

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CAM KALIPLARINDA KULLANILAN KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME  
DEMİRLERİN (KGDD) BORLANMASI**

**FATMA ÜNAL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALURİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
MALZEME PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. AHMET TOPUZ**

**İSTANBUL, 2013**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CAM KALIPLARINDA KULLANILAN KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME  
DEMİRLERİN (KGDD) BORLANMASI**

Fatma ÜNAL tarafından hazırlanan tez çalışması **29/08/2013** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Ahmet TOPUZ  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Ahmet TOPUZ  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Cemalettin YAMAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER  
Yıldız Teknik Üniversitesi

---

---

---

## ÖNSÖZ

---

Bu çalışmada cam sanayisinde kullanılan kalıplarda meydana gelen aşınma gibi problemlerden kaynaklı malzeme ve ürün kayıplarını minimuma indirmek ve kalıpların ömrünü arttırmak amacı ile cam şekillendirilmesinde kullanılan kalıplara borlama yüzey işlemleri uygulanmıştır. Yüzey işlemleri ile malzemelerin sertlik, yorulma ve kırılma tokluğu gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra, sürtünme, aşınma, oksidasyon ve korozyona karşı dayanıklılık kazanması sağlanmaktadır ve bu tez çalışmasında da kalıpların ömürlerinin uzatılması amaçlanmıştır.

Lisansüstü eğitimim süresince kıymetli fikir, öneri ve eleştirileriyle bana daima yol gösteren, tezimin her aşamasında ilgisini esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet TOPUZ'a teşekkürlerimi ve en derin saygılarımı sunarım.

Çalışmam boyunca testlerin gerçekleştirilmesindeki yardımlarından dolayı sevgili hocalarım Arş.Gör. Zekeriya Yaşar CÖMERT ve Arş.Gör. Burak BİROL'a, Uzman Yahya BAYRAK'a ve bölümümüz teknisyenlerinden Mehmet ÇALIŞKAN ve Şaban CEYLAN' a ve değerli arkadaşlarım Şaban TOROS ve Ozan BÜLBÜL' e teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca her zaman yanımda olup, benden desteklerini esirgemeyen değerli annem Hatice ÜNAL' a, hayattaki en büyük yol göstericim olan değerli babam Saim ÜNAL' a ve kardeşlerime teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos, 2013

Fatma ÜNAL

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	vii
KISALTMA LİSTESİ .....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xi
ÖZET .....	xii
ABSTRACT .....	xiv
<b>BÖLÜM 1</b>	
<b>GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1    Literatür Özeti .....	1
1.2    Tezin Amacı .....	3
1.3    Hipotez .....	3
<b>BÖLÜM 2</b>	
<b>CAM</b> .....	<b>4</b>
2.1    Cam Üretim Proseslerinde Kullanılan Kalıp Parçaları .....	4
2.2    Cam Üretiminde Kullanılan Kalıp .....	5
2.2.1    Cam Üretimi Kalıplarında Kullanılan Malzemeler.....	6
2.2.1.1    Paslanmaz Çelikler .....	6
2.2.1.2    Bakır Esaslı Alüminyum Bronzu .....	7
2.2.1.3    Nikel Esaslı Kalıp Alaşımları .....	7
2.2.1.4    Seramik Esaslı Kalıp Malzemeleri .....	7
2.2.1.5    Dökme Demir Kalıp Malzemeleri .....	8
2.3    Cam Kalıplarından Beklenen Özellikler .....	8
<b>BÖLÜM 3</b>	
<b>BOR VE BORLAMA</b> .....	<b>11</b>
3.1    Bor.....	11

3.2	Borlama .....	12
3.3	FeB ve Fe <sub>2</sub> B' un Özellikleri .....	15
3.4	Fe-B Denge Diyagramı.....	16
3.5	Borlama Yöntemleri .....	16
3.5.1	Kutu Borlama (Katı ortamda borlama) Yöntemi.....	17
3.5.2	Pasta (Macun) Borlama Yöntemi.....	20
3.5.3	Sıvı Borlama .....	21
3.5.4	Gaz Borlama Yöntemi .....	23
3.5.5	Plazma Borlama Yöntemi .....	24
3.5.6	Çok bileşenli borlama yöntemi.....	25
3.5.7	Akışkan Yatakta Borlama Yöntemi.....	25
3.6	Akışkan Yataklı Fırınlar .....	29
3.6.1	Dıştan Rezistanslı Akışkan Yataklı Fırınlar.....	29
3.6.2	İçten Rezistanslı Akışkan Yataklı Fırınlar .....	30
3.6.3	Daldırmalı Isıtmalı Akışkan Yataklı Fırınlar .....	30
3.6.4	Direkt Isıtmalı Akışkan Yataklı Fırınlar .....	31
3.6.5	Endirekt Isıtmalı Akışkan Yataklı Fırınlar .....	31
3.6.6	İndüksiyon Isıtmalı Akışkan Yataklı Fırınlar .....	32
3.7	Borlama Üzerine Alaşım Elementlerinin Etkisi .....	32
3.8	Borlamanın Avantajları .....	32
3.9	Borlamanın Dezavantajları.....	34

#### BÖLÜM 4

BORLAMA KİNETİĞİ VE DİFÜZYON.....	36
4.1 Borlama Kinetiği.....	36
4.2 Difüzyon Mekanizmaları .....	36
4.2.1 Arayer Difüzyonu.....	36
4.2.2 Boşluk Difüzyonu .....	37
4.2.3 Yer Değiştirme İle Difüzyon .....	37
4.3 Aktivasyon Enerjisi (Q).....	38
4.4 Difüzyon Hızı .....	39
4.5 Difüzyon Katsayısı (D) .....	39
4.6 Difüzyon Mesafesi (x).....	40

#### BÖLÜM 5

AŞINMA VE KIRILMA TOKLUĞU .....	42
5.1 Aşınma.....	42
5.2 Aşınma Mekanizmaları.....	43
5.2.1 Adhezif Aşınma .....	43
5.2.2 Koroziyel Aşınma.....	44
5.2.3 Eroziyel Aşınma .....	45
5.3 Borlama Yüzey İşleminin Aşınmaya Etkisi.....	45
5.4 Kırılma Tokluğu .....	47

#### BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	49
---------------------------	----

6.1	Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Yöntem .....	49	
6.2	Deneylerde Kullanılan Cihazlar .....	51	
6.2.1	Borlama Kutusu .....	51	
6.2.2	Borlama İşleminde Kullanılan Fırın .....	51	
6.2.3	Optik Emüsyon Spektrometresi.....	52	
6.2.4	Optik Mikroskop .....	52	
6.2.5	X-Işını Difraktometresi (XRD) Cihazı .....	53	
6.2.6	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	53	
6.2.7	Aşınma Cihazı.....	54	
6.2.8	Sertlik Cihazı .....	54	
6.3	Borlama Sonrası Elde Edilen Borür Tabakalarının Mikroyapı İncelemeleri .. .....	55	
6.4	Borlama Sonrası Elde Edilen Borür Tabakalarının Mikrosertlik Ölçümleri ... .....	63	
6.5	Borlama Sonrası Elde Edilen Borür Tabakalarının Kırılma Tokluğu Ölçümleri.....	64	
6.6	Borlanmış Numunelerin XRD Analizleri .....	65	
6.7	Borlanmış Numunelerin Sürtünme Katsayılarının Hesaplanması.....	66	
6.8	Borür Tabakalarının Büyüme Kinetiği .....	70	
<b>BÖLÜM 7</b>			
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>			<b>72</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>			<b>75</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>			<b>82</b>

## SİMGE LİSTESİ

---

B	Bor
B <sub>4</sub> C	Bor Karbür
KBF <sub>4</sub>	Potasyum Bor Tetra Florür
C	Karbon
SiC	Silisyum Karbür
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum Oksit
FeB	Demir Borür Bilesigi
Fe <sub>2</sub> B	Demir Borür Bilesigi
<sup>0</sup> C	Santigrat Cinsinden Sıcaklık
<sup>0</sup> K	Kelvin Cinsinden Sıcaklık
μmf	Minimum Akıs Hızı
d	Parçacık Çapı
p	Parçacık Kütlesi
D	Difüzyon Katsayısı
x	Bor Dis Sayısı
t	Zaman
Kc	Kırılma Toklugu
E	Elastisite Modülü
P	Yük
c	Çatlak Yarı Boyu
μ	Sürtünme Katsayısı
mg	Miligram
SiO <sub>2</sub>	Silisyum Oksit

## KISALTMA LİSTESİ

---

ASTM	American Society for Testing and Materials
AISI	Amerikan Endüstriyel Normu
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
HV	Vickers Sertliği
KGDD	Küresel Grafitli Dökme Demir
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	Scanning Electron Microscope
XRD	X-Işını Difraksiyon Spektrometresi



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Cam üretiminde kullanılan kalıp ve aksesuarlar ..... 5
Şekil 2. 2	Yaygın olarak kullanılan bazı cam kalıbı alaşımlarının ısı geçirgenlik-sıcaklık değişimi ..... 6
Şekil 3. 1	900° C’de 8 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK60’ın mikroyapı fotoğrafı ..... 15
Şekil 3. 2	Fe-B denge diyagramı ..... 16
Şekil 3. 3	Kutu borlama kutusu..... 18
Şekil 3. 4	Gaz borlama ünitesi ..... 23
Şekil 3. 5	Plazma borlama ünitesinin şematik resmi ..... 24
Şekil 3. 6	Yatak malzemesinin akışkanlaşmasında basınç değişimi ve akışkanlaşmanın etkisi ..... 27
Şekil 3. 7	Akışkan yataklarda meydana gelen akışkanlaşma tipleri ..... 28
Şekil 3. 8	Değişik tipte gaz dağıtıcılarının kullanılması sonucu oluşan akışkanlaşma kaliteleri ..... 29
Şekil 3. 9	Dıştan rezistanslı akışkan yataklı fırının şematik gösterimi ..... 29
Şekil 3. 10	İçten rezistanslı akışkan yataklı fırının şematik gösterimi ..... 30
Şekil 3. 11	Daldırmalı ısıtmalı akışkan yataklı fırının şematik gösterimi ..... 30
Şekil 3. 12	Direkt ısıtmalı akışkan yataklı fırının şematik gösterimi ..... 31
Şekil 3. 13	Endirekt ısıtmalı akışkan yataklı fırının şematik gösterimi..... 31
Şekil 3.14	Borlama sırasında alaşım elementlerinin hareket yönü ..... 32
Şekil 4. 1	Arayer difüzyonunun şematik gösterimi..... 37
Şekil 4. 2	Boşluk difüzyonunu şematik gösterimi ..... 37
Şekil 4. 3	Yer değiştirme ile difüzyonun şematik gösterimi ..... 37
Şekil 4. 4	Yer alan ve arayer difüzyonlarında aktivasyon enerjisinin gösterimi ..... 38
Şekil 4. 5	$\alpha$ -Fe içerisindeki farklı atom difüzyonlarına ait difüzyon katsayısı-sıcaklık ilişkisi grafiği ..... 38
Şekil 4. 6	Difüzyon mekanizmasının şematik gösterimi ..... 39
Şekil 4. 7	Difüzyon mesafesinin şematik gösterimi ..... 40
Şekil 5. 1	Çalışma koşulları ile aşınma türleri arasındaki ilişkiyi gösteren akış şeması 43
Şekil 5. 2	Adhezif aşınma olayının şematik gösterimi ..... 44
Şekil 5. 3	Korozif aşınmanın gelişiminin şematik görüntüsü ..... 44
Şekil 5. 4	Korozif aşınmaya bir örnek ..... 45

Şekil 5. 5	Vickers uç kullanılarak elde edilen izin kullanımıyla kırılma tokluğu ölçümü..	48
Şekil 6. 1	GGG40.3 mikroyapı görüntüsü .....	50
Şekil 6. 2	Borlama kutusunun şematik resmi .....	51
Şekil 6. 3	Protherm PLF 100/3 kamara tip fırın .....	51
Şekil 6. 4	Optik emüsyon spektrometresi .....	52
Şekil 6. 5	Leica ICM 1000 mikroskop ve bilgisayarlı analiz ünitesi .....	52
Şekil 6. 6	X-ışını difraktometresi (XRD) cihazı .....	53
Şekil 6. 7	Taramalı elektron mikroskobu (SEM) .....	53
Şekil 6. 8	Micro photonics ball on disk (bilya-disk) aşınma cihazı.....	54
Şekil 6. 9	Mikrosertlik cihazı .....	54
Şekil 6.10	850°C' de Ekabor I ile borlanmış numunelerin optik mikroskop görüntüleri .....	55
Şekil 6.11	850°C' deki borür tabaka kalınlıklarını gösteren grafik .....	56
Şekil 6.12	900°C' de Ekabor I ile borlanmış numunelerin optik mikroskop görüntüleri..	57
Şekil 6.13	900°C' deki borür tabaka kalınlıklarını gösteren grafik .....	57
Şekil 6.14	950°C' de Ekabor I ile borlanmış numunelerin optik mikroskop görüntüleri .....	58
Şekil 6. 15	950°C' de 4 saat %85B <sub>4</sub> C+%15Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ile borlanmış numunenin optik mikroskop görüntüsü .....	59
Şekil 6. 16	950°C' de 4 saat Ekabor II ile borlanmış numunenin optik mikroskop görüntüsü .....	59
Şekil 6. 17	950°C' deki borür tabaka kalınlıklarını gösteren grafik .....	60
Şekil 6. 18	Borlanmış numunelerin geri saçılımlı elektronlarla çekilmiş elektron mikroskobu görüntüleri .....	61
Şekil 6. 19	950°C, 4 saat %85B <sub>4</sub> C+%15Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> kutu borlama işlemi optik mikroskop görüntüleri .....	62
Şekil 6. 20	Borür tabakası üzerinde kırılma tokluğu hesabı için çatlak boyunun ölçümü. ..	64
Şekil 6. 21	950°C' de 1 saat Ekabor I tozu ile borlanmış numunenin XRD analizi .....	65
Şekil 6. 22	950°C' de 4 saat Ekabor I tozu ile borlanmış numunenin XRD analizi .....	66
Şekil 6. 23	950°C' de Ek I, 1 saat borlanmış numunenin sürtünme katsayısı-zaman grafiği .....	67
Şekil 6. 24	950°C' de Ek I, 4 saat borlanmış numunenin sürtünme katsayısı-zaman grafiği .....	67
Şekil 6. 25	GGG40.3 deney numunesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	68
Şekil 6. 26	Numunelerin aşınma izi optik mikroskop görüntüleri .....	68
Şekil 6. 27	Numunelerin aşınma izi SEM görüntüleri .....	69
Şekil 6. 28	Borlama işlemine tabi tutulmuş GGG40.3 dökme demirin x <sup>2</sup> -t grafiği.....	70
Şekil 6. 29	Borlama işlemine tabi tutulmuş GGG40.3 dökme demirin lnK-1/T grafiği..	71

## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1	Bor ve bazı bileşiklerinin sertlikleri ..... 11
Çizelge 3. 2	Ana malzemeye göre elde edilen borür fazları ve mikro sertlikleri ..... 14
Çizelge 3. 3	FeB ve Fe <sub>2</sub> B' un özellikleri ..... 15
Çizelge 3. 4	Kutu borlama yönteminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin özellikleri. ..... 18
Çizelge 3. 5	Borlama bileşenleri ..... 19
Çizelge 3. 6	Ekabor borlama ürünleri ..... 19
Çizelge 3. 7	Pasta borlama yönteminde kullanılan koruyucu gazlar ve bileşimleri ... 21
Çizelge 3. 8	Sıvı ortam borlamasında kullanılan temel bor kaynakları ve özellikleri . 22
Çizelge 3. 9	Yüzeyi borlanmış çeliklerin sert malzemelerle ve diğer yüzey işlemleriyle kıyaslanması ..... 33
Çizelge 4. 1	Bazı metallerde yayılım sabiti ve aktivasyon enerjisi..... 40
Çizelge 5. 2	Kromlama ve borlama ısı işlemi uygulanmış çeliklerin sürtünme..... katsayıları ..... 46
Çizelge 5. 3	Borlanmış ve borlanmamış malzemelerin sürtünme katsayılarının ..... kıyaslanması ..... 47
Çizelge 6. 1	GGG40.3 küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimi ..... 49
Çizelge 6. 2	850°C' de yapılan borlama sonucu oluşan borür tabaka kalınlığı değerleri ..... 56
Çizelge 6. 3	900°C' de yapılan borlama sonucu oluşan borür tabaka kalınlığı değerleri ..... 58
Çizelge 6. 4	950°C' de yapılan borlama sonucu oluşan borür tabaka kalınlığı..... 59
Çizelge 6. 5	Mikrosertlik değerleri..... 63
Çizelge 6. 6	Kırılma tokluğu değerleri..... 64
Çizelge 6. 7	Numunelerin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, sürtünme, aşınma derinliği ve hızı değerleri..... 69

**CAM KALIPLARINDA KULLANILAN KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME  
DEMİRLERİN (KGDD) BORLANMASI**

Fatma ÜNAL

Metaluri ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet TOPUZ

Bu tez çalışmasında ferritik GGG40.3 küresel grafitli dökme demir örnekler Ekabor I ticari tozu içinde gömülerek 850, 900 ve 950°C sıcaklıklarda 1, 2 ve 4 saat sürelerde kutu borlama tekniği ile borlama yapılmıştır ve daha sonra aynı demir borlama ajanı olarak kullanılan ticari Ekabor II tozu ile borlamaya tabi tutuldu ve borlama işlemi 950°C sıcaklıkta 4 saat boyunca gerçekleştirildi. Genellikle Ekabor toz karışımı B<sub>4</sub>C, SiC and KBF<sub>4</sub> içermektedir. Son olarak, KBF<sub>4</sub>'deki flor gazının zararlı etkisinden dolayı Ekabor tozu yerine %85B<sub>4</sub>C+%15Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> toz karışımı kullanılarak 950°C sıcaklıkta 4 saat boyunca borlama yapılmıştır.

Demir ana malzeme üzerindeki FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının varlığı optik mikroskop ve SEM(taramalı elektron mikroskobu) ile doğrulandı ve borür tabakasının tester dişi şeklinde morfolojisi gözlemlendi. X-ışını difraksiyon analizleri, kırılma toklukları ve mikrosertlikleri incelenmiş ve tabaka büyüme oran sabitleri hesaplanmıştır. 30 N yük altında 1000 m kayma yolunda ball on disk(bilye-disk) aşınma testi uygulanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Ekabor I ve Ekabor II ticari tozları aynı kompozisyona sahipken, toz boyutları aynı değildir. Burada toz boyutunun borlama üzerine etkisi incelenmiştir. Toz boyutunun azalması daha iyi yüzey temasıdır ve böylece daha iyi difüzyon gerçekleşir. Ekabor I ile

borlanan örneklerin borür tabaka kalınlığı Ekabor II kullanılarak elde edilen borür tabakasınınkinden daha kalındır.

Demir yüzeyindeki borür tabakaların X-ışınları difraksiyon analizi FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının varlığını ortaya çıkarmıştır. Borlama sonrasında elde edilen borür tabakasının kalınlığı optik mikroskop kullanılarak ölçülmüştür. 850°C' de 1, 2 ve 4 saatlik sürelerde borlanmış örneklerin borür tabaka kalınlığı değerleri 38-60 µm aralığında iken, 950°C' de borlanmış örneklerin borür tabaka kalınlık değerleri 92-198 µm arasında dağılım göstermektedir.

Sertlik değerlerinin 1170-1820 HV ve kırılma tokluğu 2,79-3,78 MPa m<sup>1/2</sup> aralığında bulunmuştur. Uzun borlama süresinin düşük kırılma tokluğu değerleriyle sonuçlandığı gözlemlenmiştir.

Aşınma testleri sonrasında, borlanmamış örneğin borlanmış örneklerle karşılaştırıldığında daha düşük aşınma direnci sergilediği gözlemlenmiştir.

Difüzyon katsayısı değerlerinin 1,078x10<sup>-8</sup>-1,537x10<sup>-7</sup> cm<sup>2</sup>/sn aralığında olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Yüzey işlem, kutu borlama, küresel grafitli dökme demir, difüzyon katsayısı

**BORONIZING OF DUCTILE IRONS USED IN GLASS MOULDS**

Fatma ÜNAL

Department of Metallurgical and Materials Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Ahmet TOPUZ

In this study, ferritic GGG40.3 ductile iron samples embedded in commercial Ekabor I powder were boronized with pack boronizing technique at 850, 900 and 950°C for 1, 2 and 4 hours and then same iron was also subjected to boronizing with commercial Ekabor II powder was used as the boronizing agent and boronizing treatment were carried out at 950°C for 4 hour. Generally, compound of Ekabor powder consists of B<sub>4</sub>C, SiC and KBF<sub>4</sub>. Finally, it was boronized by using %85B<sub>4</sub>C +%15 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> powder mixture instead of Ekabor powder at 950°C for 4h, due to harmful effect of fluorine gas in KBF<sub>4</sub>.

The presence of FeB and Fe<sub>2</sub>B phases on iron substrate was confirmed by optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) and it was observed tooth-shape morphology of boride layers. It was investigated X-ray diffraction, fracture toughness and microhardness and calculated growth rate constant. Wear tests were carried out using the ball on disc apparatus under 30 N load, 1000 m sliding distance and results were evaluated.

Although commercial Ekabor I and Ekabor II powders have same composition, powder sizes of them are not the same. It was investigated the effect of powder size on boronizing. The smaller the particle size of the powder, the bigger the contact surface, and so the better the diffusion. The thickness of boride layers of samples boronized by using Ekabor I was thicker than the boride layers obtained by using Ekabor II.

X-ray diffraction analysis of boride layers on the surface of the iron revealed the existence of FeB, Fe<sub>2</sub>B phases. After boronizing, thickness of the obtained boride layers

was measured by using optical microscopy. While thickness values of boride layers of borided samples at 850°C for 1, 2 and 4 hours were between 38 and 60 µm, thickness values of boride layers of borided samples at 950°C ranged from 92 to 198 µm.

It was found that hardness values were between 1170 and 1820 HV and fracture toughness were in the range of 2,79-3,78 MPa m<sup>1/2</sup>. It was observed that prolonged boronizing time resulted in low fracture toughness values.

After wear tests, It was observed that unboronized sample exhibited inferior wear resistance compared to boronized samples.

It was determined that diffusion coefficient values were in the range of 1,078x10<sup>-8</sup>-1,537x10<sup>-7</sup> cm<sup>2</sup>/sn.

**Keywords:** Surface treatment, pack boronizing, ductile iron, diffusion coefficient

#### 1.1 Literatür Özeti

Türk Cam Sanayii 1935 yılında üretime başlayan Paşabahçe Fabrikası ile kurulmuş olup, 78 yıllık bir geçmişe sahip olan Türk Cam Sanayii bu sürede de gelişmesini ve büyümesini sürdürmüştür. Bugün camın asıl gruplarını oluşturan düz cam (işlenmiş camlar dahil), cam ev eşyası, cam ambalaj, cam elyafı, taşyünü ve cam yünü üretimleri gerçekleştirilmektedir. Cam sektörü inşaat, otomotiv, beyaz eşya, gıda, ilaç, kozmetik, turizm (lokanta, ikram dahil...), mobilya, boru, elektrik ve elektronik gibi bir çok sektörü ve ev eşyalarına kadar birçok alanı kapsamaktadır[1].

Cam üretiminde, cam kalıplarının sıcak camla teması kalıbın aşınmasına ve ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Cam sanayisinin ülkemizde var olan gelişimini göz önünde bulundurduğumuzda, cam kalıplarının ömürlerinin arttırılmasıyla ilgili yapılan çalışmaların ne kadar önem arz ettiği ortadadır. Nitrokarbürleme, sementasyon, sert krom kaplama, borlama ve çeşitli yüzey kaplama teknikleri gibi çok çeşitli yüzey işlemleri ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Burada yapılan bazı çalışmalardan bahsedilecektir.

Arısoy 2005 yılında, cam ambalaj üretiminde kullanılan dökme demir kalıp olan, ASTM A 247' ye göre A tipi alaşımsız gri dökme demir ve bir yüzeyinde kokil kalıp kullanılarak çil uygulanmış D tipi alaşımlı dökme demir malzemelere nitrokarbürizasyon ve pasta borlama işlemleri uygulamıştır. Cam ambalaj üretimi koşullarına benzer şartlardaki performans deneylerinde borlanmış alaşımlı dökme demirin borlanmamış olana göre daha uzun süre yüzey sertliğini koruduğunu bulmuştur [2].



Güneş ve arkadaşları 2012 yılında, 21NiCrMo2 yatak çeliğine ağırlıkça %100 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %70 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +%30 SiC, %70 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +% 30 B<sub>4</sub>C, % 30 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %70 SiC, %30 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %70 B<sub>4</sub>C pasta karışımlarını kullanarak 700, 750 ve 850 °C sıcaklıkta 2, 5 ve 7 saat sürede %70H<sub>2</sub> – %30Ar gaz karışımında 10 mbar basınç altında plazma pasta borlama işlemi yapmışlardır. Aynı malzeme Ekabor II toz karışımı ile aynı sıcaklık ve sürelerde kutu borlama işlemine de tabi tutulmuştur. Her iki borlama yöntemiyle de elde edilen borür tabakalarının testere dişi şeklinde olduğunu tespit etmişlerdir. Plazma borlama tekniği ile yapılan borlama sonucunda kutu borlama ile elde edilen borür tabaka kalınlıkları karşılaştırılacak olursa; aynı sıcaklıkta plazma borlama ile elde edilen tabaka kalınlığının daha kalın olduğunu gözlemlemişlerdir. Her iki borlama yönteminin sonucunda (FeB +Fe<sub>2</sub>B) çift fazlı yapının oluştuğunu, 850 °C sıcaklıkta 7 saat plazma borlama sonucunda 1992 HV<sub>0.05</sub> sertlik değerinde iken, kutu borlama ile 1951 HV<sub>0.05</sub> sertlik değerinde olduğunu bulmuşlardır [3].

Kayalı ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları çalışmada, AISI 440C ve AISI 52100 çeliklerini Ekabor II tozu ile 850, 900 ve 950 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 8 saat sürede kutu borlama işlemine tabi tutmuşlardır. Elde edilen sonuçlarda AISI 52100 çeliğinde FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakalarını gözlemlerlerken, AISI 440C çeliğinde bu fazların yanı sıra CrB ve MnB fazlarına da rastlamışlardır. AISI 440C paslanmaz çeliğinin tabaka kalınlığının AISI 52100 çeliğine göre daha düşük olduğunu ve AISI 440C paslanmaz çelik malzemenin morfolojisinin düz olduğunu; AISI 52100 çeliğinin yüzeyinde oluşan tabakanın morfolojisinin testere dişi şeklinde olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun nedeni; alaşım elementlerinin hem borür tabaka kalınlığını düşürmesi hem de tabakanın morfolojisini etkilemesindedir. Borlama işlemine tabi tutulmamış AISI 52100 çeliğinin sertliğinin 311 HV<sub>0.05</sub> değerinden 1620-1989 HV<sub>0.05</sub> değerine yükseldiğini, AISI 440C çeliğinin 400 HV<sub>0.05</sub> sertlik değerinden borlama sonrasında 1530-2170 HV<sub>0.05</sub> sertlik değerlerine yükseldiklerini gözlemlemişlerdir[4].

Azaklı ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları çalışmada, Saf Fe ve Fe-8Mo ikili alaşımlarından numuneler hazırlayıp, 1100 °C sıcaklıkta, 3 saat süre ile % 90 SiC, % 5 B<sub>4</sub>C ve % 5 KBF<sub>4</sub> içeren borlama tozuyla kutu borlama işlemine tabi tutmuşlardır. Borlama sonrasında hem saf demirin hem de Fe-8Mo ikili alaşımının üzerinde oluşan borür tabakalarının testere dişi şeklinde oluştuğunu tespit ettiler. Oluşan borür tabaka

kalınlığının saf demir de daha yüksek olduğunu buldular. Saf demir üzerindeki kaplamanın geçiş bölgesinin olmadığını bulmuşlardır. Ayrıca; saf demir üzerinde oluşan tabakanın FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarından oluştuğunu, Fe-8Mo ikili alaşımında bu fazlara ilaveten molibden zengin Mo-Fe-B çökeltilerinin var olduğunu tespit etmişlerdir. Molibden zengin olana bu çökeltilerin hem borür tabakasında hem de geçiş bölgesinde var olduğunu gözlemlemişlerdir [5].

## **1.2 Tezin Amacı**

Ülkemizde çok büyük miktarlarda yeraltı kaynağı olarak bulunan bor madeninin kullanımını sağlayarak, değerlendirilmesi ve bunun yanısıra, cam sektörü ülkemizde gittikçe gelişen bir alan olduğundan, kullanılan kalıpların ömrünün arttırılmasıyla birlikte ekonomiye katkı sağlamakta amaçlanmıştır.

## **1.3 Hipotez**

Sıcak camla temas eden cam kalıplarının aşınmaya karşı direnci düşmekte ve ömürleri azalmakta, bu da maliyeti arttırmaktadır. Bunu engellemek için malzemeye değiştirilebilir ancak, bu iş çok maliyet getirir. Bunun yerine malzemenin yüzeyine işlem yapılarak dayanımı arttırılabilir. Literatür taramalarında görüldüğü gibi çeşitli yüzey işlemler yapılarak, malzemelerin ömürleri arttırılabilmektedir. Buradaki tez çalışmasında literatür araştırmalarının ışığı altında cam kalıplarında kullanılan GGG40.3 ana malzemeye yüzey işlem uygulayarak, malzemenin dayanımını arttırma yoluna gidilmiştir.

#### 2.1 Cam Üretim Proseslerinde Kullanılan Kalıp Parçaları

*Huni*; cam damlasının ebüşör merkezine düşmesini sağlayan parçadır.

*Ebüşör*; huniden gelen cama ilk şeklini veren parçadır.

*Parizon*; ebüşörde ilk şeklini almış cama verilen addır.

*Tampon*; iki görevi vardır. Birincisi, yerleştirme havasını vermek, ikincisi ise; parizonun dibini yapmaktır.

*Müldebak*; kafa kısmının şeklini oluşturan parçadır.

*Ring*; ürünün ağız yüzeyini şekillendirmede kullanılan parçadır.

*Mandren*; ilk boşluk şeklini veren parçadır.

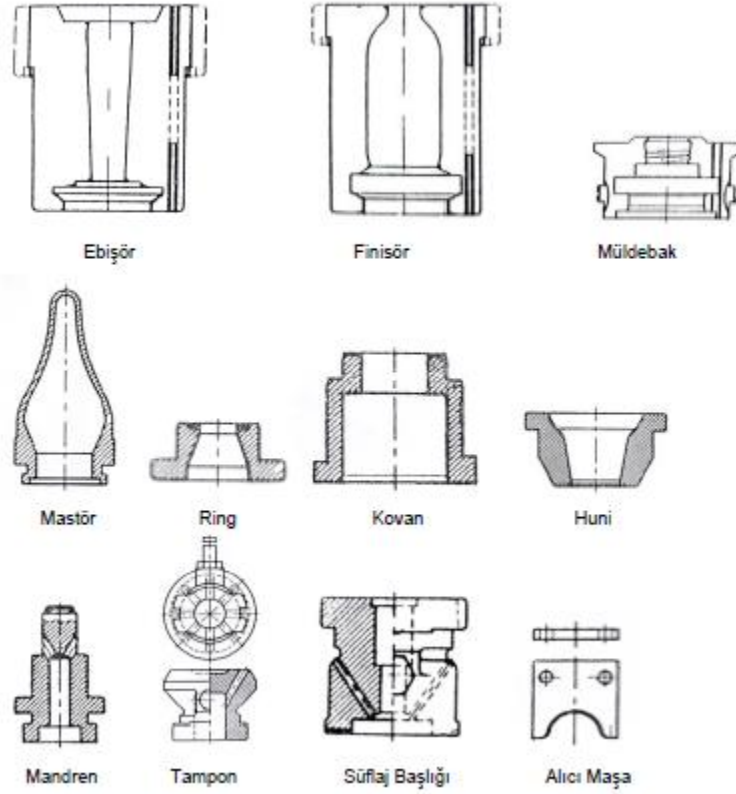
*Kovan*; mandrene yataklık eden kalıp parçasıdır.

*Finisör*; ebüşörde ilk şeklini almış cama son şeklini veren kalıp parçasıdır. Cam ürünün dış şekli, finisörün iç duvarı şekline sahip olmaktadır.

*Müldefon*; dip yapıcı parçadır.

*Süflaj başlığı*; parizonu şişirip, finisörün şeklini almasını sağlayacak gerekli havayı vermeye yarayan parçadır.

*Alıcı maşa*; şişeleri kalıp finisör içinden alma işinde kullanılır [6], [7].



Şekil 2.1 Cam üretiminde kullanılan kalıp ve aksesuarlar[6], [7].

## 2.2 Cam Üretiminde Kullanılan Kalıp

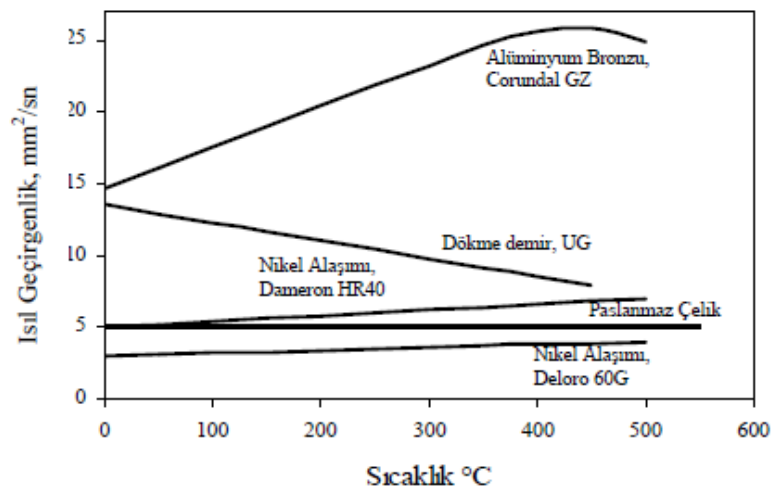
Cam kalıp malzemeleri sürekli olarak sıcak camla temas halinde olmakta ve cama şekil vermede kullanılmaktadırlar. Sıcak camla temas eden kalıpların aşınma, oksidasyon ve korozyon gibi problemleri ortaya çıkmaktadır. Bunlar kalıp yüzeyinin deforme olmasına neden olurlar ve kalıp ömrünü düşürürler.

Kalıp üretim maliyetleri, cam ürünün fiyatının oluşmasında en yüksek paya sahiptir ve bundan dolayı üretilen kalıpların kullanım ömürleri, hem cam ürünün kalitesine, hem de ürünün ucuzluğuna etki etmektedir [7].

Cam ürünleri üretiminde kullanılan dökme demir ve çelik kalıpların, yüksek sıcaklıktaki cam damlası ile teması sonucunda kalıpların yüzeyleri hasara uğramakta ve bu hasarların sonucunda kalıplar kullanılamaz hale gelmektedir. Metalik kalıp malzemelerinin kalıp özelliklerinin geliştirilmesine yönelik olarak, farklı yüzey kaplama işlemlerinin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır.

### 2.2.1 Cam Üretimi Kalıplarında Kullanılan Malzemeler

Cam ürünleri üretiminde kullanılan kalıpların genel olarak, yüzey özellikleri ve parlaklıklarının iyi, termal şok direncinin yüksek, yüksek sıcaklıklarda boyutsal kararlılığa sahip, oksidasyona ve işlenebilirliğinin yüksek olması istenmektedir. Kalıp malzemesinde cam şekillendirme süreçlerinde, ısı birikiminin önlenmesi için kalıpta ısı yayılımının yüksek olması gerekmektedir ve bu özellik malzemenin ısı iletkenliğinin, özgül ısısının ve yoğunluğunun uygun değerlerde bir araya gelmesiyle oluşur. Farklı kalıp malzemelerine ait ısı geçirgenlik değerleri aşağıdaki şekilde verilmiştir[8].



Şekil 2.2 Yaygın olarak kullanılan bazı cam kalıbı alaşımlarının ısı geçirgenlik-sıcaklık değişimi[8].

Beklenen özellikleri karşılaması ve ucuzlukları göz önüne alındığında cam kalıplarının üretiminde en çok kullanılan malzemeler dökme demirlerdir. Bunun yanı sıra, paslanmaz çelikler, bakır esaslı alüminyum bronzları, nikel esaslı alaşımlar ve seramikler de kullanılmaktadırlar [9].

#### 2.2.1.1 Paslanmaz Çelikler

Farklı alaşım elementleri ve farklı bileşimlerle oldukça geniş bir çelik türünü ifade etmelerine karşılık, sadece ostenitik ve martensitik yapıda AISI 430 (Cr: %12-%14) ve AISI 310 (Cr: %25-Ni: %20) paslanmaz çelikler, özel kalıp parçalarında kısıtlı olarak kullanılmaktadırlar[8]. Bu alaşımların yüksek sıcaklık dirençleri oldukça yüksek olmasına

rağmen, ısı iletkenlikleri 0,03 ile 0,05 cm<sup>2</sup>/s arasındaki değerlerde olup, oldukça dūşüktür. Beklenen özelliğin, yüksek sıcaklıkta yüksek oksidasyon direnci olduğu kalıp parçaları için tercih edilirler ve mastör gibi yüksek sıcaklıklarda dayanıklılık gerektiren parçalarda kullanılırlar. Ancak bunların ısı iletkenlikleri dökme demirlerden çok düşük olduğundan özel soğutma sistemleri kullanılmaktadır[6].

#### **2.2.1.2 Bakır Esaslı Alüminyum Bronzu**

Özellikle bakırın yüksek iletkenliğinden faydalanmak amacıyla tercih edilen alaşımlardır. Şişe imalatında yüksek devir yakalayabilmek için, müldebak gibi kalıp parçalarında kullanılmaktadırlar[6]. Bunların en yaygın kullanılanı, %14-16Ni, %8-10 Al ve %8-10 Zn içeren ve Corundal GZ, Minox, ABX ve XX gibi ticari isimlerle anılan alüminyum bronzudur. Bu malzemenin üretimindeki en önemli yenilik, ring yapımında kullanılan çubukların sürekli dökümüdür. Yukarıdaki ısı iletkenlik-sıcaklık değişimi grafiğinden anlaşıldığı gibi bu malzemenin en belirgin avantajı kalıp malzemelerinin çalıştığı sıcaklıklarda gösterdiği yüksek ısı iletkenliğidir[8]. Bu özelliği dolayısıyla üretim koşullarında diğer malzemelere göre camdan daha fazla ısının transfer edilebileceği anlamına gelmektedir ve bundan dolayı tercih edilmektedir. İçeriğindeki nikel miktarının düşürülmesi yönünde yapılan çalışmalarla %1 Ni içeren AB1 ve %4 Ni içeren AB2 alaşımları geliştirilmiş olup, ancak bu alaşımlar cam üretimi şartlarında oyuklanmaya daha hassastırlar [10].

#### **2.2.1.3 Nikel Esaslı Kalıp Alaşımları**

Bor ve/veya krom ilavesi ile nikel alaşımları sertleştirilebilmektedir. Tipik bileşimleri %7,5 Cr, %0,3 C, %5,0 Fe, %4,0 Si, %1,2 B ve kalanı Ni şeklindedir ve üretilen alaşımlar sıcak toz püskürtme tekniklerinde kullanılan toz bileşimlerine benzer özelliktedirler. Günümüzde nikel esaslı alaşımlar, tampon, süflaj başlığı, müldefon ve ring gibi birçok kalıp parçasının imalinde kullanılmaktadırlar [7], [8], [10].

#### **2.2.1.4 Seramik Esaslı Kalıp Malzemeleri**

Seramik kalıpların üretimi esnasında meydana gelen termomekanik gerilimler malzemedede erken hasar oluşumuna neden olmasından dolayı kullanımları sınırlıdır.

Brauns ve arkadaşı seramik malzeme geliştirilmesine yönelik olarak ZrO, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, AlN ve MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> karışımı olan kordiyeritten üretilen mastörlerin, üretim şartlarındaki davranışlarını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemişlerdir. ZrO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve kordiyerit, ısı iletimlerinin düşük olmasından dolayı mastörler yüzeylerinde ısı biriktirerek 700°C'ye ulaşan sıcaklar ile çok yüksek sıcaklık gradyanı oluşturmuş ve kalıplar için iyi bir seçim olamayacaklarını gösterirlerken, SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve AlN iyi ısı iletkenlikleri ile IS Makinelerindeki üretimler için uygun olduklarını göstermişlerdir [2], [11].

### 2.2.1.5 Dökme Demir Kalıp Malzemeleri

Gri dökme demirler, özellikle alaşımlı dökme demirler cam üretiminde kullanılan tüm kalıp parçalarında kullanılabilen uzun dayanımları olan malzemeler iken; küresel grafitli dökme demirler, ısı iletiminin düşük olmasından dolayı sadece *ebüşör*, *tampon* ve *mandren* yapımında kullanılmaktadır. [2], [8], [10]. Yüksek sıcaklıklarda ve hızlı soğutmadan kaynaklı ısı farklılıkları malzeme üzerinde ısıl gerilmelere neden olmaktadır. Küresel grafitli dökme demirler, gri dökme demirlere göre daha iyi oksitlenme direnci, ısıl şok direnci ve mekanik özellikler taşımaktadır [2], [10], [12]ve ısıl yorulmadan kaynaklı problemler tolere edebilmektedir. Cam kalıplarında, beyaz ve temper dökme demirlerin kullanım alanı bulunmamaktadır[2], [8], [10].

## 2.3 Cam Kalıplarından Beklenen Özellikler

Cam kalıp malzemesinin seçiminde üretilecek cam mamulün kalite seviyesi, şekillendirme makinasının üretim hızı ve kalıp ömrü göz önünde bulundurulmalıdır. Bunlardan mamul kalitesi; kalıp yüzeyinin parlatılabilme özelliği ve çalışma koşullarındaki sıcaklıklar karşısında boyutsal kararlılık ile yakından ilgilidir. Üretim hızı ise malzemenin ısıl iletkenlik özelliği ile alakalıdır. Kalıbın çatlama, aşınma, yüzeyinin bozulması gibi nedenlerle oluşacak hasarlar kalıp ömrünü belirlemektedir. Mamul kalitesi, üretim hızı ve kalıp ömründe olan problemler ürün maliyetini [2], [9], [10].

Cam kalıbının taşınması gereken özellikler şunlardır;

- ✓ucuz ve kolay temin edilebilmesi,

- ✓homojen ve ince yapılı malzemeden üretilmesi
- ✓yüksek parlatılabilirlik özelliğine sahip olması
- ✓yüzey parlaklığını yüksek sıcaklıklarda koruyabilmesi
- ✓düşük toleranslarda iyi işlenebilmesi
- ✓mekanik özelliklerin yeterli olması
- ✓şeklini çarpılma olmadan koruyabilmesi
- ✓düşük ısıl genleşmeye sahip olması
- ✓cam-metal yapışma sıcaklığının yüksek olması
- ✓ısıl çatlamalara karşı dirençli olması
- ✓yüzey bozulmalarına karşı dirençli olması
- ✓oksidasyon ve korozyona dirençli olması
- ✓ısıl iletkenliğin yüksek olması
- ✓kaynaklanabilirliğinin iyi olması gibi özellikler kalıp malzemelerinden beklenen özelliklerdir[2], [9], [10].

Bunun yanı sıra; cam kalıplar sürekli olarak cam üretiminde hızlı ısıtma ve soğutmaya maruz kalmaktadır. Nihayetinde bu olay termal çatlamalara neden olmaktadır[13] termal çatlamalara karşı direncinin yüksek olması da beklenmektedir.

Yukarıda cam kalıp malzemelerinden beklenen özelliklerden bahsedilmiş ve cam ambalaj üretiminde kullanılan kalıp malzemeleri olarak ucuzluk ve kalıplardan beklenen diğer özellikleri sağlaması açısından en çok tercih edilen malzeme grubunun dökme demirler olduğu bilinmektedir[9]. Bu çalışmada küresel grafitli dökme demir malzemesi kullanılmıştır. Küresel grafitli dökme demirler, iyi oksitlenme direnci, ısıl şok direnci ve mekanik özelliklerinin [10] yanı sıra ucuz ve kolay temin edilebilmesinin yanı sıra iyi ısıl yorulma gibi özelliklere de sahiptir. Küresel grafitli dökme demir önemli derecede iyi çekme mukavemeti, süneklik ve tokluk kombinasyonu ile birlikte iyi aşınma direncine sahipken[14] yine de; sıcak camla temas eden kalıp malzemelerin kullanım ömürleri, yüzeylerinde meydana gelen hasarlar nedeniyle azalmakta ve bu yüzden yüzey



özelliklerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Yüzey kalitesini geliştirmek için kullanılan yöntemlerden bir tanesi de borlama ısıtılmasıdır.

Klasik yüzey sertleştirme ve kaplama ısıtılması işlemleri sementasyon, nitrürasyon, karbonitrürasyon vb. gibi uygulanan ısıtılması işlemler aşınma, korozyon, sürtünme gibi tribolojik özellikleri tam olarak karşılayamamaktadır. Bu özellikleri sağlamanın yolu ülkemizde çok miktarda bulunan yeraltı kaynağımız bor madenini kullanarak borlama ısıtılması işlemi ile istenen özellikleri sağlamaktır [15]. Borlamanın diğer yüzey sertleştirme işlemlerine göre en önemli üstünlüğü yüzey tabakasının çok sert olması ve sürtünme katsayısının düşük olmasından dolayı aşınma direncinin yüksek olması ve borlamadan sonra ek bir ısıtılması işlemine gerek duyulmamasıdır.

Kalıp malzemelerinin yapılmasında en önemli hususlardan birisi malzemenin camla teması sırasında daha inert bir karakter sergileyerek korozyona uğramayacak, cama yapışmayacak ve camla adhezif aşınma göstermeyecek bir yapıya sahip olması istenmektedir. Bunun için malzemelerin camla temas eden yüzeylerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır[2] , [16]. Borlama ısıtılması işlemi ile yüzeyde seramik yapıda ferro-bor tabakası oluşturularak adhezif aşınmanın azaltılması sağlanmaktadır [17]. Böylece malzemenin aşınma direnci artırılmış olur.

Yüzey pürüzlülüğü, üretilen parçaların yüzey kalitelerinin geliştirilmesi ve belirlenmesinde, önemli bir rol oynamaktadır. Çünkü yüzey pürüzlülüğü, yorulma direnci, aşınma, sürtünme ve yağlama gibi ürünün kalitesini etkileyen fonksiyonel karakteristik özellikleri etkilemektedir. Yüzey pürüzlülüğünün azalması ile yüzey kalitesinin artması sağlanmaktadır [18]. Taktak 2007 yılında yaptığı çalışmada borlanmış AISI H13 ve 304 çeliklerin yüzey pürüzlülüğünün borlama sıcaklığı ve zamanın artmasıyla birlikte arttığını tespit etmiştir[19]. Soykut' un 2007 yılında yaptığı çalışmada AISI 4140 ve AISI 420kalite çeliklerinin borlanması sonrasında yüzey pürüzlülüklerinin belirgin bir şekilde artmadığını, AISI 5140 kalite çeliğinin borlama sonrasında yüzey pürüzlülük değerinin işlem görmemiş numuneye göre daha düşük olduğunu bulmuştur [7].

## BÖLÜM 3

### BOR VE BORLAMA

#### 3.1 Bor

Atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81, atomun yarıçapı 0,98 Å, ergime sıcaklığı 2092 °C olan ve periyodik çizelgede B simgesi ile gösterilen 3A grubunda ilk ve en hafif olan bir elementtir. Ayrıca; bor elementinin yoğunluğu  $2,33 \pm 0,02 \text{ gr/cm}^3$ , valans elektron sayısı “3” ve iyon yarıçapı 0,23 Å’dur. Yer kabuğunda yaygın olarak bulunan 51. Elementtir, doğada serbest halde bulunmazlar ve doğada yaklaşık olarak 230 çeşit bor minerali bulunmaktadır. Bor, latis parametereleri sırasıyla  $a=1,093 \text{ nm}$  ve  $c=2,381 \text{ nm}$  olan bir rombohedral kristal kafes yapısına sahiptir[20], [21], [22], [23]. Bor ve bazı bileşiklerinin sertliklerinin kıyaslamasını Çizelge 3.1’ de görebiliriz.

Çizelge 3.1 Bor ve bazı bileşiklerinin sertlikleri [24]

Malzeme	Mohs sertlik
Bor	9,3
Bor karbür (B <sub>4</sub> C)	9,32
Bor nitrür (BN)	1,2
Elmas (standart)	10

Çizelge 3.1' de görüldüğü üzere en sert malzeme olan elmasın sertlik değerine Bor un sertliğinin yakın olduğunu görmekteyiz.

Çeşitli endüstri alanlarında çok farklı malzeme ve ürünlerin üretiminde bor mineralleri ve bileşikleri kullanılmaktadır. Cam sanayi, seramik sanayi, nükleer sanayi, askeri zırhlı araçlar, elektrik-elektronik ve bilgisayar sanayi, iletişim araçları, inşaat-çimento sektörü, otomobil sanayi, tekstil sektörü, metalurji sanayi, enerji sektörü, ilaç ve kozmetik sektörü, tıp, kimya, temizleme ve beyazlatma sanayi, tarım, kağıt sanayi, temizlik malzemelerinde, kağıt, mıknatıslar, fotoğrafçılık, kompozit malzemeler, spor malzemeleri, manyetik cihazlar bor ve ürünlerinin kullanım alanlarıdır ve hatta patlayıcı üretiminde de bor mineralleri kullanılmaktadır [22].

### **3.2 Borlama**

Borlama; ana metalle sert borür tabakaları oluşturmak için iş parçasının yüzeyine bor atomlarının difüze edilmesiyle yapılan termokimyasal yüzey işlemdir [25], [26].

Termokimyasal bir difüzyon prosesi olan borlama, demir, demir dışı alaşımlar ve süper alaşımlar gibi çok geniş bir alana uygulanabilir [27], [28].

Çeliğin borlanması korozyon hızını azaltır ve yüzeyin sertliğini de geliştirir. Bor bileşiminin termo difüzyon ısıl işlemi 700-1000°C sıcaklık aralığında proses sıcaklığına ihtiyaç duyarak, demir borür oluşturmaktır. Bu proses sıvı, katı, gaz, pasta ayrıca plazma ve akışkan yatak ortamlarında uygulanabilir. [22], [28],[29]. Bunların yanı sıra; termo-kimyasal olmayan fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprej ve iyon biriktirme yöntemleri borlama amacıyla kullanılan yöntemler arasındadır [26], [30].

Metal alaşımının yüzeyine borun difüzyonu tamamı ile yoğun bir reaksiyon bölgesi oluşturur. Çeliğe borun difüzyonu demir borürlerin( $FeB$  ve  $Fe_2B$ ) oluşumuna neden olur ve borür tabakanın kalınlığı ısıl işlemin süresi ve sıcaklığından etkilenir. Proses sıcaklığı, borlanan malzemenin kimyasal kompozisyonu, bor ortamı ve borlama zamanına bağlı olarak, metalik malzemenin yüzeyine borun difüzyonuyla tek fazlı  $Fe_2B$  veya  $FeB-Fe_2B$  çift faz yapısı meydana gelmektedir [28], [31], [32].

Borlama yüzey işlemleri ile diğer yöntemlere göre yüzeyde daha sert bir tabaka elde edilebilmektedir. Özdemir ve arkadaşlarının 2006 yılında yaptığı çalışmaya göre; borlanmış çeliğin sertliğinin 1600-2000 HV değerinde iken, karbürleşmiş veya nitrürlenmiş çeliğin sertliğinin 650-900 HV değerinde olduğunu gözlemlemişlerdir [28], [32]. Borlama işlemi sonucunda elde edilen tabaka; yüksek sertlik (1400-5000 HV) ve yüksek ergime sıcaklığına (1400-1550 °C) sahiptir. Özellikle çeliklerde, oluşan borür tabakası 650 °C' ye kadar sertlik değerini korumaktadır [22].

Borlama işlemi materyalin yüzeyinde borür tabakası oluşturarak yüksek sertlik, aşınma direnci ve korozyona karşı dayanımı artırır, aynı zamanda bu özellikleri yüksek sıcaklıklarda koruma ve erozyona karşı direnci de arttırdığından bu amaçla da kullanılmaktadır [30]. Borlama yüzey işlemi alaşımsız ve alaşımlı çeliklere, demir dışı metal ve alaşımlarına (Ni, Co, Mo, Ti), bu alaşımların toz metalurjisi yöntemiyle üretilen tozlarına, bazı süper alaşımlar ile sermetler gibi birçok malzeme grubuna uygulanabildiği gibi endüstriyel olarak daha çok demir esaslı alaşımlara uygulanabilmektedir [7], [30], [33].

Yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayısı kombinasyonu, başta adhezyon ve abrazyon aşınması olmak üzere korozyon ve yüksek sıcaklık oksidasyonu hasarına karşı önemli direnç sağlamaktadır. Düşük alaşımlı çeliklerin aside karşı (örneğin sülfürik, hidroklorik ve fosforik asit), östenitik paslanmaz çeliklerin de hidroklorik aside karşı dayanımını artırır [34].

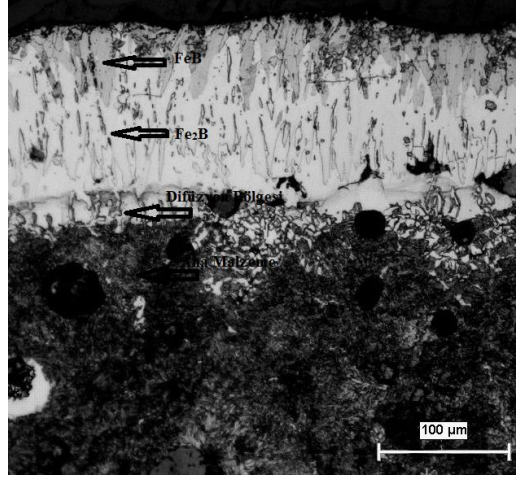
Altlık malzemenin ne olduğuna bağlı olarak oluşan borür fazına bağlı olarak sertlik değeri değişmektedir. Çizelge 3.2' de çeşitli ana malzeme üzerinde oluşan tabakaların sertlikleri verilmiştir.

Çizelge 3.2 Ana malzemeye göre elde edilen borür fazları ve mikro sertlikleri [35]

Borlanan ana malzeme	Borür tabakasında oluşan fazlar	Borür tabakasının sertliği(HV)
Fe	FeB Fe <sub>2</sub> B	1900-2100 1800-2000
Co	CoB Co <sub>2</sub> B Co <sub>3</sub> B	1850 1500-1600 700-800
Ni	Ni <sub>4</sub> B <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub> B <sub>3</sub> Ni <sub>3</sub> B	1600 1500 900
Mo	Mo <sub>2</sub> B MoB <sub>2</sub> Mo <sub>2</sub> B <sub>5</sub>	1660 2330 2400-2700

Borür tabakalarının yapısı; borlama yöntemine, borlanan malzeme bileşimine, borlama ortamına ve işlem şartlarına bağlı olmak üzere; ya düz ( örneğin yüksek alaşımlı çeliklerde ) ya da parmaklı bir şekilde ( testre dişi ) olabilmektedir[36].

Demir ve çelik türü malzemelerde borlama işlemi sonucunda altlık malzemenin yanı sıra, borür tabakası ve geçiş bölgesi olmak üzere iki farklı bölge mevcuttur[37]. Borür tabaka ile ana(matris) malzeme arasındaki bölgeye geçiş bölgesi denilmektedir. Aşağıdaki şekilde ana(matris) malzeme, geçiş bölgesi ve tabakalar gösterilmiştir.



Şekil 3.1 900° C’de 8 saat borlama işlemine tabi tutulan DDK60’ın mikroyapı fotoğrafı [38]

Genellikle oluşan borür tabakasında tek bir Fe<sub>2</sub>B fazının oluşumu, çift fazlı FeB-Fe<sub>2</sub>B yapısına göre tercih edilmektedir. Bunun nedeni; FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının ısıl genleşme katsayıları farklı olduğundan tabaka çatlak oluşumu gözlenebilir.

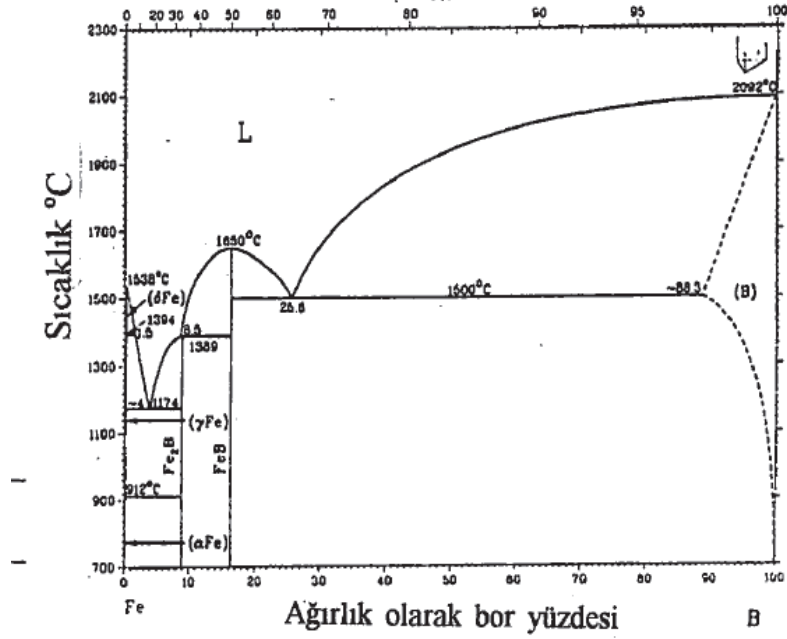
### 3.3 FeB ve Fe<sub>2</sub>B’ un Özellikleri

FeB ve Fe<sub>2</sub>B’ un özellikleri Çizelge 3.3’ de kıyaslamalı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.3 FeB ve Fe<sub>2</sub>B’ un özellikleri[26]

Özellik	Fe <sub>2</sub> B	FeB
Kristal yapı	Hacim merkezli tetragonal	Ortorombik
Bor içeriği(%ağırlıkça)	8.83	16.23
Latis parametresi(°A)	A=5.078, c=4.28	A=4.053, b=5.495, c=2.946
Teorik yoğunluk(g/cm <sup>3</sup> )	7.43	6.75
Ergime sıcaklığı(°C)	1389-1410	1540-1657
Termal iletkenlik (W/m. °K)	30.1(20 °C)	10.0(20 °C)
Termal genleşme katsayısı (ppm/°C)	7.65(200-600 ° C) 4.25(100-800 ° C)	23(200-600 ° C)
Elastisite modülü(GPa)	280-295	590
Mikrosertlik(GPa)	18-20	19-21

### 3.4 Fe-B Denge Diyagramı



Şekil 3.2 Fe-B denge diyagramı [39]

Fe-B denge diyagramında, ağırlıkça %8.83 bor içeren  $Fe_2B$ , % 16,23 bor içeren  $FeB$  intermetalik bileşikler mevcuttur. Diyagramda görüldüğü üzere ağırlıkça %3,8 bor ihtiva eden ergime sıcaklığı 1174 °C olan ötektik faz içermektedir [22], [40].

### 3.5 Borlama Yöntemleri

Borlama yöntemleri iki ana grupta toplanmaktadır:

- Termokimyasal yöntemler (kutu borlama, pasta borlama, sıvı borlama, gaz borlama ve akışkan yatakta borlama)
- Termokimyasal olmayan yöntemler ( fiziksel buhar biriktirme (PVD) , kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprej kaplama vb. yöntemler).

Bu yöntemler arasında en çok kullanılan yöntem sıcaklık ve zamanın fonksiyonundan yararlanılarak atomun metale difüzyonu esasına dayanan termokimyasal yöntemlerdir. [26], [30].

Son yıllarda bu borlama yöntemlerine ilave olarak iyon implantasyonu, çok bileşenli borlama, süperplastik borlama, ötektik borlama, plazma sinterleme gibi değişik teknikler geliştirilmiştir[41], [42], [43].

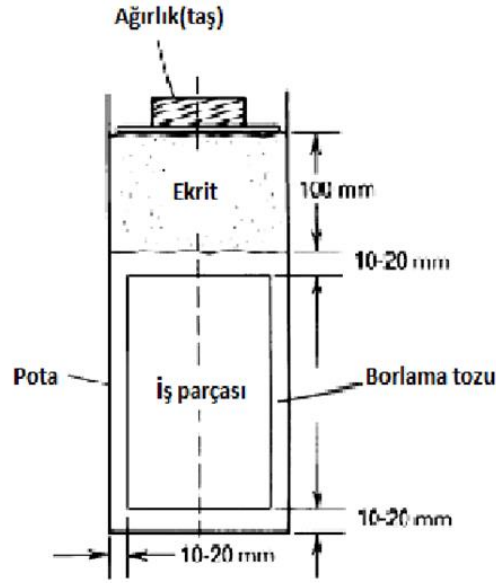
Borür tabakası, proses sıcaklığı, süre ve borlanan malzemenin özelliklerine bağlıdır. Borlama ortamı katı, sıvı veya gaz ortamında olabilmektedir. Katı ortamda borlama işlemi yöntemin kolay olması ve pürüzsüz bir kaplama yüzeyinin eldesinden dolayı geniş bir kullanım alanına sahiptir ve avantajlı bir borlama tekniğidir [44].

### **3.5.1 Kutu Borlama (Katı ortamda borlama) Yöntemi**

Borlama yöntemleri arasında en kolay ve ekonomik olarak görülen bu teknik, borlamaya tabi tutulacak malzemenin toz karışımı şeklinde bor verici ortam içerisinde belirlenen sıcaklık ve süre içerisinde borlamaya tabi tutulmasıdır [45].

Bor verici bileşikler (bor ajanı olarak), aktivatörler ve dolgu maddelerini belirli oranda bir araya getirilmesiyle toz halindeki bor verici karışımlar oluşturulmaktadır. Borlama işlemi; ısı dirençli kutularda(çelik gibi) parçanın her taraftan 10-20 mm kalınlıkta borlama tozuna gömülmesiyle fırınlarda belirlenen sıcaklık ve sürelerde ısı işlemi tabi tutulmasıyla gerçekleştirilmektedir. Burada kutunun dışarıdan hava almasını engellemek amacıyla, borlama toz karışımının üzerine SiO<sub>2</sub> ekrit gibi toz karışımı konular ve potanın ağzı kapatılır. Kutu borlamanın şematik şekli aşağıda verilmiştir.





Şekil 3.3 Kutu borlama kutusu [26]

Yaygın olarak kullanılan bor sağlayıcılar; bor karbür ( $B_4C$ ), ferrobor (FeB) ve amorf bordur. Ferrobor ve amorf bor çok iyi bor verici kaynaklar olup kalın borür tabakası sağlarlar. Dolgu malzemesi olarak SiC ve  $Al_2O_3$ ' in reaksiyonda herhangi bir rolü yoktur, akışkanlık sağlarlar [22], [26]. Ayrıca SiC bor miktarını kontrol ederek, borlama ajanlarının kaybını önler.  $NaBF_4$ ,  $KBF_4$ ,  $(NH_4)_3BF_4$ ,  $NH_4Cl$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $BaF_2$ ,  $Na_2B_4O_7$  borlama aktivatörleri olarak kullanılmaktadırlar.

Çizelge 3.4 Kutu borlama yönteminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin özellikleri [46]

Bor sağlayıcı	Kimyasal formül	Molekül Ağırlığı(gr)	Teorik Bor Miktarı(%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Amorf Bor	B	10.82	95-97	2050
Ferro-Bor	-	-	17-19	
Bor Karbür	$B_4C$	55.29	77.28	2450

ASM Handbook' ta verilmiş olan borlama bileşenleri Çizelge 3.5' de verilmiştir.

Çizelge 3.5 Borlama bileşenleri

Borlama Bileşenleri
% 5B <sub>4</sub> C, % 90SiC, % 5KBF <sub>4</sub>
% 50B <sub>4</sub> C, % 45SiC, % 5 KBF <sub>4</sub>
% 85B <sub>4</sub> C, % 15Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
% 95B <sub>4</sub> C, % 5Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>
% 84B <sub>4</sub> C, % 16Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>
Amorf Bor (% 95-97)
% 95Amorf Bor, % 5KBF <sub>4</sub>

Genelde, bu üç temel bileşenden oluşturulmuş bazı ticari bor sağlayıcılarda borlama amacıyla kullanılmaktadır. Örneğin; *Ekabor tozu* gibi [46], [47]. Ticari borlama ürünleri Çizelge 3.6' da verilmiştir.

Çizelge 3.6 Ekabor borlama ürünleri [48], [49]

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

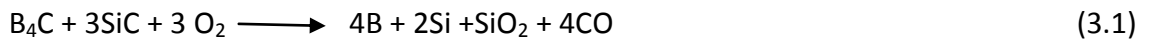
Çizelge 3.6 Ekabor borlama ürünleri (devamı)

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

Borlama tozunun tane boyutunun borlama üzerine etkisi vardır. Tane boyutu küçüldükçe temas yüzeyi arttığından dolayı; difüzyonu kolaylaştırdığından dolayı borür tabakasının kalınlığı artmaktadır. Demirel ve Çetin 2012 yılında alaşimsız ve düşük karbonlu GS60 çeliği numunelerini 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda 2, 4, 6 ve 8 saat sürede Ekabor II+%15 ferrosilisyum toz karışımı ile kutu borlama işlemine tabi tutmuşlardır ve borlama süresi ve sıcaklığın artışıyla birlikte borür tabaka kalınlığının ve sertliğinin de arttığını ve en yüksek sertliğin 950 °C sıcaklıkta 8 saat sürede yapılan borlama işlemi sonucunda 2100 HV olduğunu bulmuşlardır [50]

Kutu borlama yönteminde paslanmaz çelik veya alümina potalar kullanılmaktadır [22], [51].

Kutu borlama prosesinde yer alan reaksiyonlar şunlardır; [47], [52].



### 3.5.2 Pasta (Macun) Borlama Yöntemi

Bu yöntem, kutu borlamanın zor ve daha pahalı olduğu veya fazla zaman kaybının olduğu durumlarda [26].

Bor karbür ( $B_4C$ ), kriyolit ( $Na_3AlF_6$ ) ve bağlayıcı olarak hidrolize edilmiş etilsilikat veya metil selüloz sulu çözeltisi karışımından macun yapılarak borlama işlemi gerçekleştirilir.

Macun haline getirilen karışım borlanacak malzeme üzerine 1-2 mm kalınlığında malzemeini yüzeyine bir fırça ile ya da püskürtme ile sürülür [26], [45]. Macunlanan malzeme sıcak hava akımında, ön ısıtma odasında veya kurutma fırınında maximum 150°C sıcaklıkta kurutulması gerekmektedir. Ardından kaplanmış malzemeler önceden ısıtılmış fırına konulur ve fırının ağzı kapatılır, borlama sıcaklığına ısıtılır. Borlanan numuneler fırın dışına alınır ve soğumaya bırakılır. Parçalar soğuduktan sonra yüzeyine yapışmış olan artıklar temizlenir. Kaliteli borür tabakası elde edebilmek için; bu yöntemde borlama işlemi mutlaka koruyucu atmosfer ortamında gerçekleştirilmelidir. [24]. Kullanılan koruyucu gazlar Çizelge 3.7' de verilmiştir [22], [53].

Çizelge 3.7 Pasta borlama yönteminde kullanılan koruyucu gazlar ve bileşimleri [22], [53]

Koruyucu Gaz	Bilesimi
Argon	% 99.996 Ar
Kalıp gazı (Fonnier Gazı)	% 5 - 30 H <sub>2</sub> , geri kalanı N <sub>2</sub>
NH <sub>3</sub> - Spalt gazı (Amonyak)	% 75 H <sub>2</sub> , % 25 N <sub>2</sub>
Saf Azot	% 99 N <sub>2</sub> , % 1 H <sub>2</sub>

### 3.5.3 Sıvı Borlama

Bu borlama yöntemi; elektrolitik borlama ve normal sıvı ortamda borlama (elektrolitik olmayan sıvı borlama) olmak üzere iki çeşittir [37]. Borlama işlemi 800-1000 °C sıcaklık aralığında 2-9 saat sürede yapılmaktadır. Bu yöntemin dezavantajlarından birisi sıcaklıktır. Sıcaklık 850 °C sıcaklığın altına düşerse; erimiş boraksın akıcılığı azalacağından dolayı borlama işlemi imkansız hale gelecektir [54], [55].

Bu yöntemin birçok dezavantajı vardır;

Isıl işlem sonrasında kalıntı tuz ve reaksiyona girmemiş olan borun uzaklaştırılması zaman ve para kaybı vardır [26], [37].

Tekrarlanabilir bir işlemi başarabilmek için, banyo viskozitesinin artması istenmez. Bunun için tuz ilavesine ihtiyaç vardır ve bu işlem de maliyeti arttırır [26], [37].

Malzemeyi korozif ortamdan muhafaza etmek için fırınlara ihtiyaç duyulabilir [26], [37].

Demir esaslı malzemelerin elektrolitik borlama işlemi, 900-950 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. [56], [57].

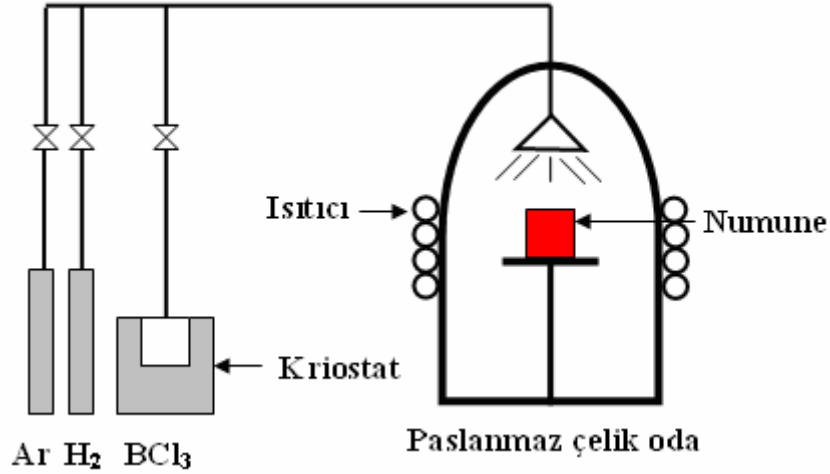
Kaplamanın homojen olması için işlem esnasında parçanın döndürülmesi gerekmektedir [56], [57].

Çizelge 3.8 Sıvı ortam borlanmasında kullanılan temel bor kaynakları ve özellikleri [36]

Malzeme	Formül	Molekül Ağırlığı(gr/mol)	Teorik Bor Miktarı(%)	Erime Sıcaklığı(°C)	Açıklama
Borax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 10 \text{H}_2\text{O}$	381.42	11.35	-	Su miktarından dolayı eritmek için
Susuz Borax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	201.26	21.50	741	20 °C de 25,2 gr/lit $\text{H}_2\text{O}$ çözünür.
Metabor Asidi	$\text{HBO}_2$	43.83	24.69	-	-
Sodyum Borflorit	$\text{NaBF}_4$	109.81	9.85	-	-
Borik Asit	$\text{B}_2\text{O}_3$	69.64	31.07	450	20 °C de 25,2 gr/lit $\text{H}_2\text{O}$ çözünür.
Borkarbür	$\text{B}_4\text{C}$	55.29	78.28	2450	-

### 3.5.4 Gaz Borlama Yöntemi

Bu borlama yönteminde, bor kaynağı olarak bor halojenürleri, diboran ve bor hidrürleri kullanılmaktadır [37], [40]. Gaz ortamda borlamanın en önemli avantajı; gaz sirkülasyonundan dolayı daha homojen bir dağılım sağlamakta ve bunun elde edilmesinin kolay olmasıdır. Prensip olarak; bor potansiyelinin ayarlanabilmesinden dolayı tek fazlı tabaka elde edilmesini mümkün kılmaktadır [53], [55].



Şekil 3.4 Gaz borlama ünitesi [54], [55].

Borlama işlemi; bir evapotartörde gaz haline getirilmiş bor kaynağı, Ar ve H<sub>2</sub> gazlarının belirli karışımının dış ortamdan izole olmuş paslanmaz çelik bir odadaki numune üzerine püskürtülmesi prensibine dayanmaktadır. Bu işlem, 700-950 °C sıcaklık aralığında ve 67 kPa (0,67 bar) basınç altında 1:15 BCl<sub>3</sub>+H<sub>2</sub> gaz karışımında yapılmaktadır [54], [55].

Bu borlama yönteminde, Diborane (B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)+H<sub>2</sub> karışımı ve Borhalid (iyonize bor)+H<sub>2</sub> ve 75/25 N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> gaz karışımı kullanılmaktadır. Ancak; bu maddelerin toksik olmaları ve korozyona karşı hassasiyetlerinden dolayı pek tercih edilmemektedirler. Toksik özelliklerinin olmamasından dolayı bu maddelerin yerine Trimetil bor (CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>B, Trietil bor (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub> ve Trietillamine bor kullanılmaktadır. Bu gazlarda zararlıdır, fakat toksik özellikleri yoktur [22].

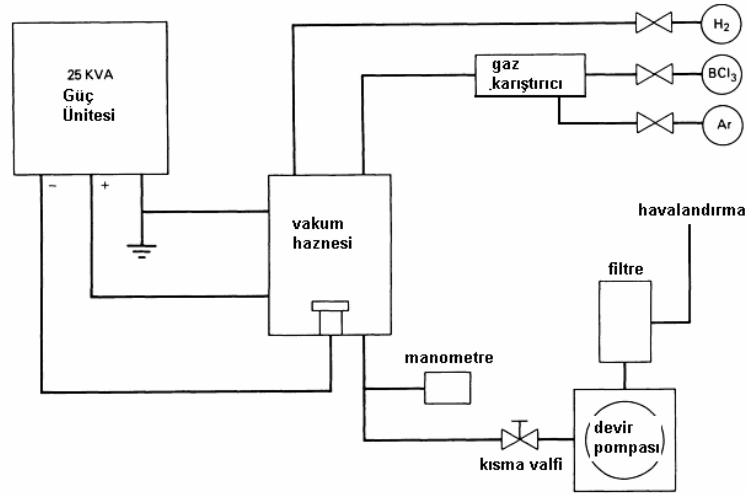
### 3.5.5 Plazma Borlama Yöntemi

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> veya B(OCH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (trimetilborat) kullanarak 800-10000C sıcaklıkta, yaklaşık 10-2 Pa basınç altında oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan borlama işlemidir [22], [26].

Plazma borlama reaksiyonları;



Plazma borlamanın avantajları; yüksek enerji verimliliği, minimum çarpılma riski, düşük işlem sıcaklığıdır. Bunların yanı sıra dezavantajları; BCl<sub>3</sub> ve B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> gazları kullanılmasıdır ve bu gazlar, pahalı, zehirli, patlayıcıdır ve korozyona neden olmaktadır [57].



Şekil 3.5 Plazma borlama ünitesinin şematik resmi [26].

Literatürde yer alan plazma borlama gazları;





şeklinde mevcuttur [22], [58].

### 3.5.6 Çok bileşenli borlama yöntemi

Malzemelere herhangi bir borlama yöntemi kullanılarak bor yayındırılmasıyla oluşturulan borür tabakası üzerine alüminyum, krom, silisyum, vanadyum ve titanyum gibi elementlerden bir veya bir kaçının aynı anda veya birbiri ardına yayındırılması prensibine dayanan termokimyasal bir yöntemdir ve işlem iki kademeli olarak 850-1050°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir [22],[26], [30]. İlk aşamada, geleneksel yöntemlerden biriyle borlama işlemi yapılmaktadır ve daha çok katı borlama (katı ortamda borlama) tercih edilmektedir. İkinci aşamada elementin difüzyonu gerçekleştirilmektedir [26], [30].

Bor-alüminyumlama, bor-silisyumlama, bor-kromlama, bor-krom-titanyumlama, bor-krom-vanadyumlama ve bor-vanadyumlama olmak üzere altı çeşit çok bileşenli borlama metodu vardır [26].

### 3.5.7 Akışkan Yatakta Borlama Yöntemi

Katı ortam borlamanın bir versiyonu olan akışkan yatakta borlama yönteminde, akıcı ortam olarak özel bir borlama tozu (iri taneli silisyum karbür parçacıkları, Ekabor gibi) kullanılmaktadır. Oksijensiz gaz ( $\text{N}_2\text{-H}_2$  karışımı gibi) yardımıyla bu toz akıcı hale getirilmektedir. Borlama işlemi, borlama tozu ve oksijensiz bir gazın taban malzemesini içeren akışkan bir yatak içerisinde gerçekleşmektedir. Elektrik, ısı kaynağı olarak kullanıldığında taban daha hızlı bir ısı transfer ortamı oluşturmaktadır [22],[26]. Bu prosesin bazı avantajları vardır;

Bu proseste işlem sıcaklığına hızlı ısıtma ve daha kısa süreli işlem görecektir parçaları doğrudan dışarıya alabilme imkanı sunmaktadır.

Isının ve gaz sirkülasyonunun yüksek olması daha hızlı işlem yapılmasına olanak sağlar ve işlem süresini kısaltır.

Borlanan parçayla hareketli hale getirilmiş olan partiküller arasındaki çok yüksek ısı transferi sayesinde mükemmel bir termal kararlılık sağlamaktadır.



Esnekliği ve daha düşük sermaye maliyetiyle birlikte üniform sıcaklık sağlamaktadır.

Sürekli ve otomatik üretime imkan verir, borlanacak parçalar aralıklı bir şekilde şarj edilebilir ve fırından dışarı alınabilirler.

Isıl işlem sonrasında parçaya doğrudan su verilebilir, borlama ve su verme işlemlerini tek bir işleme indirgeme demektir.

Borlanmış parçaların seri üretimi için azalan süre ve enerji tüketiminden dolayı maliyet düşüktür [22],[26].

Bu yöntemin önemli bir dezavantajı, inert gaz aracılığıyla damıtma kabı içerisinde damıtma maddesinin sürekli çalkalanmasıdır. Zengin florür bileşimleri içeren atık gazlar kesinlikle temizlenmelidir. Çevre ile ilgili problemleri önlemek için; kuru  $\text{CaCO}_3$  döküntüleri ile doldurulmuş bir emici ile veya titreşimli bir havalandırma tesisatı ile atık gazların oranı azaltılabilir ve bu da ilave maliyet gerektirir [22],[26].

Akışkan yatak farmasötik, gübreleme, yiyecek ve diğer endüstrilerde kaplayıcı olarak geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bu endüstrilerdeki amaç, kontrollü salınım, içeriğın stabilizasyonu ve toz kalitesinin gelişimi gibi yüksek kalite ve değerli performans sağlamaktır. Akışkan yatakta kaplama temel olarak, sprey tarafından sağlanan kaplama malzemesinin fazına bağlı olarak birkaç türde sınıflandırılır. Birisi, kaplama malzemesinin sıvı faz solüsyonuyla kaplanması iken, diğeri süspansiyon olarak katı toz sağlayıcıyla direk olarak kaplamadır. Günümüzde toz süspansiyonlar daha çok kullanılmaktadır [59].

Akışkan yataklı fırınlarda borlama yönteminde akıcı ortam olarak Ekabor™ adı verilen özel borlama tozları kullanılabilir [22].

Akışkan yatakta yüzey kaplama işlemi son zamanlarda rapor edilmiştir [60]. Süreç mükemmel ısı ve kütle transferiyle karakterize edilebilir ve çevreye zararsızdır. Bu metod geniş alanda ve başarıyla farklı tipte kaplamaların oluşumunda kullanılabilir [60].

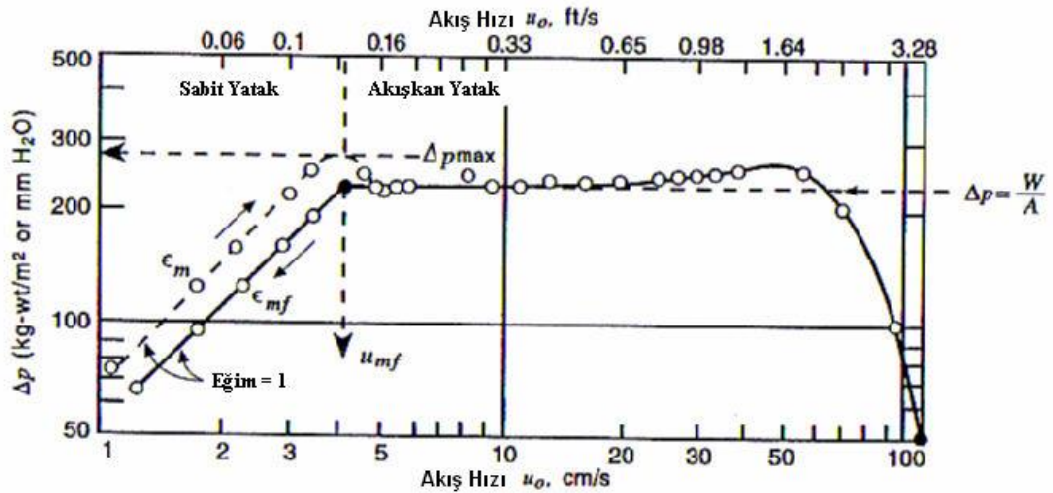
Akışkan yatak teknolojisi, kromlama, alüminyumlama, karbürleme, nitrürleme, karbonitrürleme ve borlama gibi birçok farklı kaplama türlerini elde etmede kullanılabilir [22]. Akışkan yatak, belli boyuttaki katı taneciklerin sıvı gibi

davrandıkları durumdur; akışkan yataklar sıvı gibi özellik göstermektedir. Örneğin; yatağa eklenen katı partiküller yatak içerisinde homojen karışır, yataktaki maddeler yoğunluğuna bağlı olarak yatak içerisinde ya yüzer ya da batar gibi [61].

Akışkan yataklı fırınlar, kuru bir yatak içerisinde yüksek ergime sıcaklığına sahip, 100  $\mu\text{m}$  toz boyutunda  $\text{Al}_2\text{O}_3$  katı partikülleri, alttan verilen basınçlı gazın etkisinde akışkanlaştırılarak sıvı gibi hareket etmektedir. Akışkanlaşan katı alümina tozu ısı iletimi sağlamaktadır [22].

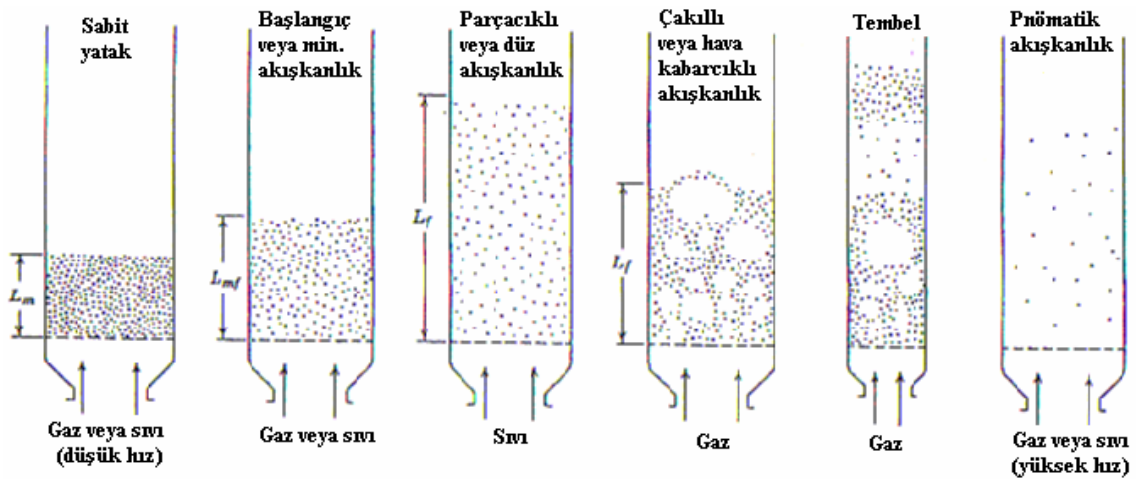
Akışkan yataklı fırınlar, elektrikli veya doğalgazlı olarak inşa edilebilmektedir. Karbonitrasyon, nitrasyon, meneviş, takım çelikleri sertleştirilmesi ve tavlama işlemleri bu fırınlarda yapılabilir. Yüksek basınçta verilen hava ve uygulanan işleme göre gaz karışımları ile akışkanlık sağlanmaktadır. Akışkanlık için genelde alüminyum oksit kumu (1200°C'ye kadar) kullanılmaktadır [62].

Akışkan yatakta kullanılan gaz genellikle bir dağıtıcı üzerinden verilmektedir. Dağıtıcı üzerinde bulunan açıklıklar sayesinde ortama homojen olarak sisteme gazın dağılımı sağlanmaktadır. Akışkanlaştırmada çoğu çalışmalarda seramik veya sinterlenmiş metal poroz plaka dağıtıcılar kullanılmaktadır.



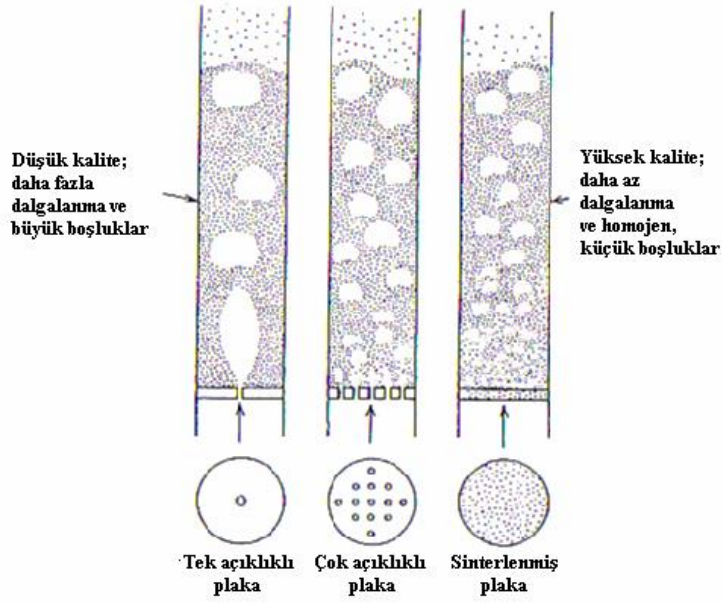
Şekil 3.6 Yatak malzemesinin akışkanlaşmasında basınç değişimi ve akışkanlaşmanın etkisi [22], [63]

Şekil 3.6' da yatak malzemesinin akışkanlaşmasında basınç değişimi ve akışkanlaşmanın etkisi yer almaktadır. Akışkan yatak prosesinin başlangıcında düşük hava/gaz akış hızında yatağın basıncı da düşüktür ki bu durumda; alümina tozları sabit durumda ısınmaktadır. Gaz akış hızının artmasıyla birlikte yatağın basıncı da artmaktadır. Belli bir basınç değerinden sonra, gaz akış hızı yükselse bile yatak basıncı sabit kalmaktadır. Belirli bir süre sonra artan gaz akış hızından dolayı alümina tozları akışkanlaşır, kaynama başlar ve kabarcıklar oluşur. Bu durumda yatağın basıncı düşer. İdeal gaz akış hızından düşük hızlarda gönderilen gaz, fırın içerisinde heterojen kaynamaya ve yetersiz ısı transferine neden olurken, daha yüksek hızlarda gönderilen gaz yatağın pnömatik olarak taşmasına ve alümina tozlarının ortamdaki uzaklaşmasına neden olmaktadır [22], [63].



Şekil 3.7 Akışkan yataklarda meydana gelen akışkanlaşma tipleri [22], [63]

Akışkanlaşma kademeleri Şekil 3.7' de gösterilmiştir. Düzgün ve kabarcıklı akışkanlaşma prosesin verimini artırır. Akışkan yataklarda homojen bir akışkanlaşma ortamı oluşturmak için potanın altında delikli gaz dağıtıcılar bulunmaktadır. Şekil 3.8' de çeşitli tipteki gaz dağıtıcıların kullanılmasıyla birlikte oluşan akışkanlaşma ortamları gösterilmektedir.

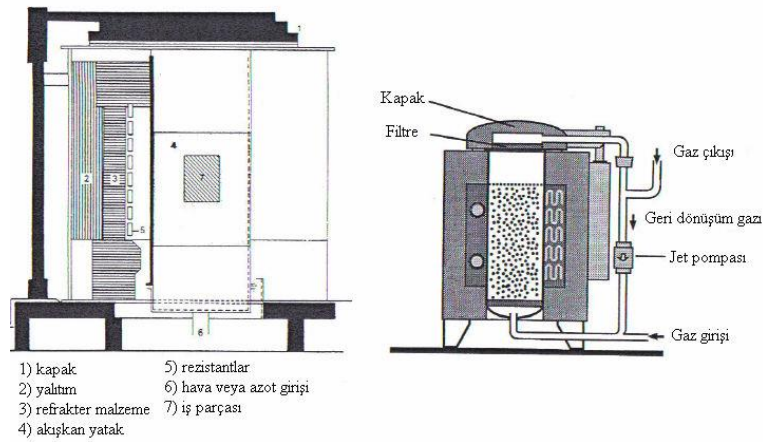


Şekil 3.8 Değişik tipte gaz dağıtıcılarının kullanılması sonucu oluşan akışkanlaşma kaliteleri [63]

### 3.6 Akışkan Yataklı Fırınlar

#### 3.6.1 Dıştan Rezistanslı Akışkan Yataklı Fırınlar

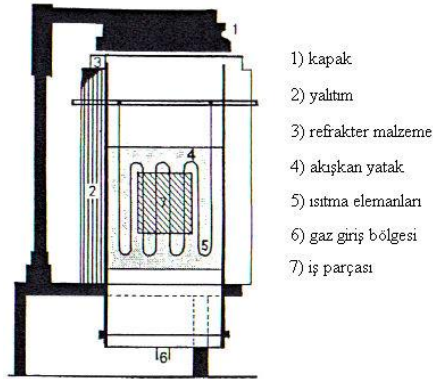
Bu fırın tipinde, elektrik rezistansları fırının dış kısmında ve tüm çevresi boyunca yer almaktadır. Bu ısıtma metoduyla 1300°C sıcaklığa kadar ısıtma yapılabilir. Şekil 3.9' da dıştan rezistanslı akışkan yatak fırının şematik görüntüsü verilmiştir [22], [63].



Şekil 3.9 Dıştan rezistanslı akışkan yataklı fırının şematik gösterimi [22], [63]

### 3.6.2 İçten Rezistanslı Akışkan Yataklı Fırınlr

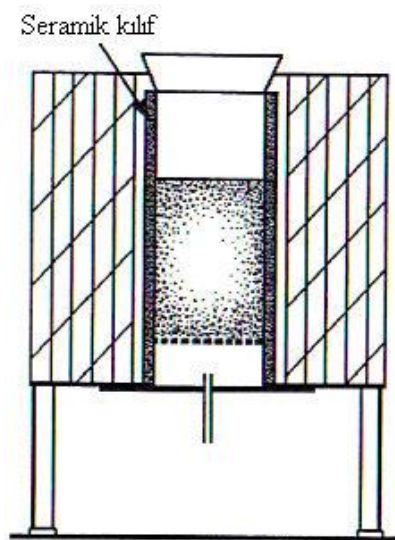
Bu fırın tipinde, elektrik rezistansı potanın içerisinde kılıfla örtülüdür ve 500-600°C sıcaklığa kadar ısıtma yapılabilir. Fırının şematik resmi aşağıda verilmiştir [22], [63].



Şekil 3.10 İçten rezistanslı akışkan yataklı fırının şematik gösterimi [22], [63]

### 3.6.3 Daldırmalı Isıtmalı Akışkan Yataklı Fırınlr

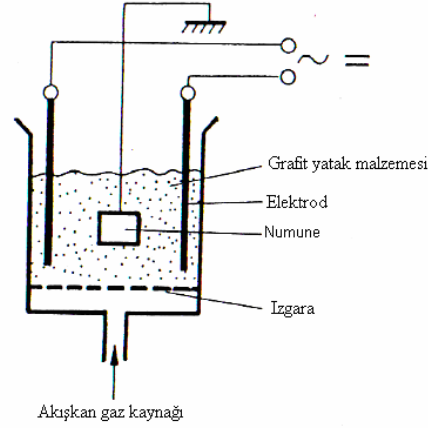
Bu yeni teknikte, seramik kılıflara daldırılmış metallerle ısıtma yapılmaktadır. Seramik kılıfların çapı 450 mm' ye kadardır ve bu tip fırında 600°C sıcaklığa kadar ısıtma yapılmaktadır. Fırının şematik resmi aşağıda verilmiştir [22], [63].



Şekil 3.11 Daldırmalı ısıtmalı akışkan yataklı fırının şematik gösterimi [22], [63]

### 3.6.4 Direkt Isıtmalı Akışkan Yataklı Fırınlar

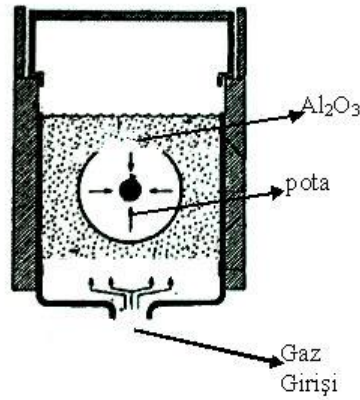
Bu metod, karbon tozu veya silisyum karbür gibi elektriği ileten yatak malzemesinin kullanımını içermektedir. Elektrotlardan akım geçirilerek yatak malzemesi ısıtılmaktadır. Şematik resmi aşağıdadır [22], [63].



Şekil 3.12 Direkt ısıtmalı akışkan yataklı fırının sematik gösterimi [22], [63]

### 3.6.5 Endirekt Isıtmalı Akışkan Yataklı Fırınlar

Yatak içerisinde yatay veya düşey olarak yerleştirilmiş, numuneleri yatak malzemesinden ve alümina tozlarından uzaklaştıran tüp şeklinde potası olan akışkan yataklı fırın tipidir. Alümina tozları akışkanlaştırılarak tüpe temas eder ve ısı iletimini sağlar, bu sayede tüp içerisinde bulunan malzemeler ısıtılmış olur. Fırının şematik resmi aşağıdadır [22], [63].



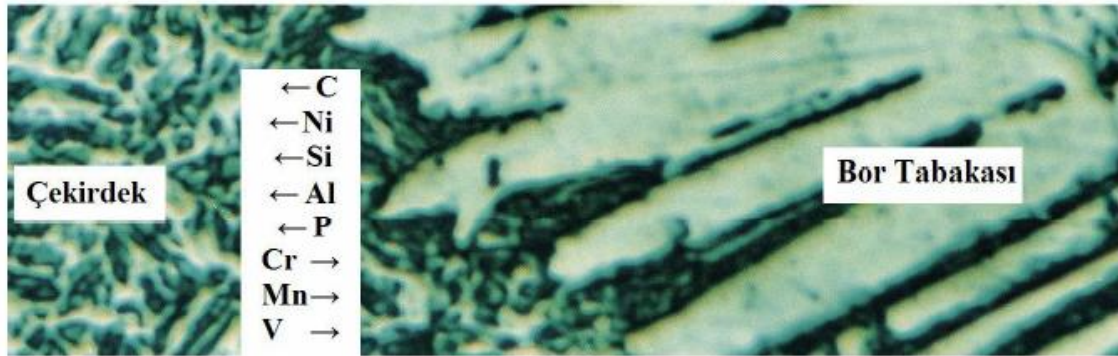
Şekil 3.13 Endirekt ısıtmalı akışkan yataklı fırının şematik gösterimi [22], [63]

### 3.6.6 İndüksiyon Isıtmalı Akışkan Yataklı Fırımlar

Dıştan elektrik ısıtmalı akışkan yataklara bir alternatif olarak geliştirilmiş ve bu fırın tipinin ısıtma oranı daha fazla ve işlem süresi daha kısadır [63].

### 3.7 Borlama Üzerine Alaşım Elementlerinin Etkisi

Hunger and True (1994) çeliklerin borlanması borür tabakası ve geçiş bölgesinin kristal yapısını, faz bileşimini, tabakanın büyümesini ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde alaşım elementlerinin etkilediğini, alaşım elementleri bu etkilerini, ana malzemenin bora karşı olan aktivitesine, yani borun yayınmasına ve reaktifliğine etki ederek, genellikle tabaka kalınlığını azaltıcı yönde etkilediğini iddia etmişlerdir [24], [43]. Campos ve diğerleri 2007 yılında yaptıkları çalışmada, bazı alaşım elementlerinin özellikle Cr, W, Mo, V'un FeB fazının şekillenmesinde büyük rol oynadıklarını bulmuşlardır [22], [64]. Alaşım elementlerinin borlama termokimyasal yüzey işlemi esnasındaki hareket yönü Şekil 3.14' de şematik gösterimde verilmiştir.



Şekil 3.14 Borlama sırasında alaşım elementlerinin hareket yönü[65]

Demir alaşımlarındaki C, Cr ve Ni gibi bazı elementlerin varlığı borür tabakasında önemli bir etkiye sahip olmaktadır [55].

### 3.8 Borlamanın Avantajları

Borlama işleminin en önemli avantajı; borlama ısıl işlemi sonrasında elde edilen borür tabakasının çok yüksek sertlik değerine (1450-5000 HV) ve yüksek ergime noktasına sahip olmasıdır [26]. Aşağıdaki çizelgede çeşitli malzemelerin borlanması sonucu elde edilen tabakanın sertlik değerleri ile diğer yüzey işlem teknikleri ile elde edilen

malzemelerin sertlik değerlerinin kıyaslaması verilmiştir. Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayılarından dolayı abrasiv aşınmaya karşı çok iyi direnç göstermektedirler ve temel aşınma mekanizmalarının oluşumunu önlemede önemli bir yarar sağlamaktadırlar [66].

Çizelge 3.9 Yüzeyi borlanmış çeliklerin sert malzemelerle ve diğer yüzey işlemleriyle kıyaslanması [26]

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



Borür tabakalarının yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayısının kombinasyonu; adhesiv, tribo-oksidasyon (kimyasal), abrasiv aşınma ve yüzey yorulması gibi temel aşınma mekanizmalarının oluşumunu önlemede çok önemli katkı sağlamaktadır [26].

Borür tabakası sertliğini yüksek sıcaklıklarda korumaktadır. Örneğin, nitrürlenmiş malzemelerle kıyaslandığında borür tabakasının sertliğini daha yüksek sıcaklıklarda muhafaza ettikleri görülmektedir [26].

Borlanmış yüzeyler 850°C sıcaklık değerine kadar orta seviyede oksidasyon direncine ve erimiş metal korozyon direncine sahiptir [26], [43].

Borlama işlemi oksitleyici ve koroziv ortamlarda parçanın yorulma ömrünü artırır [43].

Borlama yüzey işlemi düşük alaşımlı çeliklerin  $H_2SO_4$ ,  $H_3PO_4$  ve HCl gibi asitlere karşı direncini arttırmaya imkan sağlamaktadır. Örneğin; borlanmış östenitik paslanmaz çeliklerin HCl asit ortamına karşı dayanıklılığı oldukça iyidir [43].

Borlanmış malzemelerin yorulma ömürleri özellikle koroziv ortamlarda %25 oranında arttırılabilmektedir [43].

Borür tabakası, 550-660°C sıcaklık değerlerinde sertliğini koruyabilmektedir [43]. Borlama, bir iş parçasının sertleştirilmesi istenen seçilmiş bölgelerine, düzensiz karmaşık şekillere üniform bir şekilde uygulanabilmektedir [43].

### **3.9 Borlamanın Dezavantajları**

Borlama işleminin avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da vardır. Bunlar; borlanacak malzemenin yüzey özellikleri açısından çok hassas bir işlem ve işçilik gerektirmektedir ki; bu nedenle borlama, gaz karbürleme ve plazma nitrüleme gibi termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine oranla daha pahalıdır [67].

Borlama işlemi uygulanan malzemelerde borür tabaka kalınlığının %5-20'si oranında boyutsal olarak artış gözlenmektedir. Bu kalınlık artışı borlanan malzemenin cinsine ve borlama şartlarına göre değişir. Çok hassas toleranslarla çalışmak gerektiğinde, kaplamanın işlenmesi elmas takımlarla mümkün olmaktadır. Çünkü yüzeyin geleneksel

tekniklerle işlenmesi sırasında kaplama tabakasında kırılmalar olabilir ve bu da kaplama kalitesinde bozulmalara ve çatlamalara sebep olmaktadır [22], [68].

Kutu borlamada yüzeydeki bor tabakası kalınlığı homojen olmamaktadır [22], [53].

Plazma borlama işlemi için kullanılan atmosfer oldukça zehirlidir ve bu nedenle ticari olarak kullanılmamaktadır [22], [53].

Sıvı borlamada parçaya çok sıkı yapışmış tuz tabakasını ortadan kaldırmakta maliyetlidir. Elektroliz sisteminin maliyeti oldukça yüksektir ve büyük parçalara uygulanamaz [22], [69].

Gaz borlama yönteminde ortam zehirlidir ve patlama riski taşımaktadır. Bunun yanı sıra tesisatı maliyetlidir [22], [69].

Takımlar borlama işleminin ardından çoğu zaman bir sertleşmeye ve temperlemeye tabi tutulmaktadır. Borlama sonrası ısı işlem göreceğ olan çeliklerde borür tabakasının özelliklerini koruyabilmesi için inert atmosfer veya vakum ortamına ihtiyaç duyulmaktadır [43].

### BORLAMA KİNETİĞİ VE DİFÜZYON

#### 4.1 Borlama Kinetiği

Borlama prosesinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için kinetik parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Yüksek sıcaklıkta yapılan borlamanın difüzyon kontrollü bir proses olduğu bilinmekte ve istenilen kalınlık ve sertlikteki borür tabakasının oluşturulabilmesi için proses parametrelerinin doğru tayin edilmesi gerekmektedir.

Borür tabakasının büyüme kinetiği borun  $Fe_2B$  içinde difüzyonu ile kontrol edilmektedir. Borür tabakasının büyümesi matris yüzeyine dik olarak borun difüzyonunun bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Fick kanunları borun  $FeB$  ve  $Fe_2B$  içindeki konsantrasyonunu tahmin etmede kullanılmaktadır ve bor tabakasının büyümesi parabolik kanuna uymaktadır [70].

Borlama kinetiğini incelemek için difüzyon olayının bilinmesi gerekmektedir. Atomların sıcaklığa bağlı olarak hareket etmesi olayı difüzyon olarak adlandırılmaktadır.

#### 4.2 Difüzyon Mekanizmaları

##### 4.2.1 Arayer Difüzyonu

Kristal yapıda mevcut bulunan küçük bir atomunun bir arayerden diğer bir arayereye geçiş hareketidir ve bu mekanizmanın gerçekleşebilmesi için boşluğa ihtiyaç yoktur [22], [71].



Şekil 4.1 Arayer difüzyonunun şematik gösterimi [72]

#### 4.2.2 Boşluk Difüzyonu

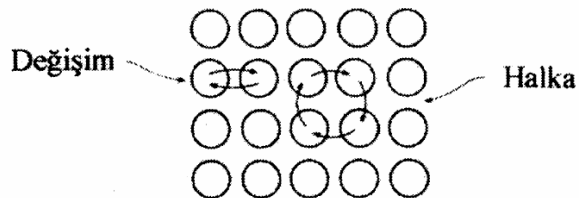
Komşu atomun kendi kafesindeki yerini terk edip, boş atomun yerine geçmesi prensibine dayanmaktadır.



Şekil 4.2 Boşluk difüzyonunu şematik gösterimi [72]

#### 4.2.3 Yer Değiştirme İle Difüzyon

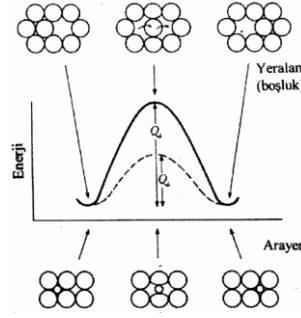
Hem arayer atomunu hem de boş kafes köşesinin bulunmadığı durumlardaki atom yayınımlarını açıklamaktadır. Doğrudan yer değiştirme ve halka hareketi ile yer değiştirme olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleşebilir [72]



Şekil 4.3 Yer değiştirme ile difüzyonun şematik gösterimi [22], [71].

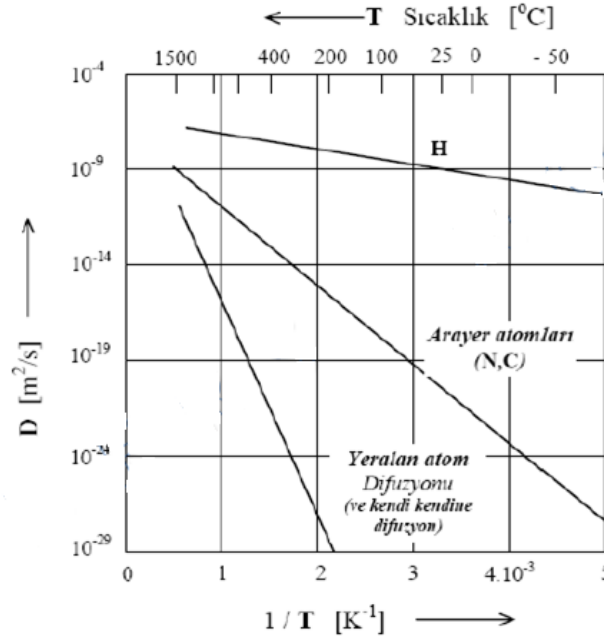
### 4.3 Aktivasyon Enerjisi (Q)

Bir kristal içerisinde bir atomun yeni yerine gidebilmesi için belli bir enerji seviyesinde (Q : aktivasyon enerjisi) olması gerekmektedir. Bu enerji sınırını aşmak için atomun ısıtılması gerekmektedir.



Şekil 4.4 Yer alan ve arayer difüzyonlarında aktivasyon enerjisinin gösterimi [22], [71].

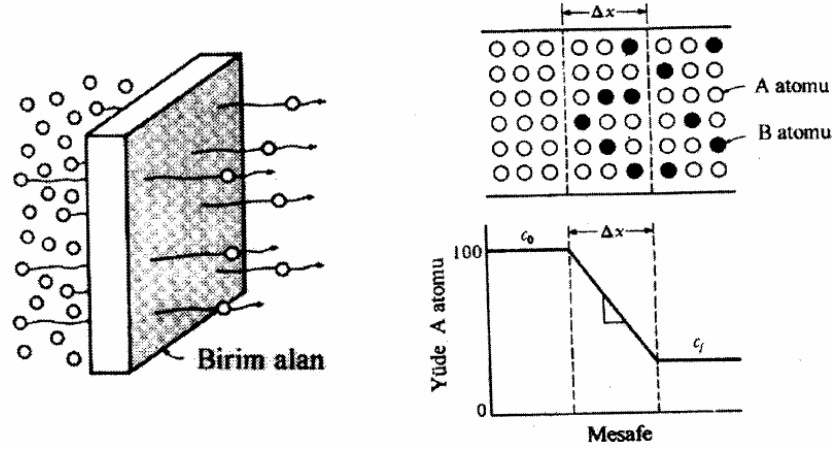
Şekil 4.4' de görüldüğü üzere arayer atomlarının hareketi için, yer alan atomlarına göre daha az aktivasyon enerjisine ihtiyaç duymaktadır.



Şekil 4.5  $\alpha$ -Fe içerisindeki farklı atom difüzyonlarına ait difüzyon katsayısı-sıcaklık ilişkisi grafiği [72]

#### 4.4 Difüzyon Hızı

I. Fick kanunu ile açıklanmaktadır. Atomların yayılım hızı, birim zamanda birim düzlem alanı boyunca geçen atom sayısı olarak tanımlanan akı "J" ile ölçülebilir ve aşağıdaki formülle ifade gösterilmektedir [22], [71].



Şekil 4.6 Difüzyon mekanizmasının şematik gösterimi [22], [71].

$$J = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

J : Atomsal yayılım akısı (atom/(m<sup>2</sup>s))  
D : yayılım katsayısı (m<sup>2</sup>/s)  
c : atom konsantrasyonu  
Δc/ Δx: konsantrasyon gradyanı

(4.1)

#### 4.5 Difüzyon Katsayısı (D)

Bir molekülün D değeri sabit olmayıp, sıcaklık, basınç ve molekülün hareket ettiği ortamın özelliklerine bağlı olarak değişir. "D" değeri sıcaklık veya ortam viskozitesine göre değişebilen bir değer olmasından dolayı, difüzyon sabiti olarak değil, difüzyon katsayısı olarak belirtilmektedir [73]. Arrhenius Denklemi olarak bilinen  $D = D_0 e^{-Q/RT}$  denklemi ile tanımlanır. Burada "Q" aktivasyon enerjisi, "R" gaz sabiti, "T" mutlak sıcaklık ve "D<sub>0</sub>" ise yayılım sabiti değerleridir ve difüzyon katsayısı(D) sıcaklığa çok etkin bir şekilde bağlıdır [22], [74]. Bazı metallerde yayılım sabiti ve aktivasyon enerjisine örnekler Çizelge 4.1' de verilmiştir.

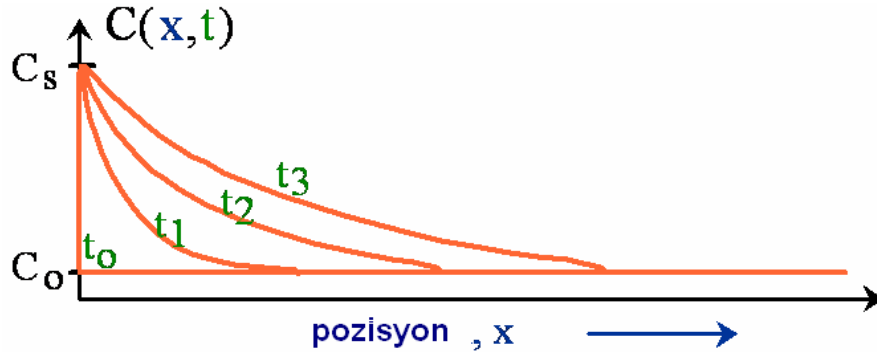
Çizelge 4.1 Bazı metallerde yayınım sabiti ve aktivasyon enerjisi [22], [71].

Eriyen	Eriten	D <sub>0</sub> (m <sup>2</sup> /s)	Q	
			kcal/mol	kJ/mol
C	Fe(YMK)	2x10 <sup>-5</sup>	34	142
C	Fe(HMK)	22x10 <sup>-5</sup>	29,3	122
Ni	Fe(YMK)	7,7x10 <sup>-5</sup>	67	280
Mn	Fe(YMK)	3,5x10 <sup>-5</sup>	67,5	282

#### 4.6 Difüzyon Mesafesi (x)

Difüzyon mesafesinin hesaplanması için II.Fick Kanunu kullanılmaktadır. II.Fick Kanunu atomların dinamik veya durağan olmayan hallerini tanımlamaktadır.  $dc/dt = D (d^2c/dx^2)$  denkleminde ifade edilir ve D sabit kaldıkça değişik şartlarda aynı konsantrasyon profili elde edilebilir. Bu özellik, belirli bir ısı işleminin uygulaması için gerekli zaman üzerine sıcaklığın etkisini belirlemeyi sağlar [22], [71]. II. Fick Kanunu I. Fick Kanununun türevidir ve aşağıdaki denklem kullanılır.

$$\frac{C_{x,t} - C_o}{C_s - C_o} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (4.2)$$



Şekil 4.7 Difüzyon mesafesinin şematik gösterimi [22]

$C_{(x,t)}$  = Yüzeyin altında "x" derinliğindeki gerekli olan bor konsantrasyonu

$C_0$  = Borlanan Malzemenin esas bor miktarı

$C_s$  = Borlanan malzemenin yüzeyindeki bor miktarı

$D$  = Difüzyon katsayısı ( $\text{cm}^2/\text{sn}$ )

$x$  = Difüzyon mesafesi (borür tabaka kalınlığı)( $\text{cm}$ )

$t$  = Borlama süresi ( $\text{sn}$ )

erf: gaus hata fonksiyonudur.

Bu denkleme göre elde edilen verilerden yola çıkarak;

$$C_{(x,t)} = C_s \text{erf}(x/2(Dt)^{1/2}) \quad (4.3)$$

denklemini elde edilir [22], [71].

II.Fick Kanunu'ndan  $x=2(Dt)^{1/2}$  denklemini elde edilir [75]. Borlama üzerine yapılan diğer çalışmalarda  $x=(Dt)^{1/2}$  denklemini olarak alınmıştır [76], [77]. Difüzyon katsayısının tayini için kullanılan formüllerden faydalanılarak 'x' ve 't'ye bağlı olarak  $x=(Kt)^{1/2}$  eşitliği kullanılmaya başlanmıştır. 'K' tabaka büyüme hız sabitidir. Buradan da;  $K = K_0 e^{(-Q/RT)}$  denklemini elde edilir [26], [78]. Bütün bu verilerden  $x^2=K.t$  denklemini elde edilmektedir. t=süre, K = tabaka büyüme hız sabiti, x= borür tabakası kalınlığı nı ifade etmektedir. 'K, sabiti  $x^2$ 'nin işlem süresine karşılık gelen grafiğin eğrisinden hesaplanmaktadır. Hız sabiti "K" ile sıcaklık arasındaki bağıntı Arrhenius eşitliği ile açıklanabilmektedir [70]. Büyüme hız sabiti ile sıcaklık arasındaki bağıntının logaritması alınır;  $\ln K = \ln K_0 - (Q/RT)$  denklemini ortaya çıkar.

Sonuç olarak  $\ln K = \ln K_0 - Q/RT$  denkleminin de yardımıyla  $\ln K - 1/T$  diyagramı çizilir ve bu diyagramın eğimi  $Q/R$  değerini ve diyagramın ordinatı kestiği nokta ise  $\ln K_0$  değerini vermektedir. Bütün bu sonuçlardan yola çıkarak  $x^2=K.t$  denkleminde bilinenler yerine konulduğunda  $x^2 = t.K_0 e^{(-Q/RT)}$  eşitliği yazılabilir. Burada "Q", "R" ve "K<sub>0</sub>" değerleri yerlerine konularak sıcaklık ve zamanın değişimine bağlı olarak difüzyon mesafesi bulunabilmektedir [22], [78], [79].

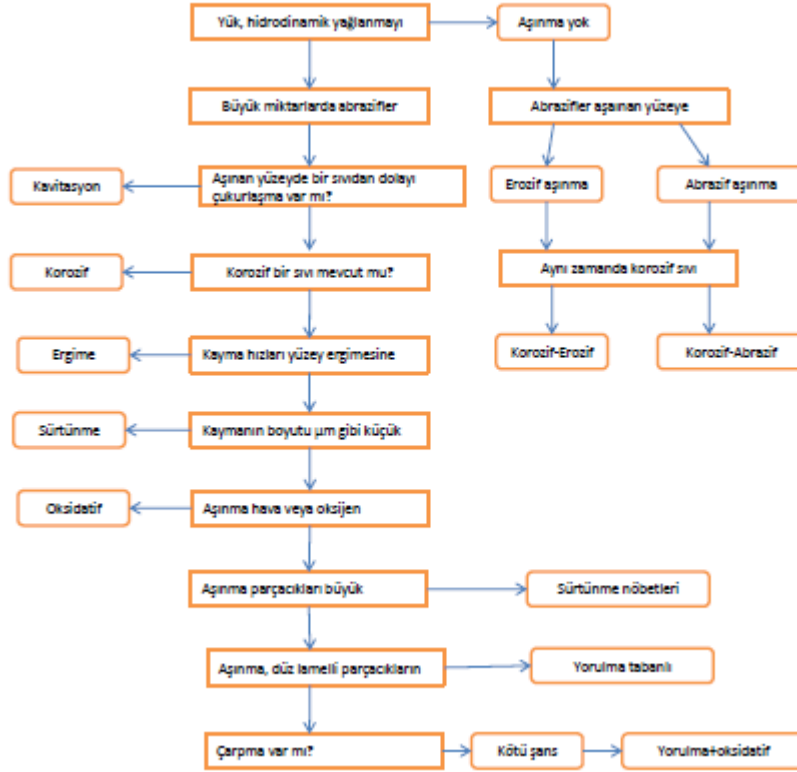


### AŞINMA VE KIRILMA TOKLUĞU

#### 5.1 Aşınma

Katıların yüzeyleri teknolojide çok farklı ve önemli roller oynamaktadır. Fonksiyonları hoş bir görünüm kazandırmaktan, aşınma ve korozyondan ana malzemeyi korumaya kadar kapsamaktadır [80].

DIN 50320 standardına göre aşınma; " kullanılan malzeme yüzeylerinden mekanik sebeplerle ufak parçaların ayrılması suretiyle meydana gelen değişiklik" şeklinde tanımlanmaktadır [81]. Temas halinde bulunan katı yüzeylerde, malzeme kaybı; bölgesel erimeler, kimyasal çözünme ve yüzeyden fiziksel oluşan ayrılmalar olmak üzere üç şekilde gerçekleşmektedir [82]. Bir aşınma sisteminde; ana malzeme(aşınan), karşı malzeme(aşındıran), ara malzeme, yük ve izafi hareket ve ortam etkilidir [57].



Şekil 5.1 Çalışma koşulları ile aşınma türleri arasındaki ilişkiyi gösteren akış şeması [30].

Çalışma koşullarına göre hangi tür aşınmanın ortaya çıkabileceğini Şekil 5.1' deki akış şemasından bakabiliriz.

## 5.2 Aşınma Mekanizmaları

### 5.2.1 Adhezif Aşınma

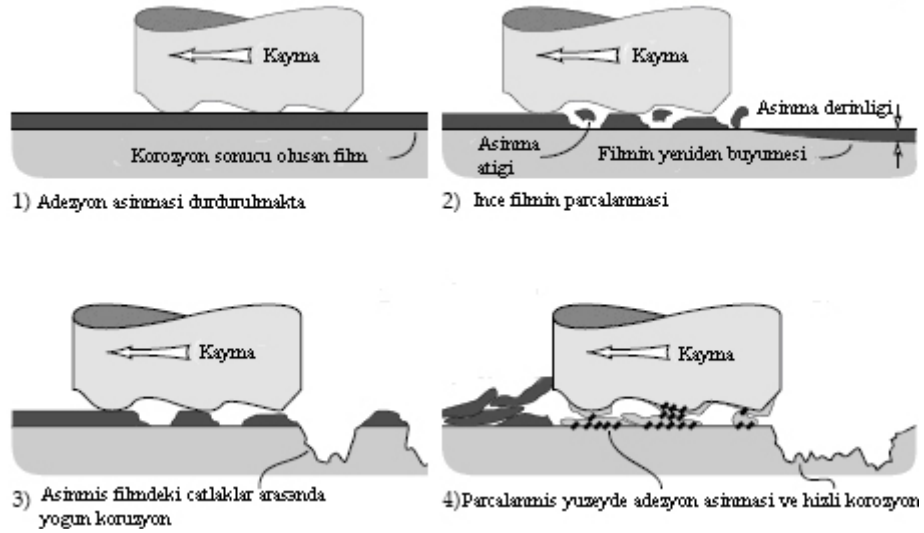
Yapışma aşınması olarak da adlandırılan adhezif aşınma, en sık rastlanılan aşınma mekanizması olmasına rağmen, genellikle hasarları hızlandırıcı etkisi yoktur [83]. Adhezif aşınmayı açıklayacak olursak; iki ayrı metal yüzeyi basınç altında aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere bir araya getirildiği zaman, iki ayrı yüzeyde bulunan karşılıklı çıkıntılar sürtünme, ısı, gerekse soğuk kaynaklaşma etkisiyle birbirleriyle bağ yaparlar. Yüzeylerin birbirlerine karşı olarak yaptığı hareketin devam etmesiyle birlikte birleşen iki çıkıntı, bağ kuvvetinin en zayıf olduğu noktadan koparak aşınma gerçekleşecektir [84].



Şekil 5.2 Adhezif aşınma olayının şematik gösterimi [85]

### 5.2.2 Korozyif Aşınma

Tribooksidasyon aşınması olarak da adlandırılan korozyif aşınmada, ana malzeme ile karşı malzeme arasındaki tribolojik zorlanmalardan dolayı meydana gelen kimyasal reaksiyon etkindir. Malzeme yüzeylerinin hava ile reaksiyona girmesi sonucunda oluşan yüzey tabakaları (oksit tabakası) aşınmayı azaltıcı etki yapmasına rağmen, bu yüzey tabakalarının tribooksidasyon sonucu özelliklerinin değişmesi, aşınmayı hızlandırmaktadır [82], [86].



Şekil 5.3 Korozyif aşınmanın gelişiminin şematik görüntüsü [87]



Şekil 5.4 Korozif aşınmaya bir örnek

### 5.2.3 Eroziv Aşınma

Bir sıvı ya da gaz akımı tarafından taşınan farklı geometrik boyut ve yapıdaki taneciklerin, temas da buldukları katı yüzeylerinde sürekli darbe etkisi yapmaları sonucunda meydana gelen hasar erozyon aşınması olarak adlandırılmaktadır. Eroziv aşınma, püskürtme, yıkama, kavitasyon - erozyon, erozyon-korozyon, yağdırma ve termal aşınma mekanizmaları olarak sınıflandırılmaktadırlar. Bu sınıflandırma, aşındırıcı taneciklerin ve bu aşındırıcı tanecikleri taşıyan akımın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin farklılık göstermesine ilaveten, sadece sıvı yada gaz akımının kendisinin de aşındırıcı madde özelliği teşkil etmesi durumu sebebiyle bu mekanizmaların tek başına, kombineli ve yüksek sıcaklık uygulamalarında malzemede bıraktıkları hasar türleri farklılık göstermesinden dolayı yapılmaktadır [84], [88].

Bu aşınma türlerinin yanı sıra; abrasif aşınma, yorulma aşınması(delaminasyon), öğütmeli aşınma, kazımalı aşınma ve oymalı aşınma gibi türlerde literatürde mevcuttur.

### 5.3 Borlama Yüzey İşleminin Aşınmaya Etkisi

Borun oksijene karşı olan yüksek afinitesinden dolayı, yüzeyde ince bir koruyucu oksit filmi oluşmaktadır. Bu oksit filmi yüzeyde yağlayıcı görevi üstlenerek sürtünmeli aşınma esnasında sürtünme katsayısını düşürürken yüzeylerin birbirlerine kaynamasını engellemektedir. Kaymalı sürtünme esnasında açığa çıkan ısı borür tabakasını etkilememektedir.

Borlamanın diğ er yüzey sertleştirme yöntemlerine göre en önemli üstünlüğü elde edilen tabakanın sertliğinin yüksek olması, sürtünme katsayısının düşük olması ve borlama ısıl işle mi sonrasında ek bir ısıl işleme ihtiyaç duymamasıdır. Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertlikleri ve yüksek aşınma dirençleriyle karakterize edilirler ve bu nedenle özellikle yüksek mertebede abrasif ve adhesif aşınmaya ve erozyona maruz makine parçalarının ve sistem elemanlarının borlanması teknik ömrün uzatılmasında önemli katkı sağlamaktadır [30]. Kromlama ve borlama yapılmış çeliklerin sürtünme katsayısı ilişkisini gösteren Çizelge 5.2' de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Kromlama ve borlama ısıl işle mi uygulanmış çeliklerin sürtünme katsayıları[30], [89]

Malzeme	Sürtünme katsayısı değerleri	
	Borlanmış	Kromlanmış
XC10	0,57	0,64
XC38	0,55	0,74
Z200C12	0,54	0,75
Z6CN18-10	0,50	0,63

Çizelge 5.2' de görüldüğü üzere, borlama işle mine tabi tutulmuş malzemelerin, kromlama işle mine tabi tutulmuş malzemelere göre sürtünme katsayılarının daha düşük olduğu görülmektedir.

Borlanmış ve borlanmamış malzemelerin sürtünme katsayılarının kıyaslaması aşağıdaki çizelgede verilmiştir ve çizelgedan görüldüğü üzere borlamanın sürtünme katsayısını düşürdüğü gözlemlenmektedir.

Çizelge 5.3 Borlanmış ve borlanmamış malzemelerin sürtünme katsayılarının kıyaslanması [30], [90]

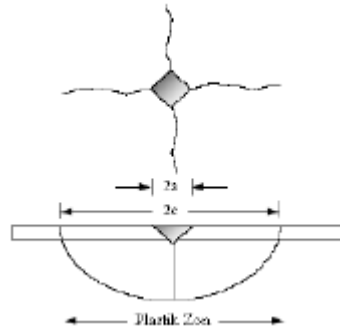
Malzeme	İşlem	Sürtünme Katsayısı
1018 Karbon Çeliği	Borlanmış	0,14-0,15
	Borlanmamış	0,19-0,24
302 Paslanmaz Çelik	Borlanmış	0,16-0,18
	Borlanmamış	0,19-0,22
Tungsten	Borlanmış	0,12-0,14
	Borlanmamış	0,45
Molibden	Borlanmış	0,16-0,17
	Borlanmamış	0,38
Nikel	Borlanmış	0,13-0,14
	Borlanmamış	0,42

#### 5.4 Kırılma Tokluğu

Kaplamanın kırılma tokluğu özellikleri borür tabakasının sertliği ve ölçülen çatlak boyuyla ilgili olduğu belirlenmiştir [91]. Borür tabakasının kırılma tokluğunu, borlama süresi, sıcaklığı ve uygulanan akımın yoğunluğu etkiler. Ayrıca, çeliğin içerdiği alaşım elementleri de, borür tabakasının oluşum hızını ve borür tabakasının kalınlığını etkilemesi de kırılma tokluğunu etkilemektedir [92].

Kırılma tokluğu deneylerindeki amaç; bir malzemenin kırılmaya karşı direncini bir ifadesi olan K<sub>ic</sub> değerini bulmaktır. Klasik kırılma tokluğu deneylerinde boyut bakımından uygun malzemelerin olması gerekmektedir. Numunenin kalınlığı ve plastik bölgenin boyutu kırılma tokluğu deneylerinde oldukça önemli parametrelerdir. Bunların yanı sıra kırılma tokluğu deneyine tabi tutulan malzemelerin gevrek olmamaları gerekmektedir. Bundan dolayı gevrek ve aynı zamanda ebatları klasik kırılma tokluğu deneylerine uygun olmayan malzemelerin kırılma tokluğu hesabında 'indentasyon' tekniği kullanılmaktadır [30]. Kırılma tokluğu deneylerinde  $K_c = X.P/c^{3/2}$

denklemleri kullanılmaktadır ve X: sabit, P: yük, H:sertlik, E:elastisite modülü ve c: çatlak yarı-boyunu ifade etmektedir. X değeri (H/E) değerine bağlıdır [91].



Şekil 5.5 Vickers uç kullanılarak elde edilen izin kullanımıyla kırılma tokluğu ölçümü [22]

Yapılan literatür araştırmalarına göre vickers uç kullanılarak kırılma tokluğu hesaplamasında aşağıdaki formül kullanılmaktadır. Bu formülde E değeri yerine Fe<sub>2</sub>B tabakasının elastisite modülü (E) 28400 kg/mm<sup>2</sup> alınmıştır [22].

$$K_c = 0,016 (E/Hv)^{1/2} P/c^{3/2} \quad (5.1)$$

$K_c$  : Kırılma tokluğu (MPa.m<sup>1/2</sup>) E: Elastisite modülü (kg/mm<sup>2</sup>)

HV: Kaplama tabakasının Vickers sertliği (kg/mm<sup>2</sup>) P: Uygulanan yük (MN)

c: Çatlak yarı boyu (m) [93]

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

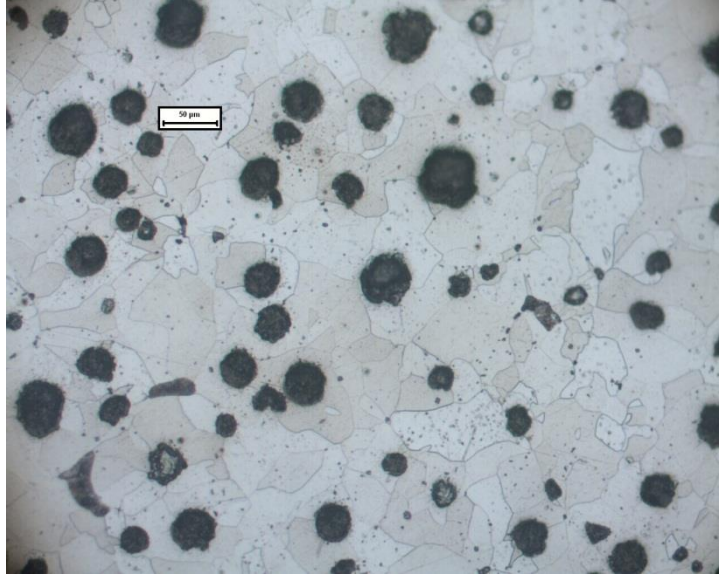
#### 6.1 Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Yöntem

Yapılan tez çalışmasında GGG40.3 matris malzemesi kullanılmış ve borlama işlemi öncesinde incelemesi yapılmıştır. İlk olarak deneylerde kullanılacak GGG40.3 küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşiminin tespiti için optik emüsyon spektrometresi kullanılmıştır ve malzememizin kimyasal analiz sonucu Çizelge 6.1' de verilmiştir. Sonrasında numunelerimizin Brinell sertliklerine bakılıp, sonuç 187 HB olarak bulunmuş, ardından 60, 180, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh lik zımpara kağıtlarıyla zımparalanmıştır. Daha sonra alümina ile ardından 3 µm'lik elmas pasta ile parlatıldı ve optik mikroskopta küre sayılarına bakıldı ve 137 tane/mm<sup>2</sup> olarak bulundu. Mikroyapılarını incelemek için %2'lik Nital(HNO<sub>3</sub>+alkol solüsyonu) ile dağlanan numunelerimizin tekrardan optik mikroskop aracılığıyla mikroyapıları incelendi ve sonuçta ferritik mikroyapıda olduğu gözlemlenmiştir. Yapının mikroyapı görüntüsü Şekil 6.1' de verilmiştir.

Çizelge 6.1 GGG40.3 küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimi

%Fe	%C	%Si	%P	%Mg
93.6	3.69	2.46	0.029	0,026





Şekil 6.1 GGG40.3 mikroyapı görüntüsü (200x)

GGG40.3 matris malzemesine Ekabor I tozu kullanılarak 850, 900 ve 950°C sıcaklıklarda 1, 2 ve 4 saat sürede kutu borlama (katı ortamda borlama) tekniği kullanılarak termokimyasal yüzey sertleştirme işlemi yapılmıştır.

Kutu borlama işlemi; 1, 2 ve 4 saatlik sürelerde 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda Protherm PLF 100/3 markalı fırında gerçekleştirilmiştir. Borlama deneylerinde 'Ekabor I' ve 'Ekabor II' ticari tozları kullanılmıştır. Bu iki tozun bileşimi de (SiC+KBF<sub>4</sub>+B<sub>4</sub>C)' den oluşmaktadır, ancak toz boyutları farklıdır, Ekabor I tozunun partikül boyutu ≤150 iken, Ekabor II tozunun ≤850 olan ticari toz karışımlarıdır. Partikül boyutunun borlama üzerine etkisini incelemek için 950°C sıcaklıkta Ekabor II tozu ile 4 saat sürede kutu borlama işlemi uygulanmıştır.

Öncelikle potanın içerisine yaklaşık 20 mm kalınlığında ticari toz karışımı konulmuş ve daha sonra numuneler aralarında eşit uzaklıkta yerleştirilmiştir. Daha sonra tekrardan potanın içerisine yaklaşık 20 mm kalınlığında ticari toz karışımı ilave edilmiş ve en üst kısmına da oksitlenmeyi engellemek amacıyla silis kumu (SiO<sub>2</sub>) doldurulmuş ve kapağı sıkıca kapatılarak, borlama işlemi için fırına konulmuştur.

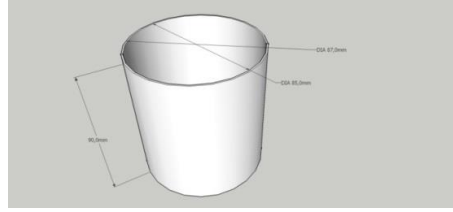
Birinci aşamada 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda Ekabor I tozu ile 1, 2 ve 4 saat sürede kutu borlama işlemi yapılmış ve numuneler incelenmiştir. Daha sonra Ekabor II tozu ile 4 saat sürede borlama işlemi yapılarak toz boyutunun borlama üzerine etkisi

incelenmiştir. Çalışmamızın ikinci aşamasında %85B<sub>4</sub>C+%15Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> toz karışımı kullanılarak 950 °C sıcaklıkta 4h sürede borlama işlemi yapılarak deneme yapılmıştır. Burada farklı toz karışımının kullanılmasının nedeni; Ekabor ticari toz karışımının içerisinde var olan Fl<sub>2</sub> gazının olumsuz etkisini tolere etmektir.

## 6.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar

### 6.2.1 Borlama Kutusu

Kutu borlama işlemi için paslanmaz çelik veya alüminadan yapılmış potalar kullanılabilir [51]. Buradaki çalışmada paslanmaz çelik bir pota kullanılmıştır ve sematik resmi Şekil 6.2’ de verilmiştir.



Şekil 6.2 Borlama kutusunun şematik resmi

### 6.2.2 Borlama İşleminde Kullanılan Fırın

Borlama termokimyasal yüzey işlemlerinin gerçekleştirilmesinde Protherm PLF 100/3 Kamara Tip Fırın kullanılmıştır.



Şekil 6.3 Protherm PLF 100/3 kamara tip fırın

### 6.2.3 Optik Emüsyon Spektrometresi

Deneylerde kullanılacak GGG40.3 küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşiminin tespiti için optik emüsyon spektrometresi kullanılmıştır.



Şekil 6.4 Optik emüsyon spektrometresi

### 6.2.4 Optik Mikroskop

Deneylerde borür tabakaların kalınlık ölçümü, tokluk değerlerinin hesaplanmasında ihtiyaç duyulan çatlak boyunun ölçümü ve mikroyapı incelemelerinde Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü' nde bulunan Leica Marka görüntü analiz cihazı kullanılmıştır.



Şekil 6.5 Leica ICM 1000 mikroskop ve bilgisayarlı analiz ünitesi

### 6.2.5 X-ışını Difraktometresi (XRD) Cihazı

Borlama işlemi görmüş numunelerin yüzeyindeki faz analizi için X-Ray ışınlarına tabi tutuldular. Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Philips Panalytical X-Pert Pro kullanılmıştır.



Şekil 6.6 X-ışını difraktometresi(XRD) cihazı

### 6.2.6 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Borlanan numunelerin borür tabakalarının ve aşınma sonrası izlerin incelenmesinde Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM) kullanılmıştır.



Şekil 6.7 Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM)

### 6.2.7 Aşınma Cihazı

Numunelerimizin aşınma testi Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan Micro Photonics ball on disk (bilya-disk) aşınma cihazıyla yapılmıştır.



Şekil 6.8 Micro photonics ball on disk (bilya-disk) aşınma cihazı

### 6.2.8 Sertlik Cihazı

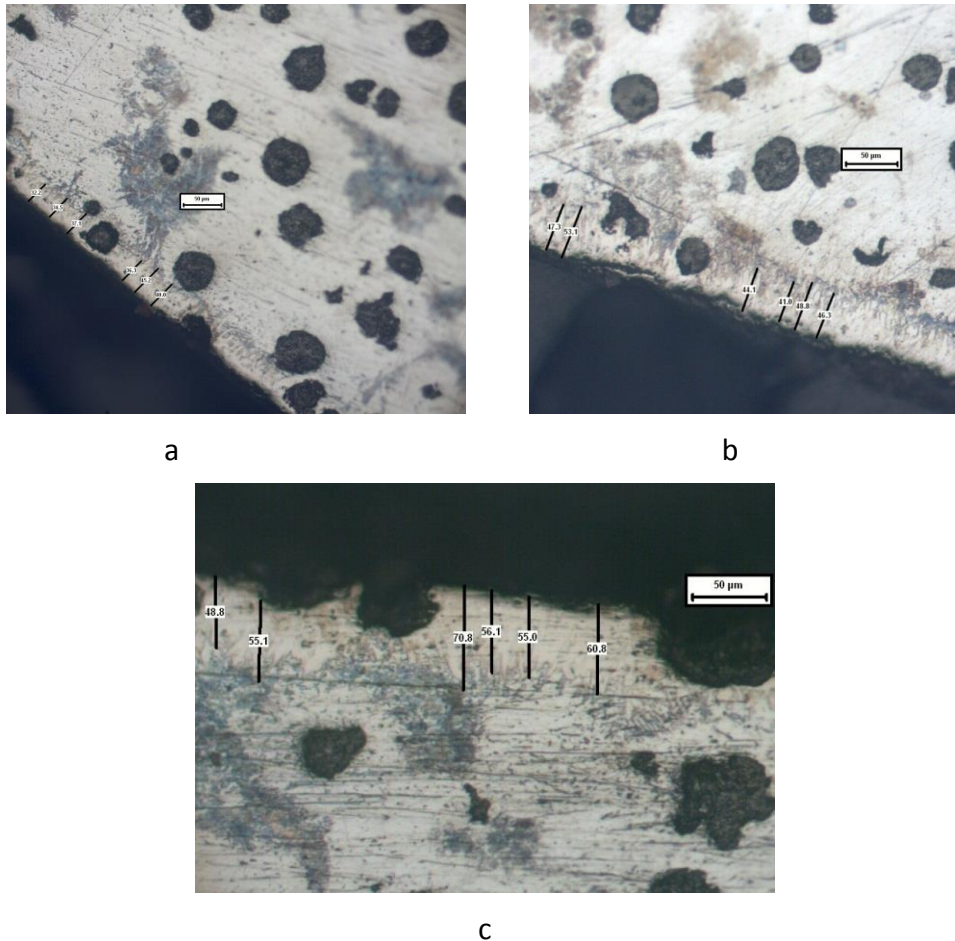
Borlama sonrasında numunelerin sertliklerine Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan HVS-1000 mikrosertlik cihazıyla bakılmıştır.



Şekil 6.9 Mikrosertlik cihazı

### 6.3 Borlama Sonrası Elde Edilen Borür Tabakalarının Mikroyapı İncelemeleri

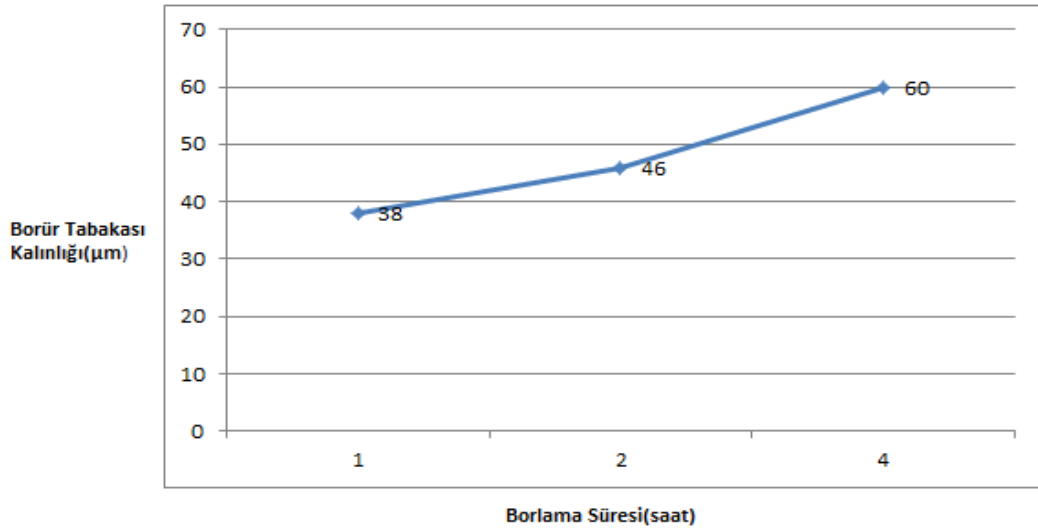
Borlama işlemi sonrasında numuneler hassas kesim cihazıyla kesilmiş ve numunelerin kesitleri incelenmek için soğuk kalıba alınmıştır. Numuneler sırasıyla 60, 180, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh lik zımparalama kademelerinden geçirilip, alümina ve 3 µm'lik elmas pasta ile parlatma işlemine tabi tutulmuşlardır. Parlatma işlemi sonrasında %2'lik Nital ( $\text{HNO}_3$ +alkol solüsyonu) ile dağlanmış ve mikroskopta incelenmiştir. Mikroyapılar Leica Marka görüntü analiz cihazı ile incelenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir. Tabaka kalınlıklarının ölçümü ve kırılma tokluğu hesabı için ihtiyaç duyulan çatlak boyu da optik mikroskoba bağlı olan optik mikrometre yardımıyla ölçülmüştür. Şekil 6.10, 6.12 ve 6.13' de borlanmış numunelerin tabaka kalınlık ölçümlerinin mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Ayrıca borür tabaka kalınlıkları hem çizelge halinde hem de grafik halinde de verilmiştir.



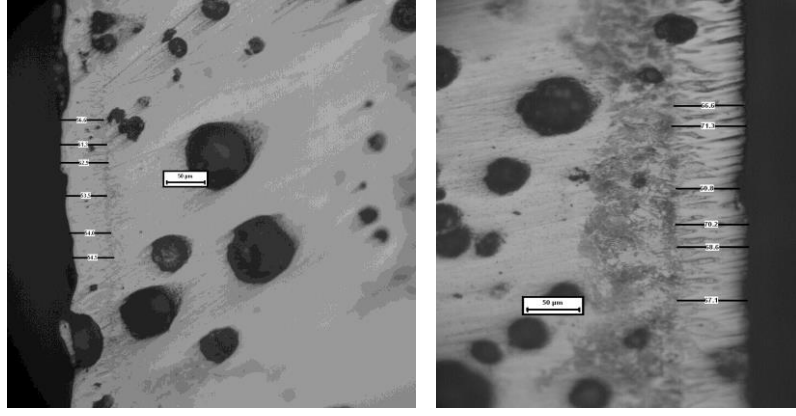
Şekil 6.10 850°C' de Ekabor I ile borlanmış numunelerin optik mikroskop görüntüleri  
a) 1 saat b) 2 saat c) 4 saat (200x)

Çizelge 6.2 850°C' de yapılan borlama sonucu oluşan borür tabaka kalınlığı değerleri

Borlama Sıcaklığı	Toz	Borlama Süresi(saat)	Tabaka kalınlığı( $\mu\text{m}$ )
850°C	Ekabor I	1	38
		2	46
		4	60

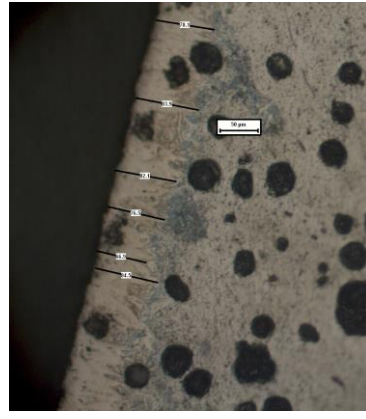


Şekil 6.11 850°C' deki borür tabaka kalınlıklarını gösteren grafik



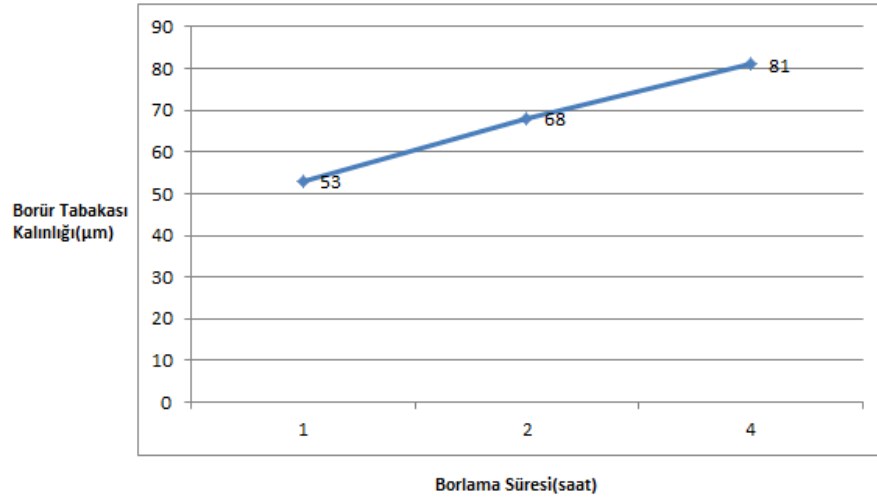
a

b



c

Şekil 6.12 900°C' de Ekabor I ile borlanmış numunelerin optik mikroskop görüntüleri  
a) 1 saat b) 2 saat c) 4 saat (200x)

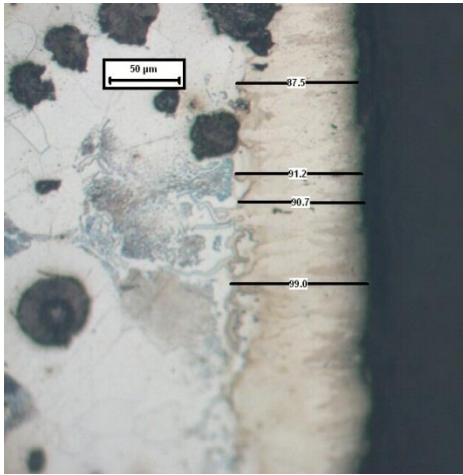


Şekil 6.13 900°C' deki borür tabaka kalınlıklarını gösteren grafik

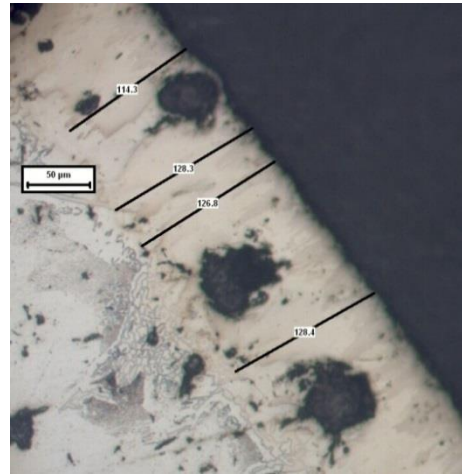


Çizelge 6.3 900°C' de yapılan borlama sonucu oluşan borür tabaka kalınlığı değerleri

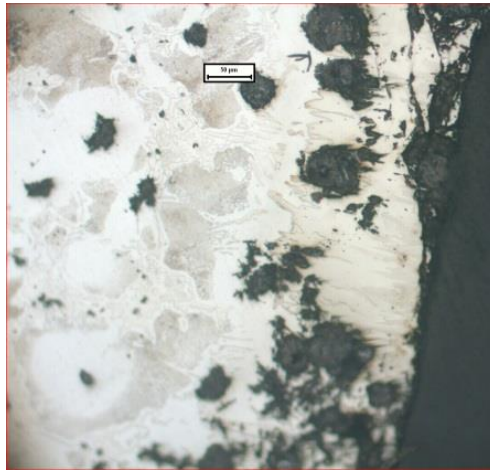
Borlama Sıcaklığı	Toz	Borlama Süresi(saat)	Tabaka kalınlığı( $\mu\text{m}$ )
900°C	Ekabor I	1	53
		2	68
		4	81



a



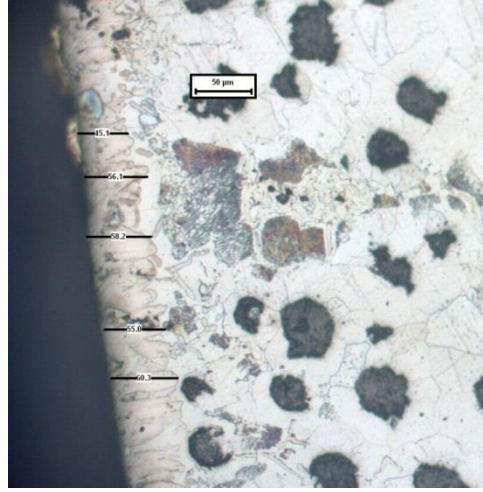
b



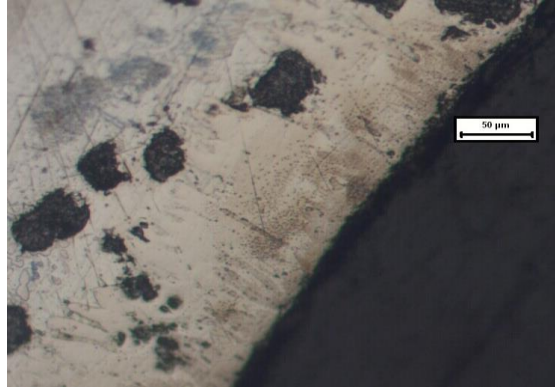
c

Şekil 6.14 950°C' de Ekabor I ile borlanmış numunelerin optik mikroskop görüntüleri

a) 1 saat b) 2 saat c) 4 saat (200x)



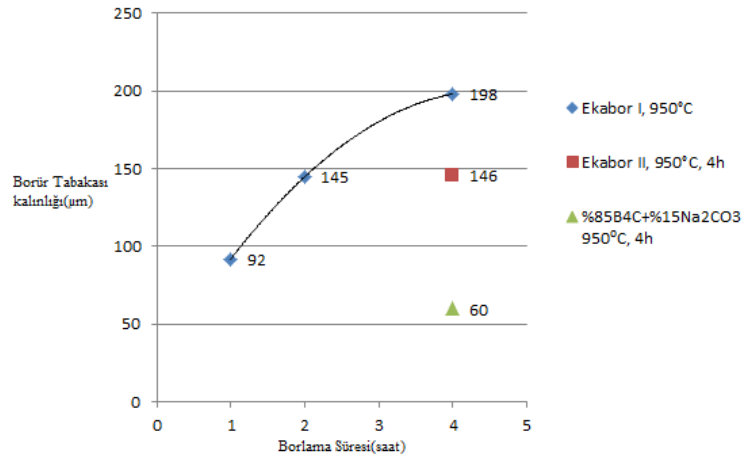
Şekil 6.15 950°C' de 4 saat %85B<sub>4</sub>C+%15Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ile borlanmış numunenin optik mikroskop görüntüsü (200x)



Şekil 6.16 950°C' de 4 saat Ekabor II ile borlanmış numunenin optik mikroskop görüntüsü (200x)

Çizelge 6.4 950°C' de yapılan borlama sonucu oluşan borür tabaka kalınlığı

Borlama Sıcaklığı	Toz	Borlama Süresi(saat)	Tabaka kalınlığı(μm)
950°C	Ekabor I	1	92
		2	145
		4	198
	Ekabor II	4	146
	%85B <sub>4</sub> C+%15Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	4	60

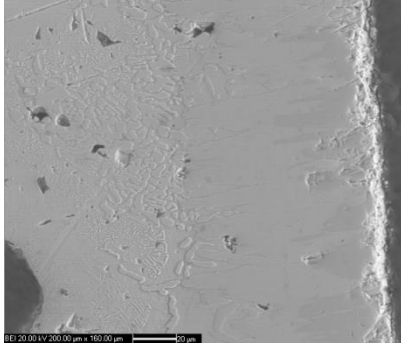


Şekil 6.17 950°C' deki borür tabaka kalınlıklarını gösteren grafik

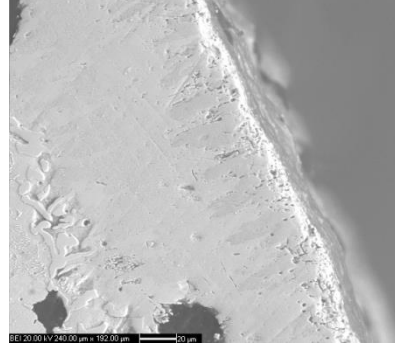
Nişli' nin 2011 yılında yaptığı çalışmada artan borlama süresi ile birlikte tabaka kalınlığının arttığını gözlemlemiştir [45]. Taştan 2010 yılında yaptığı çalışmada borür tabakasının işlem sıcaklığı ve sürenin artmasıyla birlikte arttığını gözlemlemiş ve tabakanın kalınlığındaki artışın süreyle parabolik olarak değiştiğini tespit etmiştir [55]. Buradaki çalışmada hem sıcaklığın hem de sürenin borlama üzerine etkisinin olduğu gözlemlendi, sürenin ve sıcaklığın artmasıyla birlikte borür tabaka kalınlığında artış olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra borlama tozunun partikül boyutunun azalmasıyla birlikte borür tabaka kalınlığında artış da gözlemlenmiştir. 4 saat sürede 950°C sıcaklıkta yapılan borlama işlemlerine bakıldığında en düşük tabaka kalınlığının %85B<sub>4</sub>C+%15Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> toz karışımı ile yapılan borlama sonucunda elde edilmiştir. En düşük borür tabaka kalınlığına sahip olmamıza rağmen; bu karışımın kullanılmasıyla Ekabor tozunun içerisinde var olan zararlı flor gazı olmadığından çevreye yararlı borlama işlemi gerçekleştirilmiş oldu.

Ayrıca, numunelerin SEM fotoğrafları çekilmiş ve borür tabakalarının varlığına rastlanılmıştır. Oluşan borür tabakasının yapısının testere dişi şeklinde olduğu görülmekte ve FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakaları kontrast farkından ayırt edilmektedir. Literatür taramalarından da bilindiği üzere, matris malzemenin üst kısmında Fe<sub>2</sub>B tabakası yer alır ve bu tabakanın üzerinde de FeB tabakası yer almaktadır. FeB tabakasının bor konsantrasyonu Fe<sub>2</sub>B tabakasının bor konsantrasyonuna göre daha yüksektir. Ayrıca, borlama olayı sonucunda elde edilen tabakalar arasında herhangi bir ayrılmanın

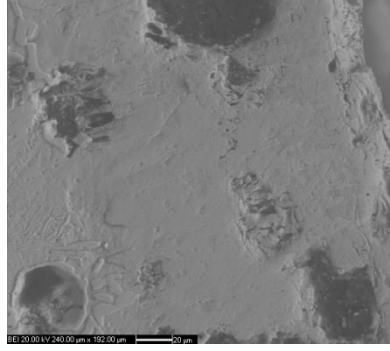
varlığına da rastlanılmamıştır. Bu durumda GGG40.3 matris üzerine yapılan borlama işleminden olumlu sonuç alındığını görmekteyiz.



a



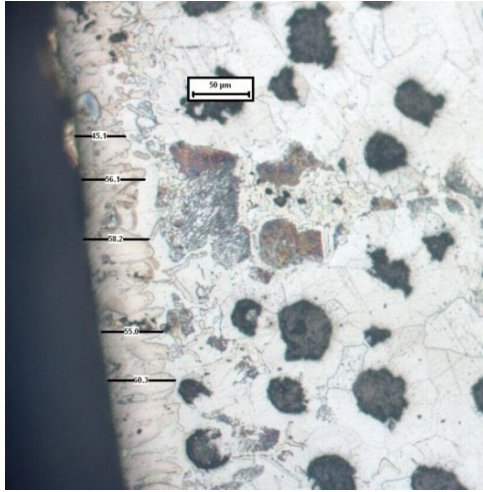
b



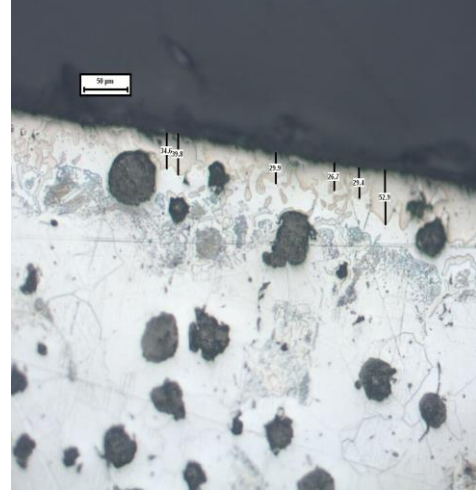
c

Şekil 6.18 a) 950°C Ekabor I, 1 saat(520x) b) 950°C Ekabor I, 2 saat(500x) c) 950°C Ekabor II 4 saat (500x) borlanmış numunelerin geri saçılımlı elektronlarla çekilmiş elektron mikroskobu görüntüleri

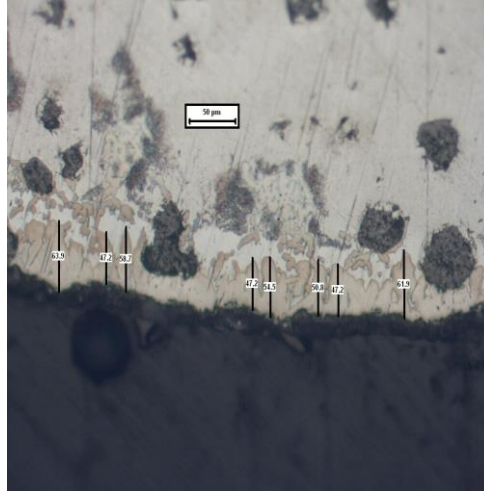
950 °C sıcaklıkta 4 saat sürede %85B<sub>4</sub>C+%15Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> toz karışımı ile yapılan kutu borlama işleminin optik mikroskop görüntüleri aşağıda verilmiştir.



a



b



c

Şekil 6.19 950 °C, 4 saat %85B<sub>4</sub>C+%15Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> kutu borlama işlemi a) ilk toz karışımı b) 1 kez kullanılmış toz karışımı c) 2.kez kullanılmış toz karışımı optik mikroskop görüntüleri

Yukarıda şekildeki görüntülere bakıldığında, elde edilen borür tabakanın morfolojisinin Ekabor tozları ile yapılan borlama işlemi sonucu elde edilen borür tabakalarına göre farklı olduğu görülmektedir.

#### 6.4 Borlama Sonrası Elde Edilen Borür Tabakalarının Mikrosertlik Ölçümleri

Deney numunelerinin sertlik değerleri Vickers mikrosertlik ölçme yöntemi ile 50 gr. ( $HV_{0,05}$ ) yük altında 10 sn sürede yapılmıştır ve elde edilen değerler aşağıda çizelge halinde verilmiştir.

Çizelge 6.5 Mikrosertlik değerleri

Borlama Sıcaklığı (°C)	Toz	Borlama Süresi (saat)	Mikrosertlik Değerleri ( $HV_{0,05}$ )
850	Ekabor I	1	1173
		2	1271
		4	1503
900	Ekabor I	1	1210
		2	1297
		4	1792
950	Ekabor I	1	1392
		2	1560
		4	1820
	Ekabor II	4	1600
	%85B <sub>4</sub> C+%15Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	4	1377

Demirel ve Çetin 2012 yılında alaşımsız ve düşük karbonlu GS60 çeliği numunelerini 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerde (Ekabor II+%15 ferrosilisyum) toz karışımı ile kutu borlama işlemine tabi tutmuşlardır ve borlama süresi ve sıcaklığın artışıyla birlikte borür tabaka kalınlığının ve sertliğinin de arttığını ve en yüksek sertlik değerinin 950 °C' de 8 saat sürede yapılan borlama işlemi sonucunda 2100 HV olduğunu bulmuşlardır [50]. Buradaki çalışmanın sonuçlarına bakıldığında da borlama süresi ve sıcaklığının artmasına bağlı olarak sertlik değerinde de artış olduğu gözlemlenmiştir.

## 6.5 Borlama Sonrası Elde Edilen Borür Tabakalarının Kırılma Tokluğu Ölçümleri

Kırılma toklukları  $K_c = 0,016 (E/Hv)^{1/2} P/c^{3/2}$  formülden yola çıkılarak hesaplanmış ve E değeri  $28400 \text{ kg/mm}^2$  olarak alınmıştır. Kırılma tokluğunun hesabında 150 ve 200 gr'lık yükler kullanılmıştır ve elde edilen değerler Çizelge 6.5' de verilmiştir. Şekil 6.17' da sertlik izinin ölçümüne ait örnek bir resim verilmiştir.



Şekil 6. 20 Borür tabakası üzerinde kırılma tokluğu hesabı için çatlak boyunun ölçümü

Çizelge 6.6 Kırılma tokluğu değerleri

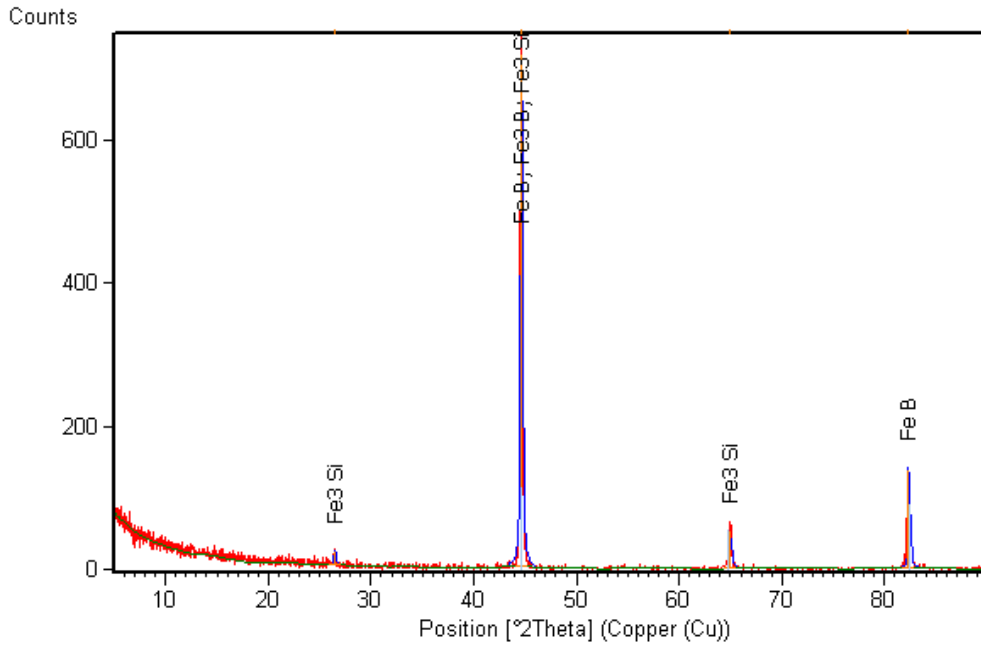
Borlama Sıcaklığı (°C)	Toz	Borlama Süresi (saat)	Kırılma Tokluğu Değeri (MPa <sup>1/2</sup> )
950	Ekabor I	1	3,78
		2	3,16
		4	2,79
	Ekabor II	4	2,98

Kırılma tokluğunu, borlama süresi ve sıcaklığı etkilemektedir ve borlama süresi ve sıcaklığının artışıyla birlikte kırılma tokluğu değerlerinde azalma meydana geldiğini Şen ve arkadaşları 2005 yılında yaptıkları çalışmada belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada kırılma tokluğu değerinin  $2,19-4,54 \text{ MPa m}^{1/2}$  aralığında olduğunu tespit etmişlerdir [91]. Yaptığımız çalışmada borlama süresinin artmasıyla birlikte kırılma tokluğu

değerlerinde azalmanın meydana geldiğini ve 2,79-3,78 MPa m<sup>1/2</sup> aralığında olduğunu tespit ettik. Literatür taramalarıyla elde edilen sonuçlarımız uyumludur.

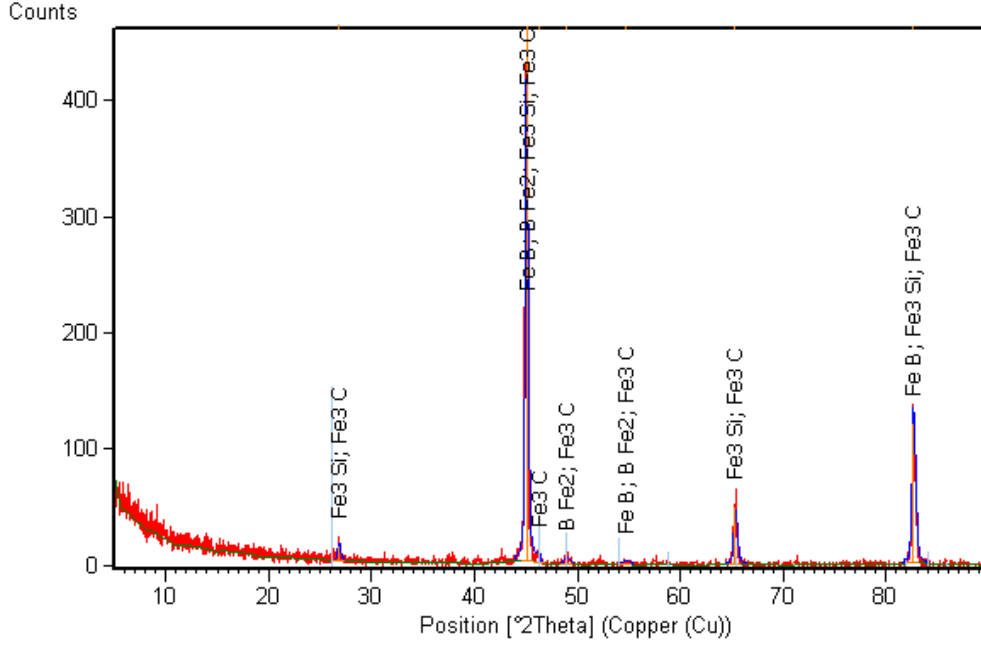
## 6.6 Borlanmış Numunelerin XRD Analizleri

Borlama işlemi görmüş numunelerin yüzeyindeki faz analizi için X-Ray ışınlarına tabi tutuldular ve bu faz analizi X-Ray difraktometre (XRD) cihazı kullanılarak yapılmıştır. XRD paternleri Şekil 6.18 ve 6.19' de verilmiştir.



Şekil 6.21 950°C' de 1 saat Ekabor I tozu ile borlanmış numunenin XRD analizi





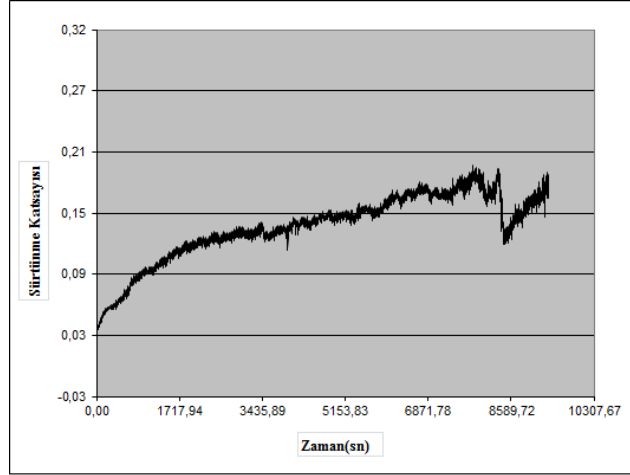
Şekil 6.22 950°C’ de 4 saat Ekabor I tozu ile borlanmış numunenin XRD analizi

Literatür taramalarında matriste oluşan temel borür fazlarının FeB, Fe<sub>2</sub>B veya her iki fazı da ihtiva eden borür tabakalarının oluşabildiği ve hatta bunların yanı sıra alaşım elementlerinin de bor ile çeşitli fazlar oluşturabildiği hatta ‘Fe’ ile farklı borür fazlarının da oluşabildiği tespit edilmiştir. Yukarıdaki XRD paternlerine bakıldığında FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının varlığı tespit edilmiştir. Bu fazların yanı sıra Fe<sub>3</sub>B fazının varlığına rastlanılmıştır. Fe<sub>3</sub>B fazının varlığını şu şekilde açıklayabiliriz: Karbon borür tabakasında önemli ölçüde çözünmez ve borür tabakasına difüze olmaz. Borlama esnasında borür tabakasından matrikse hareket eder, Fe<sub>2</sub>B ve matris arasında ayrı bir tabaka olarak boronementit Fe<sub>3</sub>(B,C) (veya çoğunlukla Fe-%0,08C çeliği olması durumunda Fe<sub>3</sub>(B<sub>0.67</sub>C<sub>0.33</sub>)) oluşmaktadır [26].

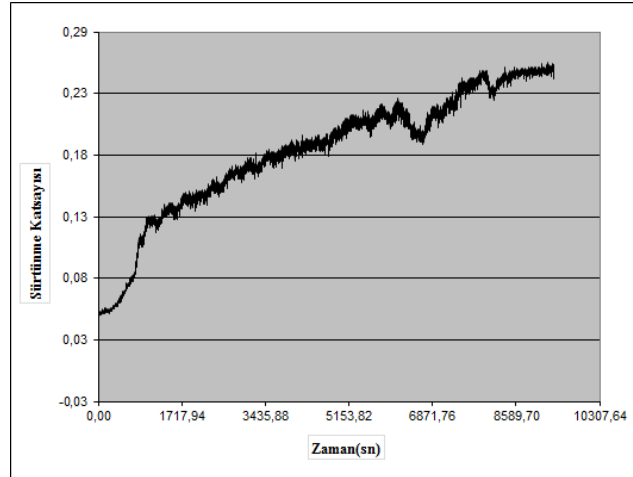
## 6.7 Borlanmış Numunelerin Sürtünme Katsayılarının Hesaplanması

Borlama işleminin aşınma dayanımını arttırdığını literatür taramalarında görmekteyiz. Çalışmamızda da bu literatür bilgisinin ışığı altında ilerleyerek numunelerimizin tribolojik özelliklerini incelemek için bilya–disk aşınma cihazı kullanarak, zamana bağlı sürtünme katsayısı grafiği elde edilmiştir. Numuneler oda sıcaklığında (25°C) 30 N yük altında 1000 m yol katettirilerek aşınma işlemine tabi tutulmuştur. Aşındırma işleminde

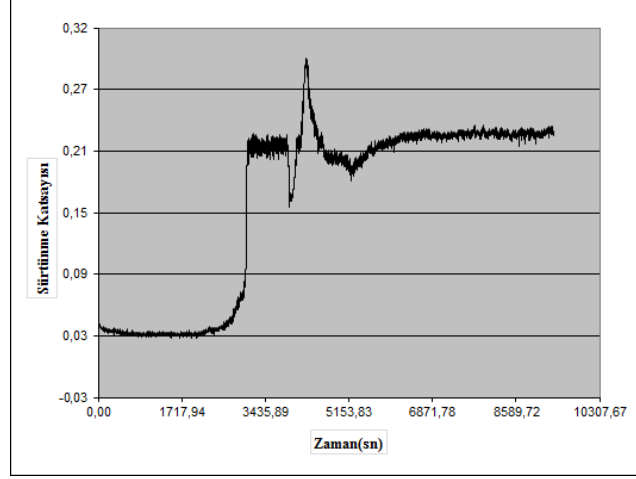
6 mm çapında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bilya kullanılmıştır. Aşındırma işlemi sonrasında numunelerin ağırlıkları 10<sup>-4</sup> hassasiyetli terazi ile tartılmıştır ve ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Numunelerin sürtünme katsayısı-zaman grafikleri verilmiş ve aşınma hızları hesaplanmıştır.



şekil 6.23 950 °C' de Ek I, 1 saat borlanmış numunenin sürtünme katsayısı-zaman grafiği

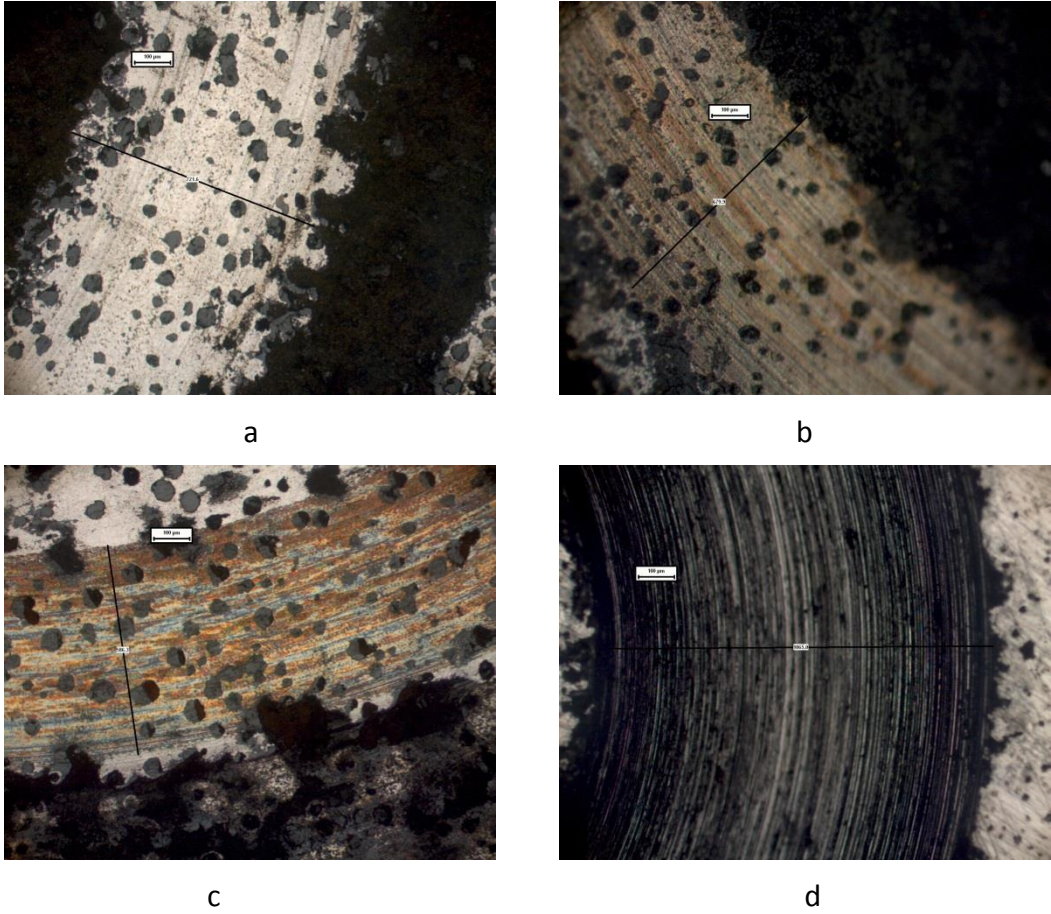


şekil 6.24 950 °C' de Ek I, 4 saat borlanmış numunenin sürtünme katsayısı-zaman grafiği

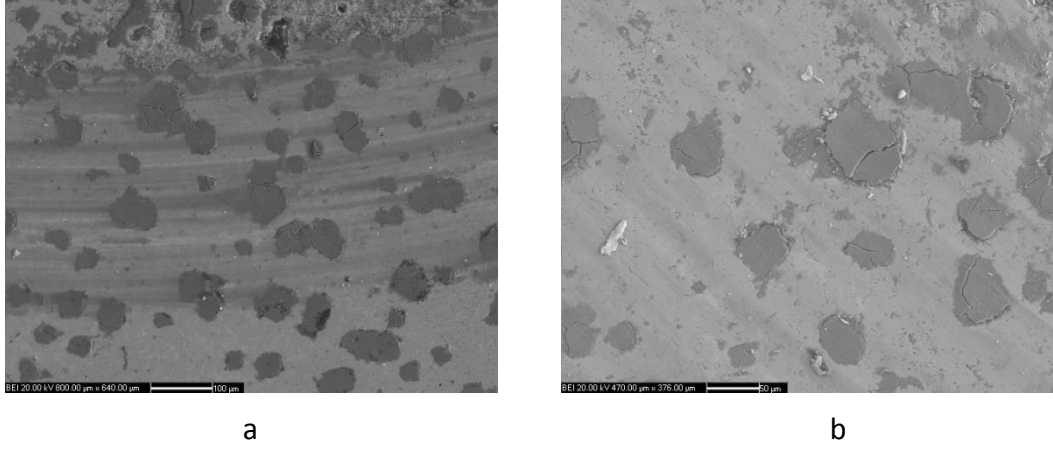


Şekil 6.25 GGG40.3 deney numunesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği

Aşınma sonrasında numunelerin hem optik mikroskop hem de elektron mikroskobu görüntüleri alınmış ve 1000 m kayma mesafesinde aşınmanın gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 6.26 a) 950°C Ek I, 1saat (100x) b) 950°C Ek I, 2 saat (100x) c) 950°C Ek I, 4 saat (100x) d) GGG40.3(100x) numunelerinin aşınma izi optik mikroskop görüntüleri



Şekil 6.27 a) 950°C Ek I, 2 saat (150x) b) 950°C Ek II, 4 saat (250x) aşınma izlerinin SEM görüntüleri

Aşınma sonrasında elde edilen ağırlık kaybı değerleri, aşınma hızları ve derinliği, ortalama sürtünme katsayısı değerleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 6.7 Numunelerin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, sürtünme katsayısı, aşınma derinliği ve hızı değerleri

Numune	İlk ağırlık (g)	Son ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (mg)	Max. sürtünme katsayısı ( $\mu$ )	Ort. sürtünme katsayısı ( $\mu$ )	Aşınma hızı ( $\text{mm}^3/\text{m}$ )	Aşınma derinliği (mm)
GGG40.3	31,9434	31,8954	48,9	0,29	0,16	0,204	0,0478
950°C Ekabor I, 1 saat	31,3427	31,3407	2	0,19	0,13	0,114	0,0167
950°C Ekabor I, 2 saat	19,8618	19,8608	1	-	-	0,0465	0,0193
950°C Ekabor I, 4 saat	28,9770	28,9748	2,2	0,26	0,18	0,106	0,0143
950°C Ekabor II, 4saat	18,8829	18,8824	0,5	-	-	0,1576	0,0298

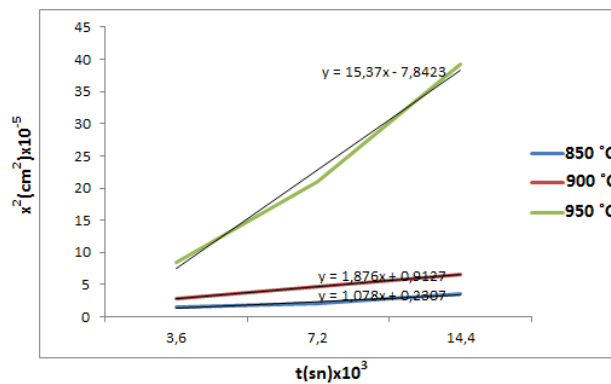
Topuz' un 2010 yılında DIN 1.2080 çeliğine borlama işlemi uygulamıştır. Borlama öncesinde bu çeliğin sürtünme katsayısının 0,55 iken, borlama sonrasında 0,3 olduğunu bulmuştur. Borlanmış numune ile borlanmamış numune arasında çok yüksek bir sürtünme katsayısı farkının olduğunu bulmuştur [22].

Çalışmamızda en fazla ağırlık kaybının borlanmamış numunede olduğunu görmekteyiz. Ekabor I ile 950°C' de 1 saat süre ile yapılan borlama işlemi sonrasında elde edilen sürtünme katsayısı değerinin, 4 saat sürede yapılanı göre sürtünme katsayısı değerinin daha düşük ve bunun yanı sıra ağırlık kaybının da daha az (0,2 mg) olduğu gözlemlenmiştir. 2006 yılında yapılan çalışmada 1000°C' de yapılan deneylerde aşınma direncinde önce artma, 9 saat borlama sonrasında azalma meydana gelmiştir ve bunun nedeni; FeB oluşumunun başlamasından kaynaklandığını söylemişlerdir [94].

## 6.8 Borür Tabakalarının Büyüme Kinetiği

Literatür kısmında anlatıldığı gibi, borür tabakalarının büyüme kinetiğinin hesaplanmasında  $x^2=K.t$  formülü ışığında  $K=K_0.e^{(-Q/RT)}$  denkleminde faydalanılmaktadır.

GGG40.3 malzemesinin her sıcaklık için tabaka büyüme oran sabitleri ve aktivasyon enerjisi bulunmuştur. Üç farklı sıcaklık ve sürede borlama sonucu elde edilen borür tabaka kalınlıklarının kareleri ile zamana bağlı grafikleri çizilmiş ve bu çizgilerin eğimlerinden de her sıcaklık için tabaka büyüme oran sabitleri (K) bulunmuştur.



Şekil 6.28 Borlama işlemine tabi tutulmuş GGG40.3 dökme demirin  $x^2$ -t grafiği

Her sıcaklık için tabaka büyüme oran sabitleri aşağıda verilmiştir.

$$K_{850^{\circ}\text{C}} = 1,078 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sn}$$

$$K_{900^{\circ}\text{C}} = 1,876 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sn}$$

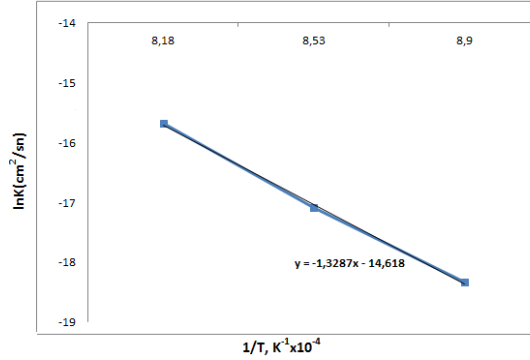
$$K_{950^{\circ}\text{C}} = 1,537 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$$

Tabaka büyüme oran sabitlerinin bulunmasının ardından bu sabitlerin ln'leri alınıp, 1/°K cinsinden sıcaklığa bağlı grafiği çizilip, geçen çizginin eğiminden Q/R değeri ve ordinatın kesim noktasından 'K<sub>0</sub>' sabitinin değeri hesaplanmıştır.

$$\ln K_{850^{\circ}\text{C}} = -18,345573 \text{ cm}^2/\text{sn}$$

$$\ln K_{900^{\circ}\text{C}} = -17,791538 \text{ cm}^2/\text{sn}$$

$$\ln K_{950^{\circ}\text{C}} = -15,688263 \text{ cm}^2/\text{sn}$$



Şekil 6.29 Borlama işlemine tabi tutulmuş GGG40.3 dökme demirin lnK-1/T grafiği

Borür tabakası büyüme aktivasyon enerjisi(Q) değerinin belirlenmesinde lnK-1/T grafiğinden faydalanılmıştır. Bu grafiğin eğimi (Q/R) değerini vermekte olup, Q değeri 110.562 kJ/mol olarak bulunmuştur. Ayrıca grafiğin ordinatı kestiği nokta lnK<sub>0</sub> değerini verdiği için buradan Ko değeri  $4,48 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sn}$  olarak bulunmuştur.

## BÖLÜM 7

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmamızda GGG40.3 küresel grafitli dökme demir malzememize kutu borlama işlemi başarıyla uygulanabilmiştir.

Optik mikroskop, SEM ve XRD paternlerinden FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının var olduğunu tespit ettik ve borür tabakasının testere dişi şeklinde bir morfolojiye sahip olduğu ve ayrıca elde edilen mikroyapı fotoğrafları ve SEM görüntülerinde iki tabaka arasında ayrılma gibi bir problemin olmadığı görülmüştür.

Sıcaklığın ve sürenin borlama üzerine etkisinin olduğu tespit edilmiş ve hem sıcaklığın hem de sürenin artmasının borlama tabakasının kalınlığını ve sertlik değerlerini arttırdığı sonucuna varılmıştır. Bunun yanı sıra, borlama için kullanılan toz boyutunun da borlama üzerine etkisinin olduğu ve toz boyutunun küçülmesiyle birlikte difüzyonun kolaylaşmasından dolayı borür tabakanın kalınlığının ve sertliğinin daha yüksek değerlerde olduğu bulunmuştur. Ortalama borür tabaka kalınlığı değerleri 38-198 µm, mikrosertlik değerlerinin 1173-1820 HV<sub>0,05</sub> aralığında bulunmuştur.

Kırılma tokluğu değerlerinin 2,79-3,78 MPa m<sup>1/2</sup> aralığında olduğu ve sürenin artmasıyla birlikte kırılma tokluğu değerlerinde azalmanın meydana geldiği tespit edilmiştir.

Aşınma deneyleri sonucunda, borlama sonucunda oluşan ağırlık kaybının oldukça azaldığı görülmüş ve sürtünme katsayısının da azaldığı tespit edilmiştir. Yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısı malzemenin aşınma direncini artırır. Elde edilen değerler

neticesinde yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısı değerlerinin literatürle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Tabaka büyüme oran sabiti değerlerinin  $1,078 \times 10^{-8}$ - $1,537 \times 10^{-7}$  cm<sup>2</sup>/sn aralığında, aktivasyon enerjisi (Q) nin 110.562 kJ/mol ve K<sub>0</sub> değerinin  $4,48 \times 10^{-7}$  cm<sup>2</sup>/sn olduğu bulunmuştur.

Borlama işleminde Ekabor ticari toz karışımları kullanılmıştır. Bu toz karışımı içerisinde çevreye zararlı olan flor gazı bulunmaktadır. Bu gazın olumsuz etkisini ortadan kaldırmak için Ekabor tozu yerine %85B<sub>4</sub>C+%15Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> toz karışımı kullanılarak borlama işlemi yapılmış ve olumlu sonuç alınmıştır. Bu toz karışımı hiç değiştirilmeden 5 kez borlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

%85B<sub>4</sub>C+%15Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> toz karışımının kullanılmasıyla Ekabor içerisinde var olan KBF<sub>4</sub>' den kaynaklı flor gazının çevreye olumsuz etkisi tolere edilerek yararlı bir işlem yapılmıştır.

Borlama işlemlerinde kullanılan kutu borlama tekniği yerine daha verimli bir yöntem olan akışkan yatakta borlama işlemi uygulanabilir. Ayrıca cam kalıpları yüksek sıcaklıktaki sıvı camla temas halinde olduklarından metal-cam arayüzeyinden cama demir geçişleri olabileceğinden bunun incelemesi yapılarak borlama işleminin etkisinin en iyi hangi optimum değerlerde olabileceği üzerine araştırma yapılabilir.

Elde edilen sonuçlar laboratuvar ölçeğinde yapılmıştır. Bu çalışma cam kalıp malzemesine uygulanarak, sektörde kullanılıp, daha sonra çeşitli incelemeler yapılabilir. Örneğin, cam-metal yüzey teması sonucunda malzemedeki oksitlenme gerçekleşebilir ve bu oksit tabakası kırılarak yüzeyden ayrılabilir. Bu durum yüzey düzgünlüğünü bozarak belki de elde edilen cam ürünün kalitesini düşürebilir. Bunun üzerine bir araştırma yapılarak optimum şartlar belirlenebilir.

Isıl gerilmeler ve cama temas sonucu malzemedeki hasar oluşumları gerçekleşebilir ve belki de bu durum aşınma hızının artmasına neden olarak malzeme kaybının artması olayı gerçekleşebilir. Bununla ilgili bir çalışma yapılabilir.

Bu tez çalışmasında sonuç olarak; cam sektörü ülkemizde önemli bir sektördür ve bunun yanı sıra ülkemiz bor kaynakları bakımından iyi bir yer altı zenginliğine sahiptir. Hem cam sektöründe kullanılan kalıpların ömürleri uzatılarak ekonomik bir katkı



sağlamak, hem çevreye yararlı bir işlem yapmak hem de yer altı zenginliğimizi kullanarak ülkemize katkı sağlanmaya çalışılmıştır.

## KAYNAKLAR

---

- [1] TÜBİTAK Cam Sanayi Raporu, [http://www.tubitak.gov.tr/tubitak\\_content\\_files/vizyon2023/mm/Ek2d.pdf](http://www.tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/vizyon2023/mm/Ek2d.pdf) , 06.08.2013
- [2] Arısoy,C.F.,(2005). Borlama ve Nitrokarbürleme Yüzey İşlemlerinin Cam Ambalaj Üretiminde Kullanılan Dökme Demir Kalıpların Performansına Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [3] Güneş, İ. ve Taktak, Ş., (2012). “Kutu ve plazma pasta borlanmış 21NiCrMo2 çeliğinin yüzey karakterizasyonu”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27(1):99-108.
- [4] Kayalı, Y., Güneş, İ. ve Ulu, S., (2012). “Diffusion kinetics of borided AISI 52100 and AISI 440C steels”, Vacuum, 86:1428-1434
- [5] Azaklı, Y., Tarakçı, M., Gençer, Y. ve Çalık, A.,(2012). “Fe-8Mo ikili alaşımının kutu borlama yöntemiyle kaplanması”, International Iron and Steel Symposium, 02-04 Nisan 2012, Karabük
- [6] Kuşçuluoğlu, S., Yücesoy, D. ve Engin, S.,(1993). Cam Teknolojisine Giriş , II. Cilt, Eğitim Müdürlüğü Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş., İstanbul
- [7] Soykut, A.Y.,(2007). Cam Şekillendirme Makinalarındaki Aşınan Parçalara Uygulanan Yüzey İşlemlerinin Performansa Etkileri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [8] Ensor, T. F., (1990). “Mould Materials”, Glass Technology, 31: 85-88
- [9] Kuşçuluoğlu, S., Yücesoy, D. ve Engin. S., (1993). Cam Teknolojisine Giriş I. Cilt, Eğitim Müdürlüğü Türkiye Şişe ve Cam A.Ş., İstanbul
- [10] Erinç, N., (1986). Cam kalıp malzemeleri (dökme demirler), Araştırma Müdürlüğü Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş.
- [11] Brauns, E. ve Paty, J., (1999). “Finite Element Calculation Of Thermomechanical Componenets For Press And Blow Moulds”, Glass Technology, 40:58-64
- [12] Ensor, T.F., (1978). “Mould Materials”, Glass Technology, 19:113-119
- [13] Anwar, Y., A Study On Thermal Cracking Of Cast Iron, Pakistan Engineering Congress, 70th Annual Session Proceedings

- [14] Refaey ,A. ve Fatahalla, N., (2003). "Effect Of Microstructure On Properties Of ADI And Low Alloyed Ductile Iron", Journal of Materials Science, 38:351–362
- [15] Çalık, A. ve Özsoy, A.(2004). "Isıl Çevrimli Borlama İşleminin SAE 1030 ve SAE1050 Çeliklerine Etkileri", II. Uluslararası Bor Sempozyumu, 23-25 Eylül 2004 Eskişehir, Türkiye
- [16] Manns, P., Döll, W. ve Kleer, G. (1995). "Glass in Contact With Mould Materials For Container Production", Glass Science an Technology Glastechnische Berichte, 68:389-399
- [17] Ünlü, B.S., ( 2004). Kaymalı yataklarda tribolojik özelliklerin ve borlanmış demir esaslı malzemelerin yatak olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi, Doktora Tezi, CBÜ Fen bilimleri Enstitüsü, Manisa
- [18] Wang M.Y., Chang H.Y., (2004). "Experimental Study Of Surface Roughness İn Slot End Milling", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44: 51–57.
- [19] Taktak, Ş., (2007). "Some Mechanical Properties Of Borided AISI H13 And 304 Steels", Materials and Design, 28:1836–1843
- [20] Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, [www.boren.gov.tr](http://www.boren.gov.tr) , 23.03.2013 20:10
- [21] Aydın, A.O., Gülensoy, H., Akıcıoğlu, A. ve Sakarya, A.(2003). "Kolemanitlerdeki Arseniğin Borik Asit ve Boraks Üretimine Etkisi", BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Balıkesir, 5(1):51-58
- [22] Topuz, P.,(2010). Akışkan Yataklı Fırında Farklı Çeliklerin Borlanması ve Borlama Parametrelerinin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [23] Döngel, A., (2008). Bor temperlenmiş küresel grafitli dökme demirin yüksek sıcaklık aşınma davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon
- [24] Uzun, H.A., (2002). Borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta
- [25] Kayalı, Y., Güneş, İ. ve Ulu, S., (2012). "Diffusion Kinetics Of Borided AISI 52100 and AISI 440C Steels", Vacuum, 86:1428-1434
- [26] Sinha A.K., (1991), Boriding (Boronizing) ASM handbook. Journal of Heat Treating, 4:437e47 [OH, USA]
- [27] Çalık, A., Şahin, O. ve Uçar, N., (2009). "Mechanical Properties Of Boronized AISI 316, AISI 1040, AISI 1045, and AISI 4140 Steels", Acta Physica Polonica A, 115: 694 – 698.
- [28] Soegijono, S. ve Soegijono, B., (2012). "The Hardness Of Boride Layer On The S45C Iron (A Preliminary Study On Surface Hardening Of Ferrous Material)", Aceh International Journal of Science and Technology, 1(2): 47-50

- [29] Bindal, C ve Ucisik, A.H., (2008). "Characterization Of Boriding Of 0.3% C, 0.02% Plain Carbon Steel", Vacuum, 82: 90-94.
- [30] Başman, G.,(2010). AISI 316 L Tipi Paslanmaz Çeliğin Termokimyasal Difüzyon Yöntemi İle Borlanmasında, Borlama Banyosu Bileşenlerinin Borür Tabakası Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [31] Martini, C. ve Palombarini, G., (2004). "Mechanism Of Thermochemical Growth Of Iron Borides On Iron". Journal of Material Science, 39: 933-937.
- [32] Özdemira, O., Ustab, M., Bindala, C. ve Hikmet, A. (2006). "Hard Iron Boride (Fe<sub>2</sub>B) On 99.97wt% Pure Iron", Vacuum, 80: 1391-1395.
- [33] Sarıca. B., (2005). Farklı Kalite Çeliklere Uygulanan Yüzey Kaplama İşlemlerinin Aşınma Davranışlarına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [34] Uluköy, A. ve Can, A.Ç.,(2006). "Çeliklerin Borlanması", Journal of Engineering Sciences, 12(2):189-198
- [35] Delikanlı, K., Çalık, A. ve Uzun, H.A., (2003). "Sade Karbonlu Bir Çeligin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi", BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5(1):99-110
- [36] Özer, M., (2011). Üç Farklı Çeliğe Katı Borlama İşlemi Yapılmasının İçyapı ve Sertlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir
- [37] Çarkçı, M., (2012). Saf Nikelin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta
- [38] Özmen, T.,(2007). Katı Ortamda Borlanmış DDK 60 Dökme Demirin Borür Tabakası Büyüme Kinetiği ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir
- [39] Massalski, Th. B., (1986). 'Binary Alloy Phase Diagrams', ASM, Metals Park, Ohio
- [40] Özsoy, A.,(1991). Çeliğin Borlanmasında Borür Tabakası, Geçiş Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir
- [41] Çarboğa, C., (2010). Düşük Karbonlu Çeliklere Bor İlavesinin Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- [42] Tabur, M., (2008). Bor Karbür Kaplanmış AISI 8620 ve Hardox 400 Çeliklerinin Abrasiv Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- [43] Alparslan E., (2011). Tekstil Endüstrisinde Borlama Uygulamaları, Yüksek lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta

- [44] Buytoz, S. ve Somunkıran, I., (2005). "Borla Kaplanan Yüzeyin Mikroyapı ve Mekaniksel Özellikleri", Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2(4):41 – 45
- [45] Nişli, G.,(2011). Bortemperlenmiş AISI 1040 Çeliğinin Yüzey Özelliklerinin ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon
- [46] Yapar, U., (2003). Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama ile Yüzey Özelliklerinin Gelistirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [47] Şahintürk, Y., (2011). Fe-Si İkili Alaşımlarında Artan Silisyum Miktarının Borlanma Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze
- [48] Akbayır, Ö., (2005). Katı Ortamda Borlanmış AISI 1030 Çeliğinde İşlem Parametrelerinin Yüzey ve Aşınma Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir
- [49] Fichtl, W., Trausner, N. ve Matuschka, A.G., (1988). "Boronizing with Ekabor", ESK GmbH.
- [50] Demirel, Ç. ve Çetin, M., (2012). "GS 60 Çeliğinin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi", International Iron & Steel Symposium, 02-04 April 2012, Karabük
- [51] Mollaoğlu, H., Topuz, A. ve Yalman, Y. O., (2004). "Kutu Borlama Tekniği ile X210Cr12, 8620 Çelikleri ve KGDD'nin Termokimyasal Borlaması", 10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi, Denizli, 319-324.
- [52] Bayça, S.U. ve Şahin, S., (2004). "Borlama", Mühendis ve Makine, 533
- [53] Şimsek, M., (2005). İçten Yanmalı Motorlarda Borlama ile Mukavemet Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta
- [54] Barış, M., (2007). Farklı Borlama Sürelerinin Transmisyon Çeliğinde Abrasiv Aşınma Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- [55] Taştan, F., (2010). Farklı Bileşimlere Sahip Çeliklerin Borlama İşlemi İle Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa
- [56] Evcin, A., (2006). Kaplama Teknikleri Ders Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar
- [57] Develi, F., (2010). Plazma Nitrüleme ve Borlama ile Çift Yüzey İşlem Uygulanmış AISI 8620 Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar
- [58] Filepa, E. ve Farkas, S.(2005). "Kinetics of Plasma-Assisted Boriding" Surface & Coatings Technology, 199:1–6

- [59] Kage, H., Abe, R., Hattanda, R., Zhou, T., Ogura, H. ve Matsuno, Y., (2003). "Effect Of Solid Circulation Rate On Coating Efficiency And Agglomeration In Circulating Fluidized Bed Type Coater", Powder Technology, 130: 203-210
- [60] Anthymidis, K.G., Maragoudakis, N., Stergioudis, G., Haidar, O. ve Tsipas, D.N., (2003). "A Comparative Study Of Boride Coatings Obtained By Pack Cementation Method And By Fluidized Bed Technology", Materials Letters, 57:2399-2403
- [61] Akışkan yataklı kazanların çalışma prensibi, <http://www.santraltanitimgrubu.org/?can=sayfam&hid=53>, 02/07/2013 20:30
- [62] Akışkan yataklı fırınlar, <http://www.emremakina.com.tr/akiskan.htm>, 02/07/2013 20:30
- [63] Reynoldson, R.W., (1993), Heat Treatment in Fluidized Bed Furnaces, Materials Park, [OH, USA]
- [64] Campos, I., Ramirez,G., Figueroa, U., Martinez, J. ve Morales, O.(2007). "Boriding of Nickel in a Fluidized Bed Reactor", Applied Surface Science, 253:3469-3475
- [65] Uluköy, A., (2005). 21NiCrMo2(AISI 8620) Çeliğinden Yapılmış Dişli Çarklara Karbürleme ile Beraber Borlama İşleminin Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale
- [66] Pazarlıoğlu, S.S., (2006). Çeliklerin Niobyum Borür Kaplanması ve Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- [67] Çalık, A., 2005. Borlama ve Endüstriyel Uygulama Alanları. I. Ulusal Bor Çalıştayı Bildiriler Kitabı Ankara
- [68] Çelebi, G.F., (2005). 31CrMoV9 ve 34CrAlNi7 Çeliklerinin Borlama Kinetiklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- [69] Küper,A., X. Qiao, Stock, H.R. ve Mayr, P., (2000). "A Novel Approach to Gas Boronizing", Surface and Coatings Technology, 130:87-94
- [70] Uslu I. , Comert H. , Ipek M., Ozdemir O. ve Bindal C., (2007). "Evaluation Of Borides Formed On AISI P20 Steel", Materials & Design, 28:55-61
- [71] Ünal, R., (2008). Atomsal Yayınım, Malzeme Bilgisi Ders Notları
- [72] Difüzyon, <http://home.uludag.edu.tr/users/mumintutar/inegol/13.pdf>, 06/06/2013 20:00
- [73] Flynn G.L., Yalkowsky S.H. ve Rosemani T.J.,(1974). "Mass Transport Phenomena and Models:Theoretical Concepts", Journal of Pharmaceutical Sciences, 63:479-510
- [74] Thelning, K.E., (1975). "Steel and its Heat Treatment: Bofors Handbook", Butterworths
- [75] Difüzyon, <http://home.iitk.ac.in/~anandh/AML120/Diffusion.ppt>, 06/06/2013 23:00

- [76] Şen, U.,(1998). Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Borlanması, Doktora Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [77] Efe, G.Ç., Ipek,M., Özbek, I. ve Bindal.C.,(2008). “Kinetics of Borided 31CrMoV9 and 34CrAlNi7 Steels” Materials Characterization, 59:23–31
- [78] Ozdemir, O., Omar, M.A., Usta, M., Zeytin, S., Bindal, C. ve Ucisik, A.H., (2009). “An Investigation on Boriding Kinetics of AISI 316 Stainless Steel” Vacuum 83:175–179
- [79] Şen,U., (2004). “Kinetics of Titanium Nitride Coatings Deposited by Thermo-Reactive Deposition Technique” Vacuum, 75:339–345
- [80] ASM Handbook (2000), Vol 8: Mechanical Testing and Evaluation, Materials Park, OH:ASM International
- [81] Aşınma, <http://www.istanbul.edu.tr/eng/metalurji/duy/lab/lab2.pdf>, 06.06.2013
- [82] Gürkan, M., (2007). Östenitik ve Martensitik Paslanmaz Çeliklerin Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar
- [83] Ülker, S., (2006). Puls Plazma Nitrüleme Cihazı Tasarımı ve AISI 52100 Çeliğin Plazma Nitrülenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar
- [84] Döngel, A., (2008). Bortemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışının İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar
- [85] Günes, İ., (2006). Plazma Nitrüleme İle Çelikler Üzerinde Kompleks Kaplamaların Oluşturulması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar
- [86] Kayalı, E.S., Eruslu, N., Ürgen, M., Taptık, Y., ve Çimenoğlu,H., (1997). Hasar Analizi Seminer Notları, 07-11 Nisan 1997, İstanbul
- [87] Stachowiak, G.W. ve Batchelor, A.W., (2001). Engineering Tribology, Butterworth Heinemann, Australia
- [88] Yıldızlı, K., Odabas D. ve Nair, F., (2003). Borlanmış AISI 1020 Çeliğinin Erozif Aşınma Davranışının İncelenmesi, BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Balıkesir, 5(1):130-140
- [89] Geoeuriot, P., Thevenot, F., Driver, J.H. ve Magnin, T., (1983). “Methods For Examining Brittle Layers Obtained By A Boriding Surface Treatment (Borudif)”, Wear, 86:1-10
- [90] Soydan, Y., (1996). Katı Ortamda Bor Yayınımı ile Sertleştirilen Çelik Yüzeylerinin Kuru Kayma Halinde Sürtünme ve Aşınma Davranışları, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [91] Şen, U., Şen, S., Köksal, S. ve Yılmaz, F., (2005). “Fracture Toughness Of Borides Formed On Boronized Ductile Iron”, Materials and Design, 26:175-179

- [92] Ersöz, A. Arısoy, C.F., Başman, G. ve Şeşen, M.K., (2008). "AISI4140 Makine Yapım Çeliğinin Elektrokimyasal Borlama İle Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin Geliştirilmesi", 12. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, Pamukkale
- [93] Yu, L.G., Khor, K.A. ve Sundararajan, G., (2006). "Boride Layer Growth Kinetics During Boriding of Molybdenum by The Spark Plasma Sintering (SPS) Technology", Surface & Coatings Technology, 201:2849–2853
- [94] Çelikyürek, İ., (2006). Demir Aluminatların Borlanması ve Aşınma Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir



## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** :Fatma ÜNAL  
**Doğum Tarihi ve Yeri** :12.10.1987/Bafra  
**Yabancı Dili** :İngilizce  
**E-posta** :fatmaunal@hitit.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Malzeme Bilimi ve Mühendisliği	Afyon Kocatepe Üniversitesi	2010
Lise	Fen Bilimleri	YDA Bafra Lisesi	2005

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2010	Hitit Üniversitesi	Araştırma Görevlisi