

**TC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

**BORLAMA İLE YÜZEYLERİ  
SERTLEŞTİRİLEN ÇELİKLERİN  
AŞINMA ve KOROZYONA KARŞI  
DAYANIMLARI**

**Hasan Ali UZUN**

**Yüksek Lisans Tezi  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ  
ANA BİLİM DALI  
ISPARTA 2002**

T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

128267

BORLAMA İLE YÜZEYLERİ SERTLEŞTİRİLEN ÇELİKLERİN  
AŞINMA ve KOROZYONA KARŞI DAYANIMLARI

DANIŞMAN: YRD. DOÇ. DR. KAMİL DELİKANLI

HASAN ALİ UZUN

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ISPARTA, 2002

128267

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne

Bu çalışma jürimiz tarafından MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda  
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mustafa Bayhan  
Doç. Dr. A. Kemal YAKUT  
Üye :  
Yard. Doç. Dr.  
Kamil DELİKANLI  
Üye :

ONAY

Bu tez 05/09/2002 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri  
üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

11.09.2002

S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Adı Soyadı: Prof Dr. Remzi KARAGÜZEL

İmza:

*Prof. Dr. Remzi KARAGÜZEL*

ZC. YÜKSEK LİSANS TEZİ  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER .....	i
ÖZET .....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
SİMGELER (KISALTMALAR) DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Bor Elementi Hakkında Genel Bilgi .....	2
1.1.1. Borun Tanımı ve Tarihçesi.....	2
1.1.2. Saf Bor'un Fiziksel Özellikleri.....	4
1.1.3. Bor Ürünleri ve Üretim Yöntemleri.....	3
1.1.4. Bor Kullanım Alanları.....	7
1.1.5. Bor Ekonomisi.....	10
1.2. Borlama Yöntemleri.....	14
1.2.1. Borlama.....	14
1.2.2. Borlama Yöntemleri.....	14
1.2.2.1. Katı (Toz) Ortamda Borlama .....	15
1.2.2.2. Macunlama (Pasta) İle Borlama.....	16
1.2.2.3. Sıvı Ortamda Borlama .....	17
1.2.2.4. Gaz Ortamda Borlama .....	18
1.2.2.5. Plazma (İyon) Borlama .....	20
1.2.3. Demir Esaslı Malzemelerin Borlanması.....	21
1.2.4. Demir-Bor İkili Denge Diyagramı.....	23
1.3. Borlamada Meydana Gelen Borür Tabakası ve Geçiş Bölgesinin Oluşum Mekanizması.....	26
1.3.1. Borür Tabakasının Oluşumu, Büyümesi ve Geçiş Bölgesi.....	26
1.3.2. Borür Tabakası Çeşitleri ve Borür Tabakası Kalınlığı.....	31
1.3.3. Borlanabilir Malzemeler ve Metal Borürler.....	33
1.3.4. Alaşım Elementlerinin Borlamaya Etkisi.....	35

1.4. Borlanmış Çeliklerin Aşınma Özellikleri.....	40
1.4.1. Abrasiv Aşınma Özellikleri.....	42
1.4.2. Adhesiv Aşınma Özellikleri.....	43
1.4.3. Kavitasyon-Erozyon Aşınması Özellikleri.....	44
1.4.4. Eroziv Aşınma Özellikleri.....	46
1.5. Borlanmış Çeliklerin Korozyon Dayanımları.....	46
2. KAYNAK BİLGİSİ.....	49
3. MATERYALVE METOD.....	53
3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	53
3.2. Katı Ortamda Borlama İşlemleri.....	54
3.3. Deneylerin Yapılışı.....	55
4. BULGULAR.....	57
4.1. Katı Ortamda Borlama Deney Sonuçları.....	57
4.2. Korozyon ve Aşınma Deney Sonuçları.....	63
5. GENEL SONUÇLAR.....	67
6. KAYNAKLAR.....	68
ÖZGEÇMİŞ.....	75

## ÖZET

Bu çalışmada, Ç1040 çeliğine farklı sıcaklık ve sürelerde termokimyasal işlemle bor kaplama ısıl işlemi uygulanmıştır. Aynı grup malzemelere 4 farklı borlama işlemi yapılmıştır. Birinci borlama işlemi 950 °C de 3 saat bekletip havada soğutma işlemi uygulanmıştır. İkinci grup deneylere de aynı sıcaklıkta 5 saat bekletme, üçüncü grup malzemelere 1000 °C de 3 saat bekletilip havada soğutma ve dördüncü grup numunelere de yine aynı sıcaklıkta 5 saat bekletip havada soğutma işlemi yapılmıştır. Her dört grup deneyde de taze (yeni) susuz boraks (tinkal) ile ferrosilisyum tozunun karışımından oluşan katı ortamda borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Termokimyasal borlama işlemleri aynı büyüklükteki potalarda gerçekleştirilmiştir. Yapılan deney numunelerin de oluşan borür tabakasının dağılmadan SEM fotoğrafları vasıtasıyla tabaka kalınlıkları ile mikro sertlikleri incelenmiştir. Borlanmış numuneler ile borlanmamış numuneler korozyon ve aşınma deneylerine tabi tutularak aralarındaki dayanım farkları karşılaştırılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Ç1040 Çeliği, Borlama, Borür Tabakası, Korozyon, Aşınma.

## ABSTRACT

In this study, four types boronizing were applied of the different temperatures and periods on the SAE 1040 steels. At the first groups experiments, boronizing process were done on the steels at the 950 °C stable temperature and 3 hours, second experiments, boronizing process were done on the steels at the 950 °C stable temperature and 5 hours. The third groups experiments were done at the 1000 °C stable temperature and 3 hours. Then, The fourth groups experiments were done at the 1000 °C stable temperature and 5 hours. All samples after boronizing were air cooled. . New boronizing powder which waterless borax and ferro silisium powder mixture were also used in the every groups experimental and process and thermochemical boronizing processes were done in the same size crucible. The SEM microstructure figure, micro hardness and boride layer thickness were investigated of the boride layers. Corrosion and wear tests were applied to the sample treated with boron and the sample not treated with boron and the strength properties were compared.

**KEYWORDS :** SAE 1040, Boronizing, Boride Layer, Corrosion, Wear.

---

## TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum bu çalışmada, gerek konunun tespitinde, gerek literatür araştırması başta olmak üzere her türlü konuda yol göstererek destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Kamil Delikanlı'ya, deneylerin yapımında her zaman yanımda olan Arş. Gör. Adnan Çalık'a, tecrübelerini bize her zaman aktaran Doç.Dr. Abdullah Özsoy'a, çalışmalarımı her zaman destekleyen Eti Bor A.Ş. Emet Bor İşletme Müdürü İsmail Moğol'a, Teknik Müdür Feti Candan'a, Üretim Müdürü İbrahim Kayandan'a ve Servis Şefim Mehmet Afacan'a, metalografik incelemelerde yardımcı olan Eskişehir 1.H.İ.B.M.K.' da Erhan Kaya'ya, Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Elemanı Kemal Yıldızlı'ya, korozyon deneylerinin yapımında yardımcı olan Eti Bor A.Ş. Emet Bor İşletmesi Laboratuvar servisi çalışanlarına, aşınma deneylerinin yapımında yardımcı olan Dumlupınar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Yrd.Doç.Dr. Rahmi Ünal'a ve Arş.Gör. Levent Urtekin'e, ferro silisyumun temin edilmesinde yardımcı olan Erdemir A.Ş.'de Erol Ekiztaş'a ve de tezin başlangıcından bitimine kadar büyük sabır gösterip desteğini esirgemeyen eşim Tülay Uzun'a teşekkürlerimi sunarım.

---



**SİMGELER (KISALTMALAR) DİZİNİ**

B	Bor
Al	Alüminyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum oksit
B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Diboran
B <sub>4</sub> C	Bor karbür
BCl <sub>3</sub>	Bortriklorit
BN	Bor nitrür
C	Karbon
Cr	Krom
Cu	Bakır
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
D	Yayınma katsayısı
Fe	Demir
FeB	Demir borür
Fe-Si	Ferro silisyum
Fe-Ti	Ferro titanyum
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sülfürik asit
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Borik asit
HCl	Hidro klorür
Mn	Mangan
MnB	Mangan borür
Mo	Molibden
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Susuz boraks
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .10H <sub>2</sub> O	Boraks dekahidrat
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .5H <sub>2</sub> O	Boraks pentahidrat
Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	Kriyolit
NaBO <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 3H <sub>2</sub> O	Sodyum perborat
NaCl	Sodyum klorür
Ni	Nikel
PVD	Fiziksel buhar biriktirme

SEM	Taramalı elektron mikroskobu
Si	Silisyum
SiC	Silisyum karbür
Ti	Titanyum
V	Vanadyum
VC	Vanadyum karbür



## ÇİZELGELERİN DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Kristalin borun yapısı ve kafes parametreleri .....	4
Çizelge 1.2. Bor ve bazı bileşiklerin sertlikleri .....	4
Çizelge 1.3. Dünya Bor Cevherleri Üretimi ( $10^3$ ton) .....	10
Çizelge 1.4. Etibor A.Ş. Bor Cevherleri ve Rafine Bor Ürünleri Üretimi ( $10^3$ ton) .....	12
Çizelge 1.5. Bor Bileşikleri Sektöründe Kurulu Kapasite Durumları .....	13
Çizelge 1.6. Dünya Birincil Bor Ürünleri Üretim Kapasiteleri.....	13
Çizelge 1.7. Demir Borürlerin Bazı Fiziksel Özellikleri.....	22
Çizelge 1.8. Teorik Borür Tabakası Kalınlığı Hesabı için Yayınma Katsayısı (D) Değerleri .....	23
Çizelge 1.9. Borür ve Karbo-Borürlerin Sınıflandırılması .....	35
Çizelge 1.10. Elektrolitik Olarak Yüzeyde Biriktirilen Demirin, Borür Tabakası Kalınlığına Etkisi .....	40
Çizelge 1.11. 3 saat süreyle borlanmış ve borlanmamış “3” adet özel hazırlanan alaşımda $56^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki % 10 $\text{H}_2\text{SO}_4$ korozif ortamında ağırlık kaybı testi ile elde korozyon değerleri.....	48
Çizelge 3.1. Deneyleerde kullanılan Ç1040 çeliğinin kimyasal bileşimi (Ağırlık %) .....	53
Çizelge 3.2. Ferrosilisyumun kimyasal bileşimi .....	54
Çizelge 4.1. Deneyleer sonucunda elde edilen tabaka kalınlıkları ve sertlik değerleri .....	57
Çizelge 4.2. Borlanmış ve borlanmamış numunelerin $56^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki % 10 $\text{H}_2\text{SO}_4$ korozif ortamında ağırlık kaybı testi ile elde edilen korozyon değerleri.....	63
Çizelge 4.3. Borlanmış ve borlanmamış numunelerin Pin-On-Disk aşınma deney cihazında ağırlık kaybı testi ile elde edilen aşınma değerleri.....	65

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Fe-B İkili Denge Diyagramı.....	24
Şekil 1.2. Fe-B İkili Denge Diyagramı.....	25
Şekil 1.3. Matriste ve Borür Tabakasındaki Bor ve Diğer Elementlerin, Yüzde Ağırlık Olarak Değişimleri .....	27
Şekil 1.4. FeB ve Fe <sub>2</sub> B Tabakalarında, Demir-Bor Reaktivitesinden Kaynaklanan Kolonsal Büyümenin Şematik Gösterimi.....	29
Şekil 1.5. Fe <sub>2</sub> B ve Geçiş Bölgesi Kalınlığının Borlama Süresi ile Değişimi.....	30
Şekil 1.6. Borür Tabakası Çeşitleri.....	31
Şekil 1.7 Borür Tabakası Kalınlığının Tanımlanması.....	33
Şekil 1.8 Borür Tabakasının Büyümesine Alaşım Elementlerinin Etkisi.....	36
Şekil 4.1. 950°C sıcaklıkta 3 saat borlama sonucunda Ç1040 numunelerinin tabaka, geçiş bölgesi ve anayapısı (a) SEM (b) Mikroyapı (c) Mikroyapı (Dağlanarak) .....	58
Şekil 4.2. 950°C sıcaklıkta 5 saat borlama sonucunda Ç1040 numunelerinin tabaka, geçiş bölgesi ve anayapısı (a) SEM (b) Mikroyapı (c) Mikroyapı (Dağlanarak) .....	59
Şekil 4.3. 1000°C sıcaklıkta 3 saat borlama sonucunda Ç1040 numunelerinin tabaka, geçiş bölgesi ve anayapısı (a) SEM (b) Mikroyapı (c) Mikroyapı (Dağlanarak).....	60
Şekil 4.4. 1000°C sıcaklıkta 5 saat borlama sonucunda Ç1040 numunelerinin tabaka, geçiş bölgesi ve anayapısı (a) SEM (b) Mikroyapı (c) Mikroyapı (Dağlanarak).....	61
Şekil 4.5. 950°C ve 1000°C sıcaklıklarda borlanan numunelerin tabaka kalınlığının borlama süresi ve sıcaklıkla değişimi .....	62
Şekil 4.6. 950°C ve 1000°C sıcaklıklarda borlanan numunelerin mikro sertliklerinin borlama süresi ve sıcaklıkla değişimi.....	62
Şekil 4.7. Borlanmış ve borlanmamış Ç 1040 çeliğinin % ağırlık kaybının korozif ortamda kalma süresi ile değişimi.....	64

Şekil 4.8. Borlanmış ve borlanmamış Ç 1040 çeliğinin birim yüzeydeki ağırlık kaybının korozif ortamda kalma süresi ile değişimi.....	64
Şekil 4.9. Borlanmış ve borlanmamış Ç 1040 çeliğindeki aşınma kaybının kayma mesafesi ile değişimi.....	65



## 1. GİRİŞ

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan malzemelerin korozyon, sürtünme ve aşınma gibi tribolojik etkiler neticesinde azalan kullanım ömürlerinin artırılması yüzey bölgesinin iyileştirilmesi ile mümkündür. Aşınma ve korozyondan dolayı dünya da her yıl önemli malzeme kayıplar olmaktadır. Ülkelerin korozyon nedeniyle kayıpları gayri safi milli hasılatlarının %3.5-5'i arasında değişmektedir. Yalnız Türkiye'deki 1991 yılı kaybı 4.5 milyar dolar olarak tahmin edilmektedir (Khoee,1992).

Borlama işlemi uzun bir geçmişe sahiptir. Çeliklerde bor yayınımla yüzey sertleştirme, ilk kez 1895 yılında Moissan tarafından yapılmıştır. 1970'li yıllardan itibaren borlama konusunda çalışmalar hızlanmıştır. Günümüzde borlama, teknolojik olarak gelişmiş ve endüstride, özellikle alternatif bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Almanya'da katı ortamda borlama, Rusya'da ise sıvı ortamda borlama bir çok endüstriyel alanda başarıyla kullanılmaktadır.

Nitrürasyon, karbürizasyon v.b. konvansiyonal yüzey sertleştirme işlemlerinde (600-1100) HV'lik bir yüzey sertliği elde edilirken, borla yüzey sertleştirmede (borlama ) 1500-2000 HV'lik sertliğin yanında çok düşük sürtünme katsayıları elde edilmektedir. Borlama, yüksek sıcaklıkta çelik malzeme yüzeyinde bor difüzyonuyla  $Fe_2B$  ve/veya  $FeB$  gibi bileşiklerin elde edilmesidir. Endüstriyel uygulamalarda, hem daha az gevrek olması ve hem de borlama sonrası ısıl işlemlere izin vermesi bakımından  $Fe_2B$ 'den oluşan tek fazlı borür tabakaları tercih edilir ( Özsoy, 1991).

Tek başına dünya Bor rezervlerinin yaklaşık % 70'ini elinde bulunduran ülkemiz, bu cevherlerin değerlendirilmesinde yetersiz durumdadır. Bir çok bilim adamının "21. yüzyılın petrolü" olarak tanımladığı ve uzay teknolojisinden, bilişim sektörüne, metalurjiden nükleer teknolojiye kadar daha sayamadığımız pek çok sanayi dalında kullanılan Bor mineralleri ülkemizin elinde bulunan en stratejik varlık konumundadır (Çınkı, 2001)

---

Ülkemizde bor minerallerinden rafine ürün olarak boraks pentahidrat, boraks dekahidrat, susuz boraks, borik asit ve sodyum perborat üretilmektedir. Bu ürünler dışında genellikle ileri teknoloji gerektiren yöntemler ile dünyada ticari olarak üretilen ve değişik kullanım alanları olan 250'den fazla özel bor ürünü mevcuttur. En yaygın kullanım alanı olan özel bor ürünleri susuz borik asit, elementer bor, çinko borat, ferrobora, bor kabür, bor nitrür olarak sayabiliriz (Kimya Müh.Odası, 2001).

Genel literatür incelendiğinde endüstriyel banyo bileşimlerinin patentlerle korunduğu, akademik çalışmalarda kullanılan borlama ortamları bileşimlerinin ise ülkemizde üretilmeyen pahalı kaynaklardan oluştuğu görülmüştür. Bu nedenle ülkemiz kaynaklarının değerlendirilmesinden yola çıkılarak borlama ortamı bileşimleri olarak ülkemizde üretilen susuz boraks ve ferro silis seçilerek katı ortamda borlama yöntemi ile Ç1040 çeliği borlanmıştır.

## **1.1. Bor Elementi Hakkında Genel Bilgi**

### **1.1.1. Borun Tanımı ve Tarihçesi**

Yerkabuğunda 51. yaygın element olarak boratlar ve borosilikatlar halinde yer alan bor elementi, yaklaşık 3 ppm 'lik konsantrasyon değerine sahiptir. Kimyasal sembolü “ B “ olup, periyodik cetvelde IIIA grubunun metal olmayan tek elementidir. Bor , tabiatta serbest halde bulunmayıp, her zaman oksijene bağlı olarak bulunmaktadır. Bor elementinin atom numarası 5, atom ağırlığı 10.81, özgül ağırlığı 2.30-2.46 gr/cm<sup>3</sup> ve ergime noktası yaklaşık 2300°C 'dir. Bor elementinin amorf bir toz halindeki rengi koyu kahverengidir. Ancak çok gevrek ve sert yapılı monoklinik kristal halinin rengi ise sarımsı-kahverengidir. ( Smith,1995 ).

Bor periyodik cetveldeki IIIA grubunun karbon ve silisyum elementlerine benzerliği en fazla ve oksijene karşı afinitesi çok yüksek olan bir elementtir. Bor elementi; doğada sırasıyla %19.10-20.31 ve %79.69-80.90 oranında, B<sup>10</sup> ve B<sup>11</sup> ile gösterilen 2 adet dengeli izotopa sahiptir. Bor izotoplarının doğadaki oranları

bölgelere göre farklılıklar göstermektedir, bilinen yataklarındaki B<sup>10</sup> miktarı; A.B.D.-Kaliforniya ' da düşük, Türkiye' de ise yüksektir (Kistler ve Helvacı, 1994).

Elementel bor; 1808 yılında Fransız Kimyacı Gay Lussac ve İngiliz Kimyacı Sir Humphry Davy tarafından aynı zamanda elde edilmiştir. Bu bilim adamları saflığı % 50'den fazla olmayan koyu renkli ve yanıcı özellik gösteren bor elementini elde etmeyi başarmışlardır. 1895 yılında Henry Moissan borik asit ve magnezyum' u indirgeme işlemine tabi tutularak yaklaşık %86 saflıkta ve yüksek miktarda elementel bor elde edebilmiştir. Moissan Prosesi günümüzde de ticari olarak düşük saflıkta amorf bor elementi eldesinin temelini oluşturmaktadır ( Baudis ve Fichte, 1995 ).

1909 yılında, Weintraub BCl<sub>3</sub> bir elektrik ark ocağında dekompoze ederek % 99 saflıkta bor elementi elde edilmiştir. Bu taritten sonra da yüksek saflıkta bor elementi eldesi için yeni yöntemler geliştirilmiştir ( Baudis ve Fichte, 1995 ).

Bor içeren doğal minerallere genel olarak boratlar denilmekte ve boratlar insanoğlu tarafından binlerce yıldır kullanılmaktadır. Arapça'da boraks anlamına gelen " baurach" sözcüğüne 2000 yıl öncesinden kalan eski İran ve Arabistan' daki el yazmalarında rastlanmaktadır. Boraks deka hidrat kimyasal bileşiğinin doğal hali olan tinkal ise, Sanskritçe' de boraks anlamına gelen "tinicana" dan türemiştir. Boratların M.Ö. 300 yıllarından kalan Çin seramiklerinde ve Babil Uygarlığı zamanından önce altın dökümü için ergitici olarak kullanıldığı bilinmektedir. Marco Polo 13. yüzyılın sonlarında boraks' ı Tibet'ten Avrupa'ya getirmiş ve bu tarihlerde boraks, lehimleme ve sırlama malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır ( Özkan vd., 1997 ). Tüm ortaçağ boyunca, Verona şehrinin bor ticaretinde ana liman görevi yaptığı bilinmektedir ( Kistler ve Helvacı,1994 ).

Türkiye'de boratlar ise 13. yüzyıldan bu yana bilinmesine rağmen son zamanlara kadar çok az kullanılmıştır. 1772 yılında İtalya'nın Tuscany Bölgesinde sıcak su kaynaklarında doğal borik asit olan "sasolit" minerali keşfedilmiştir. 1836 yılında ise Şili ve Arjantin'de boratlar bulunmuş ve bu yataklar 19. yüzyılın sonlarına



kadar dünyada bor elde edilen en büyük kaynaklar haline gelmiştir. 1864 yılında A.B.D.' nin Kaliforniya ve Nevada Eyaletlerindeki bor yatakları keşfedilmiştir ( Özkan vd., 1997 ).

### 1.1.2. Saf Bor'un Fiziksel Özellikleri

Periyodik sistemin IIIA grubunda bulunan borun atom numarası 5, atom ağırlığı 10.82, atom çapı 1.78 Å ve ergime noktası 2400°C' dir.

Bor  $2.33 \pm 0.002 \text{ gr/cm}^3$  yoğunluklu kristal ve  $2.3 \text{ gr/cm}^3$  yoğunluklu amorf olmak üzere iki şekilde bulunur. Kristalin borun yapısı ve kafes parametreleri tablo 1.1' de, bor ve bazı bileşiklerin sertlikleri ise tablo 1.2' de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Kristalin borun yapısı ve kafes parametreleri (Taşçı, 1993)

Kristal Şekli	Kafes Parametreleri ( Å )	
	b	c
Tetragonal	8.13	8.57
Hegzagonal	9.54	11.98

Çizelge 1.2. Bor ve bazı bileşiklerin sertlikleri (Taşçı, 1993)

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

### 1.1.3. Bor Ürünleri ve Üretim Yöntemleri

**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 gr./mol, özgül ağırlığı 1,71 ( $20^\circ\text{C}$ ), özgül ısısı 0,385 kcal/gr/ $^\circ\text{C}$  (  $25-50^\circ\text{C}$ ), oluşum ısısı  $-1497,2$  kcal/mol' dür. Renksiz monoklinik kristal yapısında bir tuzdur. Sulu çözeltileri yaklaşık, konsantrasyondan bağımsız olarak hafif alkali reaksiyon gösterir. (pH=9,2). Doymun boraks çözeltisi  $105^\circ\text{C}$ ' 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 gr/mol, özgül ağırlığı 1.88, özgül ısısı 0,316 kcal /gr/ $^\circ\text{C}$  ve oluşum ısısı ,  $-1143,5$  kcal/mol' dür. Mineral adı tinkalkonit olan pentahidrat boraksın dehidrasyonundan oluşan birikintiler halinde bulunur. Doymuş boraks çözüntüsünün  $60^\circ\text{C}$ ' nin üzerinde kristallenmesi ile oluşur.

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

**Borik Asit :** Borik asit( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) molekül ağırlığı 61,83 gr/mol,  $\text{B}_2\text{O}_3$  içeriği %56.3,ergime noktası  $169^\circ\text{C}$ , özgül ağırlığı 1.44, oluşum ısısı ,  $-1089$  kJ/mol, çözünme ısısı 22,2 kJ/mol olan kristal yapılı bir maddedir. Oda sıcaklığında sudaki çözünürlüğü az olmasına rağmen, sıcaklık yükseldikçe çözünürlüğü de önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle sanayide borik asidi kristallendirmek için genellikle doymun çözeltiyi  $80^\circ\text{C}$ ' den  $40^\circ\text{C}$ ' ye soğutmak yeterli olmaktadır. Bor minerallerinden geniş ölçüde üretilen borik asit başlıca; cam,seramik ve cam yünü sanayiinde kullanılmakta olup, kullanım alanları çok çeşitlidir. Borik asit, bor minerallerinin genel olarak sülfürik asit ile asitlendirilmesi ile 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,  $B_2O_3$  ‘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 sanayiinde çok kullanılır. Yüksek sıcaklıkta borik asitten su buharlaşırken  $B_2O_3$  kaybı artmaktadır. Cam üretim prosesinde, borik asit yerine, bor oksit kullanılması enerji ve hammadde avantajı sağlamaktadır (Kocakuşak vd., 1986). Bor oksit porselen sırlarının hazırlanmasında, çeşitli camlarda, ergitme işlemlerinde, seramik kaplamalarda kullanılır. Ayrıca pek çok organik reaksiyonun katalizörüdür. Pek çok bor bileşiğinde başlangıç maddesidir.

**Sodyum Perborat :** Sodyum perborat ( $NaBO_2 \cdot H_2O_2 \cdot 3H_2O$ ) genellikle tetrahidrat yapısındadır. Perborat üretiminde %33  $B_2O_3$  içeren boraks minerali kullanılmaktadır. Sodyum perborat, Bandırma’ daki Eti Bor A.Ş. Boraks ve Asit Fabrikaları İşletmeleri tarafından üretilmektedir. (Kocakuşak vd., 1986). Sodyum perborat, ağartıcı etkisi dolayısıyla yaygın olarak sabun ve deterjan sanayiinde kullanılmaktadır. Ayrıca kozmetik maddelerin yapımında, tekstil endüstrisinde, mum, reçine, tutkal ve sünger sanayiinde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (Sönmez, 1991).

**Diğer Bor Bileşikleri :** Yukarıda açıklanan bor ürünleri dışında sanayide yaygın olarak kullanılan diğer bor bileşikleri aşağıda özet olarak verilmiştir (Ediz ve Özdağ, 2001).

**Boridler :** Metalik karaktere sahip bor bileşikleridir. Metallerle veya metaloksitler ile borun reaksiyonu sonucu elde edilirler. Ticari olarak metal karışımların ve borun ; alüminyum, magnezyum veya karbon ile indirgenmesi ile elde edilirler. Boridler yüksek ergime noktasına, yüksek sertliğe ve iyi bir kimyasal stabiliteye sahiptirler. Oksidasyona karşı dirençlidirler. Bu nedenle, metal yüzeylerinin kaplanmasında, ısıya dayanıklı kazan ve buhar kazanları yapımında, korozyona dayanıklı malzeme üretiminde ve elektronik sanayide kullanılırlar.

**Bor Karbür :** Bor-karbon sistemindeki tek bileşik olan bor karbür, genellikle granür katı olarak elde edilir. Masif ürün olarak elde edilmek istendiğinde, 1800-2000°C' de grafit kalıplarda preslenir. Saf bor karbür kristalleri hafif parlak görünümdedir. Yoğunluğu 2,52 gr/cm<sup>3</sup>, ergime sıcaklığı 2450°C' dir. Sıcak preslenmiş bor karbür, aşındırıcı parçalarda, contalarda, seramik zırlı yüzeylerin yapılmasında kullanılır. 2000°C 'nin üzerindeki sıcaklıkların ölçülmesinde termoçift olarak kullanılır. Sertliği nedeniyle abrasiv malzeme yapımında kullanılır, ayrıca nükleer reaktörlerde nötron yakalama kapasitesi, kimyasal inertliği ve radyasyon stabilitesi gibi özelliklerinden yararlanır (Sönmez, 1991).

**Bor Nitrit :** Bor nitrit genellikle hegzagonal yapıda oluşur. Hegzagonal sistemde iken beyaz, talk' a benzeyen, 2,27 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluğunda bir tozudur. Kübik sistemde ise oldukça serttir. Teorik yoğunluğu 3,45 gr/cm<sup>3</sup> tür ve iyi bir elektrik izolatörüdür. Ergitilerek masifleştirilmiş bor nitrit büyük bir kimyasal dirence sahiptir. Kübik yapıdaki bor nitrit çok iyi bir abrasiv malzemedir. Bu özelliğinden dolayı, kesici aletlerin yapımında ve sert alaşımların işlenmesinde kullanılır (Sönmez, 1991).

**Bor Halojenürler :** Borun flor, klor, brom, iyot gibi halojenlerle yaptığı bileşiklerdir. Bor oksitin derişik sülfirik 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 (Sönmez, 1991).

#### 1.1.4. Bor Kullanım Alanları

Bor mineralleri ve bileşikleri çeşitli endüstri dallarında çok farklı malzeme ve ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır. Metalik malzemeler üzerine bor kaplama işlemi ve bor bileşiklerinin kullanımı, insanlık tarihin en eski teknolojilerinden olup günümüze kadar kullanıla gelmiştir. Günümüzde bu kullanım sahaları çok daha fazla

genişlemektedir, özellikle 400'den fazla endüstriyel alanlarda uygulama alanı bilinmektedir (Çalık, 2002).

Bor ve ürünlerinin kullanım alanlarını aşağıdaki gruplarda toplamak mümkündür:

- Cam Sanayi: Borsilikat Camları, İzole Cam Elyafı, Tekstil Cam Elyafı, Optik Lifler, Cam Seramikleri, Şişe ve Diğer Düz Camlar,
- Seramik Sanayi: Emaye ve Sır Porselen Boyaları vb.
- Nükleer Sanayi: Reaktör Kontrol Çubukları, Nükleer Kazalarda Güvenlik Amaçlı ve Nükleer Atık Depolayıcı olarak,
- Uzay ve Havacılık Sanayi: Sürtünmeye-Aşınmaya ve Isıya Dayanıklı Malzemeler, Roket Yakıtı
- Askeri ve Zırhlı Araçlar: Zırh Plakalar vb.
- Elektronik – Elektrik ve Bilgisayar Sanayiinde: Bilgisayarların Mikro chiplerinde, CD-Sürücülerinde, Bilgisayar Ağlarında; Isıya ve Aşınmaya Dayanıklı Fiber Optik Kablolar, Yarı İletkenler, Vakum Tüpler, Dielektrik Malzemeler, Elektrik Kondansatörleri, Gecikmeli Sigortalar, vb.
- İletişim Araçlarında: Cep Telefonları, Modemler, Televizyonlar vb.
- İnşaat Çimento Sektöründe: Mukavemet Artırıcı ve İzolasyon Amaçlı olarak,
- Metalurji: Paslanmaz ve Alaşımli Çelik, Sürtünmeye-Aşınmaya Karşı Dayanıklı Malzemeler, Metalurjik Flaks, Refrakterler, Briket Malzemeleri, Lehimleme, Döküm Malzemelerinde Katkı Maddesi olarak, Kesiciler vb.
- Enerji Sektörü: Güneş Enerjisinin Depolanması, Güneş Pillerinde Koruyucu olarak vb.
- Otomobil Sanayi: Hava Yastıklarında, Hidroliklerde, Plastik Aksamda, Yağlarda ve Metal Aksamlarda, Isı ve Yalıtımı Sağlamak Amacıyla Antifrizler vb.
- Tekstil Sektörü: Isıya Dayanıklı Kumaşlar, Yanmayı Geciktirici ve Önleyici Selülozik Malzemeler, Yalıtım Malzemeleri, Tekstil Boyaları Deri Renklendiricileri, Suni İpek Parlatma Malzemeleri, vb.

- İlaç ve Kozmetik Sanayi: Dezenfekte Ediciler, Antiseptikler, Diş Macunları, vb.
- Tıp: Ostrepoz Tedavilerinde, Alerjik Hastalıklarda, Psikiyatride, Kemik Gelişiminde ve Artiretti, Menopoz Tedavisinde Beyin Kanserlerinin Tedavisinde vb.
- Kimya Sanayi: Bazı Kimyasalların İndirgenmesi, Elektrolitik İşlemler, Flatasyon İlaçları, Banyo Çözeltileri, Katalizörler, Atık Temizleme Amaçlı olarak, Petrol Boyaları, Yanmayan ve Erimeyen Boyalar, Tekstil Boyaları vb.
- Temizleme ve Beyazlatma Sanayi: Toz Deterjanlar, Toz Beyazlatıcılar, Parlaticılar vb.
- Tarım Sektörü: Gübreler Böcek-Bitki Öldürücüler, vb.
- Kağıt Sanayi: Beyazlatıcı olarak,
- Kauçuk ve Plastik Sanayi: Naylon vb. , Plastik Malzemeler vb.
- Koruyucu: Ahşap Malzemeler ve Ağaçlarda Koruyucu olarak Boya ve vernik Kurutucularında vb.
- Patlayıcı Maddeler: Fişek vb.
- Fotoğrafçılık
- Zımpara ve Aşındırıcılar
- Yapıştırıcılar
- Kompozit malzemeler
- Spor Malzemeleri
- Manyetik Cihazlar
- Mumyalama

Gelişen teknolojiler, Bor kullanımını ve Bor' a bağımlılığını artırmakta, 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.

### 1.1.5. Bor Ekonomisi

Dünya bor mineralleri üretiminde Türkiye ve A.B.D.' de lider konumdadır. Önemli miktarlarda üretim yapan diğer ülkeler ise; Arjantin, Kazakistan, Rusya, Şili, Çin, Peru ve Bolivya' dır. Bu ülkeler ve yaptıkları üretim Çizelge 1.3' de verilmiştir. Çizelge 1.3'den anlaşılacağı gibi, 1970 yılında % 21 olan ülkemizin payı, 1980 yılında % 31'e 1992 yılında ise % 41' e yükselmiş ve Türkiye dünyanın en büyük bor minerali üreticisi konumuna gelmiştir. Aynı yıllarda A.B.D.' nin dünya üretimindeki payı ise sırasıyla % 65, % 54 ve % 39 olarak gerçekleşmiştir. Çizelge 1.3'de dünya bor cevheri üretimi verilmiştir (Sivrioğlu, 1996).

Çizelge 1.3. Dünya Bor Cevherleri Üretimi (10<sup>3</sup> ton) (Sivrioğlu, 1996)

Yıl	Etibor A.Ş.	A.B.D.	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 bor bileşiklerinde ikinci sırada yer almaktadır. Çünkü A.B.D.' nin almış olduğu tüm ürünler, rafine olup,  $B_2O_3$  oranları yüksektir. Türkiye'nin  $B_2O_3$  üretimindeki payının 480.000 ton olmasına karşılık A.B.D.' nin payının 580.000 ton olduğu tahmin edilmektedir.  $B_2O_3$  baz alındığında A.B.D. ve Türkiye'nin dünya üretimindeki payı sırasıyla %48 ve %39 olmaktadır. Etibor A.Ş.' nin bor mineral üretiminde 1. sıraya yerleşmesinin nedeni, gerek madencilik alanında, gerekse tesisler bazında yapmış olduğu önemli yatırımlardır. Çizelge 1.4 Etibor A.Ş. bor cevherleri ve rafine bor ürünleri üretimini vermektedir (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 düzeydedir (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 ). Etibor A.Ş.' nin 1995 yılında bor ihracatı 216 milyon dolar olup, toplam Etibor A.Ş. ihracatı içerisinde bor'un payı %64' tür.



Çizelge 1.4. Etibor A.Ş. Bor Cevherleri ve Rafine Bor Ürünleri Üretimi (10<sup>3</sup>ton)  
(Poslu ve Aslan,1995)

Bor Cevheri veya Rafine Ürünleri Cinsi	YILLAR				
	1990	1991	1992	1993	1994
Kolemanit	571.0	503.0	334.0	414.0	450.0
Üleksit	129.0	129.0	135.0	149.0	198.0
Tinkal	552.0	577.0	590.0	560.0	558.0
Bor Cevherleri Toplamı	1,252.0	1,209.0	1,059.0	1,123.0	1,206.0
Boraks deka	16.1	14.2	18.1	30.6	30.1
Boraks penta	121.0	146.7	160.9	168.0	163.7
Borik asit	25.0	17.6	23.2	30.2	46.1
Sodyum Perborat	18.9	13.5	13.9	17.7	15.1
Bor Ürünleri Toplamı	181.0	192.5	216.1	246.5	255.0

Bor bileşikleri sektöründe kurulu kapasite durumu çizelge 1.5'de verilmiştir (Tolun,1996). Dünya birincil bor ürünleri ( penta, deka, susuz boraks, borik asit ) üretim kapasiteleri 1992 yılı itibariyle Çizelge 1.6' da verilmiştir ( Sivrioğlu,1996 ).

Çizelge 1.5. Bor Bileşikleri Sektöründe Kurulu Kapasite Durumları (Tolun,1996)

Kuruluş Adı	Ana Ürün	Kapasite (ton/yıl)
Etibor A.Ş.- Bandırma Borik Asit İşletmesi	Boraks ( dekahidrat )	55,000
	1.Borik Asit	25,000
	2.Borik Asit	75,000
	Sodyum Perborat	20,000
Etibor A.Ş.- Kırka Boraks İşletmesi	Boraks pentahidrat( Etibor 46)	160,000
	Boraks dekahidrat	17,000
	Susuz boraks (Etibor 65 )	60,000

Çizelge 1.6. Dünya Birincil Bor Ürünleri Üretim Kapasiteleri ( Sivrioğlu,1996)

Ülke/Firma	Kapasite (ton)	Açıklama
ABD/US Borax (1996)	845,000	100,000 ton susuz, 112,000
North American C.C.	90,000	ton borik asit 48,000 ton
In-Cide Technologies	23,000	susuz, 40,000 ton borik asit
		Tamamı borik asit
Türkiye/Etibor A.Ş. (1996)	482,000	60,000 ton susuz, 50,000
		ton borik asit
Rusya/Bor Primorsky	250,000	Tamamı borik asit
Fransa/Borax Francais	85,000	40,000 ton borik asit
İtalya/Harris Chemical Group	75,000	60,000 ton borik asit
Hindistan/Borax Morarji	19,000	3,000 ton borik asit
Southern Borax	16,000	Tamamı borik asit
Şili/Qumica Industria	24,000	Tamamı borik asit
Arjantin/Boroquimica	16,000	3,200 ton susuz boraks
Diğer	20,000	8,000 ton borik asit
TOPLAM	1,900,000	610,000 ton borik asit 1,290,000 ton boraks(penta+deka+susuz )

## 1.2. Borlama ve Yöntemleri

### 1.2.1. Borlama

Borlama, difüzyon mekanizmasıyla gerçekleştirilen yüzey sertleştirme işlemlerindedir. Borlama, metalik malzemenin yüzeyine Borun yayındırıldığı termo kimyasal bir işlemdir. Borla yüzey sertleştirme, esas olarak borun yüksek sıcaklıkta çeliğe yayılımı olayıdır. Demir ve demir dışı birçok alaşım ile sinterkarbür ve seramik malzemelere uygulanabilir. Borlanacak malzemeler, özelliklerine göre 700–1000 °C sıcaklık aralığında, yaklaşık 1-12 saat süre ile katı, macun (pasta), sıvı veya gaz fazındaki bor verici ortamlarda bekletmek suretiyle yapılan bir işlemdir (Çalık ve Özsoy, 2002).

Borlu tabakanın özellikleri, borlanan çeliğin bileşimine, borlama sıcaklığına, süresine ve ısıl işleme bağlıdır. Borlamayla çelik yüzeyinde oluşan tabaka çok sert olup ayrıca sementasyon da olduğu gibi sertleştirmeye gerek kalmaz. Borlu tabakada bor  $Fe_2B$  ve  $FeB$  şeklinde bulunur. Bor, çeliklerde alaşım elementi ve yüzey sertleştirici ve ayrıca çelik üretiminde cüruf yapıcı olarak kullanılır.

### 1.2.2. Borlama Yöntemleri

Esas itibariyle bir yayınma işlemi olan borlama, karbürleme ve nitrürlemeye benzer. Difüzyon yöntemi olan borlama termokimyasal bir işlemdir. Uygun işlem sıcaklıklarında metal malzemenin yüzeyine yayılan bor, metal ile bir ve birkaç inter metalik fazdan meydana gelen bir tabaka oluştururlar. Bu işlemin esası borla metalin bir arada bulunduğu bor verici ortamda kimyasal veya elektro-kimyasal reaksiyonlar neticesinde borun metal yüzeyine yayılması olayıdır. Borlama ortamı ise, bor kaynağı (bor veya bileşikleri), aktivatör, dolgu veya deoksidantlardan oluşur. Aktivatörler tabakanın düzenli büyümesine ve oluşumuna etki ederler. Dolgu ve deoksidantlar ise borlama sıcaklığında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluştururlar ve ayrıca borlama maddelerinin ana malzemeye yapışmalarını önlerler.

Borlama sonucu oluşan borür tabakasının özelliklerini şöyle sıralayabiliriz (Türktekin, 1998).

- 1- Çok yüksek sertlik
- 2- Yüksek ısınma direnci
- 3- Alt yüzeye iyi tutunma özelliği
- 4- Yüksek sıcaklık dayanımı
- 5- Yüksek ısılarda sertliğini koruma özelliği
- 6- Demir malzemelerinkine uygun genleşme kat sayısı

### 1.2.2.1 Katı (Toz) Ortamda Borlama

Yüzeyi borlanacak malzeme, toz halindeki bor verici ortam içinde 800-1000°C sıcaklıklarda 4-10 saat bekletilerek borlama işlemi yapılır. Borlama tozu ısıya dayanıklı çelik saç kutu içine konur ve borlanacak parça bu tozun içine gömülür. Bu toz, parçanın tüm yüzeylerinde en az 10 mm kalınlığında olmalıdır. Kutuların ağzı bir kapak ile kapatılarak önceden belirli bir sıcaklığa ısıtılmış fırına konur. Ve fırın kapağı kapatılarak fırın içi sıcaklığı borlama sıcaklığına yükseltilir. Bir süre bekletildikten sonra kutu fırından alınarak soğutulur ve parça içinden çıkarılır. Bu sırada çelik kutunun kapağı kutunun üzerinde kendi ağırlığı ile durmalıdır. Sementasyonda olduğu gibi sıkıca kapatılmasına gerek yoktur. Eğer işlem normal atmosfer de yapılacaksa kapak sıkıca kapatılır. Bu yöntem koruyucu gaz atmosferi içinde de yapılabilir. Yöntem ucuzdur ve özel bir teknik gerektirmez.

Borlama ortamının ana bileşimi borkarbür, ferrobör ve amorf bördür. Bor karbür diğerlerine göre ucuzdur. Amorf borun saf halinin çok pahalı oluşu ve saf ferrobörün eldesinin endüstriyel olarak çok zor olması bu metotların bırakılmasına neden olmuştur. Diğer bor verici toz ortam bor karbür ise amorf bor ve ferrobörden ucuz olup, bileşimi zamana göre sabittir. Elverişli tane boyutunun ve etkin aktivatörün seçimi ile iyi sonuçlar alınmıştır. Bütün bunlara rağmen amorf bor tuzuna aktivatör olarak amonyum klorür eklenerek yapılabilir. Ferrobör ortamında yapılan borlama sonucu elde edilen tabaka teknik açıdan kullanılamaz. Aktivatör dolgu maddeleri ile kullanılabilir.

Katı ortam borlomasında kullanılan bazı borlama bileşiklerine ait örnekler % ağırlık olarak aşağıda verilmiştir (Özsoy, 1991).

1. % 60 B<sub>4</sub>C + %5 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %5 NaF + %30 Demir oksit
2. % 50 Amorf bor + %1 NH<sub>4</sub>F.HF + %49Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
3. %100 B<sub>4</sub>C
4. %(7,5-40) B<sub>4</sub>C + % (2,5-10) KBF<sub>4</sub> + %(50-90) SiC
5. %84 B<sub>4</sub>C + %16 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>
6. %95 Amorf bor+%5 KBF<sub>4</sub>
7. %20 B<sub>4</sub>C + %5 KBF<sub>4</sub> + %75 Grafit
8. %(40-80) B<sub>4</sub>C + %(20-60) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
9. %80 B<sub>4</sub>C + %20 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

#### 1.2.2.2. Macunlama (Pasta) İle Borlama

Borlama için kullanılacak tozlar macun haline getirilir ve borlanacak parçanın üzerine 2 mm kalınlıkta sürülür. Parça yüzeyine sürülen macun derhal sıcak hava akımında, ön ısıtma odasında veya kurutma fırınında maksimum 150°C' de kurutulması gerekir. Gerekliği taktirde macun üzerine tekrar birkaç kez daha sürülebilir. Kurutma işleminden sonra macun ile kaplanmış parçalar önceden ısıtılmış fırına konur ve fırın ağzı kapatılarak borlama sıcaklığına ısıtılır. Belirli süre bu sıcaklıkta tutulan parçalar dışarı alınır. Ve soğumaya terk edilir. Parçalar soğuduktan sonra yüzeyinde yapışmış olan artıklar temizlenir ve böylece borlama yapılmış olur.

Bu yöntemle borlama mutlaka koruyucu gaz ortamında yapılması gerekir. Aksi takdirde kötü bir borür tabakası oluşur. Bu yöntemle kısmi borlama yapılabilir. Bor korbür ( B<sub>4</sub>C ), kriyolit ( Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> ) ve bağlayıcı olarak da hidrolize edilmiş etilsilikat karışımından macun yaparak borlama yapılmıştır. Bu yöntemde kullanılan koruyucu gazlar; Argon, Formier Gazı, NH<sub>3</sub> ve saf azottur.

### 1.2.2.3. Sıvı Ortamda Borlama

Borlama şartlarında ortam sıvıdır. Borlanacak malzeme 800-1000°C arasındaki sıcaklığa sahip sıvı bir borlu ortam içinde 2-6 saat bekletilerek bor yayılımını gerçekleştirilir.

Sıvı ortamda borlama tuz eriği içinde elektrolitli veya elektrolitsiz (daldırma) ve derişik çözeltide olmak üzere yapılabilir (Bozkurt, 1984).

#### Daldırma Yöntemi

Elektrolizsiz ergitilmiş tuz eriği veya normal sıvı ortam borlaması olarak da adlandırılır. Bu yöntem genelde B<sub>4</sub>C'in katı fazı ile sıvı sodyum klorit (NaCl) den ibarettir. Bu da boraksın viskozite azaltma yöntemleriyle elektrolit olarak erimesi esasına dayanır (Selçuk, 1994).

Ortamın esas bileşemi boraks olup, aktivatör olarak B<sub>4</sub>C, SiC, Zr, B, vs. kullanılır. Klorürlerin karışımı veya klorürler ile floritlerin karışımına bor karbür ilavesi ile yada erimiş boraks banyolarına bor karbür ilave edilerek yapılır. Bu yöntem ucuz ve fazla ihtisas istemez. Fakat termal şok, borlamadan sonra parçanın temizlenmesi, büyük boyutlu ve kompleks parçalara uygulanmaması, metodun kötü yönleridir. Çalışma sıcaklığı 800-1000°C ve borlama süresi 2-6 saattir.

#### Elektroliz Yöntemi

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

Farklı akım şiddetleri, özellikle karmaşık şekilli parçalarda borür tabakasının kalınlığının düzgün olmasına neden olur. Bu yöntemde iş parçası bir tuz tabakasıyla kaplanır ki bunu temizlemek oldukça masraflıdır. Elektrolizle borlama da anodun 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 yıkıldığı ve viskozitenin azaldığı görülmektedir. Ayrıca NaCl, B<sub>4</sub>C ve NaBF bileşiminden oluşan tuz eriğinde diğer problemler çıkmaktadır. Bu yöntemin tesisi pahalıdır. Karışık şekilli parçalarda homojen kalınlıklı tabaka oluşumu oldukça zordur. İşlem 800-1000°C arasında 0,5-5 saat süre ile yapılır. Banyo bileşimlerinde 0.2 A/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğu, 600-700°C sıcaklık ve 2-6 süre şartlarını kullanarak sade karbonlu çelikte 15-70µm kalınlıkta borlu tabaka elde edilmiştir (Selçuk, 1994).

Elektrolizin ana bileşimi boraks ve borik asittir. Ana bileşene ilaveten NaF, NaCl gibi aktivatörler kullanılır. Bu aktivatörlerden ayrıca banyonun akışkanlığını artırması istenir.

#### **Derişik Çözeltide Borlama**

Boraks ve Borasitli anhidriti içeren derişik ortamlarda yüksek frekanslı ısıtma ile deneyler yapılmıştır. Belli bir bor difüzyonu sağlandığı halde birleşik tabakalar elde edilememiştir. Boraks ve borasidi anhidriti içeren değişik miktarlı çözeltilerde yapılan deneyler kapalı borür tabakası vermemiş ve 1000°C 'de 10 dakika süre ile 0,1 A/cm<sup>2</sup> ve 450 kHz frekans ile doymuş boraks çözeltisinde tabakalar elde edilmiştir. Bu yöntem esnasında açığa çıkan bor halojenleri ilgili (uygun) asit oluşumları altında su ile kuvvetli reaksiyona girerler. Bu sebeple derişik çözeltide borlama başarılı olmamıştır (Selçuk, 1994).

#### **1.2.2.4 Gaz Ortamda Borlama**

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. Bu bor vericilerden  $BF_3$ ,  $BCl_3$ ,  $BBr_3$  saf veya su ile;  $B_2H_6$  su ile ve  $(CH_3)_3B/(C_2H_5)_3B$  olarak kullanılırlar. 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  $150^\circ C$  '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 ve su ile gaz ortamda borlamayı yapmışlardır (Bozkurt, 1984).

Organik bileşiklerden bortrimetil ve bortrietil yüksek oranda karbon ihtiva ettikleri için, borlama sonucu oluşan borür tabakası yanı sıra yüksek karbonlu bir tabakada oluşur. Böylece borlama ile yayılan karbon oluşan tabaka kalıntısını bozar. Bor halojenleri ise uygun halojen bileşimlerinin teşekkülü ile korozyona neden olurlar.

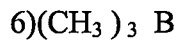
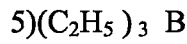
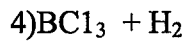
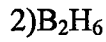
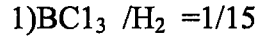
Amerika'da geliştirilen bir yöntem ise bor ve borkarbürden ayrışan bir gaz fazıyla yapılan borlamadır. Bunun esasını ise , borklorit ile hidrojen karıştırılarak  $1300-1500^\circ C$  de sıcak grafit çubuk üzerine gönderilir ve bor karbür oluşumu sağlanır. Bu yöntem ilk etapta daha yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelere uygulanmaktadır. Bu yöntemle Fe esaslı malzemeler yanı sıra silika, mullite, Ti, Ni, Co ve W 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.

Eğer işlem gazı %150 oranında Azot ve geri kalanı Hidrojenden olursa az miktardaki borklorit aktif bor taşıyıcı olarak etkide bulunur. Bunun sonucu olarak da borür tabakasının yapısı pratik olarak atmosferde en az miktarda bulunan  $BCl$



'ten dolayı  $BCl_3$  'ün miktarından bağımsızdır. Bu yöntemde ise sürelerin kısa olması gerekir. Gaz ortamda borlama esnasında bor verici olarak Hidrojen ve Azottan oluşan taşıyıcı gaz içindeki bortriklorit olursa ve  $BCl_3$  ile Hidrojen oranları ayarlanırsa işlem hacmi  $HCl$  ve  $H_2$  'den oluşan gaz ile dolarsa parça yüzeyi korozyona uğramaz. Aşağıdaki gaz bileşenleri kullanılarak borlama yapılabilir.



#### 1.2.2.5. Plazma (İyon) Borlama

Gaz ortamda 300-700 Pa basınçla borlama yapmak mümkündür. İşlem sıcaklığı diğer borlama yöntemlerine kıyasla düşmekle ve borlama süresi kısalmaktadır. Reaktif gazın daha iyi kullanımı ile işlem atmosferinde  $BCl_3$  buharının miktarı azaltılır. Bu yöntemde işlenen parça yüzeyinin aktiflenmesi katodik püskürtmeden dolayı ( özellikle işlemin başlangıç aşamasında , yani ısınma esnasında ) akkor ışık ile başarılır.

Yüzey difüzyonu ve kimyasal emilme gibi yüzey işlemlerinin büyük ölçüde yükseltilmiş yüzey enerjisinden dolayı yüzeydeki kimyasal reaksiyonlar katalitik etki ile hızlanırlar. Bunun sonucu oluşan iyon ve elektronlar elektrik alanına etkide bulunurlar. Sistemi besleyen enerji, bu iyon ve elektronlar tarafından iletilir. Elektriksel alanın etkisi altında iyon ve elektronlar gaz moleküllerin bu sıcaklığa ait ortalama enerjisinden daha yüksek bir enerji kazanırlar. Elektronlar ile moleküllerin çarpışmasında sonuç olarak moleküllerin bir kısım enerjisi iletilir. Bu durum, bu şartlar altında, sistem içindeki portiküller (iyonlar, atomlar, moleküller)'in uygun sayıları yüksek enerji ile mevcut olduklarından ve atmosferdeki bu sıcaklıkta dengeli enerji dağılımını anormal akkor ışık saçılımı olmadan karşılanabildiği için başarılır.

Gaz ortamda termik aktiflenme sonucu meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aktiflenmiş malzeme yüzeyinin katalitik etkisi ile hızlanırlar. Bu yöntem genelde  $BCl_3$  - buharı ile hidrojenin oluşturduğu gaz karışımında yapılmaktadır. Bu ortamda  $BCl_3$  - buharı ve hidrojenin oluşan atmosfer içinde plazma ( iyon ) borlama esnasında kloritin hidrojen ile indirgenmesi borür tabakasının oluşumuna ait ayrıntılı rolü oynar. İlgili reaksiyon , indirgenme reaksiyonunun tahrik edildiği katodik bölge içindeki atomik hidrojenin varlığına bağlı olarak akkor ışık saçılımı ile oluşur. Reaksiyon sonucu açığa çıkan bor katodik püskürtme ile aktiflenen malzeme yüzeyine emdirilir. Reaksiyon gidişinin yükseltilmiş hızı gaz karışımındaki fazla hidrojene bağlıdır.

$BCl_3$  - buharı ve hidrojen karışımının kullanılmasında hacmin %10'unu teşkil eden  $BCl_3$  - miktarı ile gaz fazındaki kimyasal reaksiyonlar ile kimyasal emilmiş bor miktarı ve hatta iş parçasının kenar tabakasına borun yayılması arasındaki dinamiksel denge elde edilir. Karışımda  $BCl_3$  - buhar kısmının artması gevrek ve gözenekli tabakaların oluşmasına neden olur.

### **1.2.3. Demir Esaslı Malzemelerin Borlanması**

Elementlerin demirde çözünme kabiliyetleri, çözücü ve çözünen atomların izafi büyüklükleri ile belirlenmektedir. Borun atom çapı, demirin atom çapından yaklaşık %27 oranında küçüktür. Bu yüzden, çok sınırlı da olsa katı çözeltiler oluşabilmektedir (Mal ve Tarkan, 1973). Demir esaslı malzemelerin borlama işlemi sonucunda, esas olarak  $Fe_2B$  ve  $FeB$  olmak üzere iki borür oluşmaktadır ve tabakanın özelliklerini büyük ölçüde bu iki borür belirlemektedir. Oluşan bu borürlere ait bazı fiziksel özellikler Çizelge 1.8'de verilmiştir.

Çizelge 1.7. Demir Borürlerin Bazı Fiziksel Özellikleri (Matuschka, 1980)

Özellik	Fe <sub>2</sub> B	FeB
Bileşim (%B ağı.)	8.83	16.23
Kafes yapısı ve parametreleri (°A)	Tetragonal h.m a=5.078, c=4.249	Ortorombik a=4.053, b=5.495, c=2.946
Teorik yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	7.43	6.75
Ergime Noktası (°C)	1390	1550
Isıl iletkenlik katsayısı (w/cm°C)	0.2-0.3	0.1-0.2
Isıl genleşme katsayısı (K <sup>-1</sup> ) 200 -600 °C arasında 100-800 °C	7.85.10 <sup>-6</sup> 9.2.10 <sup>-6</sup>	23.10 <sup>-6</sup>
Young modülü (kg/mm <sup>2</sup> )	30000 29000	60000
Özdirenç (20°C) (μohmcm)	38	80
Curie Sıcaklığı (°C)	742	325

Bor elementinin demirde çözüldüğü bilinmesine rağmen, borun demirde yer alan mı, yoksa ara yer katı eriyiği mi yaptığı konusu tartışmalıdır. Borun atomik boyutu, her iki tür katı eriyik oluşumu için gerekli olan değerlere yakındır. Bazı araştırmacılar da, borun α-demirinde hem yer alan hem de ara yer katı eriyiği bölgelerini işgal edebileceğini ve aynı zamanda yer alan bor atomlarının karbon gibi diğer ara yer atomları ile etkileşebileceklerini ileri sürmüşlerdir. Düşük sıcaklıklarda demir içerisinde bor çözünlüğü mukayese edildiğinde 1/50 oranında ara yer atomu olarak, büyük oranda ise yer alan atomu olarak eridiği görülmüştür

Borlama süreci iki ana adımda gerçekleşmektedir. Birinci adımda, tepkime ortakları (partnerleri) arasındaki reaksiyonlar orta seviyede ve cismin yüzeyinde meydana gelir. Parçalanmış partiküller, yüzeyde çok hızlı bir şekilde, sıkı ve ince bir borür tabakası oluştururlar. Bu oluşumun süresi sıcaklığa bağlıdır ve 900 °C'de 10 dakika civarındadır. Bu aşama, toplam borlama süresine oranla çok kısa bir zaman aldığından ihmal edilebilir. İnce ve sağlam olan birinci tabakanın oluşumundan hemen sonra ikinci adım başlar. Bu adım yayınma kontrollüdür. Oluşacak borlu tabakaların kalınlığı, yayınma kanunlarına uygun olarak borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak parabolik ( $x^2 = D.t$ ) bir artış göstermektedir. Çizelge 1.8'de çok kullanılan bazı alaşımsız çelikler için yayınma katsayısı (D) değerleri verilmiştir.

Borlu tabakalar karakteristik görünümlere sahiptirler. Yayınma yönünün yüzeyden içeri doğru olmasından dolayı dişe benzer bir yapı oluşur, özellikle saf demir veya alaşımsız düşük karbonlu çeliklerde bu yapı açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Karbon ve/veya alaşım elementlerinin miktarlarındaki artışla bu yapıda değişimler meydana gelmektedir.

Çizelge 1.8. Teorik Borür Tabakası Kalınlığı Hesabı için Yayınma Katsayısı (D) Değerleri (Lu, 1983).

Malzeme (DIN)	D(cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> 10 <sup>-8</sup> )				Do Cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> 10 <sup>-3</sup>	Q kJ/kmol
	1000 °C	950 °C	900 °C	800 °C		
Armco-Fe	3.40	2.16	1.22	0.330	8.91	131859
Ck15	2.88	1.87	1.06	0.319	4.77	126836
C45	2.45	1.56	1.02	0.283	2.22	120557
C60	2.29	1.44	0.924	0.262	1.83	119301
C100	1.69	0.982	0.497	0.207	0.667	113441

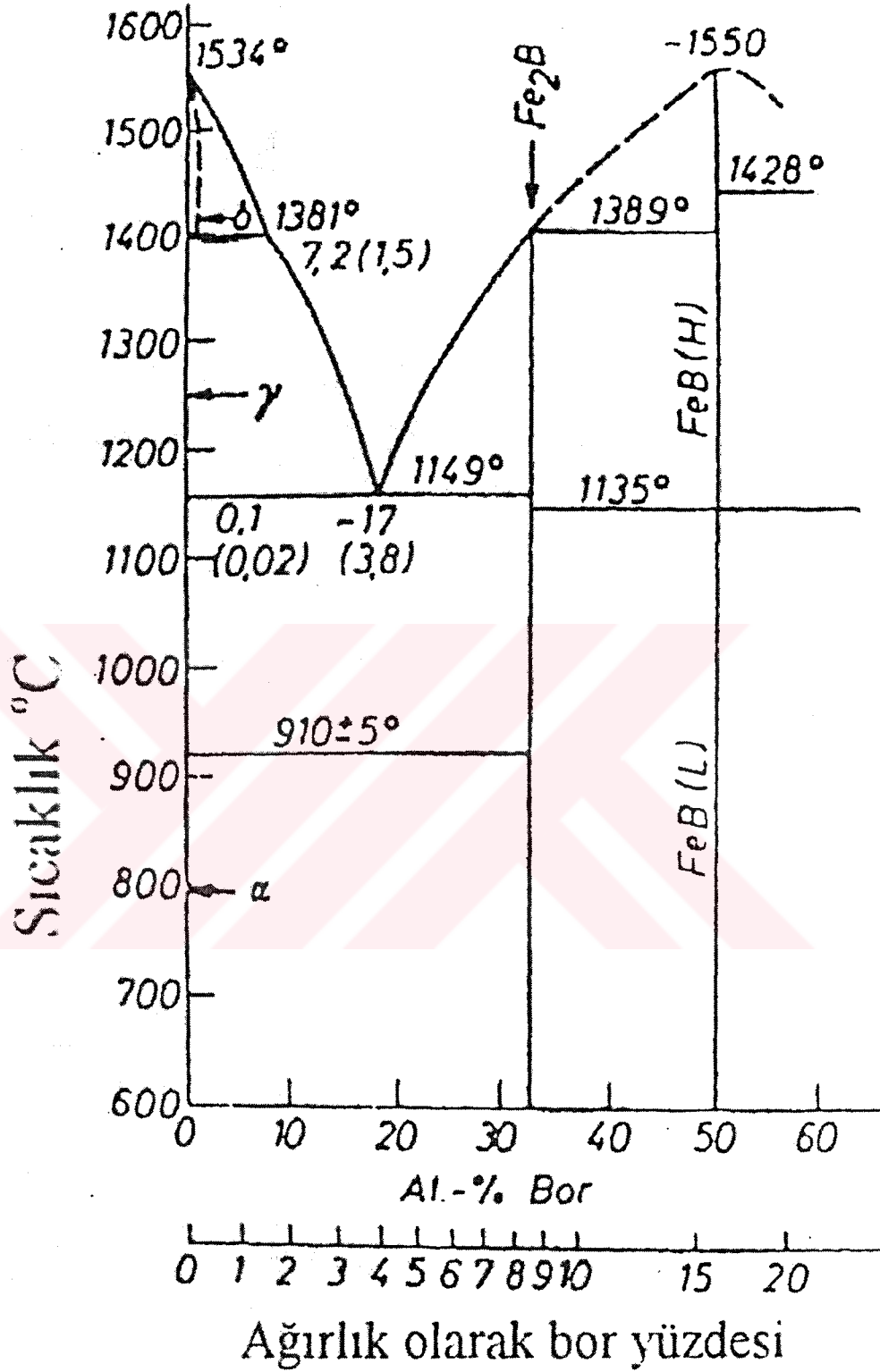
#### 1.2.4. Demir-Bor İkili Denge Diyagramı

Fe-B ikili denge diyagramı, ilk olarak Hansen (1958) tarafından düzenlenmiştir (Şekil 1.1). Bu denge diyagramına göre Fe-B ikili sisteminde ağırlık olarak;

% 8.83 bor oranında Fe<sub>2</sub>B ve

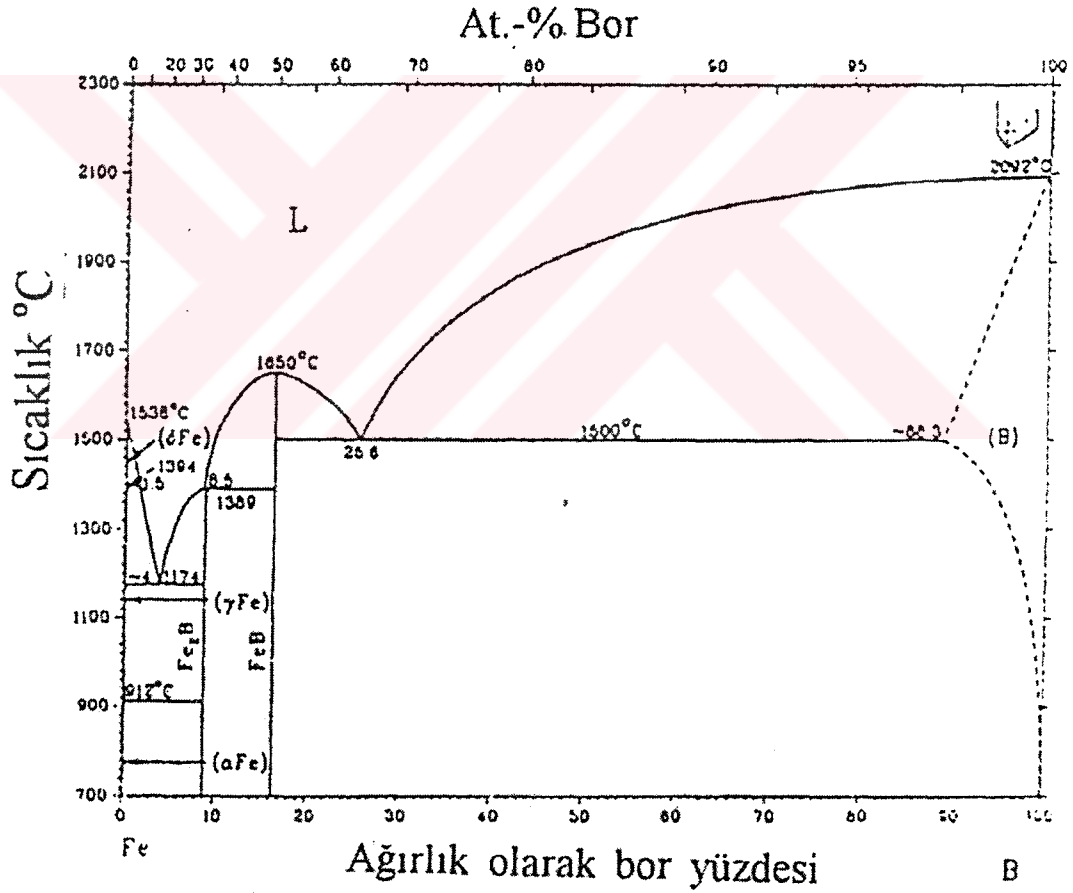
% 16.23 bor oranında FeB,

olmak üzere iki tür borür ve ergime noktası 1149 °C olan % 3.8 bor oranında bir ötektik oluşmaktadır (Matuschka, 1980).



Şekil 1.1. Fe-B İkili Denge Diyagramı (Matuschka, 1980)

Massaiki (1986), demir-bor denge diyagramını Şekil 1.2'de görüldüğü gibi yeniden düzenlemiştir. Hallems vd.(1994), deneysel termodinamik ve faz diyagramı verilerini esas alıp, en küçük kareler metodunu uygulayarak, Fe-B faz diyagramını optimize etmek için termodinamik bir model kurmuşlardır. Kurulan model sonucunda hesaplanan faz diyagramı ve termodinamik özelliklerin, deneysel sonuçlarla oldukça iyi uyum gösterdiğini belirtmektedirler.

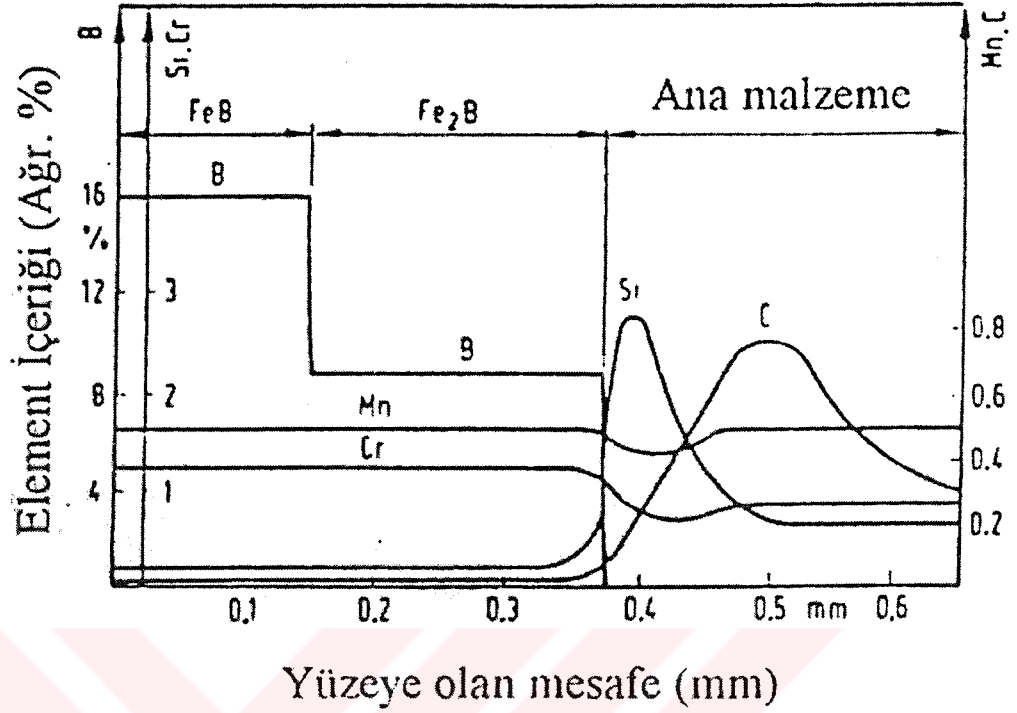


Şekil 1.2. Fe-B İkili Denge Diyagramı (Massaiki 1986)

### 1.3. Borlamada Meydana Gelen Borür Tabakası ve Geçiş Bölgesinin Oluşum Mekanizması

#### 1.3.1. Borür Tabakasının Oluşumu, Büyümesi ve Geçiş Bölgesi

Borlama işleminin başlangıç safhasında tane sınırları, dislokasyonlar ve atom boşlukları gibi mikro hataların bulunduğu bölgelerde olduğu kadar, yüzeylerdeki pürüzler ve çizikler gibi makro hataların olduğu metal yüzeyindeki daha reaktif noktalarda da  $Fe_2B$  çekirdeği oluşur ve büyür. Bu oluşumu borca daha zengin bileşiklerin çekirdeklenmesi takip eder (Badini ve Mazza, 1988). Yüksek saflıktaki demirde olduğu gibi, demir-bor reaktifliğinin çok düşük olduğu şartlarda, bu noktalardan sadece bir kaç reaksiyona girer ve rast gele dağılmış reaksiyon ürünü adacıklar meydana gelir. Ortamın bor potansiyelinin daha yüksek olduğu durumlarda, metal yüzeyindeki daha az reaktif olan noktalarda devreye girerek sürekli bir tabaka oluşur. Bu durum, daha düşük bor potansiyelli ortam ile daha reaktif metal şartlarında da sağlanabilmektedir. Borlama esnasında bor kristallerinin tercih yönü yayınma mekanizmasına bağlıdır. Bor'un yayınma mesafesi, borür tabakasından uzundur. Fakat borür tabakasında bor yoğunluğu çok daha yüksektir. Borür tabakasında ve alt bölgelerde bor ve diğer elementlerin dağılımı Şekil 1.3'de verilmiştir (Soydan, 1996)



Şekil 1.3. Matriste ve Borür Tabakasındaki Bor ve Diğer Elementlerin, Yüzde Ağırlık Olarak Değişimleri (Soydan, 1996)

Demir esaslı malzemelerin borlanması esnasında, kolonsal kümeler oluşturan borür kristalleri FeB/Fe<sub>2</sub>B ve/veya Fe<sub>2</sub>B/FeB ara yüzeylerinde dişe benzer morfolojiler oluşturarak büyümektedirler. Borürlerin kolonsal olarak büyümesi, hacim merkezli tetragonal Fe<sub>2</sub>B kristallerinin, [001] yönünde bor atomlarının yayılımı ile açıklanmaktadır. Bu yönün demirde bor yayılımı için en uygun yön olduğu ileri sürülmektedir.

Malzeme ve işlem şartlarına bağlı olarak tek fazlı veya çok fazlı tabakalar elde edilmesine ve esas malzeme ile tabaka yüzeylerinde farklı morfolojilerin olabilmesine rağmen, pratikte, tek fazlı (Fe<sub>2</sub>B) ve parmaklı türde (girintili-çıkıntılı) borür tabakası, daha sonraki ısıl işlemlere uygunluğu ve FeB'a göre daha az gevrek

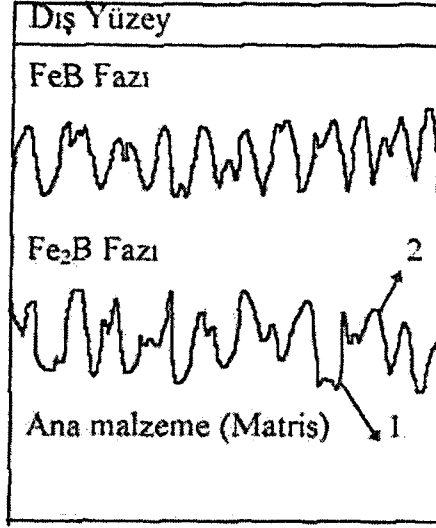


olması sebebiyle tercih edilmektedir.  $Fe_2B$  tabakasının büyümesi konusunda iki mekanizma ileri sürülmektedir;

Difüzyon kanalı büyüme mekanizmasına göre; ortagonal prizma, bor atomlarının yayınmasını kolaylaştıracak en büyük ara kesite sahiptir ve  $Fe_2B$  kristalinde, [001] doğrultusunda, bor atomları için bir yayınma kanalı oluşturur. Bor tabakasından borür ve esas metal ara yüzeyine sürekli olarak yayınan bor atomları, borlama tabakası yüzeyine dik doğrultuda  $Fe_2B$  kristalleri oluşturur ve bu kristaller kolonsal bir şekilde içeriye doğru büyür (Palombarini ve Carbucicchio, 1987). Difüzyon kanalı büyüme mekanizması,  $Fe_2B$ 'un kuvvetli bir tercihlî yönelmeye sahip olmasına rağmen,  $Fe_2B/Fe$  ara yüzeyinde düşük veya ihmal edilebilir bir kolonlaşma göstererek büyümesini veya kristallografik bir tekstürün olmadığı durumda ara yüzeydeki kolonlaşmayı açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Bu konuda, uçtan büyüme mekanizmasının daha geçerli olduğu ileri sürülmektedir.

Uçtan büyüme mekanizmasına göre; ana malzemenin bileşimine ve işlem şartlarına bağlı olarak başlangıçta oluşan  $Fe_2B$  çekirdeği iğnesel bir şekilde büyür ve bor gradyanı boyunca yönelir. Bu durumda  $Fe_2B$  çekirdeğinin ucu civarında oluşan bölgesel yüksek gerilme alanları ve kafes distorsiyonları tabakanın kolonsal olarak büyümesini sağlar.

Uçtan büyüme mekanizmasında, Şekil 1.4'te görüldüğü gibi demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan tabaka ile ana malzeme ara yüzeyindeki kolonsallık 1 noktasında 2 noktaya göre daha yüksektir.



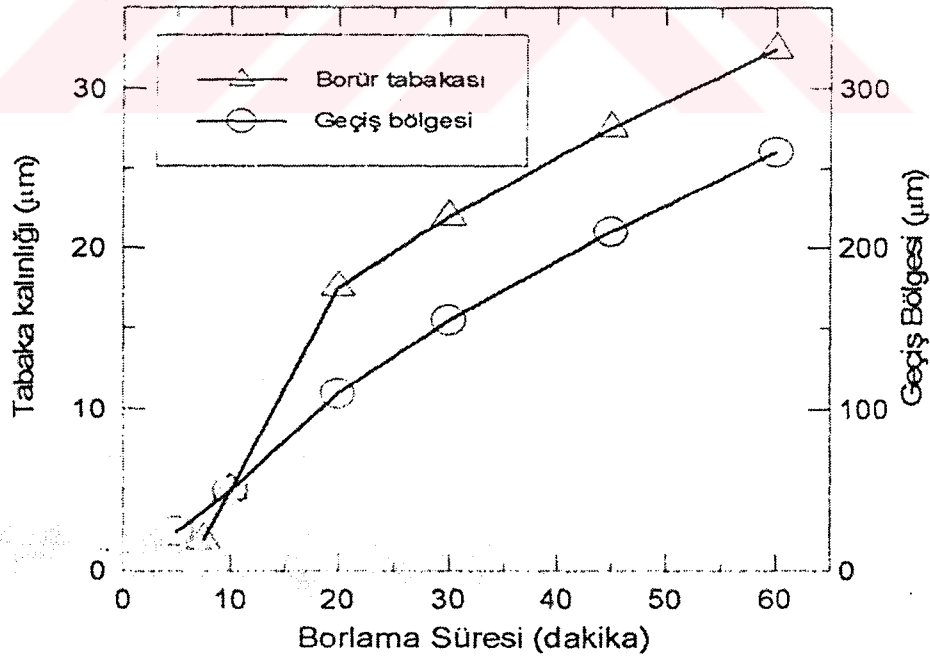
Şekil 1.4. FeB ve Fe<sub>2</sub>B Tabakalarında, Demir-Bor Reaktivitesinden Kaynaklanan Kolonsal Büyümenin Şematik Gösterimi (Palombarini ve Carbucicchio, 1987)

Çok fazlı borür tabakaları oluşumunda, FeB'nin büyüme mekanizması, ana malzeme üzerindeki Fe<sub>2</sub>B'nin büyüme mekanizmasına (uçtan büyüme) benzeyebilir. Aynı tabaka için FeB/Fe<sub>2</sub>B ara yüzeyindeki kolonsallığın Fe<sub>2</sub>B/matris ara yüzeyindekinden daha az olması oldukça dikkat çekicidir. Bu durum, mevcut fazların mekanik özelliklerindeki farklılıklarla ilişkili olabilir. Fe<sub>2</sub>B, nisbeten sünek olan ana malzemede büyüyen bir faz iken FeB, Fe<sub>2</sub>B üzerinde yani daha sert bir yapıda büyüyen bir fazdır. Buradan FeB'nin, Fe<sub>2</sub>B'den daha sert olabileceği sonucu çıkarılabilir. Bu farklılıklar, bölgesel gerilim oluşumlarına ve/veya ara yüzeylerde kafes distorsiyonlarına sebep olabilir. Borür büyümesinin bir dahili süreç olduğu göz önüne alındığında, yani tepkimelerin tek fazlı tabakalarda Fe<sub>2</sub>B/matris ve çok fazlı tabakalarda FeB/Fe<sub>2</sub>B ara yüzeylerinde gerçekleştiği düşünüldüğünde, oluşan bileşiklerin dış yüzeylerinin kristal yapılarının düzensiz ve mekanik olarak zayıf olması muhtemeldir. Bu durum mekanik aşınma deneyleri ile doğrulanmaktadır.

Borlama işlemi esnasında çelik bileşiminde bulunan elementlerin yeniden dağıldıkları ve bu arada FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakalarının, karbon ve silisyumu çözündürme yeteneği olmamasından dolayı, bor yayını esnasında C ve Si'un borür tabakasından içeriye doğru itildikleri ve bunun sonucu olarak borür tabakası ile

borlanan metal matriks arasında "geçiş bölgesi" olarak isimlendirilen bir yapının meydana geldiği bilinmektedir.

Geçiş bölgesi, mikroyapı itibarı ile esas malzeme yapısından farklı bir görünüme sahiptir ve borür tabakasına göre daha kalındır (Bozkurt, 1984). Borür tabakası tarafından karbonun içeriye doğru itilmesi sonucunda geçiş bölgesinde, esas malzemeye göre daha fazla perlit bulunacağı, çeşitli araştırmacılar tarafından ileri sürülmektedir. Bu bölgedeki bor dağılımını otoradyografi yöntemi ile inceleyen (Berzina vd., 1984), geçiş bölgesi kalınlığının, normal metalografik yöntemle belirlenene göre daha büyük olduğunu belirlemişlerdir. Aynı yöntemi kullanan (Bozkurt, 1984), geçiş bölgesinin, borür tabakasından 10-15 kat kadar fazla bir kalınlığa sahip olduğunu tesbit etmiştir. Genel olarak, geçiş bölgesindeki tane boyutu, ana malzeme boyutuna göre daha büyük olduğu halde, sinterlenmiş Fe-C alaşımlarında bu bölgede tane büyümesine rastlanmadığı ileri sürülmektedir. Lu (1983), Ck 15 çeliğinde borlama süresine bağlı olarak borür tabakası ve geçiş bölgesi kalınlıklarının farklı tarzlarda arttığını belirtmektedir (Şekil 1.5).

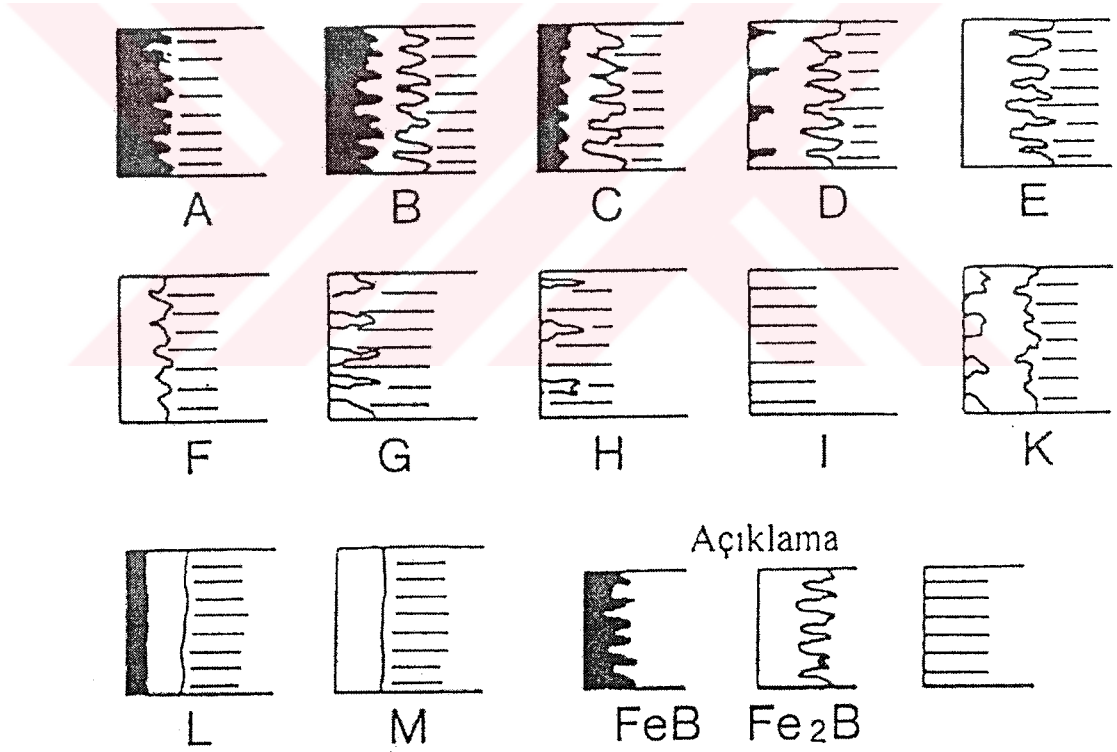


Şekil 1.5. Fe<sub>2</sub>B ve Geçiş Bölgesi Kalınlığının Borlama Süresi ile Değişimi (Lu, 1983).

### 1.3.2. Borür Tabakası Çeşitleri ve Borür Tabakası Kalınlığı

Çeşitli borlama yöntemleri ile 14 farklı yapıda borür tabakası elde edilebilmektedir. Kunst ve Schaaber tarafından geliştirilerek düzenlenen sistematik sınıflandırma Şekil 1.6' da gösterilmiştir (Matuschka, 1980).

Borür tabakalarının yapısı; borlama yöntemine, borlanan malzemenin bileşimine, borlama ortamına ve işlem şartlarına bağlı olarak; ya düz bir formda veya parmaklı formda olabilir. Tabaka tiplerinden hareketle bazı tabaka özelliklerinin belirlenebileceğini söylemek mümkündür. Bu özel tabaka tipleri aşağıdaki gibi karakterize edilebilir:



Şekil 1.6. 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 tab.  
 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 parmaklı değil  
 M: Tek fazlı tabaka, FeB ve Fe<sub>2</sub>B, düz

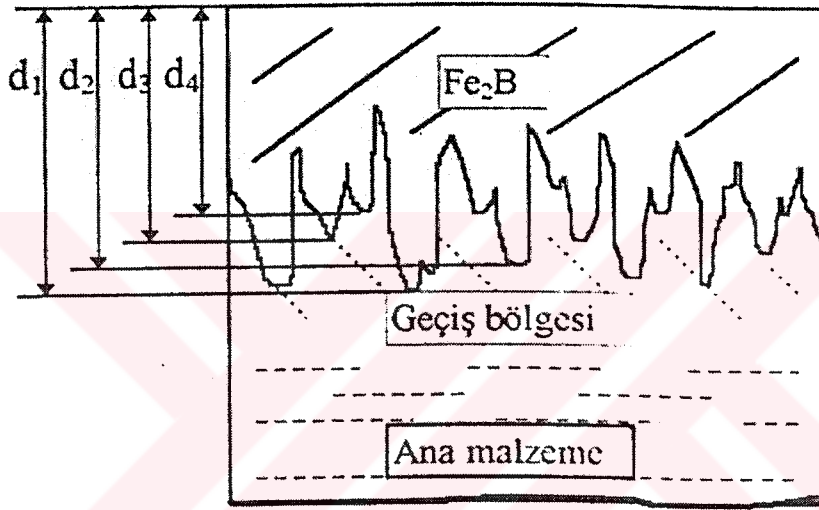
Endüstride E ve F tipi yani tek fazlı borür tabakası (Fe<sub>2</sub>B) tercih edilmektedir. Bu tabakalar, düşük kırılma katsayısına sahiptir ve ana malzemeye, borlu tabakanın özelliklerini olumsuz yönde etkilemeden; borlama sonrası ısı işlemleri uygulanabilir (Matuschka, 1980).

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

Teorik olarak, adhezif 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. Yüksek alaşımlı çeliklerde 15-20 µm kalınlık uygundur. Takım çeliklerinde, tabaka kalınlığının 75-100 µm' yi geçmemesi önerilir. Tabaka kalınlığı arttıkça tabakanın gevrekliği de artacağı için, özellikle çift fazlı (Fe<sub>2</sub>B+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.

Borür tabakaları iğnesel ve değişken bir formda olduklarından, tabaka kalınlığının tanımlanmasında güçlükler çıkmakta ve farklı tanımlamalar yapılmaktadır. Literatürde tabaka kalınlığı, genellikle tabakanın diş yapışı, düz bir düzlemlle karşılaştırılarak ve bor dişlerinin bu düzleme göre ortalama değeri alınarak (Şekil 1.7) belirtilmektedir.



$$d = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$$

Şekil 1.7. Borür Tabakası Kalınlığının Tanımlanması (Matuschka, 1980)

d: Tabaka kalınlığı, n: Bor dişi sayısı.

### 1.3.3. Borlanabilir Malzemeler ve Metal Borürler

Borlama işlemi uygulanacak malzemelerin, ısıl işlemlere uygunluk, gerekli mekanik dayanım, çok sert ve aşınmaya dirençli borür tabakası oluşturabilme yeteneği gibi özellikleri taşımaları gerekmektedir. Hemen hemen bütün demir esaslı malzemeler; dövme ve dökme çelikler, gri dökme demirler, küresel grafitli dökme demirler, sinterlenmiş demir ve çelikler, takım çelikleri ve diğer çelikler, belirtilen özellikleri sağlarlar ve bor yayınımları ile yüzeyleri sertleştirilebilirler (Matuschka, 1980).

Demir esaslı malzemelere ilaveten bazı demir dışı metaller ve alaşımları, genellikle özel teknikler kullanılarak, başarı ile borlanmaktadır. Titanyum, nikel ve bunların alaşımlarının borlanması oldukça enteresan ve iyi sonuçlar vermektedir. Titanyumun borlanması sonucunda, aşınmaya karşı oldukça dayanıklı, %18 bor ağırlık yüzdesi ile  $TiB_2$  ve  $Ti_3B_4$  oluşmaktadır.  $Ti_2B$  hegzogonal,  $TiB$  ise ortorombik kafes yapısına sahiptir (Hunger ve True, 1994).

Cr, Mn, Ni, Co, Mo, Ta, vb. demir dışı alaşımlar ile seramik malzemeler borlanabilir. Co ve Ni esaslı Wc ve TiC gibi karbürler çok sert ve yüksek ergime sıcaklığına sahip olmalarına karşılık, nemli atmosferik şartlarda, oksidasyon dayanımları düşüktür. Bunu uygulamak için borlama uygulanabilir. Ancak, Co veya Ni içeriğinin %6' dan küçük olması gerekmektedir (Fichtl, 1981).

Al, Zn, Mg alaşımları düşük ergime sıcaklıklarından dolayı borlanamaz. Cu ve alaşımları klasik yöntemlerle borlanamaz (Fichtl, 1981). Al ve Si borür tabakasında çözünemez. FeB/Fe<sub>2</sub>B fazının önünde birikerek, ferritik yapıya sahip bir bölge oluştururlar. Bu ferritik bölge çok yumuşaktır ve sertleştirilemez (Hunger ve True, 1994). Al alaşımlı çeliklerin borlanması tavsiye edilmezken (Fichtl, 1981), bu konuda müsbet yönde bazı çalışmalara rastlanmıştır (Özsoy, 1991). %1' den fazla Si içeren çeliklerin borlanması da uygun değildir, ancak çok ince tabakalar için olumlu sonuçlar alınmıştır (Fichtl, 1981).

Çeliklerin borlanması istenmeyen yüzeyleri veya bölgeleri SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, asbest, bakır, veya benzeri ticari ürünlerle kaplanarak kısmi borlama yapılabilir (Matuschka, 1980). Permyakov ve Loskutov, iş parçasının borlanması istenmeyen yüzeylerinin, en azından 0.1 mm kalınlığında bakır veya 4 g amorf bor tozu, 4 ml sentetik reçine ve 14 ml trikloroetilen karışımı ile kaplanmasını önermişlerdir (Özsoy, 1991).

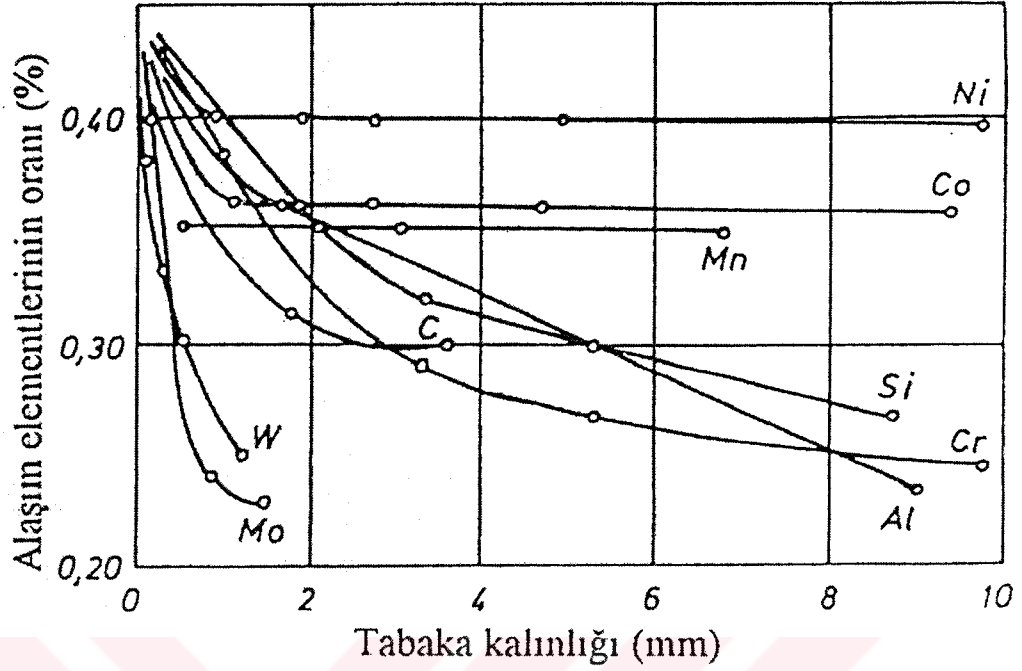
Çizelge 1.9. Borür ve Karbo-Borürlerin Sınıflandırılması (Matuschka, 1980)

Malzeme	Borür Tipi ve Yapısı							
	$M_4B$ Ortorom. ( $Mn_4B$ )	$M_3B$ Ortorom ( $Fe_3C$ )	$M_2B$ Tetrago. ( $CuAl_2$ )	$M_3B_2$ Tetragon ( $Si_2U_3$ )	$MB$ Ortorom ( $FeB, CrB$ )	$M_3A_4$ Ortorom. ( $Ta_3B_4$ )	$MB_2$ Hegzag. ( $AlB_2$ )	$M_2B_5$ Hegzag. ( $Mo_2B_5$ )
Demir	$Fe_3(CB)_6$	$Fe_3(CB)$	$Fe_2B$	$M_3B_2$	$FeB$	$FeMo_2B_4$	-	-
Nikel	-	$Ni_3B$	$Ni_2B$	-	$NiB$	$NiMo_2B_4$	-	-
Krom	$Cr_4B$	$Cr_3B$	$Cr_2B$	-	$CrB$	$Cr_3B_4$	$CrB_2$	-
Manganez	$Mn_4B$	-	$Mn_2B$	-	$MnB$	$Mn_3B_4$	$MnB_2$	-
Titanyum	-	-	$Ti_2B$	-	$TiB$	-	$TiB_2$	$Ti_2B_5$
Molibden	-	-	$Mo_2B$	$Mo_3B_2$	$MoB$	$FeMo_2B_4$ $NiMo_2B_4$	$MoB_2$	$Mo_2B_5$
Niobiyum	-	-	-	$Nb_3B_2$	$NbB$	4	$NbB_2$	-
Vanadyum	-	-	-	$V_3B_2$	$VB$	$Nb_3B_4$ $V_3B_4$	$VB_2$	-

#### 1.3.4. Alaşım Elementlerinin Borlamaya Etkisi

Alaşım elementleri, çeliklerin borlanması borür tabakası ve geçiş bölgesinin kristal yapısını, bileşimini (faz yapışma), toplam tabaka ve geçiş bölgesi kalınlığını kısacası tabakanın büyümesini ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Alaşım elementleri bu etkilerini, ana malzemenin bor' a karşı olan aktivitesine, yani borun yayınmasına ve reaktifliğine tesir ederek, genellikle tabaka kalınlığını azaltıcı yönde gösterirler. Alaşım elementlerinin etkisi, borür tabakalarına tercihli olarak girme kabiliyetine ve bor ile etkileşme ve sağlam (stabil) bileşikler oluşturmasına bağlı olarak da değişiklik gösterir. Bu yüzden alaşım elementleri, borür tabakası ile az veya çok sağlamlıkta bileşik oluşturanlar (Cr, Ni, Mn, V, Mo) ve borür tabakasında çözünmeyenler (C, Si, Al, Cu) şeklinde iki gruba ayrılabilir. Samsonov ve Epik, borür tabakasının büyümesine alaşım elementlerinin etkisini Şekil 1.8'deki şekilde vermişlerdir (Hunger ve True, 1994).





Şekil 1.8. Borür Tabakasının Büyümesine Alaşım Elementlerinin Etkisi (Hunger ve True,1994)

Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucunda esas olarak (Fe,M)B ve  $(Fe,M)_2B$ , ( $M=Cr,Mn,Ni$ ) bileşikleri elde edilir. Oluşan bu borürlere alaşım elementlerinin etkileri farklılıklar arz etmektedir (Blazon vd.,1975). Borlanan malzemedeki alaşım elementleri, atom numaralarına ve çaplarına bağlı olarak reaktivlik gösterirler. Krom ve manganın atom numaraları demirin atom numarasından düşük olduğundan, ana malzemenin içinden yüzeye doğru yayılırken, nikel ve karbon yüzeyden içeriye doğru yayınırlar. Alaşım elementleri (Mn, Cr, Mn+Cr), orjinal malzeme sertliğini artırır. Alaşımli özel çeliklerde bu artış 50 Hv değerinden daha düşüktür. Alaşımli ve alaşımsız çeliklerin borlanması sonucunda ise ortaya çıkan sertlik farkı, borlanmamış haldekiler ile mukayese edilemeyecek kadar büyük olmaktadır (Bindal, 1991). Alaşım elementleri, örnek olarak %1 C, Fe-B sisteminde ötektik sıcaklığını yaklaşık 50 °C aşağıya düşürür (Matuschka, 1980).

Karbon, demir borürlerde çözünemediğinden, ana malzemeye doğru yayılır ve tabakanın altında  $Fe_3C$ ,  $Cr_3C$ ,  $Fe_6C_3$  gibi karbür şeklinde birikir. Karbon, geçiş bölgesi denilen bu bölgenin yapısını etkiler ve daha düzenli ve sert bir yapı

Karbon, demir borürlerde çözünemediğinden, ana malzemeye doğru yayılır ve tabakanın altında  $Fe_3C$ ,  $Cr_3C$ ,  $Fe_6C_3$  gibi karbür şeklinde birikir. Karbon, geçiş bölgesi denilen bu bölgenin yapısını etkiler ve daha düzenli ve sert bir yapı oluşmasına neden olur (Badini vd., 1987). Karbon konsantrasyonundaki artış, daha dengeli su vermeyi, dolayısıyla çok sert borür tabakasından, yumuşak olan ana malzemeye doğru daha dengeli bir geçişi sağlar.

Karbon miktarının artışına bağlı olarak, tabaka sertliğinde artış meydana gelmektedir. Bu artış %0.4 C' a kadar devam etmekte, bu değerin üzerinde hemen hemen sabit kalmaktadır. Bu durum  $FeB$  veya  $Fe_2B$  bileşiklerinde daha fazla karbon ikamesinin zorlaşmasından kaynaklanmaktadır (Badini vd., 1987).

Karbon konsantrasyonundaki artış, borür tabakasının toplam kalınlığı ve sertliğinin azalmasına, demir borürlerin izafi dengelerinin değişmesine ve geçiş bölgesinde karbürlerin oluşmasına sebep olur (Özsoy, 1991).  $Fe_2B$ ,  $FeB'$  ye göre daha dengelidir.

Blazon (1975), karbon miktarının artışı ile borür tabakası kalınlığındaki azalmayı  $FeB'$  nin azalmasına bağlamaktadır. %1.2 -1.25 karbon bileşiminde  $FeB'$  nin tamamen ortadan kalkacağını ve sertliğin düşeceğini söylemektedir. Karbon miktarının artışı ile parmaklı yapı düzleşir. Düşük ve orta karbonlu çeliklerde iğnemsî yapı oluşur (Özsoy, 1991).

Bor yayılımını esnasında Si,  $FeB'$  den içeriye doğru yönelir ve  $Fe_2B$  fazında Si konsantrasyonu düzgün olarak artar. Silisyumun artışı ile  $Fe_2B$  tabakasının altında bir ferrit bölgesi oluşur. Bu, çok yumuşak bir faz olduğu için tabakada çatlamalara, dökülmelere ve çökmelere neden olabilir. Özellikle darbe ve yerel basınçlara maruz kalan elemanların borlanması Si içeriğinin %0.7'nin altında olması istenir (Bozkurt, 1984). Silisyum, borür tabakasının gevrekliğini artırır. Bu yüzden %1' in üzerinde Si içeren çelikler borlamaya uygun değildir. Ancak ince tabaka ve darbesiz çalışma durumlarında bu tür çelikler de borlanabilir (Matuschka, 1980).

göstermektedir. Carbucchio ve Sambogna (1985) ise, Cr artışına bağlı olarak toplam tabaka kalınlığının değişmediğini, buna karşılık FeB'nin arttığını, Fe<sub>2</sub>B'nin ise azaldığını ileri sürmüştür. Bir takım çalışmalarda ise kromun, ya demir borürlere girdiği veya geçiş bölgesinde konsantre olduğu, ayrıca çok yüksek krom içeriklerinde CrB fazının oluştuğu belirtilmektedir (Geoeuriot vd.,1982). Yüksek krom içeren çeliklerde düz karakterde bir yapı oluşur, %4 Cr miktarı iyi sonuç vermektedir ve yapı parmaklı şekilde oluşmaktadır (Carbucchio ve Sambogna, 1985). Kromun, atom numarası demirin atom numarasından düşük olduğundan, ana malzemeden ziyade borür tabakasında, yani (Fe,Cr)B ve (Fe,Cr)<sub>2</sub>B' da daha fazla çözünür ve yüzeye doğru yayılır. Bindal (1991), borlama süresi ve krom miktarına bağlı olarak, krom borürler tesbit etmiştir. Ayrıca, kromun çok fazla olmasa bile, kırılma tokluğunu düşürdüğünü belirtmektedir. Krom, tabaka boyunca hemen hemen homojen bir dağılım gösterir ve kromlu çeliklerde oldukça düzgün bir geçiş bölgesi oluşur. Cr içeren borür tabakasının sertliği, krom miktarı ile doğru orantılı olarak artar (Badini, 1987). Yüksek kromlu çeliklerin borlanması sonucunda diğer alaşımsız veya az alaşımlı çeliklerde oluşan, sürtünme direncini düşürüp, aşınma dayanımını da artıran bor oksit tabakalarının yerine aşınma açısından daha az koruyucu olan krom oksit tabakası meydana gelmektedir (Blazon vd., 1975)

Nikel, kromun aksine tabakanın altında, geçiş bölgesinde yayılır. %9'a kadar Ni tabaka geometrisini olumsuz olarak etkilemez (Matuschka, 1980). Nikel, miktarı bu değer üzerinde çıkınca, iğneli yapıdaki tabaka düzgünleşir ve mekanik özellikleri kötü yönde etkileyen porozite artar (Geoeuriot vd., 1982). Borür tabakası ile ana malzeme arasında konsantre olan nikel, Fe<sub>2</sub>B tabakasının gelişmesine yardımcı olur ve düşük nikelli borürlerin ((Fe,Ni)B ve (Fe,Ni)<sub>2</sub>B) oluşmasına yol açar. (Özsoy, 1991). Nikel tabaka kalınlığını krom kadar etkilemez. Nikel miktarının artışı Fe<sub>2</sub>B'nin sertliğini düşürürken, FeB fazını etkilemez (Badini vd., 1987).

Mn, krom gibi tercihi olarak borür tabakasına girer ve yüzeye doğru yayılır. Dukarevich ve Mozharov, manganın FeB bölgesinde konsantre olduğunu söylerken, Tsipas ve Rus (1987), çözünmenin genellikle Fe<sub>2</sub>B'de olduğunu iddia etmektedirler. Mn, borür tabakasının kalınlığını azaltıcı yönde etki yapar ve artan Mn oranı ile

Mn, krom gibi tercihli olarak borür tabakasına girer ve yüzeye doğru yayılır. Dukarevich ve Mozharov, manganın FeB bölgesinde konsantre olduğunu söylerken, Tsipas ve Rus (1987), çözünenin genellikle Fe<sub>2</sub>B'de olduğunu iddia etmektedirler. Mn, borür tabakasının kalınlığını azaltıcı yönde etki yapar ve artan Mn oranı ile tabaka geometrisi düzgünleşir (Özsoy,1991). Carbucicchio vd. (1984), manganlı çeliklerin borlanması sonucunda, mangan borürlere rastlamadığını söylerken, Bindal (1991), yüksek manganlı çeliklerde, borlama süresine bağlı olarak mangan borürler (MnB, Mn<sub>2</sub>B) tesbit etmiştir. Molibden, titanyum, tungsten ve vanadyum diğer alaşım elementlerinde olduğu gibi genellikle toplam tabaka kalınlığını azaltan ve tabaka ile geçiş bölgesi arasında oluşan, mekanik özellikleri olumlu yönde etkileyen, iğnemsî yapıyı düzgünleştiren bir etki yaparlar. Borlama işlemi uygulanacak çeliklerde vanadyum miktarının %0.15'i geçmemesi istenir (Matuschka, 1980). Titanyum, FeB fazında çözünür ve sertliği artırır. Ti, geçiş bölgesinde tane büyümesini engelleyici bir rol oynar (Özsoy, 1991).

Yüksek alaşımlı çeliklerde, daha kalın borür tabakaları elde etmek için dolaylı borlama işlemi yapılabilir. Bu yöntemde; borlanacak olan çelik parçanın yüzeyinde, önce elektrolitik olarak demir biriktirilir veya kaplanır. Daha sonra istenilen tabaka kalınlığına göre, uygun sıcaklık ve sürede borlama yapılır. Elde edilecek tabaka kalınlığı, çelik türünden veya alaşım elementlerinden daha çok, yüzeyde biriktirilen demir tabakasının kalınlığına bağlıdır. Sıcaklık ve süreye bağlı olarak 200-250 µm tabaka kalınlığına ulaşılabilir (Matuschka, 1980).

Çizelge 1.10. Elektrolitik Olarak Yüzeyde Biriktirilen Demirin, Borür Tabakası Kalınlığına Etkisi (Matuschka, 1980)

Çelik	Demir tabakası kalınlığı (mm)	Borür tabakası kalınlığı (mm)
3Kh 2 V 8	-	0.05-0.06
	0.10-0.11	0.12
	0.16-0.18	0.18
	0.24-0.25	0.21-0.23
Kh 18 N 9 T	-	0.04-0.05
	0.10-0.11	0.11-0.12
	0.16-0.18	0.16
	0.24-0.25	0.23
U 8	-	0.20-0.21
	0.10-0.11	0.20-0.22
	0.16-0.18	0.23
	0.24-0.25	0.23
Armco Demir	-	0.22
	0.10-0.11	0.22-0.23
	0.16-0.18	0.23-0.24
	0.24-0.25	0.24

#### 1.4. Borlanmış Çeliklerin Aşınma Özellikleri

Aşınma sürtünerek çalışan bütün sistemlerde görülür ve bir malzeme problemi olmayıp pek çok değişkene bağlı bir sistem problemidir. Sistemin özelliğine göre çeşitli mekanizmalarda ortaya çıkar. Genellikle bu mekanizmalar sistemin aşınma davranışını belirlemede temel çıkış noktası olmasına rağmen, aynı anda oluşan aşınma mekanizmaların birbirini etkilemesi sonucu konu oldukça karışık bir durum gösterir (Karamış, 1988).

Aşınma çoğu zaman makine veya sistemin teknik ömrünü tayin eder. Aşınmanın meydana geldiği bütün sistemlerde aşınmaya karşı tasarım açısından bütün önlemler alındıktan sonra kullanılan konstrüksiyon elamanlarının ve takım malzemelerinin aşınmaya karşı korunması hem işletme ekonomisi hem de sistemin sağlıklı çalışabilmesi için son derece önemlidir. Aşınmaya karşı alınan tedbirler aşınmayı tamamen ortadan kaldırmayıp, aşınmanın türüne ve tribolojik faktörlere bağlı olarak aşınma hızını yavaşlatmak suretiyle malzemelerin çalışma ömrünü artırır (Nair vd., 2000).

Aşınma, temelde bir malzeme yüzey problemi olduğu için aşınmanın önlenmesine ya da yavaşlatılmasına yönelik tedbirler malzeme yüzeyinde yoğunlaştırılmıştır. Bu nedenle tribolojik faktörlere bağlı olarak aşınmaya maruz malzemelerin yüzey özellikleri çeşitli termal, termokimyasal ısı işlemlerle ve PVD, CVD gibi çeşitli kaplama yöntemleriyle iyileştirilmektedir (Karamış, 1991).

Borlama termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Yüksek sıcaklıklarda bor atomları temasta bulunduğu malzeme yüzeyine diffüze olarak malzeme yüzeyinde sert borür tabakaları oluşturur. İşlem fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından karbürleme, nitrürleme gibi termokimyasal işlemlerle benzerlik gösterir (Nair, 1996).

Borlamanın diğer yüzey sertleştirme işlemlerine göre en önemli üstünlüğü yüzey tabakasının çok sert olması sürtünme katsayısının düşük olması ve borlamadan sonra ek bir ısı işleme gerek duyulmamasıdır. Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertlikleri ve yüksek aşınma dirençleriyle karakterize edilirler. Bundan dolayı özellikle yüksek mertebede abrasiv ve adhesiv aşınmaya ve erozyona maruz makine parçalarının ve sistem elemanlarının borlanması teknik ömrün uzatılmasında önemli katkılar sağlar.

### 1.4.1. Abrasiv Aşınma Özellikleri

Borlama sonucu oldukça yüksek sertliğe sahip bir yüzey tabakası elde edilir. Her ne kadar sertlik ve aşınma dayanımı arasında doğrudan doğruya bir bağıntı yoksa da; borlama sonucu yüzey sertliğinin ve akma direncinin artması sürtünen yüzeyler arasındaki temas yüzeyini azaltarak aşınma hızını düşürür.

Abrasiv aşınma genel olarak sürtünen yüzeyde sertliği ile orantılıdır.(Özmen ve Çetincan, 1992) Borlanmış çelikler yüksek sertliklerinden dolayı abrasiv aşınmaya karşı son derece dirençlidirler. Borür tabakasının kalınlığı işlem şartlarına bağlı olarak 20 µm – 300 µm arasında değişir ve teknik ömürdeki artış birkaç kattır.

Abrasiv aşınmanın azaltılması için borlanmış malzemelerin kullanıldığı uygulama örnekleri arasında : Pnömatik taşıma sistemleri, plastik enjeksiyon makine parçaları, değirmen pompa ve valf parçaları vb. bulunmaktadır.

Sert SiC zımpara kağıdının abrasiv olarak kullanıldığı zımpara aparatında yapılan iki cisimle abrasiv aşınma deneylerinde borlanmış 42 Cr, Mo4 numunelerin; nitrürlenmiş ve sertleştirilmiş numunelere kıyasla çok üstün bir abrasiv aşınma direnci sergilediği görülmüştür (Hunger ve True, 1994).

Borlanmış çelikteki alaşım elemanlarının aşınma özelliklerine etkisi vardır. Bu etki aynı olmayıp aşınma mekanizmasına bağlı olarak değişmektedir. Borlanmış alaşımli çeliklerin abrasiv aşınma dirençlerinin alaşımatsız olanlara göre daha fazla olduğu ve borlanmış çeliklerde Cr, Mo, V ve de hepsinden öte VC' ün varlığının abrasiv aşınma direncini iyileştirdiği yapılan çalışmalarda ifade edilmektedir.

Alaşımli bir çelik borlandığında bazı alaşım elementleri borür tabakası içerisinde erirken, bazıları da tabakanın altında yoğunlaşarak tabakanın büyüme eğilimini ve faz kompozisyonunu etkiler. Borlanmış 145V33 çeliği en düşük abrasiv aşınma göstermiştir. Buna borür tabakası içerisindeki, SiC tanecikleri tarafından

kesilemeyen sert VC taneciklerinin sebep olduğu belirtilmektedir (Habig ve Chatterjee-Fisher, 1981).

Aynı konuda yapılan başka bir çalışmada X210Cr12 soğuk iş takımı çeliği 900°C / 5 saat şartlarında borlanılarak 1650 HV tabaka sertliği elde edilmiştir. Bu numuneler sulu abrazyon şartlarında SiC zımpara ile abrasiv aşınmaya tabi tutulmuş ve borlanmış numunelerin borlanmamışlarına kıyasla aşınma direncinde 8-10 katlık bir artış sağlanmıştır (Özmen ve Çetincan, 1992).

#### 1.4.2. Adhesiv Aşınma Özellikleri

Adhesiv aşınma deneyleri özellikle vakum altında yapılmaktadır. Çünkü temas yüzeylerinde oluşan tabii birikintiler ve oksidasyon ürünleri aşınmanın karakterini etkilemektedir.

Vakum altında yapılan deneylerde borlanmış çeliklerin nitrürlenmiş ve sertleştirilmiş olanlara kıyasla daha fazla adhesiv aşınmaya maruz kaldıkları gözlenmiştir. Bu deneylerde borlanmış 42CrMo4 çeliği en fazla aşınırken, 145V33 borlandığında aşınma direncinde çok az bir iyileşme gözlenmiştir. Diğer taraftan; X20Cr13 ve molibden'li çelikler daha az bir aşınma göstermişlerdir. Bu durumun borlanmış tabaka içerisinde çözünmüş Cr ve Mo'in adhezyon kuvvetlerini azaltmasından kaynaklandığı ifade edilmektedir.

Aşınma deneyleri atmosferik şartlarda yağlamasız yapıldığında; sürtünen yüzeyler arasında tribooksidasyon ürünlerinin oluşturduğu bir reaksiyon tabakası gözlenmiştir. Bu tabaka borlanmış tabakaları korurken, nitrürlenmiş tabakaları tahrip etmektedir.

Borun oksijene karşı ilgisi yüksek olduğundan borür tabakası üzerinde ince bir oksit filmi oluşur. Bu tabaka metal-metal temasını geciktirir, katı yağlayıcı görevi yaparak sürtünme katsayısını düşürür. Yüzeyin kimyasal bileşimi ve sürtünen yüzeylerin kimyasal kararlılığı eleman çifti arasındaki yüzey çekim kuvvetini azaltır



ve dolayısıyla aşınma dayanımını artırır. Borlu tabakaların soğuk kaynak eğilimi düşüktür, ayrıca aşınmayı önlemek için yağlanmasına gerek yoktur. Bu durum özellikle adhesiv aşınmayı önlemede büyük yarar sağlar (Selçuk, 1994).

Sürtünme sırasında açığa çıkan ısı yüzeyin yumuşamasına ve termal kararlılığa etki eder. Borlanmış yüzeylerde ise demir-borür fazının ötektik noktası  $\approx 1149^{\circ}\text{C}$  olduğunda sertliklerini  $1000^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar koruyabilmektedirler. Borlanmış yüzeyde  $1000^{\circ}\text{C}$ 'de 1560 HV sertlik değeri elde edilmiştir. Bu nedenlerle borlanmış yüzeylerde; yüksek parlama sıcaklığına sebep olan yüksek kayma hızlarında dahi adhezyonun artmadığı gözlenmiştir (Lang, 1986).

Borlanmış yüzeylerin iyi aşınma özellikleri; borlanmış yüzeylerde daha az yağ kullanılmasını ya da hiç kullanılmamasını sağlar. Daha az ya da hiç yağ kullanılmaması ekonomik açıdan ve çevrenin korunması açısından önemlidir.

Borlanmış yüzeylerin iyi aşınma özellikleri; borlanmış yüzeylerde daha az yağ kullanılmasını ya da hiç kullanılmamasını sağlar. Daha az ya da hiç yağ kullanılmaması ekonomik açıdan ve çevrenin korunması açısından önemlidir (Nair vd., 2000).

#### 1.4.3. Kaviteasyon-Erozyon Aşınması Özellikleri

Malzemelerde kaviteasyon tahribatı; sıvı ortam içerisinde izafi hareket sonucu boş denebilecek küçük hacimlerin oluşması ve bunların sıvı tarafından ani olarak doldurulması esasına dayanan tekrarlı zorlamalarla yüzey bölgesinin yorulması sonucu meydana gelir.

Borlanmış X165 CrMoV12 çeliğinin kaviteasyon direncini belirlemek için yapılan deneylerde borlanmış 2000-2100 HV<sub>0,02</sub> yüzey sertliğine sahip numuneler, borlanmamış numunelerle aynı şartlarda titreşimli kaviteasyon deneyine tabi tutulmuşlardır. Yapılan deneyler neticesinde; tarif edilen kaviteasyon sistemi için 1700 saatlik bir kaviteasyon zorlamasına kadar borlanmış numunelerin

borlanmamışlara kıyasla yaklaşık 4 kat daha fazla kavitasyon direncine sahip olduğu gözlenmiş olup bu artışın kısa süreli kavitasyon zorlamaları için geçerli olduğu ifade edilmektedir. Uzun süreli bir kavitasyon etkisinde ise yüzey bölgesinden sert borür parçacıklarının mikrojet ve yüksek frekanslı basınç dalgasının etkisi ile mikrobloklar halinde koparılmaya başlaması sonucu kavitasyon direncinin hızla düşmeye başladığı ifade edilmektedir (Demirci, 1996).

Hidrolik makinaların klavuzları, klavuz kanatları, halkalı salmastraları, türbin çarkları, pelton nozlu ve mızrakları giriş suyu tarafından taşınan her metreküp suda 0.5-5 kg taşınan sert parçaların etkisiyle abrasiv aşınmaya maruz kalırlar. Bu problemin çözümü için, hidrolik türbin parçaları değiştirilir yada nitrürleme, termal püskürtme, borlama gibi yüzey işlemlerine tabi tutulur.

Borlama ile özellikle düşük alaşımlı çeliklerde, Cr-Mo' li çeliklerde ve Co esaslı alaşımlarda çok etkin bir şekilde aşınmaya dayanıklı yüzeyler elde edilmekte olup, abrasiv aşınmada %400-500' e varan iyileşmeler kaydedilmiştir. Buhar türbin nozllarında kullanılan %12 Cr' lu çelik borlandığında aşınmaya karşı diğer bütün kaplama yöntemlerinin üzerinde bir performans sergiler (Mann, 1997).

Malzemelerin kavitasyon direnci; şekil değiştirme derecesine, elastiklik ve sertlik gibi mekanik özelliklere önemli ölçüde bağlıdır.

Martenzitik Cr-Ni' li dökme paslanmaz çeliği (13Cr-4Ni) hidrolik türbinlerde pompalarda ve kompresörlerde geniş bir uygulama sahasına sahiptir. Borlu tabakaların kavitasyon direncini tespit etmek amacıyla yapılan deneyde 13Cr-4Ni çeliği 900°C / 6 saat şartlarında borlanılarak 700-750 HV<sub>0,01</sub> sertlik değeri ve 30-40 µm tabaka kalınlığını elde edilmiştir. Borlanmış numunelerde borlanmamış numunelere kıyasla 2,5 kat sertlik artışı sağlanmıştır. Döner disk aparatıyla yapılan kavitasyon deneylerinde borlanmış 13Cr-4Ni çeliğinin kötü kavitasyon direnci sergilediği gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak borlanmış yüzeylerin son derece gevrekleşmesi ayrıca yüzeyde genişleme oranının ve de şekil değiştirme enerjisinin son derece azalması gösterilmiştir (Mann, 1997).

Borlamadan sonra sonra 600°C' de 6 saat süreyle yapılan temperleme işlemi, mekanik özellikleri iyileşmenin yanı sıra kavitasyon direncinde de az da olsa iyileşme sağlanmıştır. Ancak sertlik azalmasına sebep olduğu için abrazyum direncinde bir miktar azalma görülmüştür (Mann, 1997).

#### 1.4.4. Eroziv Aşınma Özellikleri

Sıcak iş takım çeliği H(13) numuneler, 1050°C' de ısıtılarak havada soğutulmuş ve 590°C' de temperlendikten sonra 850°C 'de 2 saat süreyle borlanmıştır. Bu numuneler 20,200 ve 400°C' de 300µm tane boyutunda SiC parçacıkları tarafından hava akımında erosiv aşınmaya tabi tutulmuştur. Deney sonucunda borlanmış numunelerin bütün sıcaklıklarda aynı şartlarda deneye tabi tutulan nitrürlenmiş ve Ni-P kaplanmış numunelere nazaran en yüksek erosiv aşınma direnci sergilediği görülmüştür (Tesipas ve Kariofillis, 1996).

Bor karbür (B<sub>4</sub>C) çeliklerin borlanark sertleştirilmesinde kullanıldığı gibi sinterlenerek de kullanılabilir. Sinterlenmiş B<sub>4</sub>C çok sert olup (35Gpa<) yüksek aşınma gerektiren kritik uygulamalarda kullanılmaktadır. Sinterlenmiş B<sub>4</sub>C parçalar, SiC parçacıklarından oluşan katı parçacık erozyonu karşısında çok yüksek bir aşınma direnci sergilemektedir.

#### 1.5. Borlanmış Çeliklerin Korozyon Dayanımları

Çevrenin kimyasal ve elektrokimyasal etkilerinden dolayı metalik malzemelerde meydana gelen hasara korozyon denir. Aslında malzemelerin rutubetin veya başka kimyasal bileşenlerin bulunduğu bir ortamla reaksiyona girmeleri korozyon olayını ve kuru hava ile reaksiyona girmelerini oksidasyon olayını meydana getirir.

Korozyona karşı alınabilecek önlemlerden biri de malzemeleri koruyucu kaplamalarla kaplamaktır.

Demir grubu malzemelerin borlanması, bu malzemelerin bazı asit ve sıvı metallere karşı olan direncini büyük ölçüde artırmaktadır. Özellikle HCl asidi ile Al, Pb ve Zn metallerin sıvı banyolarında borlu malzemelerin korozyon dayanımı çok yüksektir (Taşçı, 1993).

Yüksek Cr' lu çeliklerde borlama ile koruyucu krom oksit yerine daha az koruyucu olan Cr-borür meydana gelmektedir. Bu bakımdan yüksek alaşımli malzemelerin borlanmasıyla daha iyi korozyon özelliği her zaman elde edilmeyebilir.

3 saat süreyle borlanan 3 adet çeliğin %10 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> içerisinde 56°C' deki borlanmış ve borlanmamış durumdaki kıyaslamaları çizelge 1.12' de verilmiştir (Bindal, 1991).



Çizelge 1.11. 3 saat süreyle borlanmış ve borlanmamış "3" adet özel hazırlanan alaşımda 56°C sıcaklıktaki % 10 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> korozif ortamında ağırlık kaybı testi ile elde korozyon değerleri (Bindal, 1991)

Alaşım No*	Malzeme Durumu	Korozyon süresi (saat)	P <sub>0</sub> ** (gr)	P <sub>1</sub> ** (gr)	P <sub>0</sub> -P <sub>1</sub> ** (gr)	Ağırlık Kaybı (%)
1	Borlanmamış	1	6.2899	5.8262	0.4637	7.37
		2	5.8262	5.3866	0.9033	15.50
		3	5.3866	4.9898	1.3001	24.13
		4	4.9898	4.6001	1.6898	33.86
	Borlanmış	1	6.5143	6.4730	0.0413	0.63
		2	6.4730	6.3360	0.1783	2.75
		3	6.3360	6.0271	0.4872	7.68
		4	6.0271	5.6499	0.8644	14.34
2	Borlanmamış	1	4.2515	4.2141	0.3018	7.09
		2	3.9434	4.1438	0.5898	14.95
		3	3.6617	3.9660	0.8560	23.37
		4	3.3955	3.7308	1.1282	33.22
	Borlanmış	1	4.2343	4.2141	0.0202	0.47
		2	4.2141	4.1438	0.905	2.14
		3	4.1438	3.9660	0.2683	6.47
		4	3.9660	3.7308	0.5035	12.69
3	Borlanmamış	1	5.5441	5.2408	0.3033	5.47
		2	5.2408	4.9288	0.6153	11.74
		3	4.9288	4.6253	0.9188	18.64
		4	4.6253	4.2991	1.2450	26.91
	Borlanmış	1	5.5816	5.5635	0.0181	0.32
		2	5.5635	5.5266	0.0550	0.98
		3	5.5266	5.3551	0.2265	4.09
		4	5.3551	5.0526	0.5290	9.87
* Alaşım No		Bileşim (% Ağırlık)				
1	Fe-0.3 C-0.02 P					
2	Fe-0.3 C-0.02 P-0.5 Mn					
3	Fe-0.3 C-0.02 P-1 Mn					

\*\* : P<sub>0</sub> : İlk Ağırlık P<sub>1</sub> : Son Ağırlık P<sub>0</sub>-P<sub>1</sub> : Ağırlık Farkı

## 2. KAYNAK BİLGİSİ

Budinski (1993), yayınma işlemlerini değişik açılardan karşılaştırmıştır. Borlama işlemi sonucunda, nitrüleme ve karbürleme gibi klasik yayınma işlemlerine göre oldukça yüksek yüzey sertliği elde edilmektedir. Ancak, borlama işlemi, nitrülemeye göre oldukça yüksek bir sıcaklıkta gerçekleştirilmektedir.

Termo-difüzyonal yöntemlerle malzeme yüzeyinin borca zenginleştirilmesi esasına dayanan "borlama" işlemi ilk kez 1895 yılında Moissan tarafından çeliklere uygulanmıştır. 1970'li yıllarda borlama konusundaki çalışmalar büyük bir hız ve yoğunluk kazanmıştır.

Bor yayını ile yüzey sertleştirme işlemi için, karbürleme ve nitrüleme işlemlerinde olduğu gibi çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Rus vd.(1985), borür tabakaların oluşumu için uygulanan yöntemleri, kimyasal yöntemler ( katı, sıvı ve gaz ortamda borlama ) ve fiziksel yöntemler ( bor iyon aşılama, fiziksel vakum biriktirme, saçılma ve iyon kaplama ) şeklinde sınıflandırmışlardır. Batı Avrupa'da, özellikle Almanya'da katı ortamda borlama işlemi tercih edilmekte ve yaygın olarak kullanılmakta iken, doğu Avrupa ülkelerinde, özellikle de Rusya' da sıvı ortamda borlama kullanılmaktadır. Gaz reaktif ortamda borlama ticari alanda çok nadir olarak kullanılmaktadır. Bu konu üzerinde oldukça geniş kapsamlı araştırmalar sürdürülmektedir. Hegewaldt vd.(1984), alaşımsız çelikleri 650°C' de gaz ortamda borladıklarını ve olumlu sonuç aldıklarını bildirmektedirler.

Goeuriot vd.(1983), "Boridif" olarak isimlendirdikleri özel bir borlama yöntemi geliştirmişler ve aktivatör olarak  $KBF_4$  yerine  $BF_3$  ve  $SiC$  ün kullanılmasını önermişlerdir. Böylece daha az kırılğan ve borlama sonrası ısıl işlemlere uygun olan tez fazlı borür ( $Fe_2B$ ) tabakasının elde edilmesi kolaylaşmaktadır. Katı ortamda borlamanın yeni bir versiyonu da " akışkan yatak tekniği " kullanılarak yapılan borlamadır. Bu yöntemde, akıcı ortam olarak özel tozu kullanılır. Tayal ve Mukherjee (1994), 400 W Nd:Yag laser kullanarak, düşük karbonlu çelikleri lokal

olarak borlamış ve başarılı sonuçlar almıştır. Laser borlamada, borlama öncesi işlemlere gerek duyulmamaktadır.

Borlama üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu, alaşım elementlerinin demir esaslı malzemelerde borür tabakasının büyüme kinetiğine etkisi ve aşınma gibi servis özellikleri üzerinedir. Blazon vd.(1975), çeliklerde borür tabakası oluşumuna alaşım elementlerinin etkisini araştırmışlar ve alaşım elementlerinin oldukça farklı etkiler yaptığını belirlemişlerdir. Gianoglio ve Badini (1986), Ni' in Badini vd. (1987), C, Cr ve Ni' in, Carburicchio vd. (1985), Cr' un etkilerini araştırmışlardır.

Bindal (1991), borlama süresi ve krom miktarına bağlı olarak, krom borürler tesbit etmiştir ve kromun çok fazla olmasa bile, kırılma tokluğunu düşürdüğünü belirlemiştir.

Lu (1983), borlama işlemi esnasında çelik bileşiminde bulunan elementlerin yeniden dağıldıkları ve bu arada FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakalarının, karbon ve silisyumu çözündürme yeteneği olmamasından dolayı, bor yayını esnasında C ve Si' ün borür tabakasından içeriye doğru itildikleri ve bunun sonucu olarak borür tabakası ile borlanan metal matriks arasında "geçiş bölgesi" olarak isimlendirilen bir yapının meydana geldiğini ve Ck 15 çeliğinde, borlama süresine bağlı olarak borür tabakası ve geçiş bölgesi kalınlıklarının farklı tarzlarda arttığını belirtmektedir. Bu bölgedeki bor dağılımını otoradyografi yöntemi ile inceleyen Berzina vd. (1984), geçiş bölgesi kalınlığının, normal metalografik yöntemde belirlenenden çok daha büyük olduğunu belirlemişlerdir. Aynı yöntemi kullanan Bozkurt (1984), geçiş bölgesinin, borür tabakasından 10-15 kat kadar fazla bir kalınlığa sahip olduğunu tespit etmiştir.

Borür tabakasının özellikleri, borlama sonrası uygun ısı işlemler uygulanarak tabaka ile matriks malzeme özgül hacimleri arasındaki farkın azaltılmasıyla geliştirilebilir. Liliental ve Tacikowski (1980), borlamadan sonra, Normalizasyon + Sertleştirme + Temperleme işleminin ana malzeme ile Fe<sub>2</sub>B tabakası özgül hacimleri arasındaki farkı düşürdüğünü, bunun sonucu olarak; borür tabakasındaki kalıntı

gerilmeler ve gevrekliğin en düşük, aşınma direncinin ise en yüksek değerde olduğunu belirtmektedir.

Borür tabakalarının özelliklerini iyileştirmek ve yayınmayı hızlandırmak için termal çevrimli borlama işlemleri uygulanmaktadır. Özsoy (1991), termal çevrimli borlamayla tane boyutunun düştüğünü ve geçiş bölgesi/borür tabakası oranının azaldığını ayrıca bölgeler arasındaki özgül hacim farklarının azaldığını, aşınma gibi servis özelliklerin iyi yönde etkilendiğini ve gevrekliğin azaldığını belirtmektedir.

Makine elemanlarının aşınma dayanımlarını artırmanın en önemli yöntemlerinden birisi de, bor yayını ile yüzeylerinin sertleştirmesidir. Eyre (1975), karbürleme ve borlama işlemi uygulanmış malzemelerin aşınma davranışlarını karşılaştırmış ve borlamanın karbürlemeye göre özellikle geçiş bölgesi üzerindeki yüklemelerde adhezif aşınma dayanımı açısından çok daha iyi sonuçlar verdiğini ve bu özelliği yüksek sıcaklıklarda dahi muhafaza ettiğini belirlemiştir.

Budinski (1993), değişik test teknikleri kullanarak yaptığı aşınma çalışmaları sonucunda, vanadyum karbür ve titanyum karbür yayındırılmış yüzeylerin adhezif ve abrazif aşınma dayanımlarının, diğer yayınma yöntemleri uygulanmış yüzeylerden daha yüksek olduğunu; kinetik katsayısı bakımından ise borlu-borlu ve VC-VC' lü çiftlerin en iyi sonuçları verdiğini belirtmektedir.

Subrahmanyam (1984), değişik fazlara sahip borür tabakasının aşınma davranışlarını incelemiş ve homojen olmayan mikro yapılarından iki fazlı tabakaların aşınma dayanımlarının, daha kötü olduğunu ve yine yüzey tabakalarına bağlı olarak aşınma mekanizmalarının farklılık gösterdiğini belirlemiştir. Uetz ve Wlassow (1980), borür tabakalarında oluşan aşınma mekanizmalarını incelemiş ve Fe<sub>2</sub>B tabakasındaki aşınmanın yorulma sonucunda oluştuğunu belirtmişlerdir.

Takeuchi vd. (1979), FeB, Fe<sub>2</sub>B tabakalarının benzer aşınma özellikleri gösterdiğini ve borlanmış çeliklerin aşınma davranışlarını etkileyen en önemli faktörün, yüzeyde oluşan koruyucu oksit filmleri olduğunu ileri sürmektedirler.



Formanek vd. (1993), plazma-sprey metoduyla borür tabakaları oluşturmuş ve bu tabakaların mikro-yapı aşınma ve erozyon testlerini yapmıştır.

Fichtl (1974), borür tabakalarının korozyon dayanımı ölçümleri sonucunda, yüksek kromlu çeliklerde korozyon dayanımının, borlu tabakada bulunan krom boritten dolayı düşük olduğunu belirtmektedir. Luigi, değişik sıcaklıklarda yaptığı aşınma testleri sonucunda, borlanmış yüzeylerin özellikle yüksek sıcaklıklarda, karbürleşmiş ve nitrürlenmiş yüzeylerden çok daha iyi aşınma dayanımı gösterdiğini belirlemiştir.

Borlama işlemi akademik çalışmalara paralel olarak, endüstride geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Çelikten yapılan kahve öğütme diskleri, borlandığında ömürleri beş kattan fazla artmaktadır. Dökme demirden yapılmış, tekstil makinası parçalarının borlanması çok iyi sonuçlar vermektedir. Demiryolu yük vagonlarının sönümlenme parçaları, genellikle 100000 km' den sonra aşınmaktadır. Bu parçalar borlandığında ömürleri, 200000 km.' ye çıkmaktadır. Volkswagen Golf otomobillerinin dizel motorlarının yağ pompası dişlileri, borlanarak ömürleri arttırılmaktadır (Fichtl, 1981).

### 3. MATERYALVE METOD

Bu çalışmada makine, otomotiv ve imalat sanayiinin yanı sıra özellikle cer kancaları, dişliler, kazıcılar, transmisyon milleri, raylar ile kazma ve kürek yapımında çok kullanılan Ç1040 çeliğine, yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirerek yapılan borlama işlemi ile sertleştirilmesi ve oluşan borür tabakalarının özellikleri ile elde edilen borlanmış çeliğin aşınma ve korozyona karşı dayanımlarının belirlenmesi için deneysel çalışmalar yapılmıştır.

#### 3.1. Deneysel Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada borlama yöntemi olarak katı ortamda borlama yöntemi seçilmiştir. Borlamaya tabi tutulacak malzeme ise Ç1040 çeliği olarak belirlenmiştir. Bunun nedeni bu çeliğin işlenebilirliğinin kolay olması, endüstride çok miktarda ve kolay bulunabilmesidir. Katı ortamda yapılan borlama işlemi neticesinde elde edilen borür tabakası kalınlığı borlama süresine ve borlama sıcaklığına göre değişiklik göstermektedir. Asil Çelik firmasından temin edilen Ç1040 çeliğinin kimyasal analizi Assan A.Ş.' de yaptırılmış olup bileşimi çizelge 3.1' de görülmektedir.

Çizelge 3.1. Deneysel kullanılan Ç1040 çeliğinin kimyasal bileşimi (Ağırlık %)

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Fe
Ç1040	0.396	0.21	0.69	0.01	0.01	Kalan

Deneysel iki değişik şekil ve boyutta numuneler kullanılmıştır. Birinci tip numune dikdörtgenler prizması şeklinde olup boyutları 20x20x30 mm' dir. İkinci tip numune ise silindirik olup 20 mm çapında ve 30 mm boyundadır.

Katı ortam borlamasında bor kaynağı olarak susuz boraks ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), Eti Bor A.Ş. Kırka Bor İşletmesi'nden temin edilmiştir. Susuz boraks üretimi itibari ile hidratlanmış boraksın 700°C civarlarında kristal suyunun uçurulması sonucu elde edilmesine rağmen sonradan yapısında su bulunabileceği ihtimalinden yola çıkılarak

elimizdeki susuz boraks  $700^{\circ}\text{C}$ ' ye kadar ısıtılarak yapıda suyun bulunmadığı tespit edilmiştir.

Katı ortam borlamasında bor verici ortamda kullanılan bir başka madde olan ferro silisyum ise Erdemir A.Ş.'den külçe halinde temin edilmiştir. Ferro silisyumun firma kataloglarından elde edilen kimyasal bileşimi çizelge 3.2' de verilmiştir. Külçe halinde alınan ferro silisyum Eti Bor A.Ş. Emet Bor İşletme Müdürlüğü Laboratuvarlarında diskli değirmende öğütülerek 250 mesh elek altı toz boyutunda hazırlanmıştır.

Çizelge 3.2. Ferrosilisyum'un kimyasal bileşimi

Fe-Si	Si	C	Al	P	S	Fe
Standart Analiz(%)	70	0.1	1	0.05	0.04	Kalan

Literatürde şimdiye kadar katı ortam borlamasında bor verici kaynak olarak yurtdışından ithal edilen ekabor tozunun kullanıldığı görülmüştür. Maliyeti fazla olan bu kaynağı kullanmak yerine ülke kaynaklarının değerlendirilmesi düşüncesinden yola çıkılarak, bor verici kaynak olarak maliyeti çok daha düşük olan %80 susuz boraks + %20 ferro silisyum bileşimi kullanılmıştır.

Katı ortam borlamasında işlemin yapılacağı potalar paslanmaz çelik (304 CrNi) malzemeden olup 60 cm çap ve 100 cm boyunda kapaklı olarak imal ettirilmiştir. Deneyin gerçekleştirilmesinde Nüve firmasının ürünü olan maksimum  $1200^{\circ}\text{C}$  sıcaklık kontrollü ve  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  hassasiyetli kül fırını kullanılmıştır.

### 3.2. Katı Ortamda Borlama İşlemleri

Borlama sonucu elde edilecek borür tabakasının oluşumunu etkileyen faktörler borlama sıcaklığı, borlama süresi, kimyasal bileşim ve çelik türüdür.

Yapılan katı ortamda borlama işlemlerini dört grupta toplayabiliriz.

I.Grup İşlemler: 950 °C sıcaklıkta Ç1040 numuneleri 3 saat süre ile katı ortamda borlamaya tabi tutulmuş ve havada soğutma yapılmıştır.

II.Grup İşlemler: 950 °C sıcaklıkta Ç1040 numuneleri 5 saat süre ile katı ortamda borlamaya tabi tutulmuş ve havada soğutma yapılmıştır.

III.Grup İşlemler: 1000 °C sıcaklıkta Ç1040 numuneleri 3 saat süre ile katı ortamda borlamaya tabi tutulmuş ve havada soğutma yapılmıştır.

IV.Grup İşlemler: 1000 °C sıcaklıkta Ç1040 numuneleri 5 saat süre ile katı ortamda borlamaya tabi tutulmuş ve havada soğutma yapılmıştır.

### 3.3. Deneilerin Yapılışı

Deneilere başlamadan önce katı ortam borlamasında bor verici kaynak bileşimini oluşturacak olan karışım, %80 susuz boraks ve %20 ferro silisyumun iyi bir şekilde harmanlanmasıyla oluşturulmuştur. Her grup deney için 4 adet pota hazırlanarak bu potalarda 4 adet numune borlamaya tabi tutulmuştur.

Numuneler potaların tam merkezinde kalacak şekilde yerleştirilmiş ve kalan boşluklar bor verici kaynak (%80 susuz boraks + %20 ferro silisyum) ile doldurulmuştur. Pota kapakları sıkı şekilde kapatılarak şamot ile sıvanmıştır. Bu durumda numunenin etrafı 2 cm bor verici kaynak ile beslenmiştir. Potalar, fırın oda sıcaklığında iken yerleştirilmiş ve işlem gruplarına göre fırında belli sıcaklık ve sürelerde beklemeye bırakılmıştır. Bekleme süreleri dolduğunda, potalar fırından alınarak havada soğumaya tabi tutulmuştur. Soğuma sonunda potaların ağzı açılarak numuneler katılaştıran bor kaynağının içinden zahmetli bir şekilde çıkarılmıştır.

Deney numunelerinin yüzeylerine bor cürufları çok az yapışmıştır. Bunlar elle ve zımpara ile bor tabakasına zarar vermeyecek şekilde temizlenerek, metalografik muayene ve mikro sertlik ölçümleri için hassas kesme ile kesilmiş ve

çeşitli zımpara kademelerinden geçirilerek 3 mikronluk elmas pasta ile çuhada parlatılmıştır.

Yüzeyleri parlatılan numuneler Eskişehir I.Hava İkmal ve Bakım Merkez Komutanlığı Metalurji Laboratuvarlarında, borür tabakalarını net görebilmek ve ölçebilmek için dağlanmadan SEM (Scanning Electron Mikroskopy - LEO 440) ile fotoğrafları çekilmiş ve oluşan tabaka kalınlıklarının maksimum ve minimum değerleri ölçülmüştür. Borür tabakasının mikro sertlik değerleri de Micromet 2100 cihazı ile 100 gram yük altında ölçülmüştür. Aynı numuneler Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarlarında %3 nital ile dağlanarak optik mikroskopta mikro yapı fotoğrafları çekilmiştir.

Bu işlemlerden sonra, 4. grup işlemlerden elde edilen borlanmış numuneler ile borlanmamış numuneler korozyon ve aşınma deneylerine tabi tutularak, aşınma ve korozyon dayanımları tespit edilmiştir.

Korozyon deneyleri Eti Bor A.Ş. Emet Bor İşletmesi Laboratuvarlarında yapılmış olup, borlanmış numune ile borlanmamış numunenin 56°C'de % 10 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> içerisinde 6 saat boyunca zamana karşı ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. Numunelerdeki ağırlık kayıpları 1 saatlik periyotlarla 0.1 mg hassasiyetli tartı cihazıyla ölçülmüştür. Her periyot sonunda korozyon ortamından alınan numuneler etüvlerde kurutularak ölçüme tabi tutulmuştur.

Aşınma deneyleri Dumlupınar Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarlarında, Pin-On-Disk (ASTGM G99-90) aşınma deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı olarak 800 mesh'lik SiC zımpara kağıtları ve pim olarak borlanmış ve borlanmamış Ç1040 çelikleri kullanılarak aşınma miktarları ağırlık olarak tespit edilmiştir. Deneyler 300 gr sabit ağırlık ve 250 d/d sabit hızda gerçekleştirilmiştir. 2 dakikalık periyotlarla numunelerdeki aşınma kayıpları 0.1 mg hassasiyetli tartı cihazıyla ağırlık olarak ölçülmüştür. Her bir numune için yeni zımpara kağıdı kullanılmış ve her 2 dakikalık periyotta yenisi ile değiştirilmiştir.

## 4. BULGULAR

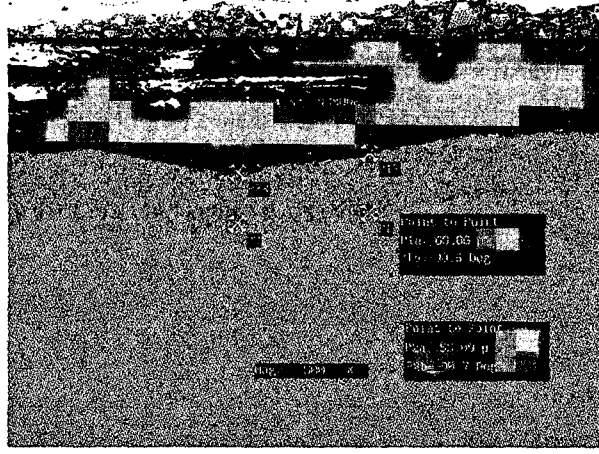
### 4.1. Katı Ortamda Borlama Deney Sonuçları

Katı ortamda borlama yöntemi ile borlanmış Ç1040 numunelerinin mikro yapı incelemeleri sonucunda SEM fotoğrafları çekilerek tabaka kalınlıkları ölçümleri yapılmış, tabaka, geçiş bölgesi ve ana yapının mikro sertlik değerleri ölçülmüş, mikro yapı fotoğrafları çekilmiştir. Mikro sertlikler 100 gram yük altında ortalama 5 sertlik değerinin aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. (Çizelge 4.1)

Çizelge 4.1. Deneyler sonucunda elde edilen tabaka kalınlıkları ve sertlik değerleri

Sıcaklık (°C)	İşlem Grup No	Numune	Tabaka Kalınlığı (µm)	Tabaka Sertlik Değeri (HV <sub>0,1</sub> )	Geçiş Böl. Sertlik Değeri (HV <sub>0,1</sub> )	Anayapı Sertlik Değeri (HV <sub>0,1</sub> )
950	I	Ç1040	63,86	869	681	266
950	II	Ç1040	80,76	1266	697	266
1000	III	Ç1040	95,16	946	612	266
1000	IV	Ç1040	103,92	1560	724	266

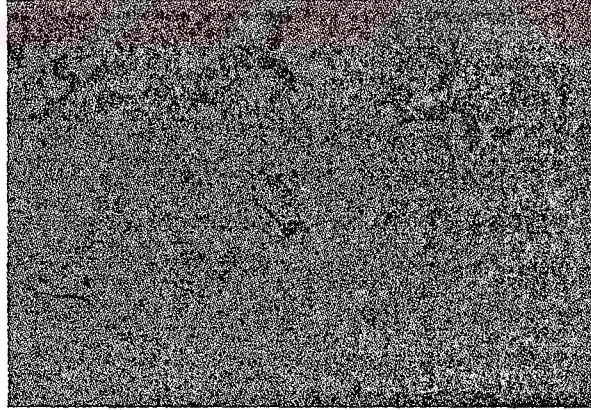
Şekil 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'teki SEM ve mikroyapı resimlerden de görüldüğü üzere borlu tabaka kalınlığında, zamanın ve sürenin artışına bağlı olarak büyüme gözlenmiştir. Bu durum difüzyon kanunlarıyla doğrudan ilgilidir. Bor tabakasının kolonsal (parmaksı) bir yapı sergilediği görülmektedir. Bunun oluşum mekanizması ise, bor atomlarının tane sınırlarına difüzyonu ile zorlaması ve malzeme merkezine doğru ilerlemesi şeklinde açıklanabilir.



(a)

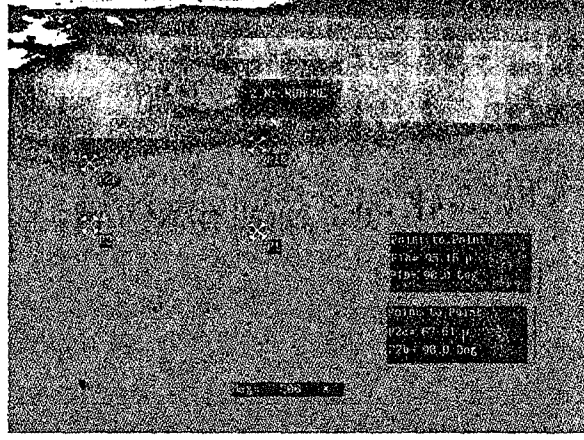


(b) X 250

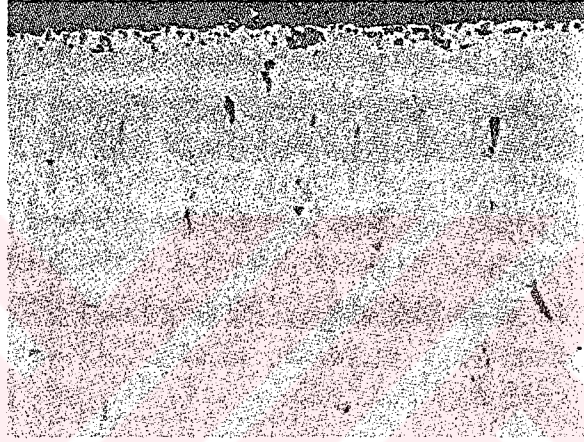


(c) X 5

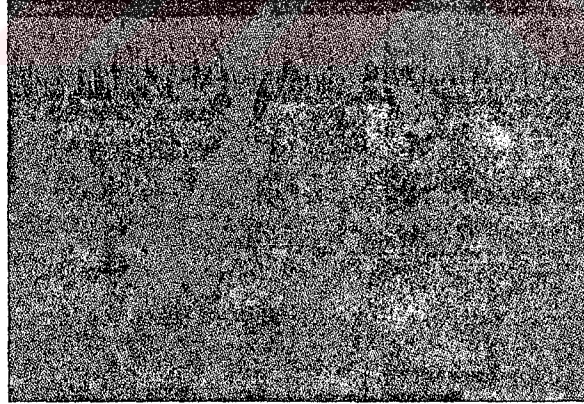
Şekil 4.1. 950°C sıcaklıkta 3 saat borlama sonucunda Ç1040 numunelerinin tabaka, geçiş bölgesi ve anayapısı (a) SEM (b) Mikroyapı (c) Mikroyapı (Dağlanarak)



(a)



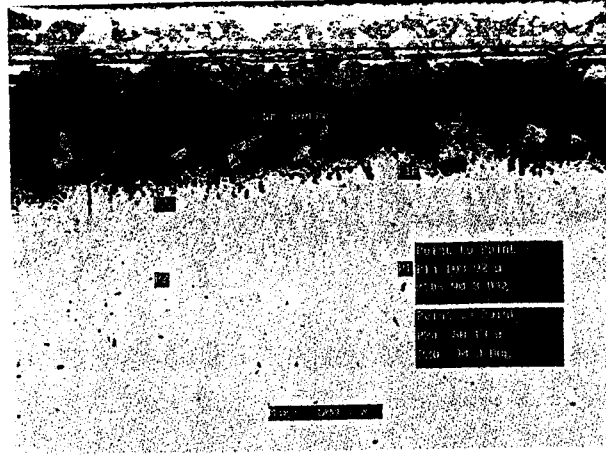
(b) X 500



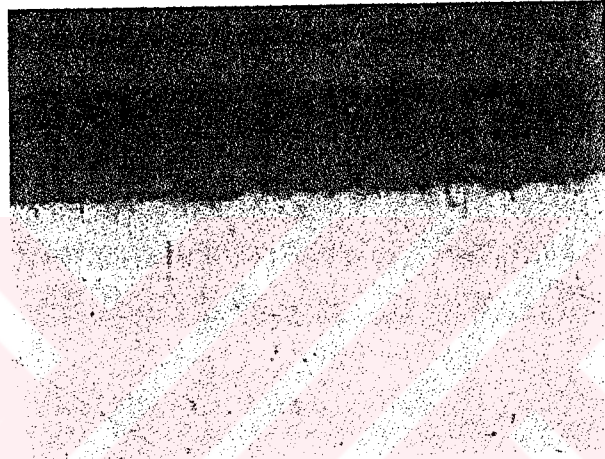
(c) X 80

Şekil 4.2. 950°C sıcaklıkta 5 saat borlama sonucunda Ç1040 numunelerinin tabaka, geçiş bölgesi ve anayapısı (a) SEM (b) Mikroyapı (c) Mikroyapı (Dağlanarak)

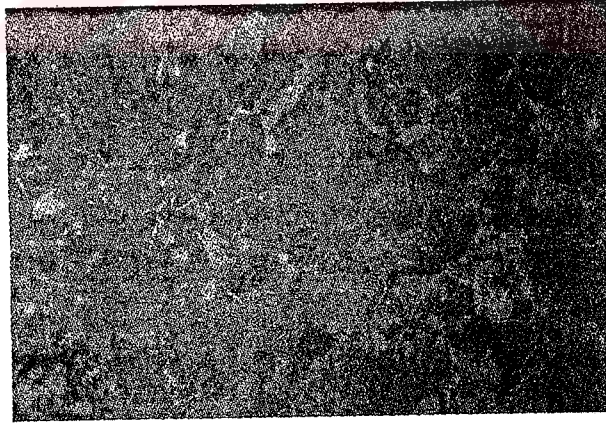




(a)

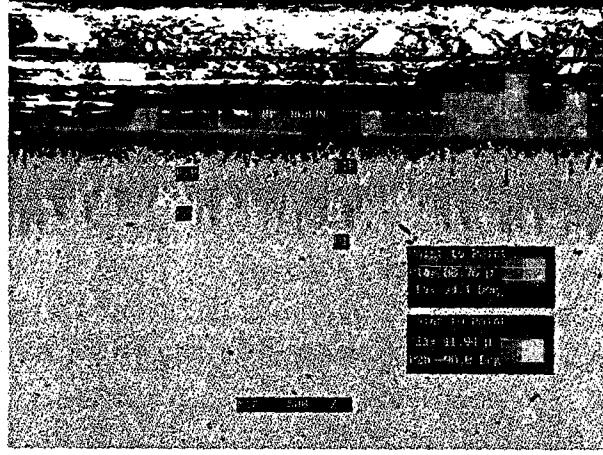


(b) X 100

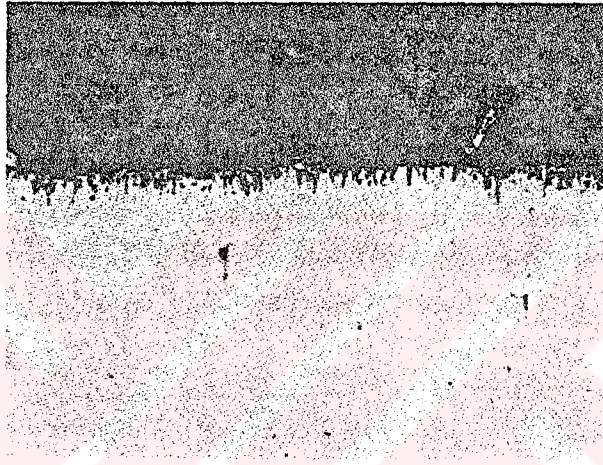


(c) X 16

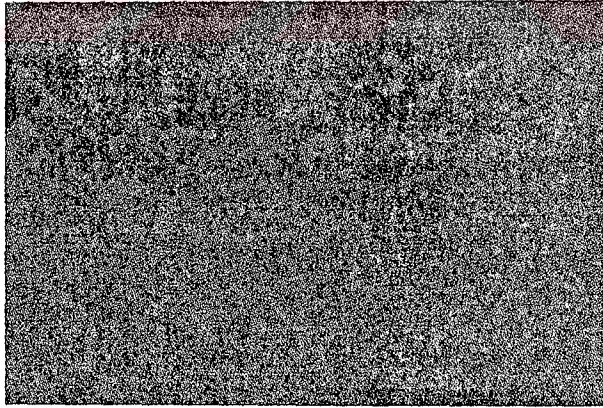
Şekil 4.3. 1000°C sıcaklıkta 3 saat borlama sonucunda Ç1040 numunelerinin tabaka, geçiş bölgesi ve anayapısı (a) SEM (b) Mikroyapı (c) Mikroyapı (Dağlanarak)



(a)

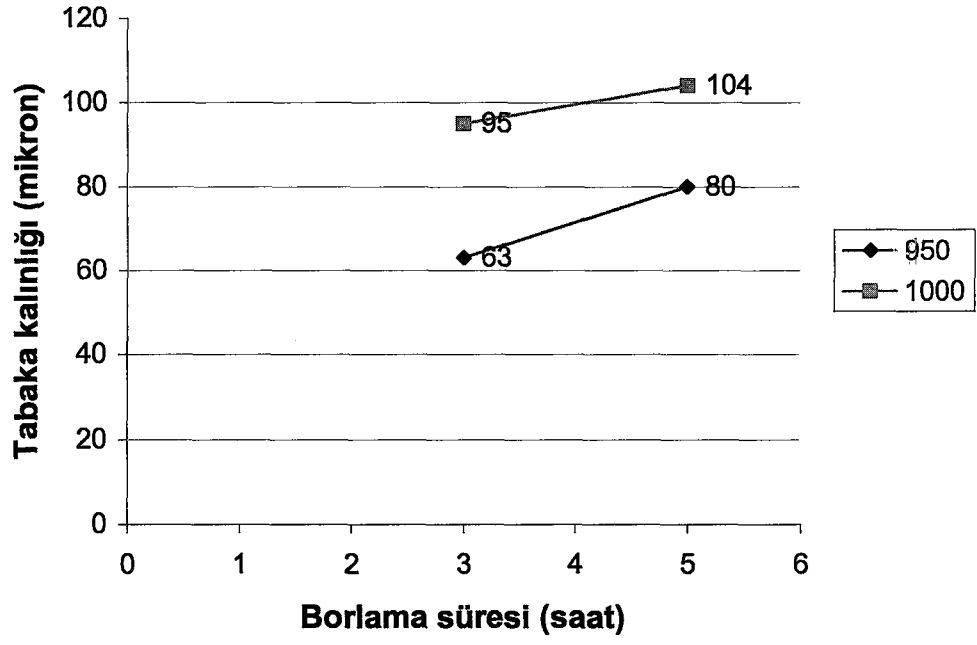


(b) X 100

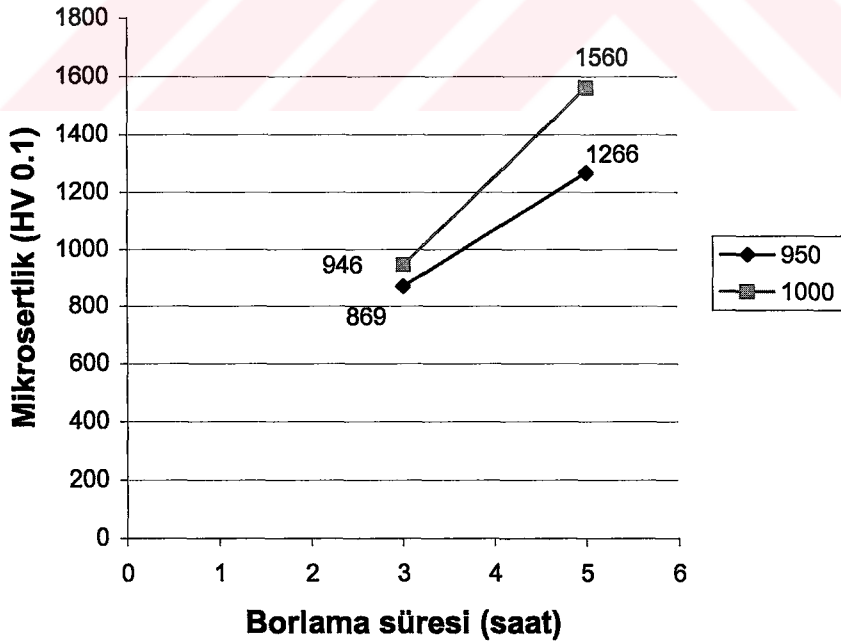


(c) X 4

Şekil 4.4. 1000°C sıcaklıkta 5 saat borlama sonucunda Ç1040 numunelerinin tabaka, geçiş bölgesi ve anayapısı (a) SEM (b) Mikroyapı (c) Mikroyapı (Dağlanarak)



Şekil 4.5. 950°C ve 1000°C sıcaklıklarda borlanan numunelerin tabaka kalınlığının borlama süresi ve sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.6. 950°C ve 1000°C sıcaklıklarda borlanan numunelerin mikro sertliklerinin borlama süresi ve sıcaklıkla değişimi

#### 4.2. Korozyon ve Aşınma Deney Sonuçları

1000°C sıcaklıkta 5 saat süreyle borlanan numune ile borlanmamış numunenin %10 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> içerisinde 56°C'deki korozyon deneyi sonuçları çizelge 4.2'de verilmiştir. Çizelgede borlanmış ve borlanmamış numunelerin 1, 2, 3, 4, 5, 6 saat süre ile korozyon ortamında bırakılmaları sonucu % ağırlık kaybı ile birim yüzeydeki ağırlık kayıpları (mg/cm<sup>2</sup>) verilmiştir.

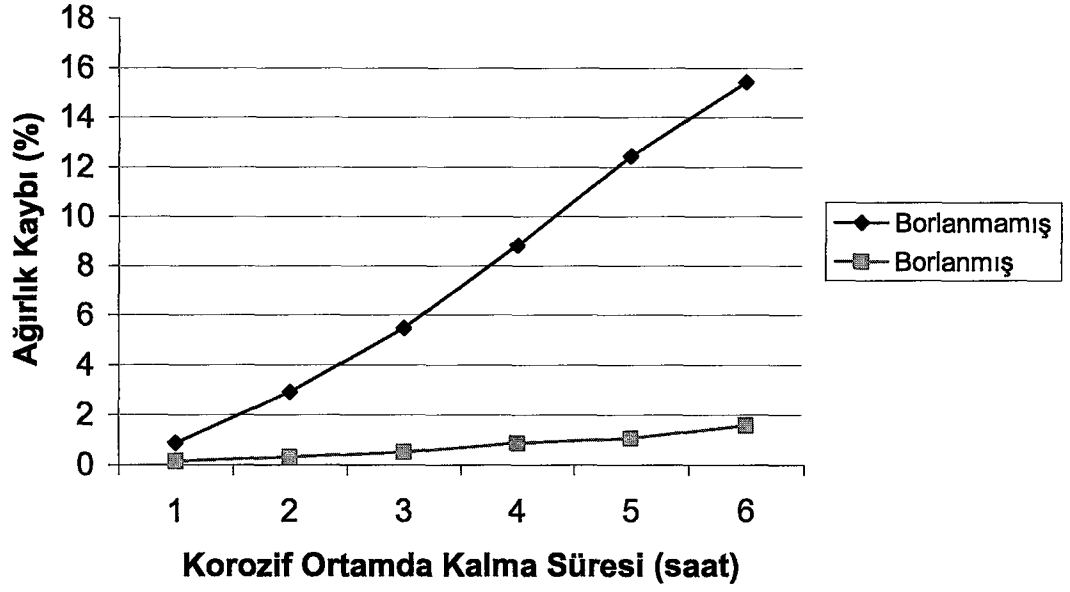
Çizelge 4.2. Borlanmış ve borlanmamış numunelerin 56°C sıcaklıktaki % 10 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> korozif ortamında ağırlık kaybı testi ile elde edilen korozyon değerleri.

Malzeme Durumu	Korozyon Süresi (saat)	P <sub>0</sub> * (gr)	P <sub>1</sub> ** (gr)	P <sub>0</sub> -P <sub>1</sub> *** (gr)	Ağırlık Kaybı (%)	Ağırlık Kaybı (mg/cm <sup>2</sup> )
Borlanmamış	1	80.4408	79.7406	0.7002	0.87	27.87
	2	79.7406	78.1060	1.6346	2.04	65.07
	3	78.1060	76.0442	2.0618	2,63	82.07
	4	76.0442	73.3388	2.7054	3.55	107.69
	5	73.3388	70.4487	2.8901	3.94	115.05
	6	70.4487	68.0451	2.4036	3.41	95.68
Borlanmış	1	85.4210	85.2889	0.1321	0.15	5.25
	2	85.2889	85.1397	0.1492	0.17	5.93
	3	85.1397	84.9706	0.1691	0.19	6.73
	4	84.9706	84.6720	0.2986	0.35	11.88
	5	84.6720	84.2357	0.4363	0.51	17.36
	6	84.2357	83.7942	0.4415	0.52	17.57

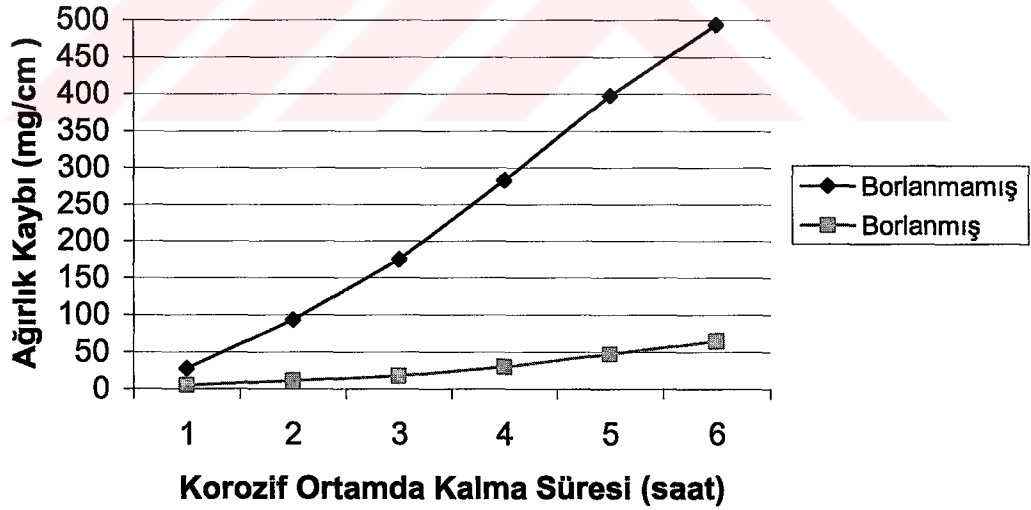
\* : P<sub>0</sub> İlk ağırlık

\*\* : P<sub>1</sub> Son ağırlık

\*\*\* : P<sub>0</sub> - P<sub>1</sub> Ağırlık farkı



Şekil 4.7. Borlanmış ve borlanmamış Ç 1040 çeliğinin % ağırlık kaybının korozif ortamda kalma süresi ile değişimi.

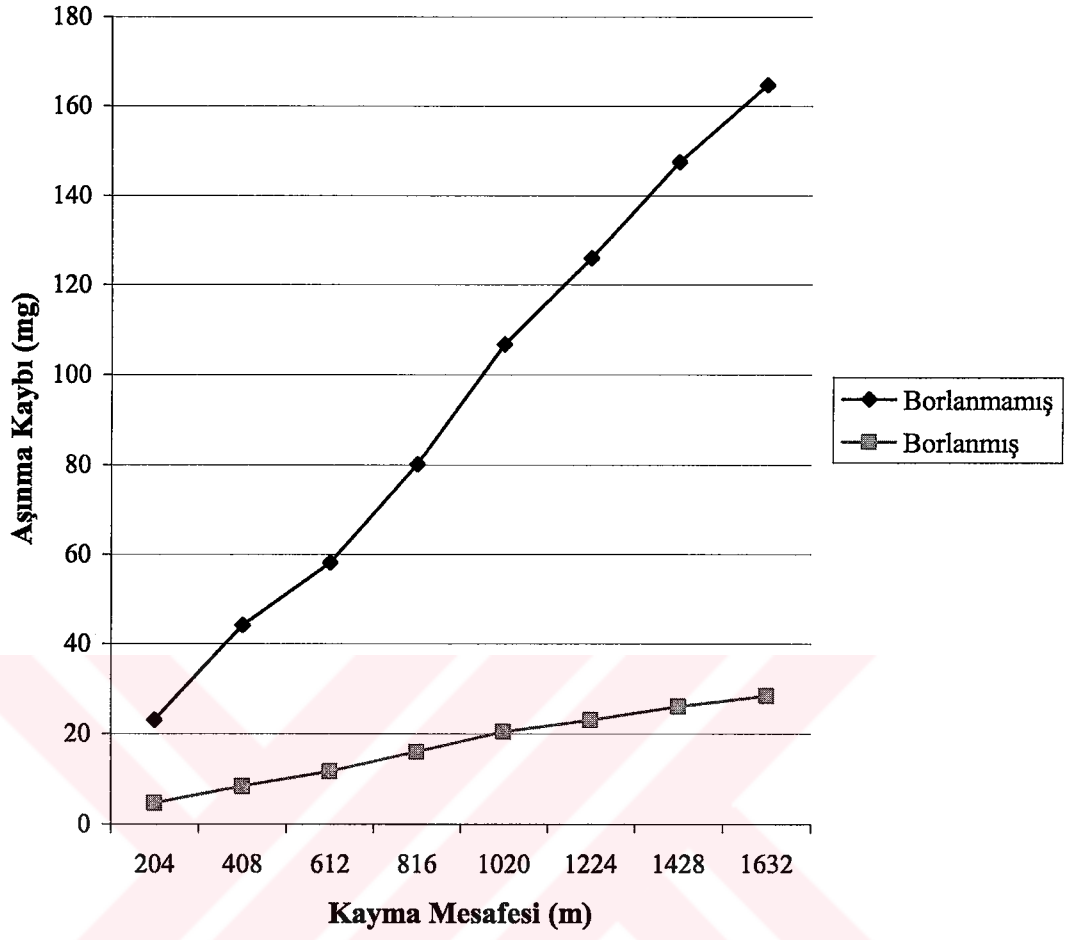


Şekil 4.8. Borlanmış ve borlanmamış Ç 1040 çeliğinin birim yüzeydeki ağırlık kaybının korozif ortamda kalma süresi ile değişimi.

Aşınma deneylerinde yine 1000°C sıcaklıkta 5 saat süreyle borlanmış numune ile borlanmamış numune kullanılmış olup aşınma deney sonuçları çizelge 4.3'te verilmiştir. Çizelgede borlanmış ve borlanmamış numunelerin 2'şer dakikalık peryotlarla 8 defa aşınmaya tabi tutulmaları sonucu meydana gelen ağırlık kayıpları verilmiştir. Her peryottaki kayma miktarı 204 m'dir.

Çizelge 4.3. Borlanmış ve borlanmamış numunelerin Pin-On-Disk aşınma deney cihazında ağırlık kaybı testi ile elde edilen aşınma değerleri.

<b>Malzeme Durumu</b>	<b>Aşınma Peryotları (2 dk)</b>	<b>İlk Ağırlık (gr)</b>	<b>Son Ağırlık (gr)</b>	<b>Ağırlık Kaybı (gr)</b>
Borlanmamış	1	62.0483	62.0253	0.0230
	2	62.0253	62.0042	0.0211
	3	62.0042	61.9902	0.0140
	4	61.9902	61.9682	0.0220
	5	61.9682	61.9416	0.0266
	6	61.9416	61.9224	0.0192
	7	61.9224	61.9008	0.0216
	8	61.9008	61.8836	0.0172
Borlanmış	1	64.2050	64.2003	0.0047
	2	64.2003	64.1966	0.0037
	3	64.1966	64.1933	0.0033
	4	64.1933	64.1890	0.0043
	5	64.1890	64.1846	0.0044
	6	64.1846	64.1820	0.0026
	7	64.1820	64.1790	0.0030
	8	64.1790	64.1767	0.0023



Şekil 4.9. Borlanmış ve borlanmamış Ç 1040 çeliğindeki aşınma kaybının kayma mesafesi ile değişimi.

## 5. GENEL SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmada, katı ortam borlaması işlemleri sonucu Ç1040 çeliğinde meydana gelen borlu tabaka kalınlığında, zamanın ve sürenin artışına bağlı olarak büyüme gözlenmiştir. Bu durum difüzyon kanunlarıyla doğrudan ilgilidir. Metalografik inceleme sonucunda SEM’de çekilen fotoğraflarda da bu rahatlıkla görülmektedir. Bor tabakasının kolonsal (parmaksı) bir yapı sergilediği tespit edilmiştir. Bunun oluşum mekanizması ise, bor atomlarının tane sınırlarına difüzyonu ile zorlaması ve malzeme merkezine doğru ilerlemesi şeklinde açıklanabilir.

Bu çalışmaların sonuçlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

1. Tespit edilen deneysel sonuçlar, literatürde belirtilen çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür.
2. 950°C’de ve 1000°C’de 3 saat ve 5 saat borlama süreyle ayrı ayrı yapılan borlama işleminde, Ç1040 numunelerinin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının dişli bir yapıya sahip olduğu, borlama süresinin artmasıyla tabaka kalınlığının arttığı tespit edilmiştir.
3. Borür tabakalarının sertliklerinin yüzeyden parmaksı uçlara doğru azaldığı, bundan dolayı da borür tabakasının en dış yüzeyinin FeB fazı, parmaksı bölgelerin ise Fe<sub>2</sub>B fazından oluştuğu söylenebilir.
4. Mekanik testler sonucunda sertlik değerinin matris sertlik değerinden oldukça fazla olduğu, borlama süresinin ve sıcaklığın artmasıyla da mikro sertlik değerinin arttığı belirlenmiştir (Çizelge 4.1).
5. Katı ortam borlamasında bor kaynağı olarak kullandığımız karışım (%80 Susuz Boraks + %20 Ferro Silisyum) sayesinde, ekabor tozu ile yapılan çalışmalarla yaklaşık aynı sonuçlara ulaşılmıştır.
6. Korozyon deneylerine tabi tutulan borlanmış numune, borlanmamış numuneye oranla yaklaşık 8 kat daha fazla korozyon dayanımı göstermiştir.
7. Aşınma deneylerine tabi tutulan borlanmış numunenin borlanmamış numuneye göre aşınma dayanımının 6 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



## 6. KAYNAKLAR

- Badini C., Gianoglio C., Paradelli G., 1987. The Effect Of Carbon, Chromium and Nickel on The Hardness of Borided Layers. *Surface and Coatings Tech.*, 30, 157-170.
- Badini C., Mazza D., 1988. The Texture of Borided Layers Grown of Fe-Ni and Fe-Cr Alloy. *J. Mater. Sci. Let.*, 7, 661-662.
- Baudis U., Fichte R., 1995. Boron and Boron Alloys. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Vol A4*, 281-293.
- Berzina I.G., Gusev E.B., Fedina G.N., Fedin V.M., 1984. Investigation of Boron Diffusion During Boronizing of Engineering Steel 45. *Phys. Met. Metall*, 57 (5), 81-84.
- Bindal C., 1991 Az Alaşımlı ve Karbon Çeliklerinde Borlama ile Yüzeye Kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tesbiti. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 165s, İstanbul.
- Blazon M., Stanojevic B., Veljkovic V., 1975. Effect of Alloying Elements on The Formation of Boride Layer on Steel. *Scripta Met.* 19(11), 1153-1156.
- Bozkurt N., 1984. Bor Yayınımıyla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 113s, İstanbul.
- Budinski K.G., 1993. The Wear of Diffusion Treated Surfaces. *Wear*, 162-164, 757-762.
- Carbucicchio M., Sambogna G., 1985. Influence of Chromium The Boride Coatings Produced on Iron Alloys. *Thin Solid Films*, 126, 299-305.
-

- Carbucicchio M., Palombarini G., Sanbogna G., 1984. Composition and Structure of Boride Layers Grown On Low Manganese Ternary Iron Alloys. *J. Mater. Sci.*, 19, 4035-4039.
- Çalık A., 2002. Türkiye'nin Bor Madenleri ve Özellikleri. *Mühendis ve Makine Dergisi*, Sayı 508, Ankara.
- Çalık A., Özsoy A., 2002. Termal Çevirimli Borlama İşleminin Ç1010 Çeliğine Etkileri. 11. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, İstanbul.
- Çınkır, M.M., 2001. Ulusal Maden Varlığımız ve Bor Gerçeği. Ankara Ticaret Odası Yayınları, 196s. Ankara.
- Demirci H., 1996. Fe-Esaslı Malzemelerin Borlanması ile Kavite Dayanımının Değişimi. 7. Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, 261-269, Ankara.
- Ediz N., Özdağ H., 2001. Bor Mineralleri ve Ekonomisi. D.P.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 133-149, Kütahya.
- Eyre T.S., 1975. Effect of Boronising on Friction and Wear of Ferrous Metals. *Wear*, 33, 383-397.
- Fichtl W., 1974. Über Neue Erkenntnisse auf dem Gebiete Oberflächen Borierens. *HTM*, 29(2), 113-119.
- Fichtl W., 1981. Boronizing and its Practical Applications. *Materials in Engineering*, 2, 276-286.
- Formanek B., Swadezba L., Macieljny A., 1993. Microstructure Wear Resistance and Erosion Resistance of Plasma-Sprayed Boride Coatings. *Surface and Coating Technology*, 56, 225-231.

- Geoeuriot P., Fillet R., Thevenot F., Driver J.H., Bruyas H., 1982. The Influence of Alloying Element Additions on The Boriding of Steels. Mater. Sci. and Eng., 55, 9-19.
- Geoeuriot P., Fillet R., Thevenot F., Driver J.H., Maging T., 1983. Methods for Examining Brittle Layers Obtained by a Boriding Surface Treatment (Borudif). Wear, 86, 1-10.
- Gianoglio C., Badini C., 1986. Distribution Equilibria of Iron Nickel in Two Phase Fields of the Fe-Ni-B System. J.Mater. Sci., 21, 4331-4334.
- Habig K.H., Chatterjee-Fisher R., 1981. Wear Behaviour of Boride Layers on Alloyed Steels. Tribology International, 209-215.
- Hallems B., Wollants P., Roos J.R., 1994. Thermodynamic Reassessment and Calculation of The Fe-B Phase Diagram. Z. Metalkd., 85, 676-682.
- Hansen M., 1958. Constitution Binary Alloys. Mc Graw-Hill Book Company Inc, 1306s.
- Hegewaldt F., Singheiser L., Türk M., 1984. Gasborieren. HTM, 39, 1, 7, 15.
- Hunger H., True G., 1994. Boronizing to Produce Wear-resistant Surface Layers. Heat Treatment of Metals, 2, 31-39.
- Karamış M. B., 1988. Abrasiv Aşınma Miktarının Hesap Yoluyla Tespitine Yeni Bir Yaklaşım. Ülkemiz Kalkınmasında Mühendisliğin Rolü Sempozyumu, 29-39, İstanbul.
- Karamış M. B., 1991. Tribological Behavior of Plasma Nitrided Material Under Dry Sliding Conditions. Wear, 147, 385-399.
-

- Khoe, S.M.M., 1992. Ergimiş Boraks Banyosunda Çeliklere Vanadyum Karbür Kaplama. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 112s, İstanbul.
- Kimya Müh.Odası, 2001. Bor Madenlerinin Mevcut Durumu Gelişmeler Görüş ve Öneriler. Kimya Mühendisliği Dergisi. Sayı:160/161, 4-11, Ankara.
- Kistler R.B., Helvacı C.,1994. Boron and Borates.Industrial Minerals and Rocks, 6.Edition, Society of Mining, Metallurgy and Exploration Inc.,171-186.
- Kocakuşak S., Yalaz N., Kalafatoğlu E., 1986. Bor Mineralleri ve İnorganik Bileşikleri. TÜBİTAK –MAE Kimya Araştırma Bölümü Yayını, No:185, 7-13.
- Lang E., 1986. Boronizing. Coating for High Temperature Applications, 417-422, U.S.A.
- Liliental W., Tacikowski J., 1980. Effect of Heat Treatment on the Brittleness of Boride Layers on Steel. Industrial Heating, 47(4), 34-36.
- Lu M.J., 1983. Die Bildungs Und Wachstums Kinetik Monophsiger Boridschichten. HTM, 38, 156-168.
- Mal K.K., Tarkan S.E., 1973. Diffused Boron ups Hardness, Wear Resistance of Metals. Metarials Engineering 77, 70-71.
- Mann B.S., 1997. Boronizing of Cast Martensitic Chromium Nickel Stainless and its Abrasion and Cavitation-Erosion Behaviour. Wear, 208, 125-131.
- Massalski Th. B., 1986. Binary Alloy Phase Diyagrams. ASM, Metals Park, Ohio.
- Matuschka A.G., 1980. Boronizing. Carl Hanser Verlag,100s, München.

- Nair F., 1996. Koruyucu Gaz Atmosferinde Macun Borlama Tekniği ile elik Yüzeylerinin Sertleştirilmesi. Erciyes Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, 65s, Kayseri.
- Nair F., Karamış M.B., Taşdemirci A., 2000. Endüstriyel Uygulamalarda Borlanmış eliklerin Aşınma Davranışının İncelenmesi. 8. Denizli Malzeme Sempozyumu, 334-343, Denizli.
- Özkan Ş.G., Çebi H., Delice S., Dođan M., 1997. Bor Minerallerinin Özellikleri ve Madenciliđi. 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 224-228, İzmir.
- Özmen Y., Çetincan A., 1992. Borlamanın eliklerde Aşınma Dayanımına Etkisi. 5. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, 583-591, Ankara.
- Özsoy A., 1991. Çeliğin Borlanmasında Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi. Anadolu Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 101s, Eskişehir.
- Palombarini G., Carbucicchio M., 1987. Growth of Boride Coatings on Iron. J. Mater. Sci. Let. 6, 415-416.
- Poslu K., Aslan İ.H., 1995. Dünya Bor Mineralleri ve Bileşikleri Üretiminde Türkiye'nin Yeri. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 33-42, İzmir.
- Rus J., Luis de Leal C., Tsipas D.N., 1985. Boronizing of 304 Steel. J. Materials Science Letters, 4, 558-560.
- Selçuk B., 1994. Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 eliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Erciyes Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri.

- Sivrioğlu İ., 1996. Bor Mineralleri ve Bor Bileşikleri Üretiminde Etibank'ın Çalışmaları ve İleriye Dönük Planları. Bor Bileşikleri Üretim Teknolojileri Araştırmaları Danışma Toplantısı, TÜBİTAK-MAM, 9s, Gebze.
- Smith R., 1995. Boric Oxide, Boric Acid and Borates. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Vol A4, 263-280.
- Soydan Y., 1996. Katı Ortamda Bor Yayınımı İle Sertleştirilen Çelik Yüzeylerinin Kuru Kayma Halinde Sürtünme ve Aşınma Davranışları. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 149s, İstanbul.
- Sönmez E., 1991. Kırka Tinkal Cevheri ve Konsantresinin Zenginleştirilme Olanaklarının Araştırılması. Dokuz Eylül Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 108s, İzmir.
- Subrahmanyam J., Gopinath K., 1984. Wear Studies on Boronized Milt Steel. Wear, 95, 293-311.
- Takeuchi E., Fujii K., Katagiri T., 1979. Sliding Wear Characteristics of Gas Boronized Steel. Wear, 55, 121-130.
- Taşçı A., 1993. Borlanmış Çeliklerin Aşınma ve Korozyon Dayanımları. İstanbul Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, 45s, İstanbul.
- Tayal M., Mukherjee K., 1994. Localized Boriding of Low-Carbon Steel Using a Nd: Yag Laser. Journal of Materials Science, 29, 5699-5702.
- Tolun R., 1996. Türkiye'de Bor Bileşikleri Üretim Teknolojilerinin Dünü, Bugünü ve Geleceđi. Bor Bileşikleri Üretim Teknolojileri Araştırmaları Danışma Toplantısı, TÜBİTAK-MAM, 16s, Gebze.

Tsipas D.N., Rus J., 1987. Boronizing of Alloys Steels. J.Materials Science Letters, 6, 118-120.

Türktekin M., 1998. H13 Sıcak İş Takım Çeliklerine Borlama ve Nitrürleme İşlemlerinin Birlikte Uygulanması. Erciyes Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, 79s, Kayseri.

Uetz H., Wlassow W., 1980. Kinetik und Mechanismen des Verschleisses von Boridschichten by Trockener Gleitreibung. Wear, 64, 231-243.



**ÖZGEÇMİŞ**

Adı Soyadı : Hasan Ali UZUN

Doğum Yeri : Seyitgazi/Eskişehir

Doğum Yılı : 28.04.1976

Medeni Hali : Evli

Eğitim ve Akademik Durumu :

Lise 1990-1993 Eskişehir Cumhuriyet Lisesi

Lisans 1994-1998 Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık  
Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil : İngilizce

İş Deneyimi :

1998-.... Eti Bor A.Ş. Emet Bor İşletme Müdürlüğü Makine İkmal  
Başmühendisliği (Makine Mühendisi)