

KATI ORTAMDA BORLANMIŞ DDK 60 DÖKME DEMİRİN BORÜR TABAKASI  
BÜYÜME KİNETİĞİ ve AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Tolga ÖZMEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat 2007

INVESTIGATION OF THE BORIDE LAYER GROWTH KINETIC AND WEAR  
PROPERTIES OF THE PACK BORONIZED DDK 60 CAST IRON

Tolga ÖZMEN

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Metallurgical Engineering

February 2007

KATI ORTAMDA BORLANMIŞ DDK 60 DÖKME DEMİRİN BORÜR TABAKASI  
BÜYÜME KİNETİĞİ ve AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Tolga ÖZMEN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ

Şubat 2007

Tolga ÖZMEN' in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Katı Ortamda Borlanmış DDK 60 Dökme Demirin Borür Tabakası Büyüme Kinetiği ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ  
(Danışman)

Üye : Prof. Dr. Remzi GÜRLER

Üye : Doç. Dr. Mustafa ANIK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nemci GÖNEN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve .....  
sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Bu çalışmada, DDK 60 küresel grafitli dökme demir malzemesinde borlama parametrelerinin yüzey ve aşınma özellikleri üzerindeki etkisi ve borür tabakalarının büyüme kinetikleri incelenmiştir. Borlama işlemi; 850, 900 ve 950 °C 'de 2, 4, 6, 8 saat sürelerde ve katı ortamda Ekabor 2 ® toz bor verici kullanılarak yapılmıştır. Malzeme yüzeyinde oluşan borür tabakaları optik mikroskop ve XRD analizleriyle incelenmiştir. Borür tabaka kalınlığı ve sertlik değerleri belirlenerek tabaka büyüme aktivasyon enerjisi tespit edilmiştir. Abrasif aşınma deneyleri, SiC'li aşındırıcı kağıt kaplı metal disk kullanılarak 42 N sabit yük altında yapılmıştır.

İşlem sıcaklık ve süresinin artmasıyla borür tabaka kalınlığı ve sertliğinin arttığı belirlenmiştir. İşlem sıcaklığına ve borlama süresine bağlı olarak, borür tabakasının kalınlığı 34,75 µm ile 123,9 µm arasında değişmektedir. Borlanmış numunelerin sertliği yüzeyden içeriye doğru ilerledikçe azalmaktadır. Ayrıca, borür tabakasının faz türüne ve kalınlığa bağlı olarak aşınma miktarının değiştiği belirlenmiştir. Büyüme hız sabiti (K);  $2 \times 10^{-9}$  ile  $6 \times 10^{-9}$   $\text{cm}^2 \cdot \text{sn}^{-1}$  arasında değişmektedir. Borür tabakası büyüme aktivasyon enerjisi  $\sim 126 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Dökme demir, bor, borlama, büyüme kinetiği, aşınma.

## SUMMARY

In this study, effect of process parameters on the surface and wear properties of DDK 60 (ductile iron) material and the growth kinetics of boride layers were investigated. Boronizing process was performed by means of a powder-pack method using EKabor 2 ® powder as a boronizing agent at the temperatures of 850, 900 and 950 °C for 2, 4, 6, 8 hours. The boride layers formed on the surface of the material was investigated by optical microscopy and X-ray diffraction analysis. To obtain the layer growth activation energy boride layer thickness and hardness values was determined. Abrasive wear tests carried out using the SiC paper coated disc at constant load of 42 N.

It was observed that boride layer thickness and hardness are increased with increasing boronizing time and temperature. Depending on process temperature and boronizing time the thickness of boride layers ranged from 34,75 to 123,9 µm. The hardness of borided specimens decreased with the distance from the surface to the interior of the test material. And also, depending on the kind and thickness of boride layer, change in wear rate was observed. The growth rate constant (K) ranged from  $2 \times 10^{-9}$  to  $6 \times 10^{-9}$  cm<sup>2</sup>.sn<sup>-1</sup>. The boride layer growth activation energy was found ~126 kJ.mol<sup>-1</sup>.

**Keywords:** Cast iron, boron, boriding, growth kinetics, wear.

**TEŞEKKÜR**

Gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ' ye, maddi manevi tüm katkılarından dolayı aileme teşekkür ederim.

Ayrıca; Sayın Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK'e, Arş. Grv. Hakan GAŞAN'a, Arş. Grv. Kerem AYBAR'a, Arş.Grv İbrahim ÇELİKÜREK'e, Arş. Grv Dr. Bedri BAKSAN'a, Arş. Grv. Mustafa ULUTAN'a, Arş. Grv. Ümit ER'e, Yük. Müh. Ömür AKBAYIR'a deneysel çalışmalarım sırasında yardımlarından ötürü Sayın Akif TUTKUN'a teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	V
<b>SUMMARY</b> .....	VI
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	VII
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	XI
<b>ÇİZERGELER DİZİNİ</b> .....	XV
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. DÖKME DEMİRLER</b> .....	2
2.1. Gri dökme demir.....	3
2.2. Beyaz dökme demir.....	4
2.3. Temper dökme demir.....	5
2.4. Alaca dökme demir.....	6
2.5. Küresel grafitli dökme demir.....	6
2.5.1. Küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması ve mekanik özellikleri.....	7
2.5.2. Küresel grafitli dökme demirlerin bazı avantajları ve kullanım alanları.....	10
<b>3. BOR</b> .....	12
3.1. Bor Elementi.....	12
3.2. Ticari Bor Mineralleri.....	13
3.3. Ülkemizde ve Dünyada Bor.....	14
3.4. Bor Ürünlerinin Başlıca Kullanım Alanları.....	15
3.4.1. Cam sanayi.....	15
3.4.2. Seramik sektörü.....	15
3.4.3. Deterjan sanayi.....	16
3.4.4. Tarım sanayi.....	16
3.4.5. Diğer kullanım alanları.....	16



**İÇİNDEKİLER (devamı)**

<b>4. BORLAMA</b> .....	19
4.1. Borlama İşlemi.....	20
4.2. Borür Tabakası.....	21
4.3. Borür Tabakalarının Sınıflandırılması.....	22
4.4. Geçiş Bölgesi.....	24
4.5. Fe-B İkili Denge Diyagramı.....	25
4.6. Fe <sub>2</sub> B ve FeB Fazlarının Özellikleri.....	26
4.7. Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması.....	28
4.8. Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği.....	28
4.9. Borlama İşleminin Avantajları.....	30
4.10. Borlama İşleminin Dezavantajları.....	32
4.11. Borlama Yöntemleri.....	33
4.11.1 Kutu borlama.....	34
4.11.2 Sıvı ortamda borlama.....	37
4.11.3 Gaz ortamda borlama.....	37
4.11.4 Plazma borlama.....	38
<b>5. AŞINMA</b> .....	39
5.1. Aşınma Hasarları.....	39
5.2. Adhezif Aşınma.....	41
5.3. Abratif Aşınma.....	42
5.4. Yorulma Aşınması.....	43
5.5. Kimyasal Aşınma.....	44
5.6. Borlanmış Malzemelerin Aşınma Özellikleri.....	44
<b>6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve SONUÇLAR</b> .....	48
6.1. Deneyde Kullanılan Malzeme.....	48
6.2. Numune Hazırlama.....	49
6.3. Borlama İşlemi.....	50

**İÇİNDEKİLER (devamı)**

6.4. Metalografik İncelemeler.....	51
6.5. X-Işın Difraksiyon Analizi.....	60
6.6. Borür Tabaka Kalınlığı.....	66
6.7. Sertlik Ölçümleri.....	67
6.8. Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği.....	71
6.9. Aşınma Deneyi.....	73
7. <b>GENEL SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR</b> .....	78
8. <b>ÖNERİLER</b> .....	81
9. <b>KAYNAKLAR DİZİNİ</b> .....	82

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1	Demir-karbon alaşımlarında yaklaşık demir ve silisyum aralıkları..... 3
2.2	Gri dökme demirde grafit lamelleri..... 4
2.3	Beyaz dökme demir mikroyapı fotoğrafı..... 5
2.4	Ferritik temper dökme demir..... 5
2.5	DDK 60 küresel grafitli dökme demire ait mikroyapı fotoğrafı..... 7
4.1	Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması..... 21
4.2	Borür tabakası, geçiş bölgesi ve ana yapının şematik resmi..... 22
4.3	Borür tabakası çeşitleri..... 23
4.4	850°C’de 6 saat borlanmış DDK 60 numune, (a); 900°C’de 8 saat borlanmış DDK 60 numune, (b); Çeliklerde borür tabakası boyunca elementlerin şematik olarak gösterimi, (c)..... 25
4.5	Kısmi Fe-B denge diyagramı..... 26
4.6	Kutu borlama yönteminin şematik gösterimi..... 34
5.1	Tribolojik bir sistemin şematik olarak gösterimi..... 40
5.2	Aşınmanın temel mekanizmaları..... 41
5.3	Normalize edilmiş ve borlanmış EN8 çeliğinin 8.5 kg yük altındaki aşınma davranışı..... 45
5.4	13-Cr-4Ni paslanmaz çeliği için farklı miktarlarda kullanılan silika kumunun aşınmaya etkisi..... 46
5.5	900 °C ‘de 6 saat borlanmış dökme demirlerin aşınma özellikleri..... 47
6.1	Deneyde kullanılan malzemenin mikroyapı fotoğrafı..... 48
6.2	Normalizasyon işleminde kullanılan fırın ve kontrol ünitesi..... 49
6.3	Numune yüzeylerinin zımparalama ve parlatma işleminde kullanılan cihaz..... 49
6.4	Borlanacak numuneler ve sarf malzemelerinin kutulara yerleştirilmesi..... 50

### ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

6.5	Borlama işlemlerinin yapıldığı Protherm marka fırın, kutuların fırına yerleştirilmesi.ve kutuların havada soğutulması.....	51
6.6	Struers Discotom-5 numune kesme cihazı.....	52
6.7	Görüntü analiz sistemi.....	52
6.8	850 °C’de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60’ın mikroyapı fotoğrafı.....	53
6.9	850 °C’de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60’ın mikroyapı fotoğrafı.....	53
6.10	850 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60’ın mikroyapı fotoğrafı.....	54
6.11	850 °C’de 8 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60’ın mikroyapı fotoğrafı.....	54
6.12	900 °C’de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60’ın mikroyapı fotoğrafı.....	55
6.13	900 °C’de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60’ın mikroyapı fotoğrafı.....	55
6.14	900 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60’ın mikroyapı fotoğrafı.....	56
6.15	900 °C’de 8 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60’ın mikroyapı fotoğrafı.....	56
6.16	950 °C’de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60’ın mikroyapı fotoğrafı.....	57
6.17	950 °C’de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60’ın mikroyapı fotoğrafı.....	57
6.18	950 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60’ın mikroyapı fotoğrafı.....	58
6.19	950 °C’de 8 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60’ın mikroyapı fotoğrafı.....	58

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)**

6.20	850 °C sıcaklıkta, 2 saat, 4 saat, 6 saat, 8 saat borlanmış DDK 60 numunelerinin mikroyapı fotoğrafları.....	59
6.21	900 °C sıcaklıkta, 2 saat, 4 saat, 6 saat, 8 saat borlanmış DDK 60 numunelerinin mikroyapı fotoğrafları.....	59
6.22	950 °C sıcaklıkta, 2 saat, 4 saat, 6 saat, 8 saat borlanmış DDK 60 numunelerinin mikroyapı fotoğrafları.....	59
6.23	850 °C’de 2 saat süre ile borlanmış DDK 60’ın x-ışın difraksiyon paterni.....	60
6.24	850 °C’de 4 saat süre ile borlanmış DDK 60’ın x-ışın difraksiyon paterni.....	61
6.25	850 °C’de 6 saat süre ile borlanmış DDK 60’ın x-ışın difraksiyon paterni.....	61
6.26	850 °C’de 8 saat süre ile borlanmış DDK 60’ın x-ışın difraksiyon paterni.....	62
6.27	900 °C’de 2 saat süre ile borlanmış DDK 60’ın x-ışın difraksiyon paterni.....	62
6.28	900 °C’de 4 saat süre ile borlanmış DDK 60’ın x-ışın difraksiyon paterni.....	63
6.29	900 °C’de 6 saat süre ile borlanmış DDK 60’ın x-ışın difraksiyon paterni.....	63
6.30	900 °C’de 8 saat süre ile borlanmış DDK 60’ın x-ışın difraksiyon paterni.....	64
6.31	950 °C’de 2 saat süre ile borlanmış DDK 60’ın x-ışın difraksiyon paterni.....	64
6.32	950 °C’de 4 saat süre ile borlanmış DDK 60’ın x-ışın difraksiyon paterni.....	65
6.33	950 °C’de 6 saat süre ile borlanmış DDK 60’ın x-ışın difraksiyon paterni.....	65

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)**

6.34	950 °C'de 8 saat süre ile borlanmış DDK 60'ın x-ışın difraksiyon paterni.....	66
6.35	İşlem sıcaklığı ve zamanına bağlı borür tabaka kalınlığının değişimi..	67
6.36	Sertlik ölçüm cihazı.....	67
6.37	850 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan DDK 60'ın yüzeyden itibaren mesafeye ( $\mu\text{m}$ ) bağlı olarak sertlik dağılımı.....	68
6.38	900 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan DDK 60'ın yüzeyden itibaren mesafeye ( $\mu\text{m}$ ) bağlı olarak sertlik dağılımı.....	69
6.39	950 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan DDK 60'ın yüzeyden itibaren mesafeye ( $\mu\text{m}$ ) bağlı olarak sertlik dağılımı.....	70
6.40	İşlem sıcaklığına göre borür tabaka kalınlığının karesinin borlama süresine bağlı değişimi.....	71
6.41	İşlem sıcaklığına bağlı olarak büyüme hız sabiti (K) değerlerinin değişimi.....	72
6.42	Borlanmış DDK 60 küresel grafitli dökme demirin Arrhenius eğrisi...	72
6.43	Deneyde kullanılan aşınma cihazı ve aşınma cihazında numunenin pozisyonu.....	73
6.44	850 °C sıcaklıkta borlanan numunelerin aşınma davranışları.....	75
6.45	900 °C sıcaklıkta borlanan numunelerin aşınma davranışları.....	75
6.46	950 °C sıcaklıkta borlanan numunelerin aşınma davranışları.....	76
6.47	Numunelerin 2000 tur sonundaki toplam aşınma miktarları.....	77

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Dökme demirlerin kimyasal bileşim aralıkları.....	2
2.2 TSE standartlarına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	9
2.3 DIN standartlarına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	9
3.1 Bor elementinin fiziksel özellikleri.....	12
3.2 Ticari önemi olan bor mineralleri.....	13
3.3 Rezervler ve bor kaynakları.....	14
4.1 Çeşitli metallerden elde edilen borür fazları ve mikro sertlikleri.....	20
4.2 Fe <sub>2</sub> B ve FeB fazlarının tipik özellikleri.....	27
4.3 Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması.....	32
4.4 Katı ortamda borlama işleminde kullanılan bor kaynakları.....	36
4.5 EKabor® borlama ürünlerinin özellikleri.....	36
6.1 Deneyde kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi.....	48
6.2 İşlem şartlarına bağlı olarak borür tabaka kalınlıkları.....	66
6.3 850 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan DDK 60'ın yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak sertlik değerleri.....	68
6.4 900 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan DDK 60'ın yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak sertlik değerleri.....	69
6.5 950 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan DDK 60'ın yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak sertlik değerleri.....	70
6.6 Aşınma deneyi sonucu ağırlık değerleri.....	74
6.7 İşlem şartlarına bağlı olarak 2000 tur aşınma sonucu toplam ağırlık kayıpları.....	74

## 1. GİRİŞ

Çağımızda yüzey mühendisliği önem kazanmıştır. Yüzey sertleştirme işlemi özel bir işlem olup, bir metalin iç kısmının nispeten tok olması istenirken, yüzeyinin belirli bir kalınlıkta sertleştirilmesi gerekmektedir. Yüzey sertleştirme amacını, metal parçaların yüzeylerinin sertliğini, aşınma direncini, korozyon direncini ve bununla birlikte yorulma ömrünü artırmaktır (Çalık vd., 2004).

Makine ve ekipmanların mekanik parçalardaki ekonomik kayıpların büyük çoğunluğu korozyon ve aşınmadan kaynaklanır. Bu kayıpları azaltmak için kullanılan malzemelerin yüzey özellikleri geliştirilmelidir. Yüzey kalitesini artırma yöntemlerinden birisi de borlamadır.

Nodüler veya sünek dökme demir olarak da bilinen küresel grafitli dökme demir içinde grafit, küreler şeklinde bulunur. Göreceli olarak yüksek mukavemet ve tokluğa sahip olan küresel grafitli dökme demirler bazı avantajlarından dolayı diğer dökme demirlerden ve çelik türlerinden daha fazla kullanım alanı bulabilmektedir. Küresel grafitli dökme demirler özellikle mukavemet ve tokluğun birlikte gerektiği uygulamalarda talaşlı imalatın kolay olması ve düşük fiyatından dolayı tercih edilir. (Çelikyürek vd, 2004). Birçok sürtünmeli ortamda, küresel grafitli dökme demirlerin kullanım alanının bulunması, bu malzemelerin küresel özelliklerinin yanı sıra yüzey özelliklerinin de önemli olduğunu ortaya çıkarmaktadır. (Şen, 1997)

Bu çalışmada, DDK 60 (Dökme Demir Küresel 60) malzemesinde borlama işlem parametrelerinin yüzey ve aşınma özellikleri ile, büyüme kinetiği üzerine etkisi incelenmiştir. Borlama işlemi 850, 900 ve 950 °C 'de 2, 4, 6, 8 saat sürelerde ve katı ortamda Ekabor2® toz karışımla yapılmıştır. Borür tabakası fazlarının türü, optik mikroskop ve XRD analizleriyle incelenmiştir. İşlem şartlarına bağlı olarak borür tabaka kalınlığı ve sertlikleri belirlenerek tabaka büyüme aktivasyon enerjisi tespit edilmiştir. Aşınma deneyi, SiC'li aşındırıcı kağıt kaplı metal disk üzerine 42 N sabit yük ile temas ettirilen kübik numuneler üzerinde yapılmıştır.



## 2. DÖKME DEMİRLER

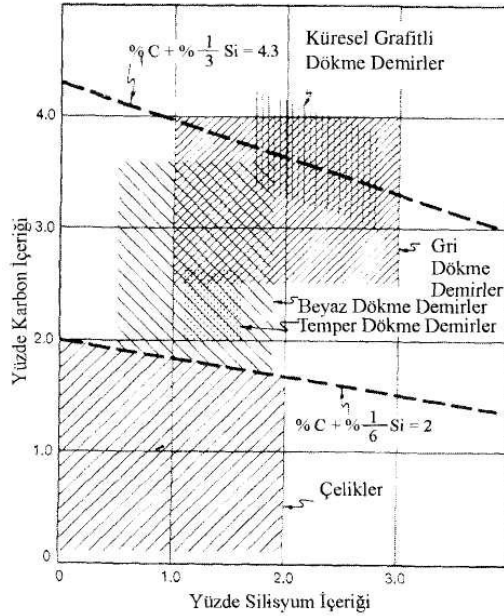
Dökme demir genel olarak ana bileşenler, %2-4 C, %1-3 Si olmak üzere mangan, kükürt ve fosfor ihtiva eden bir demir-karbon alaşımıdır. Bileşiminde bulunan elementlerin oranına ve döküm esnasındaki soğuma hızına, dökümden sonra tatbik edilen ısı işleme göre çeşitli dökme demir türleri ortaya çıkmaktadır. Dökme demir türleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir;

- a. Gri dökme demir,
- b. Beyaz dökme demir,
- c. Temper dökme demir,
- d. Alaca dökme demir,
- e. Küresel grafitli dökme demir.

Alaşımlandırılmamış dökme demirlerin kimyasal bileşim aralıkları Çizelge 2.1’de verilmiş, yaklaşık karbon ve silisyum içerik aralıklarının çeliklerle karşılaştırılması Şekil 2.1’de gösterilmiştir (Erdoğan, 2000).

Çizelge 2.1. Dökme demirlerin kimyasal bileşim aralıkları (Erdoğan, 2000).

Element	Gri Dökme Demir (% Ağ.)	Beyaz Dökme Demir (% Ağ.)	Temper Dökme Demir (% Ağ.)	Küresel Grafitli Dökme Demir (% Ağ.)
Karbon	2.5-4	1.3-3.6	2-2.60	3-4
Silisyum	1-3	0.5-1.9	1.1-1.6	1.2-3
Mangan	0.25-1	0.25-0.80	0.2-1	0.1-1
Kükürt	0.02-0.25	0.06-0.2	0.04-0.18	0.03 mak.
Fosfor	0.05-1	0.06-0.18	0.18 mak.	0.1 mak.



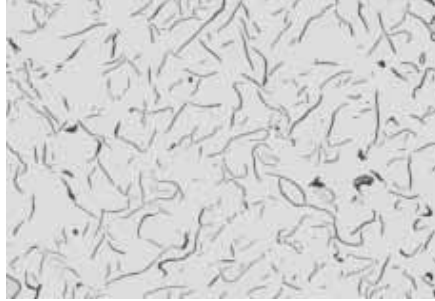
Şekil 2.1. Demir-karbon alaşımlarında yaklaşık demir ve silisyum aralıkları (Erdoğan, 2000).

Bazı hallerde de dökme demir içerisinde Ni, Cr, Mo, Ti, Al ve Cu gibi elementler de bulunabilir. Dökme demirlerin çok geniş aralıkta değişen mukavemet, sertlik, korozyon direnci, kolay işlenebilme, aşınmaya dayanıklılık ve titreşimleri yutma gibi özellikleri vardır. Bu özellikler dökme demirlere çok geniş bir kullanma alanı açmıştır (Anık vd., 1999).

## 2.1. Gri dökme demir

Yüksek karbon ve silisyum oranlı dökme demirlerin yavaş soğumaları sırasında, karbonun grafit halinde ayrışmasıyla oluşan dökme demir türüdür. Grafitin dökme demir içerisindeki miktarı, biçimi, büyüklüğü ve dağılımı özelliklere etki eder. Gri dökme demirde genel olarak gelişmiş ve üniform dağılmış lameller grafit tercih edilir. Şekil 2.2’de lamel grafitli dökme demir görülmektedir. Gri dökme demirde çekme mukavemeti 28 ila 42 kg/mm<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Kalın kesitlerde kalın grafit levhacıkları ve yapıda ferrit olması sebebiyle düşük mukavemet değerleri elde edilirken, ince kesitlerde ince grafit ve perlitik yapı nedeniyle yüksek mukavemet

değerleri elde edilmektedir. Ayrıca bu yapı ve özellik değişmelerine kimyasal bileşimin de etki ettiğini unutmamak gerekir. Özellikle karbon ve silisyum grafit oluşumu üzerine önemli şekilde etki etmektedir.

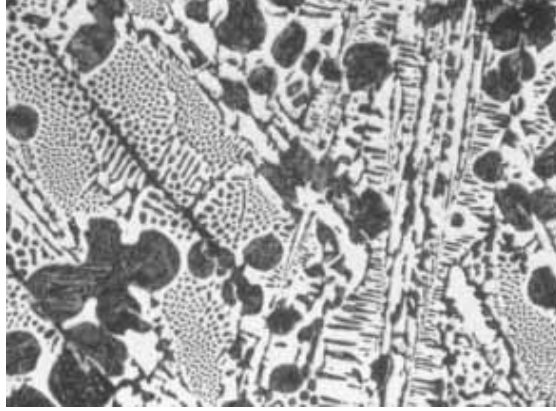


Şekil 2.2. Gri dökme demirde grafit lamelleri (Struers, 2006).

Gri dökme demirin en iyi özelliği, basma mukavemetidir. Basma mukavemeti, çekme mukavemetinin 3-5 katıdır. Yorulma limiti, çekme mukavemetinin yarısı kadardır. Gri dökme demirler iyi bir şekilde yağlanırlarsa, aşınmaya karşı yüksek mukavemet gösterirler. Demir alaşımlar içerisinde işlenebilme kabiliyeti en yüksek olan gri dökme demirdir. Yüksek titreşim söndürme yetenekleri vardır. Bu sebepten makine gövdelerinin yapımında kullanılırlar. Korozyona karşı dayanıklılıkları yüksek olup su tesisatlarında geniş uygulama alanı bulurlar (Anık vd., 1999).

## 2.2. Beyaz dökme demir

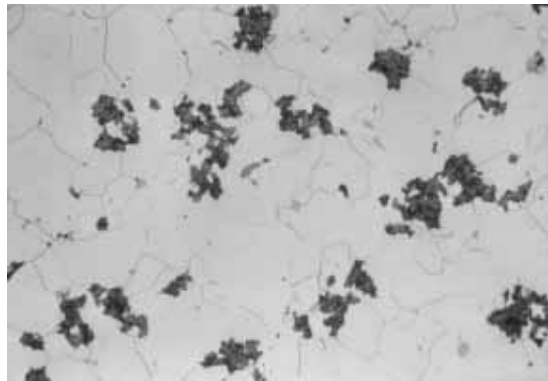
Düşük karbon ve silisyum oranlarında ve yüksek soğuma hızlarında karbon ayrışamaz, bağlı halde kalır. Bu tür dökme demire "beyaz dökme demir" adı verilir. Beyaz dökme demir kırıldığı zaman, beyaz, parlak bir yüzey verir. Yapıdaki perlit ve yüksek orandaki demir karbür sebebiyle, yüksek sertlik ve aşınmaya dayanıklılık özellikleri vardır. Sertlikleri 350-550 Brinel arasındadır. Darbe mukavemetlerinin ve işlenebilme kabiliyetlerinin düşük olması, beyaz dökme demirlerin kullanılma sahalarını daraltır. Şekil 2.3'de beyaz dökme demire ait mikroyapı fotoğrafı gösterilmiştir. Başlıca kullanma alanları arasında cevher veya çimento değirmen astarları, öğütücü bilyeler sayılabilir (Anık vd., 1999).



Şekil 2.3. Beyaz dökme demir mikroyapı fotoğrafı (Struers, 2006).

### 2.3. Temper dökme demir

Karbonu serbest halde bulunmayan yani grafit içermeyen beyaz dökme demirin [  $C + Si < \% 3,8$  ] uzun süre yüksek sıcaklıkta ısıtılması (tavlanması) sonucu üretilir. Temper dökme demir için tavlama ısıtılmasının birinci aşamasında, işlem sıcaklığına çıkartılan dökme demirde grafitler çekirdeklenir. İkinci aşamada, dökme demir işlem sıcaklığında bekletilerek demir karbürdeki karbon çözeltiye geçer ve temper grafit oluşumu gerçekleştirilir. Son aşama ise istenilen matris yapısına göre soğutma işlemidir. Temper dökme demir ısıtılması ve ortamına bağlı olarak beyaz ve siyah olmak üzere iki türlü üretilir (Anık vd., 1999; Erdoğan, 2000). Şekil 2.4'de ferritik temper dökme demirin mikroyapısı görülmektedir.



Şekil 2.4. Ferritik temper dökme demir (Struers, 2006).

#### **2.4. Alaca dökme demir**

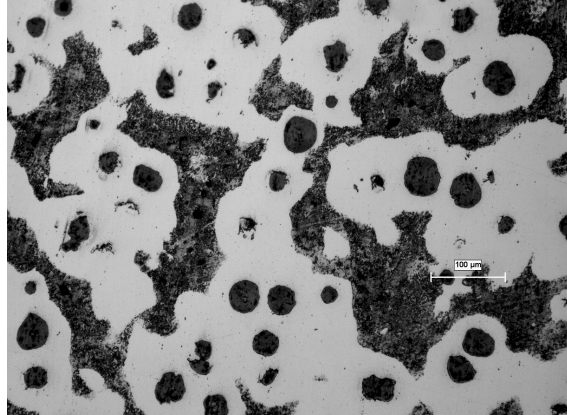
Uygun oranlarda karbon ve silisyum ihtiva eden bir dökme demir parçanın bazı kısımlarının hızlı, bazı kısımlarının yavaş soğutulmasıyla gri ve beyaz dökme demir yapıların birlikte bulunduğu bir yapı elde edilir. Bu yapıdaki dökme demir, "alaca dökme demir" olarak adlandırılır. Hızlı soğutulan kısımlar beyaz, yavaş soğutulan kısımlar ise gri dökme demir olarak katılır. Beyaz ve gri dökme demir yapıdaki kısımların arası, bu ikisinin karışımıdır ve alaca dökme demir olarak anılır (Anık vd., 1999).

#### **2.5. Küresel grafitli dökme demir**

Aynı zamanda nodüler, sfero ve düktül dökme demir gibi isimlerle de anılan bu tür dökme demirlerde karbon, grafit küreleri halindedir. Şekil 2.5’de küresel grafitli dökme demir mikroyapı örneği verilmiştir. Karbonun lamelden küre haline geçişini sağlamak için ergimiş dökme 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).

Küresel grafitli dökme demirler, çok ince kesitli parçalarda da ( $\approx 1.5$  mm) çok büyük parçalarda da ( $\approx 800$  mm) iyi döküm sonucu vermektedir.

Küresel grafitli dökme demirler, gri dökme demirlerin mükemmel dökülebilme özellikleriyle, çeliklerin mukavemet ve süneklik özelliklerini bir arada sağlayabilen ender malzemelerdendir.



Şekil 2.5. DDK 60 küresel grafitli dökme demire ait mikroyapı fotoğrafı (200X, %10 Pikral).

Küresel grafitli dökme demirlerde, grafitlerin sayısı ve dağılımı metalurjik kalitenin çok iyi ve hassas bir göstergesidir. Küre sayısının  $100 \text{ adet/mm}^2$  olması ortalama bir değer olarak tercih edilir.

Küresel grafitli dökme demirlerin yapısı, bir matris ve bu matris içindeki küresel grafitlerden oluşur. Grafitlerin hacimsel olarak yapının %8-10'unu kaplaması tercih edilir (Çelik, 1996).

### 2.5.1. Küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması ve mekanik özellikleri

Küresel grafitli dökme demirlerde ostenit-ferrit dönüşümü matris yapının karbon oranını etkiler. Ostenitin kristalleşme sıcaklığında karbon oranı %1 civarındadır ve bu oran soğuma sırasında azalır. Ostenit-ferrit dönüşümü sırasında karbonun ostenitteki çözünürlüğü %0.55 civarındadır. Buna karşın karbonun ferrit içinde çözünürlüğü sıfırdır. Bu durumda dönüşüm sırasında karbon açığa çıkar. Açığa çıkan bu karbon; soğuma hızına, kimyasal bileşime ve grafit dağılımına bağlıdır. Düşük soğuma hızlarında açığa çıkan karbon çökelir ve grafit kürelerine eklenir. Bu durumda matris yapı tamamen ferrittir ve ferritik küresel grafitli dökme demir elde edilmiş olur. Oysa hızlı soğuma karbonun çökmesine olanak vermez. Karbon ferrit içinde çözünemediği ve ostenitte katılma sırasında dönüşümüne

devam ettiği için ostenit doku içinde çok ince demir karbür plakaları oluşmaya başlar. Bu plakalar matrisin sürekliliğini bozar ve ferrit ile ardışık plakalar oluşturur. Ortaya çıkan bu yapı perlittir. Bu şekilde oluşan dökme demir ise perlitik küresel grafitli dökme demirdir.

Küresel grafitli dökme demirlerin döküm sonrası matris yapıları çeşitli oranlarda ferrit ve perlit içerirler. Bunun dışında çeşitli ısıtım ve katılaştırma teknikleriyle yapıyı değiştirmek mümkündür. Soğuma hızına müdahale edilerek veya katılaşmadan sonra mamul üzerinde ısıtım uygulamalarıyla beynitik, martenzitik veya ostenitik matris yapılar elde edilebilir (Çelik, 1996).

Küresel grafitli dökme demirlerin elde edilmesinde iki ana yöntem vardır:

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

Küresel grafitli dökme demirlerin yapısındaki grafitler çeliğe benzer bir matris içerisinde dağılmış küresel partiküller halindedir. Grafitlerin küreler halinde oluşmasını sağlamak için, BCIRA yönteminde sıvı dökme demire seryum (Ce) ilave edilmektedir. Seryumun büyük bir kısmı dökme demir bileşimindeki kükürdü giderirken, 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.

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

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

Kısa Gösterilişi	Çekme Muk. (kg/mm <sup>2</sup> )	Akma Muk. (kg/mm <sup>2</sup> )	% Uzama	Sertlik HB	Mikroyapı
DDK 40	42	28	12	140-201	Daha çok ferritik
DDK 50	50	35	7	170-241	Ferrit+Perlit
DDK 60	60	40	3	192-269	Perlit+Ferrit
DDK 70	70	45	2	229-302	Daha çok perlitik
DDK 80	80	50	2	248-352	Perlitik
DDK 35.3	35	22	22	-	Ferritik
DDK 40.3	40	25	18	-	Ferritik

Çizelge 2.3. DIN standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması (Şen, 1997).

Kısa Gösterilişi	Çekme Muk (kg/mm <sup>2</sup> )	Akma Muk. (kg/mm <sup>2</sup> )	% Uzama
GGG-40	40	25	15
GGG-50	50	32	7
GGG-60	60	38	3
GGG-70	70	44	4
GGG-80	80	50	2

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 (Şen, 1997).



### 2.5.2. Küresel grafitli dökme demirlerin bazı avantajları ve kullanım alanları

Küresel grafitli dökme demirlerin, çeliklere göre sahip olduğu bazı üstün özellikleri sebebiyle, kullanım alanları ve üretim miktarları her geçen gün biraz daha artmaktadır. Küresel grafitli dökme demirlerin bazı avantajları aşağıda sıralanmaktadır;

- Küresel grafitli dökme demirler çeliklere göre %10 daha hafiftirler.
- Küresel grafitli dökme demirlerden yapılan dişliler, çeliklerden daha sessiz çalışmaktadır. Yapıdaki grafit, titreşim 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 belirli dişliler, son şeklini verecek şekilde dökülebilir. Örneğin, döküm işlemi sırasında dişler oluşturulabilir.
- Küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirliği, tavllanmış çelikten oldukça iyidir. Bu nedenle pahalı işleme takımlarının sarfiyatı da az olmaktadır.
- Küresel grafitli dökme demir dişlilerin üretiminde kullanılan enerji, çelik 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, ön teker destek kolları, direksiyon bağlantılarının kompleks şekilleri, fren diskleri, serbest kollar, tekerlek poryaları, güç iletim bağlantıları, turbo yuvaları ve manifoldları için yüksek sıcaklık uygulamaları ve bir çok uygulama için yüksek güvenlik valfleri, kam mili, diferansiyel taşıyıcı, motor taşıyıcı, şanzıman taşıyıcı, diferansiyel gövdesi ve çanı, kompresör taşıyıcı, distribütör dişlisi, yardımcı shaft kayıcıları sayılabilir. Ayrıca küresel

grafitli dökme demir boru endüstrisi diğer en büyük kullanım alanını teşkil etmektedir. Bunun yanında, madencilik ve metalürji sektöründe, kırıcı gövdelerde, sıcak hadde merdanelerinde, kalıplarda, ergitme ve cüruf potalarında da kullanılmaktadır (Şen, 1997).

### 3. BOR

Bor, doğada tüm canlıların yaşantısını devam ettirmesi için vazgeçilmez elementlerden birisidir. Bunun yanında; bor dünyada en yaygın kullanım alanına sahip olan elementlerin başında gelmektedir. Sanayinin en önemli temel taşlarından birisi olan bor ürünleri; katma değerinin çok yüksek olması nedeniyle; dünyada belli başlı firmaların elindedir. Büyük rezervleri ve yüksek kalitede cevher avantajı ile Türkiye bu pazarda çok önemli bir paya sahiptir (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001).

#### 3.1. Bor Elementi

Periyodik sistemin üçüncü grubunun başında bulunan ve atom numarası 5 olan bor elementi, kütle numaraları 10 ve 11 olan iki kararlı izotopundan oluşur. Çizelge 3.1'de bor elementine ait bazı fiziksel özellikler verilmiştir.

Çizelge 3.1. Bor elementinin fiziksel özellikleri (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001).

Özellik	Değeri
Atom ağırlığı	10.811 ± 0.005 veya 0.007
Ergime noktası	2190 ± 20 °C
Kaynama noktası	3660 °C
Vickers sertliği	5000 HV

Bor, yeryüzünde toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan bir elementtir. Yüksek konsantrasyonda ve ekonomik boyutlardaki bor yatakları, borun oksijen ile bağlanmış bileşikleri olarak daha çok Türkiye ve ABD'nin kurak, volkanik ve hidrotermal aktivitesinin yüksek olduğu bölgelerde bulunmaktadır (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001).

Tarihte ilk olarak 4000 yıl önce Babiller Uzak Doğu'dan boraks ithal etmiş ve bunu altın işletmeciliğinde de kullanmışlardır. Mısırlıların da boru, mumyalamada, tıpta ve metalurji uygulamalarında kullandıkları bilinmektedir. İlk boraks kaynağı Tibet

Göllerinden elde edilmiştir. Boraks; koyunlara bağlanan torbalarda Himalayalar'dan Hindistan'a getirilmiştir. Eski Yunanlılar ve Romalılar bor'u temizlik maddesi olarak kullanmıştır. İlaç olarak ilk kez Arap doktorlar tarafından M.S. 875 yılında kullanılmıştır. Borik Asit 1700'lü yılların başında borakstan yapılmış, 1800'lü yılların başında ise elementer bor elde edilmiştir. Elementer bor 1808 yılında Fransız Kimyacı Gay-Lussac ile Baron Louis Thenard ve bağımsız olarak İngiliz kimyacı Sir Humphry Davy tarafından bulunmuştur.

Bor elementinin kimyasal özellikleri morfolojisine ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Mikron ebadındaki amorf bor kolaylıkla ve bazen şiddetli olarak reaksiyona girerken kristalin bor kolay reaksiyona girmez. Bor yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyona girerek borik asit ve diğer ürünleri oluşturur. Mineral asitleri ile reaksiyonu, konsantrasyona ve sıcaklığa bağlı olarak yavaş veya patlama şeklinde olabilir ve ana ürün olarak borik asit oluşur (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001).

### 3.2. Ticari Bor Mineralleri

Çizelge 3.2'de verildiği gibi ticari öneme sahip olan bor mineralleri; tinkal, kolemanit, kernit, üleksit, pandemit, borasit, szaybelit, hidroborasit gibi minerallerdir.

Çizelge 3.2. Ticari önemi olan bor mineralleri (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001).

Mineral	Formülü	% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Bulunduğu yer
Boraks (Tinkal)	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .10H <sub>2</sub> O	36.6	Kırka,Emet,Bigadiç,A.B.D
Kernit (Razorit)	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .+ H <sub>2</sub> O	51.0	Kırka, A.B.D., Arjantin
Üleksit	NaCaB <sub>5</sub> O <sub>9</sub> .8H <sub>2</sub> O	43.0	Bigadiç, Kırka, Emet,Arjantin
Propertit	NaCaB <sub>5</sub> O <sub>9</sub> .5H <sub>2</sub> O	49.6	Kestelek, Emet, A.B.D
Kolemanit	Ca <sub>2</sub> B <sub>6</sub> O <sub>11</sub> .5H <sub>2</sub> O	50.8	Emet, Bigadiç, Küçükler,A.B.D
Pandemit (Priseit)	Ca <sub>4</sub> B <sub>10</sub> O <sub>19</sub> .7H <sub>2</sub> O	49.8	Sultançayır, Bigadiç
Borasit	Mg <sub>3</sub> B <sub>7</sub> O <sub>13</sub> Cl	62.2	Almanya
Szaybelit	MgBO <sub>2</sub> (OH)	41.4	B.D.T. (Eski S.S.C.B.)
Hidroborasit	CaMgBO <sub>11</sub> .6H <sub>2</sub> O	50.5	Emet

### 3.3. Ülkemizde ve Dünyada Bor

Bor, Türkiye'nin sahip olduğu çok önemli, ancak yeterince değerlendirmediği endüstriyel hammaddelerinden biridir. Ülkemiz, gerek bor minerallerinin sahip olduğu rezerv potansiyeli, gerekse işletme maliyeti ve tenör avantajları ile dünyada en önemli potansiyele sahiptir. Eti grubunun en büyük rakibi US Borax'ın web sayfasında da belirttiği üzere dünyada bor kullanan endüstriler gün geçtikçe gelişmekte ve yeni kullanım alanları ortaya çıkmaktadır. Bir zamanlar elinde ülkenin en önemli krom, alüminyum, gümüş, bakır v.b. maden ve işletmelerine sahip olan Eti grubunun elinde bugün sadece Bor İşletmeleri kalmıştır. 15-20 milyon dolarlık iç pazar hariç Eti grubu 1.2 milyar dolar olduğu söylenen Bor pazarından yılda 180-236 milyon dolar arası gelir elde edebilmiştir. Bu gelir düzeyi sahip olunan potansiyele göre yeterli değildir, dolayısı ile bu gelirin artırılması gerekmektedir (Üncü ve Yerlikayalar, 2004).

Dünya bor rezervleri hakkında güvenilir kesin bir rakam vermek güç olmakla birlikte, Çizelge 3.3.'e göre dünya rezervi yaklaşık 369 milyon ton B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve toplam rezerv ise 1.176 milyon ton B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olarak verilmektedir (Eti Maden İşl. Gen. Müd.).

Çizelge 3.3. Rezervler ve bor kaynakları (milyon ton B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),(Eti Maden İşl. Gen. Müd.).

Ülke	Görünür Ekonomik Rezerv	Muhtemel Rezerv	Toplam Rezerv	Toplam Rezervdeki Pay(%)
Türkiye	227	624	851	72,20
A.B.D.	40	40	80	6,80
Rusya	40	60	100	8.50
Çin	27	9	36	3,10
Arjantin	2	7	9	0,80
Bolivya	4	15	19	1,60
Şili	8	33	41	3,50
Peru	4	18	22	1,90
Kazakistan	14	1	15	1,30
Sırbistan	3	0	3	0,30
<b>TOPLAM (Bin Ton)</b>	<b>369</b>	<b>807</b>	<b>1.176</b>	<b>100.00</b>

Dünyanın önemli bor yataklarının ise; Türkiye, Rusya ve ABD'de olduğu bilinmektedir. Dünya toplam bor rezervi sıralamasında Türkiye %72'lik pay ile ilk sıradadır. Dünyadaki en önemli bor üreticileri; Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü (Türkiye) ve Rio Tinto (ABD)'dur. Bu iki kuruluş dünya bor üretiminin yaklaşık %70'ini gerçekleştirmektedir.

### **3.4. Bor Ürünlerinin Başlıca Kullanım Alanları**

Çok çeşitli sektörlerde kullanılan bor mineralleri ve ürünlerinin kullanım alanları giderek artmaktadır. Üretilen bor minerallerinin % 10'a yakın bir bölümü doğrudan mineral olarak tüketilirken, geriye kalan kısmı bor ürünleri elde etmek için kullanılmaktadır. Bor'un çeşitli endüstrilerdeki kullanımına ilişkin bazı bilgiler aşağıda sıralanmıştır (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001).

#### **3.4.1. Cam sanayi**

Bor, cam sanayisinde borosilikat cam üretiminde kullanılmaktadır. Camın ısıya dayanımını artıran bor; yansıtma, kırılma, parlama gibi özelliklerini de arttırmaktadır. Bor, camı asit ve çizilmeye karşı korur. Cam tipine bağlı olarak; cam eriğinin % 0,5 ile % 0,23'ü bor oksitten oluşmaktadır. Örneğin Pyrex'de % 13,5 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vardır. Genellikle cama boraks, kolemanit, borik asit halinde karma olarak ilave edilmektedir (Eti Maden İşl. Gen. Müd.).

#### **3.4.2. Seramik sektörü**

Seramik sektöründe bor oksit olarak emayelerin akışkanlığını ve doyunlaşma ısını azaltmak amacı ile kullanılır. Özellikle emayeye katılan hammaddelerin % 17-32'si borik oksit olup, sulu boraks tercih edilir. Bazı hallerde bor oksit veya susuz boraks da kullanılır. Metale kaplanan emaye onun paslanmasını önler ve görünüşüne güzellik katar. Çelik, alüminyum, bakır, altın ve gümüş emaye ile kaplanabilir. Emaye asite karşı dayanıklılığı artırır. Mutfak aletlerinin çoğu emaye kaplamalıdır. Banyolar, kimya sanayi teçhizatı, su tankları, silahlar v.b. de kaplanır (Eti Maden İşl. Gen. Müd.).

### 3.4.3. Deterjan sanayi

Sabun ve deterjanlara mikrop öldürücü (jermisit) ve su yumuşatıcı etkisi nedeniyle % 10 boraks dekahidrat ve beyazlatıcı etkisini artırmak için toz deterjanlara % 10-20 oranında sodyum perborat katılmaktadır (Eti Maden İşl. Gen. Müd.).

### 3.4.4. Tarım sanayi

Bor mineralleri bitki örtüsünün gelişmesini artırmak veya önlemek maksadıyla kullanılmaktadır. Bor, değişken ölçülerde, birçok bitkinin temel besin maddesidir. Bor eksikliği görülen bitkiler arasında yumru köklü bitkiler (özellikle şeker pancarı) kaba yoncalar, meyve ağaçları, armut, zeytin, kahve, tütün ve pamuk sayılmaktadır. Bu gibi hallerde susuz boraks ve boraks pentahidrat içeren karışık bir gübre kullanılmaktadır. Bu da, suda çabuk eriyebilen sodyum pentaborat ( $\text{NaB}_5\text{O}_8 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) veya disodyum oktaboratın ( $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}$ ) tarım ürününün üzerine püskürtülmesi suretiyle uygulanmaktadır.

Bor bitkilerin köklerinin ve yapraklarının gelişmesine, çiçek açmasına, polen üretimine, filizin gelişmesine, tohum ve meyve vermesine yardımcı olur (Eti Maden İşl. Gen. Müd.).

### 3.4.5. Diğer kullanım alanları

İnşaat-çimento sektöründe; mukavemet artırıcı ve izolasyon amaçlı (daha sağlam, hafif ve depreme-ısıya dayanıklı binaların yapılmasında, yalıtımda).

Cam elyafı üretiminde; lastik ve kağıtta yer edinmiş olan cam elyaf, hafifliği, fiyatının düşüklüğü, kimyasal etkilere dayanıklılığı nedeniyle plastiklerde kullanılmaktadır. Böylece sertleşmiş plastikler otomotiv, uçak sanayilerinde, çelik ve diğer metalleri ikame etmeye başlamıştır. Ayrıca, spor malzemelerinde de (kayaklar, tenis raketleri v.b.) kullanılmaktadır.

Ahşap korumada; bakteri ve çürümeye karşı koruyucu ve alev geciktirici olarak kullanılmaktadır

Yanmayı önleyici (geciktirici) maddelerde borik asit ve bor bileşikleri; selülozik maddelerde, ateşe karşı dayanıklılık sağlarlar. Tutuşma sıcaklığına gelmeden selülozdaki su moleküllerini uzaklaştırırlar ve oluşan kömürün yüzeyini kaplayarak daha ileri bir yanmayı engellerler. Bor bileşikleri plastiklerde yanmayı önleyici olarak giderek artan oranlarda kullanılmaktadır. Bu amaç için kullanılan bor bileşiklerinin başında çinko borat, baryum metaborat ve amonyum fluoborat gelmektedir.

Nükleer uygulamalarda; atom reaktörlerinde borlu çelikler, bor karbürler ve titanbor alaşımları kullanılır. Paslanmaz borlu çelik, nötron absorbanı olarak tercih edilmektedir. Yaklaşık her bir bor atomu bir nötron absorbe etmektedir. Atom reaktörlerinin kontrol sistemleri ile soğutma havuzlarında ve reaktörün alarm ile kapatılmasında bor kullanılır. Ayrıca, nükleer atıkların depolanması için kolemanit kullanılmaktadır.

Metalurji’de bor bileşikleri; yüksek sıcaklıklarda düzgün, yapışkan, koruyucu ve temiz, çapaksız bir sıvı oluşturma özelliği nedeniyle demir dışı metal sanayinde koruyucu, cüruf oluşturu ve ergitmeyi hızlandırıcı madde olarak kullanılmaktadır. Bor bileşikleri, elektrolit kaplama sanayinde, elektrolit elde edilmesinde sarf edilmektedir. Borik asit nikel kaplamada, fluoboratlar ve fluoborik asitler ise; kalay kurşun, bakır, nikel gibi demir dışı metaller için elektrolit olarak kullanılmaktadır. Alaşımlarda, çeşitli mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacı ile dökme demir, çelik gibi malzemelerde yoğun kullanım alanı bulunmaktadır. Bu konuda ferrobör oldukça önem kazanmıştır.

Otomobil hava yastıkları ve antifrizde bor; hava yastıklarının hemen şişmesini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Çarpma anında, elementel bor ile potasyum nitrat toz karışımı elektronik sensör ile harekete geçirilir. Sistemin harekete geçirilmesi ve hava yastıklarının harekete geçirilmesi için geçen toplam zaman 40 milisaniyedir. Ayrıca otomobillerde antifriz olarak ve hidrolik sistemlerde de kullanılmaktadır.



Sağlık sektöründe; BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) kanser tedavisinde kullanılmaktadır. Özellikle; beyin kanserlerinin tedavisinde hasta hücrelerin seçilerek imha edilmesine yaraması ve sağlıklı hücelere zararının minimum düzeyde olması nedeniyle tercih nedeni olabilmektedir. Metabolizmadaki bor; kalsiyum, magnezyum ve fosfor dengesini ayarlar. Sağlıklı kemiklerin oluşumuna, kasların ve beyin fonksiyonlarının gelişimine yardım eder.

Yakıt olarak bor kimyasalları; özellikle füze yakıtı olarak kullanılmaktadır. Sodyum tetraborat, özel uygulamalarda yakıt katkı maddesi olarak kullanılmaktadırlar.

Atık temizlemede; sodyum borohidrat, atık sulardaki civa, kurşun, gümüş gibi ağır metallerin sulardan temizlenmesi amacıyla kullanılmaktadır.

Borlu katı yakıtlar/hücre yakıtları/(fuel cells); son günlerde sodyum borohidritinin kullanıldığı, sodyum borohidrattan enerji üreten hücre yakıtıyla ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Sodyum borohidratın kimyasal bağlarında hidrojen mevcut olup, katalist hidrojeni açığa çıkarmakta veya elektrik üretmektedir. Bu üretim de temel prensip ise su ile boraksın reaksiyonudur. Bu reaksiyondan üretilen hidrojen direk içten yanmalı motorlara beslenebilir veya hücre yakıtlarında kullanılabilirler.

Enerji üretimi ve ısı depolama bor; demir ve nadir toprak elementleri kombinasyonu % 70 enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu güçlü manyetik ürün; bilgisayar disk sürücüleri, otomobillerde doğru akım-motorları ve ev eşyaları ile portatif güç aletlerinde kullanılmaktadır. Son yıllarda , borların piller/aküler de kullanılması ile maliyetler düşürülmüş ve çevre dostu piller/aküler üretilmeye başlanmıştır.

Fiber optik, kozmetik, kauçuk ve plastik sanayi, fotoğrafçılık, patlayıcı maddeler (havai fişek vb.), hidrolik yağlar, petrol boyaları, yanmayan ve erimeyen boyalar, tekstil boyaları, zımpara ve aşındırıcılar, kompozit malzemeler, manyetik cihazlar, ileri teknoloji araştırmaları (moleküler biyoloji vb.), mumyalama ve bunun gibi diğer birçok alanda kullanılmaktadır (Eti Maden İşl. Gen. Müd.).

#### 4. BORLAMA

Borlama, günümüzde endüstri kullanımı için geliştirilmiş termokimyasal işlemlerden biridir (Şen, et al., 2005). Borlama işlemi yalnız demir esaslı metallere değil, demir dışı metallere de uygulanmaktadır (Delikanlı vd., 2003). Borlama, demir ve demir dışı metallerin aşınma dayanımını, yüzey sertliğini ve korozyon direncini geliştiren önemli bir termokimyasal işlemdir. Borlama işleminde, bor atomları iş parçasının yüzeyine yayılır ve metal yüzeyinde borür şeklinde biçimlenirler. Borlama katı, sıvı veya gaz ortamda gerçekleştirilebilir. Çeşitli borlama türleri arasında kutu borlama en sık kullanılanıdır. Endüstriyel borlama çoğunlukla çelik ve demir alaşımlara uygulanmaktadır (Yu, et al., 2005).

Borlama işlemi yüzeyi iyi temizlenmiş malzemelere 700-1000°C sıcaklık aralığında, 1-10 saat sürelerde katı, sıvı veya gaz gibi çeşitli ortamlarda uygulanabilmektedir. Demir esaslı malzemelerin borlanması, malzeme yüzeyinde  $Fe_2B$  veya  $Fe_2B + FeB$  fazları oluşur (Şen, 1997). Bor potansiyelinin düşük olduğu durumlarda, borür tabakasında yalnızca  $Fe_2B$  fazı görülmektedir. Yüksek bor aktivitesinde,  $Fe_2B$  fazı ile birlikte  $FeB$  fazı da görülmektedir. İstenen tek fazlı yapıda  $Fe_2B$  fazı,  $FeB$  fazının çok sert, fakat kırılgan olması nedeniyle tercih edilmektedir (Keddam, 2004).

Alaşımli çeliklerde ve diğer malzemelerde kendi alaşım elementlerinin borürleri oluşur. Çizelge 4.1' de bazı malzemelerde borlama ile elde edilen borürler ve mikrosertlik değerleri verilmiştir (Delikanlı vd., 2003).

Çizelge 4.1. Çeşitli metallere elde edilen borür fazları ve mikro sertlikleri (Delikanlı vd., 2003).

Borlanan Alt Yüzey	Borür Tabakasındaki Fazlar	Borür Tabakasının Sertliği (HV)
Fe	FeB	1900-2100
	Fe <sub>2</sub> B	1800-2000
Co	CoB	1850
	Co <sub>2</sub> B	1500-1600
	Co <sub>3</sub> B	700-800
Ni	Ni <sub>4</sub> B <sub>3</sub>	1600
	Ni <sub>2</sub> B <sub>3</sub>	1500
	Ni <sub>3</sub> B	900
Mo	Mo <sub>2</sub> B	1660
	MoB <sub>2</sub>	2330
	Mo <sub>2</sub> B <sub>5</sub>	2400-2700

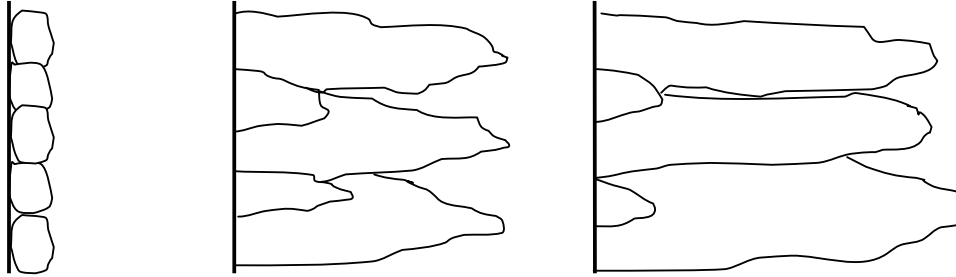
#### 4.1. Borlama İşlemi

Borlama, termokimyasal yüzey sertleştirme işlemi olup, bor elementinin yüksek sıcaklıkta metal yüzeyine yayılması ile yüzeyde borür tabakası elde etme işlemidir (Keddam, 2004). Demir borürler termal ve elektrik iletkenliği gibi özelliklerinden başka yüksek sertlik gibi tipik seramik özellikleri de gösteren bileşiklerdir. Tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları gibi mikro hatalar ile yüzey pürüzlülükleri ve çizikler gibi yüzeyin daha reaktif olduğu yerler borür tabakası oluşumunun başlangıç noktalarıdır. Bu noktalarda Fe<sub>2</sub>B çekirdekleri oluşur ve gelişir.

C. Martini ve G. Palombarini, borlama işlemi büyüme mekanizmasının 3 aşamada gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Birinci aşamada, Fe<sub>2</sub>B kristalleri (ilk biçimlenen ürün) metal yüzeyinde gelişir. İkinci aşamada, önemli miktarda Fe<sub>2</sub>B kristali biçimlenir ve malzeme içerisine doğru büyür. Son aşamada, iç kısımdaki Fe<sub>2</sub>B tabakası üzerinde gelişen FeB tabakası incelenebilir.

Borlamanın birinci aşamasında borlayıcı ortam ve malzeme yüzeyindeki reaksiyon bölgeleri arasında reaksiyon oluşur. Taneler yüzeyde çekirdek oluşturmaktadır. Borlama süresi ile çekirdek oluşumu artar ve ince bir bor tabakası elde

edilir. Bor, FeB ve Fe<sub>2</sub>B yapısında çeliğin yüzeyine yayılır. Borlama işlemi sırasında, ilk borür çekirdeği numunenin yüzeyinde oluşmaktadır (Şekil 4.1.).

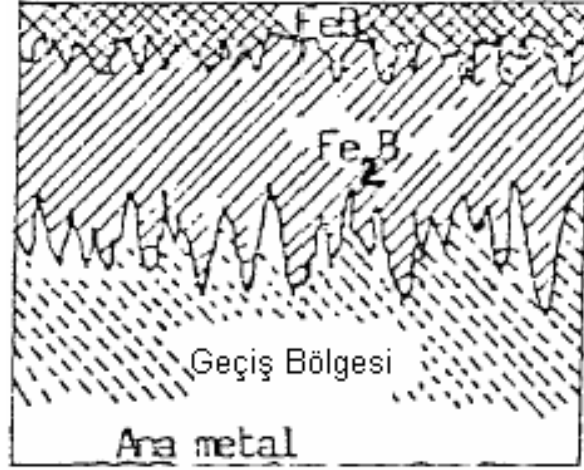


Şekil 4.1. Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması (Bayça ve Şahin, 2004).

Oluşan ilk borür çekirdeği numune içinde büyür. Bor atomları kafes yapının 001 doğrultusunda daha hızlı yayıldığı için FeB ve Fe<sub>2</sub>B 001 boyunca yönlenir. Bu yüzden borür taneleri 001 yönünde yüzeye dik daha hızlı büyür. Borür tanelerinin diğer yönlerde büyümesi daha yavaştır. Bu nedenle kolonsal yapı oluşur. Önce Fe<sub>2</sub>B fazı oluşur, ortamda yeterince bor konsantrasyonu varsa FeB fazı da oluşur. İlk önce oluşan Fe<sub>2</sub>B fazı uzun sürede büyümektedir. Borür tabakaları çeliğin yüzeyinden içeriye doğru FeBx → FeB → Fe<sub>2</sub>B yapısında oluşur. Borlamanın son aşamasında sadece FeB fazı oluşur. FeB fazı Fe<sub>2</sub>B fazından daha kısa sürede büyür. Bu yüzden FeB fazının dokusu Fe<sub>2</sub>B fazı kadar güçlü değildir (Bayça ve Şahin, 2004).

#### 4.2. Borür Tabakası

Bu tabaka malzemenin en dış yüzeyi ile yüzeyin altındaki parmaklı (dişli) kısma verilen addır. Ortamdaki bor miktarının fazla olduğu işlem şartlarında sadece Fe<sub>2</sub>B oluşmaz aynı zamanda Fe<sub>2</sub>B'a göre borca daha zengin olan FeB'da meydana gelebilir. Borür tabakasının kalınlığı malzemenin kimyasal bileşiminin yanı sıra işlem sıcaklığı, işlem yöntemi ve süresine bağlıdır. Şekil 4.2' de borür tabakası, geçiş bölgesi ve ana yapının şematik resmi verilmiştir (Delikanlı vd., 2003).



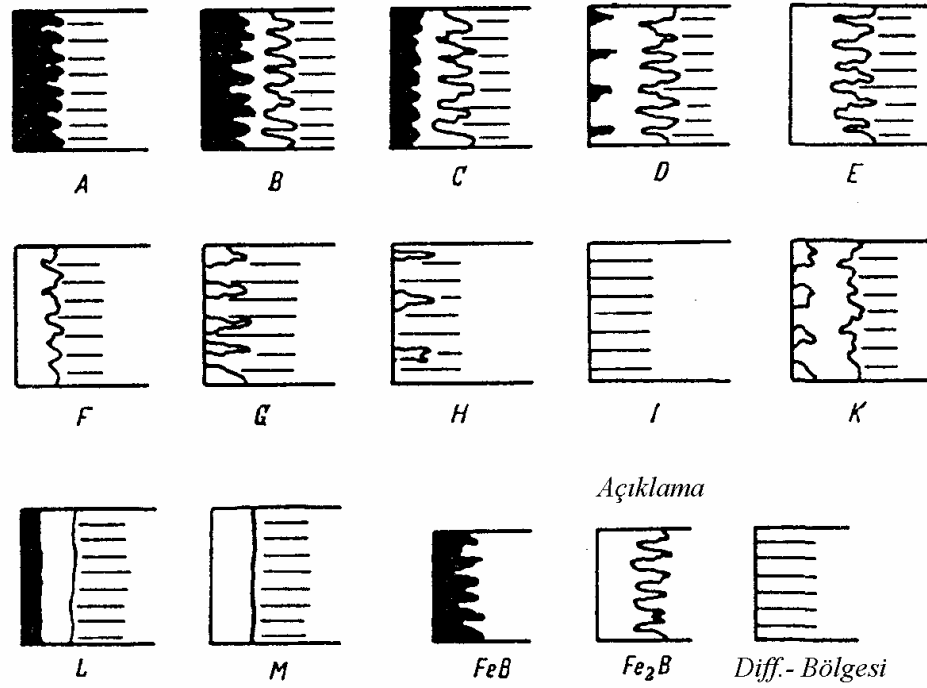
Şekil 4.2. Borür tabakası, geçiş bölgesi ve ana yapının şematik resmi (Delikanlı vd., 2003).

FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazları birbirlerine çekme ve basma gerilmeleri uygulamakta ve fazlar arasında genellikle yüzeye paralel ve yer yer dik çatlaklar oluşturmaktadır. Dolayısıyla borür tabakasında mümkün olduğunca çok az oranda FeB fazının oluşturulmasına çalışılmalıdır (Delikanlı vd., 2003).

#### 4.3. Borür Tabakalarının Sınıflandırılması

Bor vericilerin borlama işlemi için uygun olup olmadığı, yapılacak metalografik incelemeler ile tespit edilebilir. Parlatılmış metalik bir numunede FeB ve Fe<sub>2</sub>B kolayca görülebilir. Ayrıca borür tabaka kalitesi, poroziteler ve tabaka yapısını tayin etmek mümkündür.

Şekil 4.3'de görüldüğü üzere Kunst ve Schaber bir sistem geliştirmişlerdir. Her bir grubu bu tabakaların görünüş ve faz dağılımlarına göre düzenlemişlerdir.



Şekil 4.3 Borür tabakası çeşitleri (Matuschka, 1980).

Bu tabaka türlerinden, tabaka yapısının özelliklerini belirlemek mümkün değildir. Yapılan bu sistemle borür tabakasının görünüşünün sınıflandırılmasına ve borlama işleminin uygun olup olmadığı anlaşılabilir.

Tabaka türleri aşağıdaki gibi karakterize edilmektedir:

- A. Tek fazlı tabaka, çoğunlukla FeB,
- B. İki fazlı tabaka, FeB ve Fe<sub>2</sub>B,
- C. İki fazlı tabaka, FeB tabakasının B'ye göre daha ince olduğu yapı ,
- D. İki fazlı tabaka, FeB fazlarının ayrı olduğu yapı,
- E. Tek fazlı tabaka, büyük oranda Fe<sub>2</sub>B fazından oluşan, belirgin kolonsal yapılı,
- F. Tek fazlı tabaka, büyük oranda Fe<sub>2</sub>B fazından oluşan, daha az belirgin kolonsal yapılı,
- G. Birbirinden ayrı Fe<sub>2</sub>B kolonları,
- H. Birbirinden ayrı ve uzak Fe<sub>2</sub>B kolonları,
- İ. Difüzyon bölgesi,

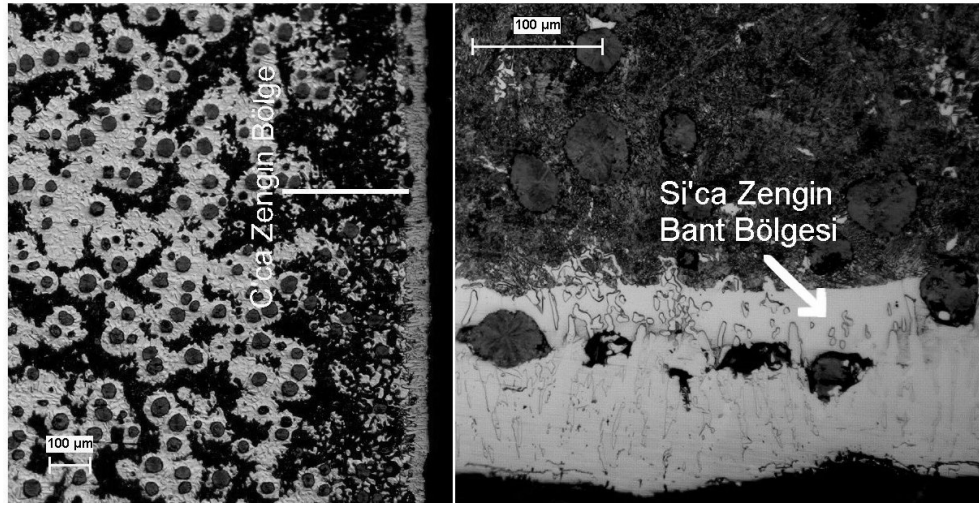
- K. Bozulmuş tabaka,
- L. FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazından oluşan, dişli yapıda olmayan iki fazlı tabaka,
- M. Fe<sub>2</sub>B fazından oluşan ve dişli yapıda olmayan tek fazlı tabaka.

Endüstride E ve F tipi borür tabakaları tercih edilmektedir. Mineraller tarafından aşınma ortamında ise D tipi borür tabakası tercih edilir. Tek fazlı borür tabakası(Fe<sub>2</sub>B) düşük kırılgenliği, yapışma mukavemetini azaltmadan ve borür tabakasının özelliklerini bozmadan borlama işlemi sonrası ana malzemeye yapılabilecek bir ısıl işleme olanak sağlaması gibi bir çok avantaja sahiptir (Matuschka, 1980).

#### 4.4. Geçiş Bölgesi

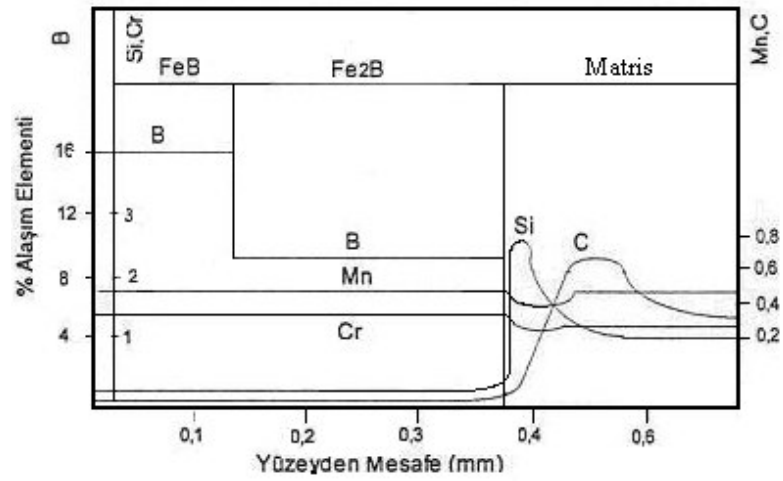
Bu bölge, borür tabakası ile ana yapı (matris) arasında kalan bölgeye verilen addır. Borlama işlemi esnasında, çelik bileşiminde bulunan elementler bu bölgede yeniden dağılarak şekillenirler. FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakalarının karbon ve silisyum gibi elementleri çözündürememesi nedeniyle bu elementler yüzeyden içeri doğru itilir. Bunun neticesiyle de bu geçiş bölgesinin meydana geldiği bilinmektedir (Delikanlı K. vd., 2003).

Araştırmalar sonucunda karbon elementinin borür tabakasında çözünmeyip, matrise doğru difüze olduğu ve karbon bileşimine bağlı olarak perlit fazı miktarının arttığı belirtilmektedir (Şekil 4.4, (a)). Silisyum, karbona benzer şekilde borür tabakası içinde çözünmemektedir ve borlama işlemi sırasında malzemenin iç kısmına doğru itilerek, borür tabakası ve matris ara yüzeyinde silisyumca zengin bant bölgesinin oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 4.4, (b)). Oluşan bant şeklindeki ferritik bölge, borür tabakasının aşınma direncini azaltması sebebiyle ferrit oluşturucu bu elementleri fazla miktarda içeren malzemeler, borlama işlemi için pek tercih edilmemektedir. Karbon ve silisyum elementlerinin matrise doğru yayını, çeliklerde borür tabakası boyunca elementlerin dağılımını gösteren Şekil 4.4 (c)'de gösterilmiştir (Şen, 1997).



(a)

(b)



(c)

Şekil 4.4. 850°C'de 6 saat borlanmış DDK 60 numune, (50X, %10 pikral), (a); 900°C'de 8 saat borlanmış DDK 60 numune, (200X, %10 pikral), (b); Çeliklerde borür tabakası boyunca elementlerin şematik olarak gösterimi, (c); (Şen, 1997).

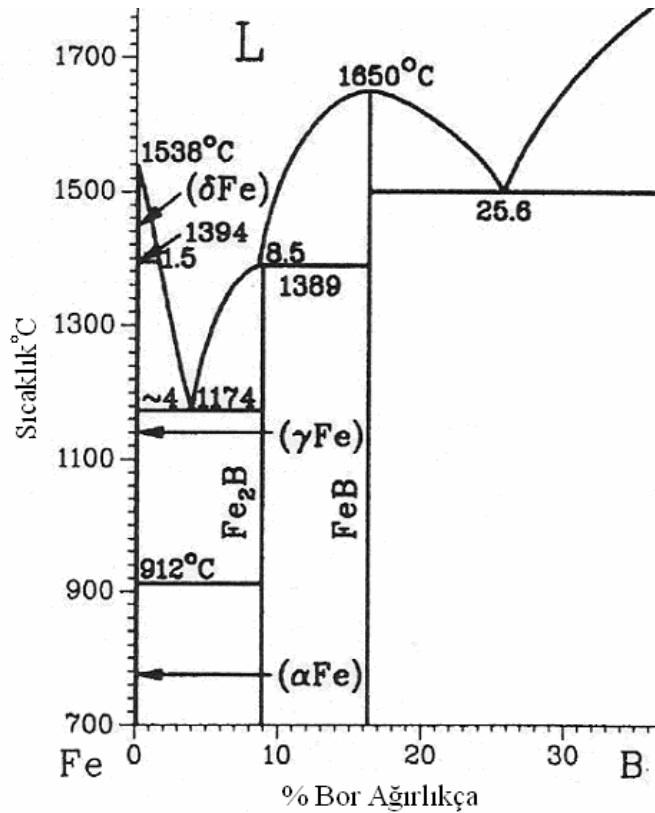
#### 4.5. Fe-B İkili Denge Diyagramı

Borun atom çapı demirden %25 daha küçük olduğundan bu elementte katı eriyik yapar. Demirde bor erirliği sıcaklığa bağlı olarak ferrit fazında 20-80 ppm, ostenit



fazında ise 55-260 ppm kadardır. Bor, ostenitte arayer katı eriyiği ferritte ise yer alan katı eriyiği yapar (Delikanlı vd., 2003).

Demir bor denge diyagramına göre; ağırlık olarak % 8.8 bor oranında  $Fe_2B$  ve %16.2 bor oranında  $FeB$  olmak üzerinde iki tür borür ve ergime noktası  $1174\text{ }^\circ\text{C}$  olan ~%4 bor oranında bir ötektik faz oluşmaktadır. Dolayısı ile borlanmış yüzey bu sıcaklığa kadar ısıdan etkilenmemektedir. Şekil 4.5.'de demir bor denge diyagramı gösterilmektedir (Özsoy, 1991).



Şekil 4.5. Kısmi Fe-B denge diyagramı (ASM Handbook, Volume 3).

#### 4.6. $Fe_2B$ ve $FeB$ Fazlarının Özellikleri

Difüzyon yönüne bağlı olarak, kolonsal yapı sergileyen tek fazlı  $Fe_2B$  fazı, çift fazlı  $Fe_2B+FeB$  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 tabakalar elde edilmeye çalışılmaktadır.

Genellikle, borür tabakalarının tribolojik özelliklerinin belirlenmesinde mikroyapıya bağlı olarak açıklamalar yapılmaktadır. Çift fazlı FeB+Fe<sub>2</sub>B tabakası, tek fazlı Fe<sub>2</sub>B tabakasına göre iyi özelliklere sahip değildir. Çift fazlı tabakalarda yüzeyin hemen altında porozite oluşumu mümkün olmaktadır. Borlama işlemi ile, borür tabakasının ince olması durumunda, porozite oluşumu ve tabakanın kalkma riskinin az olduğu düşünülmektedir.

Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucunda, Fe<sub>2</sub>B fazının hakim olduğu dış yapısına benzer kolonsal bir yapının oluşması da tercih edilmektedir. Çift fazlı FeB+Fe<sub>2</sub>B tabakası, vakum veya tuz banyosunda 800°C sıcaklık civarında uzun süre ısıtılma işlemine tabi tutulduğu takdirde, tek fazlı Fe<sub>2</sub>B fazı elde edilebilmektedir. Fe<sub>2</sub>B ve FeB fazlarının tipik özellikleri Çizelge 4.2 'de verilmektedir (Şen, 1997).

Çizelge 4.2. Fe<sub>2</sub>B ve FeB fazlarının tipik özellikleri (Şen,1997).

Özellik	Fe <sub>2</sub> B	FeB
Kristal Yapı	HMT	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 <sup>3</sup> )	7.43	6.75
Termal genişleme 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 iletkenlik (W/m °K)	30.1 (20°C)	12.0 (20°C)
Elektriksel direnç (10 <sup>-6</sup> Ω.cm)	38	80
Renk	Gri	Gri

#### 4.7. Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması

Demir borürler, seramiklerin yüksek sertlik özellikleri ile metallerin termal ve elektriksel iletkenlik gibi genel özelliklerini birada bulunduran bileşikleridir.

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 Fe<sub>2</sub>B fazı ve iç kısımda geçiş bölgesi yer almaktadır. FeB fazı ile Fe<sub>2</sub>B ve Fe<sub>2</sub>B ile matris ara yüzeyindeki yapının kolonsal olduğu bilinmektedir. Ancak, yüksek alaşımlı çeliklerde ara yüzey yapısının kolonsal yerine düz bir çizgi halinde olduğu bilinmektedir.

Borlama işlemi sonucu 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. Yapılan araştırmalarda, ilk oluşan borür fazının Fe<sub>2</sub>B olduğu bilinmektedir. Bor kaynağından ana metal üzerine yayılan bor atomları, bor tabakasına dik doğrultuda Fe<sub>2</sub>B kristalleri oluşturmakta ve bu kristaller kolonsal bir şekilde içeriye doğru ilerlemektedir. FeB fazının büyüme mekanizması, matrisin hemen üzerinde oluşan Fe<sub>2</sub>B fazı benzerlik göstermektedir. Aynı tabaka için FeB/ Fe<sub>2</sub>B ara yüzeyindeki kolonsallığın Fe<sub>2</sub>B/matris ara yüzeyine göre daha az olması; Fe<sub>2</sub>B fazının nispeten sünek olan bir malzeme üzerine büyümesi, FeB fazının ise daha sert bir tabaka üzerinde yayılması şeklinde açıklanır(Akbayır, 2005).

#### 4.8. Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği

Metallere uygulanan yüzey işlemlerinin çoğu, alaşım elementinin malzeme yüzeyine yayılması esasına dayanmaktadır. Genel olarak difüzyon işleminin gerçekleşmesi için iki temel kavram önem kazanmaktadır. Bunlar; difüzyonlanabilme ve difüzyon için gerekli olan itici güçtür. Difüzyon kontrollü işlemlerde bu özellik, sadece ana malzemenin yapısına bağlı değil, aynı zamanda tabaka yapısına da bağlı

olmaktadır. Bu temel karakteristikler difüzyonla yüzey sertleştirme işlemlerinde, kinetiğinin temelini teşkil etmektedir. Çeliğin iki klasik yüzey sertleştirme işlemi olan semantasyon ve nitürasyon, matris malzeme içerisinde C ve N'un yayılması esasına dayanmaktadır. Benzer şekilde bor difüzyonu da kütle taşıma ile gerçekleşmektedir. Bunun yanında matris metalin içerdiği alaşım elementlerinin bor difüzyonuna tek ya da birlikte etkileri de mevcuttur. Demir ve demir esaslı malzemeler borlama işlemine tabi tutuldukları zaman, malzeme yüzeyi üzerinde borür fazı başlangıçta çekirdek halinde büyümektedir. Borür fazları içerisinde hakim faz olarak Fe<sub>2</sub>B ve FeB fazları yer almaktadır. Difüzyon işlemi, bor atomlarının FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının içerisinde difüzyonu ile kontrollü olarak gerçekleşmektedir.

Borür tabaka kalınlığının karesi, zamanın bir fonksiyonu olarak Eşitlik 4.1'deki gibi tanımlanmıştır. Bu fonksiyondan elde edilecek grafiğin eğimi büyüme hız sabitini verir.

$$d^2 = K.t \quad (4.1)$$

d = Borür tabaka kalınlığı (cm)

t = Zaman (sn)

K = Büyüme hız sabiti (cm<sup>2</sup>/sn)'ni göstermektedir.

Arrhenius, sıcaklığın kimyasal tepkime hızlarına etkisini, deneysel olarak, gaz moleküller için geliştirmiş olduğu Eşitlik 4.2'deki bağıntıyla açıklamıştır. Bilim adamlarını ve mühendisleri ilgilendiren birçok tepkimenin hızları Arrhenius hız yasasına uyar ve bu nedenle Arrhenius eşitliği sık sık katı hal hız verilerinin çözümlenmesinde kullanılır.

$$K = K_0 \cdot e^{\left(\frac{Q}{RT}\right)} \quad (4.2)$$

$K$  = Büyüme hız sabiti ( $\text{cm}^2/\text{sn}$ )

$K_0$  = Frekans faktörü ( $\text{cm}^2/\text{sn}$ )

$Q$  = Borür tabakası büyüme aktivasyon enerjisi ( $\text{J/mol.}$ )

$R$  = Gaz sabiti,  $8,314$  ( $\text{J/mol.}^\circ\text{K}$ )

$T$  = Sıcaklık ( $^\circ\text{K}$ )

Arrhenus eşitliği yaygın olarak doğal logaritmalı haliyle Eşitlik 4.3'deki gibi yazılır ve bu eşitlik  $y = b + mx$  tipinde bir doğruyu gösterir. Bu durumda eşitlik 4.3'deki  $-Q/R$  niceliği  $m$  eğimine karşılık gelir. Buna göre  $\ln K$ ,  $1/T$  grafiği,  $-Q/R$  eğiminde bir doğru verir ve bu verilerle borür tabakası büyüme aktivasyon enerjisi ( $Q$ ) değeri hesaplanır (Akbayır, 2005).

$$\ln K = \ln K_0 - \frac{Q}{RT} \cdot \ln.e \quad (4.3)$$

Şen (1997), GGG-80 malzemesinde sıvı ortamda yapmış olduğu çalışmalar sonucu borür tabakası büyüme aktivasyon enerjisini  $125,52 \text{ kJ.mol}^{-1}$  bulmuştur.

Sen, et al., (2005), AISI 5140, AISI 4340, AISI D2 malzemelerinde yapmış oldukları borlama işlemi sonrası borür tabakası büyüme aktivasyon enerjisi değerlerini sırasıyla 223, 234 ve  $170 \text{ kJ.mol}^{-1}$  bulmuşlardır.

#### 4.9. Borlama İşleminin Avantajları

Borlama işleminin bazı avantajları aşağıda sıralanmıştır.

- Borlama işleminin en önemli karakteristik özelliği, elde edilen borür tabakasının çok yüksek sertlik ( $1450-5000 \text{ HV}$ ) ve ergime sıcaklığına sahip olmasıdır. Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme yöntemleri olan sementasyon ve nitrürasyona göre çok daha yüksektir. Hatta bu sertlik, sertleştirilmiş takım çeliklerinin ve sert krom kaplamanın sertliklerinden daha yüksek, tungsten karbürüne ise eşdeğerdir. Borlanmış çeliklerin ve diğer sert metallerin yüzey sertlikleri Çizelge 4.3'de verilmektedir.

- Borür tabakalarının yüksek yüzey sertliğine ve düşük sürtünme katsayısına sahip olmaları; adhezif, tribo-oksidasyon (kimyasal), yüzey yorulması ve abrazyon aşınma gibi temel aşınma mekanizmalarının oluşumunu önlemede çok önemli fayda sağlar. Bu sayede kalıp üreticilerinin, pahalı ve zor işlenen takım çelikleri yerine, üstelik orijinal malzemeninkinden daha üstün özelliklere ve aşınma direncine sahip olan kolay işlenen çelikleri kullanabilmeleri mümkün olmuştur. Bu ise takım ve kalıp ömrünü artırdığı gibi yağlayıcı kullanımını da azaltır.
- Borür tabakası, 550-660 ° C sıcaklıklarda bile sertliğini korumaktadır.
- Isıl işlem uygulanabilen malzemeler, performanslarını optimize etmek için borlama sonrası tamamen sertleştirilebilirler.
- Borlama, bir iş parçasının sertleştirilmesi istenen seçilmiş bölgelerine, düzensiz karmaşık şekillere üniform bir şekilde uygulanabilir.
- Borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin oksitleyici olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerin erozyon dirençlerini artırmaktadır. Bu özellikleri sebebiyle de endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Borlama işlemi ile, düşük alaşımlı çeliklerin, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ve HCl gibi asitlere karşı direncini artırmak mümkündür.
- Borlanmış yüzeyler çok yüksek sıcaklıklarda (850°C) orta seviyede oksidasyon direncine ve oldukça yüksek ergimiş metal korozyon direncine sahiptir.
- Oksitleyici ve korozif ortamlarda parçanın yorulma ömrünü artırır.
- Borlama yüzeyi, çok hassas bir şekilde parlatılabilir (Özbek, 1999)
- Demir dışı metal olan nikel ve alaşımlarının yüzey sertleştirme işlemi karbürizasyon ve nitrürasyon işlemleri ile, katı durumda karbon ve azotun çok az çözünmesi nedeniyle gerçekleştirilememektedir (Anthymidis, et al., 2002). Cr

ve Mo gibi nitür formu bulunan elementleri içeren nikel alaşımlarına nitürasyon işlemi uygulanmış fakat nitür tabakası kalınlığının çok ince olduğu tespit edilmiştir. Borlama işlemi kolayca uygulanabilen nikelde kalın tabakalar elde edilebilir ve bir çok metalde zor intermetalik bileşiklerin kolayca oluşabildiği borürler ile aşınma direnci önemli ölçüde artar (Ueda, et al., 2000).

Çizelge 4.3. Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması (Özbek, 1999).

Malzeme	Mikrosertlik (HV)
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 çeliği	630-700
Yüksek hız çeliği BM 42	900-910
Nitürlenmiş çelik	650-1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
Sementit karbürler, WC+Co	1160-1820(30kg)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +ZrO <sub>2</sub> seramikler	1483(30kg)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC+ZrO <sub>2</sub> seramikler	1730(30kg)
Elmas	~10000

#### 4.10. Borlama İşleminin Dezavantajları

Borlama işleminin bu avantajlarının yanı sıra bazı sınırlamaları da mevcuttur:

- Borlama işleminin ana dezavantajı borür tabakasının, özellikle FeB fazının kırılğan olmasıdır. Borür tabakalarının kırılmasında bir çok faktör rol oynayabilir. Birincisi, FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının çok sert olmaları; ikincisi, borür tabakaları arasında geniş sertlik değer farkının olmasıdır (Kukla and Pertek, 2003).

- Borlama teknikleri esnek değildirler. Yüksek derece el işçiliğine ihtiyaç duyulması sebebiyle otomatik işlem kontrolüne olanak sağlamaz (Kaestner, 2001). Gaz ortamında sementasyon ve plazma nitrürasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre işçilik ve işletim maliyeti daha yüksektir. Daha esnek olan gaz karbürizasyonu ve plazma nitrürasyonu işlemlerinin kısa sürede ve daha kolay gerçekleşmesi borlamaya göre avantajlar sağlamaktadır. Buna rağmen; yüksek sertlik ve kalıcı yüksek aşınma ve korozyon direncinin arzu edildiği durumlarda borlama işlemi tercih edilmektedir. Ucuz iş gücü temin edilebilen yerlerde de borlama tercih edilen bir işlemdir (Özbek, 1999).
- Borlama sonucu, parça kalınlığında artma meydana gelir. Bu oran ana malzemenin kompozisyonuna göre, borür tabaka kalınlığının %15-30'u arasında değişmektedir. Dolayısı ile borlanacak parçalar çok hassas boyutlarda kullanılacaksa, dizaynları yapılırken bu durum göz önüne alınmalıdır (Keith, 1997).
- Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde (2000 N) karbürizasyon ve nitrürasyonla kıyaslandığı zaman çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği sebebiyle, dişli üretiminde bir sınırlama söz konusudur.
- Borlama sonrası ısıtılacak olan çeliklerde borür tabakasının özelliklerinin korunması için inert atmosfer veya vakum gerekmektedir (Özbek, 1999).

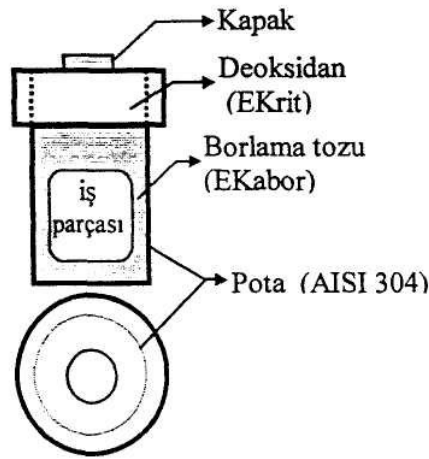
#### **4.11. Borlama Yöntemleri**

Borlamada, bor verici olarak herhangi bir bor bileşiği kullanılabilir. Borlama ortamı diğer katkı maddeleriyle birlikte katı, sıvı, gaz ve plazma halinde olabilir. Boraks esaslı elektrolitik veya elektrolitik olmayan sıvı ortam veya gaz ortamlarda yapılan borlama işlemlerinde parça yüzeyinin kirlenmesi, pratik uygulamalar açısından dezavantaj görülmektedir. Genellikle aktive edilmiş bor karbür ( $B_4C$ ) içeren katı ortam borlamasının teknik uygulamalarda daha uygun olduğu belirlenmektedir (Soyupak, 2004).



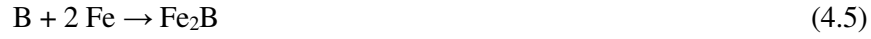
#### 4.11.1. Kutu borlama

Kutu borlama, borlanacak malzemenin bor verici ortam olan bir toz karışımı içerisinde belirli sıcaklık ve sürelerde bekletilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Borlanacak parçanın etrafı yeterli miktarda (yaklaşık 10-20 mm) borlama tozuyla kaplanarak üst kısma SiC gibi bir dolgu malzemesi doldurulur ve kapak, hava girişini mümkün mertebe engelleyecek şekilde kapatılır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Kutu borlama yönteminin şematik gösterimi (Özbek, 1999).

Kutu borlamada çok farklı bor bileşenleri kullanılabilir. Kutu borlamada kullanılan toz karışımlarını meydana getiren bileşenler; katı bor kaynağı, akışkanlar ve aktivatörlerdir. Ticari uygulamalarda genellikle bu toz karışımları kullanılarak yapılan kutu borlama tercih edilmektedir.  $B_4C$ 'den bor'un yalnız bırakılması için ortamda redüksiyonu sağlayacak bir madde (redüktan) bulunmalıdır. Redüktan madde olan SiC ile  $B_4C$  bileşiminden bor (elementel bor) elde edilir. Serbest kalan B'un oksijene afinitesi çok yüksektir ve oksijenle  $B_2O_3$  oluşturur. Bunu önlemek için ortamda yeterince SiC bulunmalıdır. Redüksiyon sağlayıcı SiC aynı zamanda demiri de redükler, böylece serbest kalan bor, demire yayılır. Borun demire yayılmasını  $KBF_4$  hızlandırır. Eşitlik 4.4 ve 4.5'de bu mekanizma gösterilmiştir (Bayça ve Şahin, 2004).



Sementasyona benzeyen bu yöntem; işlem kolaylığı, toz bileşiminin kolayca değiştirilebilmesi, faz bileşenlerinin fazla değişikliğe uğramaması, gerekli cihaz ve donanımın basitliği ve ekonomik yönden de ucuz olması gibi faktörler dolayısı ile geniş bir uygulama alanına sahiptir. Pota veya kutunun, yüksek iç gerilmeler, çatlaklar ve kalkmalara sebebiyet vermemesi ve yeniden toz ilavesiyle (%20-50) borlamaya devam edilebilmesi açısından fırın hacminin %60'ını geçmemesi tavsiye edilmektedir. Kutu olarak, alaşımsız çelik, paslanmaz çelik veya alümina kutular kullanılabilir. Homojen bir ısı dağılımı için borlanacak parçaların şekli fırına uygun olmalı ve yerleştirme bu durum göz önüne alınarak yapılmalıdır. Katı ortam borlamasında kullanılan bazı bor kaynakları Çizelge 4.4'de, literatürde rastlanan katı ortamda borlama bileşiklerine ait örnekler ise aşağıda verilmiştir (Özbek, 1999).

Tipik borlama toz karışımlarının bileşimleri (% ağırlıkça);

- %5 B<sub>4</sub>C, %90 SiC, %5 KBF<sub>4</sub>
- %50 B<sub>4</sub>C, %45 SiC, %5 KBF<sub>4</sub>
- %85 B<sub>4</sub>C, %15 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>
- %95 B<sub>4</sub>C, %5 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>
- %84 B<sub>4</sub>C, %16 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>
- Amorf bor (%95-97)
- %(40-80) B<sub>4</sub>C + %(20-60)Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- %60 B<sub>4</sub>C + %5 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %5NaF+%30 Demir oksit
- %50 Amorf bor + %1NH<sub>4</sub>F.HF + %49Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- % 100B<sub>4</sub>C
- %20 B<sub>4</sub>C + %5KBF<sub>4</sub> + %75 Grafit
- %95 Amorf bor, %5 KBF<sub>4</sub>

Çizelge 4.4. Katı ortamda borlama işleminde kullanılan bor kaynakları (Özbek, 1999).

Malzeme	Formülü	Molekül Ağırlığı	Teorik Bor Oranı (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Amorf Bor	B	10,82	95-97	2050
Ferro Bor	Fe-B	-	17-19	-
Borkarbür	B <sub>4</sub> C	55,29	77,28	2450

Yaygın olarak kullanılan bor kaynakları; bor karbür (B<sub>4</sub>C), ferrobör ve amorf bördür. Ferrobör ve amorf bor çok iyi bor kaynakları olup kalın bördür tabakası oluştururlar. Akışkan olarak SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, aktivatör olarak NaBF<sub>4</sub>, KBF<sub>4</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>BF<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>Cl, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, BaF<sub>2</sub> ve Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> kullanılmaktadır. Amorf bor oldukça pahalıdır. Ferro bor ucuz olsa bile ne ticari miktarlarda, ne de yeterli safiyette üretilmemektedir. Endüstriyel uygulamalar için sadece bor karbür kullanılmakta olup fiyatı hem nispeten daha ucuzdur, hem de kalitesinde bir değişim söz konusu değildir. Borlama işlemi uygun bir toz karışımı ile yapılabileceği gibi değişik ticari toz karışımları (Çizelge 4.5) ile de yapılabilmektedir(Özbek, 1999).

Çizelge 4.5. EKabor® borlama ürünlerinin özellikleri (Özbek, 1999).

Tip	Tane Boyutu (µm)	Yoğunluk gr/cm <sup>3</sup>	Özellik
EKabor 1®	≤150	1,80	Yüzey kalitesi en yüksek tabaka için; parça yüzeyine yapışmaya eğilimli
EKabor 2®	≤850	1,50	Mükemmel yüzey kalitesi; işlem sonrası parçadan kolaylıkla ayrılma
EKabor 3®	≤1,400	0,95	Çok iyi yüzey kalitesi; işlem sonrası toz akıcılığı hala iyidir
EKabor HM®	≤150	0,95-1,50	Çok iyi yüzey kalitesi; sert metal, küçük delik ve kalın tabakalar için
EKabor WB®	220-350	0,95	Oksijensiz gaz atmosferde, akışkan yatakta borlama için
EKabor Pasta®	-	1,90	Daldırma, fırça ile sürme ve püskürtme ile uygulanabilir, inert gaz altında çalışmalı
Ekrit®	≤420	1,55	Örtü malzemesi, borlama süresince toz borlama ürünlerine oksijen sızmasını önler

Kutu borlamada kullanılan pota, borlama işlemi boyunca bor kaynağının kaybını önlemek için tüm malzemeler doldurulduktan sonra ağız kısmı demir curufu veya oksitlenmeyi önleyecek bir madde(Ekrit®) ile kapatılmaktadır. Hazırlanan kutular, işlem sıcaklığına getirilmiş fırına yerleştirilir(Özbek, 1999).

Kutu borlama işlemin yüksek işlem sıcaklığı (800-1000 °C) ve uzun işlem sürelerinde (~3-16 saat) gerçekleşmesi gibi dezavantajları olmasına rağmen bir çok borlama yöntemi içinde, sadece kutu borlama işlemi geniş ölçüde kullanım alanı bulmuştur (Yu, et al., 2002).

#### **4.11.2. Sıvı Ortamda Borlama**

Metalik malzemelerin bor bileşimli ergimiş tuz banyosuna daldırılmalarıyla yapılmaktadır. Ergimiş tuz banyosu değişik oranlarda B<sub>4</sub>C, BaO, KC1, NaCl bileşiklerini içerir. BaO ilavesi, difüzyonu önemli ölçüde iyileştirir. Oluşan demir-bor tabakalarının tipik kalınlıkları 100-200 µm' dir. Bu yöntemin kullanımını; zehirlilik, patlayıcılık, doğa ve çevresel kirlilik gibi dezavantajları sınırlandırmaktadır. Sıvı ortam borlamasında, işlemin sonunda borlayıcı ortam bileşenlerinin parça yüzeyine yapışması ve bunların temizlenmesi için ek bir işlem gerekmesi sıvı borlamanın bir olumsuzluğudur (Soyupak, 2004; Karakan vd., 2002).

#### **4.11.3. Gaz Ortamda Borlama**

Bor hidritlerin termal parçalanması sonucu elde edilen buharla yapılan borlama işlemidir. Bu işlemde sıcaklık yükseltilebilir ve daha homojen difüzyon tabakası elde edilebilir. İşlem özellikle karışık şekilli parçaların borlanması ve homojen tabaka elde edilmek istendiğinde tercih edilen bir yöntemdir. Ancak sıvı ortamda borlama işleminde mevcut olan zehirlilik, patlayıcı doğa ve çevresel kirlilik gibi dezavantajları kullanımını sınırlamaktadır (Soyupak, 2004; Karakan vd., 2002).

#### 4.11.4. Plazma Borlama

Katı haldeki bir maddeyi enerji vererek sıvı, sıvı haldeki maddeyi enerji vererek gaz ve gaz durumdaki maddeyi enerji vererek plazma haline getirmek mümkündür. Plazma, içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötron veya molekül içeren karışımdır (Soyupak, 2004).

Plazma borlama, demir esaslı ve demir dışı metalik malzemelere uygulanan, Ar, H<sub>2</sub> gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, BF<sub>3</sub>, B(OCH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (trimetilborat) kullanarak, 800-1000 °C sıcaklıkta, yaklaşık 10<sup>-2</sup> Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan borlamadır. Mikroyapı ve Fe<sub>x</sub>B tabakalarının büyümesi; işlem sıcaklığı, gaz karışım oranları, malzeme kompozisyonları, işlem basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla kontrol edilebilmektedir (Karakan vd., 2002).

Geleneksel borlama yöntemlerinden sıvı borlama ve gaz borlama işlemi sonucu karşılaşılan çevresel kirlilik, zehirleyici maddeler ve patlayıcı olması gibi problemler, son yıllarda yapılan çalışmalarla geliştirilen plazma borlama işleminde de görülmektedir. Plazma borlama işleminde bor kaynağı olarak kullanılan B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ve BCl<sub>3</sub> gazlarının pahalı, zehirleyici, patlayıcı ve korozyona neden olması bunu doğrulamaktadır. Bununla birlikte plazma borlama işlemi geleneksel borlama yöntemlerine göre yüksek enerji verimliliği, düşük işlem sıcaklığı, minimum distorsiyon gibi bir çok avantajı da içermektedir (Yoon, et al., 1999).

## 5. AŞINMA

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.

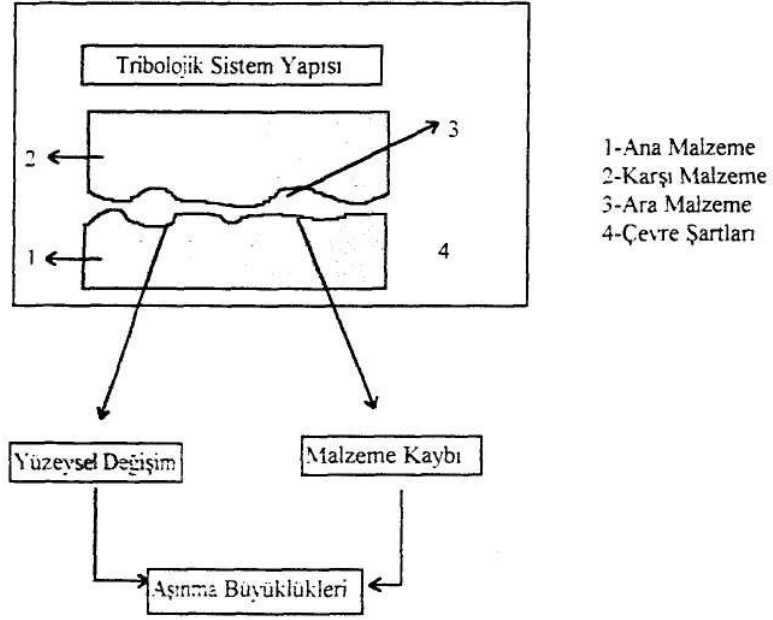
Bir aşınma sisteminde temel unsurları aşağıda sıralanmıştır:

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

Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte tribolojik sistem olarak adlandırılmaktadır ve Şekil 5.1 'da böyle bir sistemin şematik olarak gösterilişi verilmektedir (Şen, 1997).

### 5.1. Aşınma Hasarları

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

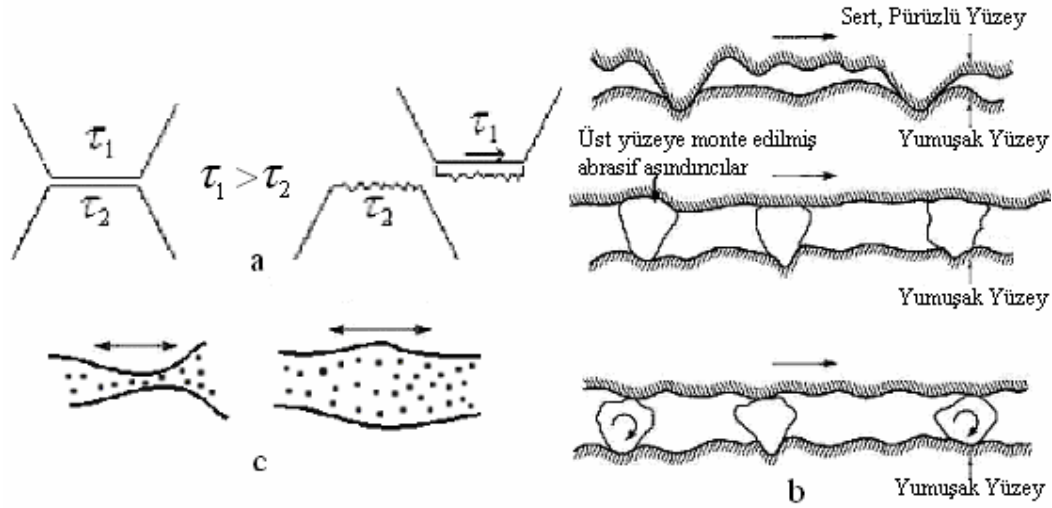


Şekil 5.1. Tribolojik bir sistemin şematik olarak gösterimi (Şen, 1997).

Kullanılan alaşım, aşınmanın meydana geldiği ortam şartları ve aşındırıcı ortamın cinsine göre, metaller ve alaşımlarının aşınmasının çok değişik mekanizmalar sonucunda oluştuğu belirtilmektedir. Holmberg, tipik aşınma mekanizmalarını dört ana grupta toplamış ve bunların;

- Adhezif aşınma,
- Abrazif aşınma,
- Yorulma aşınması,
- 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, adhezif aşınma (Şen, 1997), (a); abrazif aşınma (Bhushan, 1999), (b); ve kimyasal aşınma (c), (Şen, 1997).

## 5.2. Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma, hareket halindeki iki yüzeyin teması ve bu yüzeylerdeki pürüzlülüklerin birleşmesi sonucu bazı parçaların kopup diğer yüzeye eklenmesi veya yapışmasıyla meydana gelir (Bhushan, 1999). (Şekil 5.2a). Yüzeylerin birbirleri üzerinde yatay hareketleri, daha yumuşak olan malzemenin yüzey pürüzlülüklerinde dağılmalara ve malzemenin kalkmasına sebep olmaktadır. Adhezif aşınmada, koruyucu yüzey filmleri, yüzey pürüzlülükleri, yorulma çatlakları ve yabancı maddeler önemli rol almaktadır (Şen, 1997).

Karşılıklı çalışan metal yüzeyleri ne kadar hassas işlenmiş olursa olsun yine de moleküler düzgünlükte değildirler. Cisimlerin üst yüzeylerindeki bu pürüzlerin tepeleri birbirleriyle temas ettikleri anda moleküler adhezyon sonucu kopan parçaların diğer yüzeye bağlanması kaçınılmazdır (Akbayır, 2005).



### 5.3. Abrazif Aşınma

Şekil 5.2.(b) 'de görüldüğü üzere, abrazif aşınma; pürüzlü, kaba yüzeylerin veya parçacıkların daha yumuşak yüzey üzerinde hareketi ile bu yüzeyde plastik deformasyon veya kırılma sonucunda oluşan hasardır (Bhushan, 1999). 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.

Abrazif aşınma, çok hızlı bir şekilde gelişerek çok yüksek aşınma hızına sahip olan ve sistemin hasarına sebep olacak şekilde etkisini anında gösteren bir aşınma türüdür. Abrazif 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 abrazif 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 ara yüzeyde aşınmadan kaynaklanan parçacıklar bulunmaktadır. Bu ara yüzeyde yer alan taneler ya bir yüzeyden aşınarak gelir, yada 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 bilyeli değirmenler gösterilebilir.

Erozyonlu aşınma ise, sıvı veya hava gibi akışkan bir ortam vasıtasıyla aşındırıcı etmenlerin 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.

Bir malzemenin diğer bir malzeme tarafından önemli ölçüde abrazif aşınmaya uğratılabilmesi için, ikinci malzemeden çok daha yumuşak olması gerekmektedir. Bu sebeple, abrazif aşınmayı minimuma indirmek için, aşınmaya uğrayan malzemenin diğer malzemeye göre çok daha sert olması istenmektedir. Bu özellik, değişik metotlarla sağlanabilmektedir. Bunlar; a) alaşımlama, b) ısıl işlem ve c) malzemelerin yüzeylerine dışarıdan müdahale ederek sert yüzey tabakası oluşturmak suretiyle malzemelerin yüzey sertliği arttırmaktadır. Sert yüzey oluşturmak için, anodizasyon, elektro-kaplama, alev püskürtme, nitrürasyon, plazma sprey kaplama, borlama ve bunun gibi bir çok yöntem kullanılmaktadır. Malzemelere uygulanan çoğu yüzey işlemi, aşınmayı azaltmak veya sınırlandırmak amacıyla yapılmaktadır (Şen, 1997).

#### **5.4. Yorulma Aşınması**

Yorulma aşınması, metal yüzeyinin tekrar eden yükler altında yorulması sonucu ortaya çıkan bir hasardır. Oldukça düşük gerilmeler ve yüksek hız altında yapılan uygulamalarda metal yüzeyinde oyuklara benzer bir çok boşluk meydana gelmektedir. Yüzeyin yorulma aşınması normal yorulmaya nazaran bazı farklılıklar içermektedir. Birinci farklılık olarak, yüzey yorulmasının, kütleli yorulmaya göre yorulma dayanım sınırını göstermemesi söylenebilir.

Yorulma aşınması, makaralı, bilyeli yataklar ve birbirine temas eden dişlilerde kullanım ömrünü azaltmaktadır. Yüzeyin hemen altında, maksimum gerilmeye ulaşıldığı zaman, boşluk veya dislokasyonların yoğunlaştığı bölgelerde çatlaklar hızla ilerlemektedir. Yorulma aşınması, malzeme yüzeyinde 0.5 mm boyutuna varan büyüklüklerde oyuklaşmaların oluşmasına ve yüzeyin hızla hasara uğramasına neden olmaktadır (Şen, 1997).

### **5.5. Kimyasal Aşınma**

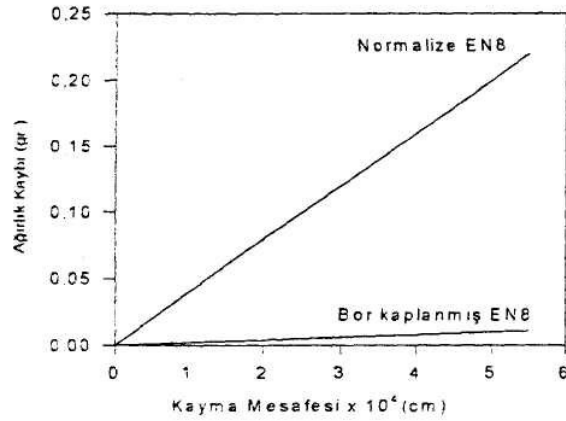
Kimyasal aşınmada, birbirine temas eden yüzeyler hava ile reaksiyona girerek, aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları meydana getirmektedirler. Bununla beraber, kimyasal maddelerin mevcut olduğu ortamlarda kullanılan makine parçalarının yüzeyleri, bu maddelerle reaksiyona girerek ince fakat sert tabakalar oluşturmaktadır. Değişken yük altında bu sert tabakalar kırılmakta ve oluşan sert parçacıklar aşınmaya neden olmaktadır (Şekil 5.2.c). Temiz kalan temas yüzeylerinde ise reaksiyon sonucu sürekli sert tabakalar oluşur ve yeniden kırılır. Olay bu şekilde devam eder (Şen, 1997).

### **5.6. Borlanmış Malzemelerin Aşınma Özellikleri**

Borlama işlemi ile oldukça sert yüzeyler elde edilir ve yüksek aşınma direncine ihtiyaç duyulan yerlerde, yani tribolojik uygulamalarda kullanılmaktadır. Borlama işlemi uygulanmış malzemelerin temas halinde sürtünme katsayıları genel olarak oldukça yüksektir. Tribolojik uygulamalarda en çok kullanılan demir veya titanyum'un oluşturduğu borürler ile yapılan borlama işlemleridir. Demir borür, çok düşük aşınma ve yüksek sürtünme direncini bir arada bulunduran ilginç tribolojik özelliğe sahip malzemeler olmaları sebebi ile fren sistemlerinde kullanılabilirler.

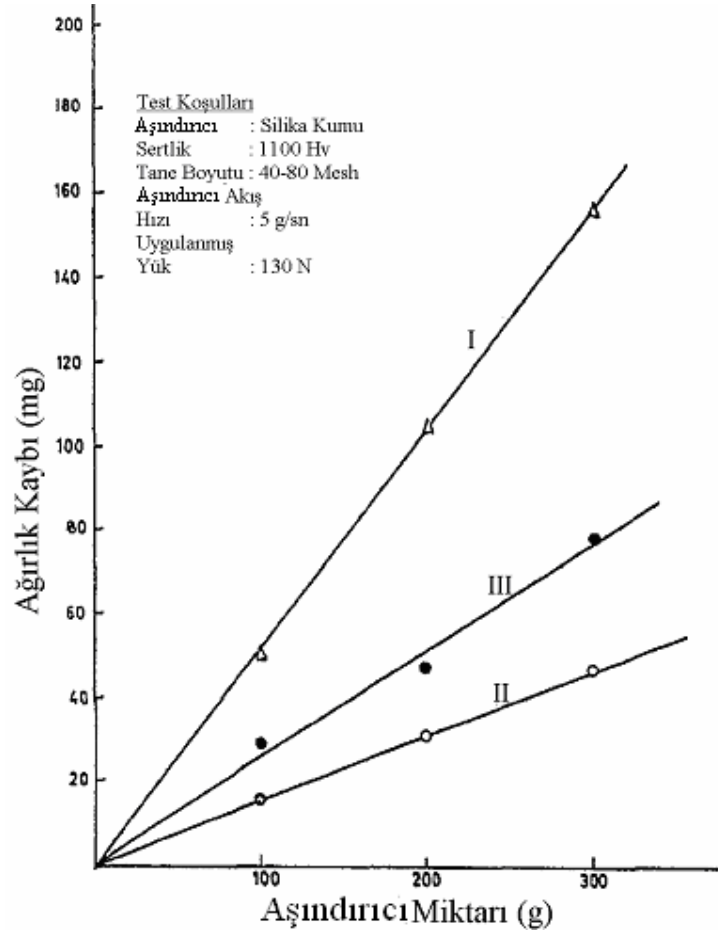
Literatürde, borlanmış çelikler üzerinde bir çok aşınma deneyinin yapıldığı belirtilirken, dökme demirlerin borlanması ve aşınma karakteristikleri hakkında yapılan çalışmalar sınırlı kalmaktadır.

Eyre, bazı çelikleri karbürleme ve borlama, gri dökme demiri ise borlama işlemine tabi tutarak, bu malzemelerin aşınma davranışlarını incelemiştir. Normalize edilmiş EN8 malzemesinin 8.5 kg yük altında 1800m'lik mesafede yapılan aşınma deneyinde, aşınmanın meydana geldiğini ve borlanmış EN8 malzemesinin aşınma miktarının ise ihmal edilebilir seviyede olduğunu tespit etmiştir (Şekil 5.3), (Şen,1997).



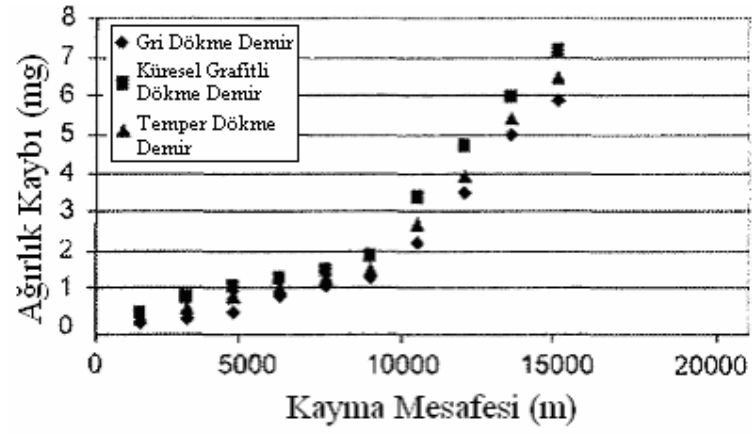
Şekil 5.3. Normalize edilmiş ve borlanmış EN8 çeliğinin 8.5 kg yük altındaki aşınma davranışı (Şen, 1997).

Mann (1997), 900 °C'de 6 saat borlama işlemine tabi tuttuğu 13Cr-4Ni paslanmaz çeliğinin ve yine aynı malzemenin aynı şartlarda borlanmasından sonra 600 °C'de temperlenmesinden sonra bu iki malzeme arasındaki aşınma davranışlarını incelemiştir. Şekil 5.4 'de görüldüğü üzere borlanmış malzemenin, borlanmış-temperlenmiş ve işlem görmemiş malzemeye göre daha iyi aşınma özellikleri gösterdiğini belirtmiştir.



Şekil 5.4. 13-Cr-4Ni paslanmaz çeliği için farklı miktarlarda kullanılan silika kumunun aşınmaya etkisi. Ana malzeme ( I ), borlanmış malzeme ( II ), borlanmış ve temperlenmiş malzeme ( III ) (Mann, 1997).

Meric vd., (2005), borlama işlemi yaptıkları gri dökme demir, küresel grafitli dökme demir ve temper dökme demirle, 13.7 Newton yük altında ve 15000 m'lik mesafede yaptıkları aşınma deneylerinde, ağırlık kayıplarının birine yakın olduğu sonucuna varmışlardır. Fakat Şekil 5.5' de görüldüğü gibi en düşük ağırlık kayıplarının gri dökme demirde olduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 5.5. 900 °C 'de 6 saat borlanmış dökme demirlerin aşınma özellikleri (Meric vd., 2005).

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve SONUÇLAR

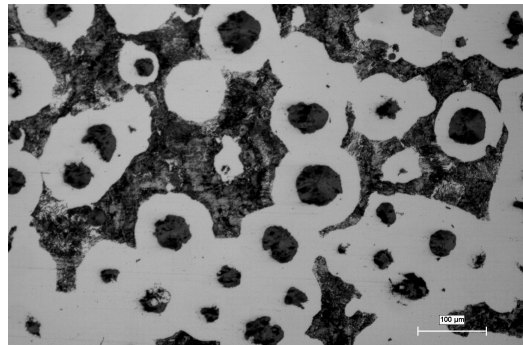
Bu çalışmada, DDK 60 küresel grafitli dökme demir numuneler 850, 900 ve 950°C sıcaklıklarda 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerde borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işlemi katı ortamda EKabor®2 tozları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Borlama sonrasında oluşan borür tabakalarının yapısı, XRD ve optik mikroskop ile değerlendirilmiştir. Borür tabakasının işlem zamanı ve sıcaklığına bağlı olarak kalınlıkları, yüzeyden matrise doğru sertlik dağılımları ölçülmüş ve borür tabakasının abrazyon davranışı incelenmiştir.

### 6.1. Deneyde Kullanılan Malzeme

Borlama işleminde, kimyasal bileşimi (Çizelge 6.1) spektral analiz cihazında belirlenen, mikroyapı fotoğrafı Şekil 6.1’de verilen DDK 60 malzemesi kullanılmıştır.

Çizelge 6.1. Deneyde kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi(% Ağırlık).

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Al
3,035	3,189	0,254	0,071	0,012	0,023	0,050	0,023
% Cu	% Ti	% Va	% Mg	% Fe			
0,019	0,013	0,014	0,047	93,24			



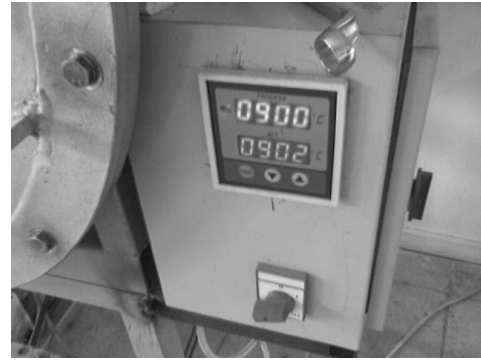
Şekil 6.1. Deneyde kullanılan malzemenin mikroyapı fotoğrafı(200X, %10 Pikral).

## 6.2. Numune Hazırlama

Deneye tabi tutulacak numuneler 12.7-12.7-12.7 mm ölçülerinde frezede işlenerek, Şekil 6.2’de görülen fırında 900 °C’de argon gazı atmosferinde normalize edildikten sonra numunelerin tüm yüzeyleri Struers Tegrapol-21 zımparalama ve parlatma cihazında (Şekil 6.3) MD-Piano 220 meş’lik zımpara kullanılarak yüzey temizliği sağlandıktan sonra MD-Dac 3 µm’lik parlatma çuhasında kabaca parlatılmıştır.



a.



b.

Şekil 6.2. Normalizasyon işleminde kullanılan fırın (a) ve kontrol ünitesi (b).

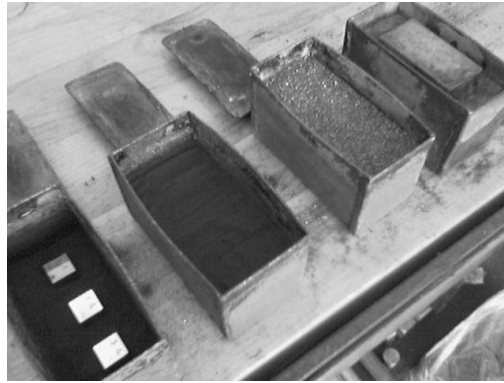


Şekil 6.3. Numune yüzeylerinin zımparalama ve parlatma işleminde kullanılan cihaz.



### 6.3. Borlama İşlemi

Borlama işleminin katı ortamda gerçekleştirilmiş olup, bor kaynağı olarak EKabor®2 ve deoksidan olarak Ekrit® toz karışımları kullanılmıştır. Borlama işlemi 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda; 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerle atmosferik şartlarda AISI 304 kalite 3 mm kalınlığında paslanmaz çelik sacdan yapılmış 11×8×7 cm ölçülerinde ağzı kapaklı kutularda yapılmıştır. Paslanmaz çelik kutu içine tabandan itibaren bir santimetre yüksekliğinde EKabor®2 tozu konulup, numunelerin aralarında bir santimetre boşluk bırakılarak her bir işlem şartı için üç adet numune yerleştirilmiş ve daha sonra tekrar bir santimetre yüksekliğinde EKabor®2 tozu ile doldurulmuştur. Borlama yapılırken numunelerin hava ile temas etmemesi için Ekrit® tozu ilave edilerek kutunun kapağı kapatılmıştır (Şekil 6.4). Her bir borlama işlem şartı için yeni toz karışımları kullanılmıştır. Maksimum sıcaklığı 1500 °C olan, işlem sıcaklığı ayarlanmış Şekil 6.5.a'da gösterilen Protherm marka elektrikli fırına içlerinde üçer adet numune bulunan dört kutu Şekil 6.5.b'deki gibi yerleştirilmiş olup, işlem süresi dolan numune kutuları maşa yardımıyla fırından alınmıştır. Bu işlem farklı sıcaklıklar için (850, 900 ve 950 °C) tekrarlanmıştır. Borlama sonrası numuneler havada soğutulduktan sonra kutudan çıkartılmıştır. (Şekil 6.5.c,d).



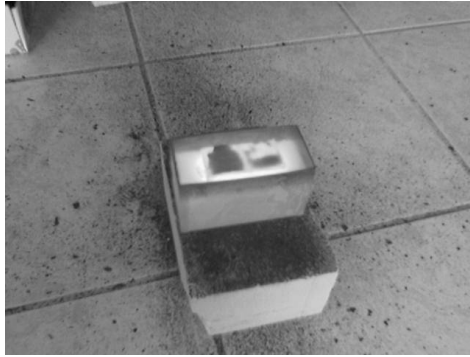
Şekil 6.4. Borlanacak numuneler ve sarf malzemelerinin kutulara yerleştirilmesi.



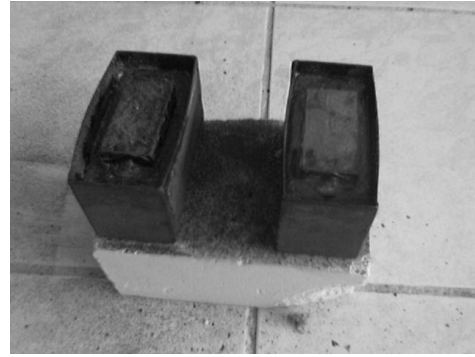
a



b



c



d

Şekil 6.5. Borlama işlemlerinin yapıldığı Protherm marka fırın(a), kutuların fırına yerleştirilmesi(b) ve kutuların havada soğutulması (c) ve (d).

#### 6.4. Metalografik İncelemeler

Borlama işlemi yapılan numuneler, Şekil 6.6'de gösterilen Struers Discotom-5 kesme cihazında eşit iki parçaya kesilerek, Metaserv 2000 cihazında 220, 600, 800 ve 1000 meş SiC zımpara kağıdı kullanılarak kademeli olarak zımparalandıktan sonra Struers Dap-2 parlatma cihazında 3  $\mu\text{m}$ 'lik elmas macun ile parlatılarak metalografik olarak

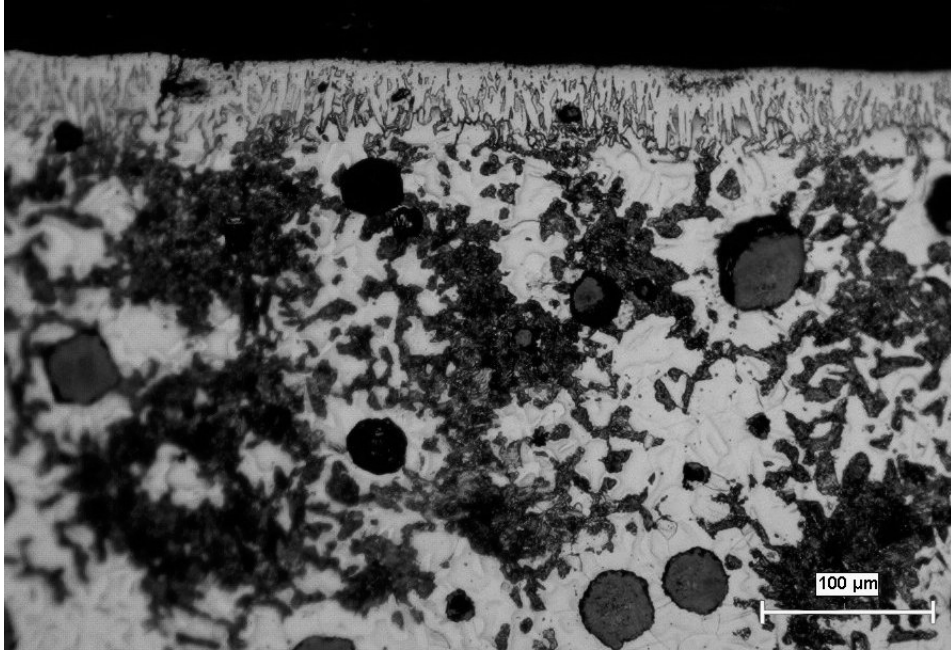
yüzeyleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, % 10'luk pikral dağlayıcısı ile dağlanarak Nikon-Eclipse L150 marka görüntü alma sisteminde (optik mikroskop) 200X büyütmede incelenmiştir (Şekil 6.7). Yüzeğe yakın olan FeB fazı ile bunun altında yer alan Fe<sub>2</sub>B fazı, dağlama ile elde edilen renk farkından dolayı kalitatif olarak ayırt edilmiştir (FeB fazı Fe<sub>2</sub>B'ye göre daha koyu). Farklı süre ve sıcaklıklarda borlanan küresel grafitli dökme demirlerin mikro yapılarının optik metalografi incelemelerinde elde edilen görüntüleri Şekil 6.8-6.19'da verilmiş olup ve bu mikroyapıların aynı sıcaklık değerinde, farklı sürelerdeki ardışık fotoğrafları 6.20-6.22'de verilmiştir.



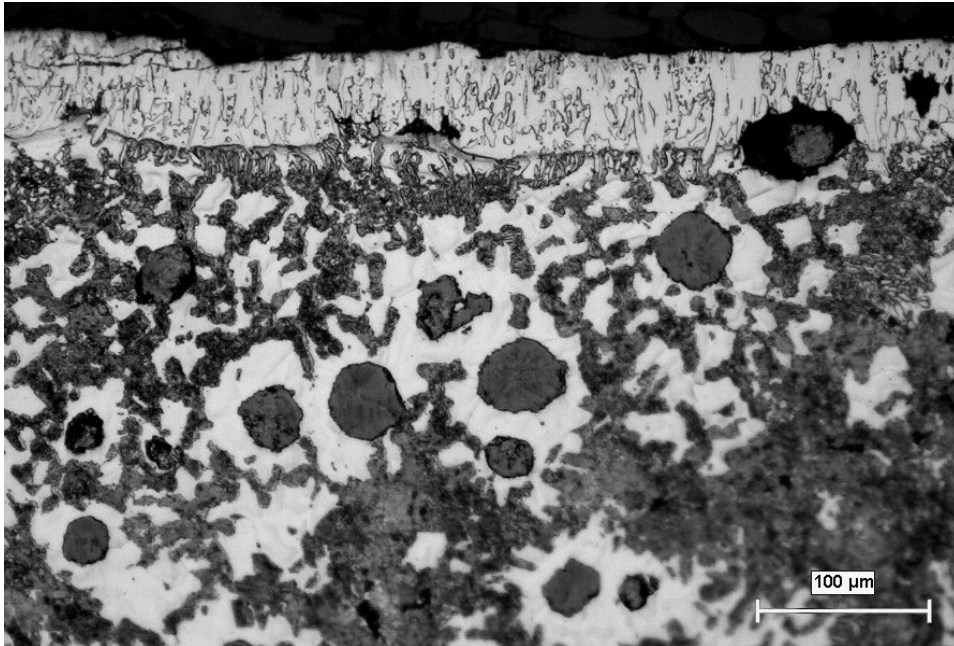
Şekil 6.6. Struers Discotom-5 numune kesme cihazı.



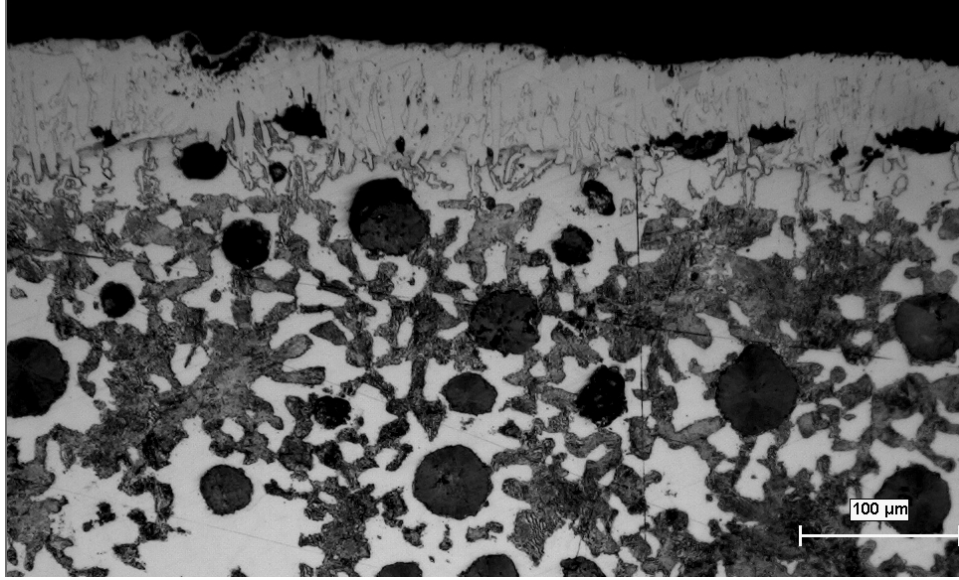
Şekil 6.7. Görüntü analiz sistemi



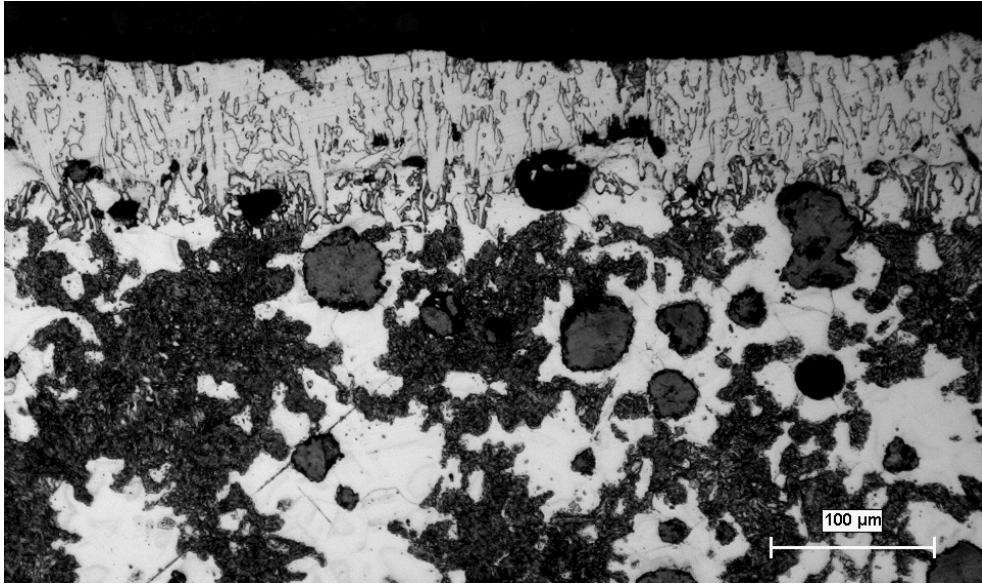
Şekil 6.8. 850 °C'de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60'ın mikroyapı fotoğrafı (200X, % 10 pikral).



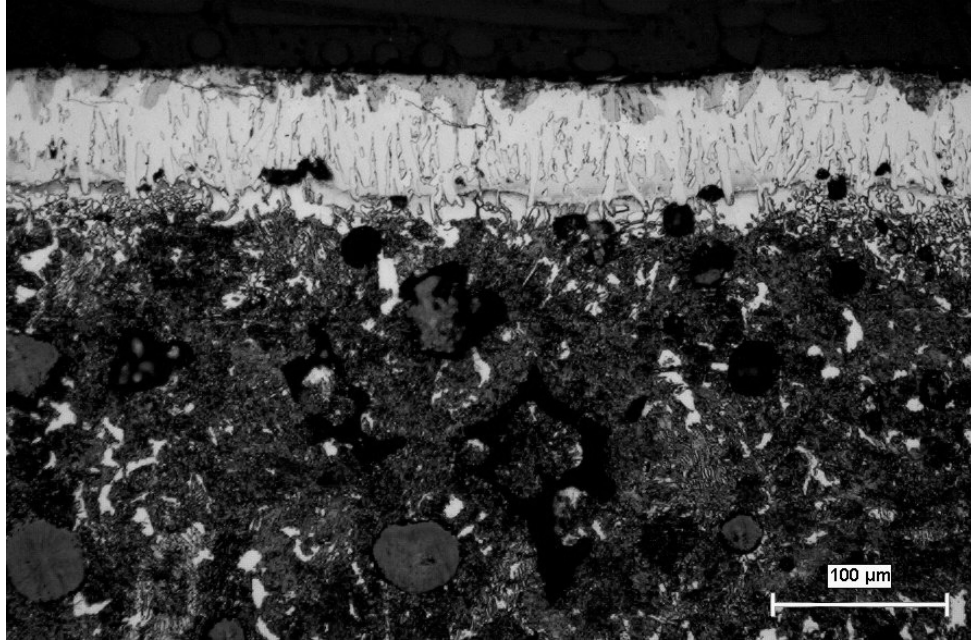
Şekil 6.9. 850 °C'de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60'ın mikroyapı fotoğrafı (200X, % 10 pikral).



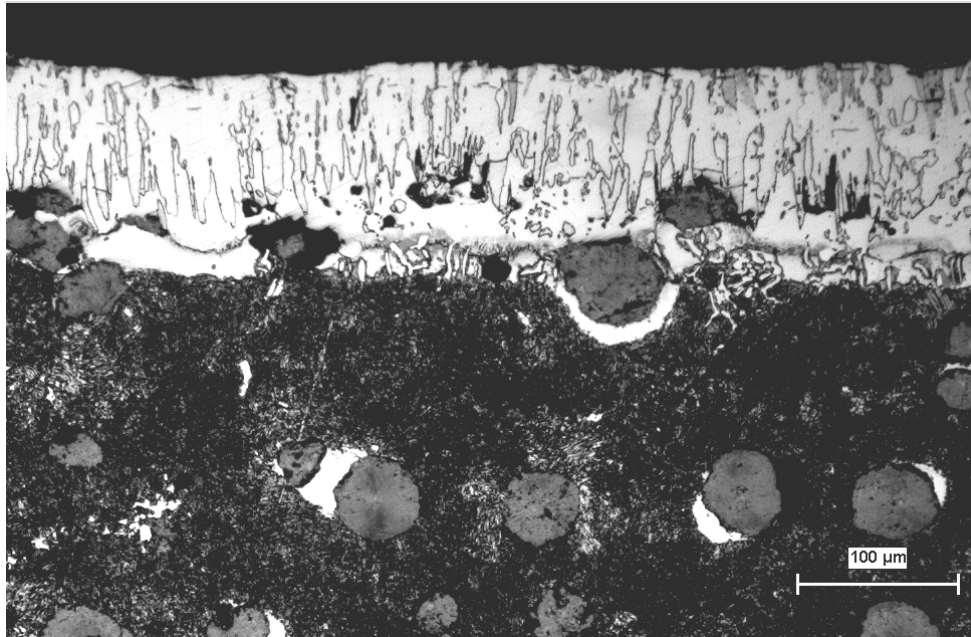
Şekil 6.10. 850 °C'de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60'ın mikroyapı fotoğrafı (200X, % 10 pikral).



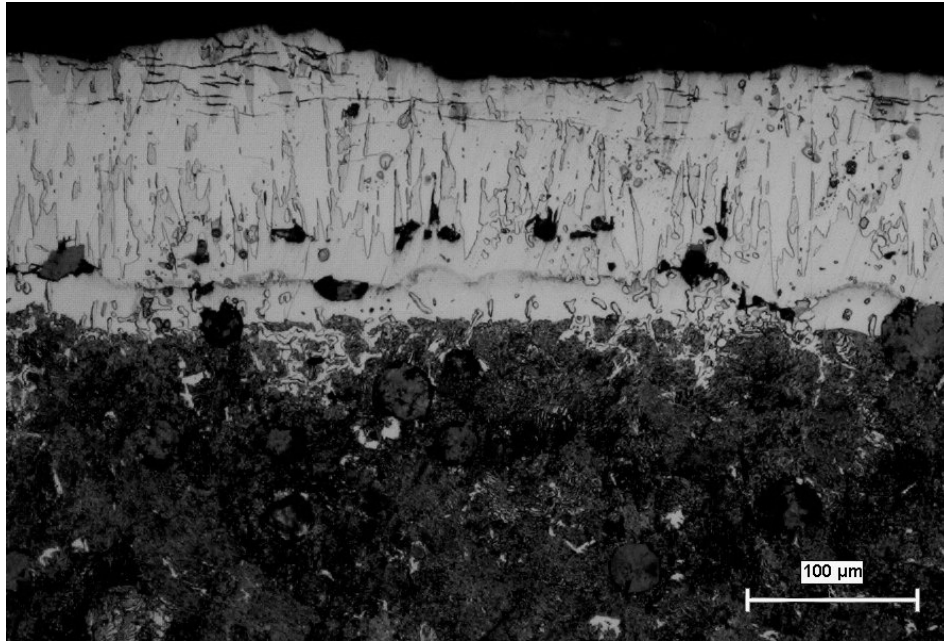
Şekil 6.11. 850 °C'de 8 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60'ın mikroyapı fotoğrafı (200X, % 10 pikral).



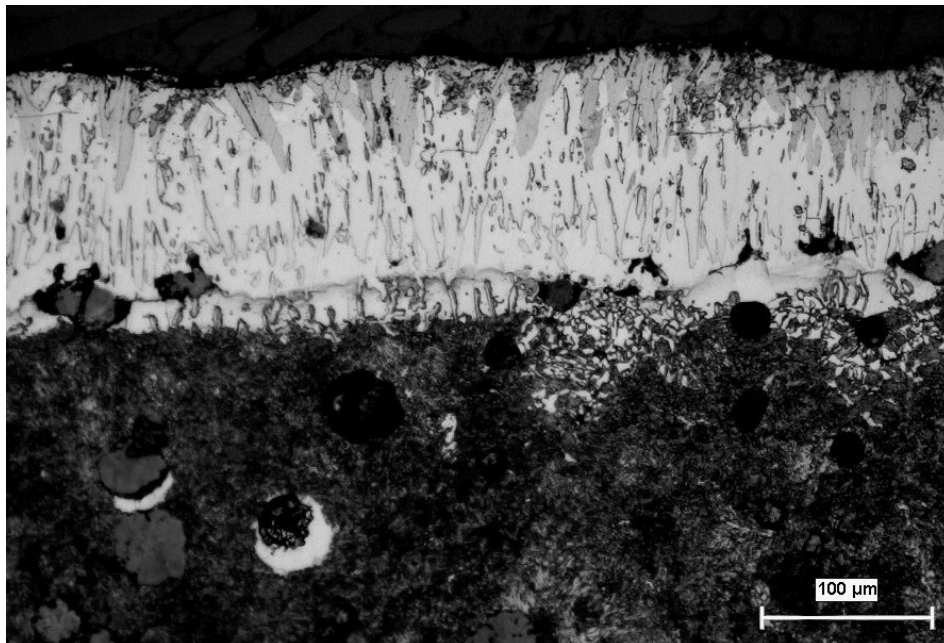
Şekil 6.12. 900 °C'de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60'ın mikroyapı fotoğrafı (200X, % 10 pikral).



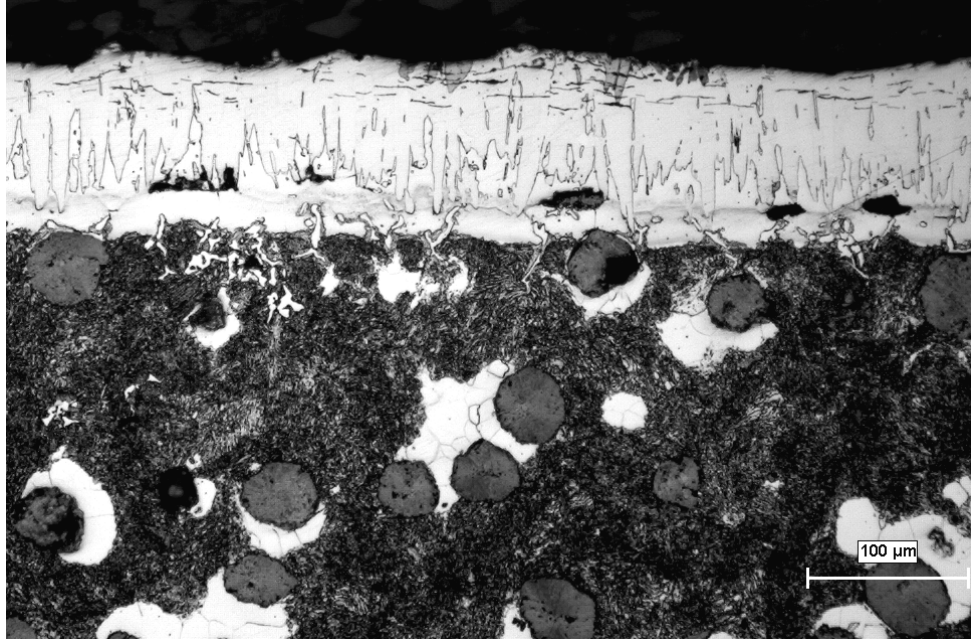
Şekil 6.13. 900 °C'de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60'ın mikroyapı fotoğrafı (200X, % 10 pikral).



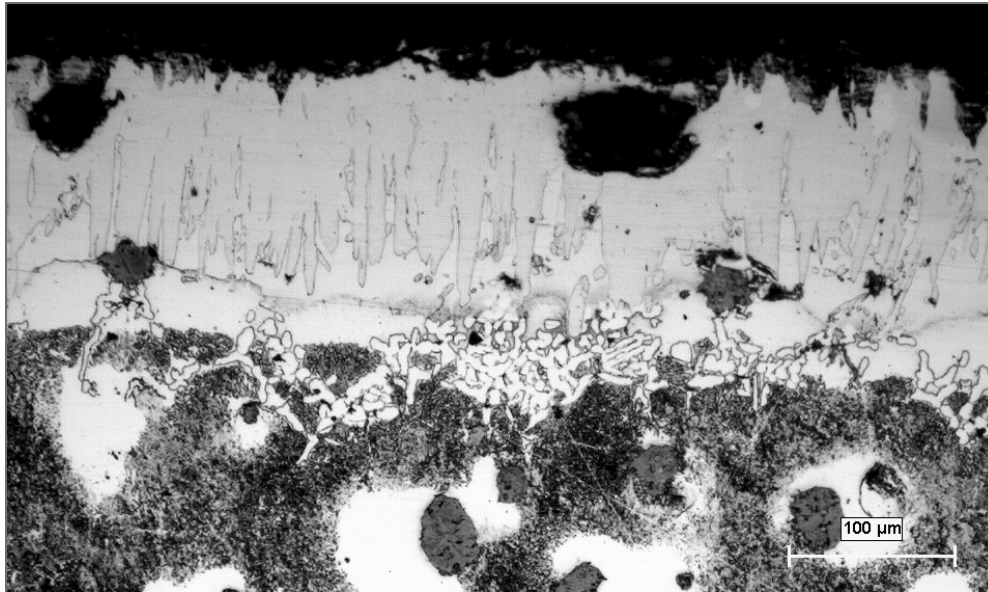
Şekil 6.14. 900 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60’ın mikroyapı fotoğrafı (200X, % 10 pikral).



Şekil 6.15. 900 °C’de 8 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60’ın mikroyapı fotoğrafı (200X, % 10 pikral).

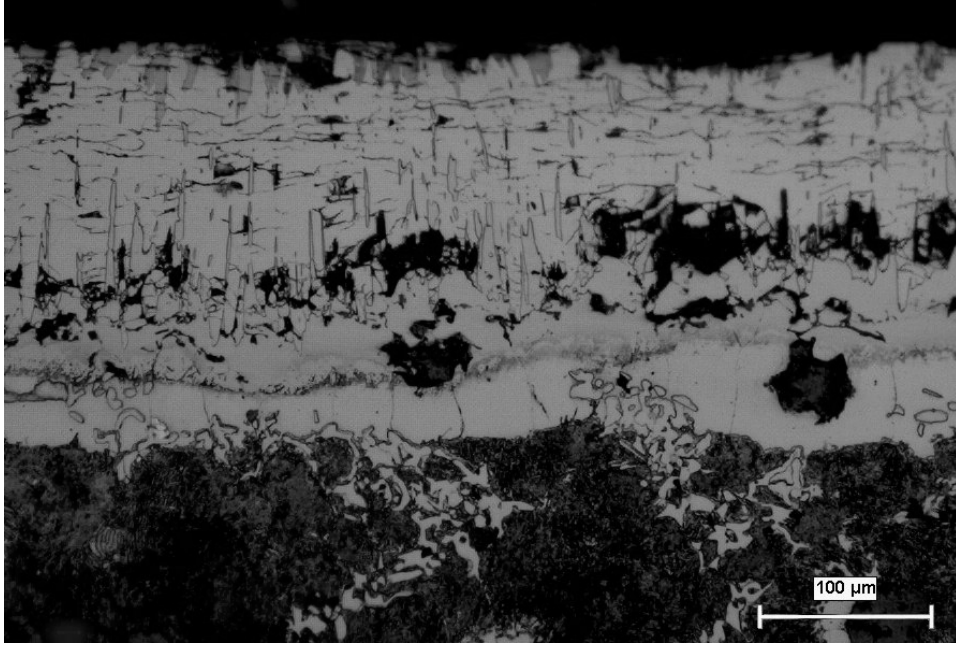


Şekil 6.16. 950 °C'de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60'nin mikroyapı fotoğrafı (200X, % 10 pikral).

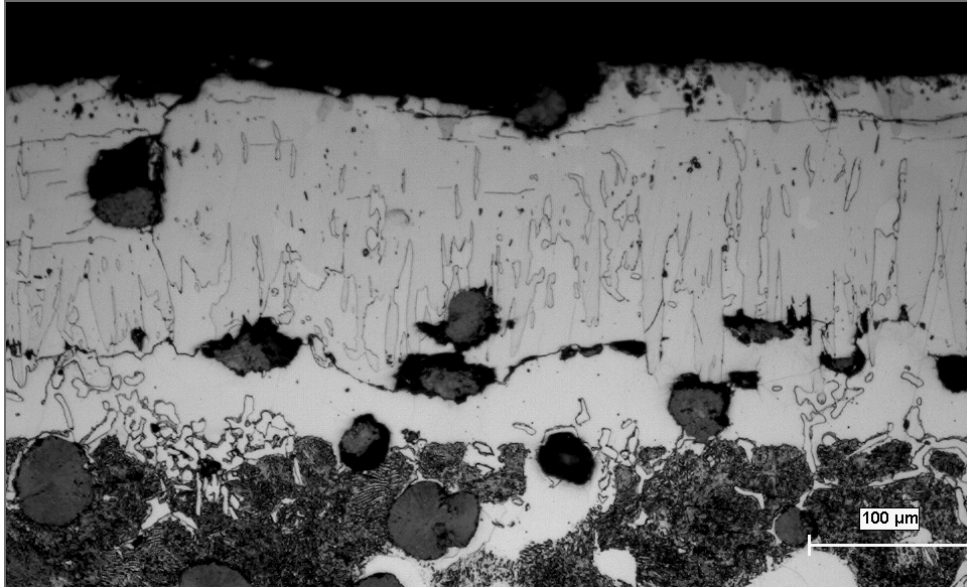


Şekil 6.17. 950 °C'de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60'nin mikroyapı fotoğrafı (200X, % 10 pikral).

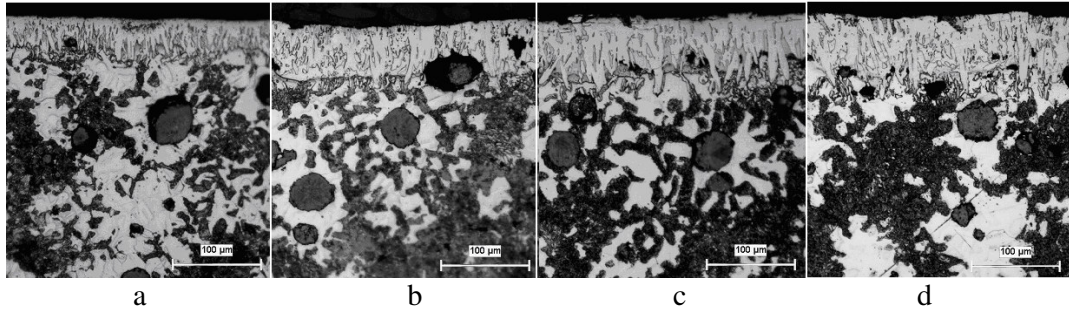




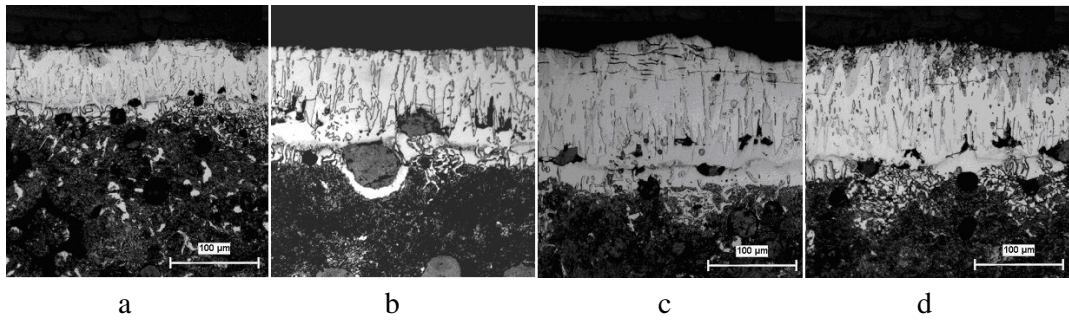
Şekil 6.18. 950 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60’ın mikroyapı fotoğrafı (200X, % 10 pikral).



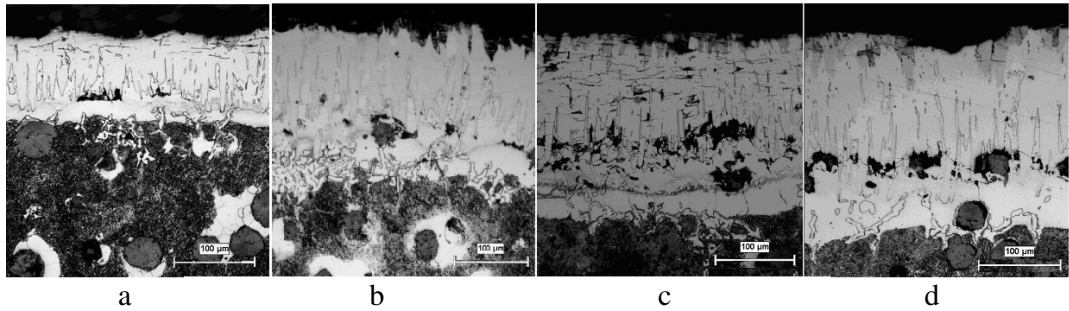
Şekil 6.19. 950 °C’de 8 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK 60’ın mikroyapı fotoğrafı (200X, % 10 pikral).



Şekil 6.20. 850 °C sıcaklıkta, 2 saat (a), 4 saat (b), 6 saat (c), 8 saat (d), borlanmış DDK 60 numunelerinin mikroyapı fotoğrafları (200X, %10 Pikral).



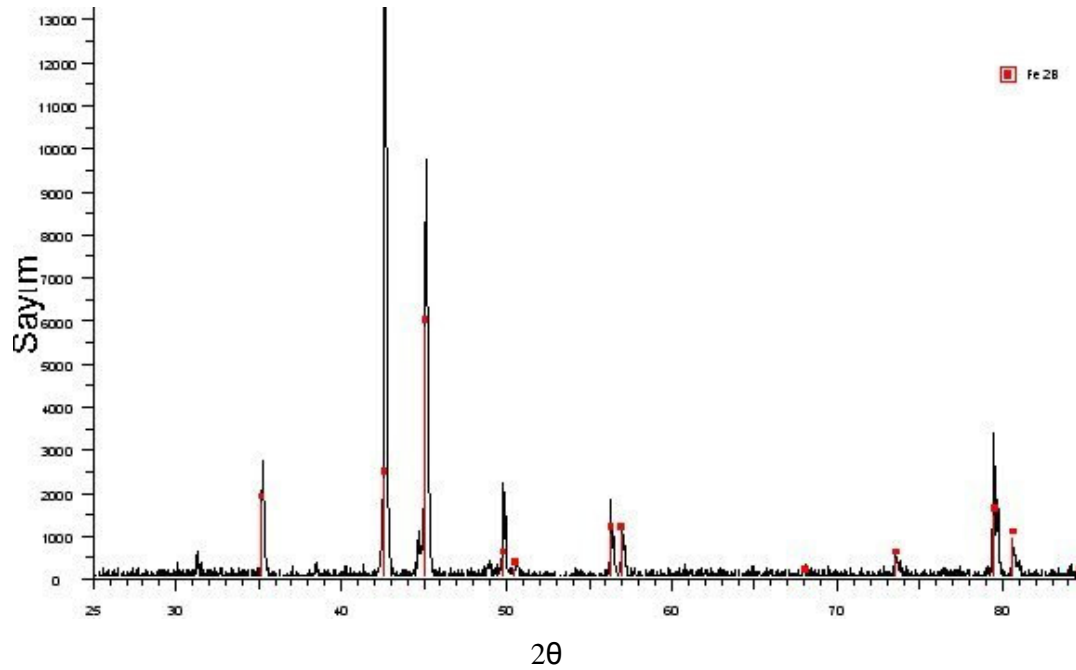
Şekil 6.21. 900 °C sıcaklıkta, 2 saat (a), 4 saat (b), 6 saat (c), 8 saat (d), borlanmış DDK 60 numunelerinin mikroyapı fotoğrafları (200X, %10 Pikral).



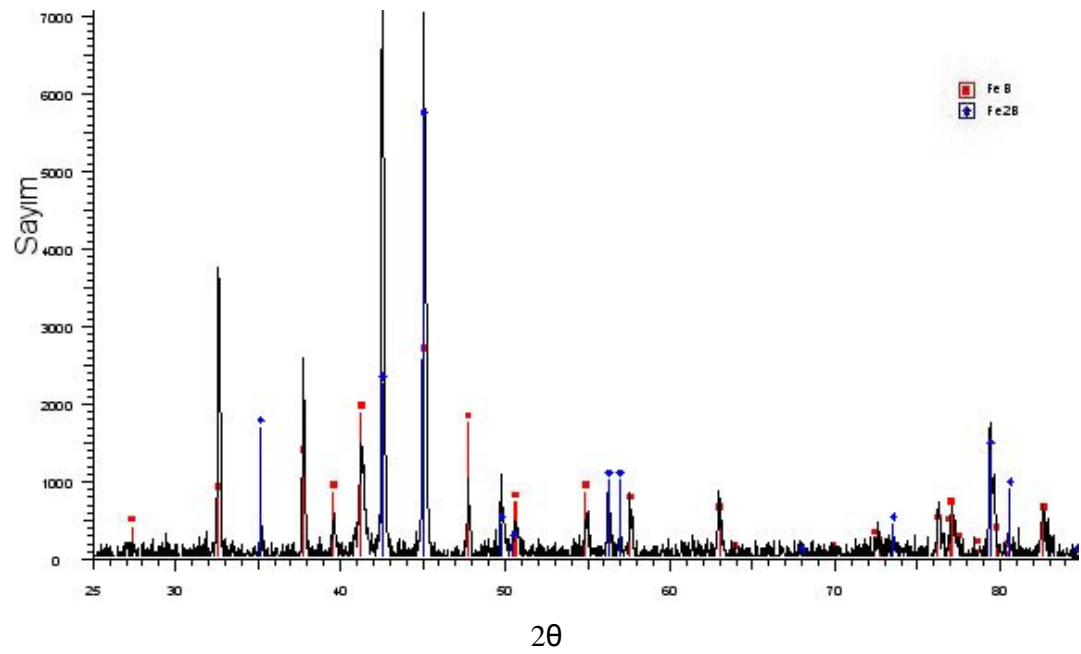
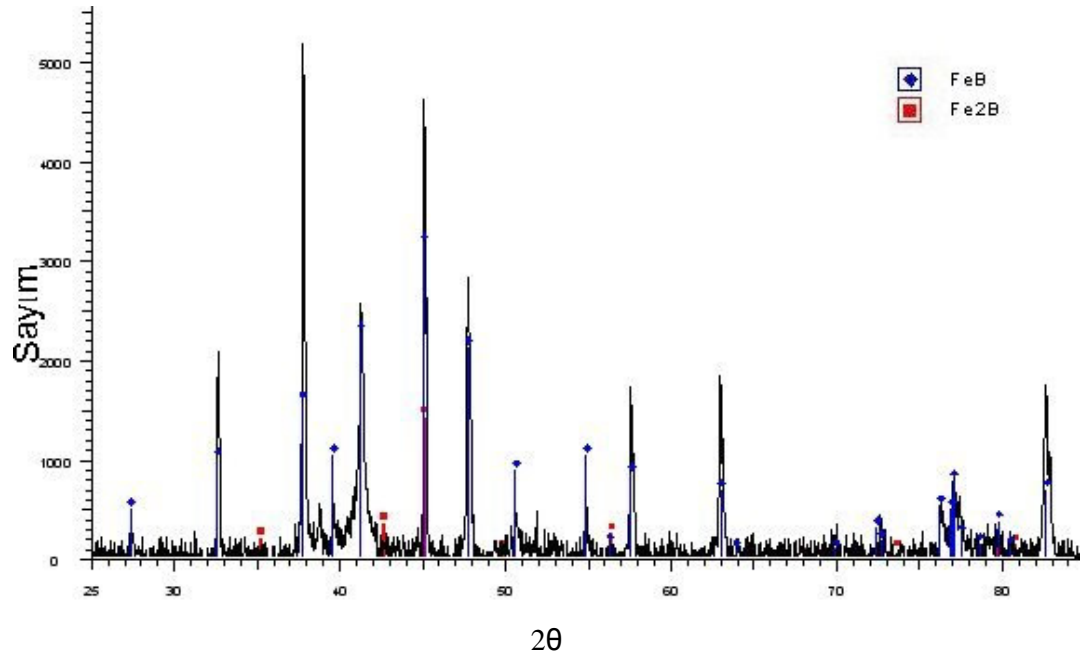
Şekil 6.22. 950 °C sıcaklıkta, 2 saat (a), 4 saat (b), 6 saat (c), 8 saat (d), borlanmış DDK 60 numunelerinin mikroyapı fotoğrafları (200X, %10 Pikral).

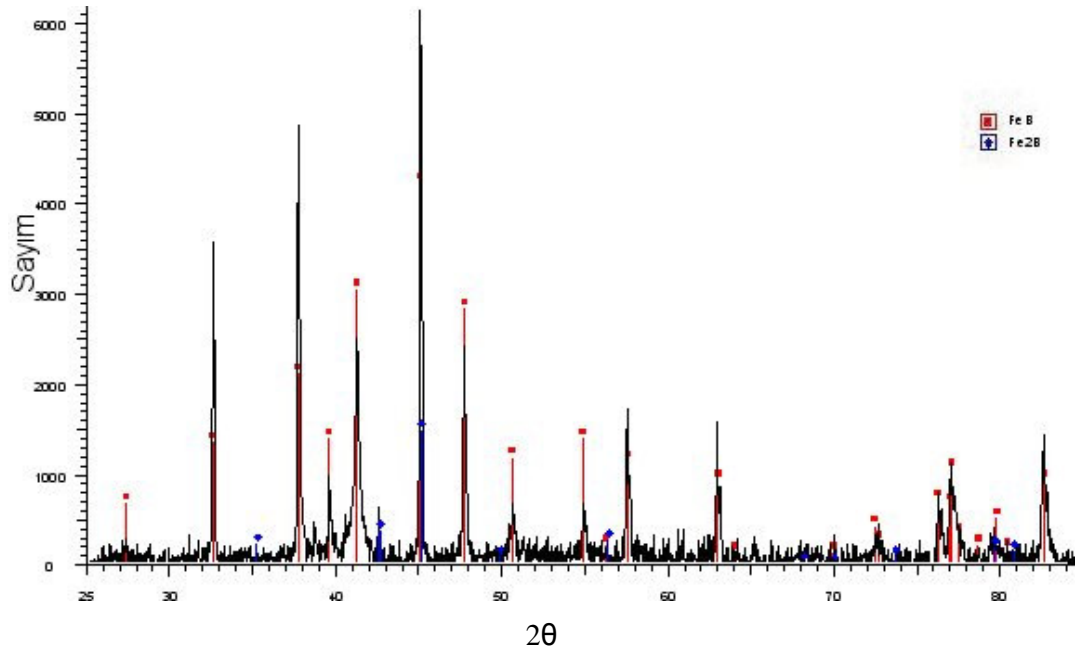
### 6.5 X-Işın Difraksiyon Analizi

XRD, analiz edilecek numune üzerine genellikle bakır veya kobalt gibi hedef bir elementten elde edilen  $K_{\alpha}$  karakteristik x-ışını demetinin gönderilmesi esasına dayanmaktadır. Gönderilen ışın demeti numunenin 3 boyutlu kristal yapısında difraksiyona uğrayarak, paternler halinde elde edilmektedir. Bu paternler, bileşimi belirli standart malzemeden elde edilen paternler ile karşılaştırılarak incelenmektedir. Borür tabakasında oluşan fazları tespit etmek için Bruker axs D8 Advance marka bakır tüplü X-ışınları difraksiyon analiz sistemi kullanılmıştır. Borlanmış DDK 60 küresel grafitli dökme demirin x-ışın difraksiyon paternleri işlem şartlarına bağlı olarak Şekil 6.23-6.34'de verilmiştir.

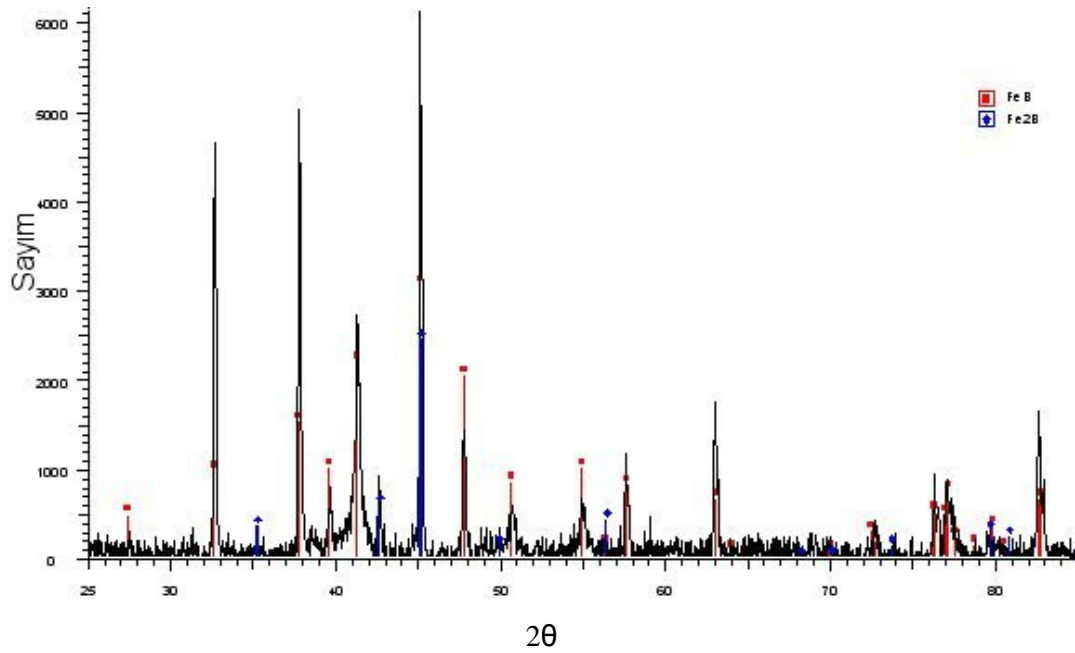


Şekil 6.23. 850 °C'de 2 saat süre ile borlanmış DDK 60'ın x-ışın difraksiyon paterni

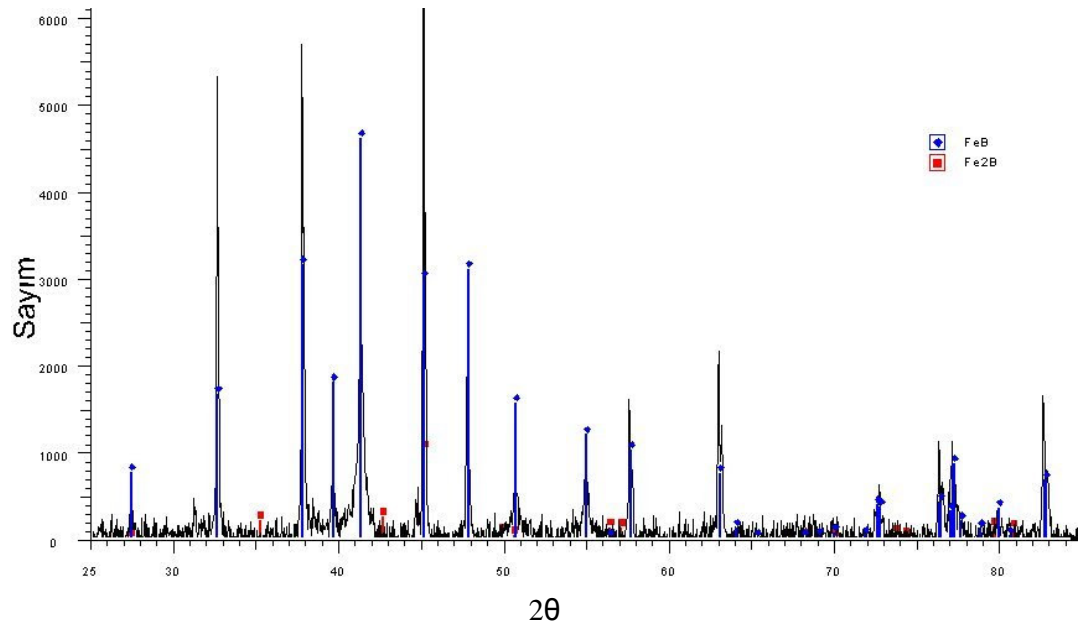




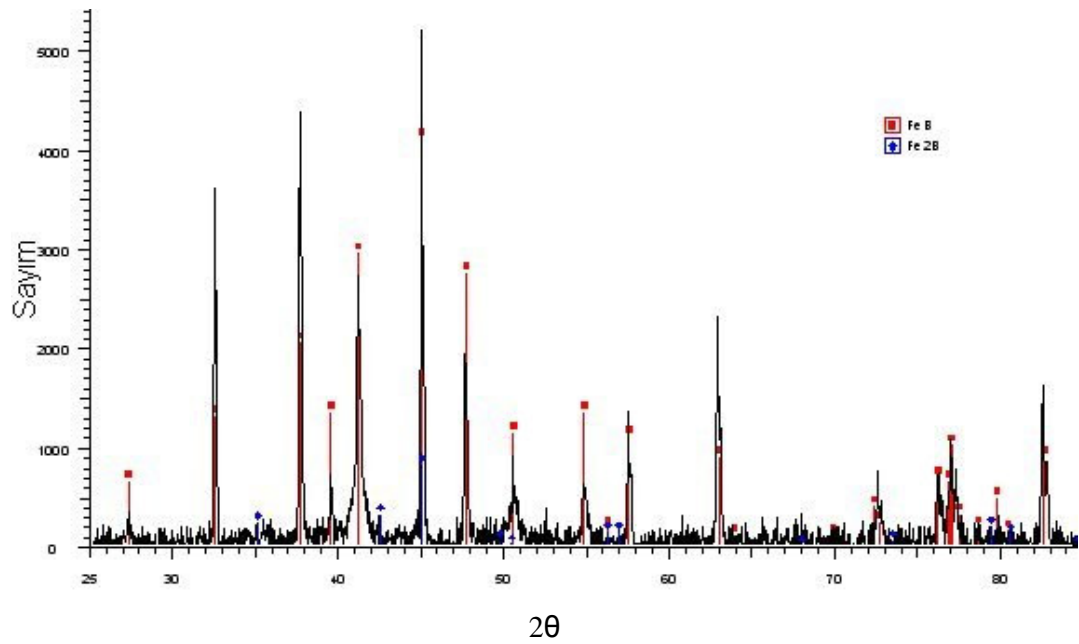
Şekil 6.26. 850 °C'de 8 saat süre ile borlanmış DDK 60'ın x-ışın difraksiyon paterni.



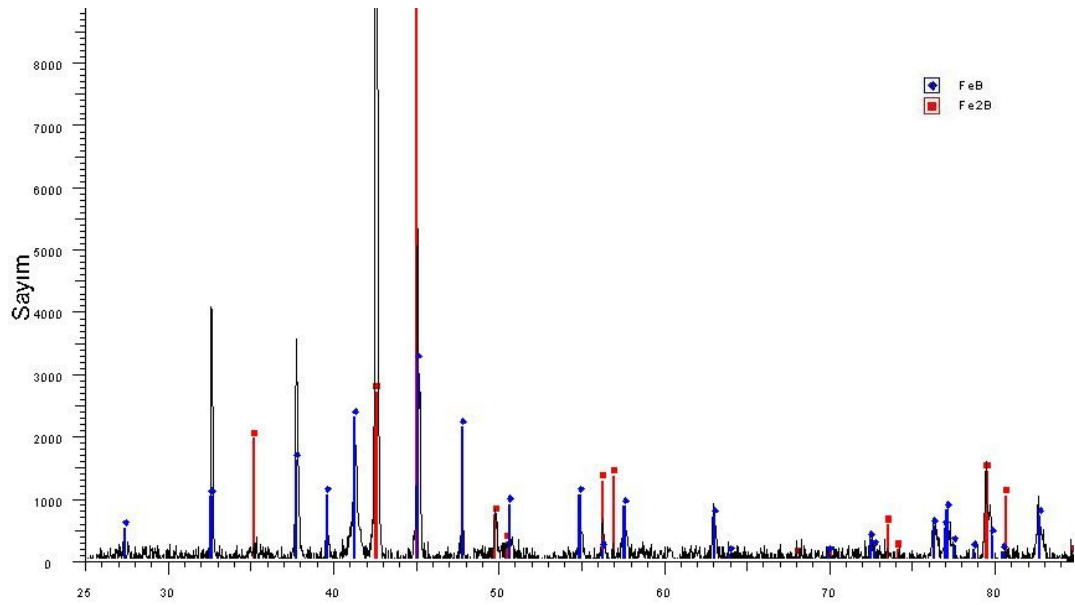
Şekil 6.27. 900 °C'de 2 saat süre ile borlanmış DDK 60'ın x-ışın difraksiyon paterni.



Şekil 6.28. 900 °C’de 4 saat süre ile borlanmış DDK 60’ın x-ışın difraksiyon paterni.

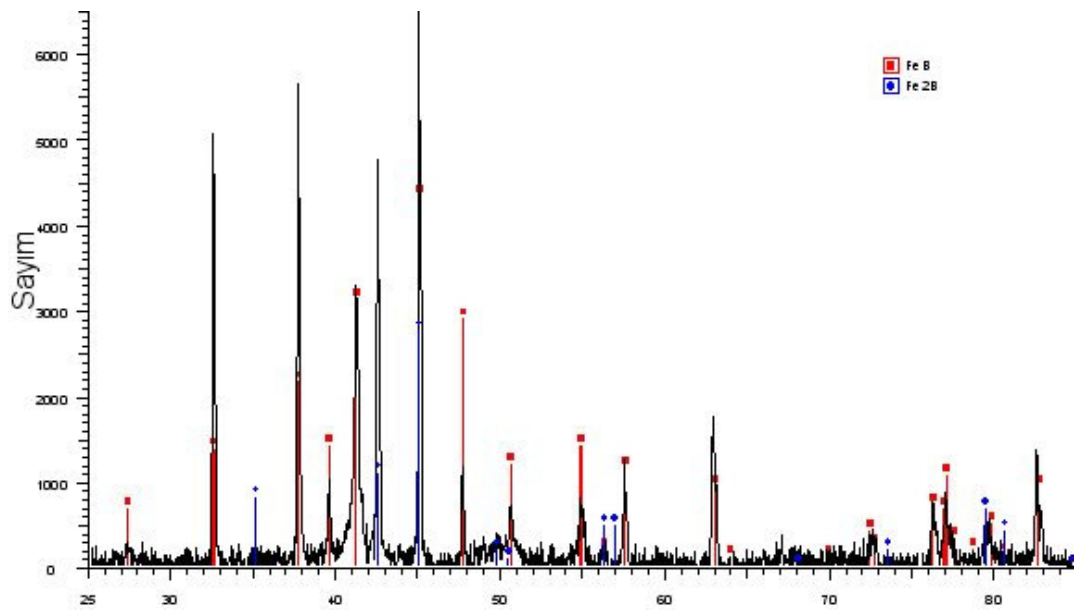


Şekil 6.29. 900 °C’de 6 saat süre ile borlanmış DDK 60’ın x-ışın difraksiyon paterni.



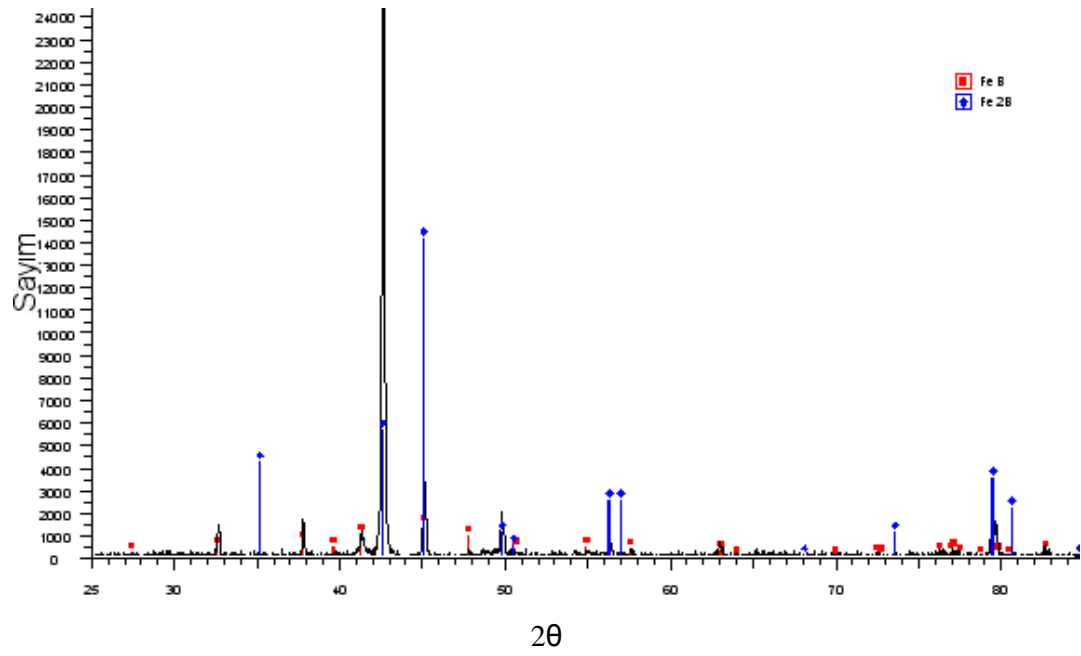
2θ

Şekil 6.30. 900 °C’de 8 saat süre ile borlanmış DDK 60’ın x-ışın difraksiyon paterni.

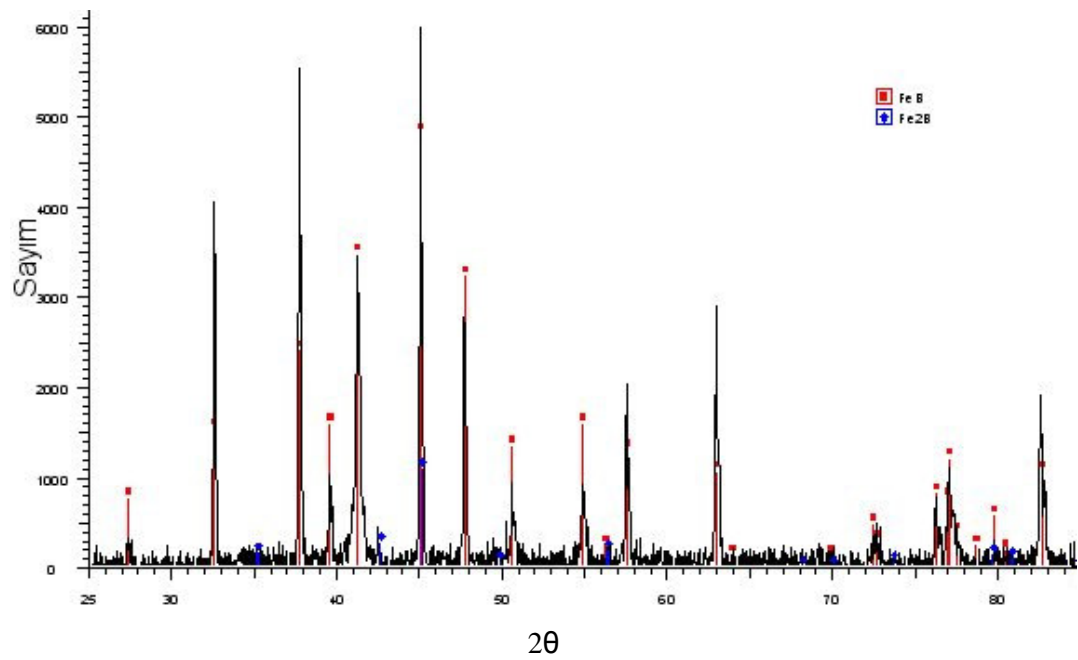


2θ

Şekil 6.31. 950 °C’de 2 saat süre ile borlanmış DDK 60’ın x-ışın difraksiyon paterni.

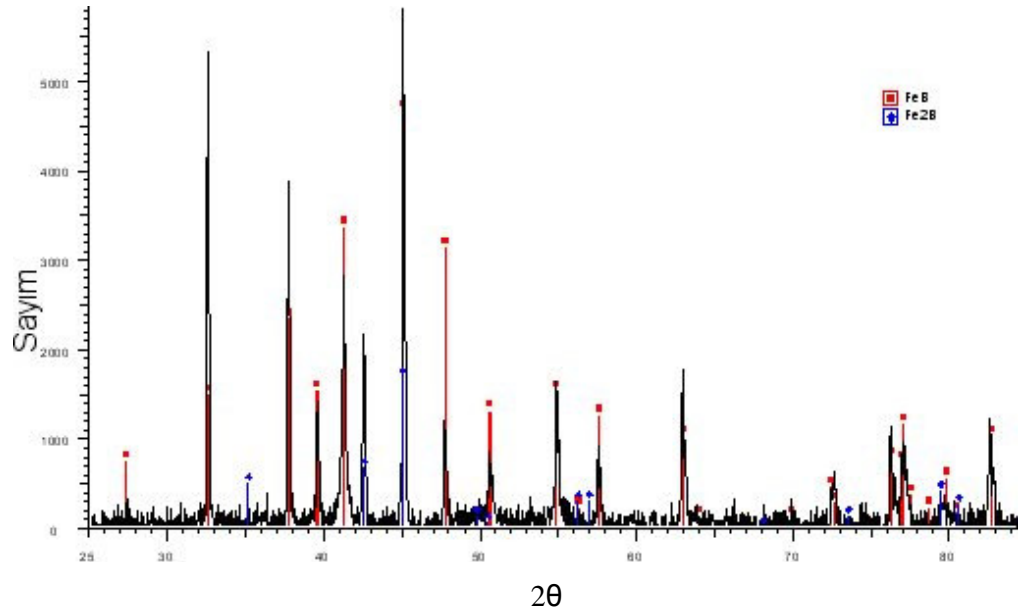


Şekil 6.32 950 °C’de 4 saat süre ile borlanmış DDK 60’ın x-ışın difraksiyon paterni.



Şekil 6.33. 950 °C’de 6 saat süre ile borlanmış DDK 60’ın x-ışın difraksiyon paterni.





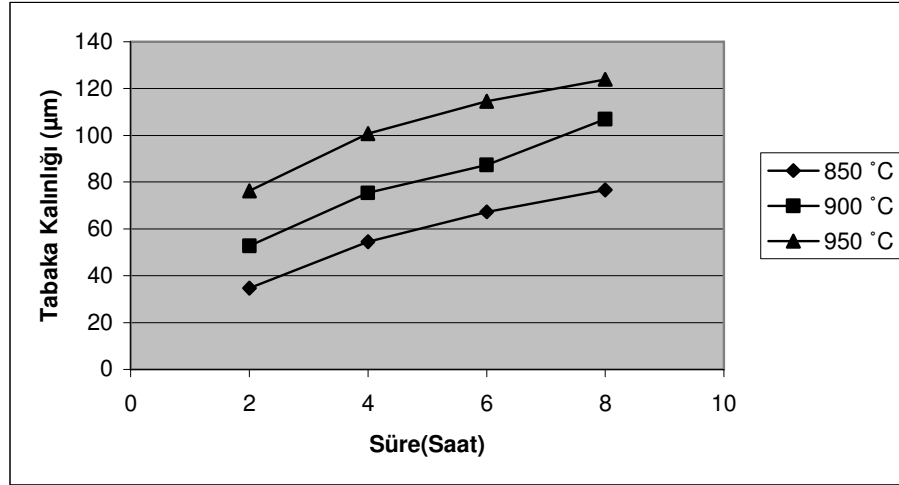
Şekil 6.34. 950 °C'de 8 saat süre ile borlanmış DDK 60'ın x-ışın difraksiyon paterni.

## 6.6. Borür Tabaka Kalınlığı

Borür tabaka kalınlığı ölçümleri görüntü alma sisteminde, numunenin iki farklı yüzeyinden Clemex görüntü analiz yazılımı kullanılarak yapılmış ve sonuçlar Çizelge 6.2'de işlem şartlarına bağlı olarak iki yüzeyin ortalama değeri olarak verilmiştir. Bu değerler ile ilgili grafik de Şekil 6.35'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. İşlem şartlarına bağlı olarak borür tabaka kalınlıkları.

Süre \ Sıcaklık(°C)	Tabaka Kalınlığı (µm)			
	2 Saat	4 Saat	6 Saat	8 Saat
850	34,75	54,5	67,3	76,75
900	52,75	75,35	87,4	106,9
950	76,25	100,75	114,5	123,9



Şekil 6.35. İşlem sıcaklığı ve zamanına bağlı borür tabaka kalınlığının değişimi.

### 6.7. Sertlik Ölçümleri

Borlanmış numunelerin sertlik ölçümleri; Future-tech FM-700 marka mikrosertlik cihazında (Şekil 6.36) vickers uç kullanılarak 25 gram yük altında 10 saniye sürede gerçekleştirilmiştir. Ölçümler borür tabakası boyunca yüzeyden itibaren matrisin içerisine kadar, belirli bir doğrultuda ve sabit aralıklarla (20 µm) borür kolonları üzerinde yapılmıştır.

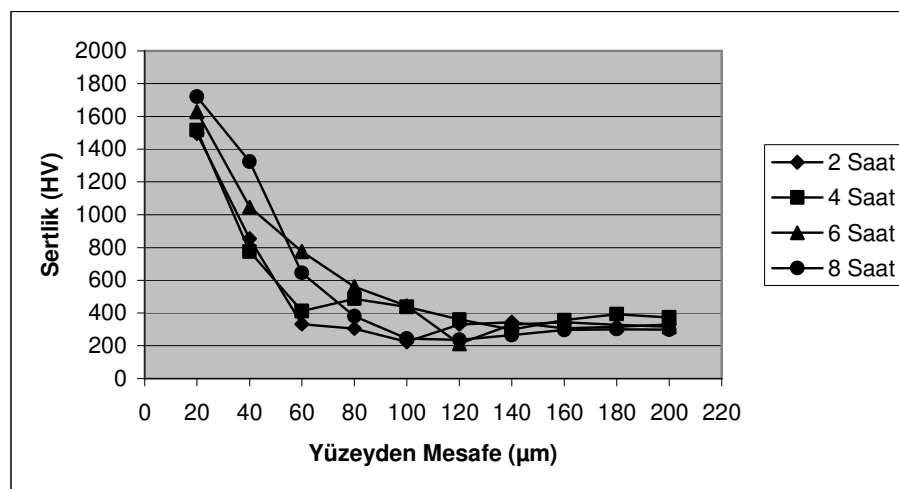


Şekil 6.36. Sertlik ölçüm cihazı.

Yüzeyden mesafeye bağlı ölçülen sertlik değerleri, işlem şartlarına bağlı olarak Çizelge 6.3-6.5’de verilmiş olup, ilgili grafikleri de Şekil 6.37-6.39’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.3 . 850 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan DDK 60’ın yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak sertlik değerleri.

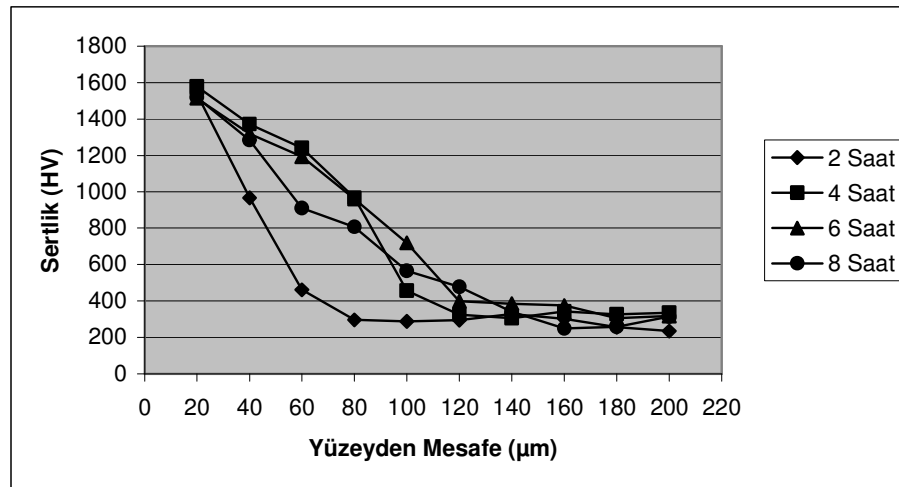
Yüzeyden Mesafe ( $\mu\text{m}$ )	Sertlik (HV)			
	2 Saat	4 Saat	6 Saat	8 Saat
20	1497	1517	1629	1721
40	852	776	1047	1323
60	334	413	776	646
80	306	487	560	381
100	224	437	443	245
120	330	360	213	237
140	344	300	330	266
160	307	356	344	296
180	316	394	326	302
200	329	374	316	299



Şekil 6.37. 850 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan DDK 60’ın yüzeyden itibaren mesafeye ( $\mu\text{m}$ ) bağlı olarak sertlik dağılımı.

Çizelge 6.4 . 900 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan DDK 60'ın yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak sertlik değerleri.

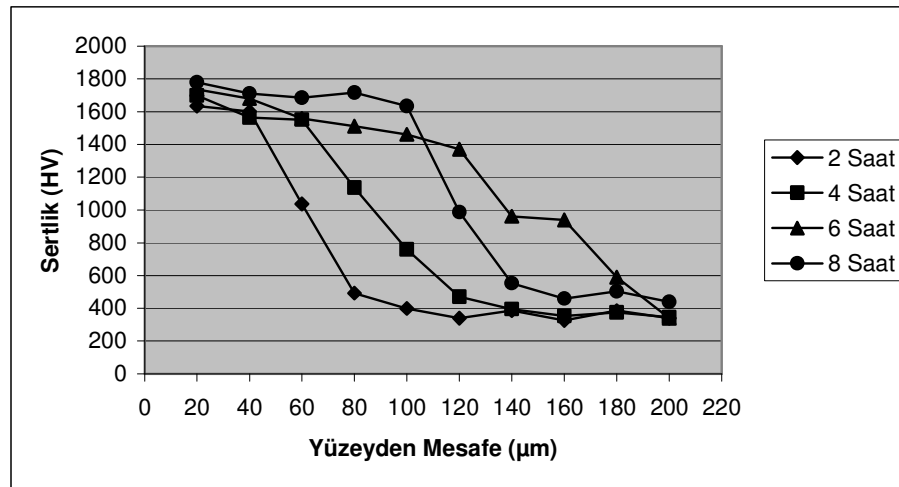
Yüzeyden Mesafe ( $\mu\text{m}$ )	Sertlik (HV)			
	2 Saat	4 Saat	6 Saat	8 Saat
20	1538	1578	1515	1519
40	967	1371	1318	1284
60	462	1241	1193	911
80	297	968	962	808
100	288	456	720	566
120	294	326	399	477
140	330	306	386	340
160	303	343	375	249
180	256	327	307	258
200	236	336	318	314



Şekil 6.38. 900 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan DDK 60'ın yüzeyden itibaren mesafeye ( $\mu\text{m}$ ) bağlı olarak sertlik dağılımı.

Çizelge 6.5 . 950 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan DDK 60'ın yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak sertlik değerleri.

Yüzeyden Mesafe (µm)	Sertlik (HV)			
	2 Saat	4 Saat	6 Saat	8 Saat
20	1635	1698	1735	1779
40	1602	1564	1679	1711
60	1037	1552	1558	1686
80	493	1135	1511	1716
100	399	760	1462	1635
120	341	470	1371	988
140	386	395	961	553
160	325	353	640	459
180	387	375	590	503
200	340	346	341	440

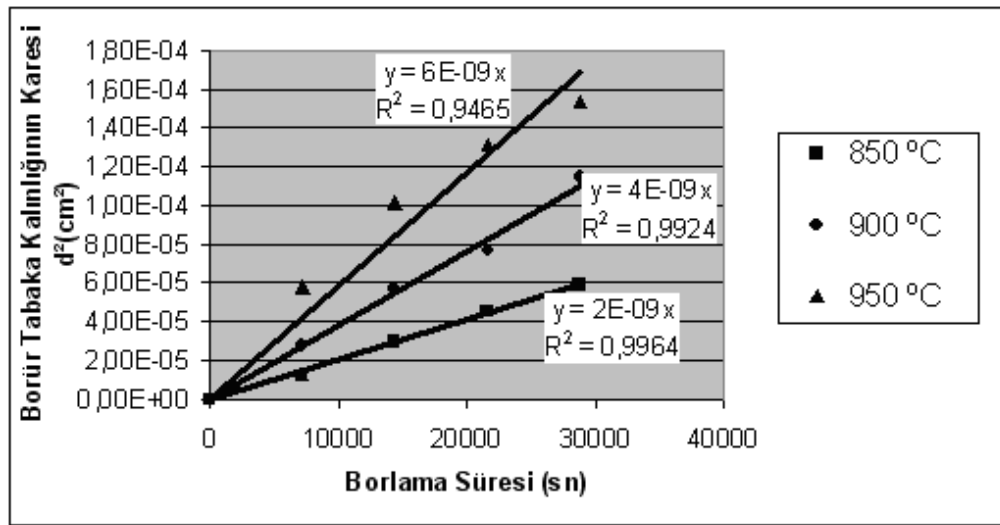


Şekil 6.39. 950 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan DDK 60'ın yüzeyden itibaren mesafeye (µm) bağlı olarak sertlik dağılımı.

### 6.8. Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği

Borür tabakası büyüme kinetiği hesaplamaları, FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının aynı özellikte oldukları kabul edilerek yapılmıştır.

Borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak elde edilen tabaka kalınlığı verileri (Çizelge 6.2) ile işlem sıcaklığına göre borür tabaka kalınlığının karesinin borlama süresine bağlı değişimi Şekil 6.40'da gösterilmiştir.



Şekil 6.40. İşlem sıcaklığına göre borür tabaka kalınlığı karesinin borlama süresine bağlı değişimi.

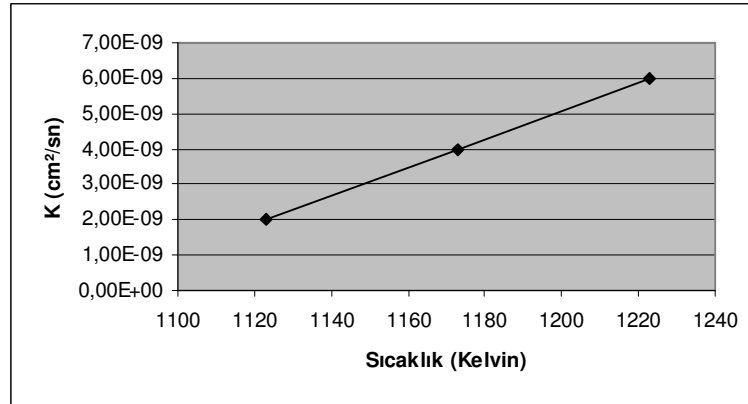
Şekil 6.40'de gösterilen eğrilerin eğimleri (Eşitlik 4.1) büyüme hız sabitlerini vermektedir. Bu durumda büyüme hız sabiti ( $K_x$ ) değerleri aşağıdaki gibidir.

$$K_{850} = 2 \times 10^{-9} \text{ cm}^2 / \text{sn} \rightarrow \ln K_{850} = -20,03011866$$

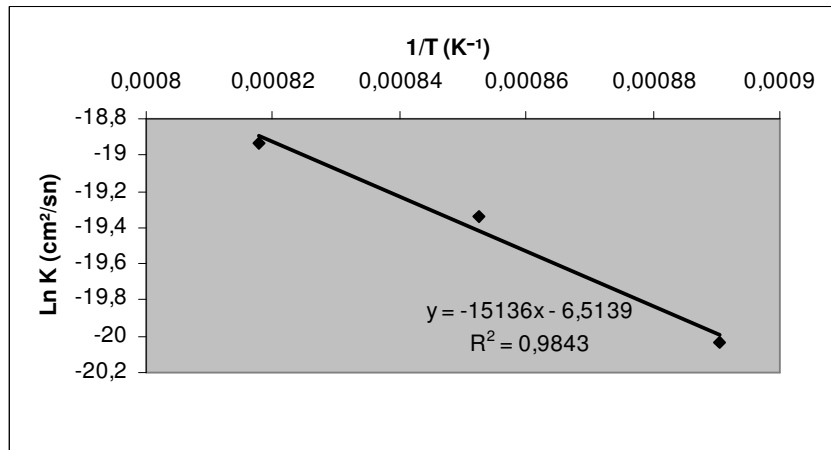
$$K_{900} = 4 \times 10^{-9} \text{ cm}^2 / \text{sn} \rightarrow \ln K_{900} = -19,33697148$$

$$K_{950} = 6 \times 10^{-9} \text{ cm}^2 / \text{sn} \rightarrow \ln K_{950} = -18,93150637 \text{ dir.}$$

Sıcaklığa bağlı olarak, büyüme hız sabiti değerlerindeki değişim Şekil 6.41 ve 6.42’de gösterilmiştir.



Şekil 6.41. İşlem sıcaklığına bağlı olarak büyüme hız sabiti (K) değerlerinin değişimi.



Şekil 6.42. Borlanmış DDK 60 küresel grafitli dökme demirin Arrhenius eğrisi.

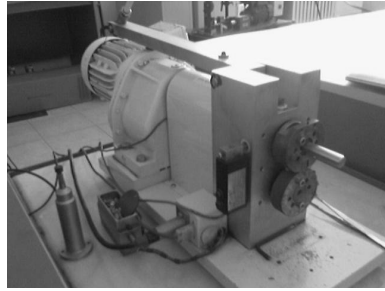
Borür tabakası büyüme aktivasyon enerjisi (Q)'nun belirlenmesinde Eşitlik 4.2-4.3'den yararlanılmıştır. Şekil 6.42'da gösterilen Arrhenius eğrisinin eğimi, Eşitlik 4.3'e göre -Q/R değerini verir. Bu durumda;

$$\text{Eğim} = -\frac{Q}{R} \text{ ise } \rightarrow -15136 = -\frac{Q}{8,3144}$$

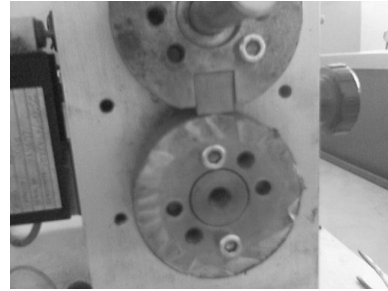
$$Q = 125,846 \text{ kJ.mol}^{-1} \text{ bulunur.}$$

### 6.9. Aşınma Deneyi

Abrazif aşınma deneyi, Plint TE53 marka aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.43.a,b). Aşındırıcı cisim olarak Silisyum Karbürlü (SiC) 800 meş'lik Struers marka zımpara kâğıtları kullanılmıştır. Cihazın aşındırıcı metal diski, çift taraflı yapışkan bant kullanılarak zımpara kâğıtları ile kaplanmış ve her numune için deney yeni zımpara kâğıtları ile gerçekleştirilmiştir. Üzeri zımpara kâğıdı kaplı aşındırıcı diskin çapı 60 mm'dir. Aşındırma işleminden sonra numunelerin ağırlıklarında olan değişimlerin ölçümü Sartorius CP3245 markalı 0,0001 gr hassasiyetli terazi ile yapılmıştır. Aşınma deneylerinde aşındırıcı zımpara kâğıdı kaplı disk ile numune yüzeyi arasındaki temas, 42 N sabit yük ile sağlanmıştır. Tüm aşınma deneylerinde diskin dönme hızı 200 devir/dakika seçilmiş ve aşınmayla oluşan ağırlık kayıpları 100, 200, 500, 1000, 1500 ve 2000 tur sonunda ölçülmüş olup, bu değerler Çizelge 6.6'de verilmektedir. 2000 tur sonundaki toplam ağırlık kayıpları da, Çizelge 6.7 'de, işlem şartlarına bağlı olarak gösterilmiştir. Şekil 6.44-6.46'de işlem sıcaklıklarına göre, tur sayısına bağlı olarak ağırlık kayıpları gösterilmiştir. Şekil 6.47'de ise 2000 tur sonundaki toplam aşınma miktarları incelenmiştir.



a



b

Şekil 6.43. Deneyde kullanılan aşınma cihazı (a) ve aşınma cihazında numunenin pozisyonu (b).

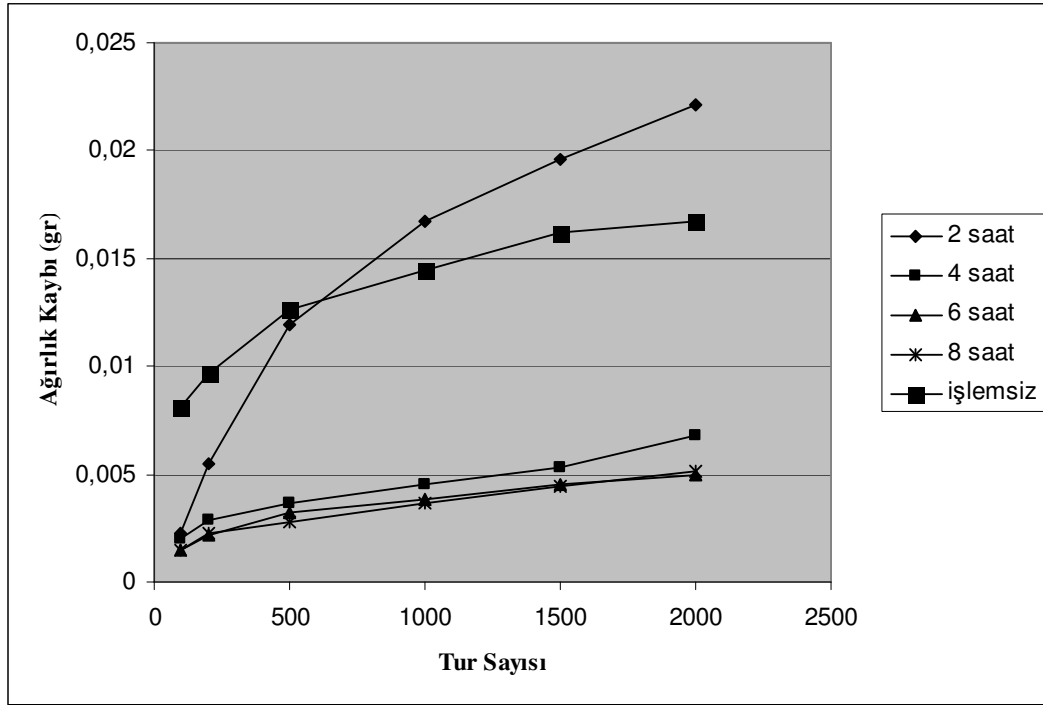


Çizelge 6.6. Aşınma deneyi sonucu ağırlık değerleri.

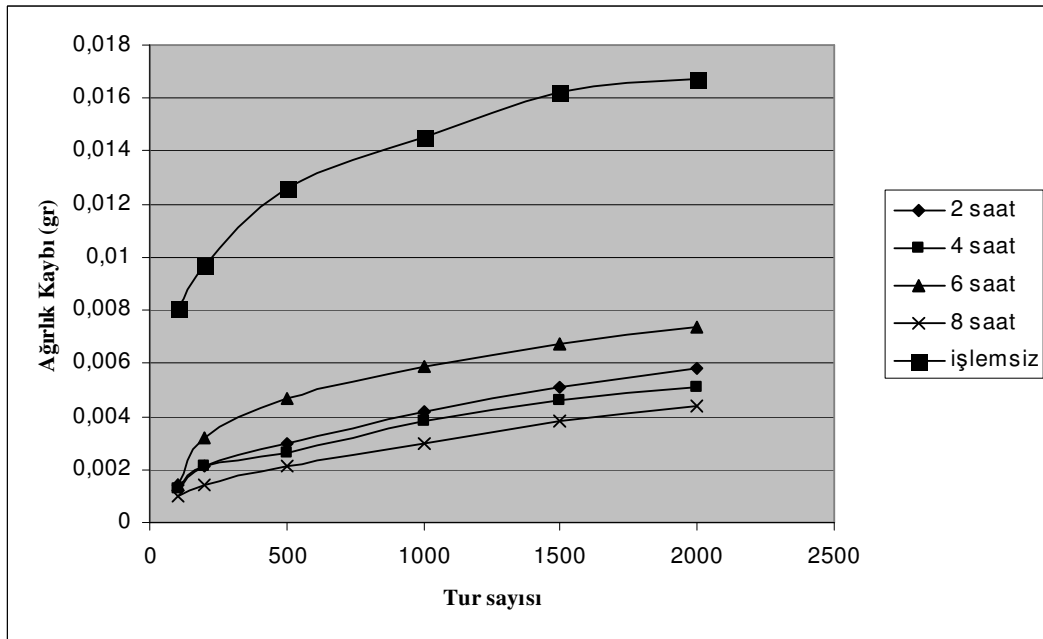
Sıcaklık (°C) - İşlem Süresi(Saat)	İlk ağırlık(gr)	100 Tur Sonundaki Ağırlık(gr)	200 Tur Sonundaki Ağırlık(gr)	500 Tur Sonundaki Ağırlık(gr)	1000 Tur Sonundaki Ağırlık(gr)	1500 Tur Sonundaki Ağırlık(gr)	2000 Tur Sonundaki Ağırlık(gr)
<b>İşlem Görmemiş Numune</b>	14,2836	14,2755	14,2739	14,2710	14,2691	14,2674	14,2669
<b>850-2</b>	13,5761	13,5738	13,5706	13,5642	13,5594	13,5565	13,554
<b>850-4</b>	13,7423	13,7403	13,7394	13,7386	13,7378	13,737	13,7355
<b>850-6</b>	14,0606	14,0591	14,0584	14,0574	14,0568	14,0561	14,0556
<b>850-8</b>	13,8615	13,86	13,8592	13,8587	13,8578	13,8571	13,8564
<b>900-2</b>	13,8842	13,8828	13,8821	13,8812	13,88	13,8791	13,8784
<b>900-4</b>	14,0958	14,0945	14,0937	14,0932	14,092	14,0912	14,0907
<b>900-6</b>	13,7242	13,7228	13,721	13,7195	13,7183	13,7175	13,7168
<b>900-8</b>	13,4069	13,4059	13,4055	13,4048	13,4039	13,4031	13,4025
<b>950-2</b>	13,921	13,9197	13,9194	13,9183	13,9173	13,9166	13,9155
<b>950-4</b>	14,1838	14,1821	14,1815	14,1808	14,1799	14,1791	14,1787
<b>950-6</b>	13,8223	13,8187	13,8178	13,8172	13,8166	13,8161	13,8156
<b>950-8</b>	13,5803	13,5785	13,5777	13,5772	13,5766	13,5762	13,5758

Çizelge 6.7. İşlem şartlarına bağlı olarak 2000 tur aşınma sonucu toplam ağırlık kayıpları (gr)

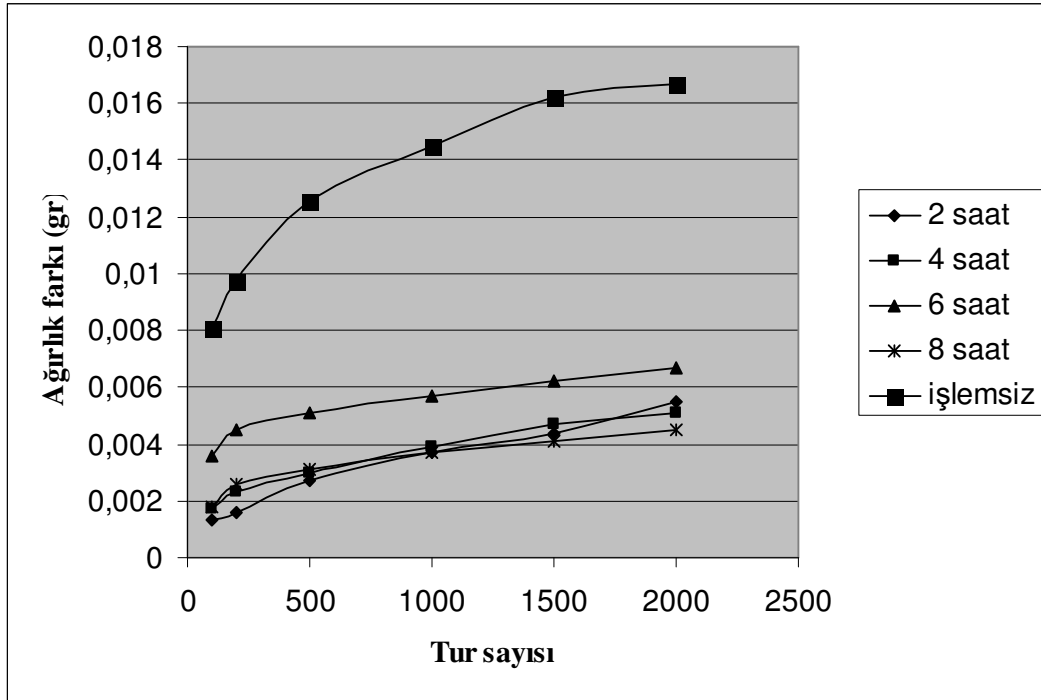
Süre	Ağırlık Kaybı (gr)		
	850 °C	900 °C	950 °C
<b>2 saat</b>	0,0221	0,0058	0,0055
<b>4 saat</b>	0,0068	0,0051	0,0051
<b>6 saat</b>	0,005	0,0074	0,0067
<b>8 saat</b>	0,0051	0,0044	0,0045
<b>İşlem Görmemiş Numune</b>	0,167		



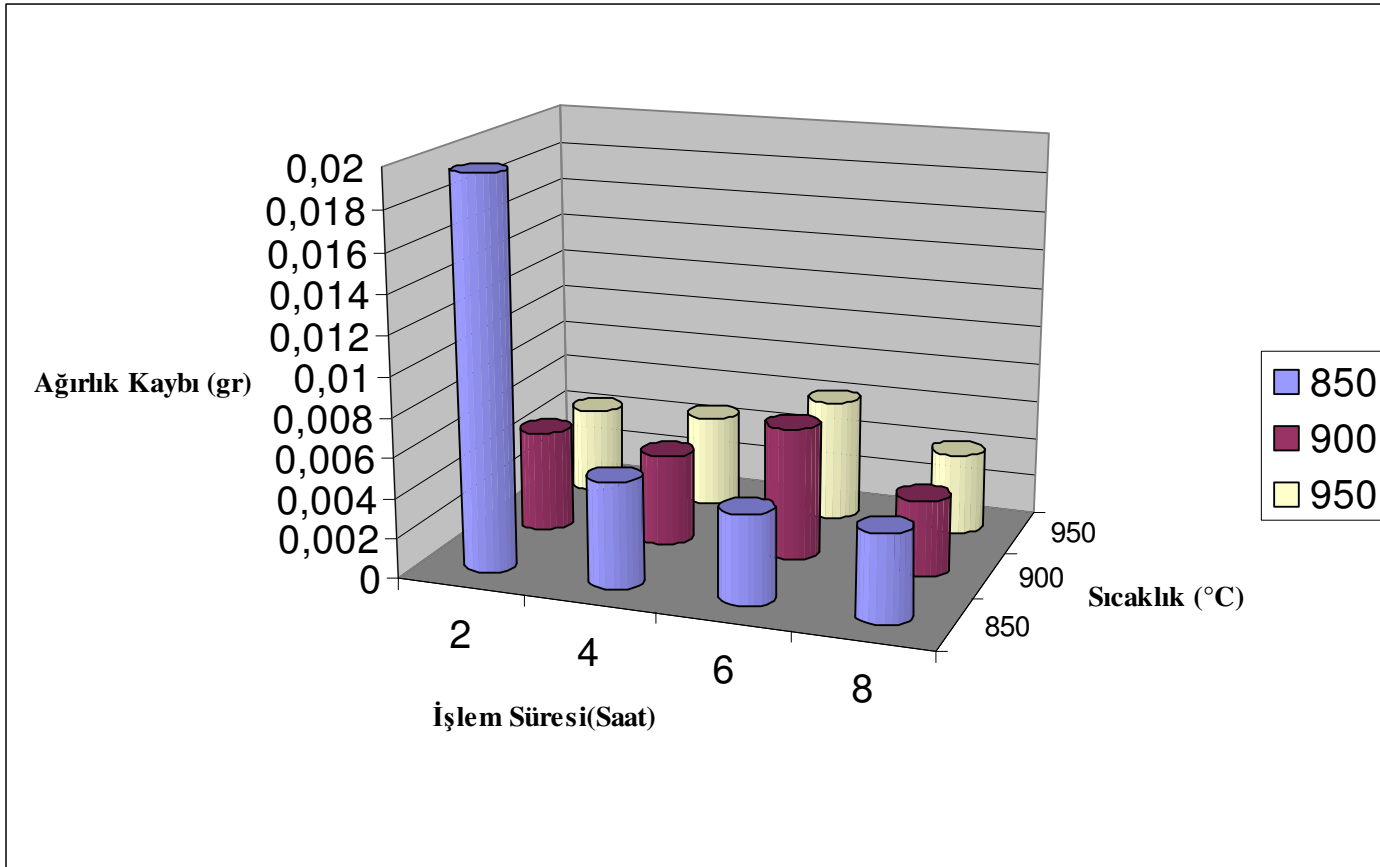
Şekil 6.44. 850 °C sıcaklıkta borlanan numunelerin aşınma davranışları.



Şekil 6.45. 900 °C sıcaklıkta borlanan numunelerin aşınma davranışı.



Şekil 6.46. 950 °C sıcaklıkta borlanan numunelerin aşınma davranışı



Şekil 6.47. Numunelerin 2000 tur sonundaki toplam aşınma miktarları.

## 7. GENEL SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR

Bu çalışmada, DDK 60 numuneler 850, 900 ve 950 °C sıcaklıkta 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerde kutu borlama yöntemiyle Ekabor2® toz karışımları kullanılarak borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işlemi sonrası borlama süresi ve sıcaklığının numuneler üzerindeki etkileri gözlenmiştir. İşlem şartlarına bağlı olarak mikroyapının, borür tabakalarının faz dağılımlarının ve aşınma özelliklerinin değiştiği gözlenmiştir. Borür tabakasının büyüme kinetiği incelenmiştir. Bu sonuçlar aşağıda irdelenmiştir.

- Klasik metalografi teknikleri ile hazırlanan tüm numuneler üzerinde yapılan optik mikroskop incelemeleri sonucunda; yüzeyden içeriye doğru borür tabakası, geçiş bölgesi ve matrisden oluşan bir yapı gözlenmiştir. Borür tabakasının, çeliklerdeki gibi, kolonsal bir yapı sergilediği ve borür tabakası içerisinde yer yer dağılmış olan küresel grafitler ile kompozit formda bir tabaka oluşturduğu görülmüştür. Yapılan mikroyapı ve XRD analizlerinde; borür tabakasında, 850 °C sıcaklık ve 2 saat süre ile borlanan numunede sadece Fe<sub>2</sub>B fazı oluşurken diğer işlem sıcaklık ve sürelerinde FeB fazının da oluştuğu belirlenmiştir.

Borlama işleminde, C ve Si gibi alaşım elementleri demir borürde çözünmeyenlerinden matris yapıya doğru yayılır ve borür tabakasının altında yığılırlar. Bu nedenle oluşan, borür fazları ve matris yapı arasında bant şeklinde silisyumca zengin ferrit bölgesi gözlenmiştir. Bu bölgenin kalınlığı, borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla artış göstermiştir. Yüzeyden içeri doğru yayılan karbon ise matris yapının ferrit bölgesine yakın kısmında perlit fazının artmasına neden olmuştur.

- Borlama işlemi difüzyon kontrollü bir işlem olduğundan işlem sıcaklık ve süresinin artmasıyla tabaka kalınlığının artması beklenen bir sonuçtur. İşlem şartlarına bağlı olarak borür tabaka kalınlığı 34,75 µm den 123,9 µm ye artmıştır.

- İşlem sıcaklık ve süresinin artmasıyla oluşan çift fazlı borür yapısının, borür tabakasının kalitesini kötü yönde etkilediği, yüzeye paralel doğrultuda oluşan çatlakların gözlenmesiyle belirlenmiştir. Bu çatlakların nedeni, literatürde de belirtildiği gibi, FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının ısı genleşme katsayılarının farklılığından oluşan basma ve çekme gerilmeleridir.
- Yüzeyden 20µm derinlikte ölçülen en düşük sertlik değeri 1497 HV olup, 850 °C sıcaklık ve 2 saat süreli işlemde, en yüksek sertlik değeri ise 1779 HV olup, 950 °C sıcaklıkta 8 saat süreli işlemde elde edilmiştir.
- Borlama işlem koşullarının abrazif aşınma mekanizması üzerine etkileri incelenmiş olup, aşınma dayanımının işlem sıcaklık ve süresinin artışıyla genelde arttığı belirlenmiştir. İşlem sıcaklığı ve süresinin artmasıyla tabaka kalınlığı ve sertlik arttığından bu beklenen bir sonuçtur. Ancak, 900 °C ve 950 °C sıcaklıklarda 6 saat süre ile borlanan numunelerin aşınma değerleri bu genellemenin dışındadır. Bunun sebebi ise, söz konusu numunelerin mikroyapı fotoğraflarından da görüldüğü gibi, borür tabakasında çatlak ve porozite yoğunluğunun diğer numunelere göre çok fazla olmasıdır. İşlem görmemiş numunenin aşınma davranışı incelendiğinde işlem şartlarına bağlı olarak borlanan numunelerin aşınma dayanımlarında önemli miktarda artış olduğu görülmüştür. Ancak 850 °C’ de 2 saat süre ile borlanan numunedeki toplam ağırlık kaybının, işlem görmemiş numunedeki ağırlık kaybına göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, 850 °C ‘de 2 saat sürede borlanan numunenin borür tabakasının ince olmasına bağlı olarak, 500 tur aşınma deneyi sonunda borür tabakasının kalkıp 2000 tur aşınma deneyi sonuna kadar matris yapının da aşındığı ve meydana gelen ağırlık kaybının fazla olduğu düşünülmektedir.
- Borür tabakası büyüme kinetiği çalışmaları sonucu, katı ortamda belirtilen deney şartlarında borlanan DDK 60’ın borür tabakası büyüme aktivasyon enerjisi ~126 kJ.mol<sup>-1</sup> olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak DDK 60 malzemesi başarıyla termo-kimyasal olarak borlanabilmiştir.

## 8. ÖNERİLER

Bu çalışmada, katı ortamda borlanan DDK 60 dökme demirinin yüzeyinde oluşan borür tabakasının karakterizasyonu, büyüme kinetiği ile aşınma özellikleri işlem sıcaklık ve sürelerine bağlı olarak incelenmiştir.

Bundan sonra yapılacak borlama çalışmalarında, kimyasal bileşimin küresel grafitli dökme demirlerin yüzey kalitesi ve aşınma özellikleri ile büyüme kinetiğine etkileri incelenebilir. Borlama işleminin DDK malzemelerin korozyon ve yorulma direnci gibi özelliklerine etkileri için çalışmalar yapılabilir. Ayrıca, küresel grafit boyutlarının işlem şartlarıyla değişimi ve varsa bu değişimin özelliklere etkileri araştırılabilir.



## 9. KAYNAKLAR DİZİNİ

Akbayır Ö., 2005, Katı ortamda borlanmış AISI 1030 çeliğinde işlem parametrelerinin yüzey ve aşınma özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 95s.

Anık S., Dikicioğlu A. ve Vural M., 1999, İmal Usulleri, Birsen Yayınevi, 299 s.

Anthymidis K.G., Stergioudis G. and Tsipas D.N., 2002, Boride coatings on non-ferrous materials in a fluidized bed reactor and their properties, Science and Technology of Advanced Materials.

ASM Handbook, Alloy Phase Diagrams, Volume 3.

Bayça S.U. ve Şahin S., 2004, Borlama, Mühendis ve Makine, Sayı 532, 57s.

Bhushan B., 1999, Principles and applications of tribology, John Wiley and Sons, Inc, 1020p.

Çalık A., Delikanlı K. ve Uzun A., 2004, Ç1035 Çeliğinin borlama özelliklerinin incelenmesi, II. Uluslar arası Bor Sempozyumu.

Çelikyürek İ., Baksan B. ve Gürler R., 2004, Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması, II. Uluslar arası Bor Sempozyumu.

Çelik O. N., 1996, Küresel grafitli dökme demirlerde Cu, Ni, ve Mo alaşım elementlerinin ostemperleme sonucu beynit oluşumuna etkisinin incelenmesi ve sinirsel ağ modeli ile değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 128s.

Delikanlı K., Çalık A. ve Uzun H. A., 2003, Sade karbonlu bir çeliğin borlama özelliklerinin incelenmesi, BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi.

Devlet Planlama Teşkilatı (DPT), 2001, Sekizinci beş yıllık kalkınma planı, madencilik özel ihtisas komisyonu raporu, 78s.

Erdoğan M., 2000, Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri, Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Şti., 337s.

Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü; Bor ve kullanım alanları.  
(<http://www.etimaden.gov.tr/>)

Kaestner P., Olfe J. and Rie K.T., 2001, Plasma assisted boriding pure titanium an TiAl6V4, Surface and Coatings Technology.

Karakan M., Alasaran A. ve Çelik A., 2002, Plazma Borlama, Mühendis ve Makine, Sayı 512.

Keddam M., 2004, A kinetic model for the borided layers by the paste-boriding process, Applied Surface Science.

Keith S., 1997, Boronizing protects metals against wear, Advanced Materials and Processes, Volume 151, Issue 3.

Kulka M. and Pertek A., 2003, Characterization of complex (B+C+N) diffusion layers formed on chromium and nickel based low carbon steel, Applied Surface Science.

Mann B.S., 1997, Boronizing of cast martensitic chromium nickel stainless steel and its abrasion and cavitation-erosion behavior, Wear.

Martini C., Palombarini G. and Carbucicchio M., 2004, Mechanism of thermochemical growth of iron borides on iron, Materials Science.

Matuschka A.G., 1980, 'Boronizing' Carl Hanser Verlag, München Vien.

- Meriç C., Sahin S. and Koksall N.S., 2005, Investigation of the boronizing effect on the abrasive wear behavior in cast irons, *Materials and Design*.
- Özbek İ., 1999, Borlama yöntemi ile (AISI M50, AISI M2) yüksek hız çeliklerinin ve AISI W1 çeliğinin yüzey performanslarının geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 161s.
- Özsoy A., 1991, Çeliğin borlanması borür tabakası, geçiş zonu ve ana matrisin özelliklerinin iyileştirilmesi, *Doktora Tezi*, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 91s.
- Sakalar M., 2002, Dökme demirler, Gazi Üniversitesi, Ankara.  
(<http://www.mtt.gazi.edu.tr>).
- Sen S., Şen U. and Bindal C., 2005, The growth kinetics of borides formed on boronized AISI 4140 steel, *Vacuum*.
- Soyupak A., 2004, Alaşımız düşük karbonlu çeliklerin kutu borlanması ve özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 81s.
- Struers, 2006, Metallographic preparation of cast iron, *Application notes*.
- Şen U., 1997, Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve özellikleri, *Doktora Tezi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 178s.
- Ueda N., Mizukoshi T., Demizu K., Sone T., Ikenaga A. and Kawamoto M., 2000, Boriding of nickel by the powder pack method, *Surface and Coatings Technology*.
- Üncü Ü.R. ve Yerlikayalar C., 2004, Küreselleşme sürecinde, küresel boronların göz diktiği ulusal maden varlığımız, "Bor Pazarı Yapısı", II. Uluslararası Bor Sempozyumu..

Yoon J.H., Jee Y.K., and Lee S.Y., 1999, Plasma paste boronizing treatment of the stainless steel AISI 304, Surface and Coatings Technology.

Yu L.G., Khor K.A. and Sundararajan G., 2002, Boriding of mild steel using the plasma sintering (SPS) technique, Surface and Coatings Technology.

Yu L.G., Chen X.J., Khor K.A. and Sundararajan G., 2005, FeB/Fe<sub>2</sub>B phase transformation during SPS pack-boriding: Boride layer growth kinetics, Acta Materialia.