Temas yüzeyleri arasında hareket meydana geldiği anda gerçek temas alanı A_r , nominal temas alanı A_n 'ye eşit oluncaya kadar büyümeye devam etmektedir. Plastik olarak bölgesel hasarın, büyük miktardaki kütsel akışın ve metalik transfer gibi etkilerin, adhesiv aşınmanın temelini oluşturduğu belirtilmektedir (Şen 1997).



Şekil 5.3 Adhesiv aşınmada yapışma mekanizmasının ideal bir modeli, (a) normal yük altında plastik olarak deforme olan temas alanları, A_r ; (b) normal yükün artması ve sürtünme kuvvetlerinin devreye girmesi ile temas alanlarının büyümesi; (c) gerçek temas alanı A_r 'nın normal temas alanı A_n 'ya ulaşması ile yapışmanın meydana gelmesi(Şen 1997).

5.2.2 Abrasiv Aşınma

Şekil 5.2b 'de görüldüğü, abrasiv aşınma plastik deformasyonla gerçekleşir. Abrasiv aşınma birbirlerine göre sertlik değerleri farklı olan malzemeler arasında yumuşak bir yüzeye çok sert partiküllerin teması ile gerçekleşmektedir. Pürüzlü sert yüzey, yumuşak malzemenin yüzeyine temas ettiği zaman, yumuşak malzemenin yüzeyinde sert malzemenin temas ettiği bölgelerin etrafında plastik akış meydana gelmektedir. Sert yüzey yatay olarak hareket ettiği zaman yumuşak malzemenin yüzeyinin kazınması sonucu derin çizikler oluşmaktadır (Şen 1997).

Abrasiv aşınma, çok hızlı bir şekilde gelişerek çok yüksek aşınma hızına sahip olan ve sistemin hasarına sebep olacak şekilde etkisini anında gösteren bir aşınma türüdür. Abrasiv aşınmanın etkisi, sert partikülün, yumuşak malzemenin yüzeyinden parça kopartarak uzaklaştırmasıyla olur ve bu kopma sırasında yapışma olmaz. Yüzeyden malzeme kaybının çok hızlı geliştiği ve yumuşak malzemenin üzerinde belirgin çizikler şeklinde ortaya çıktığı bir aşınma mekanizmasıdır.

Genel olarak abrasiv aşınma türleri üç ana grupta toplanmaktadır. Bunlar; oymalı sürtünme aşınması, öğütmeli sürtünme aşınması ve erozyondur. Karakteristik açıdan bu aşınma türleri birbirlerine benzemelerine rağmen, tek tek incelendikleri zaman önemli farklılıkların mevcut olduğu görülmektedir.

Oymalı sürtünme aşınması, kütleli bir şekilde yüzeyin deformasyonu sonucunda oluşan bir aşınma türü olup aşırı yüklemeler etkisi ile meydana gelmektedir. Bu tür aşınmaya örnek olarak, ağır koşullar altında çalışan kazıcı, kırıcı gibi maden araçlarında görülen aşınmalar verilebilir.

Öğütmeli sürtünme aşınması, iki yüzeyin birbiri üzerinde hareket etmesi sonucunda ortaya çıkmakta ve arayüzeyde aşınmadan kaynaklanan parçacıklar bulunmaktadır. Bu arayüzeyde yer alan taneler ya bir yüzeyden aşınarak gelir, ya da her iki yüzeyin birlikte aşınması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu aşınmada, keskin köşelere sahip taneler yük uygulanması durumunda malzeme yüzeyini kazıma veya kaldırmak suretiyle, kopararak hasara neden olmaktadır. Örnek olarak bilyalı değirmenler gösterilebilir.

Erozif aşınma ise, sıvı veya hava gibi akışkan bir ortam vasıtasıyla aşındırıcı tozların malzeme yüzeyine etki etmesiyle gerçekleşmektedir. Her bir temas, malzeme yüzeyinden küçük bir parçanın kaybına neden olmaktadır. Normal şartlar altında aşınma hızı düşüktür. Ancak yüksek sıcaklıklarda malzemenin akma dayanımının düşmesi sebebiyle erozif aşınma hız kazanmaktadır. Hatta bazı şartlarda, malzemenin yüzeyinin her tarafını korozyon ürünleri kaplayabilmektedir. Buna erozyonun korozyon etkisi de denilmektedir. Örnek olarak gemi pervaneleri verilebilir (Kayalı 1993).

Bir malzemenin diğ er bir malzeme tarafından önemli ölçüde abrasiv aşınmaya u ratılabilmesi için, ikinci malzemeden çok daha yumuşak olması gerekmektedir. Bu sebeple, abrasiv aşınmayı minumuma indirmek için, aşınmaya uğrayan malzemenin diğ er malzemeye göre çok daha sert olması istenmektedir. Bu  zellik, değişik metodlarla sağlanabilmektedir. Bunlar; a) alaşımlama, b) ısıt ı lem ve c) malzemelerin yüzeylerine dışarıdan müdahale ederek sert yüzey tabakası oluşturmak suretiyle malzemelerin yüzey sertliği artırılabilir. Sert yüzey oluşturmak için, anodizasyon, elektro-kaplama, alev püskürtme, nitrasyon, plazma spre, borlama ve bunun gibi bir çok yöntem kullanılmaktadır. Malzemelere uygulanan çoğu yüzey işlemi, aşınmayı azaltmak veya sınırlandırmak amacıyla yapılmaktadır ( en 1997).

5.2.3 Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, metal yüzeyinin yorulması sonucu ortaya çıkan bir hasardır. Oldukça düşük gerilmeler ve yüksek hız altında yapılan uygulamalarda metal yüzeyinde oyuklara benzer birçok boşluk meydana gelmektedir. Yüzeyin yorulma aşınması normal yorulmaya nazaran bazı farklılıklar içermektedir. Birinci farklılık olarak, yüzey yorulmasının, kütlesel yorulmaya göre yorulma dayanım sınırını göstermemesi söylenbilir. Kazıma, birbiri üzerinde hızla hareket eden iki p r z l  yüzeyin temas ettiği noktalarda, çok küçük boyutlarda meydana gelen bir tür yorulma a ınmasıdır ( en 1997).

5.2.4 Kimyasal Aşınma

Kimyasal a ınmada, birbirine temas eden yüzeyler hava ile reaksiyona girerek, aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğ er tabakaları meydana getirmektedirler. Bununla beraber, kimyasal maddelerin mevcut olduğu ortamlarda kullanılan makina parçalarının yüzeyleri, bu maddelerle reaksiyona girerek ince fakat sert tabakalar oluşturmaktadır. Değişken yük altında bu sert tabakalar kırılmakta ve oluşan sert parçacıklar aşınmaya neden olmaktadır ( ekil 5.2d). Temiz kalan temas yüzeylerinde ise reaksiyon

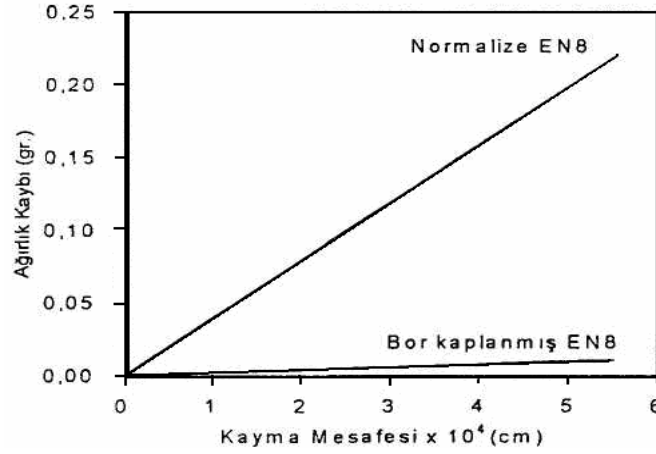
sonucu sürekli sert tabakalar oluşur ve yeniden kırılır. Olay bu şekilde devam eder (Şen 1997).

5.3 Bor Kaplamaların Aşınma Özellikleri

Bor kaplamalar, oldukça sert kaplamalardır ve yüksek aşınma direncine ihtiyaç duyulan yerlerde, yani tribolojik uygulamalarda kullanılmaktadır. Bor kaplamaların temas halinde sürtünme katsayıları genel olarak oldukça yüksektir. Tribolojik uygulamalarda en çok kullanılan bor kaplamalar, demir borür ve titanyum diborür kaplamalardır. Demir borür kaplamalar, çok düşük aşınma ve yüksek sürtünme direncini bir arada bulunduran ilginç tribolojik özelliğe sahip malzemeler olmaları sebebiyle fren sistemlerinde kullanılabilmektedirler (Şen 1997).

Bazı çeliklere yapılan karbürleme, borlama ve gri dökme demirin borlanıp aşınma davranışlarının incelenmesi sonucunda(Şekil 5.4), Normalize edilmiş EN8 malzemesinin 8,5kg yük altında 1800m'lik mesafede yapılan aşınma deneyinde, metalik aşınmanın meydana geldiğini ve borlanmış EN8 malzemenin aşınma miktarı ihmal edilebilir seviyede olduğunu görülmüştür (Eyre 1975).

Aynı zamanda sementle edilmiş, normalize edilmiş ve bor kaplanmış ENİ A çeliğinin aşınma özellikleri Şekil 5.5 'de verilmektedir. Şekilde, normalize ve sementle edilmiş ENİ A çelikleri, yüke bağlı olarak düşük yüklerde hızlı metalik aşınma sergilemesine rağmen, bor kaplanmış çelik hızlı bir aşınma davranışı göstermemektedir.

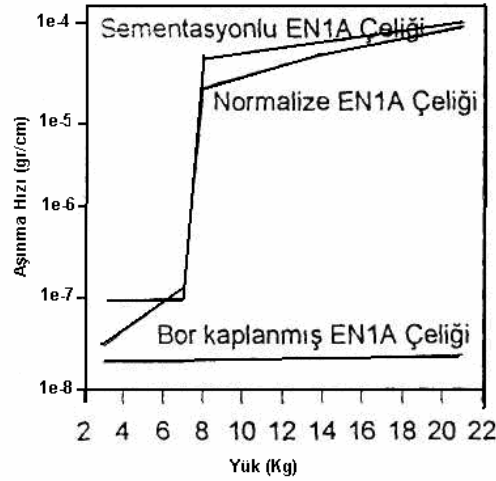


Şekil 5.4 Normalize edilmiş ve borlanmış EN8 çeliğinin 8.5 kg. yük altındaki aşınma davranışı (Eyre 1975).

Eyre yapmış olduğu bu çalışmada, ENİA ve EN8 çeliklerinin bor kaplanması sonucunda aşınma davranışlarının birbirine çok benzediğini (Şekil 5.4 ve 5.5) ve bor kaplanmış gri dökme demirin aşınma davranışının yanında daha dağınık davranıştı ve kısa ömürlü olduğunu belirtmektedir. Fakat borlanmış dökme demirlerin ömürleri borlanmış çeliklere oldukça yakındır (Şen 1997).

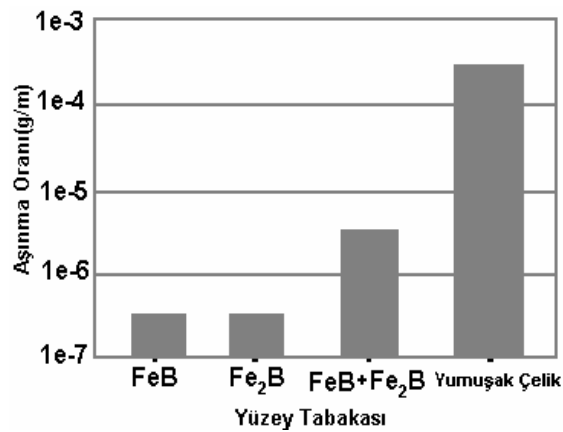
Yapılan çalışmada yüksek sıcaklıklarda borlanmış malzemenin sementasyon ve normalizasyon işlemine tabi tutulmuş malzemeye göre özelliklerini koruduğunu, ayrıca bütün şartlarda adhesiv aşınmaya karşı mükemmel sonuçlar verdiğini belirtmektedir. Aynı şekilde, bor kaplanmış gri dökme demir malzemelerin, sürtünme katsayılarının çeliklere göre daha düşük olarak tesbit edildiğini de söylemektedir (Şen 1997).

Venkataraman ve Sundararajan, 1,15 ve 2,10 MPa gerilme altında yapmış oldukları aşınma deneylerinde borlanmış ve borlanmamış çeliklerin düşük aşınma hızlarında, sürtünme katsayılarının birbirine yakın olduğunu belirtmektedirler. Ancak artan sürtünme hızlarına bağlı olarak sürtünme katsayısı değerlerinde önemli ölçüde azalma görülmektedir. Aşınma hızları açısından ise borlanmış çeliklerin, borlanmamış çeliklere nazaran önemli ölçüde düşük aşınma hızlarına sahip oldukları ve aşınma hızlarının da uygulanan yüke bağlı olduğu tesbit edilmiştir (Venkataraman ve Sundararajan 1995).



Şekil 5.5 Normalize edilmiş, sementasyona tabi tutulmuş ve bor kaplanmış EN1A çeliğinin aşınma davranışı (Şen 1997).

Subrahmanyam ve arkadaşları, homojen olmayan mikroyapılarından dolayı iki fazlı tabakaların aşınma dayanımlarının daha kötü olduklarını ve yine yüzey tabakalarına bağlı olarak aşınma mekanizmalarının farklılıklar gösterdiğini söylemektedir, iki fazlı tabakalarda, transfer partiküllerinin oksitlenmesi ile birlikte adhesiv aşınma, tek fazlı FeB borür tabakasında ve alt tabakalarda, hem oksidasyonlu aşınma hemde abrasiv aşınmanın olduğunu, tek fazlı Fe₂B tabakasında ise yalnızca oksidasyonlu yorulma aşınmasının gözlemlenmiştir (Subrahmanyam ve Gopinath 1984). Şekil 5.6 'da borür tabakasının içerdiği faz dağılımlarına göre aşınma davranışı gösterilmektedir.



Şekil 5.6 Yumuşak çelik yüzeylerine ve farklı borür fazı içeren yüzey tabakalarına ait aşınma oranları ($P_v = 39 \text{ MPa.m/sn.}$) (Subramanyam ve Gopinath 1984).

5.4 ÖKGDD'in Aşınma Özellikleri

ÖKGDD malzemelerin aşınma davranışı tamamen mikro yapısına ve dolayısıyla mekanik özelliklere bağlı olarak değişim göstermektedir. Mikro yapıda bulunan östenit ve martensit aşınma davranışını etkileyen en önemli fazlardır (Yalçın 1997).

Yalçın tarafından yapılan çalışmada, farklı sıcaklıklarda östempelenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma özellikleri sıradan döküm malzemeleri ile kıyaslanmıştır. Çalışmada aşınma deneyi için Pin-on-disk deney düzeneği kullanılmıştır. Ayrıca farklı yük koşulları altında numunelerde meydana gelen ağırlık kaybı tespit edilmiştir. Tablo 4.3 'de küresel grafitli dökme demirler ile ÖKGDD malzemelerin aşınma sonucundaki ağırlık kaybı değerleri verilmiştir. Deneyde kullanılan küresel grafitli dökme demirler öncelikle 900 °C'de 120 dakika östenitleme işlemine tabi tutulduktan sonra 250 °C, 300 °C ve 350 °C sıcaklıklarında da 60 dakika östempereleme işlemine tabi tutulmuştur (Yalçın 1997).

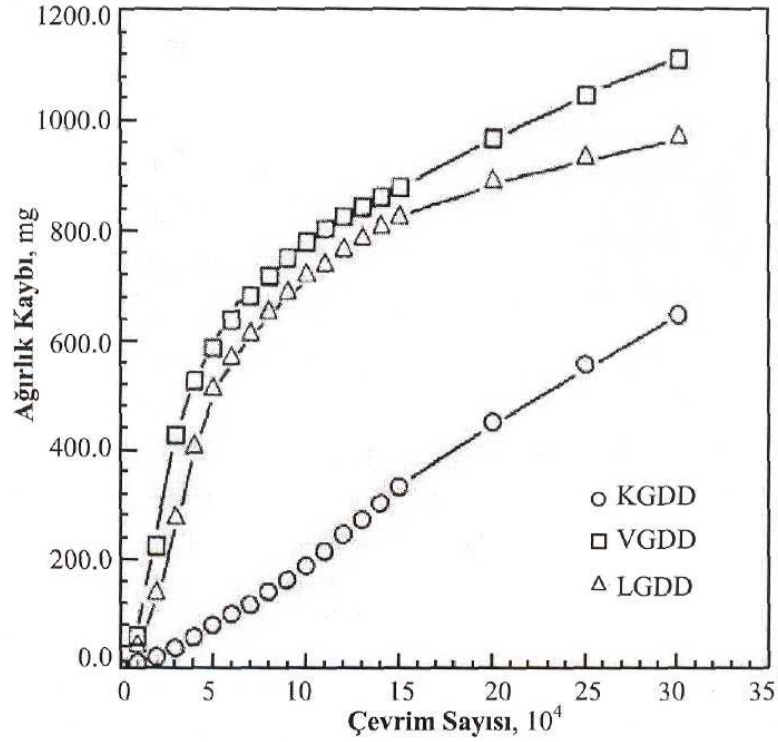
Tablo 5.1 Döküm ve farklı sıcaklıkta östempelenmiş malzemelerin farklı yükler altında ağırlık kaybı değerleri (Yalçın 1997).

Uygulanan Yük, N	Ağırlık Kaybı, mg				
	Ferritlenmiş	Döküm	ÖKGDD		
			T _Y :900°C, t _Y :120 dak, t _A :60 dak		
			250°C	300°C	350°C
10	73	26	8.4	4.3	7
20	144	96	11.5	6	14
40	466	344	14.6	6.7	37
80	845	586	27.2	92	86.5

Tablo 5.1 incelendiğinde, östempereleme ısı işleminin KGDD malzemelerin aşınma direncini nasıl etkilediği görülebilir. Özellikle östempereleme sıcaklığı 300 °C için 10,20 ve 40 N luk yük uygulamalarında meydana gelen aşınma oranı en az değerdedir. Uygulanan yükün artması ile birlikte meydana gelen ağırlık kaybı da artmaktadır. Fakat bu artış diğerlerine nazaran ÖKGDD malzemedede oldukça azdır

(Yalçın 1997). Hatate vd. tarafından yapılan bir çalışmada ise grafit şeklinin aşınma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneylerde lamel, vermicular ve küresel grafitli dökme demirler kullanılmıştır. Deneylerde kuru ve yağlı şartlar altında yuvarlanmalı-kayma teması neticesinde disk yüzeylerindeki aşınma miktarı analiz edilmiştir (Hatate vd. 2001).

Şekil 5.7 'de verilen grafiğe göre grafit şekli malzemenin aşınma davranışını önemli derecede etkilemektedir. KGDD malzemelerde ağırlık kaybı ile yük çevrim sayısı arasında oransal bir ilişki varken vermicular ve lamel grafitli dökme demir için deneyin ilk aşamalarında KGDD malzemelere nazaran büyük bir aşınma söz konusu (Aslantaş 2003).



Şekil 5.7 Yuvarlanmalı-kayma teması sonucu ağırlık kaybı ile yük çevrim sayısı arasındaki ilişki (Aslantaş 2003).

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

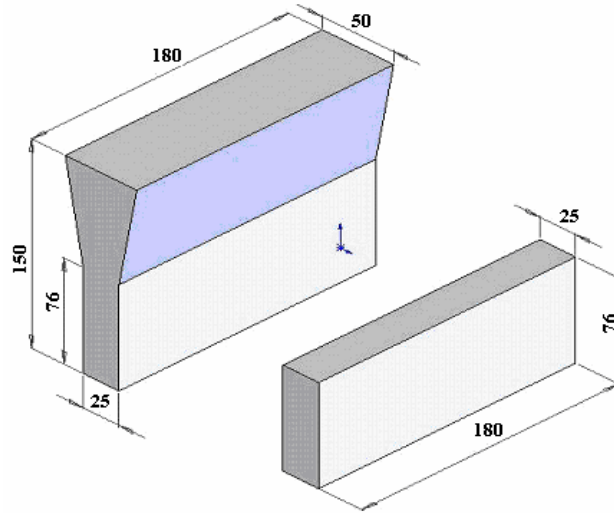
6.1 Deneysel Malzeme ve Numuneler

6.1.1 Deneysel Malzemeler

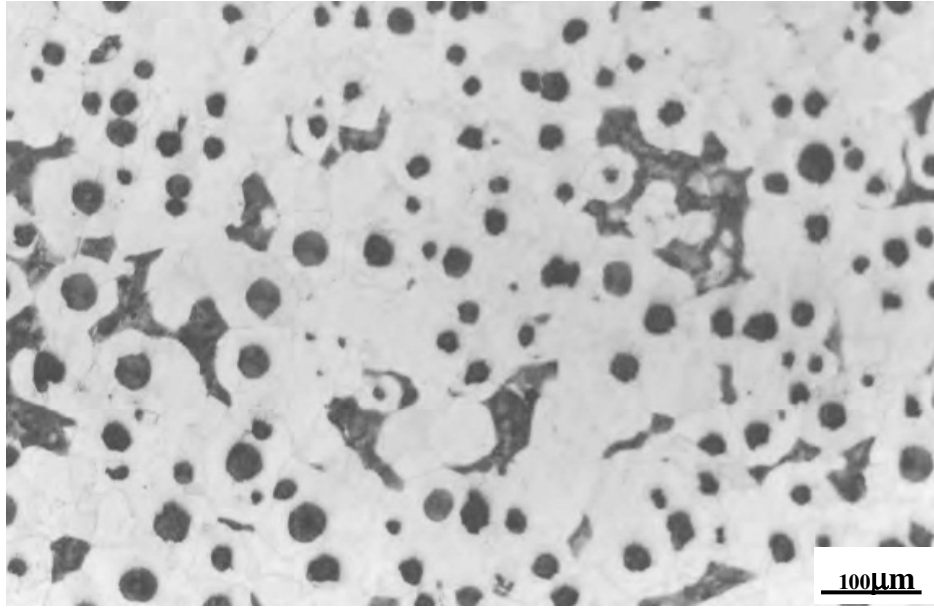
Deneysel malzemelerde kullanılan Alaşımsız Küresel Grafitli Dökme Demir malzemeler, DÖKTAŞ A.Ş tarafından GGG 40 kalitesinde Y-Blok şeklinde üretilmiştir. Döküm malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 6.1 'de verilmektedir. Ayrıca döküm malzemesinin mekanik özellikleri Tablo 6.2 'de ve mikroyapı fotoğrafı Şekil 6.2 'de verilmiştir.

Tablo 6.1 Döküm malzemesinin kimyasal bileşimi

%C	%Si	%S	%Mo	%Cr	%Cu	%Sn	%Mn	%Ti	%Mg	%P
3.840	2.273	0.010	0.001	0.021	0.044	0.005	0.141	0.020	0.039	0.048



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



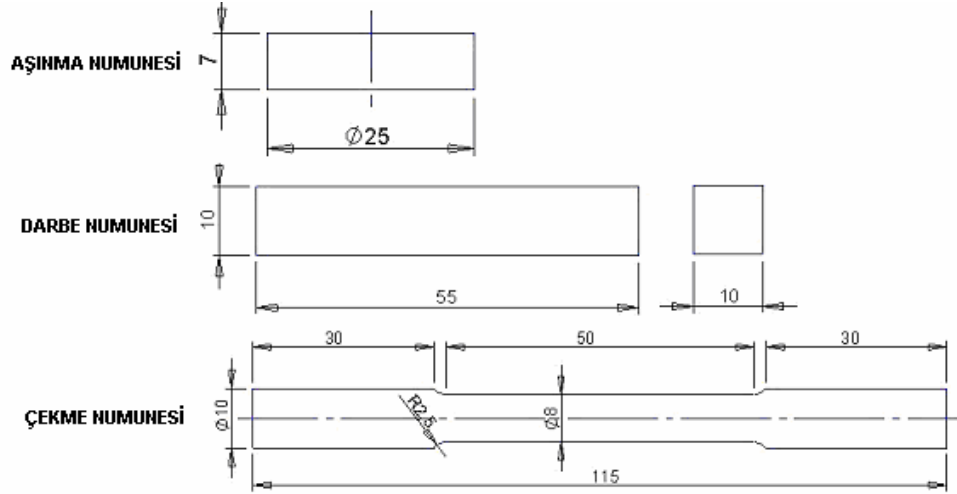
Şekil 6.2 Alaşımsız KGDD’in döküm haliyle mikroyapısı.

Tablo 6.2 Döküm malzemesinin mekanik özellikleri

Çekme Mukavemeti (MPa)	425,5
Akma Mukavemeti (MPa)	244,3
% Uzama	19,7
Sertlik, HB	140
Darbe Direnci, Joule	112

6.1.2 Deney Numuneleri

Deneylerde kullanılan darbe, çekme ve aşınma numuneleri Şekil 6.3 'de verilmiştir. Darbe numuneleri ASTM A 327–72, çekme numuneleri ASTM E8–01 standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır. Aşınma numuneleri ise 25 mm çapında ve 7 mm kalınlığında diskler şeklinde işlenmiştir.



Şekil 6.3 Mekanik deneylerde kullanılan numunelerin şekil ve boyutları[mm].

6.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar ve Yöntem

6.2.1 Borlama ve Östemperleme Fırını

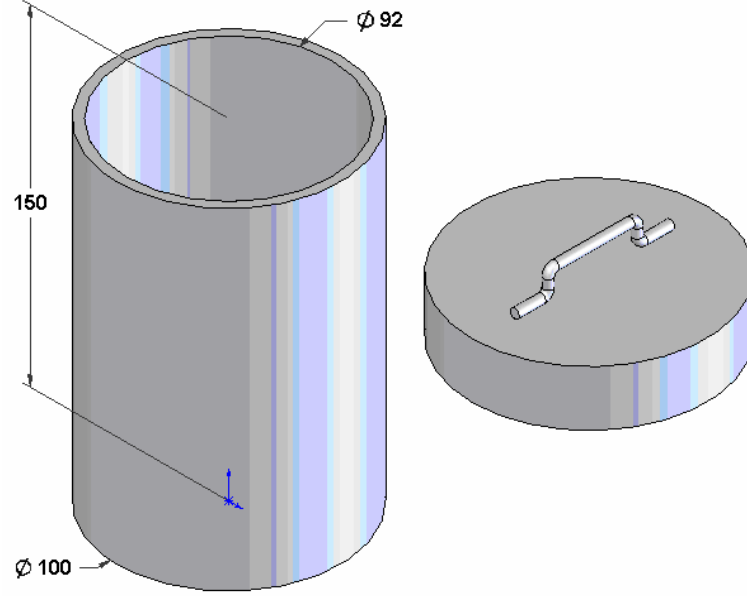
Borlama işleminde tel resistanslı kuyu fırını kullanılmıştır. Fırın atmosferik şartlara açık olup, fırının hassasiyeti $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Östemperleme işleminde ise PID kontrollü kuyu fırın kullanılmıştır. Östemperleme fırınının hassasiyeti $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Tuz banyosu %50 NaNO_3 + %50 KNO_3 tuzlarının karışımından oluşmaktadır.



Şekil 6.4 Borlama ve Östemperleme işlemlerinde kullanılan fırınlar.

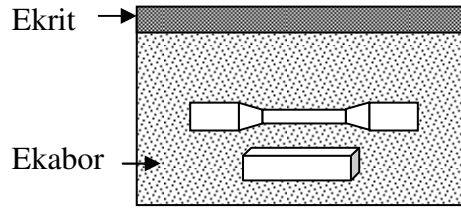
6.2.2 Borlama potası

Borlama işleminde, şekil ve boyutları Şekil 6.5 'de verilen paslanmaz çelikten yapılan potalar kullanılmıştır.



Şekil 6.5 Borlama deneylerinde kullanılan AISI 316 paslanmaz çelik potanın geometrik şekli ve boyutları.

6.2.3 Borlama işlemi



Şekil 6.6 Borlama işleminin yapılış yönteminin şematik gösterimi.

Deney numuneleri paslanmaz çelik kutu içerisinde Ticari Ekabor®-2 tozuna gömüldükten sonra, üste 10 mm kadar Ekrit serilmiş ve kutu bir kapakla kapatılmıştır. Paslanmaz çelik pota fırının içine yerleştirilip, 900 °C'de 1, 3 ve 5 olmak üzere üç farklı bekletme süresinde borlama işlemi yapılmıştır.

6.2.4 Bortemperleme işlemi

Bölüm 6.2.3 'de anlatıldığı şekilde borlama işleminden sonra numuneler hızlı bir şekilde borlama fırınından alınarak paslanmaz çelik potadan çıkarılmış ve 300, 350 ve 450 °C'deki tuz banyosu içine atılmıştır. Tuz banyosunda 60 dakika bekletildikten sonra fırın dışına alınan numuneler oda sıcaklığına soğutulmuş ve bol suyla yıkanıp kurutulmuştur.

6.2.5 Darbe Deneyi

Darbe deneyleri 300 joule kapasiteli PSd 300/150-1 Charpy cihazında (Şekil 6.7) oda sıcaklığında yapılmıştır. Her bir deney şartı için en az üç numune kullanılmıştır.



Şekil 6.7 Charpy deneyinde kullanılan cihazın şekli.

6.2.6 Çekme Deneyi

Çekme deneyleri 10 ton kapasiteli Instron 8801 marka çekme cihazında yapılmıştır (Şekil 6.8). Çekme deneylerinde her bir şart için en az üç çekme numunesi kullanılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Deneyler oda sıcaklığında 2 mm/dak. çekme hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.8 Instron çekme cihazı.

6.2.7 Sertlik Deneyi

Sertlik ölçümlerinde Shimadzu HMV-2 mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Darbe deneyinden elde edilen numuneler üzerinden her bir şart için en az 10 ölçüm alınmıştır. Mikrosertlik ölçümleri 50 gr. yük altında yüzeyden matrise doğru gerçekleştirilmiştir.

6.2.8 Aşınma Deneyi

Bu çalışmada, bortemperlenen küresel grafitli dökme demir numuneler bilye-disk aşınma yöntemine tabi tutulmuştur. Numuneler oda sıcaklığında, 10 N yük altında ve 0,3 m/s kayma hızında 1000 m aşındırılmıştır. Aşındırıcı olarak 4,6 mm çapında WC-Co bilye kullanılmıştır. Deneylerin yapıldığı aşınma cihazı Şekil 6.9 'de verilmiştir. Aşınma hızı, Perthometer M2 marka pürüzlülük cihazından elde edilen aşınma izleri kullanılarak aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$\text{Aşınma hızı} = \frac{\text{Aşınan hacim miktarı}}{\text{Uygulanan yük} \times \text{Kayma mesafesi}}, \text{ mm}^3/\text{Nm}$$

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



Şekil 6.9 Aşınma deney sisteminin görünümü.

6.2.9 Metalografi Çalışmaları

Kırılan darbe test numunelerinden alınan parçaların kesitleri metalografik incelemeler için kullanılmıştır. Numuneler, sırasıyla 240, 320, 400, 600, 800, 1000 no 'lu zımparalama kademesinden geçirildikten sonra, 3 μm 'lik elmas pasta ile parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Parlatılan yüzeyler %2'lik nitalele dağlanarak mikroyapıları ortaya çıkarılmıştır. Mikroyapılar, Olympus BX-60 marka optik mikroskop ile incelenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir. Tabaka kalınlıkları ise yine aynı optik mikroskoba takılı optik mikrometre yardımıyla ölçülmüştür. Tabaka kalınlığı, metalografi numunesinin dört yüzünden yapılan en az on ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

6.2.10 X-Işını Difraksiyon Analizi

X-ışını çalışmaları bortemperleme ile yüzeyde oluşan kaplama tabakasının karakterizasyonu için yapılmıştır. Numunelerin X-ışını difraksiyon analizleri Cu K_{α} ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılan Shimadzu XRD-6000 marka X-ışını Difraktometresi ile gerçekleştirilmiştir.

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

7.1 Giriş

Bu bölümde, Tablo 6.1’de bileşimi verilen, GGG–40 kalitesindeki alaşımsız küresel grafitli dökme demir (KGDD) malzemenin bortemperleme ısı işlemi neticesinde elde edilen mikroyapı, mekanik özellikler ve aşınma deney sonuçları verilmiş ve irdelenmiştir.

7.2 Metalografik İnceleme

Metalografik olarak hazırlanan bortemperlenmiş numunelerin seçilmiş optik mikroyapı fotoğrafları Şekil 7.1-Şekil 7.3’de verilmiştir. Bortemperlenmiş bütün numunelerde borür tabakası, kaplama-matris arayüzeyi ve matris açık bir şekilde ortaya çıkmıştır. Yüzeyde oluşan bor tabakası dişsel bir morfolojiye sahiptir ve tabaka/matris arayüzeyi oldukça düz görünmektedir.

Bortemperlenen numunelerin mikroyapıları incelendiğinde izotermal dönüşüm sıcaklığına bağlı olarak matriks yapısının değiştiği görülmektedir. Klasik östemperleme işlemi ile elde edilen mikroyapılar bortemperlenen malzemelerin matris yapısında da elde edilmektedir. Düşük dönüşüm sıcaklığında (300 °C), borür tabakasının altında ferrit iğnelerinin büyüme hızının yüksek, karbon difüzyon hızının nispeten düşük olmasından dolayı ince iğnesel ferrit, az miktarda kalıntı östenit ve çok ince karbürlerden oluşan alt beynit matris oluşmaktadır (Şekil 7.1a).

350 °C’de ise üst beynit oluşumuyla sonuçlanan farklı bir dönüşüm mekanizması mevcuttur. Karbon difüzyonu daha hızlıdır ve böylece karbonun çoğu beynitik ferrit plakalarının dışına yayınabilir. Neticede üst beynit yapısı, nispeten kaba, tüylü, karbürsüz ferrit plakaları ve yüksek miktarda kalıntı östenitin bir karışımından oluşmaktadır (Şekil 7.1b).

Daha yüksek sıcaklıklarda (450 °C) izotermal dönüşüm sıcaklığına soğutma sırasında TTT diyagramında perlit burnunun kesilmesi perlitik bir yapının

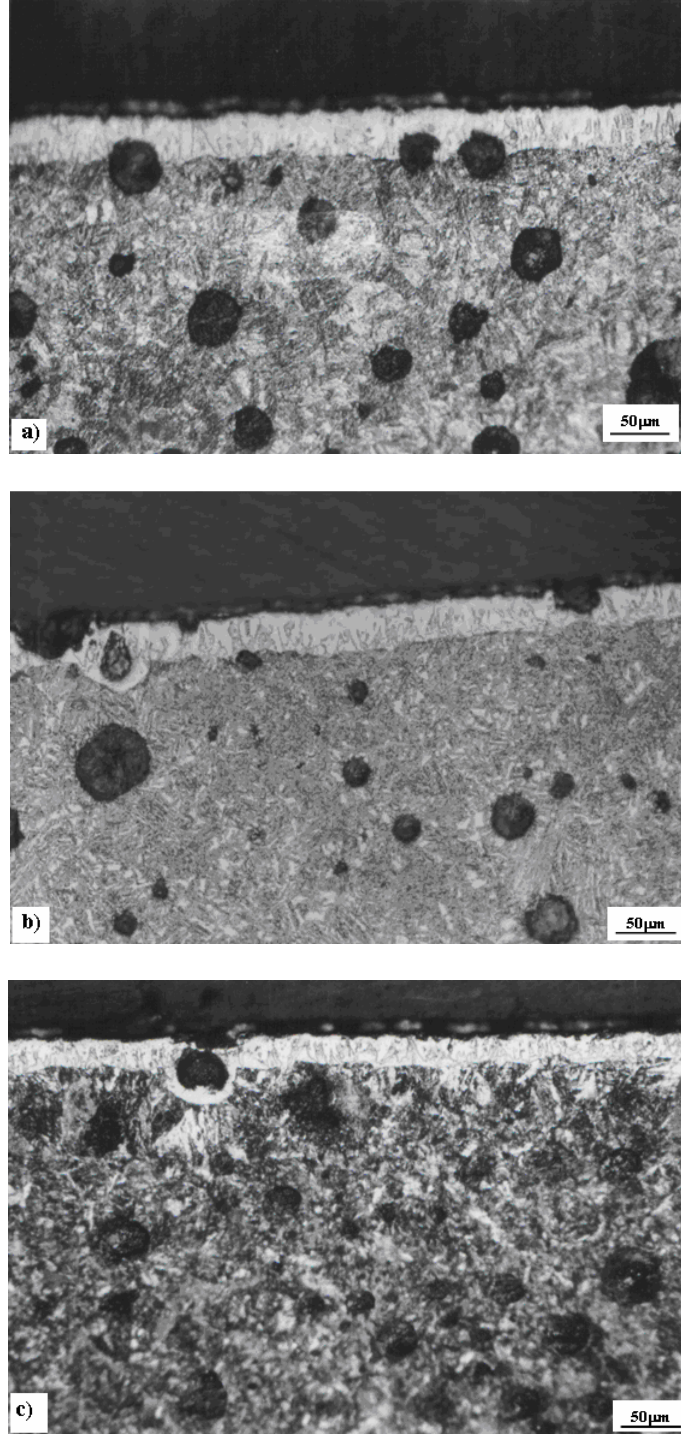
oluşumuna neden olduğu düşünülmektedir. Yani beynitik dönüşüm için yeterince itici güç sağlanamamaktadır.

Borlama süresinin artması hem borür tabakasının kalınlığını hem de matris yapısını etkilemektedir. Artan borlama süresi ile üst beynitik yapının daha düşük temperleme sıcaklığında elde edildiği görülmüştür. 1 ve 3 saat borlanan numunelerde 350 °C’de üst beynit elde edilmişken (Şekil 7.1b ve 7.2b) 5 saatlik borlama süresi için 300 °C’de elde edilmiştir (Şekil 7.3a). Böyle bir davranışın nedeni borür tabaka kalınlığının artması olabilir.

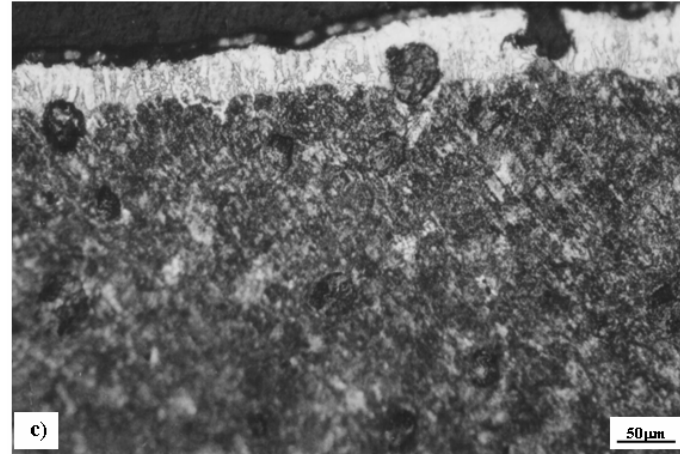
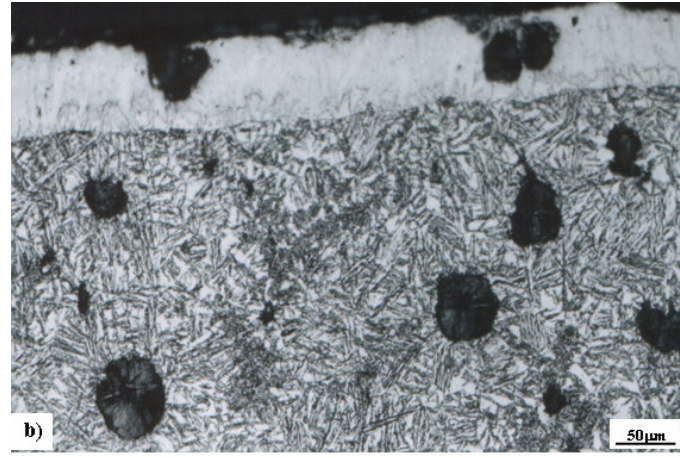
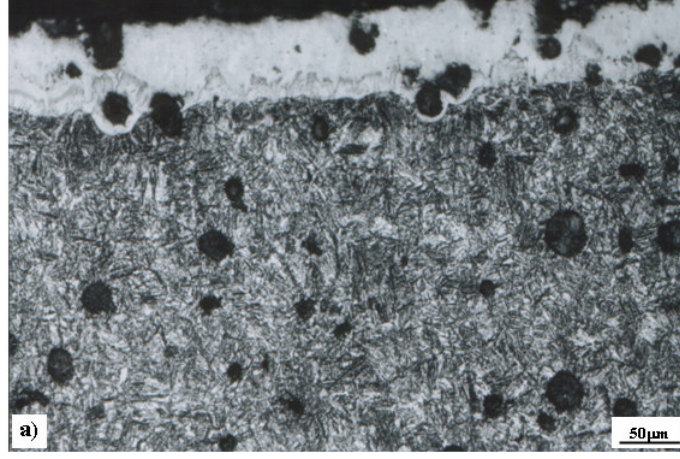
Aynı temperleme sıcaklığında farklı borlama süreleri dikkate alındığında, artan borlama süresiyle borür tabaka kalınlığının arttığı görülmektedir. Bortemperlenen KGDD ’lerin bortemperleme şartlarına bağlı olarak yüzeyinde oluşan ortalama borür tabaka kalınlığı değerleri Tablo 7.1 ’de, grafik olarak gösterimi ise Şekil 7.4 ’de verilmiştir. Tablodan da görülebileceği gibi 1, 3 ve 5 saatlik borlama süreleri için borür tabaka kalınlıkları sırasıyla 34 ± 4 , 54 ± 5 ve 67 ± 5 μm olarak ölçülmüştür. Dikkat çeken bir nokta ise borür tabaka kalınlığının temperleme sıcaklığı ile de değişmesidir. 1 ve 3 saatlik borlama süreleri için artan temperleme sıcaklığı ile borür tabaka kalınlığı azalma göstermiştir. Borlama süresinin 5 saat olması durumunda ise temperleme sıcaklığının tabaka kalınlığını çok fazla etkilemediği söylenebilir.

Artan borlama süresiyle borür tabaka kalınlığının artması beklenen bir durumdur ve elde edilen sonuçlar literatürle (Şen 1997) uyum göstermektedir. Borlama işlemi yayınmaya dayalı termo-kimyasal bir olay olduğundan borlama süresinin artmasıyla borür tabaka kalınlığı artmaktadır. Artan borlama süresiyle üst beynit yapısının daha düşük temperleme sıcaklığında elde edilmesinin kalın borür tabakasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Çünkü borür tabakasının ısı iletme kapasitesinin düşük olmasından dolayı matrisin östemperlenebilirliğini azaltması mümkündür. Bir başka ifadeyle artan tabaka kalınlığı ile beynit oluşum sıcaklığının düştüğü ve dolayısıyla klasik östemperleme işleminde genellikle 330 °C ’nin üzerinde elde edilen üst beynit yapısı 300 °C ’de elde edilebilmiştir.

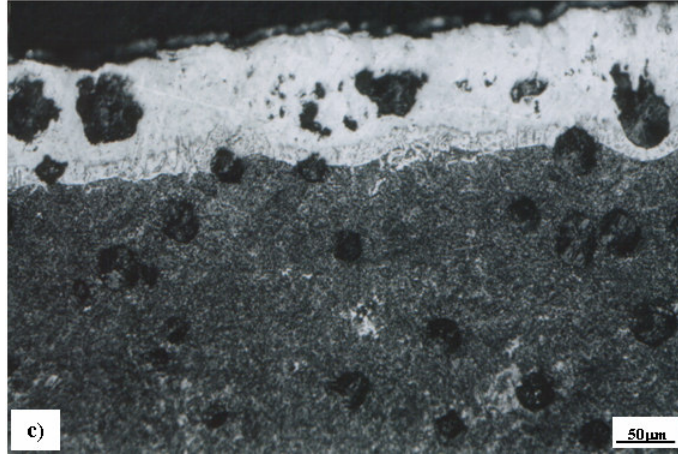
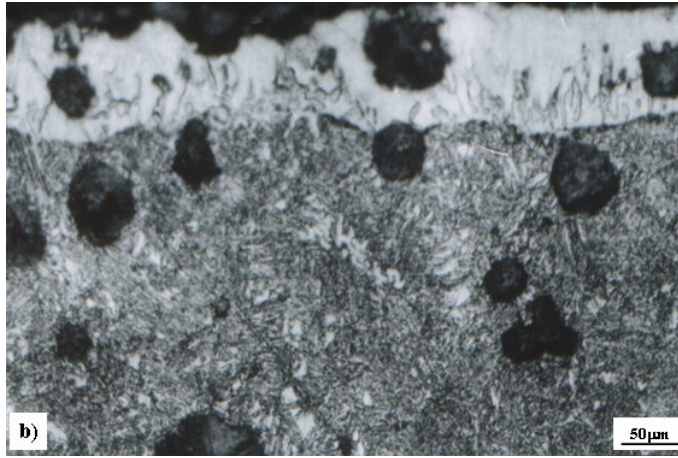
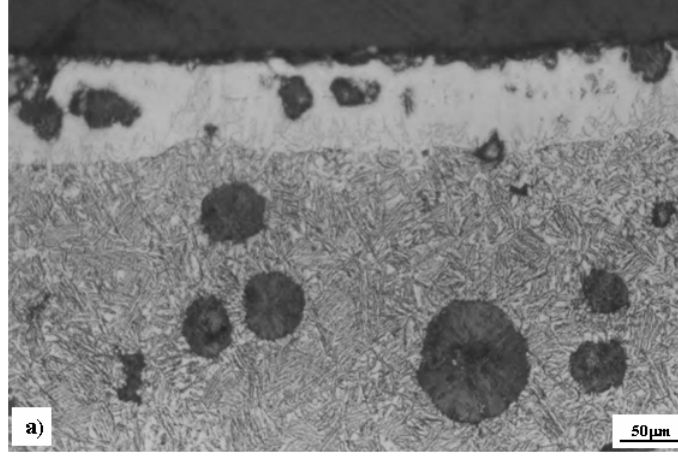
Benzer bir yaklaşımla perlit oluşum sıcaklığının da düştüğü Şekil 7.2c ile Şekil 7.3b 'ün karşılaştırılmasıyla görülebilmektedir. Perlitik bir matris yapısı 3 saatlik borlamada 450 °C'de temperleme ile elde edilirken (Şekil 7.2c), 5 saatlik borlamada 350 °C'de elde edilmektedir (Şekil 7.3b).



Şekil 7.1 900 °C'de 1 saat süre ile borlanıp, a) 300 °C, b) 350 °C ve c) 450 °C 'de bortemperlenmiş numunenin optik mikroyapı fotoğrafları.



Şekil 7.2 900 °C’de 3 saat süre ile borlanıp, a) 300 °C, b) 350 °C ve c) 450 °C ’de bortemperlenmiş numunenin optik mikroyapı fotoğrafları.

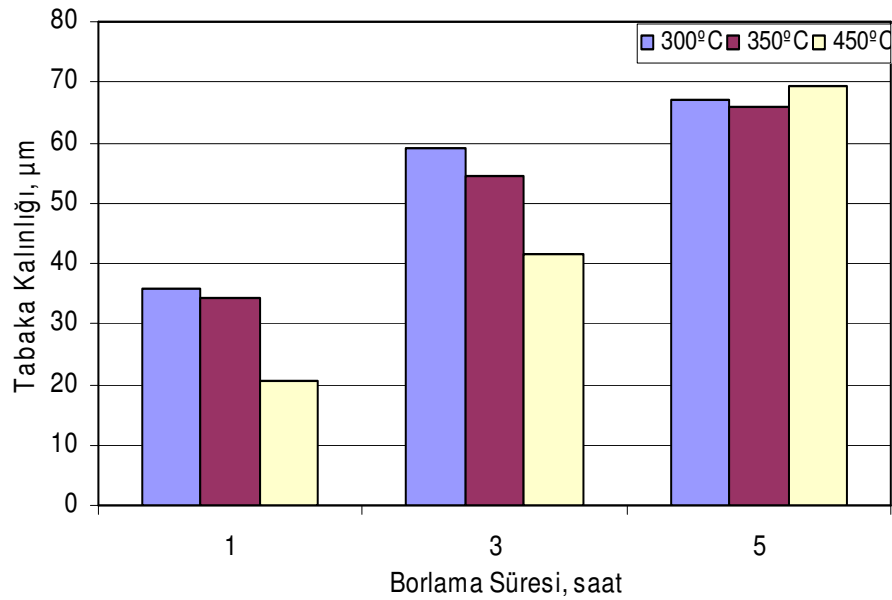


Şekil 7.3 900 °C’de 5 saat süre ile borlanıp, a) 300 °C, b) 350 °C ve c) 450 °C ’de bortemperlenmiş numunenin optik mikroyapı fotoğrafları.

Tablo 7.1 ve Şekil 7.4 dikkatlice incelenirse, minimum ve maksimum borür tabaka kalınlığının 450 °C’de temperleme ile elde edildiği görülmektedir. Bu verilerden, çok yüksek temperleme sıcaklığında borlama süresinin tabaka kalınlığına etkisinin daha fazla olduğu söylenebilir.

Tablo 7.1 Borlama süresi ve temperleme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.

Temperleme Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Tabaka kalınlığı (µm)
300	1	36±3
	3	59± 6
	5	67±5
350	1	34±4
	3	54±5
	5	66±5
450	1	21±4
	3	42±5
	5	69±6



Şekil 7.4 Borlama süresinin ve temperleme sıcaklığının tabaka kalınlığına etkisi.

7.3 X-Işını Difraksiyon Analizi

Kaplama tabakasında oluşan fazları tesbit etmek için x-ışını difraksiyon analiz yöntemi kullanılmıştır. Farklı bortemperleme şartlarındaki numunelerin yüzeyinden alınan x-ışını difraksiyon paternleri Şekil 7.5–7.7 'de, tabakalarda bulunan FeB ve Fe₂B fazlarının difraksiyon açıları ise Tablo 7.2 'de topluca verilmiştir.

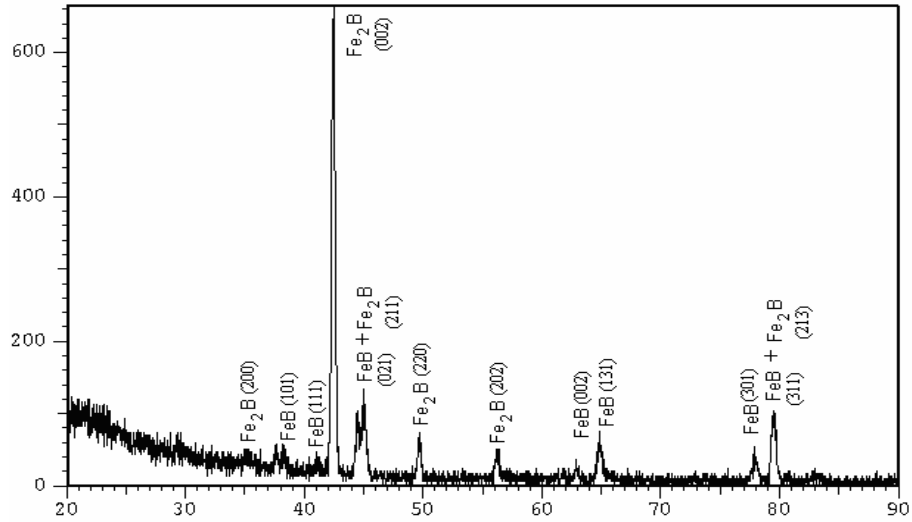
Bortemperleme ısı işlem koşulları tabaka bileşimini etkilemektedir. 1 saat borlanıp 300 °C'de temperlenen numuneden alınan XRD grafiğine bakıldığında (Şekil 7.5) FeB piklerinin şiddetlerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Buna karşılık 3 saat borlanan numunelerde örneğin $2\theta = 37,702$ 'de görülen (101) FeB piki, yine $2\theta = 63,030$ 'da görülen (002) FeB şiddetleri yüksektir. Ayrıca, aynı borlama süresinde FeB piklerinin şiddetlerinin artan temperleme sıcaklığı ile düşmesi dikkat çekmektedir. 5 saatlik borlama süresinde ise en düşük FeB pik şiddetleri 350 °C'de temperlenen numunelerde elde edilmiştir (Şekil 7.7b).

Tüm bu veriler göz önünde bulundurulduğunda, kısa borlama sürelerinde az miktarda FeB ve çoğunlukla Fe₂B 'den oluşan iki fazlı bir tabakanın oluştuğu söylenebilir. Bununla birlikte özellikle 3 saatlik borlama süresinde artan temperleme sıcaklığı ile FeB fazının azaldığı görülmektedir. 5 saatlik borlama süresinde ise en düşük FeB fazı 350 °C'de elde edilmiştir. Buradan muhtemelen uzun borlama sürelerinde artan temperleme sıcaklığı ile FeB fazının belli bir sıcaklığa kadar azaldığı ve daha sonra tekrar artış gösterdiği sonucuna varılabilir. Bortemperleme şartlarına bağlı olarak oluşan FeB ve Fe₂B faz miktarlarının malzemenin mekanik özelliklerine de etki ettiği ileriki başlıklarda belirtilecektir.

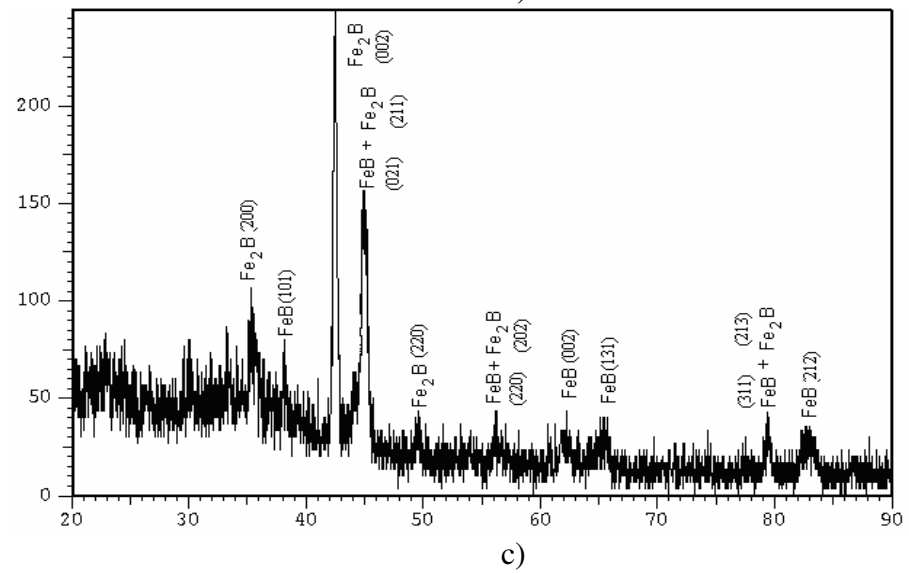
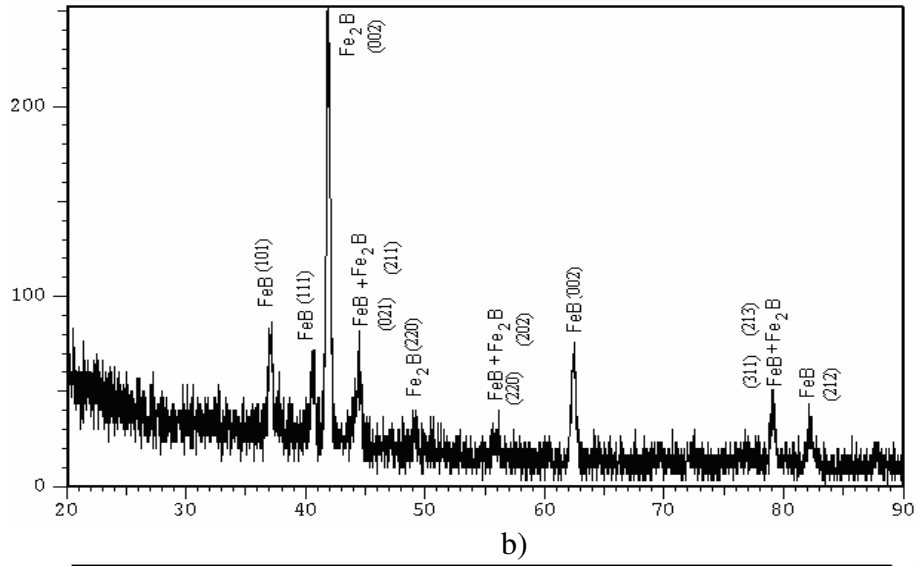
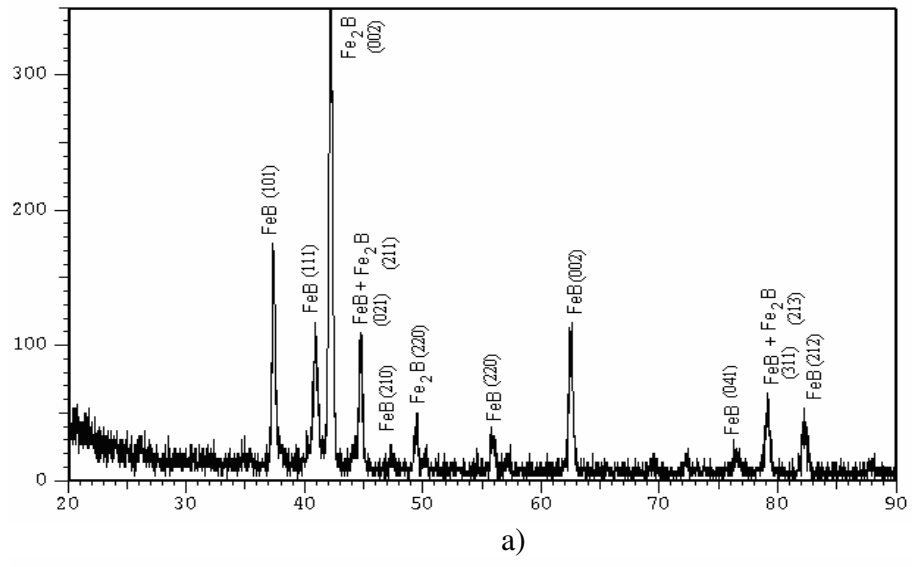
Tablo 7.2 Farklı bortemperleme şartlarında numune yüzeyinde elde edilen FeB ve Fe₂B fazlarının difraksiyon açıları. (+) işareti verilen açıda fazın varlığı, (-) işareti fazın olmadığını göstermektedir.

Bileşik	2θ	130BDI	330BDI	335BDI	345BDI	530BDI	535BDI	545BDI
FeB	37,702	+	+	+	+	+	+	+
	41,209	+	+	+	-	+	-	+
	45,029	+	+	+	+	+	+	+
	47,719	-	+	-	-	-	-	-
	56,270	-	+	+	+	+	+	+
	63,030	+	+	+	+	+	+	+
	63,969	+	-	-	+	-	+	-
	76,327	-	+	-	-	-	-	-
	77,570	+	-	-	-	-	-	+
	79,875	+	+	+	+	+	+	+
	82,755	-	+	+	+	+	-	+
Fe ₂ B	27,333	-	-	+	-	-	-	-
	35,171	+	-	-	+	-	+	+
	42,506	+	+	+	+	+	+	+
	45,107	+	+	+	+	+	+	+
	50,590	+	+	+	+	+	+	+
	56,399	+	-	+	+	+	+	+
	79,763	+	+	+	+	+	+	+

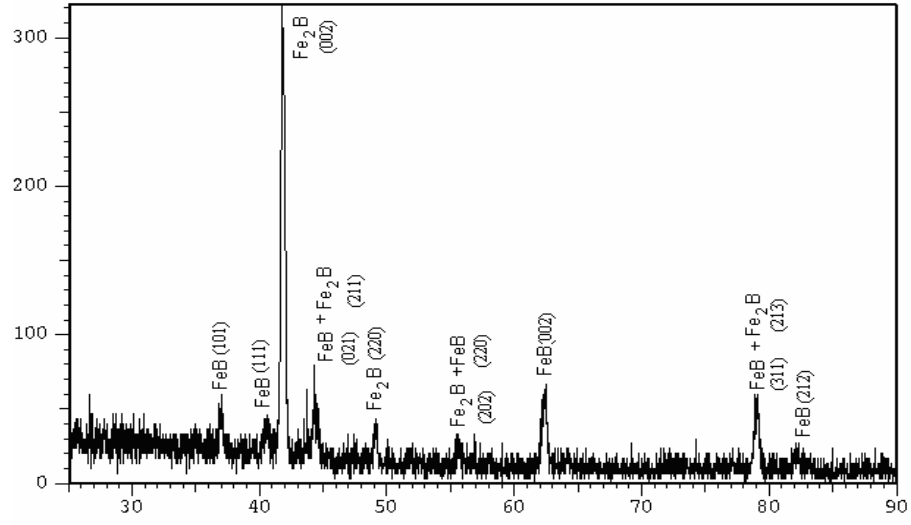
130BDI: Sembollerdeki ilk rakam borlama süresini, sonraki iki rakam ise temperleme sıcaklığını göstermektedir.



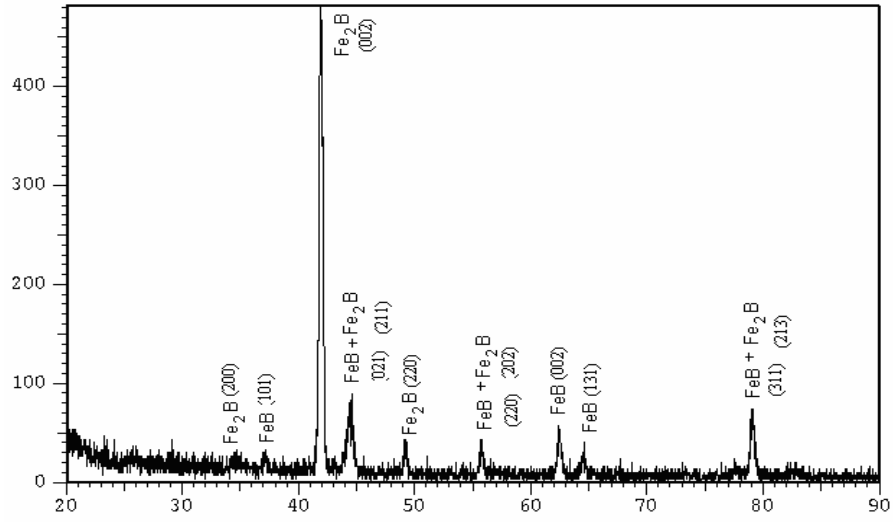
Şekil 7.5 900 °C’de 1 saat borlanıp, 300 °C’de bortemperlenmiş numunenin x-ışını difraksiyon paterni.



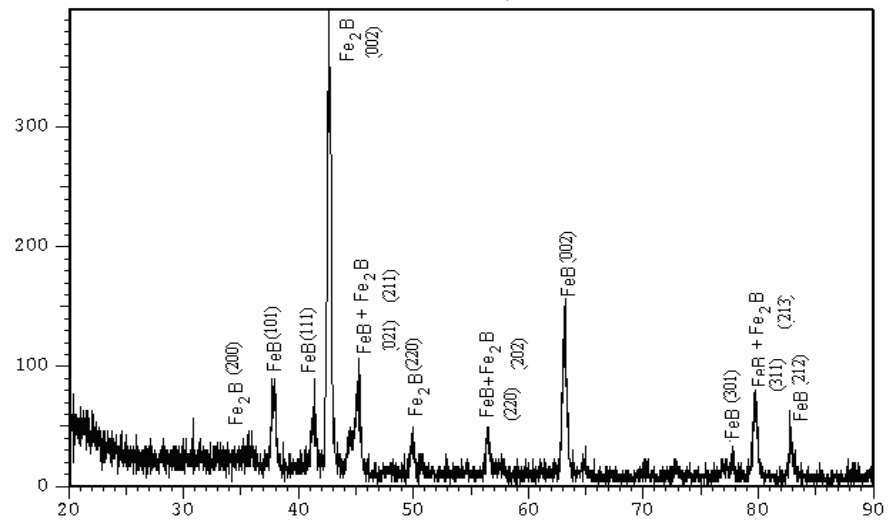
Şekil 7.6 900 °C’da 3 saat borlanıp a) 300 °C, b) 350 °C ve c) 450 °C ’de bortemperlenmiş numunenin x-ışını difraksiyon paterni.



a)



b)



c)

Şekil 7.7 900 °C’da 5 saat borlanıp a) 300 °C, b) 350 °C ve c) 450 °C ’de bortemperlenmiş numunenin x-ışını difraksiyon paterni.

7.4 Mikrosertlik

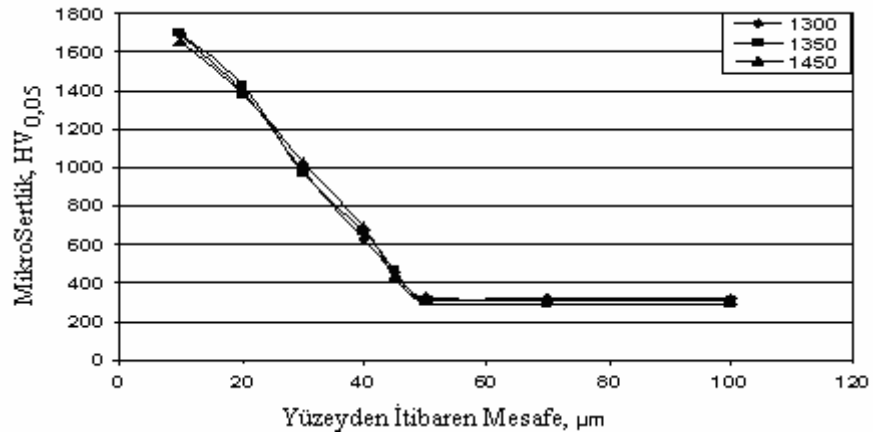
Bortemperleme şartlarına bağı olarak numunelerin yüzeyinde oluşan borür tabakalarının sertlik dağılımları Tablo 7.3 'de, grafik olarak gösterimleri ise Şekil 7.8 'de verilmiştir.

Grafiklerden görülebileceği gibi tüm bortemperlenen numunelerde yüzeyden matrise doğru sertlik azalmakta, belli bir derinlikten sonra ise hemen hemen sabit kalmaktadır. Bu beklenen bir davranıştır, çünkü yüzeyde oluşan borür tabakası yüksek sertliğe sahiptir. Belli bir derinlikten sonra sertliğin değişmemesi ise matrise ulaşıldığını göstermektedir. Yüzey sertlikleri açısından değerlendirildiğinde bortemperleme şartlarına bağı olarak sertliğin 1654 ile 1762 HV_{0,05} arasında değiştiği görülmektedir. Yüksek sertlikler genellikle 3 saatlik borlama sürelerinde elde edilmiştir. Temperleme sıcaklığının yüzey sertliğine çok önemli bir etkisinin olmadığı söylenebilir.

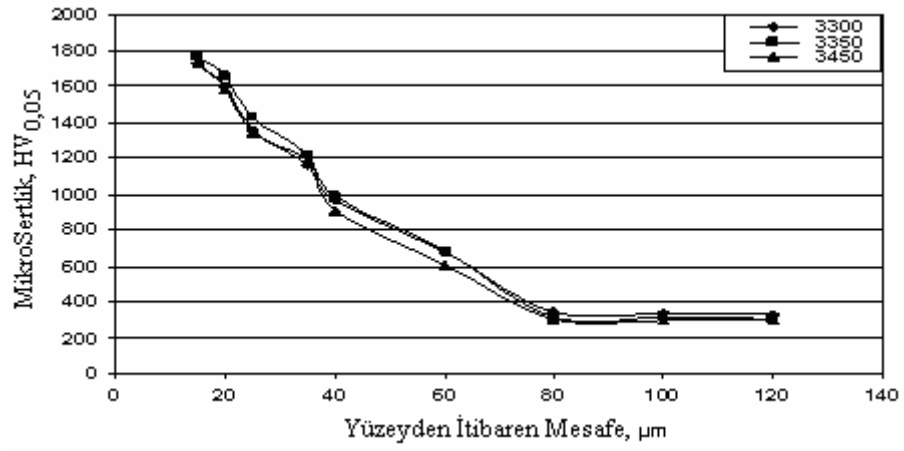
Yüzeyin 100 µm altında matris sertliği dikkate alındığında hem borlama süresinin hem de temperleme sıcaklığının sertliği çok fazla olmasa da etkilediği anlaşılmaktadır. En yüksek matris sertliğine 300 °C'de temperleme ile ulaşılmıştır. Ayrıca aynı temperleme sıcaklığında 3 saat borlanan numunede 1 ve 5 saat borlanan numunelere göre daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. 450 °C 'de temperlenen numunelerin 350 °C 'de temperlenen numunelerle hemen hemen aynı (hatta biraz yüksek) sertlik değerlerine sahip olması dikkat çekmektedir. Çünkü bilindiği gibi artan temperleme sıcaklığı ile sertliğin azaldığı bilinmektedir. Burada, temperleme sırasında artan sıcaklıkla kırılmalık reaksiyonunun daha kısa sürelerde başlaması söz konusu olabilmektedir. Dolayısıyla matriste ideal beynitik yapıda bulunan yüksek karbonlu östenitin, ferrit ve sert karbürlere ayrışması mümkündür. Bu da üst beynit yapısına sahip numuneye göre daha yüksek sertliğe neden olmaktadır.

Tablo 7.3 Bortemperleme şartlarına bağı olarak numunelerin yüzeyinden itibaren sertlik dağılımları.

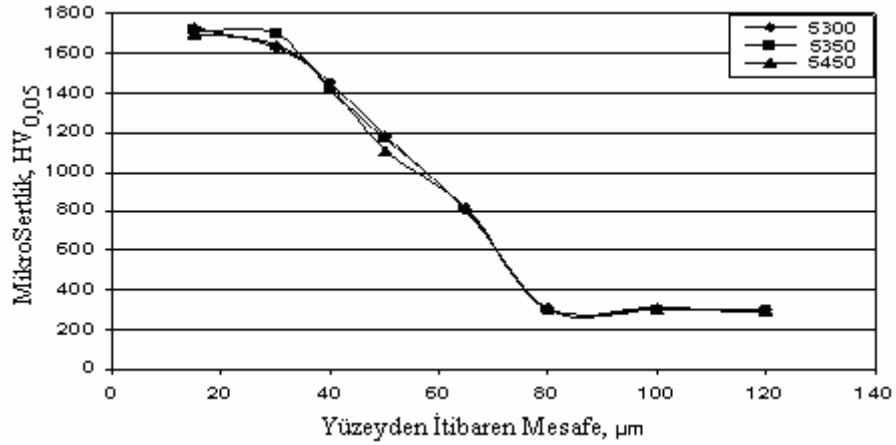
Yüzeyde İtibaren Mesafe (µm)	Sertlik(HV _{0,05})								
	300 °C			350 °C			450 °C		
	1	3	5	1	3	5	1	3	5
	Saat			Saat			Saat		
10	1694			1700			1654		
15		1724	1727		1762	1713		1730	1702
20	1395	1601		1427	1654		1388	1584	
25		1357			1430			1344	
30	987		1632	969		1697	1032		1644
35	630	1162		671	1215		694	1187	
40		963	1456		989	1410		910	1436
45	457			468			436		
50	325		1180	300		1167	315		1103
60		676			684			605	
65			803			812			821
70	320			296			312		
80		343	311		317	300		305	304
100	318	338	308	295	312	299	310	298	298
120		326	302		308	297		299	296



a)



b)



c)

Şekil 7.8 Yüzeyden matrise sertlik dağılımı a) 1 saat borlanmış, b) 3 saat borlanmış ve c) 5 saat borlanmış.

7.5 Mekanik Özellikleri

Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen mekanik özellikler toplu olarak Tablo 7.4 'de verilmiştir. Bortemperleme şartlarıyla çekme mukavemeti, %0,2 akma mukavemeti ve % uzamadaki değişim Şekil 7.9 'da darbe enerjisindeki değişim ise Şekil 7.10 'da grafik olarak gösterilmiştir.

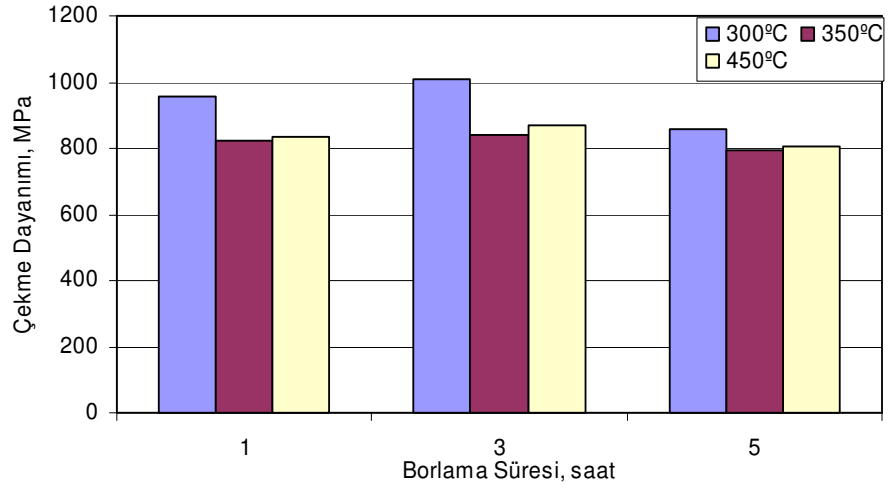
Şekil 7.9 incelendiğinde bortemperleme şartlarının çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve % uzamayı etkilediği görülmektedir. Her üç borlama süresinde en yüksek çekme mukavemeti 300 °C'de temperleme ile elde edilmiştir. Buna karşılık 350 °C'de çekme mukavemetleri daha düşük çıkmıştır. Elde edilen değerlere bakılacak olursa minimum çekme mukavemeti 795 MPa, maksimum ise 1007 MPa'dır. Bu veriler östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir standartlarına (ASTM A897M-90, 1990) göre en düşük sınıfın özelliklerine yakın değerlerdir. Bu da matrisin östemperlendiğini, yani beynitik yapının elde edildiğini göstermektedir. Ancak klasik östemperleme işleminde üst beynit genellikle 330 °C'nin üzerindeki östemperleme sıcaklıklarında elde edilmektedir. Optimum mekanik özellikler de 350-375 °C'lerde östemperleme ile sağlanmaktadır. Bu çalışmada maksimum çekme mukavemeti 3 saat borlanıp 300 °C'de 1 saat temperlenen numunede elde edilmiştir. Yüksek temperleme sıcaklıklarında (350 ve 450 °C) borlama süresinin etkisi çok sınırlı iken düşük temperleme sıcaklığında (300 °C) daha fazladır.

Tablo 7.4 Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen mekanik özellikler.

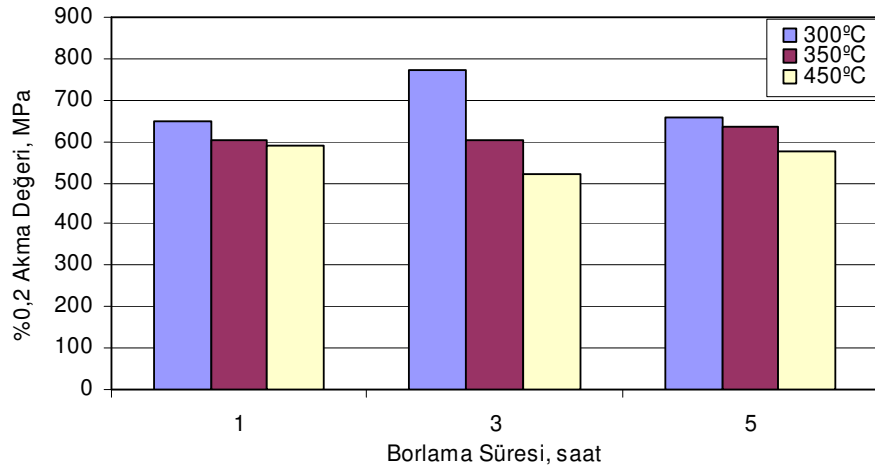
Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Temperleme Sıcaklığı (°C)	Temperleme Süresi (saat)	Çekme Mukavemeti (MPa)	% 0,2 Akma Mukavemeti (MPa)	%Uzama	Darbe Enerjisi (Joule)
Satıldığı Durumda Mekanik Özellikleri				425,5	244,3	19,7	112
900	1	300	1	954	649	11,3	111
		350	1	825	601	5,9	46,6
		450	1	832	577	6,5	45,9
	3	300	1	1007	772	8,1	81,4
		350	1	838	604	6,1	48,6
		450	1	868	635	5,4	38,4
	5	300	1	857	590	10,4	86,4
		350	1	795	622	5,9	10,7
		450	1	806	577	4,8	8,6

%0,2 akma mukavemeti değerleri incelendiğinde yine en yüksek mukavemetin 3 saat borlama ve 300 °C’de temperleme ile elde edildiği görülmektedir. Buna karşılık, farklı olarak tüm borlama sürelerinde artan temperleme sıcaklığı ile akma mukavemeti azalmaktadır. 1 ve 5 saatlik borlama süreleri için temperleme sıcaklığının akma mukavemetine etkisi az iken 3 saatlik borlama süresinde daha belirgindir.

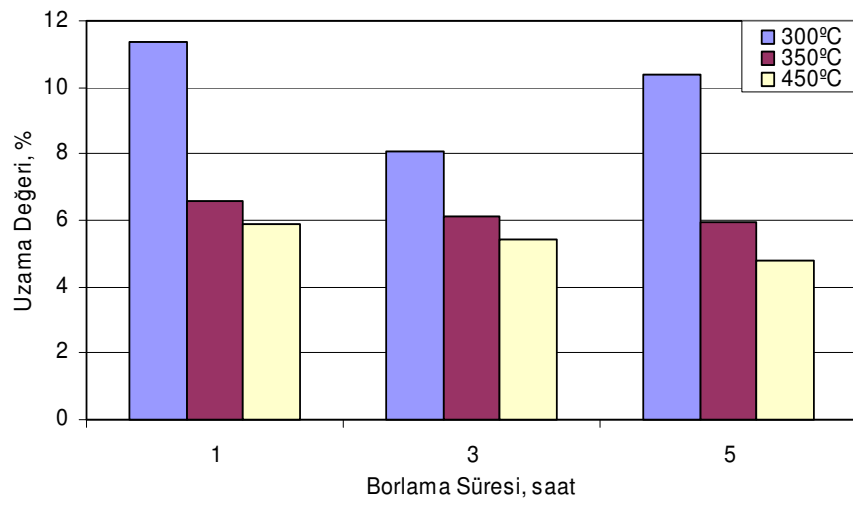
En iyi uzama değerleri de 300 °C’de temperleme ile elde edilmiştir. 1 saat borlanıp söz konusu sıcaklıkta temperlenen numunede % 11 ’in üzerinde uzamaya ulaşılmıştır. Tüm borlama sürelerinde artan temperleme sıcaklığı ile % uzamada düşüş görülmüştür. 5 saat borlanıp 300 °C’de temperlenen numunenin yüksek sünekliliğe sahip olması ise dikkat çekmektedir.



a)



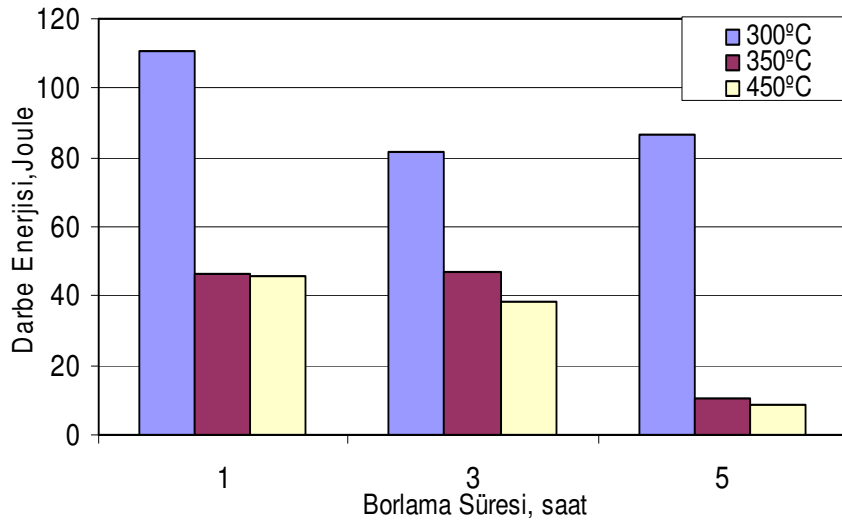
b)



c)

Şekil 7.9 Bortemperleme şartlarına bağlı olarak çekme mukavemeti, %0,2 akma mukavemeti ve % uzamadaki değişim grafiği.

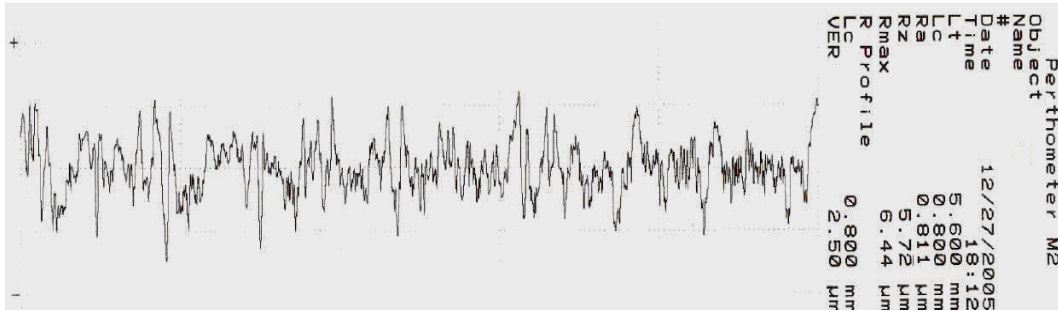
Şekil 7.10 incelendiğinde, 300 °C’de temperleme ile yüksek darbe enerjilerinin elde edildiği görülmektedir. 1 saatlik borlama ile klasik östemperleme ile bile zor ulaşılabilen bir darbe enerjisi elde edilmiştir. 350 ve 450 °C’de temperlemede borlama süresinin darbe enerjisine çok fazla bir etkisinin olmadığı söylenebilir. Borlama süresinin 3 saatten fazla olması, yüksek temperleme sıcaklıklarında (350 ve 450 °C) darbe enerjisinde oldukça fazla düşüşe neden olmaktadır. Buna rağmen 5 saatlik borlama süresi 300 °C’de oldukça yüksek darbe enerjisi (86,4 J) kazandırmaktadır.



Şekil 7.10 Bortemperleme şartlarının darbe enerjisine etkisi.

7.6 Aşınma Özellikleri

Bortemperleme işlemi uygulanacak aşınma numuneleri metalografik olarak hazırlanarak, yüzey pürüzlülükleri Perthometer M2 marka yüzey pürüzlülüğü cihazında ölçülmüştür (Şekil 7.11). Ölçümler sonucunda max. yüzey pürüzlülük değeri 0,311 μm olarak tespit edilmiştir. Bortemperleme işlemi uygulanan numunelerin aşınma deneyi öncesi Ra değerleri Tablo 7.5’de verilmiştir. Bölüm 6.2.8’de anlatıldığı şekilde aşınma deneyleri bilye-disk yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerleri Tablo 7.6 ’da gösterilmiştir. Ayrıca bazı numunelerin aşınma süresine bağlı olarak sürtünme katsayılarının değişimi Şekil 7.12–7.14’de verilmektedir. Bortemperleme şartlarının sürtünme katsayısı ve aşınma hızına etkisi Şekil 7.15 ’de sunulmuştur.



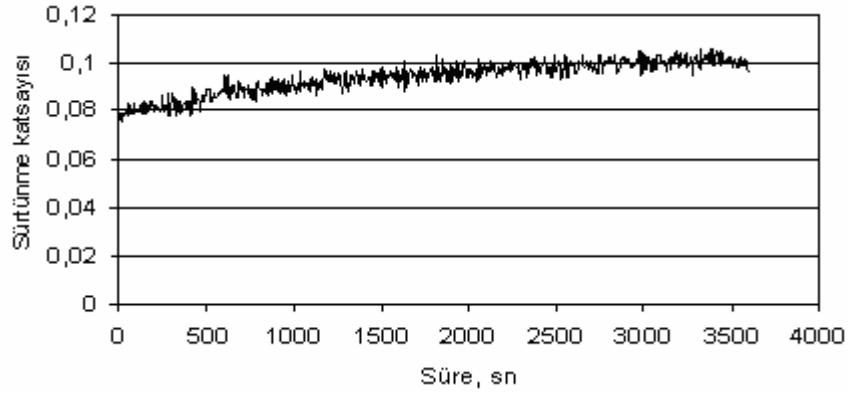
Şekil 7.11 900 °C ’de 1 saat süre borlanıp, 300 °C ’de bortemperlenen numunenin aşınma deneyi uygulamadan önce ölçülen yüzey pürüzlülük eğrisi.

Tablo 7.5 Aşınma deneyine tabii tutulan numunelerin aşınma deneyi öncesi yüzey pürüzlülük değerleri.

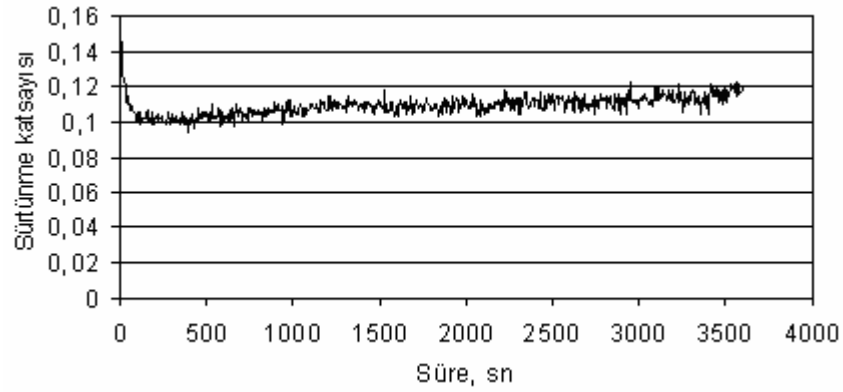
Borlama Süresi (Saat)	Yüzey Pürüzlülüğü Ra(μm)		
	300°C	350 °C	450 °C
1	0,800	1,030	2,714
3	1,078	1,771	1,764
5	1,466	1,234	1,711

Tablo 7.6 Sürtünme katsayısı ve aşınma hızı sonuçları.

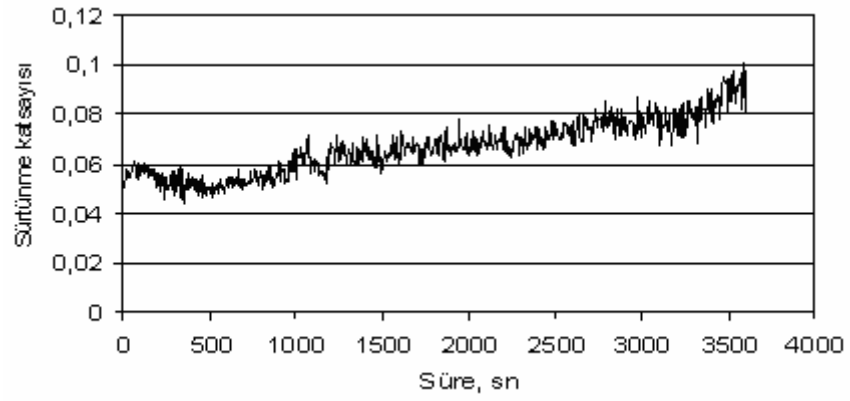
Sürtünme Katsayısı			Borlama Süresi (Saat)	Aşınma Hızı(mm ³ /Nm)x10 ⁻⁸		
10N				10N		
300°C	350 °C	450 °C		300°C	350 °C	450 °C
0,071	0,099	0,121	1	0,8349	2,2191	10,2856
0,081	0,109	0,123	3	2,6861	3,1447	14,413
0,07	0,067	0,118	5	4,4942	6,0273	12,7531
0,15			İşlemsiz	11,5304		



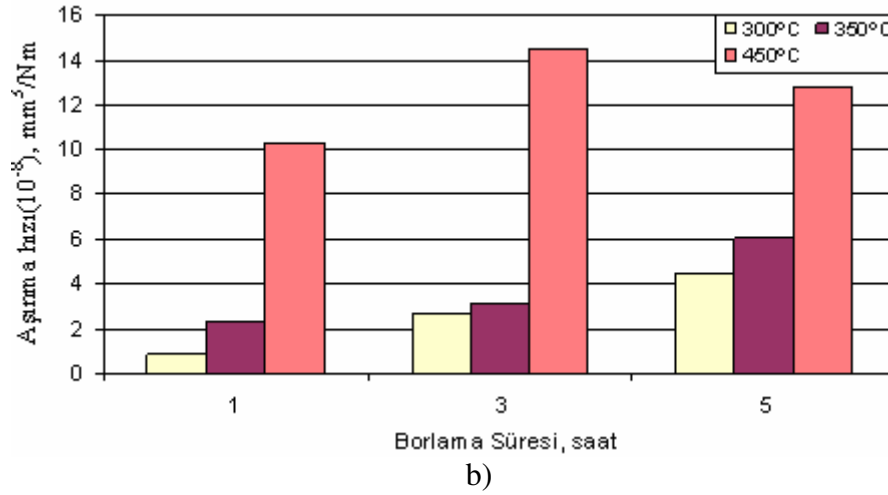
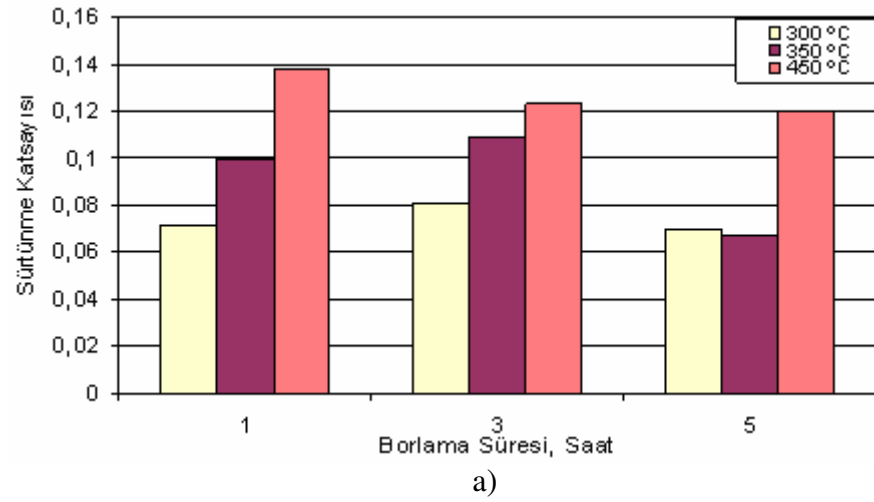
Şekil 7.12 900 °C 'de 1 saat süre borlanıp, 300 °C 'de borteperlenen numunenin 10 N yük altında aşınma süresine bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi.



Şekil 7.13 900 °C 'de 3 saat süre borlanıp, 300 °C 'de borteperlenen numunenin 10 N yük altında aşınma süresine bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi.



Şekil 7.14 900 °C’de 5 saat süre borlanıp, 450 °C’de bortemperlenen numunenin 10N yük altında aşınma süresine bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi.



Şekil 7.15 Bortemperleme şartlarının a) sürtünme katsayısına, b) aşınma hızına etkisi.

Şekil 7.15 incelendiğinde, sürtünme katsayısı ve aşınma hızınının temperleme sıcaklığı ile değişimi benzer bir davranış göstermektedir. Artan temperleme sıcaklığı ile hem sürtünme katsayısı hem aşınma hızı artmaktadır. Ancak, 450 °C 'de temperleme, aşınma hızında çok keskin bir artışa neden olmaktadır. Aşınma hızının en yüksek olduğu bortemperleme şartı, 3 saatlik borlamadan sonra 450 °C 'de temperleme olarak görülmektedir.

Borlama süresinin etkisine bakılacak olursa 300 ve 350 °C'de temperleme durumunda artan borlama süresiyle sürtünme katsayısı önce artmakta daha sonra ise azalma göstermektedir. Buna karşılık, 450 °C'de sürtünme katsayısı artan borlama süresi ile sürekli azalmaktadır.

Aşınma hızının borlama süresi ile değişiminde yine 300 ve 350 °C'de temperleme, benzer bir davranış göstererek artan süre ile aşınma hızı sürekli artmaktadır. 450 °C'de ise aşınma hızı belli bir borlama süresine kadar artmakta daha sonra azalmaktadır.

Bortemperleme işlemine tabi tutulmayan işlemsiz KGDD 'in sürtünme katsayısı ve aşınma hızı sırasıyla 0,15 ve $11,53 \times 10^{-8}$ olarak ölçülmüştür. Bortemperlenen numunelerde ölçülen sürtünme katsayısı değerleri 0,067 ile 0,123 arasında değişmektedir. Buradan da görülebileceği gibi bortemperleme işlemi sürtünme katsayısını azaltmaktadır.

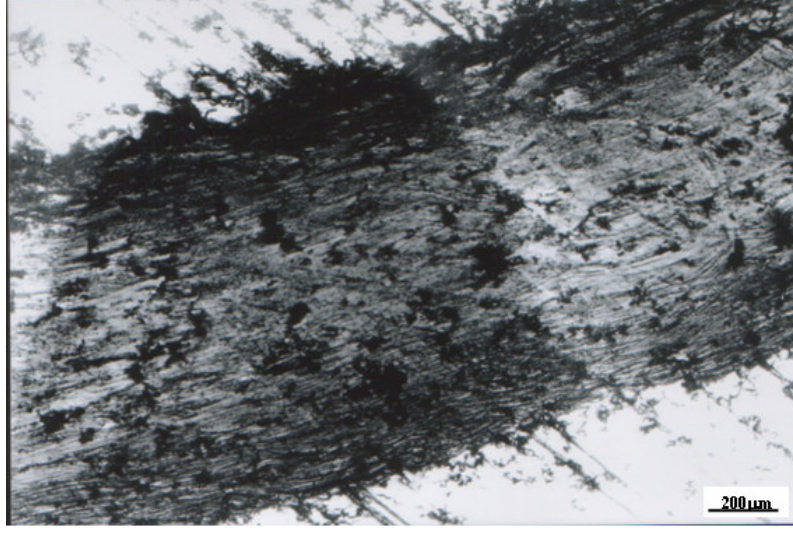
Yapılan bir çalışmada (Şen 1997) 850 ve 900 °C'de 4 farklı süre için sıvı borlama yapılmış KGDD malzemelerin WC-Co bilyeye karşı 10 N yük altında aşındırılması ile 0,13–0,20 arasında değişen sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. Görüldüğü gibi bortemperleme, sadece borlanan numunelere göre daha düşük sürtünme katsayıları sağlamaktadır. Şen aynı çalışmada artan borlama süresi ile aşınma hızının arttığı sonucuna ulaşmıştır. Bizim çalışmalarda elde edilen sonuçlar da 450 °C'de temperleme hariç tutulursa benzer bir davranış göstermektedir. Ancak, belli bir temperleme sıcaklığının üzerine çıkılırsa borlama süresinin artmasıyla aşınma hızı önce artmakta daha sonra ise azalma eğilimine girmektedir.

Küresel grafitli dökme demir yapısında bulunan küresel grafitlerin yağlama etkisi yaptığı bilinmektedir. Bortemperleme ile yapıda bulunan yüzeye açık grafit küreleri borür tabakasıyla kaplanmamaktadır (Şekil 7.1–7.3). Dolayısıyla, grafit kürelerinin yağlama etkisinin BKGDD malzemelerde de sürdüğü söylenebilir. Aşınma davranışına FeB ve Fe₂B faz oranlarının ve tabaka kalınlığının da etkili olduğu sanılmaktadır. FeB fazının yüksek sertliğinden dolayı aşınma direncini artıracakı düşünülebilir. 3 ve 5 saatlik borlama sürelerinde artan temperleme sıcaklığı ile FeB miktarının azalması, aynı zamanda aşınma hızının artması bu yaklaşımı doğrulamaktadır. Ancak, artan borlama süresiyle FeB miktarının artması, aynı zamanda 300 ve 350 °C’de aşınma hızının da artması, aşınmanın sadece FeB miktarıyla ilgili olmadığını, muhtemelen tabaka kalınlığının da etkili olduğunu göstermektedir.

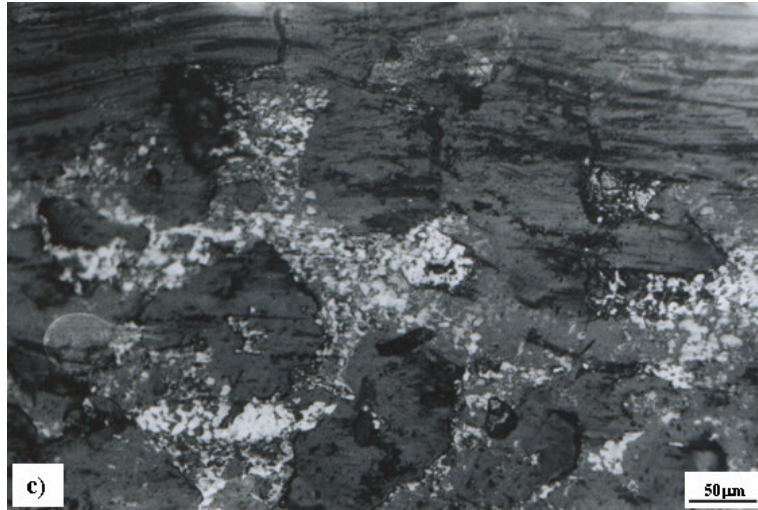
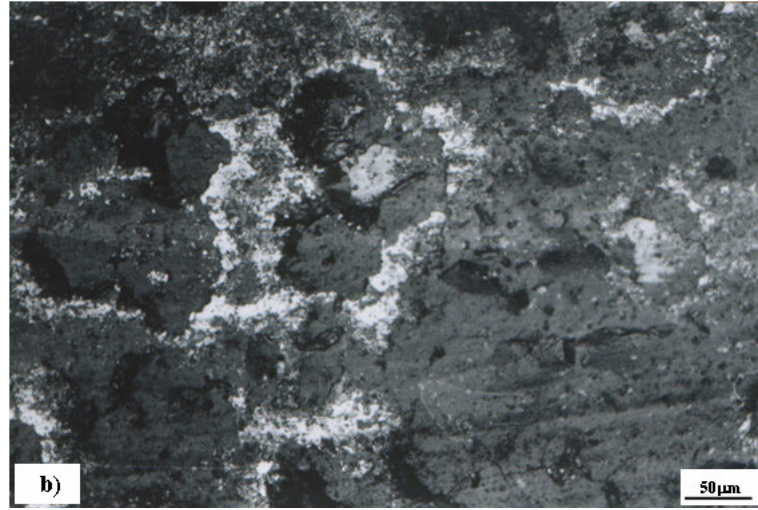
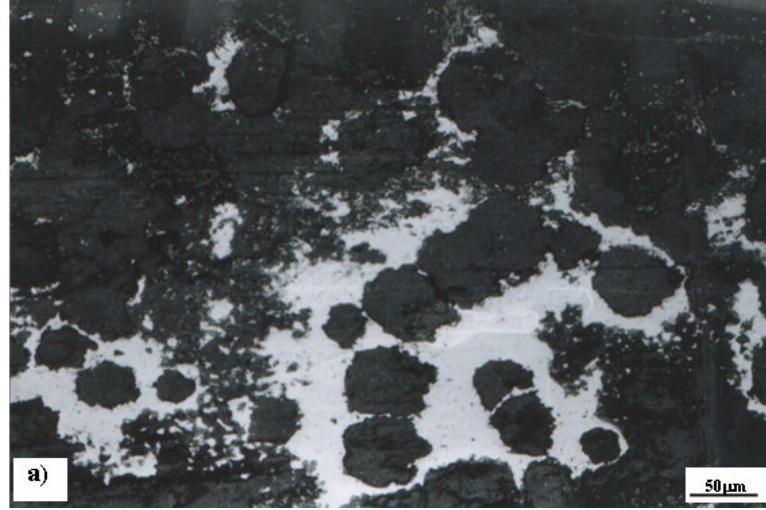
Yukarıdaki tüm verilerden, en iyi aşınma direncinin, FeB fazının bulunduğu fakat tabaka kalınlığının çok fazla olmadığı şartlarda elde edilebileceği sonucuna ulaşılabilir. Bu şartların ise 1 saat borlama ve 300 °C’de temperleme ile sağlanabileceği Şekil 7.15’de verilen aşınma hızı-borlama süresi grafiğinden görülebilmektedir.

Aşınma deneyine tabi tutulan işlemsiz ve bortemperlenmiş numunelerin aşınma yüzeylerinden alınmış seçme optik fotoğrafları Şekil 7.16-Şekil 7.18’de verilmiştir.

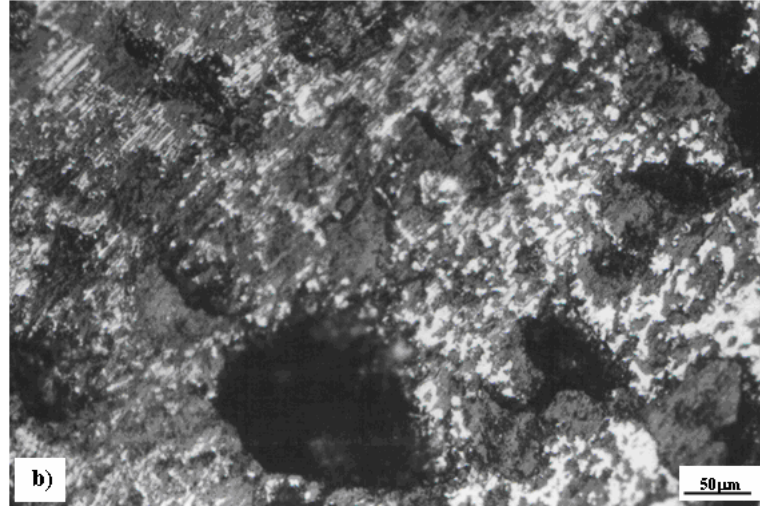
Aşınma izlerinin fotoğrafları incelendiğinde aşınma türünü net olarak ayırmak mümkün olamamaktadır. Ancak, aşınmanın hem adhesiv hem de abrasiv türü içerdiğine dair işaretler görülmektedir. Temperleme sıcaklığının artmasıyla adhesiv aşınmadan abrasiv aşınma türüne sanki bir kayma söz konusu. Şekil 7.17 ‘nin dikkatle incelenmesi 450 °C ’de temperlenen numunenin aşınma fotoğrafında abrasiv aşınmayı karakterize eden derin çizikler dikkat çekmektedir. Oysa 300 °C ’de temperlenen numunede bu çizikler görülmemektedir. Aşınma direncinin en yüksek olduğu söz konusu bu şartlarda numunede grafitlerin mümkün olduğu kadar şekillerini korudukları gözlenmiştir. Bu şartlarda yapılan deneyde kullanılan aşındırıcı bilyenin ise kendisinin aşındığı tespit edilmiştir (Şekil 7.19).



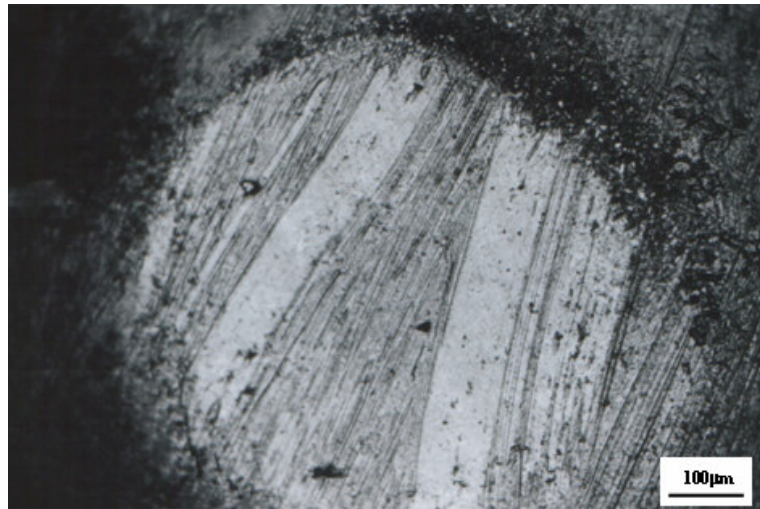
Şekil 7.16 İşlemsiz malzemenin aşınma izi optik fotoğrafı.



Şekil 7.17 900 °C’de 1 saat süre ile borlanmış a) 300 °C, b) 350 °C ve c) 450 °C’de bortemperlenmiş numunenin yüzeyine uygulanan aşınma deneylerinde oluşan izlerin mikroyapı görüntüleri.



Şekil 7.18 900 °C’de a) 3 saat, b) 5 saat süre ile borlanmış, 450 °C’de bortemperlenmiş numunelerin aşınma izi optik fotoğrafları.



Şekil 7.19 Aşındırıcı WC-Co bilyenin aşınma yüzeyi optik mikroskop fotoğrafı.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1 Sonuçlar

Üç farklı borlama süresi ve üç farklı temperleme sıcaklığında bortemperlenen alaşımsız küresel grafitli dökme demir üzerine yapılan bir dizi deney neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Bortemperleme ısısal işlemi küresel grafitli dökme demire başarıyla uygulanabilmektedir.
- Bortemperlenen KGDD 'in yüzeyinde FeB ve Fe₂B 'den oluşan çift fazlı bir borür tabakası oluşmuştur. Borür tabaka kalınlığı artan borlama süresiyle artmakta, artan temperleme sıcaklığı ile azalmaktadır. Ancak 5 saatlik borlamada tabaka kalınlığı temperleme süresinin artmasıyla az bir düşüşten sonra artış göstermektedir.
- Bor tabakasının sertliği 1103–1762 HV_{0,05} arasında değişirken, çekirdek sertliği ise matris mikroyapısına bağlıdır ve 289–343 HV_{0,05} arasında değişmektedir.
- Maksimum çekme ve %0,2 akma mukavemeti 3 saat borlama ve 300 °C'de 1 saat temperleme şartlarında elde edilmiştir. Buna karşılık en iyi uzama 1 saat borlama süresinde sağlanmıştır.
- Genel olarak artan borlama süresi ve temperleme sıcaklığı ile darbe enerjisi azalmaktadır. Temperleme sıcaklığının 300 °C'yi aşması darbe enerjisinde keskin düşüslere neden olmaktadır.
- Sürtünme katsayısı ve aşınma hızı borlama süresiyle daha az değişirken temperleme sıcaklığına çok bağlıdır. Artan temperleme sıcaklığı ile sürtünme katsayısı ve aşınma hızı artmaktadır. Temperleme sıcaklığının 450 °C seçilmesi aşınma hızını çok önemli derecede yükseltmektedir.

- Bortemperleme şartlarının tüm özellikler üzerinde etkili olduğu ve optimum bortemperleme şartlarının 1-3 saat borlamayı takiben 300-350 °C aralığında temperleme ile elde edilebileceği genel sonucuna ulaşılmıştır.

8.2 Öneriler

- Bu çalışmada bortemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin oda sıcaklığında ve tek bir yük altında aşınma davranışları incelenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda ve farklı yüklerde aşınma davranışları araştırmaya değer bir konudur.
- Bortemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin kaplama tabakasının yapışma özellikleri Rockwell-c yöntemiyle incelenebilir.
- Bortemperleme ısıtılmasının yorulma özelliklerine etkisi araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- 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.
- ASTM A 327-72,1991, Standart Methods of Impack Testing Cast Iron, Vol.01.02
- 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.
- Carbucicchio, M., Badını, C., Palombarini, G.,1980,“Mössbauer and Metallographic Analysis of Borided Surface Layers on Armco Iron”, J. Mater. Sci., 15, pp. 711-719.
- Çalık, A., Özsoy A., 2002, “Termal Çevirimli Borlama İşleminin Ç1010 Çeliğine Etlileri” 11. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, İstanbul.
- 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.
- Eyre, T. S., 1975, “Effect of Boronising on Friction and Wear of Ferrous Metals”, Wear, 33, 383-397
- Eyre, T. S., 1991, “Friction and Wear Control in Industry”, Surface Engineering, Vol. 7, 143-148
- Fichtl, W., Trausner, N., Matuschka, A. G., 1987, “Borieren mit Ekabor”,ESK GmbH.
- Forrest, R. D., 1987, “The Challenge an Opportunity Presented to the SG Iron Industry by the Development of Austempered Ductile Iron, BCIRA Report 1700.,
- Graf, A., Matuschka, W., 1977, “Borieren”, Carl Hanser Verlag, München, Wien, pp.1-87.
- Güneş, İ., Kayalı, Y., Taktak, Ş., 2003, “AISI H13 Sıcak İş Takım Çeliğinin Bor Mineral Esaslı Bir Tuz Banyosunda Borlanması” I.Ulusal Bor Çalıştay, Ankara, 22-24 Nisan, 175-181

- Harding R. A., 1993, "Opening up the Market for ADI", Foundryman, pp. 197-208.
- Harding, R. A., 1991, "Standarts and Specifications for Austempered Ductile Irons, BCIRA Technology.
- İzgiz, S., 1988, "Küresel Grafitli Dökme Demirler", Ankara, sy 355-358.
- Janovak, J. F., Gudlanch, R.B., 1985, "Approaching Austempered Ductile Iron Properties by Controlled Cooling in the Foundry", J.Heat Treating, Vol.4, No.1, pp. 25-31.
- Karl, B. R., 1990, "Heat Trating of Ductile Irons, Metals Handbook, 10th Edition, Vol.4, pp.682-692.
- Karsay, I. S., 1990, "Ductile Iron-Production Practies", AFS, Second Edition, USA.
- Karslı, A. M., 2005, "AISI 440c ve 52100 Yatak Çelikleri üzerinde oluşturulan Karbür ve Borürlerin Yüksek Sıcaklıklarda Aşınma Davranışlarının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, A.K.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Kovacs, B. V., 1990, "Austempered Ductile Iron", Fact and Fiction, Modern Casting, pp. 37-41.
- Meriç, C., and Şahin, S., 2002 "Investigation of Effect Boronizing on Welding zone, Science Technology of Welding and Joining", 7, 107.
- Mimaroğlu, A., Yılmaz, F.,1997, "Influence of Carbide Size, Hardness and Temperture on Sliding Friction and Wear of Boundary Lubricated high-Speed Steel and Si3N4 Ceramics", Tribology Transactions, vol.40, pp.173-177.
- Oğuz, A., 1994, "Hafif Dirençli ve Dayanıklı Bor Cevheri", Bilim ve Teknik Dergisi, TÜBİTAK, 319.
- 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.

- Özsoy, A., Yaman, Y. M., 1993, “The Effect of Thermocycling Liquid Boronising on the Thickness of the Boride Layer and Transition Zone”, *Scripta Met.* Vol. 29, pp. 231–236.
- Palombarini, G., Carbuicchio, M., 1987, “Growth of Boride Coatings on Iron” *J. Mater. Sci. Let.*, pp.415-416.
- Pengxun, Y., 1992, “Gaseous Boronising with Solid Boron-Yielding Agents”, *Thin Solid Films*, 214, pp. 44–47.
- Reymond, A. C., 1991, “Engineering Properties of Borides”, *Engineering materials Handbook*, Vol.4, Ceramic and Glases, ASM International, pp. 787–803.
- Rundman, K. B., 1991, “Heat Treating of ductile Irons”, *ASM Handbook*, Vol.4, pp.682-692.
- 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 Metalurgy of Cast Iron”, *Metals Handbook*, 10th edition, ASM International, USA, pp. 3-55.
- Subrahmanian, C.and Strafford, K.N., 1993, “Review of Multicomponent and Multilayer Coatings for Tribological Applications”, *Elsevier Sequoia, Wear*, 165, pp. 85–95.
- Subrahmanian, J. and Gopinath, K., 1984, “Wear Studies on Boronized Mild Steel”, *Wear*, Vol. 95, 293–311.
- Şahin, S., 1999, “Katı Borlama Yöntemi İle Ferrobör Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi”, *Doktora Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- 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 cats irons”, *Vacuum Technology*, 72, pp. 199–204

- Venkataraman, B., Sundararajan, G., 1995, "Heat Speed Sliding Wear Behaviour of Boronized Medium Carbon Steel", Surface and Coating Technology, 73, pp. 177-184.
- Wang, N., Fischer, T. E., 1993, "Modification of Tribological properties of Aluminium Oxide by Pack Boronization", Lubricant Engineering, Vol. 49.
- 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 Üni., Denizli, 87-94.
- Yalcin Y., Taktak Ş., Yazıcı A.M., 2005, "Küresel grafitli dökme demirin ortotemperlenmesi", 4. International Advanced Technologies Symposium, Şelçuk Üni, Konya, 934-940.

[http:// www.ductile.org](http://www.ductile.org) 15.11.2005

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince benden bilgi ve deneyimlerini hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım ve değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Yılmaz YALÇIN 'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda bulundukları katkılarından dolayı Sn. Yrd. Doç. Dr. Şükrü TAKTAK 'a, Arş. Grv. Sinan ULU 'ya, Arş. Grv. Özgür VERİM 'e, Arş. Grv. Ali KECEBAŞ 'a, Şükrü ÜLKER 'e ve tüm bölüm hocalarıma teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca tüm öğrenim hayatım boyunca maddi, manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

ÖZGEÇMİŞ

25.07.1979 yılında Kütahya 'nın Emet ilçesinde doğan Yusuf KAYALI, ilköğretimini Tavşanlı Üçeylül İlkokulu ve Emet Lisesinde Ortaokulu tamamladı. Ortaöğretimini Tavşanlı Atatürk Lisesinde tamamladı. 1998 yılında başladığı Önlisans Eğitimini Balıkesir Üniversitesi, Edremit M.Y.O. 'nun Makine Teknikerliği Bölümünü 2000 yılında tamamladı. 2001 yılında başladığı Lisans Eğitimini Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümünü 2004 yılında tamamladı. Aynı yıl Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisansa başladı ve 2006 yılında Yüksek Lisansı 'nı tamamladı.