

**TEL ÇEKME SANAYİNDE BORLAMANIN ENDÜSTRİYEL  
UYGULAMASI**

**Pamukkale Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

---

**Recep YURTSEVEN**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ali Rıza TARA KCILAR**

**Haziran, 2008  
DENİZLİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ ONAY FORMU**

Recep YURTSEVEN tarafından Yrd. Doç. Dr. Ali Rıza TARAKCILAR yönetiminde hazırlanan “**Tel Çekme Sanayinde Borlamanın Endüstriyel Uygulaması**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU  
Jüri Başkanı



Yrd. Doç. Dr. Mustafa BOZDEMİR  
Jüri Üyesi



Yrd. Doç. Dr. Ali Rıza TARAKCILAR  
Jüri Üyesi (Danışman)

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

**Prof. Dr. Mehmet Ali SARIGÖL**  
Müdür

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğini beyan ederim.

İmza :

Öğrenci Adı Soyadı : Recep YURTSEVEN

## TEŞEKKÜR

Bu konunun belirlenmesinde ve çalışmanın hazırlanmasında beni yönlendiren ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Ali Rıza TARAKCILAR' a teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmayı finanse eden Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine (PAÜBAP) (Proje No: 2007FBE008), numunelerin yapımında ve endüstriyel uygulamalarda destek sağlayan "Nexans Türkiye Endüstri ve Tic. A.Ő." Denizli Fabrikasında Teknik Müdür Makine Mühendisi Mustafa Dünder ve Makine Mühendisi Burhan Akşit' e ve borlama malzemelerini temini konusunda yardımcı olan "Vezneli A.Ő." ye de teşekkür ederim.

Özellikle bana hep moral ve güç veren, maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan aileme sabırlarından ötürü minnettirim.

## ÖZET

### TEL ÇEKME SANAYİNDE BORLAMANIN ENDÜSTRİYEL UYGULAMASI

Yurtseven, Recep  
Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği ABD  
Tez Yöneticisi: Yrd. Doç. Dr. Ali Rıza TARAKCILAR

Haziran 2008, 88 Sayfa

Borlama, özellikle yüksek yüzey sertliği ve aşınma dayanımı sağlayan termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Üstün özelliklerine rağmen, özellikle ülkemiz sanayisinde yeterince kullanılmamaktadır. Aşınma ile malzeme kayıplarının ciddi rakamlara ulaştığı bilinmektedir. Yapılan çalışmayla, borlama işlemi gerçek çalışma şartlarında denenmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir.

Çalışmamızda, tel çekme sanayinde kullanılan bir makine parçasının borlama ile aşınma dayanımının artırılabilirliği araştırılmıştır. Malzeme olarak bu tip çalışma şartlarında sık kullanılan X165CrMoV12, X210Cr12 ve 60WCrV7 takım çelikleri ile fiyatı daha ucuz, ancak borlama kabiliyeti yüksek sade karbonlu C20 çeliği kullanılmıştır. Malzemelere 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile Ekabor®2 borlama malzemesi ile katı ortamda borlama işlemi yapılmıştır.

Sonuç olarak, borlamanın uygun çalışma şartlarında kullanımı ile aşınma dayanımının artırılabilceği kanaatine varılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Borlama, Borlama Uygulamaları, Sertlik

Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU  
Yrd. Doç. Dr. Ali Rıza TARAKCILAR  
Yrd. Doç. Dr. Mustafa BOZDEMİR

**ABSTRACT****INDUSTRIAL APPLICATION OF BORIDING IN THE WIRE DRAWING  
INDUSTRY**

Yurtseven, Recep  
M. Sc. Thesis in Mechanical Engineering  
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ali Rıza TARAKCILAR

June 2008, 88 Pages

Boriding is a thermochemical surface hardening process that especially provides high surface hardness and wear resistance. In spite of paramount properties, especially in our country industry, boriding is not enough used. It is known that losing material reaches high level with wear. In this study, boriding process has been tested in genuine working conditions and the results have also been evaluated.

In our study, it has been researched capability of wear resistance increment of a machine part which is using in wire drawing industry with boriding process. As material, X165CrMoV12, X210Cr12 and 60WCrV7 tool steels that frequently used these working conditions have been used. It has been also used C20 carbon steel that is cheaper and has high boriding capability. Powder boriding process has been carried out to these materials by Ekabor<sup>®</sup>2 boriding powder at 950°C temperature by 6h durations.

As a result, it has been opined that abrasion resistance will be able to increase by using boriding process in favorable working conditions.

**Keywords:** Boriding, Applications of Boriding, Hardness

Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU  
Asst. Prof. Dr. Ali Rıza TARAKCILAR  
Asst. Prof. Dr. Mustafa BOZDEMİR

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ ONAY FORMU.....	i
BİLİMSEL ETİK SAYFASI.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
TABLOLAR DİZİNİ.....	xi
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	1
1.2. Bor Hakkında Genel Bilgi.....	3
1.2.1. Borun tanımı ve tarihçesi.....	3
1.2.2. Saf borun tabiattaki bulunuşu.....	5
1.2.3. Bazı bor ürünleri ve üretim yöntemleri.....	5
1.2.4. Bor'un kullanım alanları.....	7
1.2.5. Bor üretimi ve ekonomisi.....	10
1.3. Borlama.....	11
1.3.1. Borlanabilen malzemeler.....	12
1.3.2. Borlama yöntemleri.....	13
1.3.2.1. Katı ortamda borlama.....	13
1.3.2.2. Macunlama (pasta) ile borlama.....	15
1.3.2.3. Sıvı ortamda borlama.....	16
1.3.2.4. Gaz ortamda borlama.....	19
1.3.2.5. Plazma borlama.....	22
1.3.3. Borlu tabakanın yapısı ve bileşenleri.....	23
1.3.3.1. Borür tabakası.....	23
1.3.3.2. Geçiş bölgesi.....	27
1.3.4. Bor tabakası özellikleri.....	27
1.3.4.1. Bor tabakasının kalınlığı.....	27
1.3.4.2. Sertlik.....	28
1.3.4.3. Aşınma.....	29
1.3.4.4. Korozyon özellikleri.....	30
1.3.4.5. Bor tabakasının özelliklerine etki eden faktörler.....	31
1.3.4.6. Bor tabakasındaki artık gerilmeler.....	33
1.3.5. Borlanmış malzemelerin ısıl işlemleri.....	33
1.3.6. Borlama işleminin getirdikleri.....	34
2. LİTERATÜR BİLGİSİ VE BORLAMA İŞLEMİNİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMA ÖRNEKLERİ.....	37
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	44
3.1. Deney Parçasının Seçilmesi.....	44
3.2. Deney Parçası Malzemeleri.....	47
3.3. Borlama Deneyleri.....	48
3.4. Metalografik ve Mikrosertlik İncelemeleri İçin Hazırlıklar.....	52
3.5. Metalografik ve Mikrosertlik İncelemeleri.....	54

4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI.....	56
4.1. Metalografik İnceleme Sonuçları.....	56
4.1.1. 1 Numaralı malzemenin (X165CrMoV12) incelenmesi.....	56
4.1.2. 2 Numaralı malzemenin (X210Cr12) incelenmesi.....	57
4.1.3. 3 Numaralı malzemenin (60WCrV7) incelenmesi.....	58
4.1.4. 4 Numaralı malzemenin (C20) incelenmesi.....	59
4.2. Tabaka Kalınlıklarının İncelenmesi.....	60
4.2.1. 1 Numaralı malzemenin (X165CrMoV12) incelenmesi.....	60
4.2.2. 2 Numaralı malzemenin (X210Cr12) incelenmesi.....	61
4.2.3. 3 Numaralı malzemenin (60WCrV7) incelenmesi.....	62
4.2.4. 4 Numaralı malzemenin (C20) incelenmesi.....	63
4.2.5. Tabaka kalınlıklarının değerlendirilmesi ve karşılaştırılması.....	64
4.3. Mikrosertlik Değerlerinin İncelenmesi.....	66
4.3.1. 1 Numaralı malzemenin (X165CrMoV12) incelenmesi.....	66
4.3.2. 2 Numaralı malzemenin (X210Cr12) incelenmesi.....	67
4.3.3. 3 Numaralı malzemenin (60WCrV7) incelenmesi.....	68
4.3.4. 4 Numaralı malzemenin (C20) incelenmesi.....	69
4.3.5. Mikrosertlik ölçümlerinin değerlendirilmesi.....	70
4.4. Kullanılan Malzemelerin Çeşitli Isıl İşlemler Sonucunda Mikrosertliklerinin Karşılaştırılması.....	71
4.5. Kullanılan Malzemelerin Çeşitli Isıl İşlemler Sonucunda Makrosertliklerinin Karşılaştırılması.....	73
4.6. Parçaların Aşınma Durumlarının İncelenmesi.....	75
5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	80
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	82
KAYNAKLAR.....	84
ÖZGEÇMİŞ.....	88



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Şekil 1.1</b> Saf borun görüntüsü (Ediz ve Özdağ 1997).....	4
<b>Şekil 1.2</b> Fe-B denge diyagramı (Bayça ve Şahin 2004) .....	12
<b>Şekil 1.3</b> Katı borlama işleminin şematik görünümü (Bayça ve Şahin 2004)....	14
<b>Şekil 1.4</b> Gaz ortamda borlama ünitesinin şematik şekli (Bayça ve Şahin 2004).....	20
<b>Şekil 1.5</b> Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması (Şahin 1999)....	23
<b>Şekil 1.6</b> Dış biçimli demirborür kristalleri (Fe <sub>2</sub> B) (Karaman 2003).....	24
<b>Şekil 1.7</b> Borür tabakası çeşitleri (Matuschka 1980).....	25
<b>Şekil 1.8</b> Borlu ve sementasyonlu tabakalardaki sertlik dağılımları (Matuschka 1980).....	28
<b>Şekil 1.9</b> Düşük karbonlu çelikte farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin aşınma davranışları (Şahin 1999).....	31
<b>Şekil 1.10</b> Alaşım elementlerinin borür tabakası kalınlığına etkisi (Matuschka 1980).....	32
<b>Şekil 2.1</b> Eğme kalıbı (Nair ve Karamış 2000).....	39
<b>Şekil 2.2</b> Borlanmış küresel valf ve metal sızdırmazlık elemanları (Hunger ve Trute 1994).....	39
<b>Şekil 2.3</b> Hasara uğramış püskürtme lülesi (Nair ve Karamış 1999).....	40
<b>Şekil 2.4</b> Farklı yüzey işlemi görmüş alüminyum derin çekme kalıbında işlem sayısına (n) bağlı olarak kalıp yüzey kalitesinin değişimi (Hunger ve Trute 1994).....	40
<b>Şekil 2.5</b> Borlanmış bir taşıma bandı (Anonymous 1998).....	41
<b>Şekil 2.6</b> Aynı işlem zamanına sahip borlanmış ve borlanmamış yatak plakaları (Nair ve Karamış 2000).....	42
<b>Şekil 2.7</b> Cam sanayi mastörleri .....	42
<b>Şekil 2.8</b> Çimento fabrikasında kullanılan fan (Karaman 2003).....	43
<b>Şekil 3.1</b> Zırlama prosesi.....	44
<b>Şekil 3.2</b> Zırlamada tellerin sarılım prensipleri.....	45
<b>Şekil 3.3</b> Yaptırılan numunelerin görünümleri.....	46
<b>Şekil 3.4</b> Deneylerde kullanılan ısıtma fırını.....	48
<b>Şekil 3.5</b> Borlama işleminde kullanılan kutular.....	49
<b>Şekil 3.6</b> Borlama işleminde kullanılan Ekirit® (solda) ve ticari Ekabor®2 tozları.....	49
<b>Şekil 3.7</b> Borlama için hazırlanmakta olan kutunun görünümü.....	50
<b>Şekil 3.8</b> Borlama için hazırlanmış kutu.....	50
<b>Şekil 3.9</b> Borlama için hazırlanmış 950°C deki fırın.....	51
<b>Şekil 3.10</b> Borlama işlemi tamamlandıktan sonra kutunun fırından çıkarılarak soğumaya bırakılması.....	51
<b>Şekil 3.11</b> Borlama işlemi tamamlandıktan sonra kutunun içerisinden çıkarılmış parçalar.....	52
<b>Şekil 3.12</b> Hassas kesme cihazı.....	53
<b>Şekil 3.13</b> Bakalite alma cihazı.....	53
<b>Şekil 3.14</b> Parlatma cihazı.....	54
<b>Şekil 3.15</b> Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı.....	55
<b>Şekil 3.16</b> Rockwell sertlik ölçüm cihazı.....	55

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Şekil 4.1</b> 1 numaralı malzemenin normalize edilmiş durumdaki mikroyapısı (100X).....	56
<b>Şekil 4.2</b> 1 numaralı malzemenin 6 saat borlanmış durumdaki mikroyapısı (100X).....	56
<b>Şekil 4.3</b> 2 numaralı malzemenin normalize edilmiş durumdaki mikroyapısı (100X).....	57
<b>Şekil 4.4</b> 2 numaralı malzemenin 6 saat borlanmış durumdaki mikroyapısı (100X).....	57
<b>Şekil 4.5</b> 3 numaralı malzemenin normalize edilmiş durumdaki mikroyapısı (100X).....	58
<b>Şekil 4.6</b> 3 numaralı malzemenin 6 saat borlanmış durumdaki mikroyapısı (100X).....	58
<b>Şekil 4.7</b> 4 numaralı malzemenin normalize edilmiş durumdaki mikroyapısı (100X).....	59
<b>Şekil 4.8</b> 4 numaralı malzemenin 6 saat borlanmış durumdaki mikroyapısı (100X).....	59
<b>Şekil 4.9</b> 1 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ölçümü (400X).....	60
<b>Şekil 4.10</b> 2 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ölçümü (400X).....	61
<b>Şekil 4.11</b> 3 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ölçümü (400X).....	62
<b>Şekil 4.12</b> 4 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ölçümü (400X).....	63
<b>Şekil 4.13</b> Oluşan bor tabakası kalınlıklarının karşılaştırılması.....	64
<b>Şekil 4.14</b> 1 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ve mikrosertlik ölçümü (400X).....	66
<b>Şekil 4.15</b> 1 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ve mikrosertlik dağılımı.....	66
<b>Şekil 4.16</b> 2 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ve mikrosertlik ölçümü (400X).....	67
<b>Şekil 4.17</b> 2 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ve mikrosertlik dağılımı.....	67
<b>Şekil 4.18</b> 3 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ve mikrosertlik ölçümü (400X).....	68
<b>Şekil 4.19</b> 3 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ve mikrosertlik dağılımı.....	68
<b>Şekil 4.20</b> 4 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ve mikrosertlik ölçümü (400X).....	69
<b>Şekil 4.21</b> 4 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ve mikrosertlik dağılımı.....	69
<b>Şekil 4.22</b> Ölçülen mikrosertlik değerlerinin karşılaştırılması.....	70
<b>Şekil 4.23</b> Kullanılan malzemelerin mikrosertlik kıyaslamaları.....	72
<b>Şekil 4.24</b> Kullanılan malzemelerin makro sertlik kıyaslamaları.....	73
<b>Şekil 4.25</b> Makro sertlik ölçümlerinde iz görüntüleri (50X).....	74

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Şekil 4.26</b> Kompaklama matrisinde aşınma izleri.....	76
<b>Şekil 4.27</b> Çelik tellerin çizgisel olarak aşındırdığı kompaklama matrisinde aşınma izlerinin ölçülmesi.....	76
<b>Şekil 4.28</b> Kompaklama matrislerindeki aşınma iz derinliğinin kıyaslanması...	78
<b>Şekil 4.29</b> Çelik tellerin dönerek geldiği sistemde kullanılan kompaklama matrisinde aşınma bölgesinin görüntüsü.....	79
<b>Şekil 4.30</b> Çelik tellerin dönerek geldiği sistemde kullanılan kompaklama matrisinde çevresel aşınma izlerinin görüntüsü.....	79

## TABLOLAR DİZİNİ

	Sayfa
<b>Tablo 1.1</b> Bor minerallerinin kullanım alanları ve yerleri (Çelik 2006).....	8
<b>Tablo 1.2</b> Dünya bor cevherleri üretimi (1000 ton) (Sivrioğlu 1996).....	10
<b>Tablo 1.3</b> Çeşitli metallerde elde edilen borür fazları ve mikrosertlikleri (Sinha 1991).....	13
<b>Tablo 1.4</b> Bortec firmasının üretimindeki borlama malzemeleri ( Bortec 1990, Karaman 2003, WEB 1).....	15
<b>Tablo 1.5</b> Sıvı ortam borlamasında kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri (Matuschka 1980).....	17
<b>Tablo 1.6</b> Gaz halindeki borlayıcı bileşikleri ve bazı özellikleri (Matuschka 1980).....	21
<b>Tablo 1.7</b> Fe <sub>2</sub> B ve FeB'nin bazı özellikleri (Baçkır 2002).....	25
<b>Tablo 1.8</b> Borlama ve diğer işlemlerle elde edilmiş yüzeylerin sertlik değerleri (Bozkurt 1984).....	29
<b>Tablo 1.9</b> Bazı malzemelerin borlanmış ve borlanmamış durumdaki sürtünme katsayıları (Bozkurt 1984).....	30
<b>Tablo 1.10</b> Diğer ısıtım işlemler ve sert malzemeler ile borlanmış çeliklerin tipik yüzey sertliğinin karşılaştırılması (Sinha 1991).....	35
<b>Tablo 3.1</b> Deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin standart karşılıkları.....	47
<b>Tablo 3.2</b> Deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri....	47
<b>Tablo 4.1</b> 1 numaralı malzemenin 6 saat borlanmış durumdaki tabaka kalınlığı.....	60
<b>Tablo 4.2</b> 2 numaralı malzemenin 6 saat borlanmış durumdaki tabaka kalınlığı.....	61
<b>Tablo 4.3</b> 3 numaralı malzemenin 6 saat borlanmış durumdaki tabaka kalınlığı.....	62
<b>Tablo 4.4</b> 4 numaralı malzemenin 6 saat borlanmış durumdaki tabaka kalınlığı.....	63

**SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ**

ASTM	American Society for Testing and Materials
HV	Vickers sertlik birimi
HRC	Rockwell sertlik birimi
MP	Megapiksel
ppm	Milyonda bir kısım
PTFE	Politetraflor etilen
vb	ve benzeri
vd	ve diğerleri

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Çalışmanın Amacı

Makine hasarlarının önemli bir bölümünü aşınma hasarları oluşturmaktadır. Aşınma ve korozyondan dolayı, dünyada, önemli malzeme kayıpları meydana gelmekte, bu da büyük maddi kayıplara sebep olmaktadır. Ülkelerin bu hasarlar nedeniyle kayıpları gayri safi milli hâsıllarının %3,5-5'i arasında değişmektedir. 1966 yılında sunulan bir raporda sürtünme, korozyon ve aşınma kaynaklı kayıpların İngiltere ekonomisine yıllık maliyetinin, gayri safi milli hâsılanın %4'ü kadar olduğu belirtilmiştir (Erdemir 2006). Yalnız Türkiye'deki 1991 yılı kaybı ise 4,5 milyar dolar olarak tahmin edilmektedir (Uzun 2002, Khoee 1992).

Aşınma, birbirine temas halinde çalışan parçaların, birbirlerine göre bağıl hareket etmesiyle sürtünmesi ve oluşan çeşitli mekanizmalarla malzeme kaybetmesidir. Her ne kadar makinelerdeki sürtünmeler azaltılmaya çalışılsa da, bu hasar biçimini yok etmek şu an için mümkün görülmemektedir. Aşınma mekanizması, malzeme sertliği, kayma mesafesi, kayma hızı gibi çok sayıda parametrenin etkilediği bir olaydır. Aynı zamanda, her makinenin çalışması esnasında oluşan kendine has etkiler de mevcuttur. Bu etkilerin hepsinin tam olarak tespit edilip, incelenmesi oldukça zordur. Bu sebeplerden dolayı, aşınmanın diğer hasar mekanizmaları gibi teorik olarak tam bir hesabı mümkün değildir. Bunun için de deneysel çalışma sonuçlarına ihtiyaç vardır. Aşınma deneyleri için standartlarda belirlenmiş deney düzenekleri mevcuttur. Ancak saydığımız sebeplerden ötürü bir makine elemanının aşınmasının tam olarak tespiti, çalışma ortamının deney şartları oluşturularak yapılabilir. Bu doğrultuda, laboratuvar şartlarında yapılan deney sonuçlarının sanayide kullanılan makinelerde uygulanması ile gerçek çalışma şartlarıyla gösterdiği uyumun incelenmesi oldukça önemlidir.

Makine üretiminde kullanılan malzemelerin, özellikle korozyon, sürtünme ve aşınma gibi tribolojik etkilere maruz kalan parçalarda kullanılan malzemelerin, kullanım ömürlerinin uzatılması bilhassa yüzey bölgesinin özelliklerin iyileştirilmesi (yüzey sertliğinin artırılması, sürtünme katsayısının düşürülmesi vb) ile sağlanabilir. Bu yüzden, bu gibi hasarlara maruz kalan parçaların yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi için çeşitli yüzey işlemleri (termokimyasal veya indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemleri vb) uygulanmaktadır. Nitrürleme, karbürleme gibi yüzey sertleştirme işlemlerinde 600-1100 HV' lik bir yüzey sertliği elde edilirken, borlama ile yüzey sertleştirmede 1500-2200 HV' lik sertliğin yanında çok düşük sürtünme katsayıları elde edilebilmektedir (Özsoy 1991).

Borlama, yüksek sıcaklıkta çelik malzeme yüzeyinde bor difüzyonuyla Fe<sub>2</sub>B ve/veya FeB gibi bileşiklerin elde edilmesidir. Endüstriyel uygulamalarda, hem daha az gevrek olması ve hem de borlama sonrası ısıl işlemlere izin vermesi bakımından Fe<sub>2</sub>B'den oluşan tek fazlı borür tabakaları tercih edilir (Özsoy 1991).

Borlama katı, sıvı veya gaz ortamda yapılabilir (Davis vd 1998, Can 2006). Borlama çalışmaları incelendiğinde, sıvı ortamda borlama sonrası, parçaların tuz banyosundan çıkarıldıktan sonra tabakaya zarar vermeden temizlenmesinin, tabaka kalınlığı kontrolünün zorluğunun ve hazırlanan banyoyu kullanmadaki tehlike ve güçlüklerden ötürü sanayi kullanımına şu anki şartlarda çok uygun olmadığı bildirilmektedir. Gaz ortamda borlamanın ise pahalı ve karmaşık ekipmanlar gerektirdiğinden kullanımı ekonomik görünmemektedir (Can 2006). Katı ortamda borlama ise çok özel bir tekniğe ve özel teçhizatlara gerek olmadan yapılabilmesinden ötürü rahatlıkla kullanılabilir ve bu gibi özelliklerinden dolayı ticari alanda daha geniş bir kullanım sahası bulmaktadır (Yu vd 2002). Çalışmamızda bu yüzden katı borlama yöntemi tercih edilmiştir. Bilinmesi gereken bir husus; Türkiye bor kaynağı olarak dünyada en büyük paya sahip olmasına karşın, borlama tozu malzemeleri üretimi Türkiye' de yapılmadığı ve bu malzemelerin yurtdışından yüksek fiyatlara alındığı acı bir gerçektir. Her şeye rağmen, borlama işlemi yapıldığında, makine parçalarının kullanım ömrünün çok daha uzun olması, bu sayede işçilik ve üretimin daha az kesintiye uğraması sebebiyle borlama yine de ekonomik konuma geçebilmektedir.

Borlama işlemi, belirtildiği gibi çok üstün özelliklere sahip olmasına karşın ülkemiz sanayinde yeterince tanınmamakta ve kullanılmamaktadır. Bu çalışmada, borlama işlemi tel çekme sanayinde kullanılan bir parçaya uygulanarak, gerçek çalışma şartlarında aşınma deneyleri yapıp, performansını ortaya koymak suretiyle sanayiye tanıtılması amaçlanmıştır.

## 1.2. Bor Elementi Hakkında Genel Bilgiler

Bor madeni cam, tekstil ve deri sanayinden, tarım havacılık ve diğer özel üretimler için kompozit malzeme üretimine kadar çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bor, hemen hemen bütün sanayi alanlarında kullanıldığı gibi metalürji ve malzeme alanında da önemli bir yere sahiptir. Bor, çeliklerde yüzey sertleştirme işlemlerinde ve alaşım elementi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Yalnız başına dünya bor rezervlerinin yaklaşık %70'ini elinde bulunduran ülkemiz, bu madenin rafinasyon ve kimyasal işlemlere tabi tutulmasıyla elde edilen mamullerin üretiminde yetersiz durumdadır. Dünya borat üretiminin ancak %18' ini gerçekleştirebilmektedir. Gelişmiş ülkeler bor madeninden onlarca değişik bileşimde ürünler (bortrioksit ( $B_2O_3$ ), borkarbür ( $B_4C$ ), bornitrür (BN), diboran ( $B_2H_6$ ) ve ferrobör (FeB) vb gibi rafine bileşikler) elde ederek, sanayinin her alanında kullanmaktadır (Özsoy 2001). Birçok bilim adamının “21. yüzyılın petrolü” olarak tanımladığı ve uzay teknolojisinden, bilişim sektörüne, metalürjiden, nükleer teknolojiye kadar daha sayamadığımız pek çok sanayi dalında kullanılan bor mineralleri, ülkemizin elinde bulunan en stratejik varlık konumundadır (Çınkır 2001).

### 1.2.1. Borun Tanımı ve Tarihçesi

Bor (Şekil 1.1) kimyasal sembolü “B” olup periyodik cetveldeki IIIA grubunun karbon ve silisyum elementlerine benzerliği en fazla ve metal olmayan tek elementidir. Oksijene karşı afinitesi çok yüksek olan bir elementtir. Bu nedenle bor, tabiatta serbest halde bulunmayıp, her zaman oksijene bağlı olarak bulunmaktadır. Yerkabuğunda 51. yaygın element olarak bor elementi, yaklaşık 10 ppm'lik konsantrasyon değerine sahiptir. Bor elementinin atom numarası 5, özgül ağırlığı 2,30-2,46 g/cm<sup>3</sup> ve ergime



noktası yaklaşık 2300°C' dir. Bor elementinin amorf toz halindeki rengi koyu kahverengidir. Ancak çok gevrek ve sert yapılı monoklinik kristal halinin rengi ise sarımsı kahverengidir (Smith 1995).



**Şekil 1.1** Saf borun görüntüsü (Ediz ve Özdağ 1997)

Boraksın ilk kez, yaklaşık 4000 yıl önce, Babilliler tarafından kuyumculukta kullanıldığı tahmin edilmektedir. Bunların, boraksı Uzakdoğu'dan getirttiklerine ilişkin bulgulara rastlanmıştır. O dönemlere ait yazılı kaynaklarda boraks minerali için “borak”, “bayrach” ve “borar” gibi sözcüklerin kullanıldığı saptanmıştır. Bundan başka, günümüzde, kimi kaynaklarda “boraks” yerine kullanılan “tinkal” sözcüğü de “tinkar” sözcüğüyle eş anlamlıdır. Yine Mısırlıların mumyalama işlerinde, tedavi amaçlı ve değişik metalleri işlemede borakstan yararlandıkları, Eski Yunanlılarla Romalılarınsa boraksı temizlik maddesi olarak kullandıkları tahmin edilmektedir. Görüldüğü gibi, boraks değişik uygarlıklar tarafından farklı amaçlarla kullanılmıştır. O dönemlerde, boraks daha çok alkali göllerden elde ediliyor ve ticareti yapılıyordu; ancak boraksın kullanım alanlarına ilişkin ilk yazılı metne, 762 yılında, Mekke, Medine ve Bağdat çevresindeki Arap yerleşimlerinde rastlanmaktadır. Boraks minerali, Çin'e bu tarihten kısa bir süre sonra girmiş; Avrupa'ysa, kimyaya ilişkin Arapça dilinde yazılan kaynakların çevrilmesi sonucu boraksla 12.-13. yüzyılda tanışmıştır. 15. yüzyıla gelindiğinde, boraks ticareti Venediklilerin eline geçmiş ve 200 yıl kadar da onlar tarafından sürdürülmüştür. O dönemin tüccarları boraksın nerelerden getirildiğini ve nasıl işlendiğini büyük bir sır olarak saklamışlardır. Ancak ham boraksın Tibet'in göllerinden elde edildiği ve torbalar içinde koyunlarla Himalayalar üzerinden

Hindistan'a taşındığı bilinmektedir. 17. yüzyıla gelindiğindeyse Hollandalılar boraks ticaretini üstlenmiş, hatta işlenmesi konusunda önemli bilgi birikimine kavuşmuşlardır. 1840 yılında, İtalya'nın Toskana bölgesindeki sıcak su kaynaklarında keşfedilen doğal borik asit (sassolit adlı bor minerali) 19. yüzyılda Avrupa pazarlarının borik asit ve boraks gereksinimini büyük oranda karşılamıştır. 19. yüzyılın sonlarına doğru dünyanın farklı bölgelerinde borat yatakları keşfedilmiştir. Sanayideki hızlı gelişmelere paralel biçimde rafine bor ürünlerinin geliştirilmesinde ve bunların pek çok alandaki kullanımında önemli adımlar atılmıştır (Karaman 2003).

### 1.2.2. Saf Borun tabiattaki bulunuşu

Bor, zamanımızın en değerli madenlerinden biri olduğundan işlenmesi ve değerlendirilmesi stratejik öneme sahiptir. Bor elementi; doğada B10 ve B11 ile gösterilen 2 adet dengeli izotopa sahiptir. Bor izotoplarının doğadaki oranları bölgelere göre farklılıklar göstermektedir, bilinen yataklarındaki B10 miktarı; ABD'de Kaliforniya'da düşük, Türkiye'de ise yüksektir (Kistler ve Helvacı 1994). Bor toprakta, deniz suyunda, birkaç ppm mertebesine kadar bulunur. Yer kabuğunun yaklaşık 10 ppm kadar oranında bor bileşiminden oluştuğu hesaplanmaktadır. Bor tabiatta yaygın bir şekilde bulunmasına rağmen, ticari bakımdan önemli ölçüde birkaç yörede bulunmaktadır. Bunlar İtalya'da Larderello, Kaliforniya'da birkaç yörede, Tibet ve Türkiye'de bulunan bölgelerdir. Zaman zaman küçük rezervlerin bulunduğu Arjantin, Bolivya, Kanada, Çin, İngiltere, Almanya, Hindistan, İran, Kore, New Mexico, Yeni Zellanda, Papua, Peru ve Suriye gibi ülkelerde de bor işlenir (Greenwood, 1973, Akgündüz 1991).

### 1.2.3. Bazı bor ürünleri ve üretim yöntemleri

Bor, birçok alanda çeşitli ürünler şeklinde kullanılmaktadır. Bazı bor ürünleri ve üretim yöntemleri aşağıda verilmiştir (Karaman 2003).

*Boraks Dekahidrat:* Teknolojik olarak alkali metal boratlarının en önemlilerinden biri, disodyum tetraborat dekahidrat ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) olarak da adlandırılan boraks dekahidrattır ve tabiatta tinkal minerali olarak bulunur. Molekül ağırlığı 381,4 g/mol, özgül ağırlığı 1,71 g/cm<sup>3</sup> (20 °C), özgül ısısı 0,385 kcal/g°C (25 - 50 °C), oluşum ısısı

1497,2 kcal/mol'dür. Renksiz monoklinik kristal yapısında bir tuzdur. Sulu çözeltileri yaklaşıklık, konsantrasyondan bağımsız olarak hafif alkali reaksiyon gösterir (pH= 9,2). Doymuş boraks çözeltisi 105 °C'de kaynar.

Boraks Pentahidrat: Disodyum tetraborat pentahidratın ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) molekül ağırlığı 291,35 g/mol, özgül ağırlığı 1,88 g/cm<sup>3</sup>, özgül ısısı 0,316 kcal/g°C ve oluşum ısısı 1143,5 kcal/mol'dür. Mineral adı tinkalkonit olan pentahidrat boraksın dehidrasyonundan oluşan birikintiler halinde bulunur. Doymuş boraks çözeltisinin 60°C'nin üzerinde kristallenmesi ile oluşur.

Susuz Boraks: Disodyum tetraborat ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) molekül ağırlığı 201,27 g/mol, özgül ağırlığı 2,3 g/cm<sup>3</sup>, oluşum ısısı, -783,2 kcal/mol olan renksiz ve çok sert bir kristaldir. Kolay öğütülebilir kristal bir kütle olarak bulunur. Ergime derecesi 741 °C'dir. Higroskopiktir. Boraks hidratların 600 - 700 °C'de dehidrasyonu ile stabil yapıda susuz boraks üretimi sağlanabilmektedir.

Borik Asit: Borik asit ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) molekül ağırlığı 61,83 g/mol,  $\text{B}_2\text{O}_3$  içeriği %56,3, ergime noktası 169 °C, özgül ağırlığı 1,44 g/cm<sup>3</sup>, oluşum ısısı, -1089 kJ/mol, çözünme ısısı 22,2 kJ/mol olan kristal yapılu bir maddedir. Oda sıcaklığında sudaki çözünürlüğü az olmasına rağmen, sıcaklık yükseldikçe çözünürlüğü de önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle sanayide borik asidi kristallendirmek için genellikle doymuş çözeltiyi 80 °C'den 40 °C'ye soğutmak yeterli olmaktadır. Bor minerallerinden geniş ölçüde üretilen borik asit başlıca; cam, seramik ve cam yünü Sanayinde kullanılmakta olup, kullanım alanları çok çeşitlidir. Borik asit, bor minerallerinin genel olarak sülfürik asit ile asitlendirilmesiyle elde edilmektedir. Türkiye'de borik asit üretimi başlıca; Bandırma'daki Eti Bor A.Ş. Boraks ve Asit Fabrika İşletmeleri tarafından yapılmaktadır.

Bor Oksit (Susuz Borik Asit): Ticari bor oksit,  $\text{B}_2\text{O}_3$ 'tür ve genellikle %1 su içerir. Genellikle borik asitten uygun sıcaklıkta su kaybettirilerek elde edilir. Renksiz cam görünüşlüdür. Oda sıcaklığında higroskopiktir. Bor oksit ve susuz boraks cam sanayinde çok kullanılır. Yüksek sıcaklıkta borik asitten su buharlaşırken  $\text{B}_2\text{O}_3$  kaybı artmaktadır. Cam üretim prosesinde, borik asit yerine, bor oksit kullanılması enerji ve ham madde avantajı sağlamaktadır. Bor oksit porselen sırlarının hazırlanmasında, çeşitli

camlarda, ergitme işlemlerinde, seramik kaplamalarda kullanılır. Ayrıca pek çok organik reaksiyonun katalizörüdür. Pek çok bor bileşiminde başlangıç maddesidir.

Sodyum Perborat: Sodyum perborat ( $\text{NaBO}_2\text{H}_2\text{O}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) genellikle tetrahidrat yapısındadır. Perborat üretiminde %33  $\text{B}_2\text{O}_3$  içeren boraks minerali kullanılmaktadır. Sodyum perborat, Bandırma'daki Eti Bor A.Ş. Boraks ve Asit Fabrikaları İşletmeleri tarafından üretilmektedir. Sodyum perborat, ağartıcı etkisi dolayısıyla yaygın olarak sabun ve deterjan sanayinde kullanılmaktadır. Ayrıca kozmetik maddelerin yapımında, tekstil endüstrisinde, mum, reçine, tutkal ve sünger sanayinde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır.

Bor Nitrit: Bor nitrit genellikle hegzagonal yapıda oluşur. Hegzagonal sistemde iken beyaz, talk'a benzeyen  $2,27 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğunda bir tozdur. Kübik sistemde ise oldukça serttir. Teorik yoğunluğu  $3,45 \text{ g/cm}^3$ 'tür ve iyi bir elektrik izolatörüdür. Ergitilerek masifleştirilmiş bor nitrit büyük bir kimyasal dirence sahiptir. Kübik yapıdaki bor nitrit çok iyi bir abrasif malzemedir. Bu özelliğinden dolayı, kesici aletlerin yapımında ve sert alaşımların işlenmesinde kullanılır.

Bor Halojenürler: Borun flor, klor, brom, iyot gibi halojenlerle yaptığı bileşiklerdir. Bor oksidin derişik sülfürik asit ve florit, klorit, bromit, iyodit gibi halojenlerle ısıtılmasıyla elde edilir. Bor klorür, düşük viskoziteli, renksiz, ışığı kıran bir sıvıdır ve %95'i bor fiber üretiminde kullanılır. Bor florür ise renksiz, boğucu kokulu, yanıcı olmayan bir gazdır. Bor iyodür katıdır ve kuvvetli nem çekicidir, oksijen akımında yanar.

#### **1.2.4. Bor'un Kullanım Alanları**

Bor, mineral ve bileşikleri olarak çeşitli endüstri dallarında, değişik amaçlarla geniş bir kullanım alanına sahiptir. Günümüzde bu kullanım sahaları daha da genişlemektedir, özellikle 400'den fazla endüstriyel sahada uygulama alanı bilinmektedir (Çalık 2002). Tablo 1.1' de bu kullanım alanlarına örnekler verilmiştir.

Gelişen teknolojiler ile bor kullanımı ve bora bağımlılık artmakta ve borun stratejik mineral olma özelliği giderek daha da belirginleşmektedir. Dünyada üretilen bor

minerallerinin %10'a yakın bir bölümü doğrudan mineral olarak, geriye kalan kısmı rafine ürünler elde etmek için tüketilmektedir (Uzun 2002).

**Tablo 1.1** Bor minerallerinin kullanım alanları ve yerleri (Çelik 2006)

<b>Kullanım Alanları</b>	<b>Kullanım Yerleri</b>
<b>Askeri &amp; Zırhlı Araçlar</b>	Zırh Plakalar, Seramik Plakalar, Ateşli Silah Namluları, Çelik Yelek.
<b>Cam Sanayi</b>	Borosilikat Camlar, Laboratuvar Camları, Uçak Camları, Borcam, Pyrex, İzole Cam Elyafı, Tekstil Cam Elyafı, Optik Lifler, Cam Seramikleri, Şişe, Diğer Düz Camlar, Otomotiv Camları vb.
<b>Elektronik ve Bilgisayar Sanayi</b>	Mikroçipler, LCD Ekranları, CD-Sürücüler, Akım Levhaları, Bilgisayar Ağlarında; Isıya-Aşınmaya Dayanıklı Fiber Optik Kablolar, Yarı İletkenler, Vakumlu Tüpler, Elektrik Kondansatörleri, Gecikmeli Sigortalar, Lazer Printer Tonerleri vb.
<b>Enerji Sektörü</b>	Cep Telefonu ve Telsiz Bataryaları, Güneş Enerjisinin Depolanması, Güneş Pillerinde Koruyucu Olarak, Hücre Yakıtları vb.
<b>Fotoğrafçılık ve Görüş Sistemleri</b>	Kamera ve Mercek Camları, Fotoğraf Makineleri, Dürbünler, Banyo ve Film İmalatları
<b>İlaç ve Kozmetik Sanayi</b>	Dezenfekte Ediciler, Antiseptikler, Diş Macunları, Lens Solüsyonları, Kolonya, Parfüm, Şampuan vb.
<b>İletişim Araçlarında</b>	Cep Telefonları, Modemler, Televizyonlar vb.
<b>İnşaat Sektöründe</b>	Çimentoya Mukavemet Artırıcı ve İzolasyon Amaçlı olarak.
<b>Kağıt Sanayi</b>	Beyazlatıcı olarak.
<b>Kauçuk ve Plastik Sanayi</b>	Naylon vb Plastik Malzemeler.
<b>Kimya Sanayi</b>	Flotasyon İlaçları, Banyo Çözeltileri, Yanmayan ve Erimeyen Boyalar, Tekstil Boyaları, Yapıştırıcılar, Soğutucu Kimyasallar, Korozyon Önleyiciler, Mürekkep, Pasta ve Cilalar, Kibrit, Kireçlenme Önleyicileri, Dezenfektan Sıvılar, Sabun, Toz Deterjanlar, Toz Beyazlatıcılar, Parlaticılar, Mumyalama vb.
<b>Koruyucu</b>	Ahşap Malzemeler ve Ağaçlarda Koruyucu olarak, Boya ve Vernik Kurutucularında vb.

(Devamı arkada)

**Tablo 1.1** Bor minerallerinin kullanım alanları ve yerleri (Çelik 2006) (Devamı)

<b>Kullanım Alanları</b>	<b>Kullanım Yerleri</b>
<b>Makine Sanayi</b>	Manyetik Cihazlar, Zımpara ve Aşındırıcılar, Kompozit Malzemeler vb.
<b>Metalürji</b>	Paslanmaz ve Alaşımli Çelikler, Sürtünmeye-Aşınmaya Karşı Dayanıklı Malzemeler, Kaynak Elektrotları, Refrakterler, Briket Malzemeleri, Lehimleme, Döküm Malzemelerinde Katkı Maddesi Olarak, Kesiciler, Kompozit Malzemeler, Zımpara ve Aşındırıcılar vb.
<b>Nükleer Sanayi</b>	Reaktör Aksamları, Nötron Emiciler, Reaktör Kontrol Çubukları, Nükleer Kazalarda Güvenlik Amaçlı ve Nükleer Atık Depolayıcı olarak.
<b>Otomobil Sanayi</b>	Hava Yastıklarında, Hidroliklerde, Plastik Aksamda, Yağlarda ve Metal Aksamlarda, Isı ve Ses Yalıtımı Sağlamak Amacıyla, Antifrizler vb.
<b>Patlayıcı Maddeler</b>	Fişek vb.
<b>Seramik Sanayi</b>	Emaye, Sır, Fayans, Porselen Boyaları vb.
<b>Spor Malzemeleri</b>	Kayak Aksamları, Tenis Raketleri, Balık Oltaları, Golf Sopaları, Darbe Koruyucular vb.
<b>Tarım Sektörü</b>	Biyolojik Gelişim ve Kontrol Kimyasalları, Gübreler, Böcek-Bitki Öldürücüler, Yabani Otlar vb.
<b>Tekstil Sektörü</b>	Isıya Dayanıklı Kumaşlar, Yanmayı Geciktirici ve Önleyici Selülozik Malzemeler, İzolasyon Malzemeleri, Tekstil Boyaları Deri Renklendiricileri, Suni İpek Parlatma Malzemeleri vb.
<b>Tıp</b>	Ostreopoz Tedavilerinde, Alerjik Hastalıklarda, Psikiyatride, Kemik Gelişiminde ve Artritte, Menopoz Tedavisinde, BNTC Terapi Yöntemiyle Beyin Kanserlerinin Tedavisinde, Manyetik Rezonans Görüntüleme Cihazlarında vb.
<b>Uzay ve Havacılık Sanayi</b>	Sürtünmeye-Aşınmaya ve Isıya Dayanıklı Malzemeler, Roket Yakıtı, Uydular, Uçaklar, Helikopterler, Zeplinler, Balonlar vb.

### 1.2.5. Bor üretimi ve ekonomisi

Dünya bor mineralleri üretiminde Türkiye ve ABD’de lider konumdadır. Önemli miktarlarda üretim yapan diğer ülkeler ise; Arjantin, Kazakistan, Rusya, Şili, Çin, Peru ve Bolivya’dır. Tablo 1.2’ de dünya bor cevheri üretimi verilmiştir (Sivrioğlu 1996).

**Tablo 1.2** Dünya bor cevherleri üretimi (1000 ton) (Sivrioğlu 1996)

Yıl	Etibor A.Ş.	ABD	Arjantin	B.D.T.	Diğer	Toplam
1990	1253	1094	260	180	177	2966
1991	1150	1240	250	160	186	2988
1992	1200	1140	250	160	187	2937
1993	1124	1055	125	90	104	2624
1994	1250	1110	140	90	268	2858

Türkiye bor mineralleri üretiminde birinci sıraya yükselirken, rafine bileşiklerinde ikinci sırada yer almaktadır. Çünkü ABD’nin almış olduğu tüm ürünler, rafine olup,  $B_2O_3$  oranları yüksektir. Türkiye’nin  $B_2O_3$  üretimindeki payının 480000 ton olmasına karşılık ABD’nin payının 580000 ton olduğu tahmin edilmektedir.  $B_2O_3$  baz alındığında ABD ve Türkiye’nin dünya üretimindeki payı sırasıyla %48 ve %39 olmaktadır (Poslu ve Aslan 1995).

1994 yılı dünya bor tüketim düzeyi dikkate alındığında, sadece ülkemizdeki görünür rezerv, tüm dünya ihtiyacını tek başına 343 yıl karşılayacak düzeydedir. U.S. Borax şirketinin elindeki görünür rezerv ise söz konusu ihtiyacı 108 yıl karşılayacak düzeydir (Sivrioğlu 1996). Türkiye bor ürünlerinin büyük bir bölümünü ihraç etmektedir. Toplam maden ihracatının %45’ni bor ürünleri oluşturmaktadır. 1990 yılında Etibor A.Ş.’nin bor ihracatının %82’si konsantre cevher, %18 rafine ürün olarak gerçekleşmiştir (Sönmez 1991).

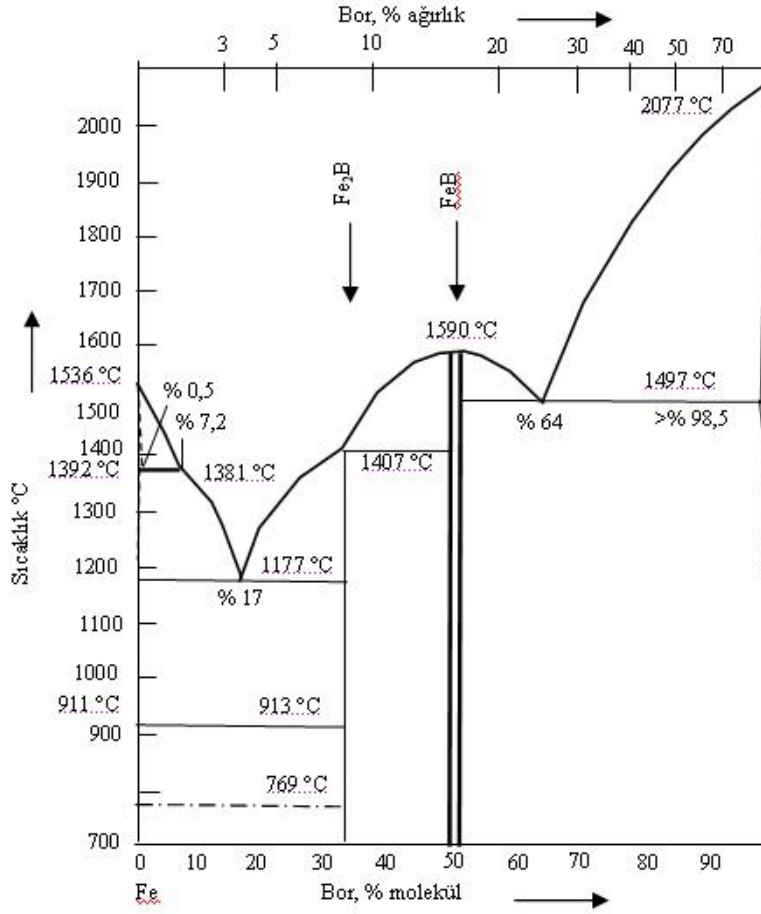
### 1.3. Borlama

Borlama, termokimyasal bir yüzey sertleştirme yöntemi olup, esas olarak metal yüzeyine bor atomu difüzyonu olarak tanımlanabilir (Sarper 2004). Borlama, teknik olarak oldukça geliştirilmiştir. Bor atomları ısı enerjisi etkisiyle metal yüzeyine yayınırlar ve esas metal atomlarıyla uygun borürler oluştururlar. Bu sebeple bor, yaygın şekilde sert ve aşınma direnci fazla tabakalar elde etmede kullanılmaktadır. Bu işlem bor atomlarının metalik malzemelerin yüzeyinden içeriye doğru difüzyonu ile olmaktadır. Borlama işlemi, demir esaslı malzemeler, demir dışı malzemeler ve toz metalürjisi ile üretilen malzemeler gibi çok geniş bir sahada uygulanabilmektedir. Bu işlem ile çelik malzeme yüzeyinde bor ve demir atomlarının sıcaklığın etkisi ile kimyasal bileşik oluşturarak yüzeyde FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakalarının biri veya her ikisi aynı anda oluşabilmektedir. Oluşan bu tabakalar malzemeye korozyon direnci ile birlikte, aşınmaya karşı yüzeyde yaklaşık 2100 HV değerinde sertlik kazandırmaktadır. Borlama işlemi esnasında kullanılan yöntem, borlama malzemesinin bileşimi, borlanacak malzeme cinsi, işlem süresi ve işlem sıcaklığı, elde edilen tabakaya etki eden faktörlerdir. Genel olarak parçalar borlama ortamında, 850-1000°C sıcaklıkta, 2-8 saat bekletilerek borlama gerçekleştirilir (Baştürk ve Erten 2006).

Bor demirde çok az çözünebilmektedir.  $\alpha$ -demirinde, 910°C civarındaki maksimum çözünebilirlik sıcaklıklarında 20-80 ppm borun çözünebildiği; buna karşılık, 1150-1170°C sıcaklıklarda  $\gamma$ -demirinde 55-260 ppm bor çözünebildiği bildirilmiştir. Çözünebilirlik sınırlarının genişliğinin, esas malzemenin saflığı ve tane boyutundaki değişikliklerden kaynaklandığına inanılmaktadır (Özsoy 1991). Şekil 1.2'de Fe-B ikili denge diyagramı görülmektedir.

Borlama işleminin performans gösterebilmesi için, parçaların kullanılacağı çalışma ortamına göre, uygun borlama yöntemi ve gerekli ısıl işlemlerin seçilmesi de oldukça önem arz etmektedir.





Şekil 1.2 Fe-B denge diyagramı (Bayça ve Şahin 2004)

### 1.3.1. Borlanabilen Malzemeler

Borlama işlemi gerek toz ve gerekse diğer metotlarla üretilen bütün ferro alaşımlara uygulanabilmektedir. Refrakter metaller (W, Ta, Mo, Zr, Hf, Nb), karbürler (özellikle Co ile bağlı WC) ve nikel esaslı alaşımlara başarı ile uygulanarak özel yapıda borlu tabakalar elde edilebilmektedir. Ti ve Ti esaslı alaşımlara bor yayınımlı ile aşınmaya dayanıklı TiB<sub>2</sub> tabakası elde edilebilmektedir (Özsoy 1991).

Yeni geliştirilen metotlarla Cu ve alaşımlarına da tatbik edilebilmektedir, fakat düşük ergime sıcaklığına sahip Zn ve Al'a uygulanamamaktadır (Meriç ve Şahin 2002). Tablo 1.3' de çeşitli metallerde elde edilen borür fazları ve mikrosertlikleri verilmiştir.

**Tablo 1.3** Çeşitli metallerde elde edilen borür fazları ve mikrosertlikleri (Sinha 1991)

Borlanan alt yüzey	Borür tabakasındaki fazlar	Borür tabakasının sertliği (HV)
Fe	FeB	1900-2100
	Fe <sub>2</sub> B	1800-2000
Co	CoB	1850
	Co <sub>2</sub> B	1500-1600
	Co <sub>3</sub> B	700-800
Ni	Ni <sub>4</sub> B <sub>3</sub>	1600
	Ni <sub>2</sub> B	1500
	Ni <sub>3</sub> B	900
Mo	Mo <sub>2</sub> B	1660
	MoB <sub>2</sub>	2330
	Mo <sub>2</sub> B <sub>5</sub>	2400-2700
W	W <sub>2</sub> B	2600
Ti	TiB	2500
	TiB <sub>2</sub>	3370
Nb	NbB <sub>2</sub>	2200
	NbB <sub>4</sub>	-
Ta	Ta <sub>2</sub> B	-
	TaB <sub>2</sub>	2500
Hf	HfB <sub>2</sub>	2900
Zr	ZrB <sub>2</sub>	2250
Re	ReB	2700-2900

### 1.3.2. Borlama yöntemleri

Borlama, termokimyasal olan (katı, sıvı, gaz, pasta ve plazma) ve termokimyasal olmayan (iyon implantasyonu, PVD, CVD, plazma püskürtme gibi) yöntemlerle yapılabilmektedir. Bu yöntemlere ilave olarak çok bileşenli borlama, süperplastik borlama, ötektik borlama, plazma sinterleme gibi değişik teknikler de geliştirilmiştir (Uluköy 2005).

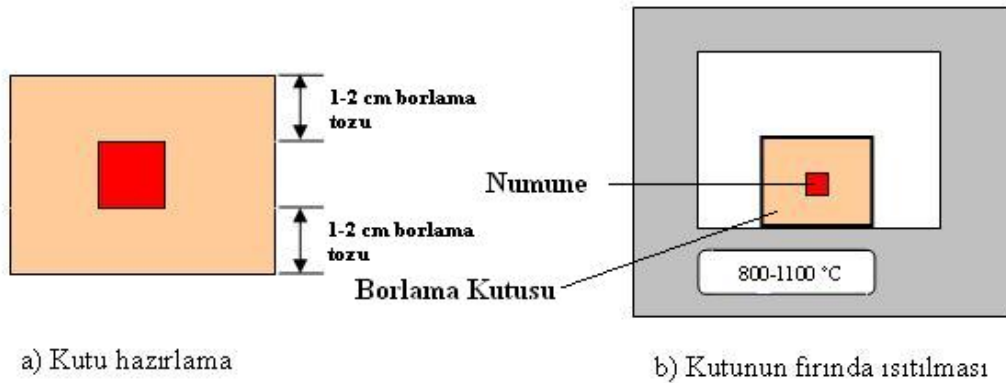
#### 1.3.2.1. Katı ortamda borlama

Borlama işlemine tabi tutulacak parça, toz halindeki bor verici ortam içinde genellikle 800-1100°C sıcaklıkta, 4-10 saat bekletilerek borlama işlemi gerçekleştirilir. Bir tür kutu sementasyona benzeyen bu yöntem, soy gaz atmosferinde yapılabileceği gibi, sıkı kapatılmış kutularda olmak şartı ile normal atmosferde de yapılabilir. Borlanacak malzemeler kutu içerisine etraflarında minimum 1 cm kalınlıkta toz örtülecek şekilde gömüldükten sonra kutu sıkıca kapatılır ve atmosferle teması

kesilmeye çalışılır (Şekil 1.3). Aşağıda katı ortamda kullanılan bazı borlama bileşim örnekleri verilmiştir (Baştürk ve Erten 2006).

1. %85-90Ferrobor +%10-15 NBF
2. %95 B<sub>4</sub>C+%5 NaF
3. %33 Amorf bor +%2 NHCl +%65 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
4. %80 B<sub>4</sub>C+%20 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>
5. %98 B<sub>4</sub>C+%2 KBF
6. %50 Amorf bor +%1 NH<sub>4</sub>F.HF+%49 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
7. %(7,5-40) B<sub>4</sub>C + %(2,5-10) KBF<sub>4</sub>+% (50-90)+SiC
8. %84 B<sub>4</sub>C+%16 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>
9. %95 Amorf bor +%5 KBF<sub>4</sub>
10. %20 B<sub>4</sub>C+%5KBF<sub>4</sub>+%75 Grafit
11. %(40-80) B<sub>4</sub>C+% (20-60) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
12. %100 B<sub>4</sub>C

Borlama için patenle korunan ticari malzemelerde geliştirilmiştir. Katı ortamda borlama ve borlama malzemelerinin üretimi özellikle Almanya’da oldukça gelişmiştir. Türkiye’de endüstriyel olarak borlama işlemi yapan tek firma olan Vezneli A. Ş. de borlama işlemlerini Bortec firmasının malzemelerini ve teknik desteğini kullanarak yapmaktadır (Karaman 2003). Tablo 1.4’ de Bortec firmasının üretimindeki borlama malzemeleri verilmiştir. Sanayi uygulamalarında en yaygın Ekabor<sup>®</sup>2 borlama tozu kullanılmaktadır.



Şekil 1.3 Katı borlama işleminin şematik görünümü (Bayça ve Şahin 2004)

**Tablo 1.4** Bortec firmasının üretimindeki borlama malzemeleri (Karaman 2003, WEB\_1 2008)

<b>Borlama Malzemesi</b>	<b>Tane Büyüklüğü (µm)</b>	<b>Açıklamalar</b>
Ekabor <sup>®</sup> 1	≤150	En yüksek kalitede yüzey elde edilebilir.
Ekabor <sup>®</sup> 2	≤850	Çok iyi kalitede yüzey elde edilebilir, işlem sonrası parçalar kolay temizlenir.
Ekabor <sup>®</sup> 3	≤1400	Çok iyi kalitede yüzey elde edilebilir. Isıl işlem sonrası tozlar hala akışkandır (topaklanma olmaz).
Ekabor <sup>®</sup> HM	≤150	Sert metaller, küçük delikli parçalarda ve kalın tabaka istenen durumlarda kullanılabilir.
Ekabor <sup>®</sup> -Paste		Üniversal olarak uygulanabilir. Daldırmayla, fırçayla veya püskürtmeyle uygulanabilir. İşlem için asal gaz atmosferi gereklidir.
Ekabor <sup>®</sup> WB	220-230	Oksijensiz gaz atmosferinde akışkan yatakta kullanılır.
Ekabor <sup>®</sup> Ni	≤150	Nikel bazlı malzemeler için kullanılır.
Ekrit <sup>®</sup>	≤420	Dolgu malzemesidir. Katı borlama maddesi ile borlama esnasında oksijen geçişini önler.

Borlama maddesinin tane boyutu küçüldükçe temas yüzeyi artar. Temas yüzeyinin artması yayılımı kolaylaştırır, dolayısıyla borür tabakasının kalınlığı artar. Borlama, kaynaklı birleştirmelerde başarı ile uygulanabilir (Bayça ve Şahin 2004).

*Katı borlamanın avantaj ve dezavantajları (Baştürk ve Erten 2006):*

Avantajları:

- Sistem ucuzdur,
- Özel teknik gerektirmez,
- Kolay elde edilebilir,
- Toz terkiibi değiştirilebilir,
- Minimum ekipman ve düşük maliyet, olarak sıralanabilir.

Dezavantajları:

- Büyük boyutlu parçaların borlanması uygulama zorluğu vardır.

### 1.3.2.2. Macunlama (pasta) ile borlama

Macun şeklindeki borlayıcı madde sertleştirilmek istenen yüzeye 2-5 mm kalınlıkta sürülür ve fırınlanmadan önce kuruması sağlanır. Kurutma işleminden sonra

macunlanmış parçalar fırına konur ve uygun sıcaklıkta borlama işlemi yapılır. Eğer paket borlama zor, pahalı ve zaman alıcı olursa ekonomik olarak bu metot kullanılabilir. Bu metotta %45 B<sub>4</sub>C (tane büyüklüğü 200-240µm) ve %55 Kriolit (Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>)'lik bir pasta borlama karışımı kullanılabilir. Pasta parça üzerine ya fırça ile ya da püskürtme ile sıvanır. Daha sonra endüksiyonlu veya dirençli bir metotla 5 saat süre ile 800–1000°C'ye ısıtılır (Tezcan 1996).

Atmosfer kontrollü fırınlarda hazır EKabor<sup>®</sup>-Paste ve Durborid-Paste gibi özel borlama malzemeleri de kullanılabilir. Gaz atmosferindeki Azot ve Hidrojen oranları 90:10 veya 95:5'tir. Saf Azot veya Argon tavsiye edilmemektedir. Saf Azot veya Argon gazı kullanıldığı takdirde katı ortam borlamaya göre nispeten daha ince tabakalar elde edilmektedir. Pasta borlama yönteminde kullanılacak Durborid<sup>®</sup>-Paste ve EKabor<sup>®</sup>-Paste özel borlama malzemeleri, su bazlı oldukları için yanma tehlikeleri yoktur. Gaz atmosferinde, endotermik veya CO içeren gazlar kullanılmamalıdır (Karaman 2003).

Pasta Borlama yöntemi, katı ortamda borlama işlemine göre özellikle zamandan tasarruf edilmesi yönüyle ( $\cong$  %50), alternatif bir borlama işlemidir. Özellikle büyük hacimli karışık şekilli parçalarda bu yöntemin tercih edilmesi, diğer borlama yöntemlerine göre ekonomiklik sağlamaktadır. Bu yöntem, kısmî borlama işlemlerinde de kullanılabilir. İş parçası ile macun arasında hava kabarcıklarının kalmamasına dikkat edilmesi gerekmektedir (Karaman 2003).

### 1.3.2.3. Sıvı ortamda borlama

Bor bileşikleri, aktivatör ve redükleyici maddelerden oluşan erimiş tuza, iş parçasının daldırılması yöntemidir. Borlama işlemi 900 - 1100°C sıcaklıkta ve 2 - 9 saat süre ile yapılır. Bu yöntemin dezavantajı sıcaklıktır. Sıcaklığın 850°C' nin altına düşmesi durumunda erimiş boraksın akıcılığı azalacağından, borlama imkansız hale gelecektir (Bayça ve Şahin 2004). Kullanılan banyoların esas bileşenleri ve özellikleri Tablo 1.5' de verilmiştir.

**Tablo 1.5** Sıvı ortam borlamasında kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri  
(Matuschka 1980)

Malzeme	Formül	Teorik Bor Ağırlığı (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	11,35	-
Susuz boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	21,50	741
Metabor asidi	$\text{HBO}_2$	24,69	-
Sodyum bor forid	$\text{NaBF}_4$	9,85	-
Borik oksit	$\text{B}_2\text{O}_3$	31,07	450
Borkarbür	$\text{B}_4\text{C}$	78,28	2450

Sıvı ortam borlaması sırasında borlanan metal ile redükleyici madde arasında galvanik pil oluşur. Aktif bor oluşumu sırasında metal yüzeyinde katodik bir reaksiyon olurken, redükleyici madde yüzeyinde anodik bir reaksiyon olmaktadır. Bu işlemin oluşması için; borlanacak metal ile redükleyici madde taneleri arasında elektrokimyasal farkın bulunması gerekir. Difüzyon reaksiyonu esnasında katot potansiyeli, yüzeyde oluşan fazın (FeB,  $\text{Fe}_2\text{B}$ ) potansiyel değerini alır. Katı eriyik, oluşum esnasında yüzeyde yayılan elementin konsantrasyonundaki değişimle birlikte sürekli değişir (Bayça ve Şahin 2004).

Borlama sonucunda numuneler yapışkan ve temizlenmesi zor olan bir tuz banyosu tortusu ile kaplanır. Bu, aynı zamanda pahalı bir temizleme işlemini de beraberine getirir (Göy 1984).

-Normal Sıvı Ortamda Borlama:

Sıvı ortamda borlamada kullanılan maddelerin en başında boraks gelmektedir. Banyo bileşimleri genellikle; %(60-80) boraks ve %(20-40) oranında  $\text{B}_4\text{C}$ , ferro-bor, B, gibi bor içeren maddeler veya SiC, Ca-Si, Fe-Si, Fe-Mn, Ca, Be, Al, Ti, Mg, Li, Zr, Ge ve nadir toprak metalleri gibi redükleyici maddelerden oluşur. Boraksa ilaveten banyoya Fe-V, Fe-Nb, Fe-Cr veya Cr tozlarının katılması durumunda V, Nb veya krom karbür tabakaları oluşur. Boraks banyolarında, oksit oluşum serbest enerjileri  $\text{B}_2\text{O}_3$ 'ün oluşum serbest enerjisinden daha düşük elementleri içeren banyolarda da karbür tabakaları oluşur (Özsoy 1991).

Aşağıdaki banyolar kullanılarak, demir grubu malzemelere borlama çalışmaları yapılmıştır (Akgündüz 1991).

1. %10 Boraks + %40 B<sub>4</sub>C
2. %73 - 79 Boraks + %15 - 20 NaCl + %6 - 7 B
3. %70 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> + %30 SiC
4. %65 (% 85 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> + %55 NaCl) + %35 Kalsit
5. NaCl + BaCl<sub>2</sub> + B<sub>4</sub>C

#### Elektroliz Yöntemi:

Elektrolizin ana bileşimi boraks ve borik asittir. Bileşene ilaveten NaF, NaCl gibi aktivatörler kullanır. Aktivatörlerden banyonun akışkanlığını artırması istenir (Uzun 2002).

Yüksek sıcaklıkta tuz banyosu, elektrolit iş parçası katot ve grafit çubuk anot olarak işlem gerçekleştirilir. Bu yöntem laboratuvar çalışmalarında gayet iyi sonuçlar vermiştir. Ancak ergimiş boraksın viskozitesinin çok yüksek olması, endüstriyel uygulamalarda sıcaklığın homojenliğini engeller, yani boraks ergiyiğinin yüksek viskozitesi 850°C'nin altında borlamayı pratik olarak imkansız kılar. 850°C'nin üzerinde ise, banyodaki düzgün sıcaklık dağılımı oldukça güçleşir (Uzun 2002).

Bu yöntemde iş parçası bir tuz tabakasıyla kaplanır, bunu temizlemek oldukça masraflıdır. Elektrolizle borlamada anotun bir tarafında ince borür tabakası oluşur. Bu da gölge etkisi yaparak değişik ve düzensiz kalınlıklara sebep olur. Sodyum klorür ve borasit anhidritin karışımı ile yapılan çalışma sonucu banyodaki sıcaklık dağılımının eşit olduğu, parçaların daha kolay yıkandığı ve viskozitenin azaldığı görülmüştür. Bu yöntemin tesisatı pahalıdır. Karışık şekilli parçalarda homojen kalınlıklı tabaka oluşumu oldukça zordur. İşlem 800–1000°C arasında ve 0,5–5 saat süre ile yapılır. Banyo bileşimlerinde 0,2 A/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğu ve 2 – 6 saat süre şartlarını kullanarak sade karbonlu çelikte 15–70 µm kalınlıkta borlu tabaka elde edilmiştir (Selçuk 1994).

Sıvı ortamda borlamanın avantaj ve dezavantajları (Baştürk ve Erten 2006):

Avantajları:

- İşlem ucuzdur (normal sıvı ortamda),
- Fazla ihtisas istemez.

Dezavantajları:

- Yüksek viskoziteli ergimiş boraksla 850°C' nin altında borlama yapmak kesinlikle imkansızdır. Bu sıcaklığın üzerinde bile bor banyosu içerisindeki sıcaklığın eşit dağılımına ulaşmak çok zordur.
- Özellikle kompleks parçalarda bu farklı yoğunluk akımları bor tabakasının farklı kalınlıklarda olmasına neden olmaktadır.
- Sıkı bir şekilde yapışmış tuz tabakası iş parçaları üzerinde oluşur ve bu oluşan tabakaların borlama işlemi tamamlandıktan sonra uzaklaştırılması maliyeti oldukça arttırır.
- Büyük boyutlu ve kompleks parçalara uygulanamaz.
- Tesisatı pahalıdır (elektroliz yönteminde).

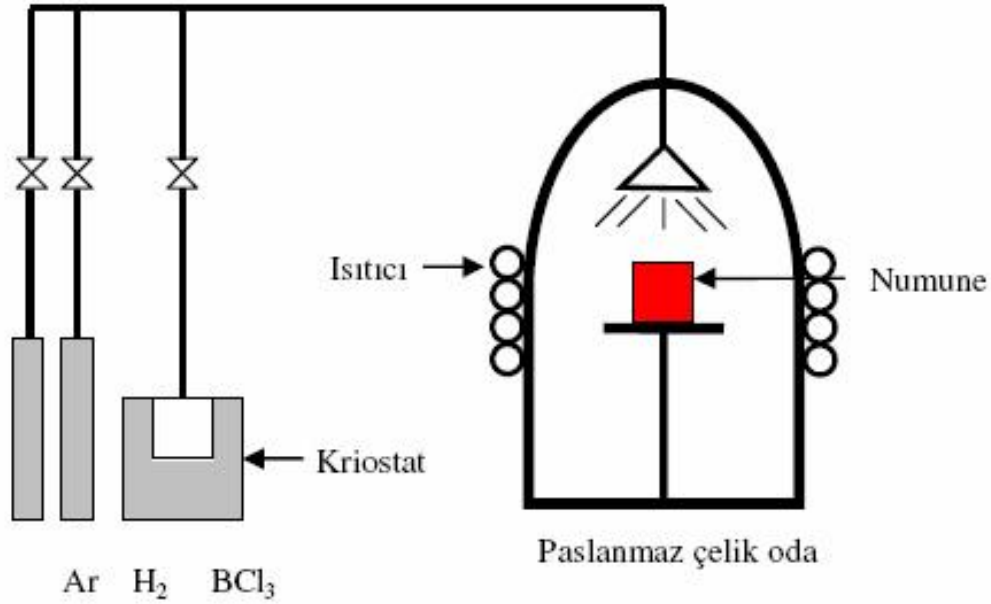
#### **1.3.2.4. Gaz ortamda borlama**

Gaz ortamda borlamada, bor kaynağı olarak bor halojenürleri, diboran ve organik bor bileşikleri kullanılır. Gaz borlayıcıların en önemli üstünlüğü, gaz sirkülasyonunun sonucu olarak daha üniform bir bor dağılımının sağlanabilmesi ve elde edilmelerinin kolay olmasıdır. Prensip olarak gaz ortamda borlamada, bor potansiyelinin ayarlanabilmesinden dolayı, tek fazlı tabaka elde etmek mümkündür (Özsoy 1991). Gaz ortamda borlamanın şematik şekli Şekil 1.4' te görülmektedir.

Gaz ortamın bileşimi, basıncı ve gazın tanktan akış hızı borlamaya etki eden faktörlerdir. Gaz ortamda borlama yapmak için bor verici ortam olarak bor halojenleri, diboran ( $B_2H_6$ ) ve organik bor bileşikleri kullanılır. Bunlardan diboran ( $B_2H_6$ ) ile beraber bor halojenleri kullanılırsa çok olumlu sonuçlar elde edilir. Fakat diboran zehirli ve patlayıcıdır. Ayrıca diboranın hidrojen ile inceltmesi çok pahalı olup 150°C 'ye yakın sıcaklıklarda ayrışır. Bu nedenle sıcak bir parça üzerine uygulamak için soğutmak



gerekir. Bu da işlemi karışık hale getirir. Bütün bunlara rağmen birçok araştırmacı diboran kullanarak gaz ortamda borlamayı yapmışlardır (Bozkurt 1984).



**Şekil 1.4** Gaz ortamda borlama ünitesinin şematik şekli (Bayça ve Şahin 2004)

Organik bileşiklerden bor trimetil ve bor trietil yüksek oranda karbon ihtiva ettikleri için, borlama sonucu oluşan borür tabakası yanı sıra yüksek karbonlu bir tabaka oluşur. Böylece borlama ile yayılan karbon, oluşan tabaka kalıntısını bozar. Bor halojenleri ise uygun halojen bileşimlerinin teşekkülü ile korozyona neden olurlar (Uzun 2002).

Amerika'da geliştirilen bir yöntem ise bor ve bor karbürden ayrışan bir gaz fazıyla yapılan borlamadır. Bunun esasını ise, bor triklorit ile hidrojen karıştırılarak 1300 - 1500°C'de sıcak grafit çubuk üzerine gönderilir ve bor karbür oluşumu sağlanır. Bu yöntem ilk etapta daha yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelere uygulanmaktadır. Bu yöntemle, Fe esaslı malzemelerin yanı sıra, Ti, Ni, Co ve W elementleri başarıyla borlanmıştır (Selçuk 1994).

Bor triklorit ile yapılan borlama esnasında ayrışarak serbest kalan klor, ortamdaki mevcut hidrojen ile birleşerek HCl oluşturur. Oluşan klor ve HCl atmosfer ve sıcaklık oranlarına göre borlanan demir ile reaksiyona girer. Bu durum ise gaz ile borlamada asıl problemi teşkil eder. Çünkü borlama çelikte yapıldığında demir klorit oluşur. Bu ise demir borürün oluşumunu engeller ve böylece korozyona neden olur (Uzun 2002).

Aşağıdaki gaz bileşenleri kullanılarak borlama yapılabilir (Akgündüz 1991).

1.  $\text{BCl}_3 / \text{H}_2 = 1/15$
2.  $\text{B}_2\text{H}_6$
3.  $\text{B}_2\text{H}_6 / \text{H}_2 = 1/50$
4.  $\text{BCl}_3 + \text{H}_2$
5.  $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{B}$
6.  $(\text{CH}_3)_3\text{B}$

Tablo 1.6'da gaz halindeki borlayıcı bileşikler ve bazı özellikleri verilmiştir.

**Tablo 1.6** Gaz halindeki borlayıcı bileşikler ve bazı özellikleri (Matuschka 1980)

Malzeme	Formül	Teorik bor miktarı (%)	Donma noktası (°C)
Bor triflorid	$\text{BF}_3$	15,95	-128,8
Bor triklorid	$\text{BCl}_3$	9,23	-107,3
Bor tribromid	$\text{BBr}_3$	4,32	-46
Di-boran	$\text{B}_2\text{H}_6$	39,08	-165
Bor trimetil	$(\text{CH}_3)_3\text{B}$	19,35	-161
Bor trietil	$(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{B}$	11,04	-94

Gaz ortamda borlamanın avantaj ve dezavantajları (Baştürk ve Erten 2006):

Avantajları:

- Gaz sirkülasyonunun bir sonucu olarak borun daha çok yayılması,
- Katı borlama işlemine göre gelişmiş sıcaklık kararlılığı ve elde etme kolaylığı.

Dezavantajları:

- Trimetil bor, borlama ile birlikte C yayılımına da neden olarak tabaka kalitesini bozar,
- Tesisatı pahalıdır,
- Ortam zehirlidir,
- Patlama tehlikesi büyüktür.

### 1.3.2.5. Plazma borlama

Borlamanın daha düşük sıcaklıkta ve daha kontrollü yapılabilmesi için plazma borlama yöntemi de gelişme göstermektedir.  $B_2H_6-H_2$  ve  $BCl_3-H_2-Ar$  karışımları plazma borlama işleminde başarılı bir şekilde kullanılır. Ancak ilk bahsedilen gaz karışımı bir katı veya sıvı ortam borlama prosesi ile mümkün olmayan  $600^\circ C$  gibi düşük sıcaklıklarda çeşitli çelikler üzerinde borlu tabaka üretmek için kullanılır.  $BCl_3-H_2-Ar$  gazlarının karışımı içinde plazma borlamanın  $BCl_3$  konsantrasyonunun daha iyi kontrol edilmesi, artık gerilmenin azalması ve borlu film tabakalarının daha yüksek mikro sertliği gibi olumlu özellikler gösterdiği iddia edilmektedir (Tezcan 1996).

En yaygın kullanılan plazma yöntemi elektriksel boşalmadır. Bir elektrik gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa belirli şartlar gerçekleştiği takdirde uygulanan gerilim plakalar arasındaki gazın delinme geriliminin üzerinde ise, bu iki plaka arasında bir elektrik akışı olur. Böylece işlem gerçekleştirilmiş olur (Atik ve Meriç 1999).

*Plazma borlamanın avantaj ve dezavantajları* (Tezcan 1996):

#### Avantajları:

- Borlanan tabakanın bileşim ve derinlik kontrolünün yapılabilmesi,
- Bor potansiyelinin yüksek olması,
- Daha ince borlu tabakaların elde edilebilmesi,
- Kullanılan sıcaklık ve işlem süresinin kısalığı,
- Yüksek sıcaklık fırınlarına ve aksesuarlara ihtiyaç olmaması.

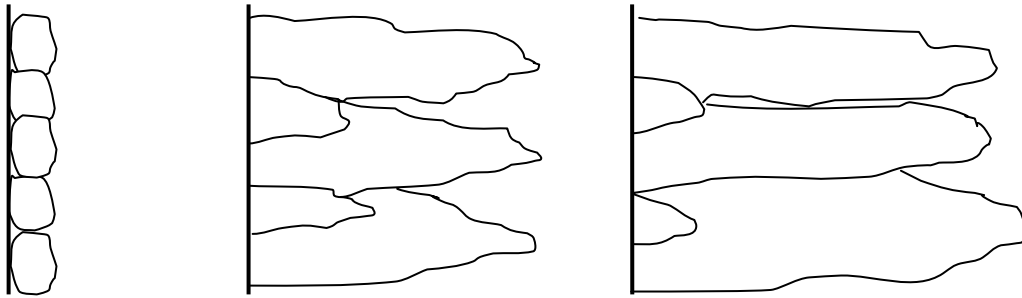
#### Dezavantajları:

- Kullanılan atmosferin aşırı zehirli olmasıdır.

### 1.3.3. Borlu tabakanın yapısı ve bileşenleri

#### 1.3.3.1. Borür tabakası

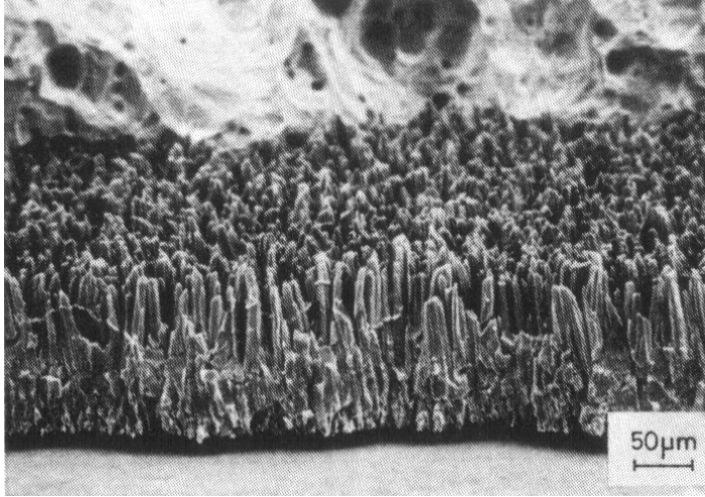
Demir borürler, termal ve elektrik iletkenliği gibi özelliklerinden başka yüksek sertlik gibi tipik seramik özellikleri de gösteren bileşiklerdir. Tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları gibi mikro hatalar ile yüzey pürüzlülükleri ve çizikler gibi yüzeyin daha reaktif olduğu yerler borür tabakası oluşumunun başlangıç noktalarıdır. Bu noktalarda  $Fe_2B$  çekirdekleri oluşur ve gelişir. Borlamanın birinci aşamasında borlayıcı ortam ve nesnenin yüzeyindeki reaksiyon bileşenleri arasında reaksiyon oluşur. Taneler yüzeyde çekirdek oluşturmaktadır. Borlama süresi ile çekirdek oluşumu artar ve ince bir bor tabakası elde edilir. Bor,  $Fe_2B$  ve  $FeB$  yapısında çeliğin yüzeyine yayılır. Borlama işlemi sırasında, ilk borür çekirdeği numunenin yüzeyinde oluşmaktadır. Şekil 1.5’de borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması verilmiştir (Şahin 1999).



**Şekil 1.5** Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması (Şahin 1999)

Oluşan ilk borür çekirdeği numune içinde büyür. Bor atomları kafes yapının [001] doğrultusunda daha hızlı yayıldığı için  $FeB$  ve  $Fe_2B$  [001] boyunca yönelir. Bu yüzden borür taneleri [001] yönünde yüzeye dik daha hızlı büyür. Borür tanelerinin diğer yönlerde büyümesi daha yavaştır. Bu nedenle kolonsal yapı oluşur. Önce  $Fe_2B$  fazı oluşur, ortamda yeterince bor konsantrasyonu varsa  $FeB$  fazı da oluşur. İlk önce oluşan  $Fe_2B$  fazı uzun bir sürede büyümektedir. Borür tabakaları çeliğin yüzeyinden içeriye doğru  $FeB_x$ ,  $FeB$ ,  $Fe_2B$  yapısında oluşur. Borlamanın son aşamasında sadece  $FeB$  fazı oluşur.  $FeB$  fazı,  $Fe_2B$  fazından daha kısa sürede büyür. Bu yüzden  $FeB$  fazının dokusu  $Fe_2B$  fazı kadar güçlü değildir (Xu vd 2001).

Taramalı elektron mikroskopunda elde edilen; borlanmış bir çeliğin %18 hidroklorik çözeltisi içinde birkaç saat kaynatılması sonrası çözülmüş, yaklaşık 120 µm uzunluğunda dış biçimli demirborür kristalleri ( $Fe_2B$ ) Şekil 1.6' da görülmektedir (Karaman 2003).



**Şekil 1.6** Dış biçimli demirborür kristalleri ( $Fe_2B$ ) (Karaman 2003)

Borlamada oluşan  $Fe_2B$  ve  $FeB$ ' ye ait bazı özellikler Tablo 1.7' de verilmiştir (Bozkurt 1984).

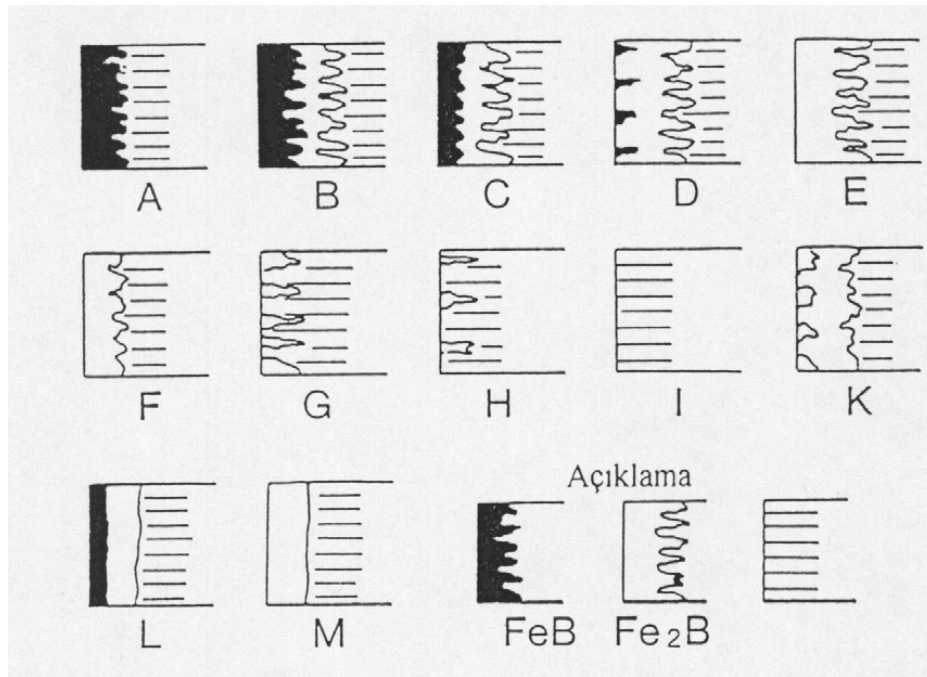
Çeşitli borlama yöntemleri ile 14 farklı yapıda borür tabakası elde edilebilmektedir. Sistematik sınıflandırma Şekil 1.7' de gösterilmiştir (Matuschka 1980).

Borür tabakalarının yapısı; borlama yöntemine, borlanan malzemenin bileşimine, borlama ortamına ve işlem şartlarına bağlı olarak düz bir formda veya parmaklı formda olabilir. Tabaka tiplerinden hareketle bazı tabaka özelliklerinin belirlenebileceğini söylemek mümkündür. Bu özel tabaka tipleri Şekil 1.7' deki gibi karakterize edilebilir. Endüstride E ve F tipi yani tek fazlı borür tabakası ( $Fe_2B$ ) tercih edilmektedir. Bu tabakalar, düşük kırılma değeri sahtir ve ana malzemeye, borlu tabakanın özelliklerini olumsuz yönde etkilemeden; borlama sonrası ısıl işlemler uygulanabilir (Matuschka 1980).

Borür tabakasının özelliklerini bu sınıflama ile belirlemek mümkün değildir. Bu değerlendirme sistemi, borür tabakasının görünümünü ve borlama işleminin uygunluğuna karar vermeyi sağlar (Matuschka 1980).

**Tablo 1.7** Fe<sub>2</sub>B ve FeB'nin bazı özellikleri (Baçkır 2002)

Özellik	Fe <sub>2</sub> B	FeB
Ergime Sıcaklığı (°C)	1390	1550
Mikrosertlik (HV)	1600-2000	1600-2400
Uzama Katsayısı (1000°C)	8.10 <sup>-6</sup> 1/K	10-16.10 <sup>-6</sup> 1/K
Termal İletkenlik (1000°C)	0,2-0,3 W/(cm°C)	0,1-0,2 W/(cm°C)
Curie Sıcaklığı (°C)	742	325
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	7	6,3
Kristal Sistem	Tetragonal hacim merkezli	Ortorombik
Kafes Parametreleri (Å)	a: 5,078, b: 4,249	a: 4,053, b: 5,495, c: 2,496

**Şekil 1.7** Borür tabakası çeşitleri (Matuschka 1980)

- A: Tek fazlı tabaka, sadece FeB
- B: İki fazlı tabaka, Fe<sub>2</sub>B ve FeB
- C: İki fazlı tabaka, B' dekinden daha ince bir FeB tabaka
- D: İki fazlı tabaka, yalnız FeB dişleri izole edilmiş
- E: Tek fazlı tabaka, sadece Fe<sub>2</sub>B, kuvvetli dişler
- F: Tek fazlı tabaka, sadece Fe<sub>2</sub>B, daha az kuvvetli dişler
- G: Fe<sub>2</sub>B dişli özel tabaka
- H: Fe<sub>2</sub>B dişleri çok izole edilmiş tabaka
- I: Geçiş bölgesi
- K: Bozulmuş tabaka
- L: İki fazlı tabaka; düz, yani parmaksı değil
- M: Tek fazlı tabaka, FeB ve Fe<sub>2</sub>B, düz

Borür tabakasının kalınlığı, borlanan parçanın kullanım şartlarına göre; borlanan malzemenin cinsi, borlayıcı ortamın bileşimi, işlem süresi ve borlama sıcaklığına bağlı olarak belirli sınırlar dâhilinde istenilen kalınlıkta ayarlanabilir. Genellikle eroziv aşınmaya maruz tabakaların, kalın (örnek olarak, seramik endüstrisinde kullanılan pres takımları vb), adhesiv aşınmaya maruz tabakaların, ince (zımba takımları vb) olması istenir (Uzun 2002).

Teorik olarak, adheziv aşınmayı önlemek için 5 µm' lik tabaka kalınlığı yeterlidir. Ancak, alaşımsız ve az alaşımlı çeliklerde olduğu gibi tabaka geometrisinin parmaklı olduğu durumlarda, bu kalınlıkta bir tabaka elde etmek mümkün değildir. Takım çeliklerinde, tabaka kalınlığının 75–100 µm' yi geçmemesi önerilir. Tabaka kalınlığı arttıkça tabakanın gevrekliği de artacağı için, özellikle çift fazlı ( $Fe_2B+FeB$ ) tabakalarda, tabakanın çok kalın olmamasına dikkat edilmelidir. Alaşım elementlerinin oranı arttıkça çelik içerisine bor yayılımı güçleşmektedir. Ayrıca, yüksek alaşımlı çeliklerde oluşan borür dişleri daha yoğun, daha üniform ve kapalıdır (Uzun 2002).

Borlanan malzemenin cinsi, borlayıcı ortamın bileşimi, işlem şekli, sıcaklık ve süre borür tabakasının kalınlığına etki eden faktörlerdir. Teorik olarak tabaka kalınlığı sınırsızdır. Bu ise işlem sıcaklığı ve süresinin artmasıyla mümkündür. İşlem sıcaklığının Fe-B denge diyagramındaki ötektik sıcaklığın ( $1177^{\circ}C$ ) altında olması gerekir. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda bölgesel ergimeler meydana gelerek malzeme yüzeyini bozabilir (Bozkurt 1984). Zaman faktörü ise, belli bir değeri aşması ekonomik açıdan uygun olmayacaktır (Ayter 2005).

Alaşımsız çeliklerde borlama şartlarına bağlı olarak tek fazlı ( $Fe_2B$ ) ya da ( $FeB+Fe_2B$ ) borür tabakası oluşur. Borlama ortamındaki bor miktarı  $Fe_2B$  fazı oluşumu için gerekli olan miktardan fazla ise uygun sıcaklık ve zaman şartlarında borür tabakasında  $Fe_2B$  fazına ilaveten  $FeB$  fazı da oluşur (Palombarini ve Carbuicchio 1987). Alaşımlı çeliklerde ise bunlara ilaveten alaşım elementine bağlı olarak  $Cr_2B$ ,  $TiB_2$ ,  $NiB_2$ ,  $CoB$  gibi bileşiklerden biri veya birkaçı oluşabilir (Goeuriot 1982).

İki fazlı borür tabakalarında, farklı genişleme katsayılarına sahip iki faz arasında önemli ölçüde iç gerilmeler meydana gelir. Borlama işleminden sonra parçaların soğuması sırasında Fe<sub>2</sub>B fazında basma, FeB fazında ise çekme gerilmeleri meydana gelir. Bu gerilmeler, hızlı soğutulma ya da mekanik zorlanmalar esnasında çatlak oluşumuna sebep olabilir (Selçuk 1994).

### **1.3.3.2. Geçiş Bölgesi**

Geçiş bölgesi, borlanmış metal borür tabakası ile ana metal arasındaki ara bölgeyi tanımlar. Geçiş bölgesi ile ilgili farklı görüşler olmakla birlikte yaygın olan görüş; borlama sonucu oluşan borür tabakasında karbon çözünemediği için metalin yapısında bulunan karbon, bor difüzyonu sırasında yüzeyden iç kısımlara itilir. Bunun sonucu olarak karbonca zengin geçiş bölgesi oluşur (Matuschka 1980).

Geçiş bölgesi hakkında başka bir görüş; bu bölgedeki borun çeliklerde alaşım elementi olarak gösterdiği etkiyi göstermesinden kaynaklanan farklı özelliklere sahip olmasıdır. Bu bölgenin ısı işlem hassasiyeti, borun ostenit dönüşümünü yavaşlatmasındandır. Ayrıca bu bölgede gözlenen ostenit tane irileşmesi de, borun alaşım elementi olarak çeliklerde gösterdiği tipik özelliklerdendir (Bozkurt 1984).

Geçiş bölgesinin kalınlığı konusunda da farklı değerlendirmeler mevcuttur. Bazı araştırmacılar geçiş bölgesi kalınlığını borür tabakasının 3–4 katı olarak bildirirken, bazı araştırmacılar bu oranın 10–15 kat olduğunu (Uzun 2002) tespit etmişlerdir.

### **1.3.4. Bor tabakası özellikleri**

#### **1.3.4.1. Bor tabakasının kalınlığı**

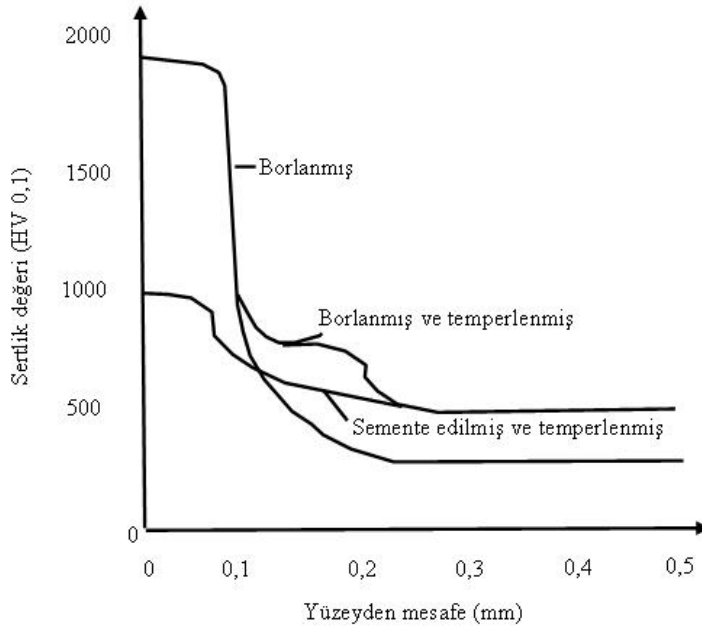
Teorik olarak tabaka kalınlığı sınırsızdır. Bu da işlem süresinin ve/veya sıcaklığın artması sayesinde olur. İşlem sıcaklığının Fe-B denge diyagramındaki ötektik sıcaklığının (1177°C) altında olması gerekir. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklar bölgesel ergimeler yaparak malzeme yüzeyinin bozulmasına neden olur. Zaman faktörünün de ekonomik yönden mantıksal bir değeri geçmemesi gerekmektedir (Yünker 2000).



Borlanmış tabakanın kırılma direnci, kalınlık arttıkça artar. Dolayısıyla çelik esaslı malzemeler için 20–200  $\mu\text{m}$ ' lik kalınlık, kullanma şartlarına, su verilip verilmeme ve borlanan malzeme cinsine göre ayarlanır. Kırılma direnci yönünden alaşımlı çeliklerde maksimum 100 $\mu\text{m}$ , alaşımsız çeliklerde 15–200  $\mu\text{m}$  kalınlığa; hatta darbesiz aşınmaya maruz kalacak parçalarda su verme koşulu ile 400  $\mu\text{m}$ ' lik kalınlığa kadar çıkılabilmektedir. Borlama sıcaklığının artması, tabaka kalınlığını arttırmasının yanında poroziteyi de arttırarak tabakanın gevrek olmasına neden olur (Bozkurt 1984).

### 1.3.4.2. Sertlik

Borlamanın en büyük etkisi sertlik üzerine olup, ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak borür fazlarına bağlıdır. FeB fazı, Fe<sub>2</sub>B fazından daha sert ve gevreklerdir (Atik 1997). Borlama ile elde edilen sertlik; karbon çeliklerinde 1600–2000 HV, alaşımlı çeliklerde 2100–2800 HV, titanyumda ise 3000 HV civarındadır (Bozkurt 1984). Şekil 1.8' de borlu ve sementasyonlu tabakalardaki sertlik dağılımları görülmektedir.



Şekil 1.8 Borlu ve sementasyonlu tabakalardaki sertlik dağılımları (Matuschka 1980)

Sertlik ölçümleri mikrosertlik yöntemi ile Vickers veya Knoop uçları kullanılarak yapılır. Ölçümlerde büyük yüklerin kullanılması çatlama ve dökülme gibi nedenlerden

dolayı hatalı sonuçlara sebep olur. Ayrıca büyük yükler tabakaların bozulmasına ve tabakanın altındaki bölgenin deformasyonuna sebep olabilir (Matuschka 1980).

Sertlik yönünden borlu tabakanın diğer bir özelliği de, borlamadan sonra yapılan ısı işlemlerin sonunda sertliğini korumasıdır (Atik ve Meriç 1999).

Tablo 1.8’ de borlama ve diğer metotlarla sertleştirilmiş tabakaların sertlik kıyaslamaları yapılmıştır.

**Tablo 1.8** Borlama ve diğer işlemlerle elde edilmiş yüzeylerin sertlik değerleri  
(Bozkurt 1984)

Malzeme	Mikrosertlik (kg/mm <sup>2</sup> )
Nitrülenmiş yüzey	610-940
Gaz ile karbürize edilmiş yüzey	700-820
Sert krom kaplı yüzey	950-1100
WC+%13 Co sinter malzeme	1300
Borlu karbon çeliği	1600
Borlu AISI H13 (X40CrMoV5-1) çeliği	1800
Borlu AISI A2 (X100CrMoV5-1) çeliği	1900

#### 1.3.4.3. Aşınma

Sürtünme katsayısı ve aşınma dayanımı bir sistem özelliği olmakla birlikte, genellikle yüksek aşınma direnci için malzemenin aşındırıcıdan daha sert ve sürtünme katsayısının düşük olması istenir. Borlama ile bu özellikler büyük ölçüde sağlanır. Borlanmış yüzeylerde PTFE’ e yakın sürtünme katsayısı elde edilebilmektedir (Atik 1997).

Borun oksijene karşı ilgisi fazla olduğundan yüzeyde koruyucu, ince bir oksit filmi oluşturmakta, bu oksit filmi yüzeyde yağlayıcı vazifesi görerek sürtünme katsayısını düşürmek suretiyle yüzeylerin birbirine kaynamasını önlemektedir. Tablo 1.9’ da bazı malzemelerin borlanmış ve borlanmamış durumdaki sürtünme katsayıları verilmiştir (Bozkurt 1984).

**Tablo 1.9** Bazı malzemelerin borlanmış ve borlanmamış durumdaki sürtünme katsayıları (Bozkurt 1984)

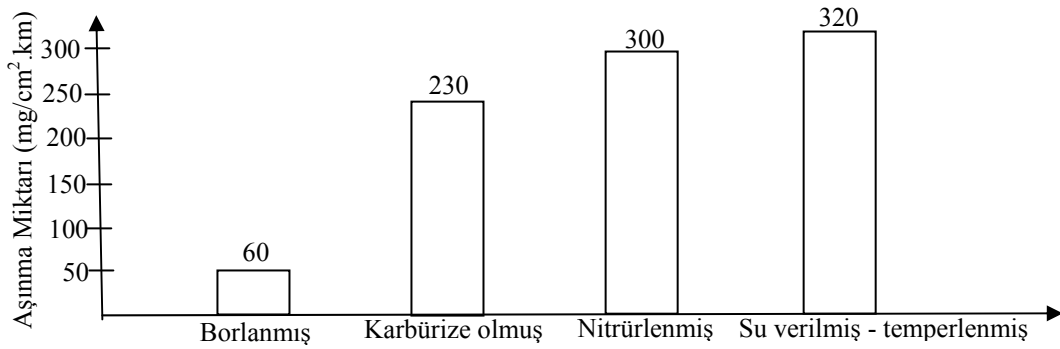
Malzeme	Sürtünme Katsayısı	
	Borlu	Borsuz
Düşük karbonlu çelik	0,17–0,19	0,585–0,595
Takım çeliği	0,07–0,04	0,16–0,18
WC+Co sinter malzeme	0,1939–0,2335	0,2617–0,2773

Darbesiz aşınmanın yer aldığı uygulamalarda, borla yüzeyi sertleştirilmiş malzemeler başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Borlu takım çeliğinin, su ile sertleştirilmiş durumdan 3 kat daha aşınmaya dayanıklı olduğu söylenmektedir (Bozkurt 1984). Paslanmaz çelik için derin çekme kalıbı 60 HRC sertlik ve yüzeyi 0,005–0,008 mm sert kromla kaplı AISI A6 çeliğinden yapıldığında tahrip olmadan 200 parça, aynı çelik yüzeyi borlandığı zaman ise 50000 parça üretildiği iddia edilmektedir (Atik 1997).

Borlanmış çeliklerin aşınma dirençleri sementasyon, nitrürasyon, sert krom kaplama ve su vererek sertleştirme ile elde edilen yüzeylere göre oldukça yüksektir. Şekil 1.9' da bu durum görülmektedir. Kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı, sementasyon ile sertleştirilmiş tabakanın yumuşamasına sebep olurken borlu tabakaya etki etmez. Borlu tabakanın 900-1000°C sıcaklıklara kadar sertliğini koruması, aşınma direncini yüksek sıcaklıklarda da muhafaza ettirebilmektedir (Şahin 1999).

#### 1.3.4.4. Korozyon özellikleri

Borür tabakasının suya ve atmosfere karşı korozyon direnci düşük olmasına karşılık, bazı asitlere ve sıvı metallere karşı iyi direnç gösterir. Özellikle HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> gibi asitlerle alüminyum, kurşun ve çinko gibi metallerin sıvı banyolarında borlu malzemelerin korozyon direnci çok yüksektir (Matuschka 1980). Yüksek kromlu çeliklerde borlama ile koruyucu krom oksit yerine daha az koruyucu olan krom borür meydana gelir. Bu bakımdan yüksek alaşımlı malzemelerin borlanmasıyla daha iyi korozyon özelliği her zaman elde edilmeyebilir (Bozkurt 1984).



**Şekil 1.9** Düşük karbonlu çelikte farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin aşınma davranışları (Şahin 1999)

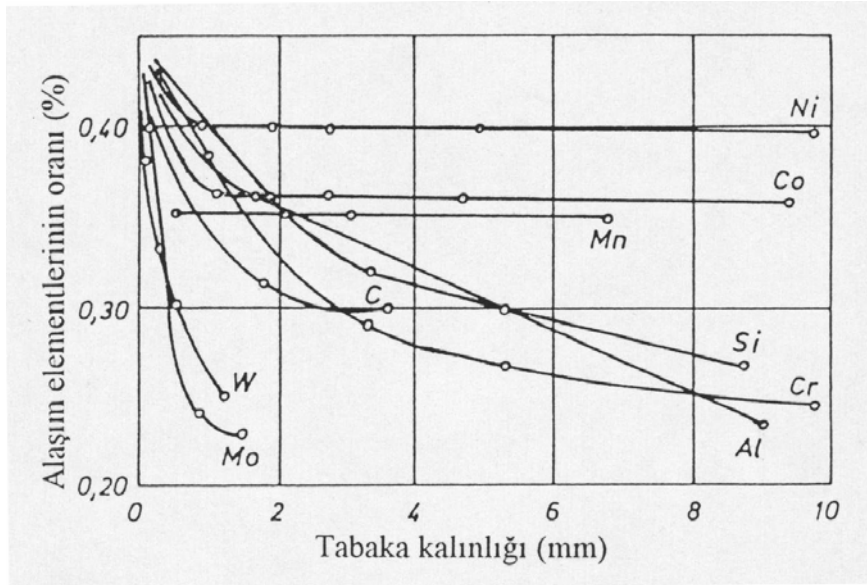
#### 1.3.4.5. Bor tabakasının özelliklerine etki eden faktörler

Borlama esnasında uygulanan yöntem, kullanılan borlama maddesi, borlanan malzemenin cinsi ve işlem parametreleri, oluşan borür tabakasının şekline ve özelliklerine etki eden faktörlerdir. Metal yüzeyinde borlama işlemi ile oluşturulan borür tabakasının kalınlığını etkileyen faktörler borlayıcı ortamın bileşimi ve konsantrasyonu, işlem sıcaklığı ve süresi, alt tabaka metal bileşimidir (Fichtl 1981).

#### Alaşım Elementlerinin Borlamaya Etkisi

Genel olarak bütün alaşım elementlerinin ilavesi, tabaka kalınlığında azalmaya sebep olduğu tespit edilmiştir (Matuschka 1980). Alaşım elementleri bor difüzyonunu azaltmakta, ana malzeme ve borür tabakasının özelliklerini değiştirmektedir (Palombarini ve Carbucicchio 1987). Şekil 1.10'da alaşım elementlerinin borür tabakası kalınlığına etkisi görülmektedir.

Alaşım elementlerinin bir diğer etkisi de, borür tabakasının sertliğini arttırması ve Fe-B denge diyagramındaki ötektik noktayı aşağıya kaydırmasıdır. Fe-B sisteminde %1C, ötektik sıcaklığını 50°C kadar düşürmektedir (Taşçı 1993).



**Şekil 1.10** Alaşım elementlerinin borür tabakası kalınlığına etkisi (Matuschka 1980)

Ana malzeme içerisindeki karbon oranının artması Şekil 1.10' dan da anlaşıldığı gibi tabaka kalınlığını azaltmaktadır. Karbon Fe<sub>3</sub>C ve Fe<sub>2</sub>C gibi fazlarda çözünmediğinden, karbon fazlalığının sonucu borür tabakası altında geçiş bölgesi meydana gelmektedir (Matuschka 1980). Bu bölgedeki karbonun, Fe<sub>3</sub>C, Cr<sub>3</sub>C, Fe<sub>6</sub>C<sub>3</sub> gibi karbürler oluşturarak borlama mekanizmasını etkilediği ve borür tabakasını daha sık ve sert yaptığı düşünülmektedir. Artan krom miktarı tabaka kalınlığında ve ara yüzeyde oluşan girintili çıkıntılı yapıda azalmaya sebep olur. %4Cr içeren çeliklerde kolonsal karakterde ve 65-95 µm kalınlıkta borür tabakası elde edilirken, %12 Cr içeren çeliklerde ise 65 µm kalınlıkta daha düz karakterde borür tabakası elde edilmiştir. %26 Cr içeren çeliklerde ise borür tabakasının kalınlığı genel olarak 5 µm'yi aşmamaktadır (Şahin 1999).

Mangan ve nikel borür tabaka kalınlığını fazla etkilememektedir (Matuschka 1980). Buna karşılık yüksek nikel oranı borür tabakasının kolonsal yapısını azaltmakta, yüksek poroziteyi ve kötü mekanik özellikleri beraberinde getirmektedir (Bozkurt 1984).

Silisyum, borür tabakası sertliğini etkilemez, ancak geçiş bölgesinin sertliği Si artışı ile artar. Silisyum, borür tabakasının gevrekliğini arttırdığı için %1'in üzerinde silisyum içeren çelikler borlamaya uygun değildir (Fichtl 1981).

Wolfram, molibden, vanadyum miktarının çelikte artmasıyla tabaka kalınlığı azalır ve kolonsal yapı düzleşir. Borlanacak malzemelerde vanadyum miktarının %0,15' i geçmemesi istenir (Matuschka 1980).

Titanyum, FeB'de çözünür ve FeB'nin sertliğini artırır. Ayrıca geçiş bölgesinde tane irileşmesini önleyici rol oynar (Bozkurt 1984).

#### **1.3.4.6. Bor tabakasındaki artık gerilmeler**

Borür tabakasının mekanik özellikleri artık gerilmelerle ilgilidir. Isıl işlem, malzeme cinsi ve borlama şartlarına bağlı olarak, borür tabakası ve tabaka ana metal ara yüzeyinde iç gerilmeler oluşur. Tabakanın faz yapısı (çift fazlı Fe<sub>2</sub>B+FeB, tek fazlı FeB) ve geometrisi (girintili veya düz oluşu), iç gerilmelerin tabakada yapacağı hasara etki etmektedir. İdeal tabaka için tek faz (Fe<sub>2</sub>B) ve iç gerilmenin daha geniş bir alana yayılması için tabaka geometrisinin girintili çıkıntılı olması arzu edilmektedir. Tabakanın Fe<sub>2</sub>B yanında FeB de içermesinin sakıncası, iki tabakada da farklı yönlenmiş iç gerilmelerin oluşmasıdır. İç gerilmeler Fe<sub>2</sub>B'de basma, FeB'de ise çekme gerilmesi şeklindedir. Fe<sub>2</sub>B ile FeB arasında -90 kg/mm<sup>2</sup> kadar bir basma gerilmesi oluşabilmektedir. Bu tür gerilmeler tabakanın çatlamasına ve FeB tabakasının dökülerek malzeme yüzeyinin bozulmasına neden olur. İç gerilmelerin nedeni FeB, Fe<sub>2</sub>B ve ana malzemenin termal uzama katsayılarının farklılığıdır (Bozkurt 1984).

#### **1.3.5. Borlanmış malzemelerin ısıl işlemleri**

Borür tabakasının Fe<sub>2</sub>B fazı genişleme katsayısı çelik grubu malzemelerin ortalama genişleme katsayılarına yakın olduğundan, bu tür malzemelere borür tabakasına zarar vermeden alışlagelmiş metotlarla ısıl işlem uygulanabilmektedir. Ostenitleme, 1150°C'nin üstüne çıkmama koşulu ile nötr atmosferde yapılmalıdır (Bozkurt 1984).

Yüksek basınçlara maruz kalacak borlanmış parçalar ısıl işleme tabi tutulmadan kullanılmamalıdır. Borlu tabakanın altı yumuşaksa, lokal basınçlar yüzünden tabaka çökmesi ve dökülmesi gibi etkiler görülebilir (Yünker 2000).

Bütün difüzyon yöntemlerinde olduğu gibi borür tabakasının oluşumunda da bir hacim artışı olmaktadır. Boyut değişimi, tabaka kalınlığı ve kullanılan malzemeye bağlıdır. Boyut artışı genel olarak tabaka kalınlığının %20'si kadardır (Biddulph 1977). Alaşımli çeliklerde ise bu değer %80'lere kadar çıkabilmektedir (Yünker 2000).

### **1.3.6. Borlama işleminin getirdikleri**

Borlu tabakalar, klasik olarak sertleştirilmiş tabakalara göre özel avantajları olan çok sayıda karakteristik özelliğe sahiptir. Borlu tabakanın temel bir avantajı, yüksek ergime noktalı bileşik fazların, yüksek sertlik değerlerine sahip olmasıdır. Borlanmış çeliklerin diğer çeliklerden ve diğer sert malzemelerden yüzey sertlik değerleri bakımından karşılaştırılması Tablo 1.10'da verilmiştir. Bu tablo, karbon çelikleri üzerinde uygulanmış olan borlu tabakanın sertliğinin, uygulanmakta olan klasik yüzey sertleştirme işlemleri ile üretilenlerden çok daha iyi olduğunu açıkça gösterir. Borlu tabakaların sertliği, sertleştirilmiş olan takım çeliği ve sert krom kaplanmış parçaların sertliğinden daha fazladır. Yüksek yüzey sertliği ve borlu tabakanın düşük sürtünme katsayısı temel aşınma mekanizmalarını (yapışma, sürtünme oksidasyonu vb) yavaşlatır (Sinha 1991).

Borlama işlemi ile gerçekleştirilen önemli bir avantaj, ürünlerin ve takım ömrünün arttırılmasıdır. Borlama işlemi ile makinelerde oldukça pahalı olan parçalar yerine daha ucuz olan daha iyi performans gösteren borlanmış parçalar kullanıldığında makinelerin maliyetlerinde azalma meydana gelmektedir. Borlama işleminin yaygın olarak kullanıldığı ülkelerde, makinelerin pahalı orijinal parçaları borlanmış parçalarla değiştirilmektedir. Bu sayede büyük maddi kazançlar sağlanmaktadır (Andrew 1974).

Saygın (2006) yaptığı çalışmasında AISI 1020 çeliğinde yaptığı değişik özelliklerdeki borlama işlemlerinin hepsinin eğilme-yorulma dayanımında azalma olduğunu gözlemlemiştir.

Çelikler ve demir olmayan alaşımlardan, borlama işlemi sayesinde malzemedeki beklenen özelliklerin çok üzerinde özellikler kazanan parçaların üretilmesi mümkün

olmaktadır. Aynı zamanda borlama işlemi WC'ün sertliğine yakın bir sertlik ve PTFE'in sürtünme katsayısına yakın bir sürtünme elde edilmesini sağlar (Andrew 1974).

**Tablo 1.10** Diğer ısıl işlemler ve sert malzemeler ile borlanmış çeliklerin tipik yüzey sertliğinin karşılaştırılması (Sinha 1991)

Malzeme	Mikrosertlik, HV
Borlu yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 takım çeliği	1800
Borlanmış X100CrMoV51 (AISI A2) çeliği	1900
Sertleştirilmiş ve temperlenmiş X100CrMoV51 (AISI A2) takım çeliği	630-700
Yüksek hız çeliği	900-910
Nitrürasyon çelikleri	650-1700
Karbürleşmiş düşük alaşımlı çelikler	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
B <sub>4</sub> C	5000
SiC	4000
TiC	3500
Elmas	> 10000

Borlanmış malzemelerin avantajları ve dezavantajları (Sinha 1991, Baştürk ve Erten 2006):

Avantajları:

- Yüksek sertlik ve aşınma dayanımı,
- Nitrürleme ve sementasyon ile karşılaştırıldığında borlanmış tabaka sertliğini yüksek sıcaklıklarda da koruması,
- Bu yöntemle çok geniş bir aralıktaki çeliklerin borlanabilmesi,
- Borlanmış yüzeyler 850°C'ye kadar oksitlenme direncine sahip olması.



Dezavantajları:

- Gaz karbürleme ve plazma nitrürleme işlemi ile kıyas edildiğinde, esnek olmaması ve yoğun işçilik gerektirmesi bu yöntemin daha pahalı olduğunu ortaya çıkarmaktadır,
- Borlama sonucu az da olsa hacimsel boyut değişimi,
- Borlanmış malzeme yüzeyinden hassas işleme gerektiğinde, bu sadece elmas lepleme ile yapılması gerekliliği (konvansiyonel taşlama yöntemleri borlanmış tabakaların çatlamasına yol açabilmektedir),
- Genel olarak, borlanmış çelik alaşımlarının karbürlenmiş ve nitrürlenmiş çeliklere göre dönmeye çalışan ve noktasal yorulmaya çalışan parçaların dayanımlarının düşük oluşu (bu sebeple dişlilerin ve vidaların borlanması oldukça sınırlıdır),
- Çoğunlukla borlamadan sonra borlanmış tabakanın bütünlüğünü korumak için takımları temperlemek ve/veya sertleştirmek gerekliliği.

## 2. LİTERATÜR BİLGİSİ VE BORLAMA İŞLEMİNİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Borlama konusunda Matuschka (1980), *Boronizing* adlı bir kitap yazmıştır. Bu kitapta, borlama, bor tabakası özellikleri ve borlama işlemi uygulamalarına örnekler yer almaktadır. 1895–1980 yılları arasında yapılmış çalışmaların geniş bir araştırmasını yaparak derlemiştir.

Bindal (1991) çalışmasında 3 ticari karbon çeliği (AISI 1020, 1040 ve 1050) ile özel olarak hazırlanmış 6 adet az alaşımlı çelik malzemeleri 940°C’ de değişik sürelerde borlayarak fiziksel ve kimyasal bazı parametrelerin değişimini incelemiştir. Borlama süresi ile borür tabakası kalınlığının azalan bir hızla arttığı, sertlik ve kırılma tokluğu gibi mekanik parametrelerin borlama süresinden çok oluşan borür bileşiğinin cinsiyle ilişkili olduğu sonucuna ulaşmıştır. Ayrıca sertlik ve kırılma tokluğu, Mn ilavesi ile Cr ilavesine göre nispi bir artış gösterdiğini ve korozyon davranışlarının da alaşım elementlerinin ilavesi ile iyileştiğini Mn’ ın bu hususta daha etkili olduğunu tespit etmiştir.

Tezcan (1996) borlama işleminin endüstriyel uygulamaları hakkında bir literatür taraması yapmıştır. Çalışmasında ülkemizde borlamanın laboratuvar ortamında ve deneysel olarak çalışıldığından, ancak endüstriyel alanda yaygın kullanılmadığından bahsetmektedir.

Selam (1996) çalışmasında borlanmış gri dökme demirlerin aşınma davranışlarını araştırmıştır. Borlama işlemlerini sıcaklığı sabit tutarak süreleri değiştirme ve süreyi sabit tutarak sıcaklığı değiştirme şeklinde yapmıştır. Borlama neticesinde borlanmış numunelerde aşınma dayanımının yükseldiğini tespit etmiştir. Aşınma deneylerinde kayma yolunun artmasıyla sürtünme katsayısının da artış gösterdiğini belirlemiştir.

Selçuk (1994) çalışmasında AISI 1020 ve AISI 5115 çeliklerinin sürtünme aşınma davranışlarını incelemiştir. AISI 1020 çeliğinin düşük yüklerde sementle edilmiş AISI 5115 çeliğinin yerine kam mili ve diğer kullanım alanlarında kullanılabileceği sonucuna ulaşmıştır.

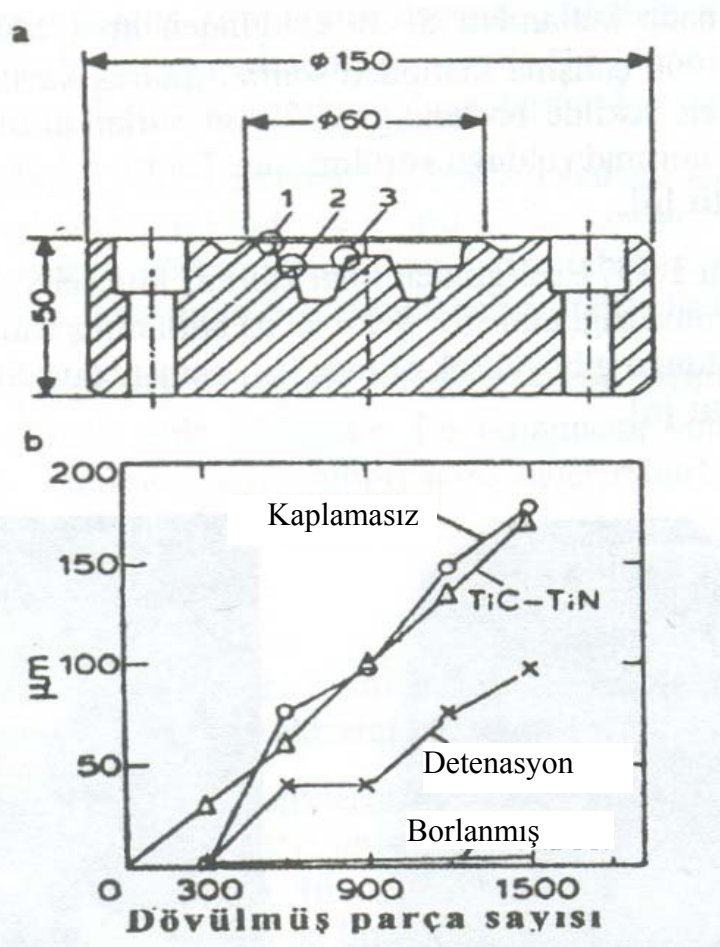
Akgündüz (1991) “Çelikte Alaşım Elementi Olarak Bor ve Borlama ile Yüzey Sertleştirme” isimli çalışma yapmış ve borlamanın yüksek aşınma dayanımı, düşük sürtünme katsayısı, asitli ortamlarda korozif dayanım ve yüksek sıcaklıklarda sertliği muhafaza etme konularında büyük üstünlük sağladığını belirtmiştir.

Karaman (2003), “Endüstriyel Borlama ve Tekstil Endüstrisinde Bir Uygulama” isimli çalışma yapmıştır. Çalışmasında, ülkemizde ve dünyada borlama işlemi ile ilgili firmaları araştırmış ve ticarî borlama malzemeleri hakkında bilgiler vermiştir. Ayrıca S235 (St 37) çeliğinden imal edilmiş iplik kılavuzlarının borlama ile kullanım ömürlerinin 8 kat arttırılabileceğini ifade etmiştir.

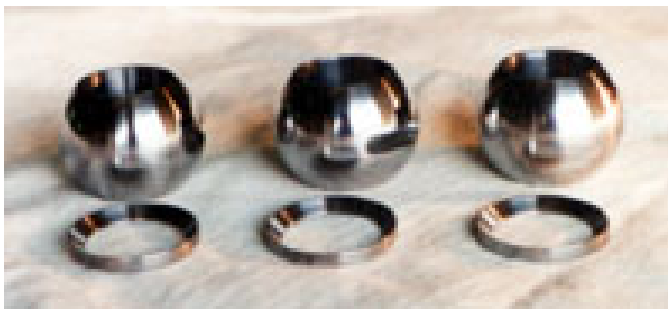
Genel vd (2002) çalışmalarında AISI W1 malzemesinin değişik sıcaklık ve sürelerde borlanmasını, yapay sinir ağları metodunu kullanarak karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, bu yöntemle borlama özellikleri hakkında %95 oranında tahmin yapılabileceği sonucuna ulaşmışlardır.

30MnCrTi5 (En18A) malzemesini eğmek üzere, X32CrMoV33 (BH10) çeliğinden yapılmış bir eğme kalıbının (Şekil 2.1), çeşitli radyüslerinin üzerindeki aşınmalar ölçülmüş ve borlamanın aşınmayı azaltıcı en etkili yöntem olduğu tespit edilmiştir (Nair ve Karamış 2000).

Borlama yoluyla sertleştirilen küresel valf parçalarında abrasif aşınmaya karşı son derece etkin koruma sağlamıştır. Bu tür valfler (Şekil 2.2) petrol endüstrisinde olduğu gibi yüksek oranda katı abrasif tanecik içeren gaz ya da sıvıları taşıma sistemlerinde kullanılmaktadır (Hunger ve Trute 1994).



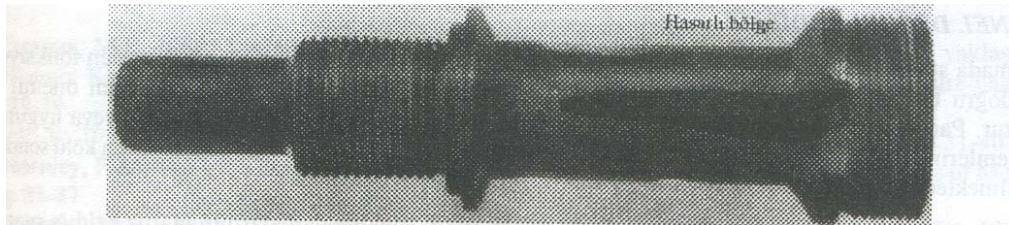
Şekil 2.1 Eğme kalıbı (Nair ve Karamış 2000).



Şekil 2.2 Borlanmış küresel valf ve metal sızdırmazlık elemanları (Hunger ve Trute 1994)

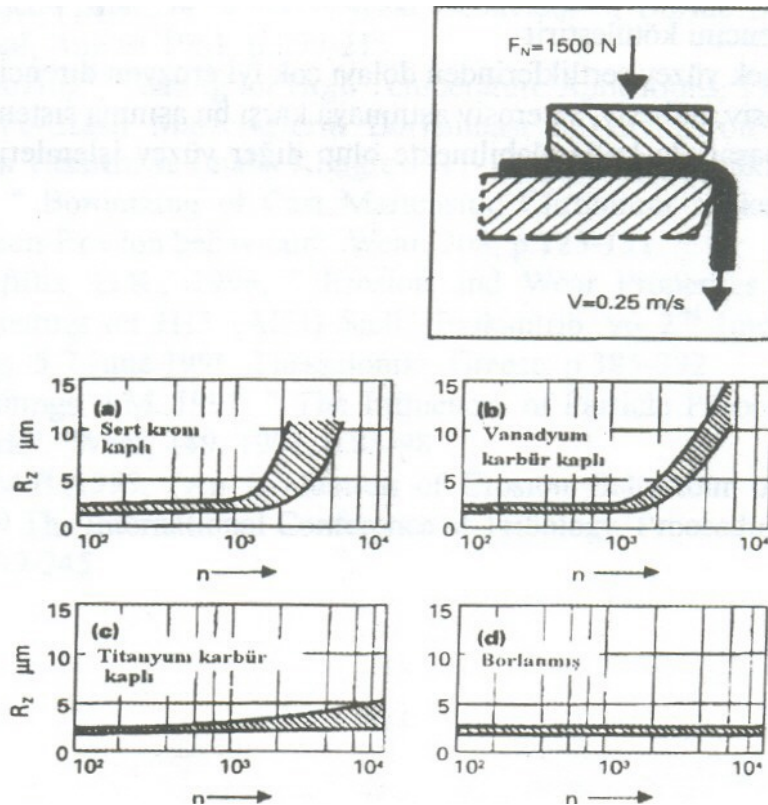
42CrMo4 (AISI 4140) çeliğinden yapılan ve termal yöntemle 50–52 HRC sertleştirilen bir püskürtme lülesi (Şekil 2.3) incelenmiştir. Lülede 7 bar basınçta ve 183 kg/h debide SiC tanecikleri taşınmaktadır. Lüleler bu şartlar altında yaklaşık 30 saat'lik bir kullanımdan sonra kullanılmaz hale gelmektedir. Bu lüle, borlanabilirlik bakımından uygun nitelikler taşıyan C20 (AISI 1020) çeliğinden imal edilerek 970°C'de

7 saat borlanmış ve yaklaşık 1400 HV<sub>0,06</sub> sertliğinde ve yaklaşık 70 µm kalınlığında borür tabakası elde edilmiştir. Aynı çalışma şartlarında püskürtme aşınmasına maruz kalan bu parçaların 600 saat'lik bir çalışma ömrüne ulaştığı tespit edilmiştir. Böylece, daha düşük dayanımlı bir malzeme ile 20 katlık bir ömür artışı sağlanmıştır (Nair ve Karamış 1999).



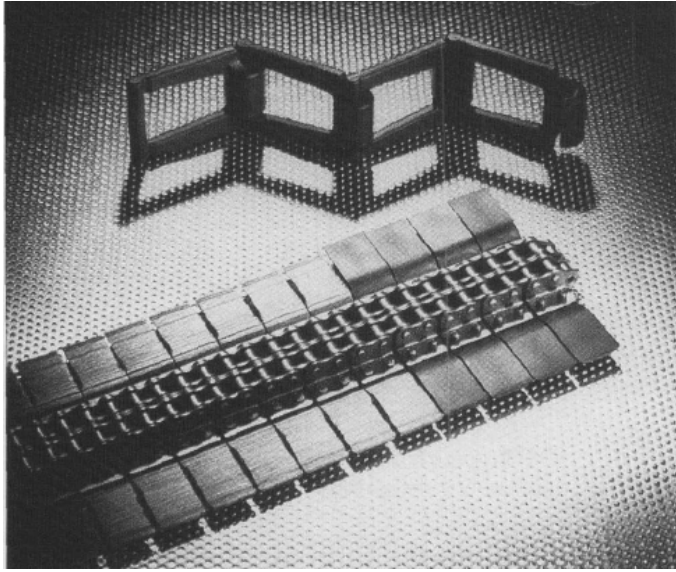
Şekil 2.3 Hasara uğramış püskürtme lülesi (Nair ve Karamış 1999)

Borlanmış yüzeylerin soğuk kaynak eğiliminin çok düşük olması adhesiv aşınmayı azaltmada iyi sonuçlar vermektedir. Şekil 2.4'de Farklı yüzey işlemi görmüş alüminyum derin çekme kalıbında işlem sayısına (n) bağlı olarak kalıp yüzey kalitesinin değişimi verilmiştir.



Şekil 2.4 Farklı yüzey işlemi görmüş alüminyum derin çekme kalıbında işlem sayısına (n) bağlı olarak kalıp yüzey kalitesinin değişimi (Hunger ve Trute 1994)

Mineral katkılı plastik granüllerin taşıma ekipmanları da borlanabilmektedir (Sinha 1991). Şekil 2.5’de borlanmış bir taşıma bandı görülmektedir.

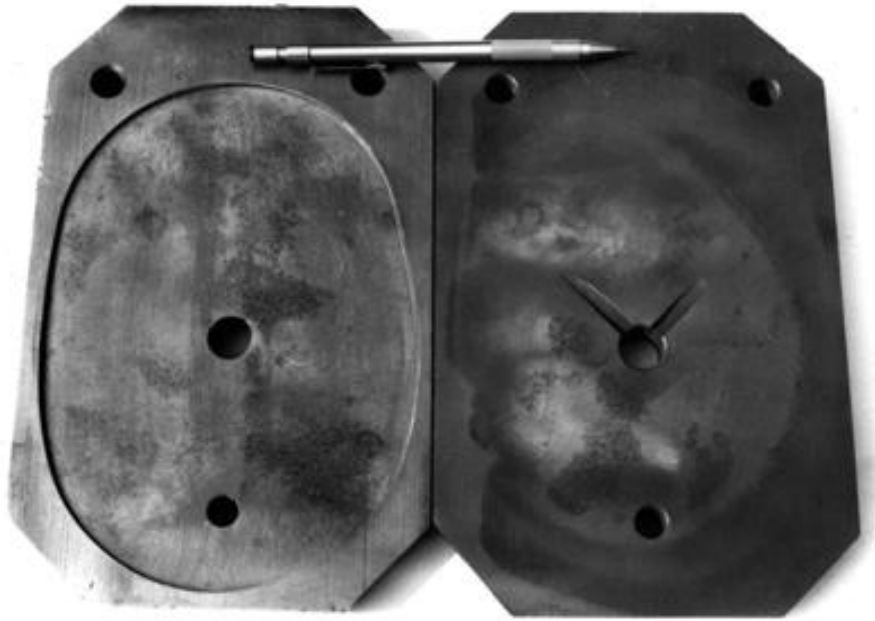


**Şekil 2.5** Borlanmış bir taşıma bandı (Anonymous 1998)

Volkswagen firmasının araçlarında kullanmış olduğu parçalarda borlama işleminin uygulanabilmesi üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Bu firma halen kullandığı yağ pompası dişlilerini Bortec firmasında borlama işlemi yaptırarak kullanmaktadır (Karaman 2003).

%3 Ni, %1 Cr ve %0,5 Mo alaşımli çelikten imal edilen tren vagonlarının alt düzen süspansiyon parçaları, 100.000 km yol kat edilmesi sonrası kullanım ömrünü tamamlamaktadır. Parçaların değiştirilmesi için bütün vagonu kaldırmak gerektiğinden, çok masraflı olmaktadır. Vagon alt düzen süspansiyon parçaları 900°C’ de 4 saat borlandığında, 200.000 km yol kat ettikten sonra halen kullanılabilir (Karaman 2003).

Şekil 2.6’ da abrasif tanecikleri sınıflandırmada kullanılan bir eleme cihazına ait yatak plakaları görülmektedir. SiC hazırlamada kullanılan St30 çeliğinden imal edilen yatak plakalarının yağlama kanalları, normal şartlarda 3000 saat çalışmadan sonra aşınarak kaybolmaktadır. Aynı plaka 200µm tabaka kalınlığı elde edilecek şekilde borlandığında çalışma ömründe 5 katlık bir artış sağlanarak 15000 saat çalışmıştır (Nair ve Karaman 2000).



**Şekil 2.6** Aynı işlem zamanına sahip borlanmış ve borlanmamış yatak plakaları (Nair ve Karamış 2000)

Cam sanayinde kullanılan X210Cr12 (1.2080) çeliğinden imal edilen mastörler (Şekil 2.7) borlandığında aşınma dirençleri artmakla birlikte ergimiş camın üzerine yapışmasına izin vermemektedirler. Ayrıca borlanmamış şişe kalıplarının ömrü 1 milyon şişe olmakta ve 8 saatte bir kalıpların yüzeyinde aşınmalar olduğu için değiştirilmek zorunda kalınmaktadır. Borlama sonrası aşınma miktarı azalan kalıpların kullanım ömürleri yaklaşık 4–5 kat artış göstermiştir (Karaman 2003).



**Şekil 2.7** Cam sanayi mastörleri (WEB\_1 2008)



Çimento sanayinde kullanılan fanlar (Şekil 2.8), transfer ettikleri havada aşırı miktarda aşındırıcı partikül bulunduğundan ötürü, kısa zamanda kanatları aşınmaktadır. Ancak, borlama işlemi sonrası çalışma ömürleri belirgin bir biçimde artış göstermiştir.



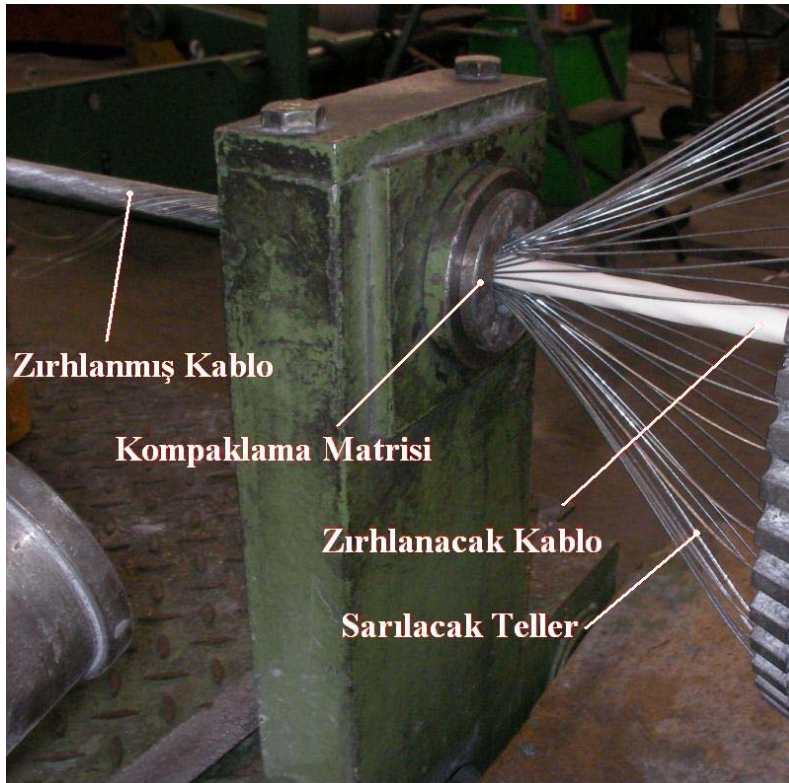
**Şekil 2.8** Çimento fabrikasında kullanılan fan (Karaman 2003)



### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 3.1. Deney Parçasının Seçilmesi

Bu çalışmada, borlama işlemi tel çekme sanayindeki, kablo üretiminde kabloya mukavemet kazandıran zırlama bölümünde çalışan kompaktlama matrislerine uygulanıp, sonuçları değerlendirilmiştir. Plastik kaplanmış bakır kablo üzerine galvanizlenmiş çelik tellerin bir araya getirilerek sarılması, zırlama işleminin bir bölümünü oluşturmaktadır. Kompaktlama matrisleri, çelik tellerin sarma işleminin yapıldığı kısımda bulunmaktadır. Parçanın çalışma esnasındaki pozisyonu Şekil 3.1’ de görülmektedir.

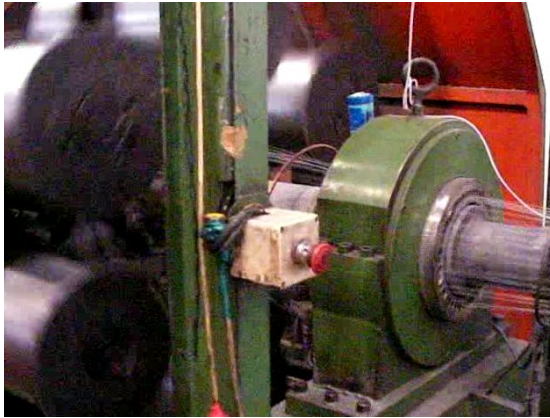


Şekil 3.1 Zırlama prosesi

Çalışmada bu parçanın seçilmesinin amacı, parçanın çalıştığı ortamın aşırı sürtünmeli ve yağlamasız olmasıdır. Böylece bor tabakasının kuru sürtünme şartlarında gösterdiği düşük sürtünme katsayısı ve yüksek sertlik değerinin avantajları görülmeye çalışılacaktır.

Zırhlamada kullanılan çelik teller, C10 (SAE 1010) malzemedan soğuk çekilerek üretilmiş ve sıcak daldırma ile galvaniz kaplanmış, çekme dayanımı  $350-500 \text{ N/mm}^2$  olan tellerdir.

Zırhlama işlemini gerçekleştirebilmek için kablo çekilirken çelik tellerin üzerine sarılması gerekmektedir. Sarılma işlemi ya zırhlanmış kablonun sarıldığı makaranın döndürülmesi, ya da çelik tellerin dönerek gelmesiyle mümkün olmaktadır. Fabrikada, iki türde de makine bulunmaktadır. Ancak, tellerin döndürülmesiyle işlemi gerçekleştiren makinenin kullanımının daha problemlili ve zor olduğu öğrenilmiştir. Tellerin dönerek sarılabilmesi için, galvanizli teller daha küçük makaralara sarılıp dönebilecek bir platforma monte edilmeleri gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmek, ayrıca zaman ve işçilik kaybıdır. Diğer yöntemde ise, galvanizli teller kangallar halinde durabilmekte ve kangaldan çekilerek kullanılabilir. Bu yöntemler Şekil 3.2' de görülmektedir.



a)



b)

**Şekil 3.2** Zırhlamada tellerin sarılım prensipleri

- a) Çelik tellerin makaralara sarılarak dönen platforma yerleştirilerek sarıldığı sistem
- b) Çelik tellerin düz geldiği ve zırhlanmış kablonun sarıldığı makaranın döndürüldüğü sistem

Bu çalışmada, parça malzemesi olarak bu tip çalışma şartlarında sık kullanılan üç adet takım çeliği ve borlama kabiliyeti daha iyi olan ve fiyat olarak da daha uygun bulunan sade karbonlu bir çelik deney malzemesi olarak seçilmiştir. Seçilen Malzemelerden Şekil 3.3' de resmi verilen parçalar CNC makinelerde işlettirilmiştir. Daha sonra bu parçalara borlama işlemi uygulanmış ve kompaktlama işleminde kullanılmıştır. Böylece bu parçalarda, borlama ile kullanım ömrünün uzatılıp uzatılamayacağı ve malzeme maliyetinin düşürülüp düşürülemeyeceği araştırılmıştır. Ayrıca, hangi malzemenin bu çalışma şartlarında borlamaya daha uygun olduğu değerlendirilmiştir.



a)



b)



c)

**Şekil 3.3** Yaptırılan numunelerin görünüşleri

### 3.2. Deneysel Parçası Malzemeleri

Deneysel çalışmalarda, bu parçaların yapımında sıklıkla kullanılan X165CrMoV12, X210Cr12 ve 60WCrV7 takım çelikleri ve C20 sade karbonlu çelik malzemelerden Şekil 3.3’ de görülen kompaktlama matrisleri imal ettirilmiştir. Tablo 3.1’de deneysel çalışmada kullanılan malzemeler ve en yakın standart karşılıkları verilmiştir.

**Tablo 3.1** Deneysel çalışmada kullanılan malzemeler ve en yakın standart karşılıkları

Numune No	Malzeme Numarası	EN Gösterimi	AISI/SAE Gösterimi
1	1.2601	X165CrMoV12	---
2	1.2080	X210Cr12	≈D3
3	1.2550	60WCrV7	≈S1
4	1.0402	C20	1020

Tablo 3.2’de deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri verilmiştir.

**Tablo 3.2** Deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri

DENEY MALZEMESİ	KİMYASAL BİLEŞİM (%)									
	C	Si	Mn	P (max)	S (max)	Co	Cr	Mo	V	W
X165CrMoV12	1,6	0,35	0,30	0,030	0,030	-	11,5	0,6	0,2	0,5
X210Cr12	2	0,20	0,30	0,030	0,030	-	11,5	-	-	-
60WCrV7	0,63	0,6	0,30	0,030	0,030	-	1,1	-	0,18	2
C20	0,21	0,4	0,5	0,045	0,045	-	-	-	-	-

### 3.3. Borlama Deneyleri

Literatürde, borlama işlemleriyle ilgili geniş bir çalışma alanı oluşmuştur. Bu kaynaklar incelendiğinde katı toz ortamda borlamanın uygulaması, diğer borlama yöntemlerine göre daha kolay ve borlandıktan sonra malzeme yüzeylerinin daha temiz elde edilebildiği görülmektedir. Bunun yanında endüstriyel uygulamalarda da bu yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sebeplerden dolayı, borlama yöntemi olarak, katı toz ortamda borlama metodu seçilmiştir. Ayrıca, yapılan çalışmalardan borlama işleminde en çok iki parametrenin, oluşan bor tabakasının kalınlığına ve sertliğine etki ettiği görülmüştür. Bunlar borlama sıcaklığı ve borlama süresidir.

Bu dört farklı çelik malzemeye, literatürdeki çalışmaların da değerlendirilmesi neticesinde, 6 saat süre ve 950°C sıcaklık şartlarında Ekabor®2 borlama tozu malzemesiyle katı ortamda borlama işlemi uygulanması kararlaştırılmıştır.

Borlama işlemi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarı'nda bulunan, Şekil 3.4'de resmi gösterilen, 1100°C sıcaklık kapasiteli, 3kW gücünde Nabertherm marka elektrikli ısıtma işlem fırınında, Manisa Salihli'de bulunan Vezneli A. Ş.'den temin edilen ve ticari borlamalarda en çok kullanılan Ekabor® 2 katı borlama tozları ile gerçekleştirilmiştir.



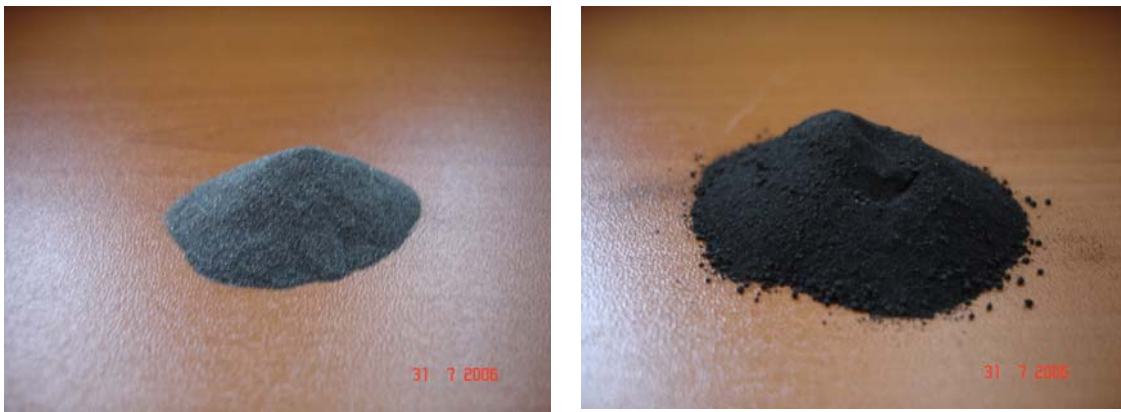
Şekil 3.4 Deneylerde kullanılan ısıtma işlem fırını



Fırın, atmosfere açık olarak çalıştığı için borlama işlemi özel borlama kutularında (Şekil 3.5) yapılmıştır. Bu kutular kapakları sıkıca kapatıldıktan sonra, kapakla kutu arasında kalan boşluğa toz doldurabilmek için kanallı olarak yaptırılmıştır. Daha sonra bu boşluğa Ekirit<sup>®</sup> tozu (Şekil 3.6.a) doldurularak borlama ortamının atmosferle ilişkisinin minimuma indirilmesi sağlanmıştır. Borlama işlemi için deney kutuları, içine numuneler yerleştirilerek etrafları ve numunelerin üzeri en az 1 cm kalınlıkta olacak şekilde Ekabor<sup>®</sup>2 (Şekil 3.6.b) tozu doldurularak hazırlanmıştır. Şekil 3.7’ de borlama için hazırlanmakta olan bir kutunun resmi görülmektedir.



Şekil 3.5 Borlama işleminde kullanılan kutular



(a)

(b)

Şekil 3.6 Borlama işleminde kullanılan ticari tozlar: (a) Ekirit<sup>®</sup> (b) Ekabor<sup>®</sup>2



**Şekil 3.7** Borlama için hazırlanmakta olan kutunun görünümü

Parçaların üzeri iyice örtüldükten sonra kutunun kapağı sıkıca kapatılmıştır. Daha sonra kapakla kutu arasındaki aralık, Ekirit® tozu ile örtülmüştür (Şekil 3.8).



**Şekil 3.8** Borlama için hazırlanmış kutu

Hazırlanan kutular 950°C deki fırının (Şekil 3.9) içerisine yerleştirilmiştir. Fırının kapağı kapatıldıktan sonra fırın 950°C' ye getirilmiş ve bu sıcaklıkta 6 saat kalması için ayarlanmıştır.



Şekil 3.9 Borlama için hazırlanmış 950°C deki fırın

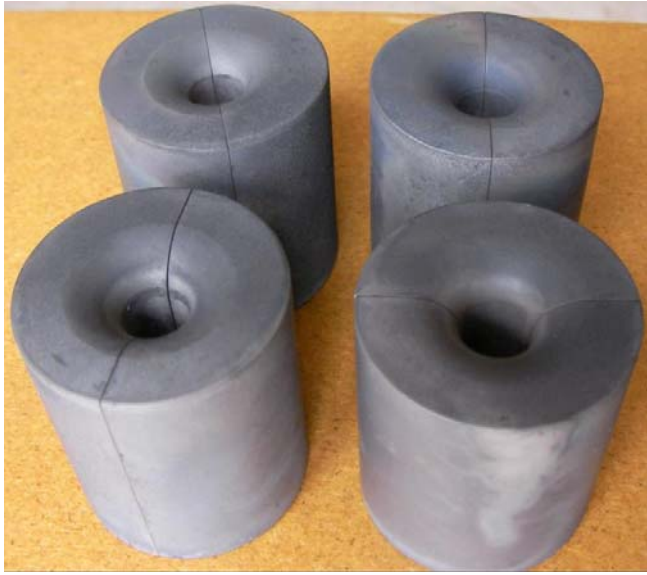
Borlama süresi tamamlandıktan sonra, kutu fırından çıkarılarak açık havada soğumaya bırakılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Borlama işlemi tamamlandıktan sonra kutunun fırından çıkarılarak soğumaya bırakılması



Kutu soğuduktan sonra parçalar içerisinden çıkarılmış ve parçaların üzerindeki tozlar kolayca temizlenerek, borlanmış parçalar elde edilmiştir (Şekil 3.11).



**Şekil 3.11** Borlama işlemi tamamlandıktan sonra kutunun içerisinden çıkarılmış parçalar

Borlanan numuneler gerçek makineler üzerinde çalıştırılarak, aşınma davranışları ve seçilen malzemelerde oluşan borlama tabakası özellikleri (tabaka kalınlığı, yüzeyden itibaren mikrosertlik değişimi vb.) incelenmiştir.

### **3.4. Metalografik ve Mikrosertlik İncelemeleri İçin Hazırlıklar**

Borlama işleminden sonra tabaka özelliklerini incelemek için aynı şartlarda küçük numuneler de borlanmıştır. Bu numuneler, borlama işleminden sonra yüzeyde oluşan borür tabakasını inceleyebilmek için PRESI Marka MECATOME T255/300 model hassas kesme makinesinde (Şekil 3.12) kesilmiş ve PRESI marka MECAPRES II model bakalite alma cihazı (Şekil 3.13) ile bakalite alınmıştır. Daha sonra sırasıyla 100, 400, 600, 800, 1000, 1200 meshlik zımpara kâğıtlarıyla PRESI marka MECAPOL P230 model parlatma cihazında (Şekil 3.14) zımparalanmış ve sonrasında 3 µm' lik elmas solüsyon+yağlayıcı kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır. Daha sonra numuneler alkolle temizlenip kurutulmuşlardır.



Şekil 3.12 Hassas kesme cihazı



Şekil 3.13 Bakalite alma cihazı



**Şekil 3.14** Parlatma cihazı

Parlatma işleminden sonra numuneler %2' lik nital çözeltisinde 10 s süre ile dağlanmış ve metalografik ve mikrosertlik incelemelerine hazır hale getirilmiştir.

### **3.5. Metalografik ve Mikrosertlik İncelemeleri**

Mikrosertlik ölçümleri, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarı'nda bulunan Metkon marka vickers mikrosertlik ölçüm cihazında (Şekil 3.15) gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri, 10 g yükleme ile yüzeyden itibaren borür tabakası ve geçiş bölgesinde 10  $\mu\text{m}$ ' lik, daha sonra 20  $\mu\text{m}$  ve 50  $\mu\text{m}$ 'lik aralıklarla yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri, her malzemede en az üç sütun olarak yapılmış ve ortalamaları alınarak hesaplanmıştır. Borür tabakalarının kalınlıklarıysa, net görülen 5 adet dişin uzunluklarının ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Mikroyapı fotoğrafları mikrosertlik cihazına bağlı 3 MP' lik parmak kamera ile çekilmiştir. Çekilen görüntüler üzerinde, Micro Hardness Pro 4.0 yazılımı ile

incelemeler yapılmıştır.



**Şekil 3.15** Metkon marka vickers mikrosertlik ölçüm cihazı

Makrosertlik ölçümleri Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Muayenesi Laboratuvarı'nda bulunan Meba marka MHT-150 model Rockwell sertlik cihazı (Şekil 3.16) ile yapılmıştır.



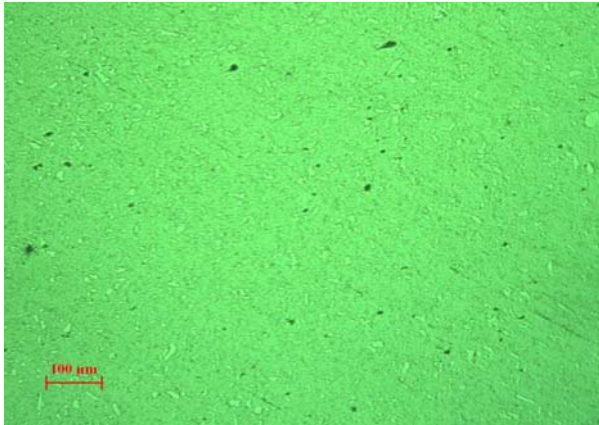
**Şekil 3.16** Rockwell sertlik ölçüm cihazı

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

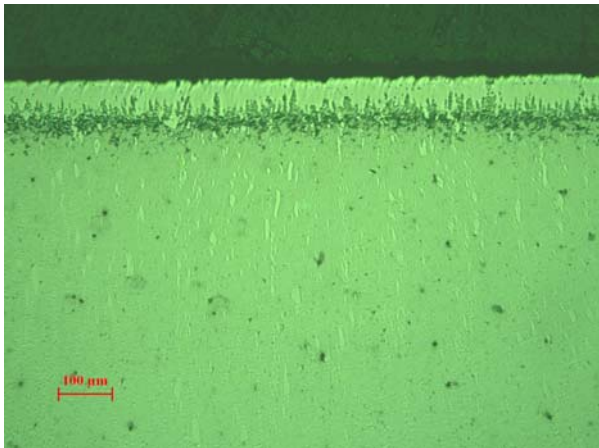
### 4.1. Metalografik İnceleme Sonuçları

#### 4.1.1. 1 Numaralı malzemenin (X165CrMoV12) incelenmesi

Şekil 4.1' de 1 numaralı malzemenin normalize edilmiş durumdaki mikroyapısı görülmektedir. Şekil 4.2' de ise 6 saat borlanmış numunenin mikroyapısı verilmiştir.



Şekil 4.1 1 numaralı malzemenin normalize edilmiş durumdaki mikroyapısı (100X)

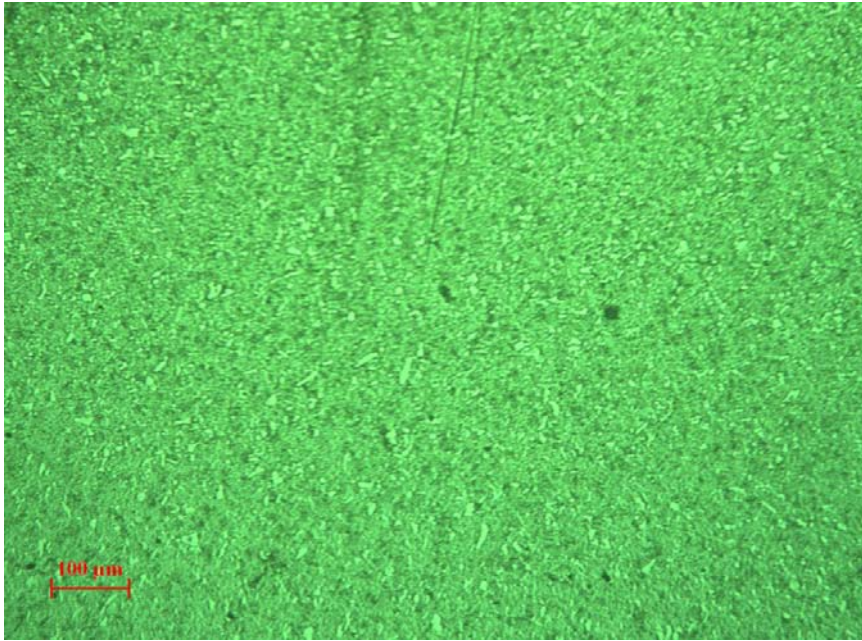


Şekil 4.2 1 numaralı malzemenin 6 saat borlanmış durumdaki mikroyapısı (100X)

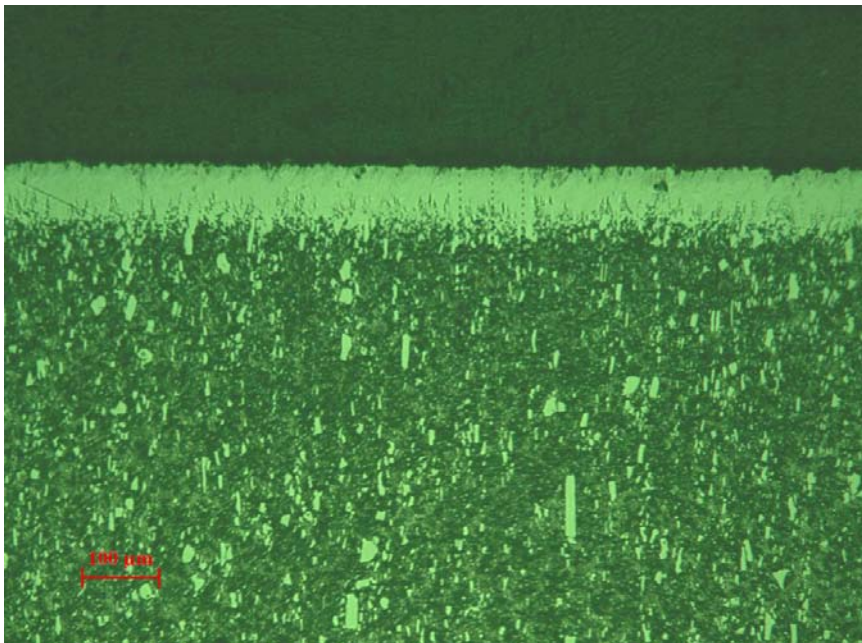


#### 4.1.2. 2 Numaralı malzemenin (X210Cr12) incelenmesi

Şekil 4.3' de 2 numaralı malzemenin normalize edilmiş durumdaki mikroyapısı görülmektedir. Şekil 4.4' de ise 6 saat borlanmış numunenin mikroyapısı verilmiştir.



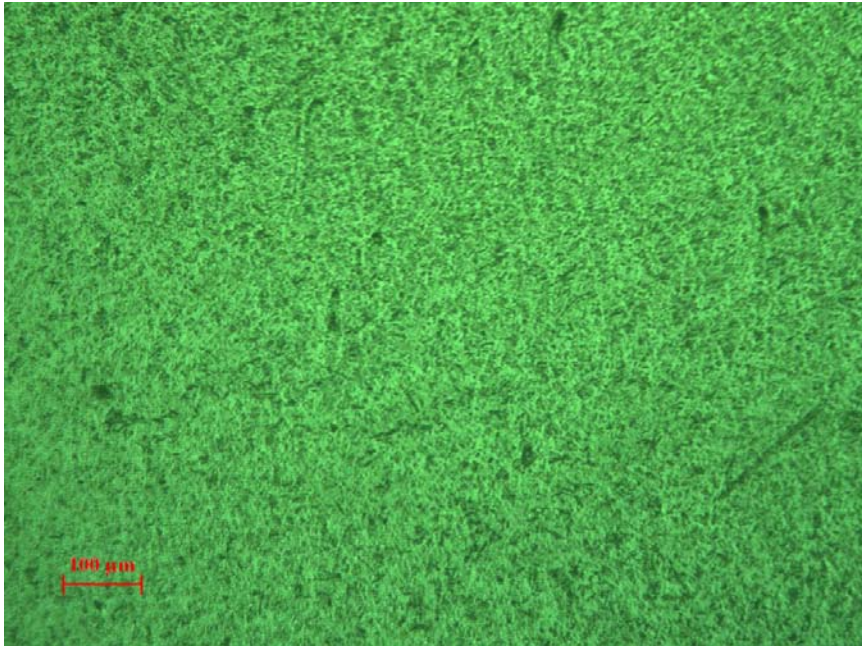
Şekil 4.3 2 numaralı malzemenin normalize edilmiş durumdaki mikroyapısı (100X)



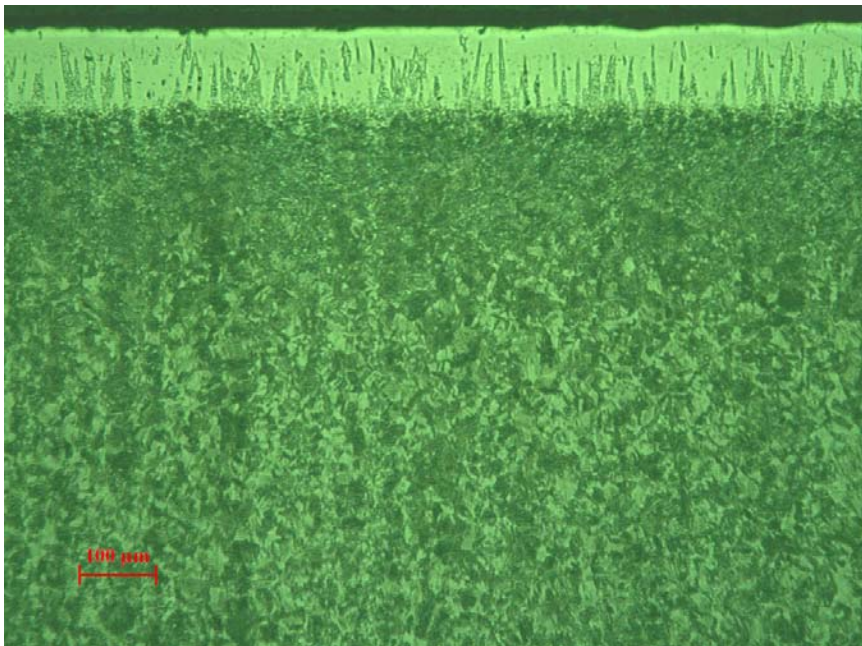
Şekil 4.4 2 numaralı malzemenin 6 saat borlanmış durumdaki mikroyapısı (100X)

#### 4.1.3. 3 Numaralı malzemenin (60WCrV7) incelenmesi

Şekil 4.5’ de 3 numaralı malzemenin normalize edilmiş durumdaki mikroyapısı görülmektedir. Şekil 4.6’ da ise 6 saat borlanmış numunenin mikroyapısı verilmiştir.



Şekil 4.5 3 numaralı malzemenin normalize edilmiş durumdaki mikroyapısı (100X)

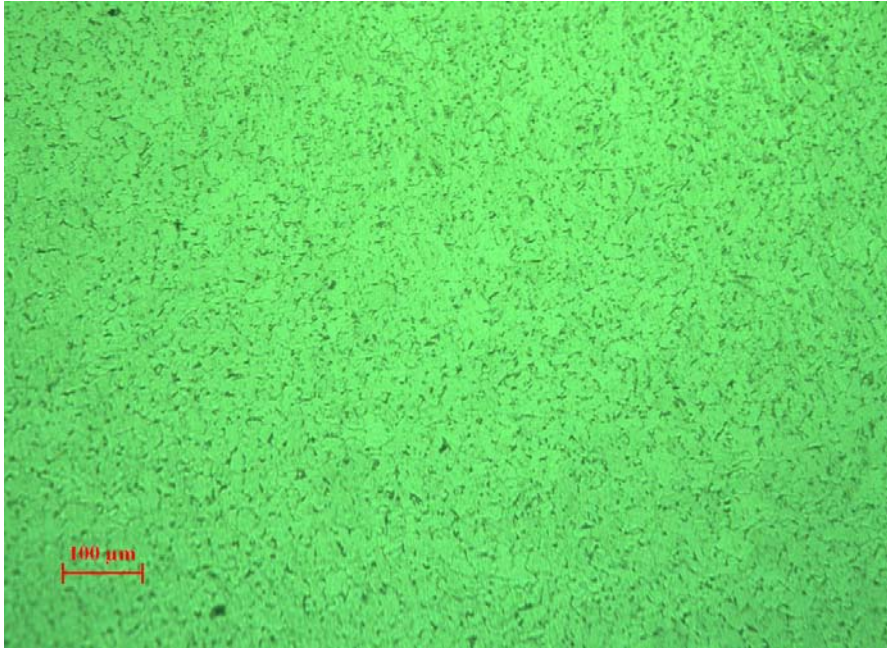


Şekil 4.6 3 numaralı malzemenin 6 saat borlanmış durumdaki mikroyapısı (100X)

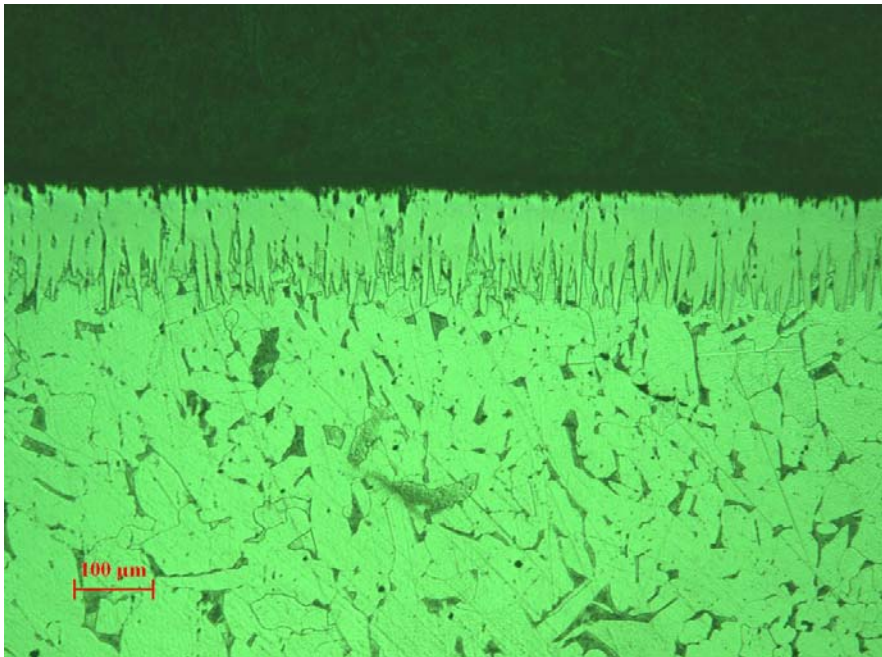


#### 4.1.4. 4 Numaralı malzemenin (C20) incelenmesi

Şekil 4.7' de 4 numaralı malzemenin normalize edilmiş durumdaki mikroyapısı görülmektedir. Şekil 4.8' de ise 6 saat borlanmış numunenin mikroyapısı verilmiştir.



Şekil 4.7 4 numaralı malzemenin normalize edilmiş durumdaki mikroyapısı (100X)



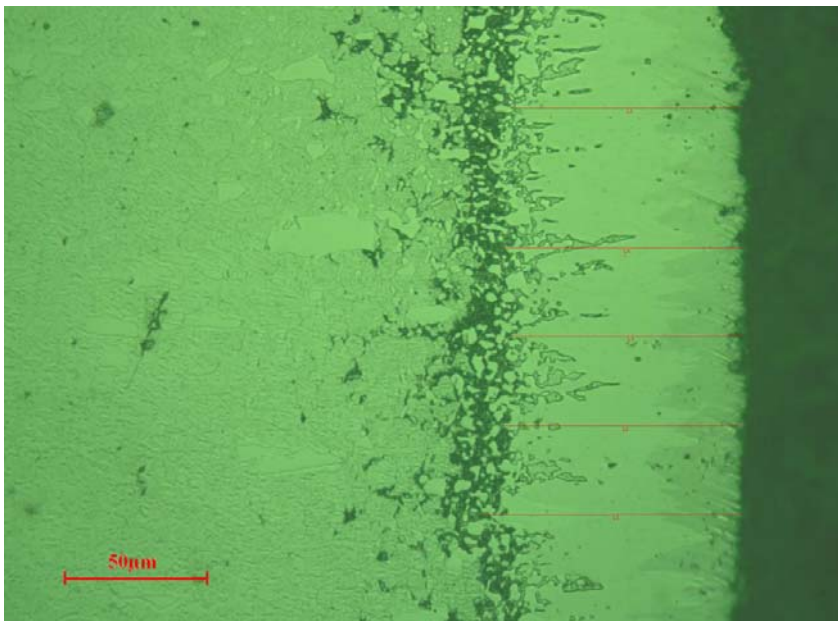
Şekil 4.8 4 numaralı malzemenin 6 saat borlanmış durumdaki mikroyapısı (100X)



## 4.2. Tabaka Kalınlıklarının İncelenmesi

### 4.2.1. 1 Numaralı malzemenin (X165CrMoV12) incelenmesi

Şekil 4.9' da 1 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ölçüm şekli verilmiştir. Tablo 4.1' de ise ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir.



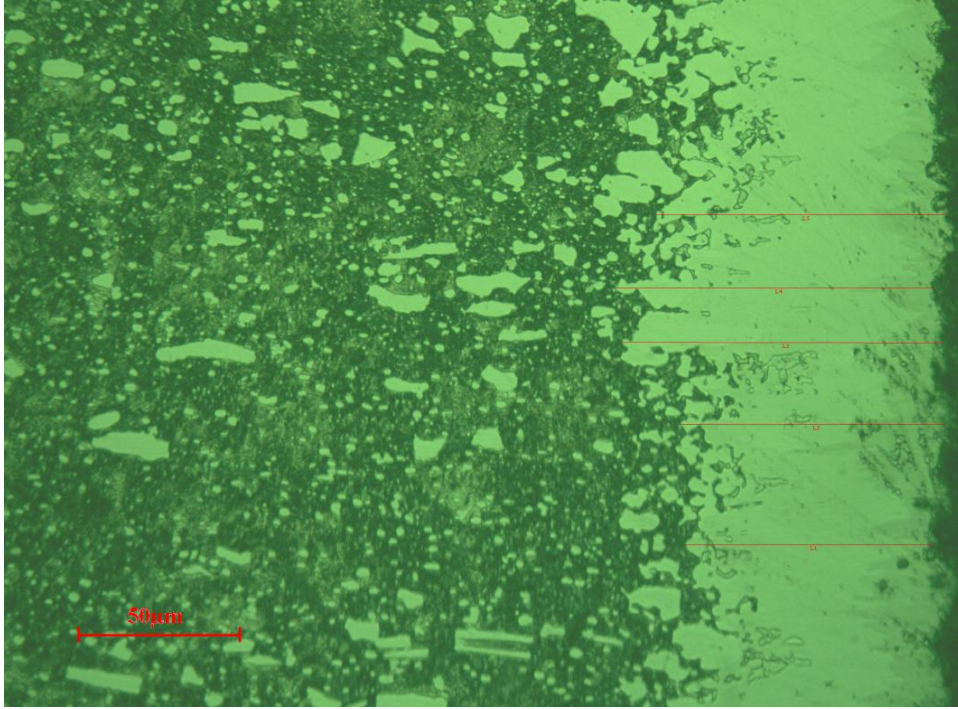
Şekil 4.9 1 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ölçümü (400X)

Tablo 4.1 1 numaralı malzemenin 6 saat borlanmış durumdaki tabaka kalınlığı

Ölçüm sırası	Tabaka Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )
1	91.177
2	83.235
3	81.029
4	83.088
5	80.000
<b>Ortalama</b>	<b>83.706</b>

#### 4.2.2. 2 Numaralı malzemenin (X210Cr12) incelenmesi

Şekil 4.10' da 2 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ölçüm şekli verilmiştir. Tablo 4.2' de ise ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir.



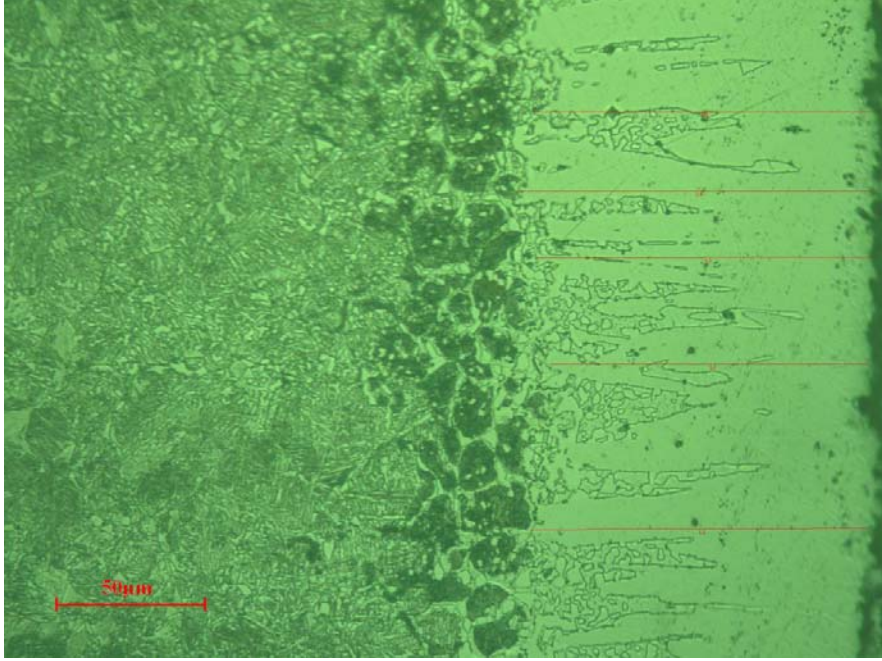
**Şekil 4.10** 2 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ölçümü (400X)

**Tablo 4.2** 2 numaralı malzemenin 6 saat borlanmış durumdaki tabaka kalınlığı

Ölçüm sırası	Tabaka Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )
1	76.471
2	81.618
3	98.824
4	98.235
5	89.853
<b>Ortalama</b>	<b>89.000</b>

### 4.2.3. 3 Numaralı malzemenin (60WCrV7) incelenmesi

Şekil 4.11' de 3 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ölçüm şekli verilmiştir. Tablo 4.3' de ise ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir.



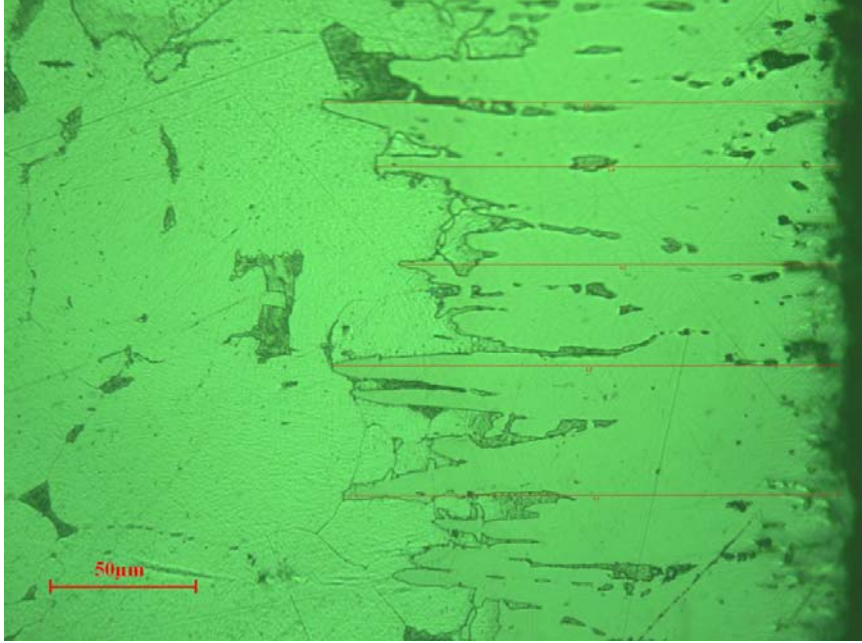
**Şekil 4.11** 3 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ölçümü (400X)

**Tablo 4.3** 3 numaralı malzemenin 6 saat borlanmış durumdaki tabaka kalınlığı

Ölçüm sırası	Tabaka Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )
1	112.942
2	106.618
3	112.059
4	118.235
5	113.824
<b>Ortalama</b>	112.736

#### 4.2.4. 4 Numaralı malzemenin (C20) incelenmesi

Şekil 4.12' de 4 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ölçüm şekli verilmiştir. Tablo 4.4' de ise ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir.



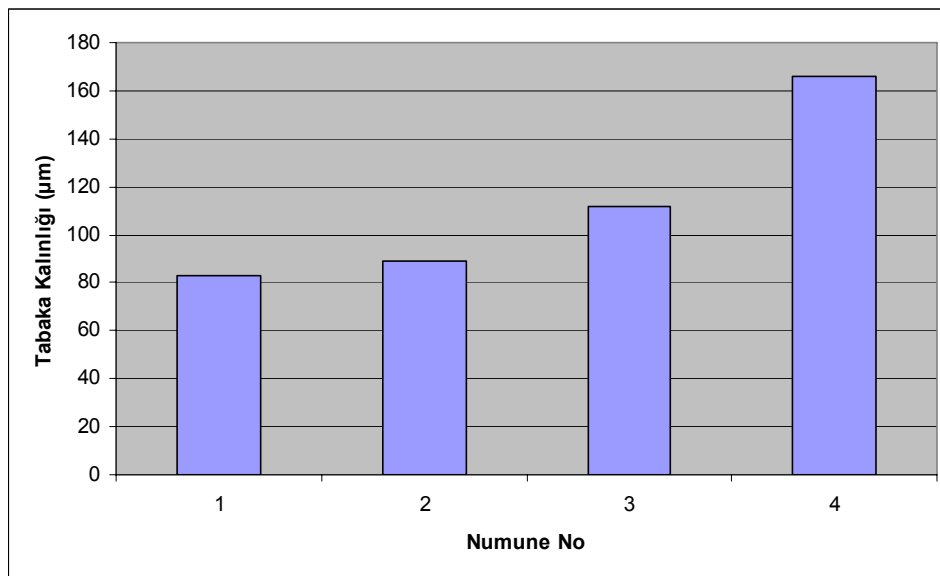
**Şekil 4.12** 4 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ölçümü (400X)

**Tablo 4.4** 4 numaralı malzemenin 6 saat borlanmış durumdaki tabaka kalınlığı

Ölçüm sırası	Tabaka Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )
1	170.294
2	173.824
3	150.882
4	158.971
5	177.500
<b>Ortalama</b>	166.294

#### 4.2.5. Tabaka kalınlıklarının değerlendirilmesi ve karşılaştırılması

Tabaka kalınlığı ölçümünde yukarıdaki bölümlerde de gösterildiği gibi tabakanın belirgin 5 uzantısı ölçülerek ortalamaları alınmıştır. Tabaka kalınlıklarının karşılaştırılması Şekil 4.13’ de görülmektedir. Oluşan tabaka kalınlıklarına bakıldığında 1 nolu malzemedeki en düşük, 4 nolu malzemedeki ise en yüksek tabaka kalınlığına ulaşılmıştır. Bu durum, çeliğin içindeki alaşım elementi oranı arttıkça tabaka kalınlığının azaldığını göstermekte ve literatürde verilen bilgilerle uyum göstermektedir.



**Şekil 4.13** Oluşan bor tabakası kalınlıklarının karşılaştırılması

1 nolu malzemedeki ortalama 83 µm tabaka kalınlığı elde edilmiştir. Bor tabakasının ana yapıya geçiş bölgesi çok net bir şekilde görülmektedir. Bor tabakası 4 nolu malzemedeki kadar derin dişlere sahip olmasa da, dişli bir yapıya sahiptir. Alaşım elementlerinin büyük bir kısmının ileri ötelendiğinden dolayı bor tabakasının hemen altında koyu renkle açık bir şekilde görülebilen geçiş bölgesi oluşmuştur. Bor tabakasının yüzeye yakın kısımlarının dişli yapıya sahip daha koyu bir renkten oluştuğu görülmüştür. Bu görünümünden, oluşan bor tabakasının çift fazlı olduğu anlaşılmaktadır. Buradan yüzeye yakın kısımlarda FeB, diğer kısımlarda ise Fe<sub>2</sub>B yapısı olduğu anlaşılabilir.

2 nolu malzemede ise ortalama 89  $\mu\text{m}$  tabaka kalınlığı ölçülmüştür. Bor tabakasının ana yapıya geçişi daha düz ve belirgin olmayan çıkıntılar şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Burada, 1 nolu malzemede olduğu gibi çift fazlı bir bor tabakası meydana gelmiştir.

3 nolu malzemede, ortalama 113  $\mu\text{m}$  bor tabakası bulunmuştur. Mikroyapıda dişli bir görüntü mevcuttur. 1 nolu malzemede olduğu gibi bor tabakası altında yine belirgin bir geçiş bölgesi görülmektedir. Oluşan tabakada 1 ve 2 nolu numunelerde görülen iki fazlı bir yapı tespit edilememiştir.

4 nolu malzemede ise, ortalama 166  $\mu\text{m}$  tabaka kalınlığı ölçülmüştür. Bu malzemede beklendiği gibi maksimum tabaka kalınlığına ulaşılmış ve tabakanın çok belirgin dişli bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Bu dişli yapı sayesinde tabakanın ana yapıya daha iyi tutunduğu kaynaklarda belirtilmektedir. Bor tabakasında iki fazlı bir yapı görülmemiştir.

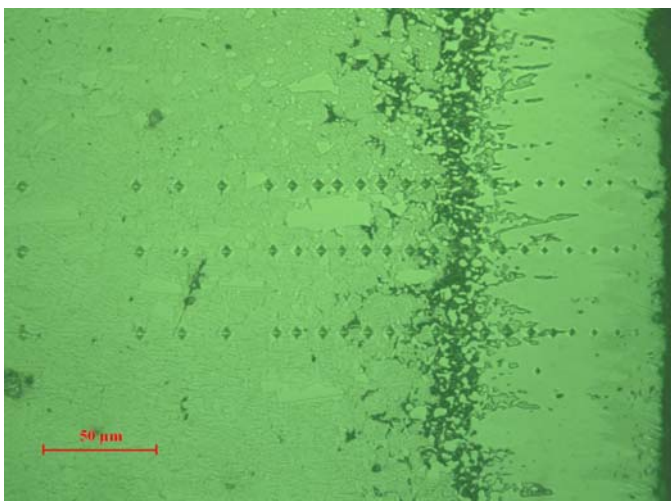
Farklı malzemelerde farklı bor tabakası kalınlıklarına ulaşılmış olması, borlama yaparak kullanacağımız malzemelerden nasıl bir özellik istediğimizi iyi bir şekilde değerlendirerek, malzeme seçmemiz gerektiğini ortaya çıkarmaktadır. Örneğin, tabaka kalınlığının fazla olmasını istediğimiz baskı kuvvetinin fazla olmadığı eroziv aşınmanın meydana geldiği durumlarda, tabaka kalınlığının daha kalın olduğu ve daha ucuz olan 4 nolu malzemenin seçilmesi uygun olacaktır. Ancak, borlamanın en çok kullanım amacı olan aşınma veya yapışma hasarının önlenmesinin yanında parçadan, yorulmaya, yüksek baskı kuvvetli aşınmaya karşıda dayanımlı olması istenen durumlarda çalışan bir parçanın malzeme seçiminde daha dikkatli olunması gerekmektedir. Bu gibi çalışma şartlarında bor tabakasının gereğinden fazla kalın olması, tabakanın parçalar halinde yüzeyden ayrılması veya yorulma ömrünün düşük olmasına sebep olabilir.



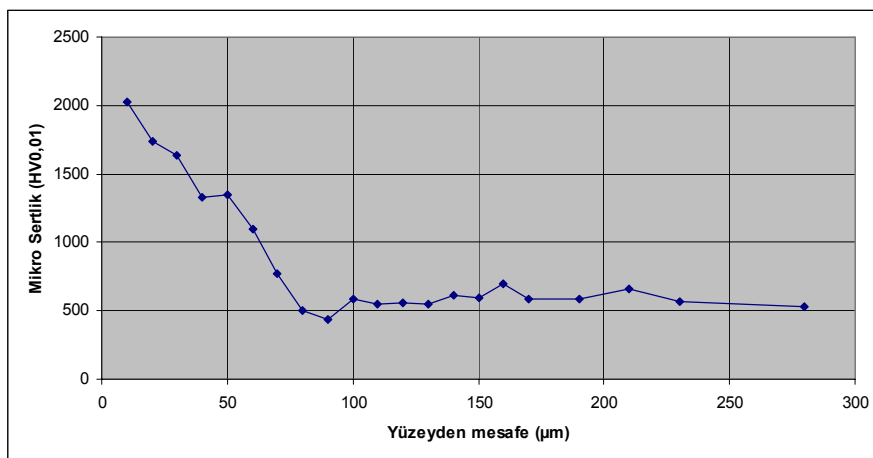
### 4.3. Mikrosertlik Değerlerinin İncelenmesi

#### 4.3.1. 1 Numaralı malzemenin (X165CrMoV12) incelenmesi

Şekil 4.14' de 1 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan borlama tabakası mikrosertlik ölçüm şekli verilmiştir. Ölçümler 10 g yük ile yapılmıştır. Şekil 4.15' de ise ölçüm sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir.



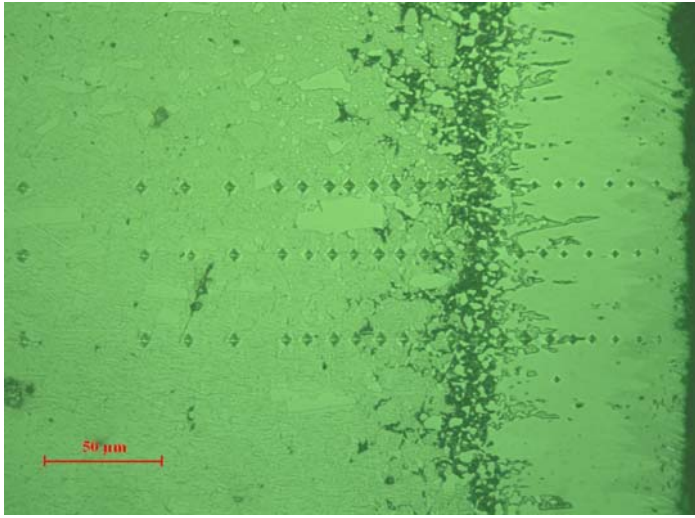
**Şekil 4.14** 1 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ve mikrosertlik ölçümü (400X)



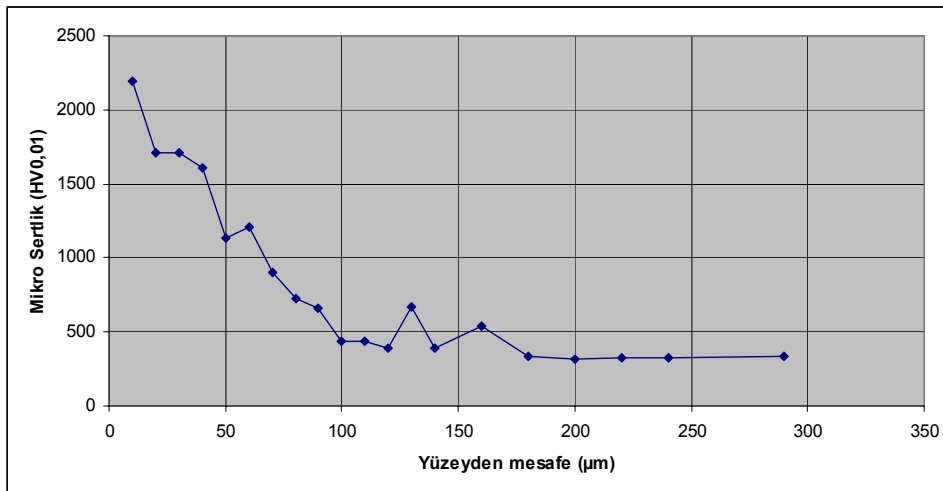
**Şekil 4.15** 1 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ve mikrosertlik dağılımı

#### 4.3.2. 2 Numaralı malzemenin (X210Cr12) incelenmesi

Şekil 4.16' da 2 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan borlama tabakası mikrosertlik ölçüm şekli verilmiştir. Ölçümler 10 g yük ile yapılmıştır. Şekil 4.17' de ise ölçüm sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.16 2 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ve mikrosertlik ölçümü (400X)

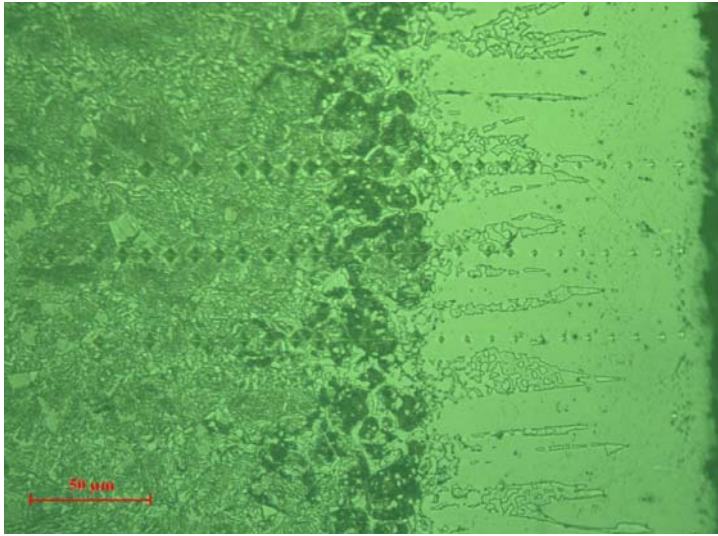


Şekil 4.17 2 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ve mikrosertlik dağılımı

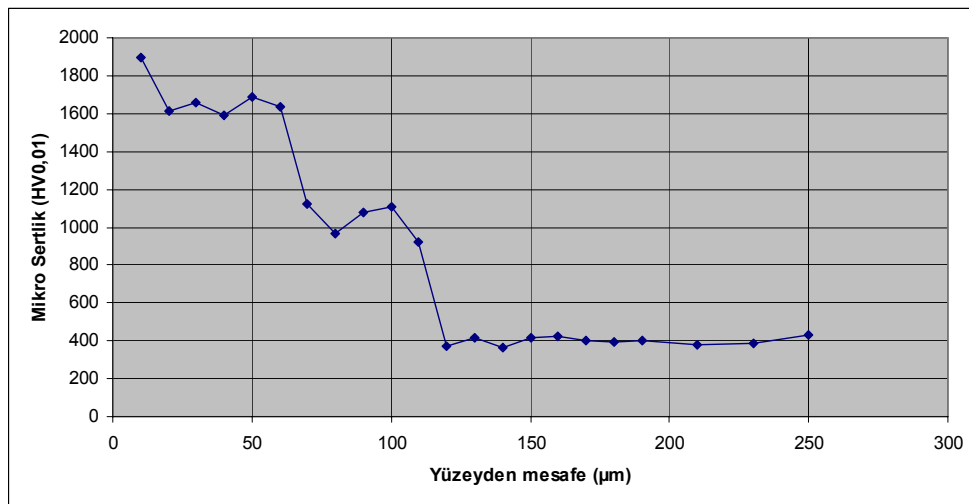


### 4.3.3. 3 Numaralı malzemenin (60WCrV7) incelenmesi

Şekil 4.18' de 3 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan borlama tabakası mikrosertlik ölçüm şekli verilmiştir. Ölçümler 10 g yük ile yapılmıştır. Şekil 4.19' da ise ölçüm sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir.



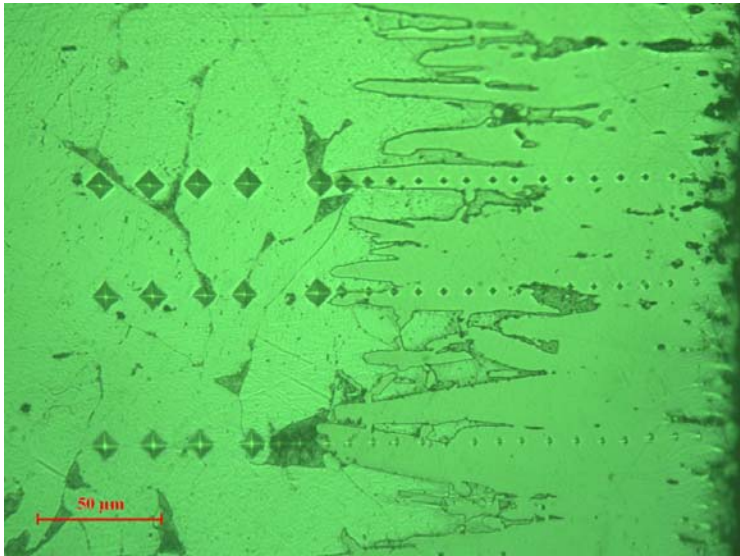
Şekil 4.18 3 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ve mikrosertlik ölçümü (400X)



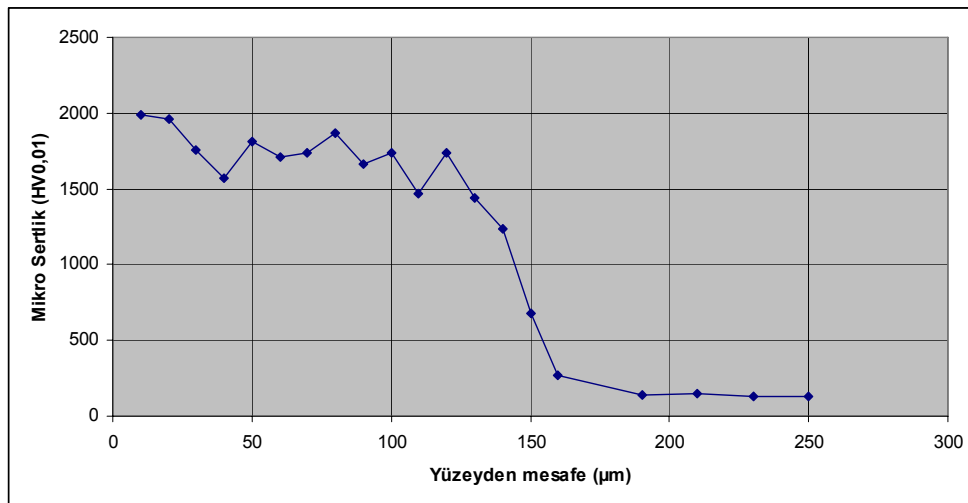
Şekil 4.19 3 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ve mikrosertlik dağılımı

#### 4.3.4. 4 Numaralı malzemenin (C20) incelenmesi

Şekil 4.20' de 4 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan borlama tabakası mikrosertlik ölçüm şekli verilmiştir. Ölçümler 10 g yük ile yapılmıştır. Şekil 4.21' de ise ölçüm sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir.



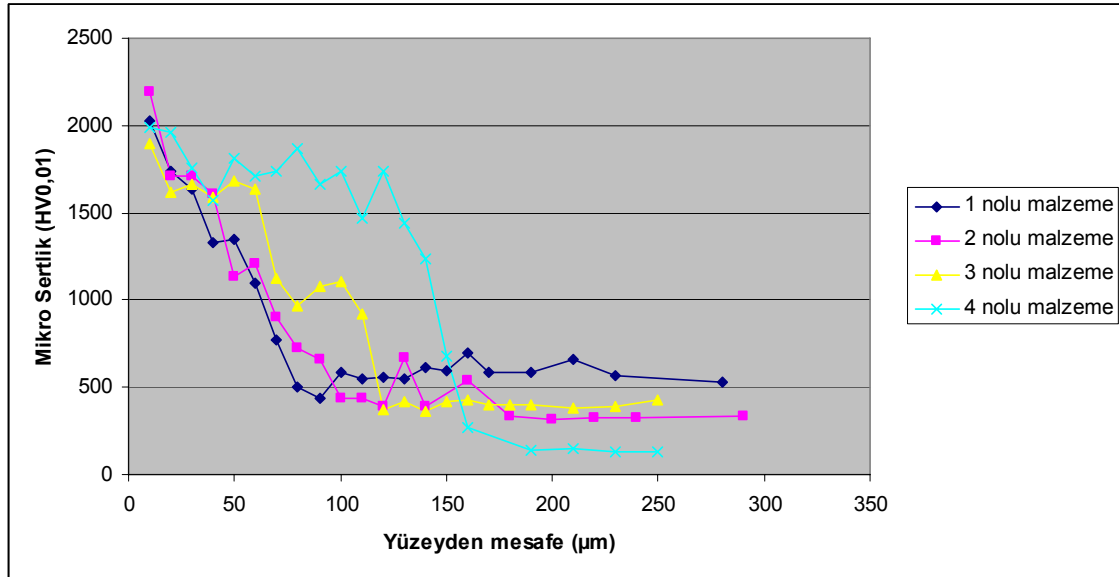
Şekil 4.20 4 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ve mikrosertlik ölçümü (400X)



Şekil 4.21 4 numaralı malzemenin 6 saat borlama sonucunda oluşan tabaka kalınlığı ve mikrosertlik dağılımı

#### 4.3.5. Mikrosertlik ölçümlerinin değerlendirilmesi

Mikrosertlik ölçümlerinde 10 g yük kullanılmıştır. İlk ölçüm yüzeye en yakın kısımdan yapılmaya çalışılmış ve yaklaşık 10  $\mu\text{m}$  mesafede sağlıklı ölçüm yapılabilmektedir. Daha sonraki ölçümler ise, yukarıdaki bölümlerde bulunan şekillerden de görülebileceği gibi, bor tabakası ve geçiş bölgesi boyunca 10  $\mu\text{m}$  aralıklarla, daha sonra ki ölçümler ise 20  $\mu\text{m}$  ve 50  $\mu\text{m}$  aralıklarla yapılmıştır. Ölçümler, aralıklı üç sütun halinde alınıp bu üç değerın ortalamaları sonuç olarak verilmiştir. Ölçülen mikrosertlik değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.22’ de görülmektedir.



Şekil 4.22 Ölçülen mikrosertlik değerlerinin karşılaştırılması

1 nolu malzemede maksimum sertlik 2022 HV0,01 ile yüzeye en yakın kısımdaki ölçümden alınmıştır. Bu durumun yüzeye yakın kısımda sertliği daha yüksek olan FeB fazından kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Daha sonra bu değer ani bir şekilde düşmüş ve tabakanın dışsız kısmında bir süre sabit kalmıştır. Dışli kısma geçildiğinde ise dişlerin kalınlıklarının azaldığı iç kısma doğru sertlik düşüş göstermiştir. Bu malzemede dikkat çeken başka bir husus bor takasından hemen sonra geçiş bölgesinde ana malzeme sertlik değerlerinden daha düşük bir sertlik göstermesidir. Ana yapıda mikrosertliği ölçümünde ise, diğer malzemelere kıyasla en yüksek ana yapı sertliğine bu malzemenin sahip olduğu görülmüştür.

2 nolu malzemede maksimum sertlik 2195 HV0,01 olarak yine yüzeye en yakın ölçümden elde edilmiştir. Bu sertlik değeri ayrıca tüm deneyi yapılan malzemeler içinde ulaşılan en yüksek sertlik değeridir. İlk ölçümden sonra sertlik yine ani bir şekilde düşmüş ve bir miktar sabit kaldıktan sonra yine azalma göstermiş ve iç kısımlara doğru hemen hemen sabitlenmiştir.

3 nolu malzemede en yüksek sertlik 1898 HV0,01 olarak yüzeye en yakın ölçümden elde edilmiştir. Daha sonra yine ani bir düşüş göstermiş ve bir miktar sabit kaldıktan sonra ana yapının sertliğine aşamalı olarak inmiştir.

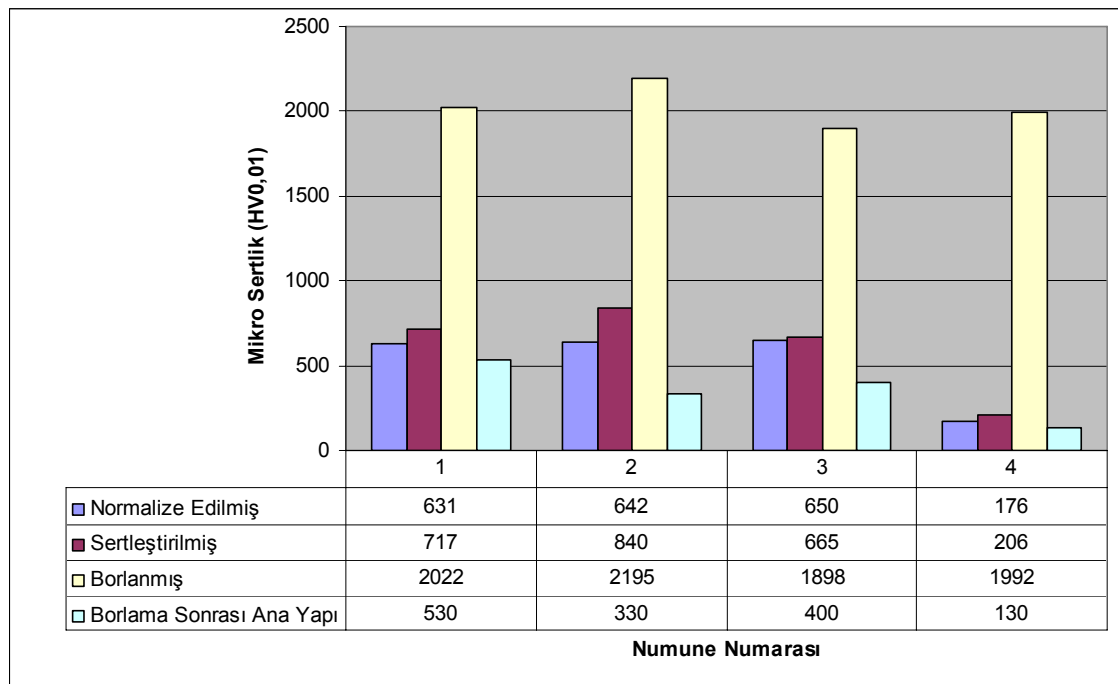
4 nolu malzemede maksimum 1992 HV0,01 sertlik değeri yine yüzeye en yakın kısımda ölçülmüştür. Daha sonra kısmen düşüş göstermiş ve tabaka boyunca belli sertlik değerini muhafaza etmiştir. Ancak tabaka sonlanır sonlanmaz sertlik ani bir şekilde düşüş göstermiştir. Bu durumun, malzemenin alaşımsız oluşundan kaynaklandığı söylenebilir. Aynı sebepten dolayı ana yapısı en yumuşak olan malzeme, 4 nolu malzeme çıkmıştır.

Malzemelerin mikrosertlik değerlerine bakıldığında bor tabakası sertlikleri genel olarak yakınlık göstermektedir. Borlanan malzeme, bor tabakası sertliğine, geçiş bölgesi özelliklerine ve bor tabakasının kalınlığına önemli ölçüde etki etmektedir. Alaşımsız bir çelik ile yüksek alaşımlı bir çeliğin, yüzey sertliği olarak birbirine yakın değerlere ulaşması borlamanın en ilginç özelliğini oluşturmaktadır. Bu, tabi ki borlamada ana malzeme yapısının hiçbir önemi yok demek değildir. Bazı parçalarda yüksek yüzey sertliğinin yanında tokluk ve dayanım gibi özelliklerde istenebilir. Ayrıca yüzey sertliğinin yüksek olması avantajlarının yanında, bazı dezavantajlara da neden olabilir. Bu yüzden malzeme seçimi, parçaların çalışma koşulları ayrıntılı bir şekilde araştırılarak yapılmalıdır.

#### **4.4. Kullanılan Malzemelerin Çeşitli Isıl İşlemler Sonucunda Mikrosertliklerinin Karşılaştırılması**

Kullanılan malzemelerin çeşitli ısıl işlemlerden sonraki mikrosertlik kıyaslaması Şekil 4.23' de görülmektedir. Sertleştirme işlemlerinde 1, 2 ve 3 numaralı malzemeler

yağda soğutulmuş, 4 numaralı malzeme ise suda soğutulmuştur. Malzemelerin diğer durumlardaki sertlikleri ile oluşan bor tabakası sertliklerini kıyaslayabilmek için mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Bu malzemelerde borlama işlemi ile en yüksek sertlik değerine ulaşıldığı görülmektedir. Malzemelerin tümünde borlama sonrası ana yapı sertliği, normalize edilmişlerine göre düştüğü görülmektedir. Bu durumun, borlama sonrası kutuda soğuyan malzemelerin daha yavaş soğumasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

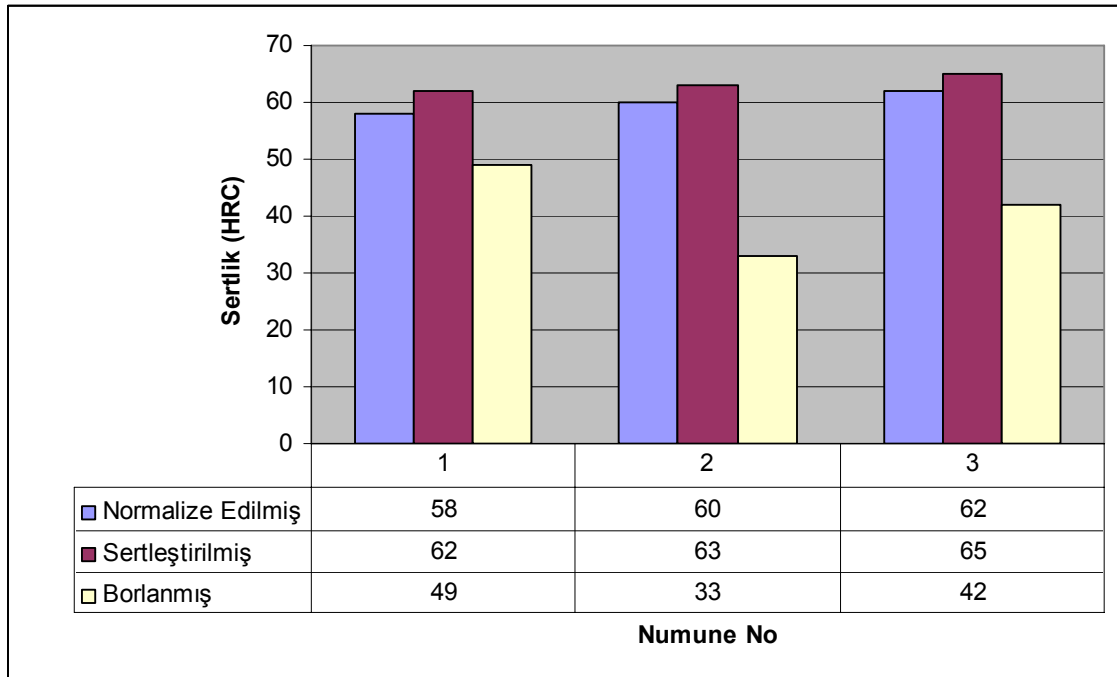


**Şekil 4.23** Kullanılan malzemelerin mikrosertlik kıyaslamaları

1, 2 ve 3 nolu malzemelerin normalize edilmiş sertlikleri oldukça yüksektir. Bu çeliklerin hava ortamında da sertleşebileceğini gösterir. Borlama sonrası en yüksek ana yapı sertliğine 1 nolu malzemede ulaşıldığı görülmüştür. Burada görüldüğü gibi 4 nolu malzemenin diğer işlemlerdeki sertliği çok düşük olmasına rağmen, bor tabakasındaki sertliği diğer malzemelere yakın olduğu görülmektedir.

#### 4.5. Kullanılan Malzemelerin Çeşitli Isıl İşlemler Sonucunda Makrosertliklerinin Karşılaştırılması

Makrosertlik ölçümleri; normalize edilmiş, sertleştirilmiş parçalardan ve borlandıktan sonra temizlenip kullanıma hazır hale getirilen borlanmış malzemelerin yüzeyinden, Rockwell C (HRC) sertlik ölçme yöntemiyle yapılmıştır. 4 nolu parçanın sertlik değerleri HRC ile gösterilemeyecek kadar küçük olduğu için tabloya koyulmamıştır. Şekil 4.24' den de görüldüğü gibi malzemelerin borlandıktan sonra makrosertliklerinde düşme görülmüştür. Bu durumun, yukarıdaki bölümde de bahsedildiği gibi, borlanmış parçaların borlama sonrası havada soğumaya bırakılan kutu içersinde gömülü halde buldukları için ana yapının daha yavaş soğumasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

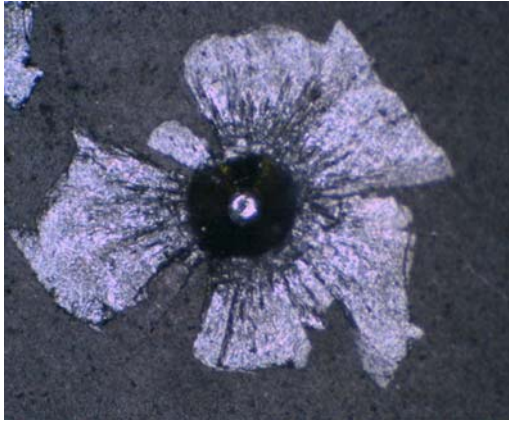


Şekil 4.24 Kullanılan malzemelerin makrosertlik kıyaslamaları

Ayrıca, 1 ve 2 nolu malzemelerden yapıp borlanmış matrislerin makrosertlikleri ölçülürken ön yüklemmeden sonra makinenin ölçüm yükünü uygulamaya başladığı sırada parça yüzeyindeki tabakanın küçük bir çıtımla sesiyle parçacıklar halinde kalktığı görülmüştür. Ancak, 3 ve 4 nolu malzemelerden yapılmış matrislerin makrosertlikleri

ölçülürken böyle durum gözlenmemiştir. Bu makrosertlik ölçüm izlerinin görüntüleri Şekil 4.25' de verilmiştir

Şekilden de görüldüğü gibi 1 ve 2 nolu numunelerdeki izlerde tabaka kırılması ile çiçeğe benzer bir görünüm oluşmuştur. 3 ve 4 nolu numunelerde ise, bu şekilde gevrek bir ayrılma görülmemiştir. Ancak, iz etrafında izi çevreleyecek şekilde dairesel çatlaklar olduğu görülmüştür. Böyle bir durumun ortaya çıkmasında, mikroyapı görüntülerinde tesbit edilen çift fazlı bor tabaksının rol oynadığı tahmin edilmektedir. Bu durumda baskı kuvvetinin yüksek olduğu temas şartlarında, tabakadan parçalar halinde kalkmalar olabileceği sonucu çıkarılabilir.



1 nolu numune



2 nolu numune



3 nolu numune



4 nolu numune

**Şekil 4.25** Makrosertlik ölçümlerinde iz görüntüleri (50X)

#### 4.6. Parçaların Aşınma Durumlarının İncelenmesi

Aşınma durumlarını araştırdığımız kompaktlama matrislerinin çalışma şartları Bölüm 3.1’ de açıklanmıştır. Kompaktlama matrisleri, çalışma esnasında, yağlamasız bir ortamda içerisinde, galvanizlenmiş çelik tellerin bir araya getirilerek kablonun üzerine sarılması işlemini gerçekleştirmektedir ve kablo üzerine tellerin düzgün bir şekilde sarılmasını sağladığı müddetçe standartlara uygun kablo üretilebilmektedir.

Tellerin kangallardan çekilerek kullanıldığı sistem (Bkz Şekil 3.2 b) avantajlarından ötürü daha çok kullanılmaktadır. Bu sistemde tel çekme hızı 10-15 m/min ve çelik tellerdeki germe kuvveti yaklaşık 20 N’ dur. Çelik tellerin dönerek gelmesiyle kullanılan sistemde ise, tellerin gergi kuvveti yaklaşık 60 N’ dur. Ancak, tellerin kangallardan çekilerek geldiği sistemde teller kompaktlama matrisi üzerinde genelde aynı çizgiden akmakta ve matrisin bu kısımlarında aşınma izleri oluşturmaktadır (Şekil 4.26). Bu izler belirli bir derinliğe ulaştıktan sonra, telleri yönlendirmekte ve zırlarda düzensiz sarılmalar meydana gelmektedir. Bu duruma sebep olmadan kompaktlama matrisi değiştirilmek zorunda kalınmaktadır. Dolayısıyla, parça üzerinde bu izler ne kadar uzun sürede oluşursa, kullanım ömrü de o kadar artmaktadır.

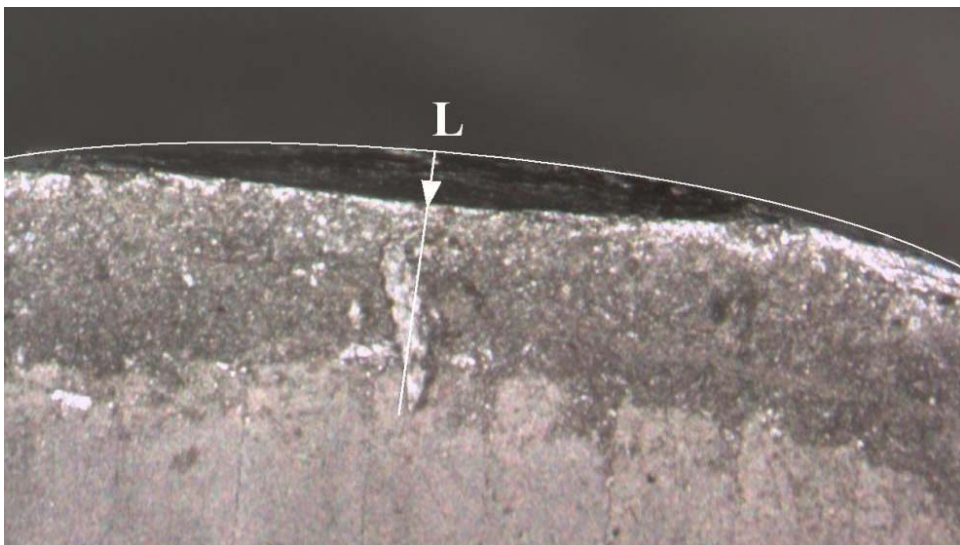
Kompaktlama matrisleri üretilen mamul çapı değişikliği esnasında matrisin değiştirilmesini daha kolay hale getirdiğinden iki parça halinde yapılmaktadır. Oluşan izler belli bir açıda meydana geldiği için, matris iki parçaya ayrıldıktan sonra kesit olarak görülebilmektedir. Bu görüntü, mikroskop ile bilgisayara aktarılarak iz derinliği ölçümü, analiz programı (Micro Hardness Pro 4.0) ile hassas bir şekilde yapılmıştır. İz derinliği ölçüm şekli Şekil 4.27’ de gösterilmektedir. Ölçümler, aynı şartlardaki en az üç izden ortalamaları alınarak verilmiştir.

Kompaktlama matrislerinin kullanımdan çıkmasına sebep olan aşınma izlerinin belli bir derinliğe ulaşması olduğundan, çalışmamızda kullanılan kompaktlama matrislerinde oluşan iz derinlikleri kıyaslanarak değerlendirme yapılmıştır. Böylece seçilen malzemelerden, hangi malzemede oluşan bor tabakasının bu çalışma şartlarına daha uygun olduğu araştırılmıştır.





Şekil 4.26 Kompklama matrisinde aşınma izleri



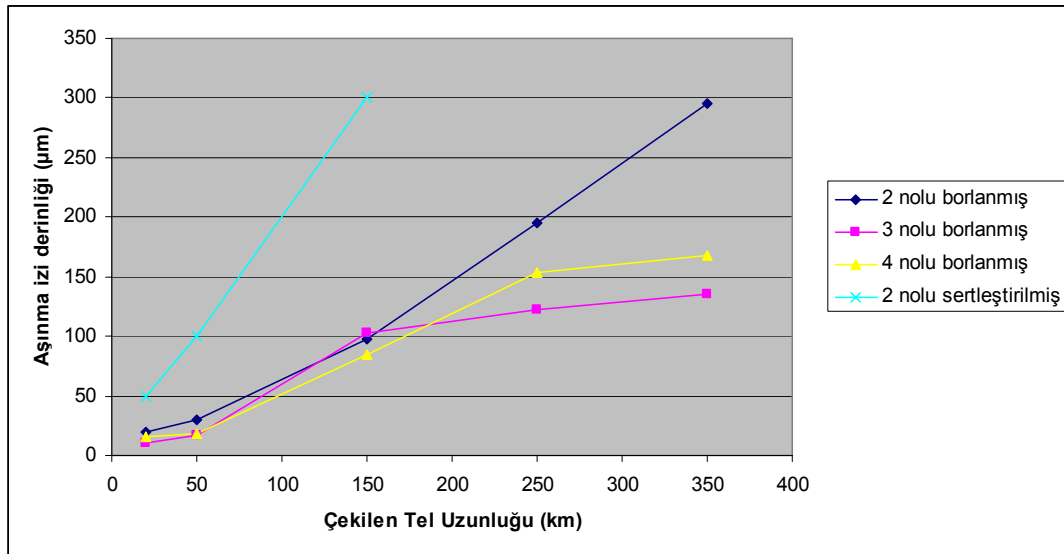
Şekil 4.27 Çelik tellerin çizgisel olarak aşındırdığı kompklama matrisinde aşınma izlerinin ölçülmesi

İz ölçümleri, km bazında farklı çalışma uzunlukları alınarak karşılaştırılmıştır. 2, 3 ve 4 nolu malzemelerden yaptırılan matrisler çelik tellerin çizgisel bir şekilde aşınmaya maruz kaldığı sistemdeki makinelerde (Bkz Şekil 3.2.b) kullanılmış, 1 nolu malzemedan yapılanlar ise matrise gelen çelik tellerin döner bir şekilde geldiği makinelerde (Bkz Şekil 3.2.a) kullanılmıştır. Bu yüzden aşınma izleri kıyaslaması 2, 3 ve 4 nolu malzemeler arasında yapılabilmektedir. 1 nolu malzeme için de aşınma bölgesi incelenerek yorumlanmaya çalışılmıştır.

Endüstriyel uygulamada kompaktlama matrisi 2 nolu malzeme olan X210Cr12 çeliğinden yapılarak, yaklaşık 60 HRC' ye sertleştirilmiş halde kullanılmakta iken, son zamanlarda daha uzun kullanım ömrü istenilmesinden dolayı sert metalden (WC+Co) matrislerin kullanımı tercih edilmektedir. Ancak, bu matrislerde tek parça imal edilmelerinden dolayı kullanım sırasında (yukarıda da bahsedildiği gibi üretilen mamul çapı değişikliği esnasında matrisin değiştirilmesini daha zor ve vakit kaybettirici hale getirdiğinden) problemlere sebep olmaktadır. Sert metalden iki parçalı matris ürettirilmek istendiğinde ise, çok yüksek fiyatlar talep edildiğinden, ekonomik olmadığı ifade edilmiştir. Çelik malzemelerden daha kolay bir şekilde iki parça olarak ürettirilebilen matrislerin kullanım kolaylığı sağlamanın yanı sıra, borlama ile kullanım ömürleri uzatılarak ve kullanılan malzeme fiyatları düşürülerek ekonomikliği arttırmak ideal bir çözüm olarak görülmektedir.

2 nolu numunede kullanılan soğuk iş takım çeliğinin 60 HRC sertleştirilmiş hali ile 2, 3 ve 4 nolu malzemelerin borlanmış durumlarının karşılaştırması yapılmıştır (Şekil 4.28).

Şekil 4.28' de görüldüğü gibi sadece sertleştirilmiş malzemelerle, borlanmış malzemeler arasında büyük fark görülmektedir. Zırlama işleminde, tecrübeye dayalı olarak matrislerde yaklaşık 200 µm iz derinliğinden sonra hatalı sarılımlar oluşabildiğinden ötürü kullanımdan çıkarılmaktadırlar. Sertleştirilmiş malzemedan yapılmış matrisler de, yaklaşık 100 km' den sonra oluşan izlerden ötürü kullanılamaz hale gelmektedirler. Aynı malzemenin borlanmış da yaklaşık 250 km' de bu değere yaklaşmıştır. 3 ve 4 nolu malzemelerden yapılmış matrisler ise, 350 km çalışmalarına rağmen hala istenilen kalitede işi yerine getirmeye devam etmektedirler.



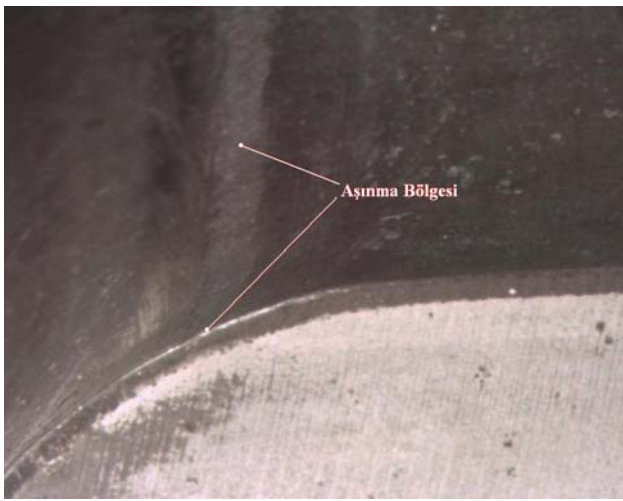
**Şekil 4.28** Kompaklama matrislerindeki aşınma iz derinliğinin kıyaslanması

2 nolu malzemeden yapılmış matris borlama sonrası kullanıldığında, bor tabakası sertliğinde en yüksek değere ulaşmasına rağmen, bor tabakasını diğer borlanmış malzemelere nispeten daha çabuk aşındırmıştır. Bu duruma, malzemede oluşan bor tabakasının çift fazlı oluşunun ve tabakanın hemen altında daha yumuşak geçiş bölgesinin etki ettiği düşünülmektedir. Ayrıca, oluşan tabakanın dişli yapıdan çok düz bir yapıya sahip olması da tabakanın tutunmasını güçleştirmektedir.

3 nolu malzemeden yapılmış matrislerde oluşan bor tabakası, diğer malzemelere oranla 350 km' ye kadar daha iyi bir performans sergilemiştir. Bu performans, bor tabakasının dişli yapıda oluşu ve bunun tabakanın tutunmasını kuvvetlendirdiği şekilde açıklanabilir. Ayrıca, borlamadan sonra ölçülen makrosertlik değerlerinin daha yüksek olmasının da bu sonuca etkisinin olduğu söylenebilir.

4 nolu malzemeden yapılmış matrislerde ise, bor tabakası kalınlığının en yüksek değere ulaşmasının aşınma değerleri üzerinde iyi sonuçlar vermesinde etkili olduğu açıktır. C20' nin diğer malzemelere göre çok sade bir kimyasal kompozisyona sahip olmasına rağmen, borlanarak kullanılan kompaktlama matrislerinde 3 nolu malzemeye yakın ve diğer malzemelerden daha üstün bir performans sergilemiştir.

1 nolu malzemeden yapılmış kompaktlama matrisinin kullanıldığı çelik tellerin dönerek geldiği sistemde oluşan aşınma yüzeyi, Şekil 4.29’ da görülmektedir. Bu sistemde çalışan matrislerde iz oluşumu olmadığı için, daha uzun süre kullanılabilirler. Burada, aşınma izlerinin çevreyi turlayacak biçimde oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.30). Bu matrislerde, diğer sistemde aynı çalışma sürecinde matris profilinde değişme oluşturan izler görülmemiştir. Ancak, izlerin bulunduğu bölgelerde bazı ufak partiküllerin kalktığı tespit edilmiştir. Bunun, çalışma sırasında kompaktlama matrisinde oluşan bası kuvvetinin yüksek olmasıyla ve bor tabakasının çift fazlı oluşuyla ilgili olduğu düşünülmektedir.



**Şekil 4.29** Çelik tellerin dönerek geldiği sistemde kullanılan kompaktlama matrisinde aşınma bölgesinin görüntüsü



**Şekil 4.30** Çelik tellerin dönerek geldiği sistemde kullanılan kompaktlama matrisinde çevresel aşınma izlerinin görüntüsü

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada, dört farklı malzemeye (X165CrMoV12, X210Cr12, 60WCrV7 ve C20), 6 saat süre ve 950°C sıcaklıkta Ekabor®2 borlama tozu kullanılarak katı ortamda borlama işlemi yapılmıştır. Borlama sonrası bor tabakasının özellikleri (tabaka kalınlığı, tabaka mikrosertlik değişimi vb), mikroyapı ve kablo üretiminde zırlama bölümünde kullanılan kompaktlama matrislerinin fabrika ortamındaki çalışmaları ile oluşan aşınma davranışları değerlendirilmiştir.

Mikroyapı incelemelerinde seçilen malzemelerden yapılan matrislerde oluşan bor tabakaları, geçiş bölgeleri ve ana yapıları net bir şekilde görülebilmüş ve mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir.

Tabaka kalınlıkları, ilgili bölümde detaylı bir şekilde belirtildiği gibi ölçülmüş ve değerleri verilmiştir. En yüksek tabaka kalınlığı, 166 µm ile 4 nolu malzemedan yapılmış matrislerde ölçülmüştür. Daha sonra 3, 2 ve 1 nolu malzemelerden yapılmış matrislerde oluşan tabaka kalınlıklarının bunu takip etmekte olduğu görülmüştür. Bu durum, malzemelerdeki alaşım elementi oranı arttıkça tabaka kalınlığının azalmasını doğrulamakta ve literatürle uyum göstermektedir.

Yüzeyden itibaren bor tabasından ana yapıya geçilene kadar mikrosertlik değerleri HV0,01 cinsinden ölçülmüş ve dağılım grafikleri çizilmiştir. Bu değerlerin ölçüm aralıkları bor tabakası ve geçiş bölgesinde yaklaşık 10 µm, daha sonra ise 20 µm ve 50 µm mesafelerde alınmıştır. İlk ölçümler yüzeye yaklaşık 10 µm mesafeden alınmış ve en yüksek değerlerde bu ölçümlerde elde edilmiştir. En yüksek değer 2195 HV0,01 ile 2 nolu malzemedan yapılmış matrislerde ölçülmüştür.

Ayrıca, borlanan matrislerin yüzeyinden ölçülen makrosertlikleri ile, bu matrislerin normalizasyon ve sertleştirme işlemleri uygulanarak yüzeylerinden ölçülen makrosertlikleri de kıyaslanmıştır. Sertlikler, HRC olarak ölçülmüştür. Borlanmış 1 ve 2 nolu malzemelerden yapılmış matrislerin sertlik ölçümleri sırasında yüzeydeki tabakanın kırıldığı gözlenmiş ve fotoğrafları ilgili bölüme (Bkz Şekil 4.25) konularak değerlendirilmiştir.

Makrosertlik ölçümlerinde, bor tabakası sertliği hesaba katılmadığı için mikrosertlik (HV0,01) ölçümleriyle kıyaslama yapılmıştır. Burada, borlama sonrası ana yapı ve malzemelerin normalizasyon ve sertleştirmeden sonraki durumları karşılaştırılmıştır.

Bu malzemelerden yaptırılan kompaktlama matrisleri, borlama işlemi uygulandıktan sonra fabrika ortamında kullanılarak aşınma izlerinin kıyaslaması yapılmıştır. Borlama sonrası, bu çalışma şartlarında daha önce kullanılmakta olan 2 nolu malzemeden (X210Cr12) yapılarak 60 HRC değerine sertleştirilmiş matrislere göre, aynı malzemeden yapıp borlanmış matrisler yaklaşık 2,5 kat, 3 nolu (60WCrV7) ve 4 nolu (C20) malzemelerin borlanmış durumlarındaki matrisler ise en az 3,5 kat ömür artışı sağlandığı tespit edilmiştir.

Bulunan sonuçlar, bu çalışma şartlarında çalışan çelik parçaların borlama ile kullanım ömürlerinin arttırabileceğini ortaya koymaktadır. Bunun yanında, borlama ile daha ucuz malzemelerinde alternatif olarak kullanılabilceğini, hatta daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini ispatlamaktadır. Ancak bunun yanında, borlama işlemi uygulanacak parçanın çalışma şartları ve parçadan istenenler çok iyi araştırılmalı ve borlama özellikleri bilinen veya araştırılmış olan malzemelerden yararlanılmalıdır.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, borlama işlemi ve sanayi uygulamaları hakkında detaylı bilgi verilmeye çalışılmış ve kablo üretim sanayinde zırlama aşamasında çalışan kompaktlama matrisleri için dört farklı malzeme (X165CrMoV12, X210Cr12, 60WCrV7 ve C20) seçilerek 950°C de 6 saat süre ile, Ekabor®2 borlama tozu kullanılarak borlanmıştır. Bu malzemelerin bor tabakası özellikleri ve gerçek çalışma şartlarında aşınma özellikleri araştırılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

Yapılan araştırmalar ve deneysel çalışma sonucunda alaşımsız çeliklerde, alaşımlı çeliklere nazaran daha yüksek tabaka kalınlıkları elde edilebileceği görülmüştür.

2 nolu malzemedan (X210Cr12) yapılarak 60 HRC değerine sertleştirilmiş matrislere göre, aynı malzemedan yapıp borlanmış matrisler yaklaşık 2,5 kat, 3 nolu (60WCrV7) ve 4 nolu (C20) malzemelerin borlanmış durumlarındaki matrisler ise en az 3,5 kat ömür artışı sağlandığı tespit edilmiştir.

Bulunan sonuçlar, bu çalışma şartlarında çalışan çelik parçaların borlama ile kullanım ömürlerinin arttırabileceğini ortaya koymaktadır. Bunun yanında, borlama ile daha ucuz malzemelerinde alternatif olarak kullanılabilceğini, hatta daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini ispatlamaktadır. Ancak bunun yanında, borlama işlemi uygulanacak parçanın çalışma şartları ve parçadan istenenler çok iyi araştırılmalı ve borlama özellikleri bilinen veya araştırılmış olan malzemelerden yararlanılmalıdır. Aksi takdirde bilinçsiz yapılan borlama ile daha kötü sonuçlara varılabilir.

Türkiye’ de ısıtım işlem alanında birçok firma olmasına ve akademik yönden borlama ile ilgili çok çalışma yapılmasına rağmen borlama işleminin ısıtım işlem işletmelerinde

hemen hemen hiç yapılmadığı öğrenilmiştir. Sanayiye yönelik olarak borlama işlemi sadece Manisa Salihli de bulunan Vezneli A.ř. tarafından yapıldığı belirlenmiştir.

Borlamanın, uygun parçalarda ve bilinçli kullanımı arttırılarak ülke ekonomisine önemli katkılar sağlanabileceği açıktır. Bu konuda akademisyenler ve sanayiciler, karşılıklı bilgi ve tecrübe alışverişinde bulunabilirler.



## KAYNAKLAR

- Akgündüz T. (1991) Çelikte Alaşım Elementi Olarak Bor ve Borlama ile Yüzey Sertleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 94s.
- Andrew, V. (1974) New Process for Obtaining Increased Metal Hardness and Reduce Friction Properties by Boronizing, *Industrial Heating*, 3:36-40.
- Anonymous (1998) Boronizing Improves Tool Life During Green Finishing, *Ceramic Industry*, 148:3-26.
- Atik, E. (1997) Çeliklerin Borlanarak Aşınma Dayanımlarının Arttırılması. *Mühendis ve Makine*, 445:17-20.
- Atik, E. ve Meriç, C. (1999) Borlanmış SAE 1015 ve CrV3 Çeliklerinin Abrasiv Aşınma Dayanımlarının İncelenmesi. *Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Sempozyumu*, Manisa, s.58-62.
- Ayter, T. (2005) Borlama İşlemi Çeliklerin Yüzey Kalitesi ve Aşınma Davranışına Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 110s.
- Bağkır, Z. B. (2002) Borlanmış Dökme Demirlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 57s.
- Baştürk, S. ve Erten, M. (2006) Borlama ile Yüzey Sertleştirme Çalışmaları. *Mühendis ve Makine*, 563: 57-74.
- Bayça, S.U. ve Şahin, .S (2004) Borlama. *Mühendis ve Makine*, 532:51-59.
- Biddulph, R. H. (1977) Boronizing for Erosion Resistant. *Thin Solid Films*, 45(2):341-347.
- Bindal, C. (1991) Az Alaşımlı ve Karbon Çeliklerinde Borlama İle Yüzeye Kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tespiti. Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 120s.
- Bozkurt N. (1984) Bor Yayınımıyla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme. Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 113s.
- Can, A. Ç. (2006) Borlama, Tasarımcı Mühendisler için Malzeme Bilgisi, *Birsan Yayınevi*, İstanbul, s.154-155.
- Çalık A. (2002) Türkiye'nin Bor Madenleri ve Özellikleri. *Mühendis ve Makine*, 508:36-41.
- Çelik, M. Y. (2006) Bor ve Bor Minerallerinin Eko Stratejik Analizi. Seminer Notları, *Dokuz Eylül Üniversitesi*, s.6-10.

- Çınk1, M. (2001) Ulusal Maden Varlığımız ve Bor Gerçeği. *Ankara Ticaret Odası Yayınları*, Ankara, s.196-210.
- Davis, J.A., Wilbur P.J., Williamson D.L., Wei R. and Vajo J.J. (1998) Ion Implantation Boriding of Iron and AISI M2 Steel Using A High-Current Density, Low Energy, Broad-Beam Ion Source. *Surface and Coatings Technology*, 104:52-57.
- Ediz N. ve Özdağ H. (2001) Bor Mineralleri ve Ekonomisi. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2:133-149.
- Erdemir, A. (2006) Süper Kayganlık ve Sürtünmesiz Yüzeyler, *Bilim ve Teknik Yeni Ufukları Türkiye’de Nano Teknoloji*, 468:8-9.
- Fichtl, W. (1981) Boronizing and Its Practical Application. *Materials in Engineering*, 2:276-286.
- Genel, K., Özbek, İ., Kurt, A. and Bindal, C. (2002) Boriding Response of AISI W1 Steel and Use of Artificial Neural Network for Prediction of Borided Layer Properties, *Surface and Coatings Technology*, 160:38-43.
- Goeuriot, P. Y., Fillit, P., Thevenot, F., Driver, S.H. and Bruyas, H. (1982) The Influence of Alloying Element Addition on the Boriding of Steels. *Material. Science and Engineering*, 55:9-19.
- Göy, Z. (1984) Borlama. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 76s.
- Greenwood, N. N. (1973) The Chemistry of Boron, *University of Leeds Pergamon Texts in Inorganic Chemistry*, Oxford, s665-991.
- Hunger, H. J. and Trute, G. (1994) Boronising to Produce Wear-Resistant Surface Layers. *Heat Treatment of Metals*, 2: 31-39.
- Karaman, Y. (2003) Endüstriyel Borlama ve Tekstil Endüstrisinde Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 121s.
- Khoe, S. M. M. (1992). Ergimiş Boraks Banyosunda Çeliklere Vanadyum Karbür Kaplama. Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 112s.
- Kistler, R. B. and Helvacı, C. (1994) Boron and Borates. Industrial Minerals and Rocks, *Society of Mining Metallurgy and Exploration Inc.*, 6:171-186.
- Matuschka, A. G. V. (1980) Boronizing. *The Alden Pres Ltd.*, Oxford, p.11-93.
- Meriç, C. and Şahin, S. (2002) Investigation of Effect Boronizing on Welding Zone. *Science Technology of Welding and Joining*, 7:107-115.
- Nair, F. and Karamış, M. B. (1999) An Evaluation of Erosion Behavior of Boronized Sand Blast Nozzle, *99<sup>th</sup> The International Conference of Tribology*, Sinaina-Romania, 3:239-245.

- Nair F., Karamış M.B. ve Taşdemirci A. (2000) Endüstriyel Uygulamalarda Borlanmış Çeliklerin Aşınma Davranışının İncelenmesi. **8. Denizli Malzeme Sempozyumu**, Denizli, s.334-343.
- Özsoy, A., (1991). “Çeliğin Borlanması Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matrisin Özelliklerinin İyileştirilmesi. Doktora Tezi, **Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir, 111s.
- Özsoy, A. (2001) Borlama ile İlgili Genel Bir Değerlendirme. **Endüstriyel Yüzey Teknolojileri Dergisi**, 22:10-13.
- Palombarini, G. and Carbucicchio, M. (1987) Growth of Boride Coatings on Iron. **Journal of Materials Science Letters**, 6:415-416.
- Poslu K. ve Aslan İ. H. (1995) Dünya Bor Mineralleri ve Bileşikleri Üretiminde Türkiye'nin Yeri. **Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu**, İzmir, s33-42.
- Sarper, S. S. (2004) Borlamanın Demir Esaslı T/M Parçaların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. Doktora Tezi, **Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Manisa, 151s.
- Saygın, M. (2006) AISI 1020 Çeliklerinde Borlamanın Yorulma Dayanımına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, **Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir, 59s.
- Selçuk, B. (1994) Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kayseri, 156s.
- Selam, M. (1996) Borlanmış Gri Dökme Demirin Aşınma Davranışının Deneysel Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 56s.
- Sinha A.K. (1991) Boronizing, Heat Treating, **ASM Int**, p.437-447
- Sivrioğlu İ. (1996) Bor Mineralleri ve Bor Bileşikleri Üretiminde Etibank'ın Çalışmaları ve İleriye Dönük Planları. Bor Bileşikleri Üretim Teknolojileri Araştırmaları Danışma Toplantısı, **Tübitak-MAM**, Gebze, s.9-16.
- Smith R. (1995) Boric Oxide, Boric Acid and Borates. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**, 4:263-280.
- Sönmez E. (1991) Kırka Tinkal Cevheri ve Konsantresinin Zenginleştirilme Olanaklarının Araştırılması. Doktora Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 108s.
- Şahin, S. (1999) Katı Borlama Yöntemi ile Ferrobor Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, **Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Manisa, 87s.
- Taşçı, A. (1993) Borlanmış Çeliklerin Aşınma ve Korozyon Dayanımları. Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 46s.

- Tezcan, R. (1996) Borlama İşlemi ve Endüstriyel Uygulamaları. Y. Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 46s.
- Uluköy, A. (2005) 21NiCrMo2 (AISI 8620) Çeliğinden Yapılmış Dişli Çarklara Karbürleme ile Beraber Borlama işleminin Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 129s.
- Uzun, H. A. (2002). Borlama ile Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları. Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 74s.
- WEB\_1 (2008) Bortec website. [www.bortec.de/boronizing](http://www.bortec.de/boronizing) (05.05.2008)
- Xu, C. H., Gao, W. and Yang, Y. L. (2001) Superplastic Boronizing of a Low Alloy Steel- Microstructural Aspects. *Journal of Materials Processing Technology*, 108:349-355.
- Yu, L.G., Khor, K.A. and Sundararajan G. (2002) Boriding of Mild Steel Using the SparkPlasma Sintering (SPS) Technique, *Surface and Coatings Technology*, 157:226–230.
- Yünker, U. (2000) Borlanmış Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 161s.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı, Soyadı** : Recep YURTSEVEN

**Doğum Tarihi** : 12. 06. 1980

**Doğum Yeri** : BURSA

**Eğitim Durumu:**

**Lise:** Tophane Endüstri Meslek Lisesi (1997)

**Lisans:** Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği  
Bölümü (2001)