

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE BORLAMA UYGULAMALARI


Erdem ALPARSLAN

Danışman: Prof. Dr. Abdullah ÖZSOY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI
ISPARTA-2011**

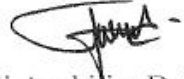
TEZ ONAYI

Erdem ALPARSLAN tarafından hazırlanan “**Tekstil Endüstrisinde Borlama Uygulamaları**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Süleyman Demirel Üniversitesi Makine Eğitimi Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Abdullah ÖZSOY 
Süleyman Demirel Üniversitesi Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri :

Yrd. Doç. Dr. Nihat YILMAZ 
Süleyman Demirel Üniversitesi Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Yrd. Doç. Dr. Fatih TAYLAN 
Süleyman Demirel Üniversitesi İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doç. Dr. Mehmet Cengiz KAYACAN

Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
2.1. Borlama İşlemi Üzerine Yapılan Araştırmalar	5
2.2. Borlama İşlemi Üzerine Ticari Anlamda Çalışan Firmalar.....	13
2.3. Bor.....	15
2.3.1. Bor'un tarihçesi.....	16
2.3.2. Bor elementi.....	17
2.3.3. Bor elementinin atomik yapısı, fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	18
2.3.4. Bor mineralleri	21
2.3.5. Ticari önemi olan bor mineralleri ve bulunduğu yerler	21
2.3.6. Bor ürünleri	26
2.3.7. Özel bor ürünleri.....	26
2.3.8. Bor Rezervleri.....	27
2.3.9. Türkiye'de bor madeni, yatakları, rezervleri ve ekonomisi.....	28
2.4. Borlama	29
2.4.1. Borlama işlemi	32
2.4.1.1. Borlama işleminin avantajları	33
2.4.1.2. Borlama işleminin dezavantajları.....	34
2.4.1.3. Borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcılar	35
2.4.1.4. Borlama işlemi uygulanabilen malzemeler	36
2.4.1.5. Borlama işlemine alaşım elementlerinin etkisi	39
2.4.2. Borlama yöntemleri.....	41
2.4.2.1. Kutu ortamda borlama yöntemi	42
2.4.2.2. Sıvı ortamda borlama yöntemi.....	45

2.4.2.3. Gaz ortamda borlama yöntemi.....	48
2.4.2.4. Macun (Pasta) ortamda borlama yöntemi.....	51
2.4.2.5. Plazma (İyon) ortamda borlama yöntemi	52
2.4.2.6. Akışkan yatak ortamında borlama yöntemi.....	54
2.4.2.7. Çok bileşenli ortamda borlama yöntemi.....	56
2.4.3. Borürlerin özellikleri	57
2.4.4. Borür tabakasının özellikleri.....	57
2.4.4.1. Borür tabakasının yapı ve bileşimi.....	58
2.4.4.2. Borür tabakasının oluşumu ve büyümesi.....	60
2.4.4.3. Borür tabakasından ana matrise geçiş bölgesi	62
2.4.4.4. Borür tabakası çeşitleri ve sınıflandırılması	63
2.4.5. Borür tabakasının tribolojik özellikleri	63
2.4.5.1. Borür tabakasının kalınlığı.....	63
2.4.5.2. Borür tabakasının sertliği.....	67
2.4.5.3. Borür tabakasının aşınma davranışı	68
2.4.5.4. Borür tabakasının korozyon davranışı.....	71
2.4.5.5. Borür tabakasının sürtünme davranışı.....	72
2.4.5.6. Borür tabakasının kalıntı gerilme davranışı.....	73
2.4.6. Borlama sonrası uygulanabilen işlemler	74
2.4.7. Borlama uygulamaları	76
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	77
3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler	79
3.2. Deneyde Kullanılan Malzemeleri Borlama İşlemi	83
3.3. Aşınma Uygulamaları	86
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	88
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	105
6. KAYNAKLAR.....	107
ÖZGEÇMİŞ.....	113

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE BORLAMA UYGULAMALARI

Erdem ALPARSLAN

**Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Eğitimi Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Abdullah ÖZSOY

Bu çalışmada, 900°C sıcaklıkta, 6 saat süreyle, Ekabor-II tozu kullanılarak, katı ortamda yapılan borlama işlemi yapılmıştır. Çelik bir malzeme üzerindeki aşınma direnci (gerçek çalışma şartlarında dokuma tezgahlarında denenerek) incelenmiş ve buna bağlı olarak malzemenin ömür analizi yapılmıştır. Bu çalışmanın önemli bir diğer amacı da, makine sanayinde borlama işleminin kullanım alanlarının belirlenmesi ve özellikle sanayimizin önemli bir ayağı olan tekstil sektöründe uygulayıp, sonuçlarının tespit edilmesidir.

Çalışmada, AISI 1050 ve AISI 1010 olmak üzere iki farklı tür çeliğe borlama işlemi uygulanmıştır. Borlanan numuneler aşınma deneyi için tekstil fabrikasında denenmiştir. Borlanan iş parçalarının Spektral, Mikroyapı, SEM, SEM-EDX, XRD, Mikro sertlik analizleri yapılmıştır.

Çalışma sonucunda borlama işlemi uygulanan iş parçalarının ömürlerinin, borlama işlemi uygulanmayan iş parçalarına göre önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Bu durumun endüstriye sağladığı yararlar tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Borlama, Endüstriyel Borlama Uygulamaları, AISI 1050-1010

2011, 123 Sayfa

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

BORONIZING APPLICATIONS ON TEXTILE INDUSTRY

Erdem ALPARSLAN

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Mechanical Education Department**

Supervisor: Prof. Dr. Abdullah ÖZSOY

In this study, boronizing process in solid medium is carried out by using Ekabor-II powder at 900°C for 6 hours. The abrasion resistance on a steel material (on real working conditions and by trying with weaving looms) is observed and therefore, the life span analysis of the material is performed. Another important object of this study is to identify the usage areas of boronizing process in machine industry and to implement it in the textile sector, an important pillar of our industry, and to determine the results.

In this study, boronizing process is carried out on two kinds of steel, as AISI 1050 and AISI 1010. The boronized samples are assayed in textile factories for abrasion test. Spectral, Microstructure, SEM, SEM-EDX, XRD, Microhardness analysis of the workpieces boronized are performed.

As a result of the study, it is observed that the life-spans of the workpieces boronized has increased substantially when compared to workpieces un-boronized. The benefits of this process on the industry are identified.

Key Words: Boronizing, Boronizing Applications On Industry, AISI 1050-1010

2011, 123 Pages

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans çalışmam süresince, tez konumun seçiminde, yönlendirilmesinde, yazım aşamasında bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim, yapıcı ve teşvik edici yaklaşımıyla çalışmalarımı yönlendiren, değerli katkılarını esirgemeyen, çalışmalarım da bana yardımcı olan, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım değerli danışman hocam Prof. Dr. Abdullah ÖZSOY'a, sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Yine çalışma süresince gerek moral olarak gerekse de deneysel çalışmalarda katkı sağlayan değerli hocalarıma desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

1980-YL-09 No'lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Deneysel çalışmamın saha ayağını oluşturan ve çalışmamda çok önemli katkısı olan Shamrock Tekstil San. ve Tic. A.Ş. firması çalışanlarına, çalışmam esnasında her türlü desteği sağladığı için Fabrika Müdürü Tekstil Mühendisi Mehmet AYDIN'a, Dokuma Departmanı Ustabaşı Muhammet ÖDEMİŞ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmam esnasında bilgi ve tecrübelerinden fazlasıyla yararlandığım TMMOB Makine Mühendisleri Odası Denizli Şubesinde Teknik Görevli olarak hizmet veren Makine Mühendisi Z. Göksel PARLAR'a sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmamın en önemli bölümlerinden birisi olan analiz aşamasında, katkılarını esirgemeyen Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı Uzmanlarından Adem ŞEN ve Ahmet NAZIM'a teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında büyük emeği olan ve her zaman yanımda olan arkadaşım Anıl Z. HARTAVI'ye, emeği geçen bütün arkadaşlarıma ve sevgili aileme en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Erdem ALPARSLAN
ISPARTA-2011

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Bor'un kaşifleri	16
Şekil 2.2. Bor minerali	17
Şekil 2.3. Bor elementinin atomik yapısı	18
Şekil 2.4. Bor elementinin kristal yapısı	18
Şekil 2.5. Bor elementinin kafes yapısı	18
Şekil 2.6. Elementel borun görünüşü	19
Şekil 2.7. Boraks'ın mineral şekli	22
Şekil 2.8. Kernit'in mineral şekli	22
Şekil 2.9. Üleksit'in mineral şekli	23
Şekil 2.10. Kolemanit'in mineral şekli	24
Şekil 2.11. Pandermit'in mineral şekli	24
Şekil 2.12. Hidroborasit'in mineral şekli	25
Şekil 2.13. Probertit'in mineral şekli	25
Şekil 2.14. Fe-B denge diyagramı	31
Şekil 2.15. Borür tabakasına alaşım elementlerinin etkisi	40
Şekil 2.16. Çeliklerin borlanması sonucunda, borür tabakası boyunca alaşım elementlerinin dağılımları şematik olarak	41
Şekil 2.17. Örnek borlama kabı şekli	44
Şekil 2.18. Numunenin borlama sıvısına daldırılması	46
Şekil 2.19. Gaz ortamda borlama ünitesi	48
Şekil 2.20. Plazma ortamda borlama ünitesi	53
Şekil 2.21. Akışkan yatakta borlama ünitesi	55
Şekil 2.22. Dış biçimli demirborür (Fe_2B) kristalleri	59
Şekil 2.23. Alaşımli ve alaşımsız çeliklere eşit şartlarda uygulanan borlama işleminin tabaka kalınlığına etkisi	67
Şekil 2.24. Çeşitli yayınma işlemleri uygulanmış EN1A çeliğinin aşınma davranışları	70
Şekil 2.25. AISI 1045 çeliğinin $56^{\circ}C$ 'de değişik asit ortamlarındaki korozyonu	72
Şekil 2.26. Borlamadan sonra yapılabilen ısıl işlem örnekleri	75
Şekil 3.1. Dokuma tezgahında kullanılan atkı makas takımı	77
Şekil 3.2. ARL 3480 DE SPECTROMETER Spektral analiz cihazı	79

Şekil 3.3. Mazak Super Turbo-X 48 Lazer kesim cihazı	80
Şekil 3.4. Lazer kesimi yapılan numuneler	81
Şekil 3.5. Lazer kesimle üretilen parçalar	81
Şekil 3.6. Lazer kesimi yapılan numuneler	82
Şekil 3.7. Taşlama ile istenilen kesme yüzeyi elde edilen numuneler.....	82
Şekil 3.8. Kılavuzlama işlemi ile civata yatakları açılan numuneler.....	82
Şekil 3.9. Borlama işleminde kullanılan Nüve marka kül fırını.....	83
Şekil 3.10. Karışım üzerine yerleştiril numuneler	84
Şekil 3.11. Karışımla tamamen doldurulan pota	84
Şekil 3.12. Şamotla sıvanan pota.....	85
Şekil 3.13. 900°C fırınlanan potalar.....	85
Şekil 3.14. Shamrock Tekstil Fabrikası dokuma departmanı.....	86
Şekil 3.15. Vamatex dokuma tezgahı	86
Şekil 3.16 R-Scale WTB 200 hassas terazi.....	87
Şekil 4.1. Borlanmış AISI 1050'ye ait gr olarak ağırlık kayıpları (alt bıçak).....	89
Şekil 4.2. Borlanmış AISI 1050'ye ait gr olarak ağırlık kayıpları (üst bıçak)	89
Şekil 4.3. Borlanmış AISI 1010'a ait gr olarak ağırlık kayıpları (alt bıçak).....	89
Şekil 4.4. Borlanmış AISI 1010'a ait gr olarak ağırlık kayıpları (üst bıçak)	89
Şekil 4.5. Philips XL 30S marka taramalı elektron mikroskobu.....	90
Şekil 4.6. AISI 1050'ye ait SEM görüntüsü (250 büyütme).....	90
Şekil 4.7. AISI 1050'ye ait SEM görüntüsü (500 büyütme).....	91
Şekil 4.8. AISI 1050'ye ait SEM görüntüsü (1000 büyütme).....	91
Şekil 4.9. AISI 1010'a ait SEM görüntüsü (250 büyütme).....	92
Şekil 4.10. AISI 1010'a ait SEM görüntüsü (500 büyütme).....	92
Şekil 4.11. AISI 1010'a ait SEM görüntüsü (800 büyütme).....	93
Şekil 4.12. Philips XL 30S marka taramalı elektron mikroskobu	93
Şekil 4.13. AISI 1050'ye ait SEM görüntüsü (500 büyütme).....	94
Şekil 4.14. AISI 1050'ye ait SEM-EDX çıktısı (1 numaralı bölge).....	94
Şekil 4.15. AISI 1050'ye ait SEM-EDX çıktısı (2 numaralı nokta).....	94
Şekil 4.16. AISI 1050'ye ait SEM-EDX çıktısı (3 numaralı bölge).....	95
Şekil 4.17. AISI 1010'a ait SEM görüntüsü (1000 büyütme).....	95
Şekil 4.18. AISI 1010'a ait SEM-EDX çıktısı (1 numaralı bölge).....	95

Şekil 4.19. AISI 1010'a ait SEM-EDX çıktısı (2 numaralı nokta).....	96
Şekil 4.20. AISI 1010'a ait SEM-EDX çıktısı (3 numaralı bölge).....	96
Şekil 4.21. Olympus GX-51 marka optik mikroskop	96
Şekil 4.22. AISI 1050'ye ait mikroyapı fotoğrafı (300 mikron)	97
Şekil 4.23. AISI 1050'ye ait mikroyapı fotoğrafı (200 mikron)	97
Şekil 4.24. AISI 1050'ye ait mikroyapı fotoğrafı (100 mikron)	98
Şekil 4.25. AISI 1050'ye ait mikroyapı fotoğrafı (50 mikron)	98
Şekil 4.26. AISI 1010'a ait mikroyapı fotoğrafı (300 mikron)	99
Şekil 4.27. AISI 1010'a ait mikroyapı fotoğrafı (200 mikron)	99
Şekil 4.28. AISI 1010'a ait mikroyapı fotoğrafı (100 mikron)	100
Şekil 4.29. AISI 1010'a ait mikroyapı fotoğrafı (50 mikron)	100
Şekil 4.30. Bruker D8 Advance marka XRD cihazı.....	101
Şekil 4.31. AISI 1050'ye ait X-ışınları difraksiyonu çıktısı	101
Şekil 4.32. AISI 1010'a ait X-ışınları difraksiyonu çıktısı	102
Şekil 4.33. Instron Wolpert Testor 2100 Series marka sertlik ölçüm cihazı.....	102
Şekil 4.34. AISI 1050'ye ait kaplama sertliği	103
Şekil 4.35. AISI 1050'ye ait yüzey sertliği	103
Şekil 4.36. AISI 1010'a ait kaplama sertliği	104
Şekil 4.37. AISI 1010'a ait yüzey sertliği	104

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. 2011 Dünya bor rezervleri	27
Çizelge 2.2. 2010 yılı türkiye mineral bazında rezerv miktarı.....	28
Çizelge 2.3. Önemli bor sağlayıcılara, borlayıcı maddelere ve borlama metotlarına toplu bakış	36
Çizelge 2.4. Çeşitli malzemelerin yüzey sertlik değerleri.....	67
Çizelge 2.5. 800-1000°C sıcaklıklarda, 2-6 saatte borlanan ve borsuz numunelerin aşınma esnasındaki sürtünme katsayıları	73
Çizelge 2.6. Borür tabakası ve Fe'e ait ısıl genleşme katsayıları.....	74
Çizelge 3.1. AISI 1050'ye ait Spektral analiz sonuçları ve Sertlik değeri.....	79
Çizelge 3.2. AISI 1010'a ait Spektral analiz sonuçları ve Sertlik değeri	80
Çizelge 3.3. Orijinal atkı makas takımına ait Spektral analiz sonuçları	80
Çizelge 4.1. Borlanmış AISI 1050 ve AISI 1010 takımlarının aşınma deney sonuçları.....	88

SİMGELER DİZİNİ

Al_2O_3	Alüminyum oksit
Bi_2O_3	Bizmut oksit
Br	Bromür
BBr_3	Bortribromür
BCl_3	Bortriklorit
BF_3	Boron trifluoride
B_2O_3	Bor oksit
B_4C	Bor karbür
$B(OH)_3$	Ortho borik asit
$B(OCH_3)_3$	Tri metil borat
Co	Kobalt
FeB	Demir borür
Fe_3C	Demir karbür
Fe-Cr	Ferro-krom
Fe-Mn	Ferro-mangan
Fe-Nb	Ferro-niobiyum
Fe-Si	Ferro-silisyum
Fe-V	Ferro-vanadyum
Ge	Germanyum
H	Hidrojen
HCl	Hidroklorik asit
Hf	Hafniyum
H_2SO_4	Sülfürik asit
H_3BO_3	Borik asit
HNO_3	Nitrik asit
KBF_4	Potasyum bor florürür
Li	Lityum
Mo	Molibden
Mn	Mangan
MnB	Mangan borür

Mg	Magnezyum
NaCl	Sodyum klorür
NaBF ₄	Sodyum floro borat
Na ₂ B ₄ O ₇	Susuz boraks
Na ₂ CO ₃	Sodyum karbonat
Na ₂ SO ₃	Sodyum sülfid
Nb	Niobiyum
NbB ₂	Niobiyum borür
NH ₃	Amonyak
NH ₄	Amonyum
PbO	Kurşun oksit
SiC	Silisyum karbür
Ta	Tantal
Te	Tellür
TiB ₂	Titanyum di borür
TiC	Titanyum karbür
TiO ₂	Titanyum di oksit
V	Vanadyum
W	Tungsten (Wolfram)
WB	Wolfram borür
WC	Wolfram karbür
Zr	Zirkonyum
α-Fe	α-demirde ferrit
γ-Fe	γ-demirde östenit
barn	10 ⁻²⁴ cm ²
HV	Vickers sertlik değeri (kg/mm ²)
T/M	Toz/Metal
AISI	American Iron and Steel Institute
DIN	Deutsche Industrie Norm
XRD	X-Ray Diffraction
SEM	Scanning Electron Microscopy

1. GİRİŞ

Yüzey işlemleri sektörü Türkiye’de hızla gelişmekte olan bir sektördür. Gerek teknolojik alt yapı açısından, gerek bilgi birikim açısından, gerekse çevreye duyarlılık açısından önemli gelişmeler kaydetmiştir. Fakat bu gelişmeler hala yeterli değildir. Ülkemizde yüzey işlemleri sektörü, borlama alanında yetersiz kalmaktadır. Sektörün gelişmesi ve çok geniş bir pazara sahip olabilmesi için, bilinçli tüketicilere hizmet satabilmeli bunun yanında da belirli bir kalite seviyesine ulaşılmış olması gerekmektedir.

Genel olarak bir malzemenin performansı, kütleli ve yüzeysel özelliğine bağlıdır. Malzemenin yüzey özelliğindeki herhangi bir değişim, malzeme fonksiyonlarını büyük ölçüde etkilemektedir. Son yıllarda malzeme yüzey özelliklerinin rolü, birçok çalışmanın konusunu oluşturmuştur. Yüzey enerjisi, yüzey gerilmesi, yüzeyin aktivitesi ve yüzeyle ilgili problemler bilimsel alanda büyük önem kazanmıştır. Metal ve alaşımlarının, kütleli ve yüzeysel özellikleri arasındaki ilişki uzun yıllardan beri araştırılmaktadır (Toprak, 2002).

Gelişen makine sanayindeki kullanılan ekipmanlar değişik tribolojik etkiler (aşınma, korozyon vb.) sonucunda kullanım ömürleri azalmaktadır. Bunun sonucu olarak sektörde büyük ekonomik kayıplar yaşanmaktadır. Kullanım ömürlerinin arttırılması malzeme yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi gibi belli yöntemler kullanılarak mümkün olabilmektedir. Yüzey kalitesini arttırma yöntemlerinden biriside borlama işlemidir.

Dünyada makine sanayindeki aşınma kayıplarının toplamı maddi olarak, üretimde ise zaman kaybı olarak büyük boyutlara ulaşmaktadır. Ancak aşınma, sürtünerek çalışan bütün sistemlerde görülür ve bir malzeme problemi olmayıp, pek çok değişkene bağlı bir sistem problemidir. Abrazyonun ve triboksidasyonun temel aşınma mekanizması olduğu durumlarda, borlanmış malzemeler en düşük aşınmayı sergilemektedir. Malzemeye, yüksek yüzey sertliği, düşük sürtünme katsayısı, yüksek korozyon direnci kazandırması ve işlem sonrası ana malzemeye ısı işlem uygulanabilmesi, borlama işleminin diğer yüzey sertleştirme işlemlerine olan üstünlükleri arasında yer almaktadır. Ayrıca, sertliğin ön plana çıktığı yerlerde alaşımsız çelikler borlanarak

alaşımli çeliklere alternatif olarak kullanılması ekonomik açıdan büyük bir avantaj sağlamaktadır (Karaman, 2003).

Dünya üzerinde, şu anda varlığı saptanabilmiş toplam 113 element mevcuttur, bunların 90 kadarı doğada bulunurken geri kalanlar laboratuvar ortamında üretilmiştir. Bu elementlerden biri olan bor, özellikleri ve kullanım alanları açısından günümüzün en stratejik elementtir. 21. yüzyılın petrolü olarak tanımlanan bor, teknolojideki hızlı gelişmeler sayesinde dünyada daha fazla tanınmakta ve kullanımı her geçen gün hızla artmaktadır. Bor bileşikleri, izolasyon ve yapı aletlerinde, cam ve seramikte, deterjanda, kompozit malzemelerle ve kozmetikten tekstile bir çok endüstri alanında kullanılmaktadır.

Ülkemiz dünya bor rezervinin yaklaşık %72'sine (864.500 ton) sahiptir. Ve mevcut rezervlerle (görünür, ekonomik rezerv) Türkiye'nin borlardan elde ettiği yıllık gelir, ortalama 647 milyon ABD dolarıdır (Anonim, 2011).

Türkiye'nin geniş bor rezervlerinin yanı sıra, üretim açısından da avantajları bulunmaktadır. Bor cevherlerimiz nispeten dar bir sahada büyük yataklar halinde konuşlanmıştır ve açık ocak yöntemleriyle üretim yapılabilir. Aynı zamanda, bor cevherlerimizin zenginleştirilmesi de nispeten kolaydır. 250'yi aşkın alanda kullanılan bor ürünleri, 21. yüzyılın en önemli hammadde ya da yan mamul maddeleri arasında bulunmaktadır. Özellikle, ileri teknoloji gerektiren üretimlerde borun kullanımı ve önemi gün geçtikçe artmaktadır (Acarkan, 2002).

Borlama işlemi uzun bir geçmişe sahiptir. Çeliklerde bor yayınıyla yüzey sertleştirme, ilk kez 1895 yılında Moissan tarafından yapılmıştır. 1970'li yıllardan itibaren borlama konusunda çalışmalar hızlanmıştır. Günümüzde borlama, teknolojik olarak oldukça gelişmiştir 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 (Delikanlı vd., 2003).

Bu çalışmanın amacı, 900°C sıcaklıkta, 6 saat süreyle, Ekabor-II tozu kullanılarak, katı ortamda yapılan borlama işleminin, çelik bir malzeme üzerindeki aşınma direncine olan etkisinin incelenmesi ve buna bağlı olarak malzemenin ömür analizinin yapılmasıdır.

Bu çalışmanın önemli bir diğer amacı da, makine sanayinde borlama işleminin kullanım alanlarının belirlenmesi ve özellikle sanayimizin önemli bir ayağı olan tekstil sektöründe uygulayıp, sonuçlarının tespit edilmesidir.

Amaç olarak bu iki konu ele alınmış ve geniş bir literatür çalışması yapılarak borlama işlemi ile ilgili sonuçlara ulaşılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda, borlama işlemi ile ilgili yapılan deneysel araştırmaların birçoğunun numune bazında ve laboratuvar koşullarında yapıldığı anlaşılmıştır. Fakat yapılan bu çalışmanın deneysel analizleri gerçek çalışma koşullarında yapılmıştır. Dolayısı ile deney malzemesi laboratuvar ortamındaki çalışmaya nazaran, gerçek çalışma koşullarında daha farklı zorlamalara, gerilmelere, sürtünmelere ve korozyon koşullarına maruz kalmıştır. Bu sayede deney malzemesi normal çalışma koşullarında çalışarak daha gerçekçi ve güvenilir tepkiler vermiştir.

Belirtilen amaçlar ışığında, makine endüstrisinde çok sık arızalanan parçalar tespit edilmiş, bu parçalara borlama işlemi uygulanmıştır. Bu bağlamda Türkiye sanayisinin aktif halde çalışan önemli sektörlerinden birisi olan tekstil sektöründe, sık arızalanan parçalar tespit edilmiştir. Overlook makinesine ait çağanoz, örgü lüperi, alt-üst bıçak takımı ve dokuma tezgahına ait atkı makas takımı, çok sık arızalanan bu parçalara örnek olarak verilebilir. Çalışmak üzere bu parçalardan birisi olan dokuma tezgahına ait atkı makas takımı seçilmiştir. Vamatex marka dokuma tezgahında çalışan bu parça diğer parçalara nazaran daha çok ve daha hızlı olarak çalışmaktadır. Dakikada 250 devir yapan bu parça, dokuma tezgahında atkı ipliğini kesmeye yarar. Yaklaşık olarak 720-1080 saatlik çalışma ömrüne sahiptir. Bu parça sürekli olarak sürtünmekte, dolayısıyla çabuk aşınarak arızaya sebep olmaktadır. Bu parçaya borlama işlemi uygulanarak sonuçları ortaya konulmuştur.

Borlama işlemi tekstil sektöründe yoğun bir şekilde kullanılan, dokuma tezgahına ait atkı makas takımına uygulanmıştır. Özellikle aşınma direnci net bir şekilde artmıştır.

Bunun yanında yorulma ve korozyon direnci de daha yüksektir. Buna bağlı olarak malzeme ömründe çok net bir şekilde artış gözlemlenmiştir. Bu sayede malzemelerin arızalanmasından kaynaklanan zaman kaybı ve maliyet artışı minimuma inmiştir.

Yapılan bu çalışma, üniversite-sanayi iş birliği çerçevesinde Süleyman Demirel Üniversitesi ve Denizli Organize Sanayi Bölgesinde aktif olarak faaliyet gösteren Shamrock Tekstil San. ve Tic. A.Ş. firması grup çalışanları ile birlikte yürütülmüştür.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Borlama işlemi dünyada yoğun ilgi gören bir konudur ve dünyada bu prosesle ilgilenen birçok firma bulunmaktadır. Dünya bor rezervinin yaklaşık %72'sine sahip olan ülkemizde, borlama işleminin bu kadar az kullanılması, borlama işleminin henüz yaygın olarak kullanılmaması ve tanınmamasından kaynaklanmaktadır. Akademik çevrelerce yapılan çalışmaların, sanayiyle bağlantılı olarak yapılmaması bu süreci daha da uzatmaktadır. Böyle büyük bir potansiyele sahip olan ülkemizin bu piyasada hak ettiği yeri alabilmesi için; bor ve bor ürünlerinin üretim yöntemlerinin geliştirilmesi, akademik çevrelerce borlama işlemi üzerinde çalışılarak proses veriminin arttırılmasına yönelik çalışmalar büyük önem taşımaktadır.

2.1. Borlama İşlemi Üzerine Yapılan Araştırmalar

Borlama ile yüzey sertleştirme konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Malzemenin sertliğini arttırmak, aşınma direncini arttırmak ve malzeme ömrünü uzatmak amacıyla değişik çalışmalar mevcuttur.

Özsoy (1991), çeliğin borlanması borür tabakası, geçiş zonu ve ana matriksin özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine yaptığı çalışmada; borlamayı, yüksek sıcaklıkta çelik malzeme yüzeyinde bor difüzyonuyla Fe_2B ve/veya FeB gibi bileşiklerin elde edilmesidir şeklinde ifade etmiştir. Nitrürasyon ve karbürizasyon gibi konvansiyonel yüzey sertleştirme işlemlerinde 600-1100 HV'lik bir yüzey sertliği, borla yüzey sertleştirmede (borlama işlemi) ise 1500-2000 HV'lik yaklaşık olarak iki katlık bir sertlik artışının yanında çok düşük sürtünme katsayıları elde edildiğini gözlemlemiştir. Oluşan borür tabakasının sertliğinin oluşan bu fazlara göre değiştiğini ve oluşan FeB fazı, Fe_2B fazından daha sert ve gevrek olduğunu bulmuştur. Borun oksijene karşı ilgisinin yüksek olduğunu gözlemlemiştir ve bütün borürler yüzeyde ince bir oksit filmi oluşturduğunu ifade etmiştir. Bu oksit filmi de sürtünme sırasında kaynak oluşumunu önleyip yağlayıcı bir görev yaptığını savunmuştur. Endüstriyel uygulamalarda, hem daha az gevrek olması ve hem de borlama sonrası ısıtma işlemlere izin vermesi bakımından Fe_2B 'den oluşan tek fazlı borür tabakalarının tercih edildiğinden bahsetmiştir.

Özsoy (2001), borlama ile ilgili yaptığı genel bir değerlendirmede; demir-çelik grubu malzemelerin akma ve kopma dayanımlarım %10-20, yorulma dayanımlarının %25 ve korozyonlu yorulma ömrünü %200 arttırmasına karşın, malzemelerin plastisite özelliklerinin kötü yönde etkilendiğini ve borlama ile volfram karbürün sertliğine eşdeğer bir sertliğin yanında, teflon malzemeninkine yakın sürtünme katsayılarının elde edilebileceğini ortaya koymuştur.

Çalık ve Özsoy (2002), termal çevirimli borlama işleminin Ç 1010 çeliğine etkileri üzerine yaptıkları çalışmada; ‘Borieren’, ‘Bonding’ veya ‘Boronizing’ adıyla anılan borlama işleminin, difüzyon mekanizmasıyla gerçekleştirilen metalik malzemenin yüzeyine borun yayındırıldığı termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemi olarak ifade etmişlerdir. Demirli, demirli olmayan ve sinterlenmiş karbür malzemelerin geniş bir bölümüne uygulanabildiğini gözlemlemişlerdir. Borla yüzey sertleştirmenin, esas olarak borun yüksek sıcaklıkta çeliğe yayınımlı olayı olduğunu demir ve demir dışı birçok alaşım ile sinterkarbür ve seramik malzemelere uygulanabildiğini gözlemlemişlerdir. 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 yüzey sertleştirme işlemi olduğunu ifade etmişlerdir.

Çalık vd., (2002), Ç 1040 çeliğinin borlanmasında oluşan borür tabakasının özelliklerinin incelenmesi üzerine yaptıkları çalışmada; birden fazla numune üzerinde zamanın ve sıcaklığa bağlı olarak Ç 1040 çeliğinin borlanmasında zamanın ve sürenin artmasıyla malzemelerin tabaka kalınlıklarında artış gözlemlemişlerdir. Bu durumun difüzyon kanunlarıyla doğrudan etkili olduğunu savunmuşlardır ve bunu metalografik inceleme sonucunda, SEM (taramalı elektron mikroskobu)’de çekilen fotoğraflarda da rahatlıkla gözlendiğini belirtmişlerdir. Bor tabakasının kolonsal (parmaksı) bir yapı sergilediği açıktır. Bunun oluşum mekanizması ise bor atomlarının tane sınırlarına difüzyonu ile zorlaması ve malzeme merkezine doğru ilerlemesi şeklinde açıklanabileceğini ifade etmişlerdir. Yapılan çalışmanın sonuçlarını karşılaştırmalı olarak yorumlamışlar ve grafiklerle bu sonuçları desteklemişlerdir.

Selçuk (1994), borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 çeliklerinin sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi üzerine yaptığı çalışmada; borun oksijene karşı ilgisi yüksek olduğundan borür tabakası üzerinde ince bir oksit filmi oluşturduğunu, bu tabakanın metal-metal temasını geciktirdiğini gözlemlemiştir. Bunun sonucu olarak da tabakanın katı yağlayıcı görevi yaparak sürtünme katsayısını düşürdüğünü ifade etmiştir. Yüzeyin kimyasal bileşim özelliklerinin ve sürtünen yüzeylerin kimyasal kararlılığının, eleman çifti arasındaki yüzey çekim kuvvetini azalttığını ve dolayısıyla aşınma dayanımını arttırdığını belirtmiştir. Borlu tabakaların soğuk kaynak eğiliminin düşük olduğunu, ayrıca aşınmayı önlemek için yağlanmasına gerek olmadığını bu durumun özellikle adhesiv aşınmayı önlemede büyük yarar sağlayacağı sonucuna ulaşmıştır.

Uzun (2002), borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları üzerine yaptığı çalışmada; borlama sonucu oldukça yüksek sertliğe sahip bir yüzey tabakası elde edildiğini, dolayısı ile yüzeyin sertliğinin ve akma direncinin artması sonucu sürtünen yüzeyler arasındaki temas yüzeyini azaltarak aşınma hızını düşürdüğü sonucuna varmıştır. Borlanmış çeliklerin, yüksek sertliklerinden dolayı, abrasiv aşınmaya karşı son derece dirençli olduğunu tespit etmiştir.

Yılmaz vd., (2008), borlama ve bilyalı dövmenin demir esaslı toz metal malzemelerde aşınma ve mikro yapı özelliklerine etkisini araştırmak üzere yaptıkları çalışmada; T/M yöntemiyle üretilmiş malzemeleri hem borlayarak hem de borlama ve bilyalı dövme işlemlerini gerçekleştirerek deneylerini yapmışlardır. Borlanmamış FeCu-Grafit kompozitinin aşınması incelendiğinde, 4800 m'lik bir aşınma mesafesinin sonunda 236 mg'lık bir ağırlık kaybı oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Borlanmış FeCu-Grafit kompozitinde ise bu kayıp yaklaşık 10 mg olmuştur. Borlanmış ve bilyalı dövülmüş FeCu-Grafit kompozitinde ise yüzeyler biraz bozulduğu için ağırlık kaybı yaklaşık 36 mg olarak tespit edilmiştir. Bu numunede ise aşınma dayanımı yaklaşık 7 kat artmıştır. Yani borlanmış numunede aşınma dayanımında yaklaşık 24 kat bir artış, borlanmış ve bilyalı dövülmüş numunede ise yaklaşık 7 kat bir artış olduğu kaydedilmiştir.

Yılmaz vd., (2007), borlamanın demir esaslı T/M malzemelerde yorulma davranışına etkisi üzerine yaptıkları çalışmada; T/M yöntemiyle borlanmış ve borlanmamış FeCu-Grafit kompozitinin yorulma özelliklerini belirlemişlerdir. Yorulma dayanımının, çekme dayanımına oranını yaklaşık olarak 0,310-0,438 değerleri arasında elde etmişlerdir. Borlanmış numunelerin yüzey kısımlarının sertliği çok arttığı için yorulma dayanımı, işlem uygulanmamış numunelere göre yaklaşık olarak %20 ila %40 arasında daha yüksek elde edilebildiğini ortaya koymuşlardır.

Çeğil (2002), AISI 8620 çeliğinin bor-vanadyumlanması ve yüzey özelliklerinin incelenmesi üzerine yaptığı tez çalışmasında; AISI 8620 çeliğinin yüzeyinde vanadyum borür tabakası oluşturarak özelliklerini incelemiştir. Borlama ve bor vanadyumlama işlemi sonrasında oluşan borür ve vanadyum borür tabakalarının yüzey morfolojileri ve faz analizlerini, optik mikroskop ve X-ışınları difraksiyon analizi yardımıyla yapmıştır. Çelik yüzeyinde bor-vanadyumlama işlemi ile üstün özelliklere sahip vanadyum borür tabakaları elde edildiğini ortaya koymuştur.

Çelikyürek vd., (2004), küresel grafitli dökme demirlerin borlanması üzerine yaptıkları çalışmada; kullanacağı bir grup numuneyi 900°C'de 2 ve 4 saat süreyle borlamış, diğer grubu da 950°C'de 2 ve 4 saat süreyle kutu borlama yöntemiyle borlama işlemine tabi tutmuşlardır. Mikroyapı fotoğraflarını çekerek her iki sıcaklık için de bor tabakasının dişimsi morfolojide oluştuğunu göstermişlerdir. Yaptıkları bor tabakası kalınlığı ölçümlerinde borlama sıcaklığı ve/veya süresinin artmasıyla tabaka kalınlığının arttığını gözlemlemişlerdir. Bor tabakasının sertliğini yüzeyden yaklaşık 15 µm mesafeden mikrosertlik cihazıyla ölçmüşler ve istenilen seviyede kalınlık ve sertlik değerleri elde etmişlerdir. Mikrosertlik ölçüm sonuçlarının borlama sıcaklığı ve/veya süresinin artmasıyla ulaşılabilen sertlik değerlerinin arttığını tablo ve şekillerle göstermişlerdir. Genel olarak borlama işlemlerine boraks kullanılmadığını vurgulayarak yaptıkları çalışmada direk olarak susuz boraksı kullanmışlardır. Boraksın doğrudan borlamada kullanımını diğer yöntemlerdeki özel malzeme kullanım gereksinimi olmamasından dolayı ekonomik açıdan çok daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir.

Şen ve Bindal (1999), AISI 5140 çeliğinin yüzeyinde oluşan borürlerin bazı özellikleri üzerine yaptıkları çalışmada, AISI 5140 çeliğini sıvı ortamda borlayarak çeliğin yüzeyinde oluşan tabaka özelliklerini incelemişlerdir. Çeliğin yüzeyinde oluşan borür tabakasının kalınlığı borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak arttığını aynı şekilde sıcaklığın ve sürenin artmasıyla birlikte yüzeyde oluşan FeB borürünün derinliğinin de artmakta olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu durum X-ışınlar difraksiyon analizlerinde de açıkça gözlenmektedir. 850°C ve 950°C’de, 2 ila 8 saat süreyle borlanan AISI 5140 çeliğinin borür tabaka kalınlığının borlama süresine bağlı olarak değişimini tablolarla göstermişlerdir. Metalografik incelemelerde, çeliklerin yüzeyinde oluşan borür tabakasının kolonsal bir yapı sergilediğini, XRD faz analizlerinde tabakanın Fe₂B, FeB ve CrB’den meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Oluşan borür tabakasının sertliği (1739 HV), işlem görmemiş çeliğine nazaran (253 HV) oldukça yüksektir. Yüzeydeki borür tabaka kalınlığının ve FeB borürünün oluşumunun, borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak arttığını ifade etmişlerdir.

Delikanlı vd., (2003), yüzeyleri borlama ile sertleştirilen Ç 1040 çeliğinin abrasiv aşınma ve korozyona karşı dayanımını inceleyen deneysel bir çalışma yapmışlar ve bu çalışmada; borür tabakalarının sertliklerinin yüzeyden parmaklı uçlara doğru azaldığı, bundan dolayı da borür tabakasının en dış yüzeyinin FeB fazı, parmaklı bölgelerin ise Fe₂B fazından oluştuğu gözlemlemişlerdir. Yapılan mekanik testler sonucunda sertlik değerinin matris sertlik değerinden oldukça fazla olduğunu, borlama süresinin ve sıcaklığın artmasıyla da mikro sertlik değerinin arttığı belirlemişlerdir. Katı ortam borlamasında bor kaynağı olarak kullandıkları karışım (%80 Susuz Boraks + %20 Ferro Silisyum) sayesinde, ekabor tozu ile yapılan çalışmalarla yaklaşık aynı sonuçlara ulaşmışlardır. Aşınma deneylerine tabi tutulan borlanmış numunenin borlanmamış numuneye göre aşınma dayanımının 6 kat daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Korozyon deneylerine tabi tutulan borlanmış numune ile borlanmamış numune arasında 8 kat daha fazla korozyon dayanımı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Tabur vd., (2009), borlanmış Hardox 400 çeliğinin abrasiv aşınma davranışları üzerine yaptığı çalışmada; Hardox 400 çeliğini, Ekabor-II tozu kullanarak katı ortamda borlamış ve pin on disk aşınma cihazında abrasiv aşınma direncini

göstermiştir. Bor tabaka kalınlığının borlama işlem süresi ve sıcaklığa bağlı olarak arttığını ve işlem süresi ile katman kalınlığı arasında parabolik bir ilişkinin olduğu sonucuna varmıştır. Aynı borlama sıcaklığında numunelerin aşınma direncinin artan borlama zamanı ile arttığını gözlemlemiştir. En fazla aşınma miktarının işlemsiz numunelerde olduğu, dolayısıyla borlama işleminin çeliğin aşınma dayanımlarında önemli ölçüde artışa sebep olduğunu tespit etmiştir.

Matuschka (1980)'ya göre, borlamayı, malzeme yüzeyini iyileştirme işlemlerinden birisi olarak tanımlamış, yüzey sertleştirmenin termo kimyasal bir işlem olup bor verici kaynağın yüksek sıcaklıkta malzeme yüzeyine difüzyonu olarak ifade etmiştir. Borlamayla ilgili olarak; bütün demir esaslı malzemelere, örneğin çelikler, takım çelikleri, ıslah çelikleri, yapı çelikleri, sementasyon çelikleri, çelik döküm, gri dökme demir ve sinterlenmiş demirlerin borlama için uygun malzemeler olduğunu belirtmiştir. Demir esaslı malzemelere ek olarak, başka element ve bileşikler de borlamanın mümkün olacağını savunmuştur. Borun genellikle demir esaslı malzemelerde alaşım veya yüzey sertleştirme amacı ile kullanıldığını gözlemlemiştir. İşlem; amorf bor, B_4C , $Na_2B_4O_7$, B_2H_6 gibi bor verici bileşikler; alkali metaller, amonyum borflorürler, aktifleyiciler ve SiC , Al_2O_3 vb. dolgu maddeleriyle hazırlanan borlayıcı ortamlarda; 800-1050°C sıcaklıklar arasında, 1-8 saatlik işlem sürelerinde istenilen malzeme üzerine uygulanabileceğini belirtmiştir. Ayrıca borlama ortamına diğer ilave maddelerle birlikte katı, sıvı, gaz ortamlarda borlama işleminin gerçekleştirilebildiğini belirtmiştir. Malzeme yüzeyinde sert, aşınmaya, oksitlenmeye ve özellikle de asitlere ve bazı metallerin ergiyik banyolarındaki korozyona karşı dirençli, iyi elektrik iletkenliğine sahip borür tabakası veya tabakaları elde edildiğini ortaya koymuştur. Borlama sonrası elde edilen tabaka özelliklerinin, kullanılan yöntem, ortamın bor potansiyeline, borlanacak malzemeye, işlem sıcaklığı ve süresi gibi borlama kinetiğini etkileyen işlem parametrelerine doğrudan bağlı olduğunu vurgulamıştır. Bu bağlamda özellikle tabaka kalınlığı sıcaklık ve süreyle paralellik göstermektedir. Artan sıcaklık ve süreyle tabaka kalınlıklarının arttığını gözlemlemiştir. Borlanmış yüzeylerin sürtünme katsayısının düşük, aşınma direncinin yüksek hale geldiğini saptamıştır. Borlanmış malzemenin yüksek sıcaklıklarda bile sertliğini ve tribolojik özelliklerini koruduğunu gözlemlemiştir.

Sinha (1991)'ya göre, borlama, demir ve demir dışı çok çeşitli sert malzemelere uygulanabilir bir termo-kimyasal yüzey sertleştirme işlemi olarak tanımlamıştır. Süreci bir bor verici kaynağı katı, sıvı veya gaz halinde, tercihen 1-12 saat arasında, 700-1000°C (1300-1830°F) aralığında malzemeyi ısıtarak yüzey işleme tekniği olarak ifade etmiştir. Borlama işlemi gerek toz metalürjisi ve gerekse diğer metotlarla üretilen bütün demir esaslı alaşımlara başarıyla uygulanabildiğini vurgulamıştır. Çok bileşenli borlama kullanımına yönelik güncel bir eğilim olduğunu tespit etmiştir. Bu çalışmada esas olarak termokimyasal borlama, avantaj, sınırlamalar ve uygulamalar için kullanılan çeşitli veriler sunar. Refrakter metaller (W, Ta, Mo, Zr, Hf, Nb), karbürler (özellikle Co ile bağlı WC) ve Ni esaslı alaşımlara başarı ile uygulanarak özel yapıda borlu tabakalar elde edilebildiğini ifade etmiştir. FeB fazı, Fe₂B fazının üzerinde oluşmakta ve Fe₂B fazından daha fazla bor içermektedir. Bor tabakasının kalınlığının da borlama sıcaklık ve süresine bağlı olarak artış gösterdiğini savunmuştur.

Bejar et al., (2006)'a göre, değişik özelliklerde çeliklerin (1020, 1045, 4140, 4340) borlama kabiliyetleri incelenmiştir. Borlamayı, kuru boraks ve SiC karışımı içinde 1223°K, 1273°K ve 1323°K sıcaklıklarında, sırasıyla 2, 4 ve 8 saat sürelerle gerçekleştirmişlerdir. Her çelik için Fe₂B fazlarını tabaka yüzeyinde elde etmiştir. Aşınma testlerini, kuvars kumu ve tekerlek ve 130 N gibi bir kuvvet ile lastik tekerlekli cihazlar kullanarak yapmış ve 1020 çeliğinin daha fazla aşınma direnci sergilendiğini gözlemlemiştir. Deney sonucunda borlama sıcaklığı ve süresi çok artarsa borlama kabiliyetinin azaldığını ortaya koymuştur. Borlamanın metallerin yüzey sertliğini ve aşınma dayanımını ciddi şekilde artırmak için etkili bir yöntem olduğu göstermiştir. Ayrıca işlemin katı, sıvı, gaz, plazma ve iyon implantasyonlu ortamlarından herhangi biri kullanılarak yapılabileceğini belirtmiştir.

Venkataraman et al., (1995)'a göre, bor kaplanan çeliklerin düşük kayma hızlarında mükemmel aşınma direnci sergilediği bilinmektedir. Ancak, yüksek kayma hızında bor kaplamaların kayma aşınma davranışı bilinmemektedir. Yaptığı çalışmada, orta karbonlu bir çeliğin aşınma ve sürtünme davranışlarını, sürgülü yüksek hızlı bir sürtünme dinamometre kullanarak karakterize etmiştir. Borlanmış ve borlanmamış örnekleri disk karşısında test etmiştir. Kayma testlerini 2 MPa yük altında, hızı en

fazla 8 m/s olacak şekilde yapmıştır. Yaptığı testlerin sonucunda çeliklerde aşınma oranının borlama sonucunda azaltılabileceğini belirtmiştir.

Mu and Shen (2010) CoCrMo alaşımlı çeliği 850, 900 ve 950°C'de 8 saat süreyle ticari LSB tozları kullanarak katı ortamda borlama işlemi yapmışlardır. Çalışmada, oksidasyon testleri sonrasında borlanan çeliğin elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışınları kırınımı (XRD) tarama kullanılarak oksidasyon direncini karakterize etmişlerdir. XRD sonucunda 950°C'de 8 saat borlanan numunede Co₂B ve CrB fazlarının oluştuğunu göstermişlerdir. Borlama sıcaklığına bağlı olarak, bor tabakasının kalınlığı 2-11 µm arasında değişmektedir. Borür tabakasının oksidasyon davranışını havada, toplam 50 saat maruz bırakarak incelemişlerdir. Test sonuçlarında borlanmış CoCrMo alaşımlı çeliğin borlanmamış numuneye göre üstün oksidasyon direncine sahip olduğunu göstermişlerdir.

Oliveira et al., (2009) AISI D2 takım çeliği üzerinde borlama işlemi uygulamışlar ve borür tabakalarının karakterizasyonu hakkında fikir sahibi olmuşlardır. Çalışmada yaygın olarak kullanılan soğuk-ış takım çeliği olan AISI D2 çeliğini 800 ve 1000°C'de, 4 saat süreyle demir-titanyum ve alüminyum içeren boraks banyosu kullanılarak borlama işlemini gerçekleştirmişlerdir. XRD sonuçlarına göre Fe₂B ve FeB katmanlarının banyo karışımına göre değiştiğini, 60-120 µm arasında değiştiğini, sertliğinin ise 1596-1744 HV arsında elde edildiğini bunun yanında tabakalar arası ara yüzeyin testere dişi morfolojisine sahip olduğunu göstermişlerdir.

Andrew and Linial (1974)'e göre, darbesiz aşınmanın söz konusu olduğu uygulamalarda, borlama ile yüzeyi sertleştirilmiş malzemeler başarı ile kullanıldığı belirtilmektedir (Ayter, 2005).

TÜBİTAK destekli yapılan araştırma projelerinde de yukarıda yapılan araştırmalarla paralel sonuçlar elde edilmiştir. Bu projelerden bazıları; Yüksel vd., (1996), X210Cr12 (1.2080 çeliği) soğuk iş takım çeliğinin tuz banyosunda borlanması üzerine; Eroğlu vd., (Temmuz 2007), Bor yüzey kaplama örtülü elektrot imali üzerine; Çalık vd., (Eylül 2007), Boraks banyosunda borlama ve karbürleme işleminin araştırılması üzerine çalışmalar yapmışlardır. Yapılmış olan bu projelerde de borlama işlemine ilişkin olarak malzemelerin karakteristik özellikleri olarak,

yüzeylerinde yüksek sertlik değerleri, düşük sürtünme katsayıları, yüksek aşınma dirençleri, yüksek sıcaklıklarda bile sertliğini ve tribolojik özelliklerini koruduklarını gözlemlemişlerdir.

Yukarıda belirtilen kaynakların haricinde hemen hemen benzer sonuçların elde edildiği ulusal ve uluslararası daha birçok çalışma mevcuttur. Yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu akademisyenler tarafından gerçekleştirilmiştir.

2.2. Borlama İşlemi Üzerine Ticari Anlamda Çalışan Firmalar

Borlama işleminin dünyadaki ve Türkiye'deki yeri araştırılmıştır. Ülkemizde ısıtma işlemi, yüzey iyileştirmesi yapan birçok firma bulunmasına rağmen borlama ile yüzey sertleştirme yapan çok az firma vardır. Ülkemizde borlama yapan ve borlama ile üretilen ürünleri kullanan firmalar tespit edilmiştir.

Ülkemizde borlama işlemini ticari anlamda gerçekleştiren birkaç firma mevcuttur. Manisa'nın Salihli ilçesinde faaliyet gösteren Vezneli A.Ş. sanayi ve üniversite için çeşitli malzemeleri istenilen şekilde borlamaktadır. Örneğin mastörler, muldefonlar, makas bıçakları, karıştırıcı kürekleri, çimento sektöründen bazı malzemeleri, çamur pompa gömlekleri, hadde ve pres kalıbı gibi değişik malzemeleri aktif bir şekilde borlamaktadır. Bir diğer borlama işlemi gerçekleştiren firma ise Mersin ilinde faaliyet gösteren Karizma Makine olup ileri teknoloji ürünlerini borlayıp sanayinin hizmetine sunmaktadır. Ulaşılan bu firmalar dışında ülkemizde borlama işlemi yapan firma bulunmamaktadır.

Ülkemiz sanayisinde borlama işleminin yoğun olarak kullanıldığı firmalar, Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş., Maden Teknik Arama Müdürlüğü ve Batı Çimento Fabrikası firmaları örnek olarak gösterilebilir.

Bortec Şirketi, borlama işlemi konusunda Almanya Hürth'de ısıtma işlemleri konusunda faaliyet gösteren tecrübeli bir şirkettir. Daha önce faaliyet gösteren, fakat kapanan Elektroschmelzwerk şirketinin ürettiği Ekabor borlama malzemelerinin üretim lisansını satın alarak, Ekabor borlama malzemelerini üretmektedir. Bu malzemeler Ekabor-I, Ekabor-II, Ekabor-III, Ekabor-HM, Ekabor Pasta, Ekrit ve Ekabor-WB'dir.

Bu malzemelerle hem borlama uygulamaları yapmakta hem de ticari olarak satmaktadır (Karaman, 2003).

VHP Şirketi, borlama işlemi konusunda Almanya Quickborn'da faaliyet gösteren ısıtma işlemleri konusunda tecrübeli bir şirkettir. Aşınma sorunları için kendi üretmiş oldukları Tigranit serisi borlama malzemeleri ile borlama işlemleri yapmaktadırlar. Şirket, Tigranit-P, Tigranit-T ve Tigranit-Z isimli üç değişik borlama maddesi üretmektedir. Bu malzemelerle hem ticari borlama uygulamaları yapmakta hem de satmaktadır (Karaman, 2003).

Durferrit Şirketi, borlama konusunda Almanya Hanau'da kurulu olan, ısıtma işlemleri konusunda tecrübeli bir şirkettir. Isıtma İşlemlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılan özel fırınlar da imal etmektedir. Borlama malzeme ihtiyacını, daha önceleri Bortec firmasının lisansında olan Ekabor malzemeleri ile karşılarken, günümüzde kendi patenti altında ürettiği Durborid-1, Durborid-2, Durborid-3 ve Durborid Pasta olmak üzere dört değişik borlama malzemesini kullanmaktadır. Ayrıca bu malzemeleri ticari olarak da satmaktadır (Karaman, 2003).

Blom Şirketi, Almanya Horn-Bad Meinberg'de kurulu bir ısıtma işlemi şirkettir. Elektroschmelzwerk şirketi kapandıktan sonra ortaya çıkan bir şirkettir (diğeri Bortec şirkettir). Durferrit firmasının imal ettiği Durbordid borlama malzemelerini kullanmaktadır. Şirket, Elektroschmelzwerk şirketi kapanmadan önceki tecrübelerinden yararlanarak kendi borlama malzemelerini imal etme aşamasındadır (Karaman, 2003).

HTK-Hamburg Şirketi, Almanya Hamburg'da kurulu olan bir ısıtma işlemi şirkettir. Şirket, VHP şirketinin imal ettiği Tigranit borlama malzemelerini kullanarak borlama işlemi yapmaktadır (Karaman, 2003).

Bodycote firması, merkezi Almanya olan, Avrupa'nın birçok ülkesinde tesisleri bulunan bir ısıtma işlemi şirkettir. Ostec şirketi, Almanya Meissen'de kurulu olan bir ısıtma işlemi şirkettir. Her iki firmanın da kendi imal borlama malzemeleri olmadığı için, borlama malzemesi üreten firmaların ürünlerini kullanarak, borlama işlemi yapmaktadırlar (Karaman, 2003).

Amerika'da faaliyet gösteren, Rio Tinto Borax (RT Borax) Türkiye'den sonra dünyaya en çok bor üreten şirkettir. Yine Amerika'da faaliyet gösteren Owens-Corning Fiberglass, Johns-Manville, Certain Teed, PPG Industries bu firmalar cam elyafı üretiminde ergimiş cama bor oksit ekleyerek bor ve ürünlerini aktif bir şekilde kullanmaktadırlar (Anonim, 2001).

2.3. Bor

Trompetter et al., (1999)'a göre, bor element olarak 150'den fazla mineralin bileşiminde yer alır. Yeryüzünde toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunur. Borat yataklarının, yer hareketlerinin sıkça görüldüğü gezegenimizi bir kabuk gibi saran levhaların, birbiriyle oluşturdıkları sınırlar boyunca yer aldıkları ve günümüzden yaklaşık 24-25 milyon yıl önce (neojen dönem) oluştukları saptanmıştır. Volkanik etkinliklerle eşzamanlı oluşan sıcak su kaynakları ve hidrotermal çözeltiler, bor elementinin oluşması için en uygun ortamlardır. Borat oluşumlarına gölgesel ortamlar dışında, deniz ortamında oluşan tuz yatakları içinde de rastlanmaktadır. Ancak bu tür ortamlarda meydana gelen boratlar çoğunlukla ekonomik değere sahip değildir. Bor mineralleri bundan başka, yeraltındaki mağmanın yeryüzüne yükselirken kristalleşmesi sonucu oluşur. Mağmanın yeraltından yükselirken sokulum yapması ve yüzeye yaklaşıırken soğuması sırasında çevredeki farklı kayaçların yüksek ısı ve basınçtan etkilenmesi de bor elementini oluşturur (Öner, 2007).

Devlet Planlama Teşkilatı (2001)'na göre, bor, doğada tüm canlıların yaşantısını devam ettirmesi için vazgeçilmez elementlerden birisidir. Bunun yanında; bor dünyada en yaygın kullanım alanına sahip olan elementlerin başında gelmektedir. Sanayinin en önemli temel taşlarından birisi olan bor ürünleri; katma değerinin çok yüksek olması nedeniyle; dünyada belli başlı firmaların elindedir. Büyük rezervleri ve yüksek kalitede cevher avantajı ile Türkiye bu pazarda çok önemli bir paya sahiptir (Özmen, 2007).

2.3.1. Bor'un Tarihçesi

Saf olmayan bor ilk defa, aynı zamanda ve birbirlerinden habersiz olarak Humry Davy tarafından İngiltere’de ve J. Gay-Lussac ile L. J. Thenard tarafından Fransa’da 1808 yılında elde edilmiştir. Davy 1807’de koyu renkli yanıcı maddeyi, suyla nemlendirilmiş borik asidin elektriklelenmesinde negatif yüzeyde elde etmişti ve 30 Haziran 1808’de yeni ayrıştırılmış alkali metal potasyumla borik asidin altın bir tüpte ısıtılarak boru elde ettiğini rapor etmiştir. Benzer bir deneme Fransız Akademisinde 21 Haziran 1808’de Gay-Lussac ve Thenard tarafından rapor edilmiş ve onlar bu maddenin ‘bor’ olarak adlandırılmasını teklif etmişlerdir. 1812 yılında Davy, bu ürünün reaktif tabiatı bakımından diğer metallere nazaran ‘karbon’a daha çok benzediğini görerek bu elementin ‘boron’ olarak adlandırılmasını teklif etmiştir Şekil 2.1.’de borun kaşifleri soldan sağa doğru verilmiştir (Çarboğa, 2010).



Şekil 2.1. Bor'un kaşifleri -solda sağa doğru-: Josph Gay-Lussac, Louis Jacques Thénard ve Sir Humphrey Davy (Ayter, 2005)

Türkiye’de ilk işletmenin, 1861 yılında çıkartılan “Maadin Nizannamesi” uyarınca 1865 yılında bir Fransız şirketine İşletme İmtiyazı verilmesiyle, başladığı bilinmektedir. 1951 yılında Bigadiç ve 1952 yılında Mustafa Kemal Paşa yöresindeki kolemanit yatakları bulunmuştur. 1958 yılında Kütahya Emet Kolemanit, 1960 yılında Eskişehir Kırka Boraks yataklarının bulunması ve işletilmeye başlatılmasıyla Türkiye, dünya bor üretimi içinde 1955 yıllarında %3 olan payını, 1962’de %15, 1977’de %39 düzeyine yükselmiş ve giderek artan üretimi nedeniyle de günümüzde ABD’nin en önemli rakibi haline gelmiştir (Kalafatoğlu vd., 2003).

2.3.2. Bor Elementi

Bor, kelime kökeni olarak Arapça “buraq/baurach” ve Farsça’da “burah” kelimelerinden gelen bir elementtir. Kimyasal sembolü [B] olup, periyodik cetvelin III A grubunun metal olmayan tek elementidir. Borun atom numarası 5, atom ağırlığı 10.81, yoğunluğu 2,3 g/cm³, elektron yapısı 1s²2s²2p¹ olup, ilk üç iyonlaşma enerjisi 800,6, 2427,1 ve 3659,7 kJ/mol’dir. Ergime noktası 2100 ile 2300°C arasında, kaynama noktası 3927°C civarında, sertliği (mikrosertlik) 4900 HV olup periyodik cetvelin üçüncü grubunun başında yer almaktadır. Doğada bulunan bor, kütle numaraları 10B (%19,8) ve 11B (%80,2) olan iki kararlı izotopun karışımından oluşmaktadır. Şekil 2.2.’de bor mialinin yapısı görülmektedir (Anonim, 2005; Öner, 2007).



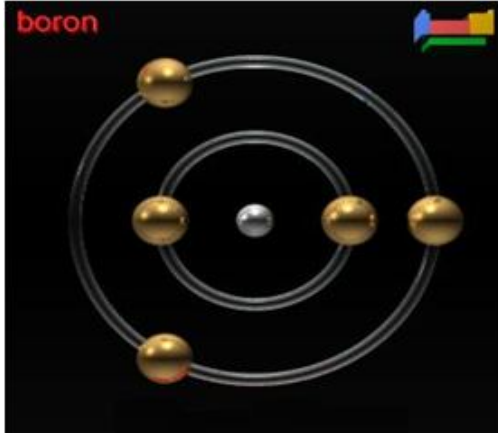
Şekil 2.2. Bor minerali (Boram, 2011)

Yeryüzünün 51. yaygın elementi olan bor, yeryüzünde toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan bir elementtir. Bor elementinin amorf bir toz halindeki rengi koyu kahverengidir. Ancak çok gevrek ve sert yapıları monoklinik kristal halinin rengi ise sarımsı-kahverengidir. Kristal bor, önemli ölçüde hafifliğe, sertliğe, çizilmeye karşı mukavemete, ısıya karşı kararlılığa sahiptir. Bor, kırmızı ötesi ışığın bazı dalga boylarına karşı saydamdır ve oda sıcaklığında zayıf elektrik iletkenliğe sahiptir. Yüksek sıcaklıkta iyi bir iletkenidir. Kristal bor, kimyasal olarak inerttir. Bor hidroklorik ve hidroflorik asitlerle kaynatıldığında bozulmaz. Sadece çok ince öğütülmüş bor, konsantre nitrat asidi ile yavaş oksitlenir (Ediz vd., 1999; Uzun, 2002; Karaman, 2003).

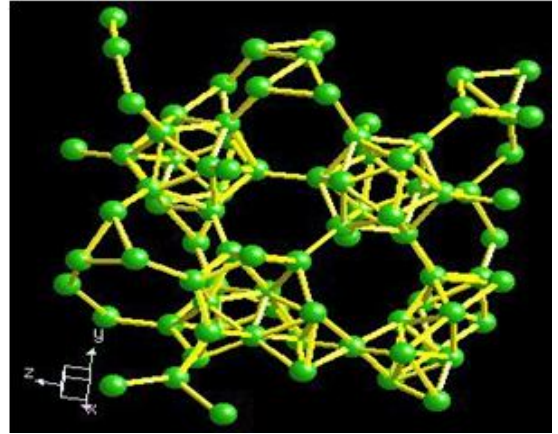
2.3.3. Bor Elementinin Atomik Yapısı, Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Atomik yapısı: Goeuriot (1982)'e göre, bor elementi %19,57 oranında B^{10} ve %80,43 oranında B^{11} izotoplarından meydana gelmektedir. Borun büyük bir nötron absorpsiyon kesiti vardır. Bu değer B^{10} izotopu için 40,10 barn, B^{11} izotopu için ise 0,75 barn'dır. B^{10} izotopu nükleer reaktörlerin kontrolü ve nükleer radyasyondan korunma nedeni ile büyük önem taşımaktadır (Çarboğa, 2010).

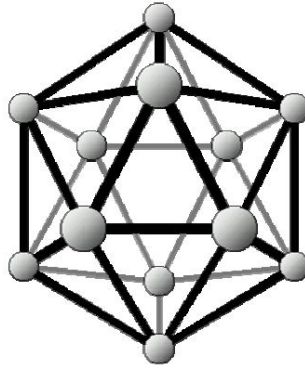
Bor atomu küçük olduğundan B^{3+} iyonu suya konduğunda, suyun elektronlarını kendisine doğru kuvvetle çekerek OH^- bağlarının kopmasına, dolayısıyla H^+ iyonunun serbest kalmasına sebep olur. Yani $B(OH)_3$ ve B_2O_3 bileşikler asidiktirler. Şekil 2.3.'de bor elementinin atomik yapısı ve Şekil 2.4.'de kristal yapısı, Şekil 2.5.'de kafes yapısı görülmektedir (Demir, 2006).



Şekil 2.3. Bor elementinin atomik yapısı (Demir, 2006)



Şekil 2.4. Bor elementinin kristal yapısı (Demir, 2006)



Şekil 2.5. Bor elementinin kafes yapısı (Ayter, 2005)

Fiziksel özellikleri: Bor madeni ilk bakışta beyaz bir kaya şeklinde olup, çok sert ve ısıya dayanıklı, doğada serbest bir element olarak değil, tuz bileşikleri şeklinde bulunmaktadır. Yer kabuğunda toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan kristal ya da amorf yapıdaki bor miktarı ortalama 10 ppm mertebesindedir. Canlıların bu elementin varlığında evrim geçirdiği ifade edilmektedir. Doğada yaklaşık 230 çeşit bor minerali olduğu bilinmektedir (Kılıç, 2004; Çarboğa, 2010).

Katı halde bor çok sert olup kırılmandır. Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi, donuk bir metalik parlaklığa sahiptir (Demir, 2006).



Şekil 2.6. Elementel borun görünüşü (Ayter, 2005)

2100 ile 2200°C arasında eriyen ve bu erimiş kütle soğutulduğunda çok sert ve kırılğan bir ürünün elde edilen bir elementtir. Oda sıcaklığında zayıf bir iletken olmasına rağmen sıcaklık artırıldığında iletkenliği de çok artar. Borun bu özelliği metallerin tam aksinedir. Sıvı bor 2550°C'de kaynar. Bor havada ısıtılırsa, yeşil alevle yanarak bor oksit meydana gelir (Görgülü ve Arslan, 2003).

Bor yanıcıdır, fakat tutuşma sıcaklığı yüksektir. Buna ilaveten yanma sonucunda kolaylıkla aktarılabilecek katı ürün vermesi ve çevreyi kirletecek emisyon açığa çıkarmaması gibi bir özelliğe sahip olduğundan dolayı katı yakıt hücresi olarak kullanılmaktadır. Bor bir yarı iletken olup sıcaklık arttıkça iletkenliği artar. Sıcaklık yükseldikçe kristal örgüsünün titreşiminin artmasından dolayı direnç artsa da serbest hale geçen elektron sayısı arttığından maddenin iletkenliği artar (Kılıç, 2004; Demir, 2006).

Kimyasal özellikleri: Bor elementinin kimyasal özellikleri morfolojisine ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Mikron ebadındaki amorf bor kolaylıkla ve bazen şiddetli olarak reaksiyona girerken, kristalin bor kolay reaksiyona girmez. Bor, yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyona girerek, borik asit ve diğer ürünleri oluşturur. Mineral asitleri ile reaksiyonu, konsantrasyona ve sıcaklığa bağlı olarak yavaş veya patlama şeklinde olabilir ve ana ürün olarak borik asit oluşur (Baykal, 2003).

Kristal haldeki bor kimyasal olarak inert olup kaynamakta olan Hf ve HCl'ye karşı dirençlidir. Sadece ince bir şekilde öğütüldüğünde, sıcak derişik nitrik asit tarafından yavaş bir şekilde etkilenir (Demir, 2006).

Kimyasal olarak ametal olan kristal bor, normal sıcaklıklarda su, hava ve hidroklorik/hidroflorik asitler ile soy davranışlar göstermekte, sadece yüksek konsantrasyonlu nitrik asit ile sıcak ortamda borik asite dönüşebilmektedir (Baykal, 2003).

Bununla birlikte bazlı ortamda bir yükseltgen ile ısıtıldığında borat vermek üzere kimyasal dönüşüme uğrar. Genellikle doğada tek başına değil, başka elementlerle bileşikler halinde bulunur. Borun kimyasal aktifliği saflığına, kristal yapısına ve sıcaklığa bağlıdır. Oda sıcaklığında sadece flor gazıyla reaksiyon verir ve yüzeysel olarak da oksijen tarafından etkilenir. Yüksek sıcaklıklarda asal gazlar ve H, Ge, Te hariç bütün ametallerle doğrudan reaksiyon verir. Bor alt gurubundaki metaller hariç, yine yüksek sıcaklıklarda hemen, hemen bütün metallerle kolaylıkla reaksiyon verir (Demir, 2006).

Bor ametal yapıda olmasına karşın oda sıcaklığında reaksiyona girme yetisi pek yoktur. Ancak sıcaklığın artmasıyla tepkime yeteneğinde müthiş bir yükselme kaydedilmektedir. Amorf yapıdaki bor, 700°C civarında oksijenle yanmaya başlar ve kırmızı bir alev görünür. Daha yüksek sıcaklıklarda Cl, Br ve S ile tepkimeye girer. Sıcak ve konsantre asitler boru oksitleyerek kolayca borik aside dönüştürür. Aynı zamanda bor açık havadan da çok etkilenir, oksijene olan yüksek afinitesi yüzünden oksitlenmeye çok müsaittir. Bor ve tuzlarının yanma sırasında aleve kattıkları renk genel olarak yeşildir (Ayter, 2005).

2.3.4. Bor Mineralleri

Bor elementinin oksijene karşı aktivitesi oldukça yüksektir ve uygun şartlarda bor oksitleri meydana getirmektedir. Bor oksitler alkali ve toprak alkali metalleriyle kolaylıkla birleşerek bor bileşiklerini meydana getirirler. Bor bileşiklerini başlıca altı ana gurup altında toplamamız mümkündür (Demir, 2006):

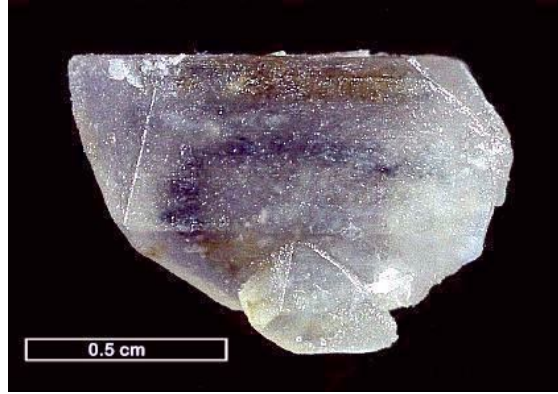
- Kristal suyu içeren boratlar,
- Bielsik boratlar,
- Susuz boratlar,
- Borik asit,
- Borosilikat mineralleri,
 - Aknizit grubu
 - Turmalin grubu
- Borofluoritler.

2.3.5. Ticari Önemi Olan Bor Mineralleri ve Bulunduğu Yerler

Bor elementi, doğada 250'den fazla mineralin yapısı içinde yer almasına rağmen, ekonomik anlamda bor mineralleri kalsiyum, sodyum, magnezyum elementleri ile hidrat bileşikleri halinde teşekkül etmiş olarak bulunur. Bor mineralleri, bünyelerinde değişik oranlarda bor oksit (B_2O_3) içeren mineraller olup, dünyada bor elementi kapsayan yüzlerce mineral bulunmasına rağmen ticari öneme sahip olanları çok azdır. Ticari önemi bulunan bor minerallerinin değerleri içerdikleri bor oksit ile doğru orantılıdır (Demir, 2006).

Boraks (Tinkal): Boraks, genellikle 1-10 mm boyutlarındaki yarı öz biçimli ve biçimsiz kristaller halinde bulunmaktadır (Şekil 2.7.). Yarı öz biçimli boraks kristallerinin büyük kütleleri genellikle, gömülmeden sonra meydana gelen oyuklar içinde bulunmaktadır. Bazen, boraks kil matrisinde saçılmış olan bireysel kristaller ve boraks-kil breşi halinde gözlenmektedir. Sertliği 2-2,5 mohs, molekül ağırlığı 381,4 gr/mol, özgül ağırlığı 1,715 gr/cm³ (20°C), özgül ısısı 0,385 kcal/gr (25-50°C), oluşum ısısı -1497,2 kcal/mol'dür. Sulu çözeltileri yaklaşık, konsantrasyondan bağımsız olarak hafif alkali reaksiyon gösterir (pH=9,2). Doymun boraks çözeltisi

105°C’de kaynar. Bor oksit içeriği %36,6’dır. Tinkal suyunu kaybederek kolaylıkla tinkalkonite dönüşebilir. Çünkü sadece yüzey kısmı veya tamamı ince taneli pentahidrate boraks kümesi halinde değişir. Yeni kesilmiş saf boraks temizdir ve cam gibidir. Fakat birçok numuneler tebeşir beyazıdır. Kille, arakatkılı üleksit ile birlikte bulunur. Ülkemizde Eskişehir-Kırka yataklarından üretilmektedir (Karaman, 2003; Anonim, 2008).



Şekil 2.7. Boraks’ın mineral şekli (Kantürk, 2006)

Kernit (Razorit): Tabiatta renksiz, saydam, uzunlamasına, iğne şeklinde, küme kristaller halinde bulunur (Şekil 2.8.). Tek kristallerin uzunluğu 10 cm’e ulaşır. Sertliği 3 mohs, özgül ağırlığı 1,95 gr/cm³ ve bor oksit içeriği %51’dir. Soğuk suda yavaş çözünür. Türkiye’de Kırka Boraks yataklarında cevher kütesinin alt kısımlarında oluşmuştur. Kırka’da Na-borat kütesinin derin kısımlarında bulunur. Dünya’da ise Arjantin ve ABD’de bulunur (Anonim, 2001).



Şekil 2.8. Kernit’in mineral şekli (Kantürk, 2006)

Üleksit: Tabiatta masif, karnabahar şeklinde, lifsi ve sütun şeklinde bulunur (Şekil 2.9.). Saf olanı, beyaz rengin tonlarındadır. İpek parlaklığında olanları da vardır. Genelde kolemanit, hidroboraksit ve probertit ile birlikte teşekkül etmiştir. Bor oksit içeriği %43'tür. Masif, karnabahar, lifsel, koni, rozet, pamuk yumağı ve çubuksal görünümler sergiler. Isıl işlemler altında, hidratlı bor minerallerinden olan üleksit bünyesindeki kristal suyunu kaybeder ve bu esnada mineralojik yapısal değişimlere maruz kalır. Türkiye'de Emet, Kırka, Bigadiç borat yataklarında yaygın olarak ve Bigadiç yatağında ikinci cevher olarak bulunur. Emet yataklarında üç farklı düzeyde rastlanır. Burada kolemanit ve hidroboraksit ile birlikte. Kırka'da borat yatakları içinde boraks, kolemanit ve inyonit ile; kil tabakaları içinde ise kurnakovit ve inderit ile birlikte bulunur. Dünyada ise Arjantin'de bulunmaktadır (Anonim, 2008; Baykal, 2003).



Şekil 2.9. Üleksit'in mineral şekli (Kantürk, 2006; Barış, 2007)

Kolemanit: Mono klinik sistemde kristallenir (Şekil 2.10.). Sertliği 4-4,5 mohs, özgül ağırlığı $2,42 \text{ gr/cm}^3$ 'dür. Bor oksit içeriği %50,8'dir. Suda yavaş, HCl'de hızlı çözünür. Bor bileşikleri içinde en yaygın olanıdır. Killer içinde cevher boşluklarında iri, parlak, saydam kristaller halinde bulunur. Kurak iklim bölgelerindeki playa ve tuz göllerinde boraks ile birlikte oluşur (Anonim, 2001; Baykal, 2003).

Türkiye'de Emet, Bigadiç, Kestelek, Kırka, Sultançayır, borat yataklarında yaygın olarak oluşmuştur. Kırka hariç diğer yatakların esas cevheridir. Buralardaki kolemanitlerde izlenen görünümler; ışınal dokulu yumrular (nodül), masif taneli saçılmış kristaller yıldızsal, nodüllerin etrafında lifsel tabakalar, kil ara katkılı tabakalar bazen breşler halinde, boşluklarda (jeodik), yassı öz biçimli kristaller halindedir. Dünyada ABD'de bulunur (Anonim, 2001; Baykal, 2003).



Şekil 2.10. Kolemanit'in mineral şekli (Kantürk, 2006; Barış, 2007)

Pandermit (Priseit): Beyaz renkte ve yekpare olarak görülmektedir (Şekil 2.11.). Kireçtaşına benzer. Bor oksit içeriği %49,8'dir. Aragonit ile birlikte, sıcak su kaynaklarının meydana getirdiği çökellerde oluşur. Kil ve jips yataklarında da bulunur. Türkiye'de Bigadiç-Sultançayır ve Kırka-Borat yataklarında bulunmuştur. Pandermit buralarda nodüler ve bir tona yaklaşan kitleler halinde kil ve jips yataklarının altında görülür. Kırka'da Ca-borat zonu üstünde, killi seviye içinde yumrular ve masif kütleler halindedir (Anonim, 2008; Baykal, 2003).



Şekil 2.11. Pandermit'in mineral şekli (Barış, 2007)

Hidroborasit: Bir merkezden ışınsal ve iğne şeklindeki kristallerin rast gele yönelmiş ve birbirini kesen kümeleri halinde bulunur (Şekil 2.12.). Lifsi bir dokuya sahiptir. Bor oksit içeriği %50,5'dir. Beyaz renkte, bazen içerisindeki safsızlıklara bağlı olarak sarı veya kırmızımsı renklere (arsenik içeriğine göre) ve kolemanit,

üleksit, probertit, veaçit-A bazen tunelit ile birlikte bulunur. İğne şeklinde kristalleri koni biçiminde topluluklar oluşturur. Ayrıca ışımsal dokulu yumrular ve bunların rastgele konumları ile oluşan topluluklar gösterir. Türkiye’de en çok Emet, Doğanlar, İğdeköy sahasında ve Kestelek’te rastlanır (Anonim, 2001; Baykal, 2003).



Şekil 2.12. Hidroborasit’in mineral şekli (Maden Teknik Arama, 2009)

Probertit: Kirlili beyaz, açık sarımsı renklerde olup, ışımsal ve lifsi şekilli kristaller halinde bulunur (Şekil 2.13.). Kristal boyutları 5 mm ve 5 cm arasında değişir. Bor oksit içeriği % 49,6’dır. Kestelek yataklarında üleksit ikincil mineral olarak gözlenir. Ancak Emet’te tekdüze tabakalı birincil olarak ve Doğanlar, İğdeköy bölgesinde kalın tabakalı olarak oluşmuştur (Anonim, 2008).



Şekil 2.13. Probertit’in mineral şekli (www.mineralienatlas.de, 2011)

2.3.6. Bor Ürünleri

Günümüzde sanayinin pek çok dalında ham, rafine ve özel bor ürünleri kullanılıyor, çünkü bor elementi kendine özgü özelliklerinden dolayı çok sayıda bileşik veya alaşım oluşturabiliyor. Cevher zenginleştirme yöntemiyle ham bor; ham borun fiziksel ve kimyasal işlemlerden geçirilmesiyle rafine bor ürünleri elde ediliyor. Özel bor ürünlerine gelince, bunlar ham bor ya da rafine bor ürünlerinden elde ediliyor. Teknik açıdan büyük miktarlarda üretilebilen ve pek çok sanayi dalının vazgeçilmez hammaddelerinden olan dört ana rafine bor bileşiği vardır (Yılmaz, 2002):

- Borik Asit (H_3BO_3),
- Boraks Dekahidrat ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$),
- Boraks Pentahidrat ($Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$),
- Susuz Boraks ($Na_2B_4O_7$).

Bunların dışında, ayrıca, sodyum perborat ($NaBO_2H_2O_2 \cdot 3H_2O$) ve susuz borik asit (B_2O_3) sanayinin önem taşıyan rafine bor bileşiklerindedir. Özel bor ürünlerineyse çinko borat, disodyum oktaborat tetrahidrat, bor karbür, magnezyum bor gibi boritler ve solibor gibi borlu gübreler örnek gösterilebilir (Yılmaz, 2002).

2.3.7. Özel Bor Ürünleri

Ham ve rafine ürünler dışında genellikle yüksek teknoloji gerektiren metotlar ile rafine bor ürünleri kullanılarak dünyada ticari olarak üretilen ve değişik kullanım alanları olan 175 civarında bor sektöründe nihai ürün olarak ta sınıflandırılan “Özel Bor Bileşikleri” mevcuttur. Bu özel bor bileşiklerin her biri farklı sektörlerde belirli amaçlar için kullanılmaktadır. Bor, bor alaşımları, bor tuzları ve organometalik bor kompleksleri ya kendi başlarına ileri teknoloji malzemesidirler ya da başka maddelere katılarak onlara ileri teknoloji malzemesi özelliği kazandırılırlar. Bu ürünlerden en yaygın kullanım alanlarına sahip olanlarını; sodyum bor hidrür, potasyum bor hidrür, boranlar, borürler, metal borürler, bor halojenürler, disodyum oktaborat tetrahidrat, bor triklorür, çinko borat, metalik bor, ferrobor, bor karbür, bor nitrür ve bor fiberleri olarak sıralayabiliriz (Anonim, 2003).

2.3.8. Bor Rezervleri

Dünya bor mineralleri rezervleri hakkında güvenilir kesin bir rakam vermek güç olmakla birlikte, dünya rezervinin yaklaşık olarak 1 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir. Bilinen dünya rezervlerinin yaklaşık %72'i Türkiye ve Rusya'da bulunmaktadır. Önem sırasına göre diğer rezervler ise ABD, Çin Halk Cumhuriyeti, Şili, Peru, Bolivya, Sırbistan, Arjantin ve İran'da toplanmıştır (Çizelge 2.1.). Dünyadaki önemli bor yatakları Türkiye, Rusya ve ABD'de olup dünya ticari bor rezervleri 4 bölgede toplanmaktadır. Bunlar; ABD Kaliforniya Eyaletinin güneyinde yer alan "Mojave Çölü", Güney Amerika'da yer alan "And Kemerı", Türkiye'nin de yer aldığı "Güney-Orta Asya Orojenik Kemerı" ve Doğu Rusya'dır. Türkiye dışında diğer önemli bor rezervlerinin bulunduğu bor yataklarının rezerv dağılımı farklı kaynaklardan alınan bilgilere göre şöyledir (Anonim, 2001; Anonim 2011).

Çizelge 2.1. 2011 Dünya Bor Rezervleri (Anonim, 2001; Anonim, 2011)

Ülke	Görünür Rezerv (Bin Ton)	Muhtemel Rezerv (Bin Ton)	Toplam Rezerv (Bin Ton)	% Pay	Rezerv Ömrü (Yıl)
<u>Türkiye</u>	240,500	624,000	864,500	72	412
<u>Rusya</u>	40,000	60,000	100,000	8	78
<u>ABD</u>	40,000	40,000	80,000	7	76
<u>Çin</u>	27,000	20,000	47,000	4	26
<u>Şili</u>	8,000	33,000	41,000	3	23
<u>Peru</u>	4,000	18,000	22,000	2	14
<u>Bolivya</u>	4,000	15,000	19,000	2	12
<u>Sırbistan</u>	6,200	10,000	16,200	1	9
<u>Arjantin</u>	2,000	7,000	9,000	1	6
<u>İran</u>	1,000	-	1,000	-	-
<u>Toplam</u>	372,700	827,000	1,199,700	100	656

2.3.9. Türkiye’de Bor Madeni, Yatakları, Rezervleri ve Ekonomisi

Türkiye’nin bilinen borat yataklarının tümü Batı Anadolu’da yer almaktadır. Günümüze dek saptanmış olan borat yatakları, Marmara Denizi’nin güneyinde, doğu-batı doğrultusunda yaklaşık 300 km’lik ve kuzey-güney doğrultusunda ise 150 km’lik bir alan içinde yer almaktadır (Yılmaz, 2002).

Bor mineralleri bünyelerinde değişik oranlarda bor oksit içeren mineraller olup Türkiye’de yaygın olarak bulunan bor mineralleri, tinkal, kolemanit ve üleksit’dir (Çizelge 2.2.). Başlıca tinkal yatakları Eskişehir-Kırka’da, kolemanit yatakları Kütahya-Emet (Espey ve Hisarcık), Balıkesir-Bigadiç ve Bursa-Kemalpaşa’da (Kestelek), üleksit yatakları ise Balıkesir-Bigadiç civarında bulunmaktadır (Güyağuler, 2001; Sapmaz vd., 2002; Önder, 2006).

Çizelge 2.2. 2010 Yılı Türkiye mineral bazında rezerv miktarı (Anonim, 2011)

Cevher	Tenör (% B ₂ O ₃)	Toplam Rezerv (Milyon Ton)	% Pay
<u>Kolemanit</u>	28,40	2.257	74
<u>Tinkal</u>	25,80	739	24
<u>Üleksit</u>	29,00	47	2
<u>Toplam</u>	27,78	3.043	100

Ediz ve Özdağ (2001), bor mineralleri ve ekonomisi üzerine çalışmışlardır. Dünyada bor ürünleri ve kimyasallarına olan talep ve kullanım alanlarının gün geçtikçe arttığına, buna bağlı olarak da önemli bor rezervlerine sahip olan ülkelerin, daha fazla ekonomik getiri sağlayacak şekilde teknolojik gizlilik ve üretimde monopolleşmeye gittiğine işaret etmektedirler. Türkiye’nin sahip olduğu önemli bor rezervleri ve mineral kalitesiyle, pazarda önemli bir paya sahip olabilmek için, bor madenciliği, üretim ve pazarlamasında bir devlet kuruluşu olan ETİBOR A.Ş.’yi tek yetkili kıldığını, önümüzdeki yıllarda ise Türkiye’nin yapılacak yatırımla bor ürünleri ile bor kimyasalları üretim ve pazarlamasında daha önemli bir konuma gelmesinin beklendiğini ifade etmektedirler.

2.4. Borlama

Endüstride, makine elemanlarının kullanım dışı kalmasının başlıca sebepleri; aşınma, yorulma ve korozyondur. Endüstrileşmiş toplumlarda sürtünme ve aşınmanın kontrol altında tutulması veya azaltılması gittikçe artan bir ihtiyaç olmuştur. Çünkü makinenin servis ömrünü uzatmak, çevre kirliliğine yol açmamak, daha etkili makine ve aletler yapmak, gittikçe azalan malzeme kaynaklarını muhafaza etmek, enerjiden tasarruf etmek ve daha emniyetli alet ve makineler geliştirmek, büyük ölçüde sürtünme ve aşınmanın önlenmesine bağlıdır. Önceleri sadece sıvı veya katı yağlayıcı kullanmakla önlenmeye çalışılan bu probleme tribolojistlerin yaklaşımı, yüzey işlemleri ve kaplamaların kullanılarak aşınmanın önlenmesi yönündedir. Malzeme yüzeylerine uygulanan klasik ve modern kaplama yöntemleri dünyada ve ülkemizde hızla gelişerek yaygınlaşmaktadır. Çünkü sanayileşmiş ülkelerde aşınma sebebiyle gayri safi milli hasılanın %7'sine eşdeğer bir harcamanın yapıldığı tahmin edilmektedir (Köseli, 2008).

Özbek (2000)'e göre, borlama, Alman Endüstri Standardı DIN 17014'e göre "termokimyasal işlem yoluyla, iş parçası yüzeyinin bor atomlarıyla zenginleştirilmesi" olarak tarif edilen termo-difüzyonal yüzey işlemidir. Yani, borlama, termal enerji yoluyla bor atomlarının iş parçasının yüzeyindeki metal kafesin içerisine yayılması ve orada ana malzemenin atomları ile borürlerin oluşturulmasıdır (Tabur, 2008).

İşlem; yüzeyi çok iyi bir şekilde temizlenmiş olan malzemelere, göre 700-1000°C aralığında, tercihen 1-12 saat sürede, bor verici katı (toz), pasta, sıvı veya gaz ortamlarda gerçekleştirilir. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD), iyon implantasyonu veya plazma püskürtme gibi termokimyasal olmayan yöntemler ile de malzeme üzerinde bor tabakası oluşturulabilir (Uluköy, 2005).

Matuschka (1980), Fichtl et al., (1988) ve Özbek (1999)'e göre, borlama işleminde, bor kaynağı (B_4C , $Na_2B_4O_7$, H_2B_6), aktivatör (KBF_4), dolgu malzemesi ve deoksidanlar (SiC , Al_2O_3) kullanılmaktadır. Burada aktivatörler tabakanın düzenli büyümesini sağlarken, dolgu ve deoksidan malzemeler işlem sıcaklığında oksijeni

tutarak redükleyici bir ortam oluşturmakta ve ayrıca ortamdaki malzemelerin ana malzemeye yapışmasını önlemektedirler (Akbayır, 2005).

Yu et al., (2005)'a göre, borlama, demir ve demir dışı metallerin aşınma dayanımını, yüzey sertliğini ve korozyon direncini geliştiren önemli bir termokimyasal işlemdir. Borlama işleminde, bor atomları iş parçasının yüzeyine yayılır ve metal yüzeyinde borür şeklinde biçimlenirler. Borlama katı, sıvı veya gaz ortamda gerçekleştirilebilir. Çeşitli borlama türleri arasında kutu borlama en sık kullanılanıdır. Endüstriyel borlama çoğunlukla çelik ve demir alaşımlara uygulanmaktadır (Özmen, 2007).

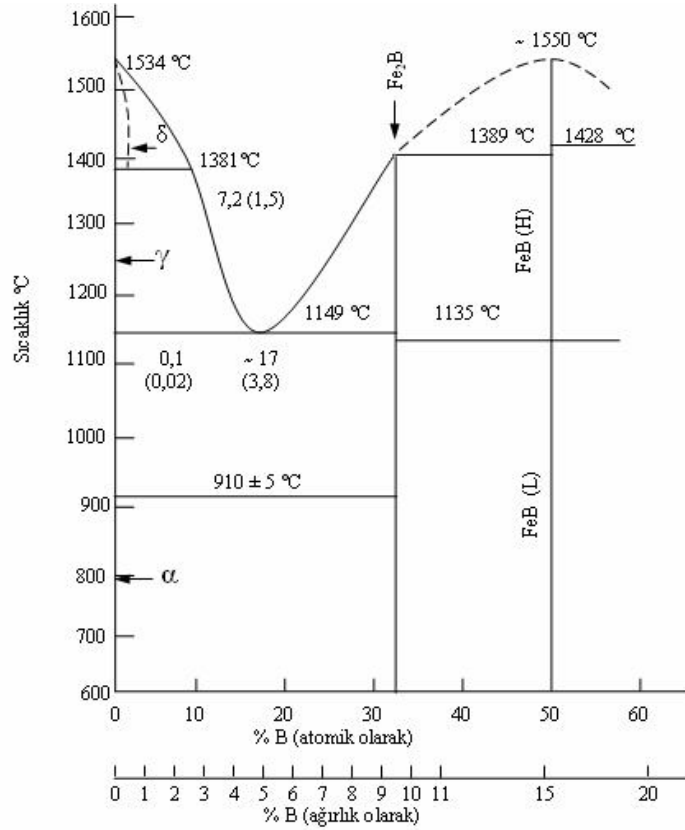
Selçuk vd., (2002)'e göre, borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin yüzeylerinin sertleştirilmesinde kullanıldığında makine parçalarının sürtünme ve aşınmaya, korozyona ve yüzey basıncına karşı dirençli bir dış yüzey kazanmasını sağlar. Bor ile yapılan yüzey sertleştirmesinde, bor elementi tek başına kullanılmaz. Daha çok borkarbür (B_4C), veya boraks veya borik asidin aktivatör ve katkı maddelerinin karışımları ile yüzey sertleştirme yapılır. Bu olay sırasında sıcaklığın etkisiyle bor serbest ve atomik hale gelir ve çeliğin bünyesine yayılır. Bu yayınan bor hemen demir ile Fe_2B ya da FeB şeklinde bileşik yapar. Bu yapılar tek tek oluştuğu gibi bir arada da oluşabilir (Yılmaz, 2005).

Selçuk (1994)'un ifade ettiğine göre, çeliğin borlanması sonucunda en üst tabakada sırasıyla FeB_x , FeB ve Fe_2B olmak üzere çeşitli borürler oluşur. Borür tabakasının altında bor atomlarının demir kristal kafesinde katı eriyik olarak çözülmüş olduğu, difüzyon tabakası denilen çözüldüğü ölçüde borca zenginleştirilmiş bir kısım mevcuttur (Can, 2009).

Difüzyon yönüne bağlı olarak, kolonsal yapı sergileyen tek fazlı Fe_2B fazı, çift fazlı Fe_2B+FeB fazlarına göre daha çok tercih edilmektedir. Gerçekte FeB ve Fe_2B fazları birbirlerine basma ve çekme gerilmeleri uygulamakta ve çoğu zaman bu gerilmeler sebebiyle, iki faz arasında çatlaklar oluşmaktadır. Bu etki mekanik zorlamalar altında borür tabakasının tabaka tabaka kalkmasına neden olmaktadır. Termal şok veya mekanik etkiler altında ayrılmalar ve tabaka halinde kalkmalar meydana gelmektedir. Bu sebeple, minimum FeB içeriğine sahip tabakalar elde edilmeye çalışılmaktadır (Özmen, 2007).

Özsoy (1991)'un belirttiğine göre, bor α , γ ve δ demirinde çok az çözünebilmektedir. α -Fe, 910°C civarındaki maksimum çözünebilirlik sıcaklıklarında 20-80 ppm borun çözünebildiği; buna karşılık, γ -Fe, 1150-1170°C sıcaklıklarda 55-260 ppm bor çözünebildiğini bildirmiştir. Çözünebilirlik sınırlarının genişliğinin, esas malzemenin saflığı ve tane boyutundaki değişikliklerden kaynaklandığına inanılmaktadır (Yılmaz, 2005).

Şekil 2.14.'de Fe-B denge diyagramı görülmektedir. Denge diyagramına göre borun çözünebilirliği, yüzde-bor oranları, borürlerin ergime sıcaklıkları hakkında yorumlar yapılabilmesini sağlamaktadır.



Şekil 2.14. Fe-B denge diyagramı (Karaman, 2003)

Özsoy (1991)'un demir bor denge diyagramı yorumuna göre; ağırlık olarak %8,8 bor oranında Fe₂B ve %16,2 bor oranında FeB olmak üzerinde iki tür borür ve ergime noktası 1174 °C olan ~%4 bor oranında bir ötektik faz oluşmaktadır. Dolayısı ile borlanmış yüzey bu sıcaklığa kadar ısıdan etkilenmemektedir (Özmen, 2007).

Şen (1997)'e göre, demir esaslı malzemelerin borlanması sonucunda, Fe₂B fazının hakim olduğu dış yapısına benzer kolonsal bir yapının oluşması da tercih edilmektedir. Çift fazlı FeB+Fe₂B tabakası, vakum veya tuz banyosunda 800°C sıcaklık civarında uzun süre ısıtılma tabi tutulduğu takdirde, tek fazlı Fe₂B fazı elde edilebilmektedir (Özmen, 2007).

Hayashi and Sugeno (1970), Liao and Spear (1974), Stjohn and Sammels (1981), Kubaschewski (1982), Massalski (1990), Özbek (1999) adı geçen yazarların yaptıkları çalışmalara göre, bor elementi bor α -Fe'de atom çapına bağlı olarak hem arayer hem de yeralan konumunda bulunabilmektedir. Fe-B sisteminde borun atom yarıçapının demirin atom yarıçapından 2,69 kat daha küçük olması, bu elementle katı eriyik yapma imkanı sağlamaktadır. Ötektik reaksiyon bor iyon difüzyonun hakim olduğu γ -Fe tane sınırlarında ve/veya Fe₂B, Fe₃(C,B)'de başlamaktadır. Ötektiğin yapısı ve özellikleri, bileşimin yanında sıvı tabakanın hızına da bağlıdır. Yüksek soğuma hızında ince mikroyapı, yüksek sertlik ve tokluk elde edilmektedir (Akbayır, 2005).

Hansen'in (1958) belirttiği Fe-B denge diyagramına göre; Fe-B sisteminde alaşım elementleri, örneğin %1 C ötektik sıcaklığını 50°C aşağıya düşürür. Borun α , γ ve δ demir içindeki çözünürlüğü sınırlıdır. Ticari uygulamalarda kullanılan düşük bor potansiyelinde sadece Fe₂B elde edilir. Bor potansiyeli arttıkça doymuş Fe₂B tabakasında FeB oluşur (Çelikyürek, 2006).

2.4.1. Borlama İşlemi

Borlama işlemi, bor verici ile işlem gören malzeme arasındaki kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla gerçekleştirilir. Genellikle bor verici olarak gaz, sıvı ve katı bor bileşikleri kullanılır (Çelikyürek, 2006).

Borlamanın birinci aşamasında borlayıcı ortam ve malzeme yüzeyindeki reaksiyon bölgeleri arasında reaksiyon oluşur. Taneler yüzeyde çekirdek oluşturmaktadır. Borlama süresi ile çekirdek oluşumu artar ve ince bir bor tabakası elde edilir. Bor, FeB ve Fe₂B yapısında çeliğin yüzeyine yayılır. Borlama işlemi sırasında, ilk borür çekirdeği numunenin yüzeyinde oluşmaktadır (Özmen, 2007).

Çeliklerin borlanması istenmeyen yüzeyleri veya bölgeleri SiC, Al₂O₃, asbest, bakır veya benzeri ticari ürünlerle kaplanarak kısmi borlama yapılabilir. İş parçasının borlanması istenmeyen yüzeylerinin, en azından 0,1 mm kalınlığında bakır veya 4 gr amorf bor tozu, 4 ml sentetik reçine ve 14 ml trikloroetilen karışımı ile kaplanmasını önermişlerdir (Özsoy, 1991; Uzun, 2002).

Borlama ile iş parçalarının ömürleri önemli derecede arttırılabilir. Daha kalın ve matris malzeme ile iyi bağlantılı borür tabakalarının, yüksek alaşımlılardan daha çok, düşük alaşımlı ve alaşımsız çeliklerde elde edildiği düşünülürse; alaşımlı çelikler, alaşımsız çeliklerle değiştirilerek iş parçası maliyetleri düşürülebilir. Keza talaşlı imalat vb. yöntemlerle üretilen parçalar toz metal tekniği ile üretilenlerle değiştirilebilir (Özsoy, 1991; Karaman, 2003).

2.4.1.1. Borlama İşleminin Avantajları

Borlama işleminin en önemli avantajı; oluşan borür tabakasının çok yüksek sertlik (1450-5000 HV) ve ergime noktasına sahip olmasıdır. Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayılarından dolayı abrasiv aşınmaya karşı çok iyi direnç gösterirler ve temel aşınma mekanizmalarının oluşumunu önlemede çok önemli fayda sağlarlar. Borlu tabakaların iyi aşınma özelliği göstermesi, yağlayıcı kullanımı da azaltır (Pazarlıoğlu, 2006).

Borlama işleminin bazı avantajları aşağıda sıralanmıştır (Sinha, 1991; Uluköy, 2005; Saygın, 2006; Emekçiler, 2006; Özmen, 2007; Tabur, 2008; Köseli, 2008):

- Borlama işleminin en önemli karakteristik özelliği, elde edilen borür tabakasının çok yüksek sertlik ve ergime sıcaklığına sahip olmasıdır. Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme yöntemleri olan sementasyon ve nitrürasyona göre çok daha yüksektir. Hatta bu sertlik, sertleştirilmiş takım çeliklerinin ve sert krom kaplamanın sertliklerinden daha yüksek, tungsten karbürünkine ise eşdeğerdedir.
- Borlama işlemi ile; tungsten karbürün, elektrolit sert krom kaplamaların ve sertleştirilmiş takım çeliklerinin sertlik değerlerine ulaşılabilir.

- Borür tabakalarının yüksek yüzey sertliğine ve düşük sürtünme katsayısına sahip olmaları; adhesiv, tribo-oksidasyon (kimyasal), yüzey yorulması ve abrasiv aşınma gibi temel aşınma mekanizmalarının oluşumunu önlemede çok önemli fayda sağlar. Bu sayede kalıp üreticilerinin, pahalı ve zor işlenen takım çelikleri yerine, üstelik orijinal malzemeninkinden daha üstün özelliklere ve aşınma direncine sahip olan kolay işlenen çelikleri kullanabilmeleri mümkün olmuştur. Bu ise takım ve kalıp ömrünü artırdığı gibi yağlayıcı kullanımını da azaltır.
- Borlama, bir iş parçasının sertleştirilmesi istenen seçilmiş bölgelerine, düzensiz karmaşık şekillere üniform bir şekilde uygulanabilir.
- Isıl işlem uygulanabilen malzemeler, borlama sonrası tamamen sertleştirilebilirler.
- Borür tabakası, 550-660°C sıcaklıklarda bile sertliğini korumaktadır.
- Borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin oksitleyici olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerin erozyon dirençlerini artırmaktadır.
- Oksitleyici ve korozif ortamlarda parçanın yorulma ömrünü artırır.
- Borlama işlemi ile düşük alaşımlı çeliklerin H₂SO₄, H₃PO₄ ve HCl gibi asitlere karşı direncini artırmak mümkündür. Örneğin; borlanmış östenitik paslanmaz çeliklerin HCl asit ortamlarına karşı dayanıklılığı çok iyidir.
- Borlama işlemi, yağlayıcı kullanımını azaltmakta, soğuk birleşme eğilimini ve sürtünme katsayısını düşürmektedir. Bu özellik yüzeyin adhesiv aşınma eğilimini azaltmaktadır. Bu sayede yüzeyi borlanmış malzemeler soğuk metal işleme şartlarında çalışabilmektedirler.
- Borlanmış yüzeyler çok yüksek sıcaklıklarda (850°C) orta seviyede oksidasyon direncine ve oldukça yüksek ergimiş metal korozyon direncine sahiptir.
- Borlanmış parçaların yorulma ömürleri özellikle korozif ortamlarda %25 oranında arttırılabilir.

2.4.1.2. Borlama İşleminin Dezavantajları

Borlama işleminin avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunları şu şekilde sıralamak mümkündür (Sinha, 1991; Uluköy, 2005; Saygın, 2006; Emekçiler, 2006; Özmen, 2007; Tabur, 2008; Köseli, 2008):

- Borlama işleminin ana dezavantajı borür tabakasının, özellikle FeB fazının kırılkan olmasıdır. Borür tabakalarının kırılmasında birçok faktör rol oynayabilir. Birincisi, FeB ve Fe₂B fazlarının çok sert olmaları; ikincisi, borür tabakaları arasında geniş sertlik değer farkının olmasıdır.
- Borlama sonucu, parça kalınlığında artma meydana gelir. Dolayısı ile borlanacak parçalar çok hassas boyutlarda kullanılacaksa, dizaynları yapılırken bu durum göz önüne alınmalıdır.
- Borlama işlemi uygulanan malzemelerde bor tabaka kalınlığının %5-20'si oranında boyutsal olarak artış gözlenmektedir. Örneğin, 25 µm'lik bir tabaka kalınlığı 1,25-6,25 µm'lik bir büyümeye neden olmaktadır. Bu kalınlık artışı borlanan malzemenin cinsine ve borlama şartlarına bağlıdır. Çok hassas toleranslarla çalışmak gerektiği zaman, kaplamanın işlenmesi elmas takımlarla mümkün olmaktadır. Çünkü yüzeyin geleneksel tekniklerle işlenmesi sırasında kaplama tabakasında kırılmalar meydana gelmektedir. Bu da kaplama kalitesinde bozulmalara ve çatlamalara yol açmaktadır.
- Takımlar borlandıktan sonra çoğu zaman bir sertleşmeye ve temperlemeye tabi tutulmaktadır. Borlama sonrası ısıl işlem görececek olan çeliklerde borür tabakasının özelliklerinin korunması için inert atmosfer veya vakum gerekmektedir.
- Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde (2000 N) karbürizasyon ve nitrürasyonla kıyaslandığı zaman, çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği sebebiyle, dişli üretiminde bir sınırlama söz konusudur.

2.4.1.3. Borlama İşleminde Kullanılan Bor Sağlayıcılar

Borlama işlemi için birçok farklı bileşik satılmaktadır. Borlama işleminin etkeni olan borkarbür, hem macun hem de toz şeklinde ticari olarak satılmaktadır. Değişik metotlarda, borlama işleminin yapılmasında kullanılan bor sağlayıcı malzemelerin bileşimleri ve fiziki durumları Çizelge 2.3.'de gösterilmiştir (Karaman, 2003).

Borlama işleminin pratik tertibatı için tabakanın değişik borlama şartları altındaki büyüme kinetiğinin verileri çok önemlidir. Çünkü oranlarındaki değişiklikler tabaka kalınlığı ve özelliklerini de etkilemektedir.

Çizelge 2.3. Önemli bor sağlayıcılara, borlayıcı maddelere ve borlama metotlarına toplu bakış (Karaman, 2003)

Maddenin Hali	Bileşim	Metotlar
Gaz	BF ₃ , BCl ₃ , BBr ₃ saf veya Hidrojen ile birlikte	İşlem sıcaklığında gaz halindeki borlayıcı madde ile borlama yapılır.
	B ₂ H ₆ +Hidrojen	
	(CH ₃) ₃ B/(C ₂ H ₅) ₃ B	
Sıvı	Na ₂ B ₄ O ₇ (+NaCl/+B ₂ O ₃)	Elektroliz yöntemiyle yapılan işlemde iş parçası katot; grafit veya platin anot olarak kullanılır.
	HBO ₂ +NaF	
	Florid eriyiği içinde bor veya bor bileşiği	Elektroliz yöntemiyle yapılan işlemde sıvı florür içeren borlayıcı madde anot, iş parçası katot olarak kullanılır.
	B ₄ C(+NaCl/+BaCl ₂ /+NaBF ₄)	Erimiş tuz banyosuna daldırma.
	Na ₂ B ₄ O ₇ 'li sıvı çözelti	
	B ₄ C+ Na ₃ AlF ₆ +Etil Silikat	Sulu çözeltide indüktif ısıtma
Katı	Ferrobör+Na ₃ AlF ₆ +Sodyum silikat	Macun tatbik edilmesi sonrasında indüktif ısıtma
	Amorf Bor (+Aktifleştirici)	
	Ferrobör (+Aktifleştirici)	Toz içinde paketlenmiş veya macunlanmış halde ısıtma
	B ₄ C+Aktifleştirici	

2.4.1.4. Borlama İşlemi Uygulanabilen Malzemeler

Endüstriyel olarak borlama işlemi, çok geniş bir yelpazedeki demir esaslı alaşımların hemen hepsine ve bazı demir dışı alaşımlara uygulanmaktadır. Yapı çelikleri, sade karbonlu, paslanmaz ve takım çelikleri gibi yapısal çeliklere, sementasyon çelikleri, temperlenmiş çelikler, takım çelikleri, korozyona dayanıklı çelikler, döküm çeliklere, Armco demire (ticari saflıkta), gri ve küresel grafitli dökme demirlere, sinterlenmiş demir ve çeliklere uygulanabilmektedir. Buna ilaveten, nikel, kobalt, molibden,

titanyum, krom, mangan, niyobyum, tungsten ve tantalyum gibi demir dışı metal ve alaşımlarına, bazı seramiklere de uygulanmaktadır (Köseli, 2008; Ersöz, 2008).

Altlık malzemenin uygunluğuna göre borlama işlemi 800-1050°C sıcaklık aralığında yapılabilir. Fakat gri dökme demir ve sert metallerde (sementit karbürler) bu kadar yüksek sıcaklıklara çıkılamaz. Gri dökme demirlerin borlanması 850-880°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilir. Çünkü steady ötektik içeren gri dökme demir, 950°C'de ergimeye başlayacak ve bunun sonucunda ise iş parçasının yüzeyi deforme olacaktır. Sert metallere için tavsiye edilen sıcaklık ise en fazla 900°C civarındadır. Daha yüksek sıcaklıklarda altlık malzemenin borlanması yanında, volfram karbür partiküllerinin veya mevcut diğer sert karbürlerin de parçalanıp borürlere dönüşmesi mümkündür (Emekçiler, 2006; Köseli, 2008; Can, 2009).

Çelik malzemelerin borlanmasında, kaplama tabakasında üç farklı bölge oluşur. Bunlar; birinci bölge borür tabakası, ikinci bölge difüzyon bölgesi ve üçüncü bölge matris bölgeleridir. Borür tabakası ile matris arasındaki ara yüzeyin geometrisi, çelik bünyesindeki alaşım elementi miktarına bağlı olarak dişli/kolonsal yapıda veya düz bir yapıda olabilmektedir. Alaşım elementi miktarı arttıkça borür tabakası daha düz bir yapıda oluşur (Köseli, 2008).

Borlama işleminin östenit fazında gerçekleşmesi sebebiyle havada sertleşen çelikler, borlama sonrasında anında sertlik kazanırlar. Suda sertleşen parçalar borür tabakasının termal şoka maruz kalması sebebiyle su verilmesi gerekli olduğu durumlarda borlanmazlar. Benzer şekilde sülfürlenmiş ve kurşunlanmış çelikler yüzeylerde çatlak oluşturma eğilimleri, nitrürlenmiş çelikler ise çatlak hassasiyetleri sebebiyle borlama işlemine tabi tutulmamaktadır (Yılmaz, 2005).

Nikel üzerindeki bor tabakaların yüksek sertliğe ve mükemmel aşınma dayanımına sahip olduğu bildirilmektedir ve titanyum borların yüksek sertlikte ve mükemmel korozyon aşınma ve oksidasyon dayanımına sahip olduğu iyi bilinmektedir (Emekçiler, 2006).

Alüminyum, çinko ve magnezyum alaşımları düşük ergime sıcaklıklarından dolayı borlanamazlar Alüminyum içeren çeliklerin borlanması tavsiye edilmemektedir.

İçerisinde ~%1'den fazla silisyum bulunan çelikler kalın borür tabakası için uygun olmayan malzemelerdir. Bu malzemelerdeki alüminyum ve silisyum, bor atomlarının difüzyonu sırasında yüzeyden içerilere doğru itilirler. Difüzyon bölgesinde Fe₂B fazının altında ferritik bir bölgenin oluşumuna yol açarlar. Bunun sonucu olarak son derece sert borür tabakasının altında orijinal altlık malzemeden daha yumuşak bir tabaka yer alacaktır. Eğer iş parçası, oldukça yüksek gerilmelere maruz kalırsa, sert borür tabakası bunu yumuşak ferrit bölgesine itilecek ve borür tabakasının parçalanmasına (yumurta kabuğu etkisi) yol açacaktır. Alüminyum, silisyum ve azotlu yatak çelikleri; kırılğan borür fazları oluşturmaları sebebiyle borlama için uygun malzemeler değildir. Benzer şekilde, içerdikleri kükürt ve kurşun gibi alaşım elementlerinin borür tabakasının kalkmasına ve çatlamasına sebep olması nedeniyle bu çeliklerin borlanması tavsiye edilmemektedir (Emekçiler, 2006; Yazıcı, 2006; Köseli, 2008).

Genellikle tüm metaller borür oluştururken, sadece çok az metal, borür oluşturmaz. Bunlar altın, bizmut, kadmiyum, bakır, kurşun, antimon, tellür ve çinkodur. Bu metallere sadece bakır ve altının ergime sıcaklığı 700°C'nin üzerindedir (Emekçiler, 2006; Akbayır, 2006).

Saf tungstenin'in üzerinde oluşturulan borür tabakası yoğun ve dişli bir morfolojiye sahiptir. Mikroyapısal çalışmalar üç farklı bölge göstermektedir. Birinci bölge WB'den oluşan yüzey tabakası, ikinci bölge borür katı çözümlenmeden oluşan geçiş bölgesi, bu bölge ana metalden daha yüksek sertlik değerine sahiptir ve üçüncü bölge borondan etkilenmeyen ana metal bölgesidir. Borür tabakanın sertliği 2500 HV iken ana metalin sertliği 445 HV'dir (Emekçiler, 2006; Akbayır, 2006).

Saf niobium'un üzerinde oluşturulan borür tabakasının yoğun ve dişli bir morfolojiye sahiptir. Mikroyapısal çalışmalar üç farklı bölge göstermektedir. Birinci bölge NbB₂'den oluşan yüzey tabakası, ikinci bölge borür katı çözümlenmeden oluşan geçiş bölgesi, bu bölge ana metalden daha yüksek sertlik değerine sahiptir ve üçüncü bölge borondan etkilenmeyen ana metal bölgesidir. Borür tabakanın sertliği 2500 HV iken ana metalin sertliği 110 HV'dir (Emekçiler, 2006; Akbayır, 2006).

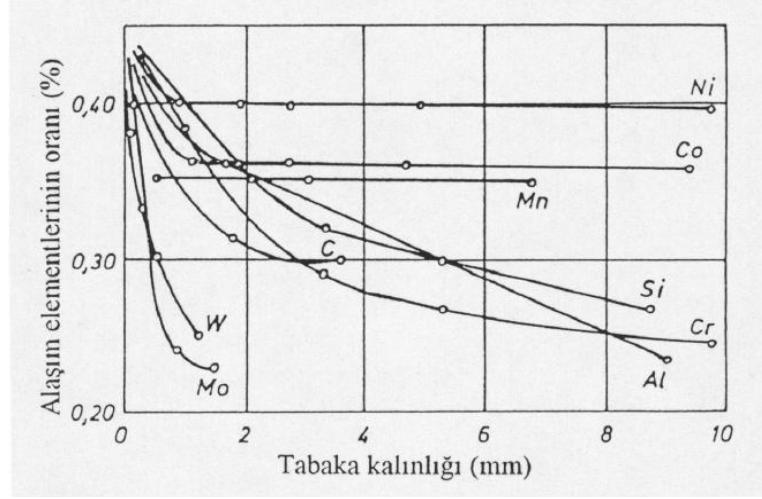
Demir dışı metal olan nikel ve alaşımlarının yüzey sertleştirme işlemi karbürizasyon ve nitrürasyon işlemleri ile katı durumda karbon ve azotun çok az çözünmesi nedeniyle gerçekleştirilememektedir. Cr ve Mo gibi nitrür formu bulunan elementleri içeren nikel alaşımlarına nitrürasyon işlemi uygulanmış fakat nitrür tabakası kalınlığının çok ince olduğu tespit edilmiştir. Borlama işlemi kolayca uygulanabilen nikelde kalın tabakalar elde edilebilir ve birçok metalde zor intermetalik bileşiklerin kolayca oluşabildiği borürler ile aşınma direnci önemli ölçüde artar (Özmen, 2007).

2.4.1.5. Borlama İşlemine Alaşım Elementlerinin Etkisi

Borlama işlemi gerek toz ve gerekse diğer metotlarla üretilen bütün ferro alaşımlara uygulanabilmektedir. Refrakter metaller (W, Ta, Mo, Zr, Hf, Nb), karbürler (özellikle Co ile bağlı WC) ve nikel esaslı alaşımlara başarı ile uygulanarak özel yapıda borlu tabakalar elde edilebilmektedir. Ti ve Ti esaslı alaşımlara bor yayınımları ile aşınmaya dayanıklı TiB₂ tabakası elde edilebilmektedir (Özsoy 1991).

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 (Uzun, 2002; Yılmaz, 2005).

Hunger and True (1994) alaşım elementlerinin, çeliklerin borlanması borür tabakası ve geçiş bölgesinin kristal yapısını, bileşimini (faz yapışma), tabakanın büyümesini ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini savunmuşlardır. Alaşım elementleri bu etkilerini, ana malzemenin bora karşı olan aktivitesine, yani borun yayınmasına ve reaktifliğine tesir ederek, genellikle tabaka kalınlığını azaltıcı yönde gösterdiğini iddia etmişlerdir. Alaşım elementlerinin etkisi, borür tabakalarına tercihli olarak girme kabiliyetine ve bor ile etkileşme ve sağlam (stabil) bileşikler oluşturmasına bağlı olarak da değişiklik gösterdiğini ispatlamışlardır. Şekil 2.15.'de alaşım elementleri borür tabakası ilişkisi vermiştir (Uzun, 2002).

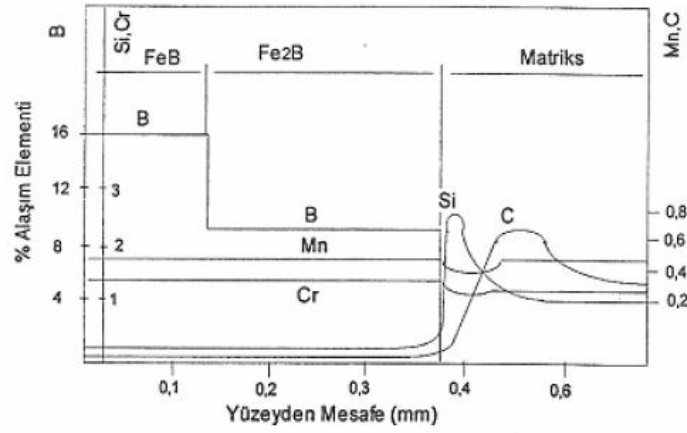


Şekil 2.15. Borür tabakasına alaşım elementlerinin etkisi (Uzun, 2002)

Blazon et al., (1975) yaptıkları çalışmada demir esaslı malzemelerin borlanması sonucunda esas olarak (Fe, M)B ve Fe, M)₂B, (M=Cr, Mn, Ni) bileşikleri elde edildiğini ifade etmişlerdir. Oluşan bu borürlere alaşım elementlerinin etkileri farklılıklar arz etmektedir. Bindal (1991)'a göre, borlanan malzemede alaşım elementleri, atom numaralarına ve çaplarına bağlı olarak reaktiflik 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), orijinal malzeme sertliğini artırır. Alaşımli özel çeliklerde bu artış 50 HV değerinden daha düşüktür. Alaşımli ve alaşımli çeliklerin borlanması sonucunda ise ortaya çıkan sertlik farkı, borlanmamış haldekiler ile mukayese edilemeyecek kadar büyük olduğunu ifade etmektedir (Uzun, 2002; Emekçiler, 2006; Köseli, 2008).

Yüksek alaşımli çeliklerde en az miktarda krom ve nikel kullanılması durumunda diboran hidrojen karışımında (1:25 oranında) borlanan çeliklerde çok ince bir tabaka oluşmaktadır. Krom çeliklerinde mangan (%8'e kadar) tabaka kalınlığını etkilemez, %2 tungsten artırır ve titanyum ve niyobyum azaltır. Bu alaşım elementlerini içeren ticari çeliklerde bu etkiler birbirini karşılar (Çelikyürek, 2006).

Şekil 2.16.'da çeliklerin borlanması sonucunda, borür tabakası boyunca alaşım elementlerinin dağılımları şematik olarak verilmektedir.



Şekil 2.16. Çeliklerin borlanması sonucunda, borür tabakası boyunca alaşım elementlerinin dağılımları şematik olarak (Tabur, 2008)

2.4.2. Borlama Yöntemleri

Taşçı (1993), esas itibariyle bir yayınma işlemi olan, karbürleme ve nitrürlemeye benzeyen borlama termokimyasal bir işlemdir. Uygun işlem sıcaklıklarında metal malzemenin yüzeyine yayınan bor, metal ile bir veya birkaç intermetalik fazdan meydana gelen bir tabaka oluştururlar (Uzun, 2002; Yılmaz, 2005).

Son teknolojik gelişmelerle beraber borlama işlemi temel olarak iki ana grupta toplanan yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Termo-kimyasal ve termo-kimyasal olmayan yöntemler olarak ayrılan bu yöntemlerden en çok kullanılanı termokimyasal yöntemlerdir. Termo-kimyasal bor kaplama yöntemleri sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak bor atomunun metale difüzyonu prensibine dayanmaktadır. (Akbayır, 2005; Köseli, 2008; Çarboğa, 2010).

Fichtl et al., (1988)'e göre, borlama işlemi, teknolojiye iki grupta toplanan yöntemlerle yapılmaktadır:

1. Termo-kimyasal yöntemler; gaz borlama, sıvı borlama, pasta borlama ve kutu borlama.
2. Termo-kimyasal olmayan yöntemler; fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey kaplama v.b. yöntemler (Sinha 1991; Akbayır, 2005; Yazıcı, 2006).

Son yıllarda bu yöntemlere ilave olarak iyon iyon implantasyonu, çok bileşenli borlama, süperplastik borlama, ötektik borlama, plazma sinterleme gibi değişik teknikler de geliştirilmiştir (Uluköy, 2005; Tabur, 2008; Çarboğa, 2010).

2.4.2.1. Kutu Ortamda Borlama Yöntemi

Durfferit (2002)'e göre, katı ortamda borlama yönteminin gerçekleştirilmesi oldukça basittir. İşleme tabi tutulacak iş parçası, sıcaklığa dayanıklı uygun bir kap içerisinde borlama maddesine sarılır, bir kapak ile kapatılır ve kap önceden ısıtılmış fırına sokulur. İşlem süresinin akışından sonra kap fırından alınır ve genelde yavaşça soğumaya bırakılır. Koruyucu gaz veya vakum kullanılması gerekli değildir, tam tersine atmosfer çıkışının kapatılmasının, borlama sonucunu daha iyi etkilediği görülür (Karaman, 2003).

Özsoy (1991) borkarbür, ferrobor ve amorf bor gibi bor verici bileşikler ile alkali metaller, amonyum bor-florürler, AlF, NaCl, NaBF₄, KBF₄, (NH₄)₃BF₄, NH₄Cl, Na₂CO₃, BaF₂ ve Na₂B₄O₇ gibi aktivatör olan dolgu maddeleri kullanılır. Bu maddeler reaktif olmayan bileşikler olan SiC ve Al₂O₃ ile belirli oranlarda karıştırılarak borlama işlemi yapılabileceğini ifade etmiştir (Karaman, 2003).

Özsoy (1991)'a göre hazırlanan kutular, önceden işlem sıcaklığına getirilmiş olan fırınlar içerisine yerleştirilmek suretiyle borlama işlemi yapılır. İşlem sıcaklıkları genellikle 800-1000°C ve işlem süreleri de 1-8 saat arasında değişir. İşlem süreleri; sıcaklığın yanında, kullanılan borlama bileşiminin ne kadar reaktif olduğuna da bağlıdır. Katı ortam bileşiklerinden, metale bor transferi mekanizmasının tam olarak açıklanamamış olmasına rağmen, gaz fazı reaksiyonlarının önemli olduğu bildirmiştir (Uzun, 2002; Karaman, 2003; Özmen, 2007).

Fichtl (1981) borlama sıcaklığını, borlanacak malzemenin bileşimine bağlı olarak belirlenmesi gerektiğini ifade etmektedir. Bunun için gri dökme demir, tungsten karbür ve diğer karbürler hariç bu sıcaklık 800-1050°C arasında seçilmesi gerektiğinin önermektedir. Gri dökme demir 850-880°C'yi geçmeyen sıcaklıklarda borlanmalıdır. Tungsten ve diğer karbürler 900°C'nin altındaki sıcaklıklarda borlanmalıdır (Can, 2009).

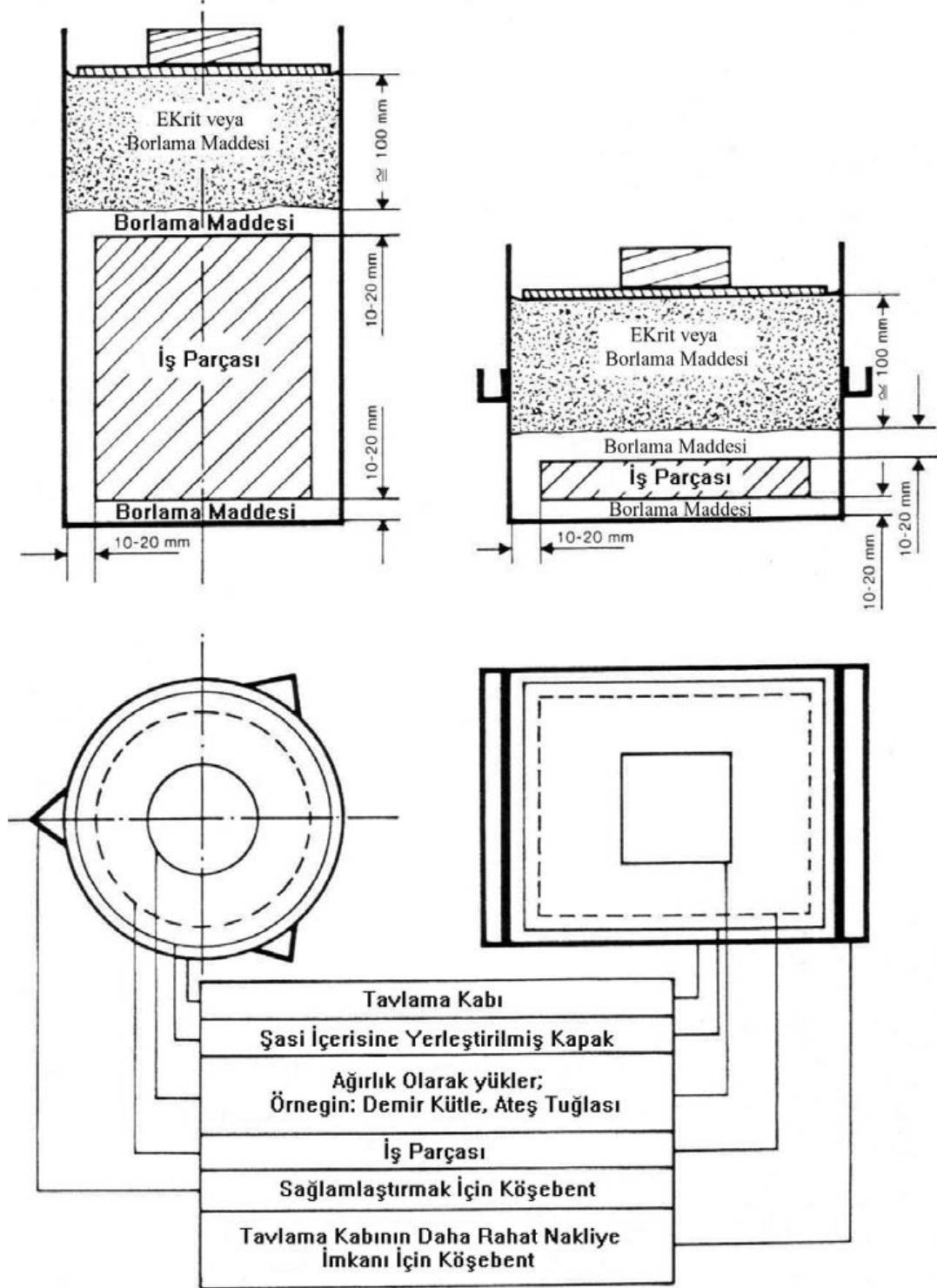
Borlama ortamı bileşenleri; 3-5 mm kalınlığındaki ısıya karşı dirençli alaşımsız çelik, paslanmaz çelik veya alümina kutular içerisine, temizlenmiş her bir numunenin etrafında en az 1-2 cm kalınlıkta olacak şekilde doldurulur. Numunelerin alt ve üst kısmı yaklaşık 10 cm kalınlık olacak şekilde borlama tozuyla kaplanır. İşlemden siliyum karbür (SiC) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) dolgu maddeleri olarak görev yaparlar ve reaksiyona iştirak etmezler. Fakat SiC, bor miktarını kontrol eder. Parçaların içine konulduğu kutular, ya kabın içine girebilen, üzerinde ağırlık bulunan bir kapakla kapatılarak ya da nötr bir atmosferde borlama işlemine tabi tutulur. Kapak üzerine koyulan ağırlık, borlama tozunun eşit şekilde etkimesini sağlar. Daha sonra kutu, belirli bir süre borlama sıcaklığına kadar elektrikle ısıtılır. İşlemden kullanılan toz %20-50 oranında taze toz ile karıştırılarak 5-6 kez yeniden kullanılabilir (Karaman, 2003; Emekçiler, 2006; Yazıcı, 2006).

Borlama maddesinin tane boyutu küçüldükçe temas yüzeyi artar. Temas yüzeyinin artması yayılımı kolaylaştırır, dolayısıyla borür tabakasının kalınlığı artar. Borlama, kaynaklı birleştirmelerde başarı ile uygulanabilir (Ayter, 2005).

Bu yöntemin avantajları; işlem basitliği, oldukça düzgün yüzeylerin elde edilmesi, gerekli ekipmanların kolay bulunabilmesi ve ucuz olmaları, toz bileşimin kolayca değiştirilebilir olması ve işlem sonu parça yüzeyinin kolay temizlenebilmesidir. Bu yöntemin yaygın olarak kullanılmasının nedeni avantajlarının diğer borlama yöntemlerinin avantajlarına göre daha çok olmasıdır. Dezavantajları ise işlem parametrelerinin kontrol yeteneğinin kötü olması, otomasyonun mümkün olmaması ve atık ürünlerinin çevreye zararlı olmasıdır. Bu durumda cam suyu ve gliserin gibi maddeler bağlayıcı olarak kullanılır (Pazarlıoğlu, 2006; Tabur, 2008).

Matuschka (1980) ekonomik nedenler ve düzenli sıcaklık verme gerekliliği dolayısıyla, kabın şeklinin iş parçasına uygun seçilmesi tavsiye etmektedir. Bilhassa ekstrüder vidalarda olduğu gibi, yuvarlak uzun iş parçalarında bu önemlidir. Şekil 2.17.'de yuvarlak cisimlerin nasıl paketlenmesi gerektiği gösterilmektedir. İnce uzun parçalar köşe profilli ince borularla desteklenmelidir. Parçaların eşit ölçüde ısınabilmesi için, karışık geometriye sahip seri üretim parçaları, büyük bir tane pota

içinde değil de, birkaç tane küçük potada borlanması daha uygun olmaktadır (Karaman, 2003).



Şekil 2.17. Örnek borlama kabı şekli (Karaman, 2003)

2.4.2.2. Sıvı Ortamda Borlama Yöntemi

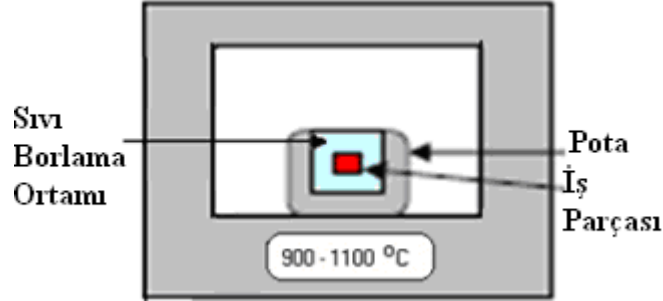
Borlama şartlarında ortam sıvıdır. Bor bileşikleri, aktivatör ve redükleyici maddelerden oluşan ergimiş tuza, iş parçasının daldırılması yöntemidir. Daldırma süresi borlama süresidir. Sıvı ortamda kimyasal reaksiyonların daha hızlı olmasından kaynaklanan yüksek aktivite nedeniyle, sıvı ortamda borlama geniş ölçüde kullanılmaktadır. Borlama işlemi, 800-1000°C arasındaki sıcaklıkta 2-6 saat süre bekletilerek gerçekleştirilir. Borlama banyosunda, bor kaynağı olarak boraks ve redükleyici madde olarak genelde B₄C ve SiC tozları kullanılır. Borlama sırasında elektrik akımı uygulanıyorsa elektrolitik borlama uygulanmıyorsa normal sıvı ortamda borlama söz konusudur (Özsoy, 1991; Uzun, 2002; Barış, 2007; Tabur, 2008).

Normal sıvı ortamda borlama: Sıvı ortam borlamasında banyo bileşimi olarak genelde; %(60-80) boraks ve %(20-40) oranında B₄C, ferrabor, kalsiyum hegzabor gibi bor verici bileşikler ile SiC, Fe-Si, Fe-Mn, Ca, Ca-Si, Al-Mg, Li-Zr, Al, Ti, Mg, Li, Zr, Ge, Be ve toprak alkali metallerine sahip redükleyici maddelerin karışımı kullanılır. Boraksa ilaveten banyoya Fe-V, Fe-Nb, Fe-Cr veya Cr tozlarının katılması durumunda V, Nb veya krom karbür tabakaları oluşur. Boraks banyolarında, oksit oluşum serbest enerjileri B₂O₃'ün oluşum serbest enerjisinden daha düşük elementleri içeren banyolarda da karbür tabakaları oluşur. Sıvı ortam borlamasında redükleyici maddeler zamanla banyonun dibine çökelerek banyo akıcılığını olumsuz etkiler. Bunu önlemek amacıyla banyo özgül hacminin (numunenin birim yüzey alanı başına düşen banyo hacmi) 10-20 cm³ veya üzerinde olması gerekir. Banyo akışkanlığını artırmak amacıyla banyoya NaCl, NaF veya B₂O₃ ilave edilmesi tavsiye edilir. Normal sıvı ortam borlamasında, borlanan metal ve redükleyici madde arasında anodik ve katodik reaksiyonlar meydana gelir. Bor ile kaplanan metal yüzeyinde katodik, redükleyici madde yüzeylerinde ise anodik reaksiyon oluşmaktadır. Bu reaksiyonların etkinliği aşağıdaki şartlara bağlıdır (Özsoy, 1991; Karaman, 2003; Turhan 2008; Tabur, 2008; Yurtseven, 2008; Can, 2009):

- Metal ve redükleyici madde arasındaki elektrot potansiyel farkına,
- Banyonun direncine,
- Metal ile redükleyici madde arasındaki temas direncine,

- Galvalik elemanın toplam omik direncine.

Şekil 2.18.'de numunenin borlama sıvısına daldırılması gösterilmektedir.



Şekil 2.18. Numunenin borlama sıvısına daldırılması (Can, 2009)

Difüzyon reaksiyonu esnasında katod potansiyeli, yüzeyde oluşan fazın potansiyel işaretini alır. Difüzyon ile yüzey bileşiminin değişimi yüzeyin elektrot potansiyeli anod potansiyeline eşitleninceye kadar devam eder. Örneğin demirin borlanması Si, B₄C, Ti gibi redükleyici maddelerin kullanılması durumunda demir tabakası üzerinde FeB, Fe₂B fazlarının her ikisine de teşekkül eder. Çünkü bahsedilen redükleyici maddelerin elektrod potansiyelleri Fe₂B, FeB fazının her ikisinden de daha negatiftir. Aynı şekilde demirin borlanması SiC'nin redükleyici madde olarak kullanılması durumunda borlanan yüzeyde yalnızca Fe₂B fazı oluşur. Çünkü SiC'nin elektrod potansiyeli Fe₂B fazı potansiyelinden daha negatif, FeB fazı potansiyelinden ise daha pozitif bir değerdedir.

Sıvı ortam borlamasının başarıyla uygulanabilmesi aşağıdaki şartlara bağlıdır (Özsoy, 1991; Tabur, 2008):

- Ergimiş banyo ortamı bir difüzyon elementi içermeli ve çok iyi bir iletkenlik özelliği göstermelidir.
- Ergimiş banyo içerisinde redükleyici maddenin potansiyeli difüzyon uygulanan metalin potansiyeline göre daha negatif olmalıdır.
- Ergimiş banyo içerisinde redükleyici madde katı halde bulunmalı ve homojen bir dağılım göstermelidir.

Elektrolitik borlama: Elektrolitik borlama, boraks veya borik asit gibi bor içeren ve Na_2O , ZrO_2 , SiC , NaCl , lityum veya potasyum gibi aktiviteörleri içeren bir sıvı banyodan bor atomlarının, katod görevi üstlenen parça yüzeyinde elektrolitik olarak biriktirilmesi işlemidir. Grafit bir elektrot da anot görevini üstlenir. İşlem sıcaklıkları genellikle $800-900^\circ\text{C}$ ve işlem süreleri 0,25-4 saat civarındadır. Daha düşük sıcaklıklarda işlem yapmak için boraksa ilave olarak; ağır metallerin oksitleri (PbO , Bi_2O_3), fosfatlar (Na_2SO_3), alkaliler (NaOH) ve klorürler (NaCl) katılır. Bu amaçla daha çok, NaCl , fosfat ve alkaliler kullanılır. Akım yoğunluğu $0,5-2,5 \text{ A/dm}^2$, gerilim 2-14 volt olarak uygulanır. Genel olarak, düşük alaşımlı çeliklerde yüksek akım yoğunluğu ile ince difüzyon tabakaları elde edilirken, yüksek alaşımlı çeliklerde veya daha kalın tabakaların gerekli olduğu hallerde, daha düşük akım yoğunluğu ve daha uzun süreler uygulanır. Keza, daha düşük akım yoğunluğu, daha büyük demir-bor kristalleri ve daha kaba (pürüzlü) bir yüzey verirken; daha yüksek akım yoğunluğu ile borlamada daha çok kristalin çekirdeklenmesi sonucu, daha düzgün bir yüzey elde edilebilir (Özsoy, 1991; Barış, 2007; Turhan 2008; Tabur,2008; Can 2009).

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 $0,1 \text{ A/cm}^2$ 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; Uzun, 2002).

Sıvı ortamda borlama yönteminin avantajları (Barış, 2007, Yurtseven, 2008):

- İşlem ucuzdur.
- Fazla ihtisas istemez.

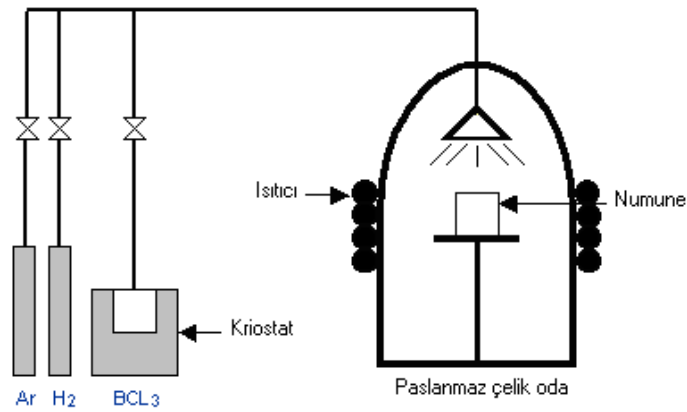
İşlemin dezavantajları (Akbayır, 2005; Develi, 2010):

- Sıvı ortamdaki radükleyici maddeler zamanla banyonun dibine çökerek banyo akıcılığını olumsuz yönde etkiler.

- Tuz kalıntılarının malzeme üzerinde kalması ve ortamda reaksiyona girmeyen borun varlığı zaman ve para kaybına yol açar.
- Borlama işleminin başarılı olabilmesi için banyo viskozitesinin artırılmaması gerekir ve bu sebeple tuz ilavesi yapılmaktadır. Bu da işlemin maliyetini arttırmaktadır.
- İşlem için malzemeyi korozif ortamlardan koruyacak fırınlara ihtiyaç vardır.
- Büyük boyutlu kompleks parçalara uygulanamaz.
- Demir esaslı malzemelerin elektrolitik sıvı borlama işlemi, 900-950°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir.

2.4.2.3. Gaz Ortamda Borlama Yöntemi

Gaz bor vericiler ile borlamanın yapılabileceğini ilk öneren kişi Moissan'dır. Boron hidritlerin termal parçalanması sonucu elde edilen buharla yapılan borlama işlemidir. Gaz borlama işleminde kullanılan bor taşıyabilen gazlar, bor halojenler veya bor hidrürlerdir. Gaz ortamının bileşimi basıncı ve gazın depodan akış hızı gaz borlamaya etki eden faktörlerdir. Gaz borlamada gaz sirkülasyonu sonucu daha uniform bir bor dağılımı ve yayınının sağlanabilmesi, borlama işleminden sonra temizleme gerektirmemesi en önemli avantajlarıdır. Bor potansiyelinin ayarlanabilmesinden dolayı tek fazlı homojen borür tabakası elde etmek mümkün olmaktadır. İşlem özellikle karışık şekilli parçaların borlanması ve homojen tabaka elde edilmek istendiğinde tercih edilen bir yöntemdir. Şekil 2.19.'da borlama ünitesi gösterilmiştir (Özsoy, 1991; Çelikyürek, 2006; Tabur, 2008, Develi, 2010).



Şekil 2.19. Gaz ortamda borlama ünitesi (Tabur, 2008)

Bozkurt (1984) gaz ortamın bileşimini, basıncını ve gazın tanktan akış hızını borlamaya etki eden faktörler olarak ifade etmiştir. Gaz ortamda borlama yapmak için bor verici ortam olarak bor halojenleri, diboran (B_2H_6) ve organik bor bileşikleri kullanılabilceğini belirtmiştir. 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 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 (Uzun, 2002; Özmen, 2007; Ulutan, 2007; Yurtseven, 2008).

$(B_2H_6)H_2$ karışımı, zehirli ve patlayıcı olma özellikleri sebebiyle ticari olarak kullanılmamaktadır. Organik malzemeler kullanıldığı takdirde borür ve karbür bileşikleri birlikte oluşmaktadır. BBr_3 , çok pahalı ve suyla olan kuvvetli reaksiyonu ayrıca yüksek sıcaklıkta kararlılığının ayarlanması için BF_3 'e ihtiyaç duyulması sebebiyle kullanım açısından tercih edilmemektedir. Gaz borlama işlemi için en çok BCl_3 tercih edilmektedir (Sinha, 1991; Kayalı, 2006; Ersöz, 2008; Tabur, 2008).

Amerika'da geliştirilen bir yöntem ise bor ve borkarbürden ayrılan 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. Bor triklorit ile yapılan borlama esnasında ayrılarak 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_3 'den 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 (Uzun, 2002; Yılmaz, 2005; Yurtseven, 2008).

Gaz ortamda borlama işleminin avantajları (Barış, 2007; Ersöz, 2008; Turhan, 2008):

- Gaz ortamda borlama işleminde bor potansiyeli ayarlanabilir. Böylece tek fazlı bir borlu tabaka elde etmek mümkün olur.
- Gaz ortamda borlama işleminde bor dağılımının düzenli olması nedeniyle homojen kaplama kalınlıkları elde edilir.
- Gaz ortamda borlama işlemi neticesinde parçalar temiz yüzeyli olarak elde edilir. Bu sebeple borlanmış malzemenin yıkanmasına ihtiyaç yoktur.
- Katı borlama işlemine göre gelişmiş sıcaklık kararlılığı ve elde etme kolaylığı sağlar.
- Gaz sirkülasyonunun bir sonucu olarak borun daha çok yayılması sayılabilir.

İşleminin dezavantajları (Özsoy, 1991; Karaman, 2003; Yılmaz, 2005; Barış, 2007; Ersöz, 2008; Develi, 2010):

- Gaz ortamda borlama işleminde kullanılan bor bileşikleri çok zehirli ve çok pahalıdır. Diboran, hidrojen ile karıştırıldığında bile çok pahalıdır.
- Bor halojenürleri korozyona neden olurlar ve istenmeyen metal halojenürler oluşur. Gaz ortamın bileşimi, basıncı ve gazın tanktan akış hızı borlamayı etkiler.
- Tesis maliyeti çok yüksektir.
- Diboran, kullanılan temel bileşiktir ve çok zehirlidir. Diboran için en düşük zehirlilik sınırı 0,1 ppm'dir.
- Trimetilbor (CH_3)₃B ve trietilbor (C_2H_5)₃B ile yapılan gaz ortam borlamasında, bu bileşiklerin yüksek oranda karbon içermeleri sebebiyle karbürizasyon söz konusu olabilmektedir. Borlama ile birlikte C yayılımına neden olarak tabaka kalitesini bozar. Bu etki trimetilborda, trietilbordadan daha kuvvetlidir.

2.4.2.4. Macun (Pasta) Ortamda Borlama Yöntemi

Kutu borlamanın zor ve pahalı olduğu veya fazla zaman kaybının olduğu durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Karmaşık şekilli parçaların tamamen veya kısmen seri bir şekilde borlanması, borlama pastası ile yapılabilir. Bu proseste %45 B₄C ve %55 kriyolit (Na₃AlF₆ ilaveli) veya geleneksel borlama toz karışımı B₄C+SiC+KBF₄ iyi bir bağlayıcı ile (metil selülozun sulu çözeltisi gibi) uygulanmaktadır. Hazırlanan borlayıcı karışım yani pasta, malzemenin üzerine sürülerek veya püskürtülerek 1-2 mm civarında kalınlıkta tabaka oluşturulmakta ve kurutulmaktadır. İşlem, demir esaslı malzemelere geleneksel fırınlarda 800-1000°C arasında 5 saat süreyle uygulanmaktadır. Bu işlemde koruyucu atmosfer olarak Ar (argon), NH₃ veya N₂ (azot) kullanılmaktadır. Borlayıcı ürünün davranışı, gaz özellikleri tarafından büyük oranda etkilenir. Argon en iyi sonucu verse de NH₃ de kullanılabilir. Endotermik veya CO (karbon monoksit) ihtiva eden gazlar kullanılamazlar. Büyük parçaların veya seçilmiş alanların borlanması için oldukça elverişlidir. 50 µm'lik bir tabaka kalınlığına 20 dakikada 1000°C'ye ısıtılarak erişilebilir (Sinha,1991; Uzun, 2002; Karaman, 2003; Akbayır, 2005; Ersöz, 2008; Can, 2009).

Parça yüzeyine sürülen macun derhal sıcak hava akımında, ön ısıtma odasında veya kurutma fırınında maksimum 150°C'de kurutulması gerekir. Gerektiği 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. Katı borlamaya göre işlem süresi daha kısadır. Bu yöntemin önemli bir dezavantajı, borlama işleminden sonra numune yüzeyine macunun yapışmasıdır. Bu etkiyi en aza indirmek için sulu sodyum silikat çözeltisi, organik karakterli çözeltiler ve %3 polivinil alkol ya da %0,5 metil selüloz içeren sulu çözeltiler kullanılabilir (Uzun, 2002; Yılmaz, 2005; Turhan, 2008; Develi, 2010).

Durferrit (2002) atmosfer kontrollü fırınlarda Ekabor-Paste ve Durborid-Paste gibi özel borlama malzemelerinin kullanıldığını belirtmiştir. Gaz atmosferindeki azot ve

hidrojen oranları 90:10 veya 95:5'tir. Saf azot veya argonu tavsiye etmemektedir. Saf azot veya argon gazı kullanıldığı takdirde katı ortam borlamaya göre nispeten daha ince tabakalar elde edilebileceğini ifade etmiştir (Karaman, 2003; Yurtseven, 2008).

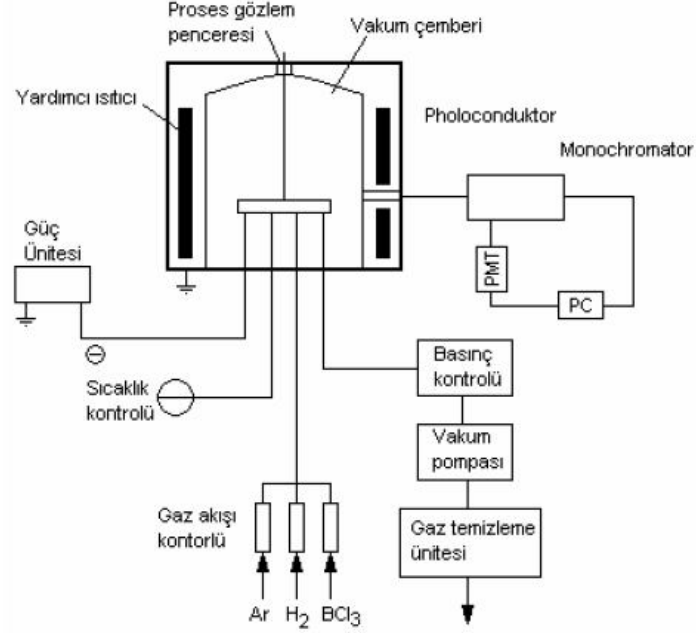
Durferrit (2002)'e göre, pasta borlama yöntemi, katı ortamda borlama işlemine göre özellikle zamandan tasarruf edilmesi yönüyle (\cong %50), alternatif bir borlama işlemidir. Aynı işlem şartları altında, katı ortamda borlama işlemine göre daha kalın tabakalar elde edilmektedir. Özellikle büyük hacimli karışık şekilli parçalarda bu yöntemin tercih edilmesi, diğer borlama yöntemlerine göre ekonomiklik sağlamaktadır. Bu yöntem, kısmi borlama işlemlerinde de kullanılabilir. İş parçasına bu yöntemin tatbik edilmesi daldırma, püskürtme veya fırçayla yapılabilir. İş parçası ile macun arasında hava kabarcıklarının kalmamasına dikkat edilmesi gerekmektedir. 1,5-3 mm kalınlıktaki bir pasta tabakası 100 μ m kalınlığında borür tabakası oluşumunu sağlamaktadır (Karaman, 2003; Yılmaz, 2005).

2.4.2.5. Plazma (İyon) Ortamda Borlama Yöntemi

Katı haldeki bir maddeyi enerji vererek sıvı, sıvı haldeki maddeyi enerji vererek gaz; ve gaz durumdaki maddeyi enerji vererek plazma haline getirmek mümkündür. Plazma, içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötral atom veya molekül içeren karışımdır. Uygulamada plazma, ısı enerjisi verilerek, ışınla veya elektriksel boşalma ile elde edilir. En yaygın kullanılan plazma yöntemi elektriksel boşalmadır (Ayter, 2005; Barış, 2007; Yurtseven, 2008; Can, 2009).

Plazma ile borlama işlemi ile 20 yıldan daha fazla süredir çalışılmasına rağmen henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Demir esaslı ve demir dışı metalik malzemelere uygulanan Ar, H₂ gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl₃, B₂H₆, BF₃, B(OCH₃)₃ (trimetilborat) kullanarak 800-1000°C sıcaklıkta, yaklaşık 10⁻² Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan borlamadır. Mikroyapı ve demirbor tabakalarının büyümesi işlem sıcaklığı, gaz karışım oranları, malzeme kompozisyonları, işlem basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla kontrol edilebilmektedir (Ayter, 2005; Pazarhoğlu, 2006; Barış, 2007; Tabur, 2008; Can, 2009; Develi, 2010).

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan bir plazma borlama ünitesinin şematik olarak Şekil 2.20.'de verilmiştir.



Şekil 2.20. Plazma ortamda borlama ünitesi (Tabur, 2008)

İşlem sıcaklığı diğer borlama yöntemlerine kıyasla düşmekte 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 başlar. 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 partiküller (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 başlar (Uzun, 2002; Yılmaz, 2005).

Plazma ortamda borlama işleminin avantajları (Akbayır, 2005; Yurtseven, 2008; Turhan, 2008):

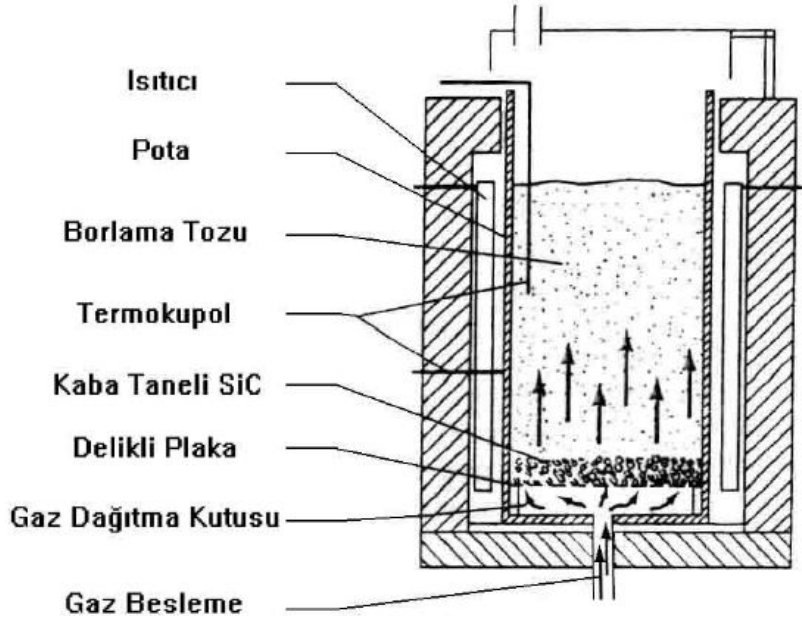
- Borlanan tabakanın bileşim ve derinlik kontrolünün yapılabilmesi,
- Klasik paket borlamaya kıyasla daha yüksek bir bor potansiyeli olması,
- Daha ince borlu tabakaların elde edilebilmesi,
- Kullanılan sıcaklık ve işlem süresinin kısalığı,
- Yüksek sıcaklık fırınlarına ve aksesuarlara ihtiyaç olmaması,
- Kompleks parçalarda homojen difüzyon tabakası ve sertlik sağlanması,
- İşlem çok yoğun enerjide gerçekleşmesi,
- Bu yöntemle yüzeyde tek fazlı Fe₂B tabakası elde edilebilmesi,
- Daha büyük boyutlu taban malzemeleri (özellikle katı borlamaya göre) işleyebilme,
- Zehirlilik, patlayıcı yapı ve çevre kirliliğini kontrol olanağı,
- İşlem sonrası daha düşük distorsiyon,
- Enerji ve gaz sarfiyatında tasarruf sağlanmaktadır.

İşleminin dezavantajları (Yurtseven, 2008; Turhan, 2008):

- Kullanılan atmosferin aşırı zehirli olmasıdır.

2.4.2.6. Akışkan Yatak Ortamında Borlama Yöntemi

Macun ve sıvı borlama yönteminin karışımı olan bir yöntemdir. Burada bor verici akışkan olarak meydana gelen bir karışım kullanılmaktadır. İri taneli SiC parçacıkları, Ekabor WB gibi özel borlama tozu ve N₂-H₂ karışımı gibi oksijensiz bir gazın taban malzemesini içeren akışkan yatak içinde, borlama yapılan bir yöntemdir. Elektrik, ısı kaynağı olarak kullanıldığı zaman, taban daha hızlı bir ısı transfer ortamı oluşturur. Bu nedenle sistem soğutma ve tavlama fırınlarıyla donatılmıştır. Şekil 2.21.'de akışkan yatakta borlama işlem sistemi gösterilmektedir (Karaman, 2003; Tabur, 2008; Turhan, 2008).



Şekil 2.21. Akışkan yataқта borlama ünitesi (Karaman, 2003)

Akışkan yatak ortamında borlama işleminin avantajları (Karaman, 2003; Akbayır, 2005; Yurtseven, 2008; Tabur, 2008; Turhan, 2008):

- Borlama sıcaklığına aniden çıkma ve daha kısa süreli işlem göreceğ parçaları doğrudan dışarıya alma ile birlikte malzemede daha az ısıl gerilme oluşmaktadır.
- Bor ve borlanan malzeme arasındaki çok yüksek ısı transfer hızı sebebi ile mükemmel ısıl kararlılığa sahip olunmaktadır.
- Sürekli seri ve otomatik çalışma imkanı vardır.
- Borlanacak parçalar aralıklı bir şekilde şarj edilir ve fırından alınabilir.
- Borlama sonrası parçaya doğrudan su verilebilir. Bu ise borlama ve su verme işlemlerini tek bir kademede yapmak demektir.
- Seri üretilmiş parçaların işlemlerinde zaman ve enerji tasarrufu sağlar.

İşleminin dezavantajları (Karaman, 2003; Tabur, 2008):

Bu yöntemin önemli bir dezavantajı, soygaz vasıtası ile damıtma kabı içerisinde damıtma maddesinin sürekli çalkalanmasıdır. Zenginleşmiş florür bileşimleri ihtiva eden atık gazlar kesinlikle temizlenmelidir.

2.4.2.7. Çok Bileşenli Ortamda Borlama Yöntemi

Çok bileşenli borlama bor elementi yanında, alüminyum, krom, silisyum, vanadyum ve titanyum gibi metalik elementlerden bir veya birkaçının, çelik yüzeyine aynı anda veya birbiri ardına yayındırılması esasına dayanan termokimyasal bir işlemdir. Katı ortamda yapılabildiği gibi sıvı boraks ortamında da yapılabilmektedir.

Çok bileşenli borlama, genellikle iki kademeli bir işlem olarak, 850-1050°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada borlama işlemi, geleneksel yöntemlerden biriyle yapılmaktadır ve daha çok kutu borlama tercih edilmektedir. FeB fazının oluşumu iyi sonuçlar vermekte ve 30 µm civarındaki kaplamalar yeterli olmaktadır. İkinci aşamada, elementin tabakaya difüzyonu gerçekleştirilmektedir.

Kutu borlama sırasında oluşan sinterleşmeyi önlemek için ortamdan Ar veya H₂ gazı geçirilmektedir. Çok bileşenli borlama; bor-alüminyumlama, bor-silisyumlama, bor-kromlama, bor-krom-titanyumlama, bor-krom-vanadyumlama ve bor-vanadyumlama şeklinde altı gruba ayrılmaktadır.

Bor-silisyumlama ile işlem gören parçaların yorulmalı korozyon dirençlerinde artış sağlanırken, bor-alüminyumlama ile rutubetli ortamlarda daha iyi korozyon ve aşınma direncine sahip parçalar elde edilmektedir. Bor-kromlama işlemi ile bor-alüminyumla işlemindekinden daha yüksek oksidasyon direncine ve geleneksel borlamadakinden daha iyi korozyon ve yorulma korozyon direncine ulaşılmaktadır. Bor-kromlanmış parçaların ısıtma işlemleri, bu sebepten dolayı kontrollü atmosfer gerektirmeksizin gerçekleştirilebilmektedir. Bor-krom-titanyumlama işlemi sonrasında parça yüzeyinde 5000 HV sertlik değerine sahip titanyum borür tabakası oluşmakta, bu da çok yüksek abrasiv aşınma ve korozyon direnci sağlamaktadır. Bor-vanadyumlama ve bor-krom-vanadyumlama işleminde sertliği 3000 HV olmasına rağmen oldukça sünek tabakalar elde edildiğinden, bu işlem, darbeli yüklemelere maruz kalacak olan parçalara uygulanabilmektedir (Akbaş, 2005; Köseli, 2008).

2.4.3. Borürlerin Özellikleri

Bor, periyodik tablodaki birçok elementle bileşik oluşturmaktadır. Borür bileşiklerinin çoğu kuvvetli kovalent bağ yapısına sahip olduklarından ergime sıcaklık dereceleri, elastisite modülleri ve sertlik değerleri oldukça yüksektir (Köseli, 2008).

Genelde borürlerin ısı iletkenlik katsayıları ve termal şok dirençleri oldukça yüksektir. Borürler diğer seramiklerle kıyaslandığı zaman, son yıllarda yapılan çalışmalarda, yüksek sertlik ve mukavemet değerleri sergilemelerine rağmen gerçekte orta derecede mukavemet ve tokluk değerlerine sahiptirler. Birçok borür, 5-80 $\mu\Omega/\text{cm}$ aralığında elektriksel dirence sahiptir ve seramikler arasında iyi iletkenlik gösterir. Borürlerin manyetik özellikleri incelendiğinde, diamanyetik özellikten kuvvetli ferromanyetik özelliğe değiştiği fakat birçok borürün oda sıcaklığında zayıf paramanyetik özellik gösterdiği görülmektedir. Borürlerin kimyasal dirençleri, birçok seramiğe nazaran oldukça yüksektir. Bağlardaki kovalentlik derecesi arttığı zaman, borürlerin ergime sıcaklığı, elastik modülü ve sertliği artmaktadır. Çoğu metal borürler yüksek ergime sıcaklıklarına sahiptir. Monoborürler ve diborürlerde stokiometrik olmama, bor zincirleriyle veya kafes boşluklarıyla artmakta, ancak metal boşluklarından etkilenmemektedir. Benzer kristal yapıları ve kafes yapısında olan borürler katı çözelti oluşturmaktadır (Akbayır, 2005; Ersöz, 2008).

2.4.4. Borür Tabakasının Özellikleri

Demir ve çelik cinsi malzemelerde, borlama işlemi sonucunda ana yapının dışında borür tabakası ve geçiş bölgesinden oluşan iki farklı yapı meydana gelmektedir. Borür tabakası malzemenin en dış yüzeyi ile yüzeyin altındaki parmaklı (dişli) kısım arasında verilen addır. Bu bölgeye difüzyon bölgesi de denilmektedir. Borlama sırasında, bor atomlarının difüzyonu ile yüzeyde metal kafesi içerisinde bor bileşikleri oluşur. Bu tabaka tek fazlı veya çok fazlı borürlerden oluşabilir. Bor tabakasının şekli, büyüklüğü, oluşan fazların kompozisyonu ve bor tabakasının sertliği ana malzemenin kimyasal kompozisyonuna bağlıdır (Barış, 2007; Turhan, 2008).

Borür tabakası ile metal arasındaki geçiş bölgesinde de sertlik artışı meydana gelmektedir. Bu, bor elementinin metalde alaşım elementi etkisi göstermesinden kaynaklanır. Borür tabakalarının çatlaması konusunda yapılan araştırmalar sonucunda FeB ve Fe₂B fazlarının farklı ısıl genleşme katsayılarına sahip olması sebebiyle çatlak oluşumuna neden olduğu görülmüştür. Bu iki faz arasında yüzeye paralel çatlakların yanında yüzeye dik olarak ilerleyen çatlaklar da yer almaktadır (Barış, 2007).

Taktak vd., (2008)'e göre, genellikle sade karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin termo-kimyasal yöntemlerle borlanması sırasında oluşan borürler kolonsal halde büyümektedir. Bor kaynağından borür ve ana metal ara yüzeyine sürekli olarak yayılan bor atomları, bor tabakasına dik doğrultuda Fe₂B kristalleri oluşturmakta ve bu kristaller kolonsal bir şekilde içeriye doğru ilerlemektedir. Demir esaslı malzemelerin borlama işlemi sonrasında çok fazlı borür tabakasında, FeB fazının büyüme mekanizması, matrisin hemen üzerinde oluşan Fe₂B fazı ile benzerlik göstermektedir. Borlama işlemi neticesinde demir matrisli malzemelerde yüzeyde FeB, Fe₂B ve geçiş bölgesi oluşabilmektedir. Bu faz yapıları tek olarak ya da birkaç yapı bir arada olacak şekilde kombine olabilirler (Develi, 2010).

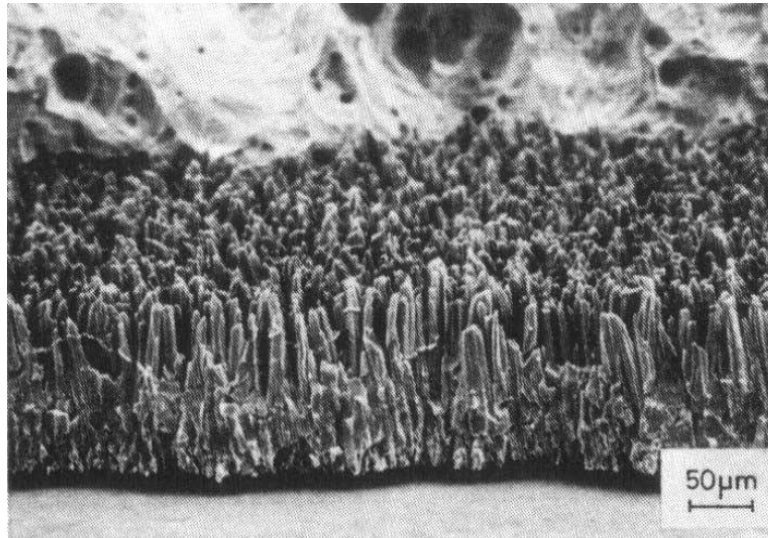
2.4.4.1. Borür Tabakasının Yapı ve Bileşimi

Özsoy (1991)'a göre, demir ve alaşımlarının borlanmasında, ya tek fazlı (Fe₂B) veya çift fazlı (FeB+Fe₂B) borür tabakaları elde edilir. Borlayıcı ortamdan sağlanan aktif bor, Fe₂B oluşumu için, esas malzeme tarafından tüketilen miktardan daha fazla olduğu işlem şartlarında sadece Fe₂B oluşmaz, aynı zamanda Fe₂B'e göre borca daha zengin reaksiyon ürünleri de meydana gelebilir (Karaman, 2003; Yılmaz, 2005).

Durferrit (2002)'e göre, borür tabakasının pürüzlülük derecesi, temel materyal ile söz konusu malzemenin ihtiva ettiği alaşım miktarına bağlıdır. Kuvvetli pürüzlülük karbonlu çelikler ve düşük alaşımlı dökme çeliklerde ortaya çıkar. Alaşım elementinin miktarının artması ile pürüzlülük zayıflar, öyle ki örneğin; %18 Cr ve %8 Ni ile çeliklerde düz katmalı tabaka meydana gelir (Karaman, 2003).

Eğer borlama maddeleri ile çalışıldığında, yüksek borlama potansiyeli söz konusu ise, iki fazlı borür tabakası meydana gelir. Bu tabakanın dış kısmı FeB'den, içinde ise Fe₂B'den meydana gelmektedir. FeB, Fe₂B ile kıyaslandığında daha yüksek sertliğe sahiptir, fakat kırılmandır. Bunun için, borlama maddesinin bor potansiyeline bağımlı olarak farklı tabaka tipleri üretilebilir. FeB ve Fe₂B optik mikroskop altında kontrast farkıyla birbirlerinden ayırt edilmesi mümkün olmuştur. FeB fazı Fe₂B fazından daha koyu renkte olduğu görülmüştür. Ayrıca FeB ile Fe₂B ve Fe₂B ile matris ara yüzeyindeki yapı kolonsaldır. FeB fazı, Fe₂B üzerinde oluşmakta ve Fe₂B fazından daha fazla bor içermektedir. Bor tabakasının kalınlığı borlama sıcaklık ve süresine bağılı olarak artış göstermektedir (Karaman, 2003; Yılmaz, 2005).

Taramalı elektron mikroskopunda elde edilen; borlanmış bir çeliğin %18 hidroklorik çözeltisi içinde birkaç saat kaynatılması sonrası çözünmüş, yaklaşık 120 µm uzunluğunda dış biçimli demirborür kristalleri (Fe₂B) Şekil 2.22.'de görülmektedir (Karaman, 2003; Yılmaz, 2005; Şimşek, 2005).



Şekil 2.22. Dış biçimli demirborür (Fe₂B) kristalleri (Karaman, 2003)

Yünker (2000)'e göre, borür tabakasının karakteristik özelliği dış şeklinde bir yapıya sahip olmasıdır. Çeliklerdeki alaşım elementi ve karbon oranının artmasıyla bor difüzyonu yavaşlamaktadır. Bunun sonucu olarak borür tabakasında hem kalınlık azalmakta, hem de borür tabakası ile ana malzeme ara yüzeyindeki dış şeklindeki yapı düzleşmektedir (Şimşek, 2005; Can, 2009).

2.4.4.2. Borür Tabakasının Oluşumu ve Büyümesi

Özsoy (1991)'a göre, demir esaslı malzemelerin borlanması sonucu oluşan tabaka, genellikle demir borürlerin çekirdeklenmesi ve gelişmesi şeklinde meydana gelmektedir. Demir borürler termal ve elektrik iletkenliği gibi metal özelliklerinden başka yüksek sertlik gibi tipik seramik özellikleri de gösteren bileşiklerdir. Demir borürler, kullanılan malzemeler ve işlem şartlarına bağlı olarak tek fazlı ya da birden fazla fazlardan oluşabilirler. Borür tabakasının oluşumunda başlangıç noktaları, tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları gibi mikro hatalar ile yüzey pürüzlülükleri ve çizikler gibi yüzeyin daha reaktif olduğu yerlerdir. Bu noktalarda Fe_2B çekirdekleri oluşur ve gelişirler. Yüksek saflıktaki demirde olduğu gibi demir-bor reaktifliğinin düşük olduğu şartlarda da, bu noktalardan sadece birkaçı reaksiyona girer ve gelişigüzel çekirdekler meydana gelir. Ortamın bor potansiyelinin daha yüksek olduğu durumda, metal yüzeyindeki daha az reaktif noktalarda devreye girerek sürekli bir tabaka elde edilir. Fe_2B fazının dış yüzeylerinde FeB ve FeB_{1+x} bileşiklerinin meydana geldiği tespit edilmiştir (Can, 2009; Çarboğa, 2010).

Borlamanın birinci aşamasında borlayıcı ortam ve nesnenin yüzeyindeki reaksiyon partnerleri arasında reaksiyon oluşur. Taneler yüzeyde çekirdek oluşturmaktadır. Borlama süresi ile çekirdek oluşumu artar ve ince bir bor tabakası elde edilir. Bor, Fe_2B ve FeB yapısında çeliğin yüzeyine yayılır. Borlama işlemi sırasında, ilk borür çekirdeği numunenin yüzeyinde oluşmaktadır. Difüzyon kanalı büyüme mekanizmasına göre; ortogonal prizma, bor atomlarının yayınmasını kolaylaştıracak en büyük ara kesite sahiptir ve bor atomları kafes yapının [001] doğrultusunda daha hızlı yayıldığı için FeB ve Fe_2B [001] boyunca yönlenerek bor atomları için bir yayınma kanalı oluşturur. Bu yüzden borür taneleri 001 yönünde yüzeye dik daha hızlı büyür. Borür tanelerinin diğer yönlerde büyümesi daha yavaştır. Bu nedenle kolonsal yapı oluşur. Borür tabakası [001] düzleminde incelendiğinde bor atomların zincirler şeklinde bağlı olduğu görülebilir. Z ekseninde yönlenmiş bu atomlar metalik atomlar tarafından kesilmezler. Bor difüzyonu bu zincirler üzerinde atomların komşu kafes pozisyonlarına sıçramasıyla daha hızlı gerçekleşir. Bu difüzyon mekanizması sonucu metal olmayan difüzyon yönünde paralel bor atom zincirlerinde dizilmiş borür kristalleri diğerlerinden daha hızlı büyürler (Çarboğa, 2010).

Malzeme ve işlem şartlarına bağlı olarak tek fazlı veya çok fazlı tabakalar elde edilmesine ve esas malzeme ile tabaka yüzeylerinde farklı morfolojilerin olabilmektedir. Buna rağmen, pratikte, tek fazlı (Fe_2B) ve parmaklı türde (girintili-çıkıntılı) borür tabakası, daha sonraki ısı işlemlere uygunluğu ve FeB 'a göre daha az gevrek olması sebebiyle tercih edilmektedir. Fe_2B tabakasının büyümesi konusunda iki mekanizma ileri sürülmektedir (Uzun, 2002, Tabur, 2008; Ersöz 2008):

Difüzyon kanalı büyüme mekanizması: Ortogonal 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 yayılan bor atomları, borlama tabakası yüzeyine dik doğrultuda Fe_2B kristalleri oluşturur ve bu kristaller kolonsal bir şekilde içeriye doğru büyür. Difüzyon kanalı büyüme mekanizması, bazı durumlarda ara yüzeydeki oluşan kolonlaşmayı açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Bu konuda, uçtan büyüme mekanizmasının daha geçerli olduğu ileri sürülmektedir.

Uçtan büyüme mekanizması: 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.

Çok fazlı borür tabakaları oluşumunda, FeB 'nin büyüme mekanizması, ana malzeme üzerindeki Fe_2B 'in büyüme mekanizmasına (uçtan büyüme) benzeyebilir. Aynı tabaka için FeB/Fe_2B ara yüzeyindeki kolonsallığın Fe_2B /matris ara yüzeyindekinden daha az olması oldukça dikkat çekicidir. Bu durum, mevcut fazların mekanik özelliklerindeki farklılıklarla ilişkili olabilir. Fe_2B , nisbeten sünek olan ana malzemede büyüyen bir faz iken FeB , Fe_2B üzerinde yani daha sert bir yapıda büyüyen bir fazdır. Buradan FeB 'nin, Fe_2B 'den daha sert olabileceği sonucu çıkarılabilir. Bu farklılıklar, bölgesel gerilim oluşumlarına ve/veya ara yüzeylerde kafes distorsiyonlarına sebep olabilir (Çarboğa, 2010).

2.4.4.3. Borür Tabakasından Ana Matrise Geçiş Bölgesi

Özsoy, (2001)'a göre, borür tabakası ile borlanan matris arasındaki bölge, geçiş bölgesi olarak adlandırılır. Borlama işlemi esnasında çelik bileşiminde bulunan elementler bu bölgede yeniden dağılırlar (Karaman, 2003; Şimşek, 2005).

Borür büyümesinin bir dahili süreç olduğu göz önüne alındığında, yani tepkimelerin tek fazlı tabakalarda Fe_2B /matris ve çok fazlı tabakalarda FeB/Fe_2B 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_2B tabakalarının, karbon ve silisyumu çözündürme yeteneği olmamasından dolayı, bor yayılımı esnasında C ve Si'nin borür tabakasından içeriye doğru itildikleri bilinmektedir. Bu bölgede bor, borür oluşturmayacak miktarda bulunmaktadır. Bunun sonucu olarak borür tabakası ile borlanan metal matris arasında 'geçiş bölgesi' olarak isimlendirilen bir yapının meydana geldiği ifade edilmektedir. Geçiş bölgesi, mikro yapı bakımından esas malzeme ve borür tabakasından farklıdır. Bu bölgenin kalınlığı, borür tabakasının kalınlığının 10-15 katı kadardır. 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 (Uzun, 2002; Yılmaz, 2005; Emekçiler, 2006; Barış, 2007; Turhan, 2008; Ersöz 2008; Çarboğa, 2010).

Bozkurt (1984) ise doktora tezinde geçiş bölgesindeki karbon miktarının ana malzemedeki seviyesini koruduğunu, buna karşılık borun yüzeyden içe doğru tedrici olarak azaldığını tespit etmiştir. Geçiş bölgesi hakkında başka bir görüş; bu bölgedeki borun çeliklerde alaşım elementi olarak gösterdiği etkiyi göstermesinden kaynaklanan farklı özelliklere sahip olmasıdır. Bu bölgenin ısıl işleme hassasiyeti, borun östenit dönüşümünü yavaşlatmasındandır. Ayrıca bu bölgede gözlenen östenit tane irileşmesi de, borun alaşım elementi olarak çeliklerde gösterdiği tipik özelliklerdendir (Ayter 2005; Yurtseven 2008; Can 2009).

2.4.4.4. Borür Tabakası Çeşitleri ve Sınıflandırılması

Bor vericilerin borlama işlemi için uygun olup olmadığı, yapılacak metalografik incelemeler ile tespit edilebilir. Parlatılmış metalik bir numunede FeB ve Fe₂B kolayca görülebilir. Ayrıca borür tabaka kalitesi, poroziteler ve tabaka yapısını tayin etmek mümkündür (Kayalı, 2006; Özmen, 2007).

Borür tabakalarının yapısı; borlama yöntemine, borlanan malzemenin bileşimine, borlama ortamına ve işlem şartlarına bağlı olarak; ya düz bir formda veya parmaklı formda olabilir. Borür tabakasının özelliklerini bu sınıflama ile belirlemek mümkün değildir. Bu değerlendirme sistemi borür tabakasının görünümünü ve borlama işleminin uygunluğuna karar vermeyi sağlar (Uzun, 2002; Yılmaz, 2005).

2.4.5. Borür Tabakasının Tribolojik Özellikleri

Genellikle, borür tabakalarının tribolojik özelliklerinin belirlenmesinde mikroyapıya bağlı olarak açıklamalar yapılmaktadır. Çift fazlı FeB+Fe₂B tabakası, tek fazlı Fe₂B tabakasına göre iyi özelliklere sahip değildir. Çift fazlı tabakalarda yüzeyin hemen altında porozite oluşumu mümkün olmaktadır. Borlama işlemi ile borür tabakasının ince olması durumunda, porozite oluşumu ve tabakanın kalkma riskinin az olduğu düşünülmektedir (Özmen, 2007).

Borür tabakaları; kalınlıkları, sertlikleri, aşınma davranışları korozyon davranışları, sürtünme davranışları ve çok fazlı yapılarda oluşan iç gerilmeler ile karakterize edilirler.

2.4.5.1. Borür Tabakasının Kalınlığı

Matuschka (1980)'ya göre, 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 (Uzun, 2002).

Tabaka kalınlığı, daima amaca uygun olmalıdır. Eroziyon aşınma için (seramik endüstrisinde kullanılan pres takımlarında olduğu gibi) kalın tabakalar uygundur. Mesela, termoplastik ve termoset malzemelerin ekstrüzyonunda malzeme hamurunda cam ve asbest fiberler, ağaç talaşı veya TiO_2 gibi pigment olarak kullanılan ve oldukça aşındırıcı olan dolgu maddeleri vardır. Adhesiv aşınma için ise (zımba takımlarında olduğu gibi) ince tabakalar gereklidir. Teorik olarak borür tabakasının kalınlığı yaklaşık olarak 5 μm olması adhesiv aşınmadan korunmak için yeterli olacaktır. Bununla beraber Fe_2B kristallerinin birbirine kenetlenen dişli bir yapıya sahip olmaları sebebiyle alaşımsız veya az alaşımlı çeliklerde bu kalınlıkta homojen bir tabaka üretmek mümkün değildir. Tabaka kalınlığı arttıkça tabakanın gevrekliği de artacağı için özellikle çift fazlı tabakalarda tabakanın çok kalın olmamasına dikkat edilmelidir (Özsoy, 1991, Yılmaz, 2005; Yurtseven, 2008; Köseli, 2008).

Metal yüzeyinde borlama işlemi ile oluşturulan borür tabakasının kalınlığını etkileyen faktörler borlayıcı ortamın bileşimi ve konsantrasyonu, işlem sıcaklığı ve süresi, alt tabaka metal bileşimidir.

Borlayıcı ortamın bileşimi ve konsantrasyonunun tabaka kalınlığına etkisi: Bor kaynaklarının ortamda yeterince bulunması borür tabaka kalınlığını artırır. Ancak ortamda yeterince bor kaynağı yoksa yani borlama işlemi sırasında bor kaynağında bor kalmaz ise tabaka oluşumu durur. Böylece ince bir borür tabakası oluşur. B_4C den B'nin yalnız bırakılması için ortamda redüksiyonu sağlayacak bir madde (redüktan) bulunmalıdır. Böylece redüktan bir madde olan SiC ile B_4C bileşiminden B (elementsel bor) elde edilir. Serbest kalan B'nin oksijene olan afinitesi çok yüksektir ve hemen oksijenle B_2O_3 oluşturur. Bunu önlemek için ortamda yeterince SiC bulunmalıdır (Akbayır, 2005; Emekçiler, 2006; Barış, 2007).

Bor potansiyelinin düşük olduğu yerlerde yapılan borlama işleminde sadece Fe_2B fazı mevcuttur. Daha yüksek bor aktivitesinin olduğu durumlarda Fe_2B fazıyla beraber FeB fazıda oluşur. Bor aktivitesini kontrol ederek sadece Fe_2B fazından oluşan borür tabakasının elde edilmesi mümkündür. Redüksiyonu sağlayan SiC aynı zamanda demiri de redükler, böylece serbest kalan bor, demire yayılır. Böylece FeB

ve Fe₂B tabakaları oluşur. Borun demire yayılmasını KBF₄ hızlandırır (Akbayır, 2005; Emekçiler, 2006; Barış, 2007).

İşlem sıcaklığı ve süresinin tabaka kalınlığına etkisi: Bor oksitten bor elementinin serbest kalması için belirli bir sıcaklık gerekir. Demir ve bor oksidin birlikte redüksiyonu (koredüksiyonu) Fe₂B ve FeB borürlerinin oluşumundan dolayı tek tek redüksiyonundan daha hızlıdır. İşlem devam ettikçe çelik yüzeyine bor yayılması devam edecektir. Böylece borür tabaka kalınlığı artacaktır. Ancak işlem sırasında redüksiyon işlemi de devam etmelidir. Redüksiyon işlemi için borlama sıcaklığı gereklidir. Borlama süresi, borlama sıcaklığında bekleme süresidir (Akbayır, 2005; Emekçiler, 2006; Barış, 2007).

Borlama süresinin artması ile tabaka kalınlığı artar. İşlem sıcaklığını sınırlayan erimedir. FeB denge diyagramında ötektik sıcaklığın 1149°C altında olması gerekir. Uygulamada bu sıcaklığın üzerinde çıkılırsa malzeme üzerinde lokal erimeler meydana gelerek malzeme yüzeyi bozulabilir. Sıcaklık artması tabaka kalınlığını artırması yanında poroziteyi de artırmaktadır. Porozitenin artması ise tabakanın gevrekleşmesine yol açmaktadır (Şimşek, 2005; Ayter, 2005; Akbayır, 2005; Emekçiler, 2006; Barış, 2007; Yurtseven, 2008; Can, 2009).

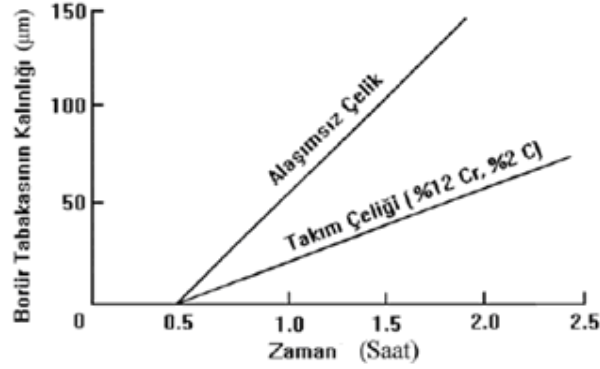
Sıcaklığın ve sürenin artmasıyla birlikte yüzeyde oluşan FeB borürünün derinliği de artmaktadır. Borür tabakası kalınlığı üzerine AISI 5140 çeliği ile yapılan bir deneyde; 850°C'de 2 saat borlama sonucu yaklaşık 45 (±5) µm, 8 saat borlama sonucu yaklaşık 91 (±7) µm; 950°C'de 2 saat borlama sonucu yaklaşık 134 (±9) µm, 8 saat borlama sonucu yaklaşık 238 (±5) µm borür tabaka kalınlığı elde edilmiştir (Karaman, 2003; Şimşek, 2005; Yılmaz, 2005).

Alt tabaka metal bileşiminin tabaka kalınlığına etkisi: Demir esaslı alaşımların termokimyasal yöntemlerle borlanması; borür tabakası ve geçiş bölgesinin morfolojisine, tabakadaki fazların cinsine, tabaka ve geçiş bölgesi kalınlığına alaşım elementlerinin değişik şekillerde etkileri görülür. Borür tabakası içerisindeki alaşım elementlerinin cins ve miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerde önemli ölçüde değişiklik görülür.

Borür tabakasında önemli bir çözünürlüğü olmayan karbon atomları, borür tabakası boyunca da difüzyona uğrayamaz ve borlama süresince yüzeyden matrise doğru sürüklenirler ve borla birlikte borosementit $Fe_3(B,C)$ şeklinde Fe_2B -matris ara yüzeyinde yer alır. Kromun, atom numarası demirin atom numarasından düşük olduğundan, altlık malzemedeki borür tabakasında, yani $(Fe,Cr)B$ ve $(Fe,Cr)_2B'$ 'de daha fazla çözünür ve yüzeye doğru yayılır. Nikel, hem borür tabaka kalınlığı hem de tabaka morfolojisi üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Borür tabakasında nikel miktarının artması, kaplama/matris ara yüzeyinde kolonsal yapının düzlemsel yapıya dönüşmesine ve porozitenin artmasına neden olurken, kaplama tabakasının sertliğini de düşürmektedir. Manganez, borür tabakasında kroma benzer bir davranış sergiler. Borür tabakası içerisinde çözünebilir manganez, yüzeye doğru yayılır ve borür tabakasının kalınlığını azaltıcı yönde etki yapar. Karbon elementi gibi silisyumun da borür tabakası içerisinde çözünürlüğü olmadığından borlama işlemi sırasında çeliğin iç kısımlarına doğru itilerek borür tabakası ile metal ara yüzeyinde yoğunlaşır ve burada ferrit fazı meydana gelir. Bu bölgede meydana gelen $FeSi_{0,4}B_{0,6}$ ve Fe_4SiB_2 bileşikler ise mekanik özelliklerin olumsuz yönde etkilenmesine neden olmaktadır. Bu çok yumuşak bir faz olduğu için tabakada çatlamalara, dökülmelere ve çökmelere neden olabilir. Belirtilen bu alaşım elementlerinin dışında tungsten, molibden, vanadyum, titanyum ve kobalt, borür tabakasının kalınlığını azaltarak düzlemsel yapıda borür tabakası oluşumunu teşvik ederler (Akbayır, 2005; Barış, 2007).

Kırılma, borür tabakası kalınlığının artmasını sınırlayan bir faktördür. Borlanmış tabakanın kırılma, kalınlık arttıkça artar. Dolayısıyla çelik esaslı malzemeler için 20-200 μm 'lik kalınlık, kullanma şartlarına, su verilip verilmeme ve borlanan malzeme cinsine göre ayarlanır. Kırılma yönünden alaşımli çeliklerde maksimum 100 μm , alaşımli çeliklerde 150-200 μm kalınlığa; hatta darbesiz aşınmaya maruz kalacak parçalarda su vermeme koşulu ile 400 μm 'lik kalınlığa kadar çıkabilmektedir (Karaman, 2003; Şimşek, 2005; Yılmaz, 2005; Ayter, 2005; Yurtseven, 2008; Can, 2009).

Genel olarak alaşım elementleri çelikteki bor difüzyonunu yavaşlatarak tabaka kalınlığını azaltmaktadır. Şekil 2.23.'de alaşımlı ve alaşımsız çeliklere eşit şartlarda uygulanan borlama işleminin tabaka kalınlığına etkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.23. Alaşımlı ve alaşımsız çeliklere eşit şartlarda uygulanan borlama işleminin tabaka kalınlığına etkisi (Karaman, 2003)

2.4.5.2. Borür Tabakasının Sertliği

Özsoy (1991)'a göre, borlama ile elde edilen en büyük kazanç sertliktir. Sertlik değeri ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak borür fazlarına bağlıdır. FeB fazı Fe₂B'den daha sert ve gevreklerdir. Borlama ile karbon çeliklerinde 1800-2000 HV, alaşımlı çeliklerde 2500-2800 HV ve yüksek hız çeliklerinde 2800-3300 HV'lik yüzey sertlikleri elde edilir. Bor kaplanmış çeliklerin borür tabakalarının sertliğinin diğer konvansiyonel sertleştirme yöntemlerine göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 2.4.'de Çeşitli malzemelerin yüzey sertlik değerleri verilmiştir. Borlamayla Wolfram karbürün sertliğine eş değer bir sertlik elde edilir (Karaman, 2003; Şimşek, 2005; Döngel, 2008; Can, 2009).

Çizelge 2.4. Çeşitli malzemelerin yüzey sertlik değerleri (Döngel, 2008)

Malzeme	Mikro sertlik (HV)
Nitrürlenmiş yüzey	610-940
Karbürleşmiş yüzey	700-820
Sert krom kaplı yüzey	950-1100
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900

Sertlik ölçümleri mikrosertlik yöntemi ile Vickers veya Knoop uçları kullanılarak yapılır. Yapılan sertlik ölçümlerinde Rockwell ve Birinell gibi büyük yüklerin kullanılmasını gerektiren yöntemler, çatlama ve dökülme gibi nedenlerden dolayı hatalı sonuçlara sebep olur. Ayrıca büyük yükler tabakaların bozulmasına ve tabakanın altındaki bölgenin deformasyonuna sebep olabilir. Genel olarak 50-100 gr yüklerle ölçüm yapılır (Ayter, 2005; Barış, 2007; Yurtseven, 2008; Can, 2009).

Borür tabakasının sertliğini belirlemek için iki ayrı yöntem önerilmiştir. Bunlar sırasıyla, sertlik deneylerinin malzeme yüzeyine dik ya da büyüme yönünde artan yükler kullanılarak gerçekleştirilmesi ve sabit yük kullanılarak gerçekleştirilmesidir. Ölçümlerde, sabit yük olarak, 100 gr kullanıldığı belirtilmektedir.

Ancak sertlik ölçümlerinin metalografik olarak çok iyi hazırlanmış numuneler üzerinde yapılması gerektiği önem taşımaktadır. Borür tabakasının bir özelliği de, borlama sonrasında ısı işlem görmesi durumunda sertliğini 900°C sıcaklığa kadar muhafaza edebilmesidir (Kayalı, 2006; Yurtseven, 2008; Can, 2009).

Borlanmış alaşımlı bir çelikte yüksek sertlikli yüzey tabakasından düşük içyapı sertliğine geçiş ani olmayıp yavaş yavaş azalarak gerçekleşmektedir. Bu, borlanmış alaşımlı çeliklerde meydana gelen geçiş bölgesinin sertlik dağılımına sağladığı bir avantajdır (Karaman, 2003; Barış, 2007).

2.4.5.3. Borür Tabakasının Aşınma Davranışı

Sürtünme katsayısı ve aşınma dayanımı bir sistem özelliği olmakla birlikte, genellikle yüksek aşınma direnci için malzemenin aşındırıcıdan daha sert ve sürtünme katsayısının düşük olması istenir. Malzemede aşınma yüzeyden başladığı için makine parçalarının ve mekanizmaların ömrü ve güvenilirliği yüzey özellikleri ile doğrudan ilişkilidir (Ayter, 2005; Şimşek, 2005; Barış, 2007; Döngel, 2008).

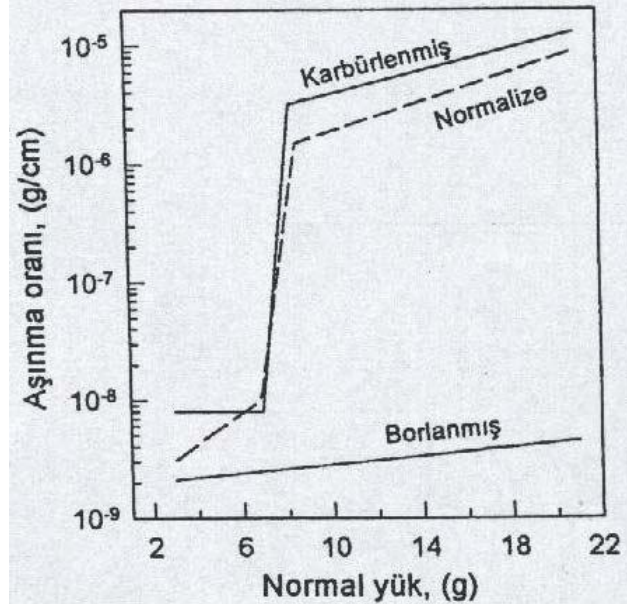
Aşınmanın birçok farklı nedeni olabilir. Mekanik aşınma, ya deformasyon ya da tanelerdeki çatlamların neden olduğu bir yüzey değişikliğinden kaynaklanabilir. Tanelerdeki bu kırılmalar büyük oranda taneler arası yüzeyin saflığından etkilenir. Bundan başka, bir yüzey tabakasındaki porozite oranı aşınmaya karşı direnci büyük

oranda etkiler. Sertlik kadar aşınmayı etkileyen diğer parametreler, yüzeyin kırılgenlığı, şekli, aşınmanın cinsi, sürtünme, ovalama, yuvarlama, çarpma vb. çevre koşullarıdır (Çelikyürek, 2006).

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 yüzeyin sertliğinin ve akma direncinin artması, sürtünen yüzeyler arasındaki temas yüzeyini azaltarak aşınma hızını düşürür (Karaman, 2003).

Borlanmış çelikler yüksek sertliklerinden dolayı, abrasiv aşınmaya karşı son derece dirençlidirler. Borür tabakasının kalınlığı işlem şartlarına bağılı olarak 20-300 µm arasında değışir ve teknik ömürdeki artış birkaç kattır. Borun oksijene karşı ilgisi yüksek olduğundan borür tabakası üzerinde ince bir oksit filmi oluşmakta, bu tabaka metal-metal temasını geciktirir, katı yağlayıcı görevi yaparak sürtünme katsayısını düşürmektedir. Yüzeyin kimyasal bileşimi ve sürtünen yüzeylerin kimyasal kararlılığı eleman çifti arasındaki yüzey çekim kuvvetini azaltır ve dolayısıyla aşınma dayanımını arttırır. Borlu tabakaların soğuk kaynak eğilimi düşüktür, ayrıca aşınmayı önlemek için yağlanmasına gerek yoktur. Bu durum özellikle adhesiv aşınmayı önlemede büyük yarar sağlar (Karaman, 2003; Ayter, 2005; Emekçiler 2006; Barış, 2007; Ulutan 2007; Döngel 2008; Can, 2009).

Borlanmış parçaların aşınma direnci nitrörlenen ya da karbürlenen çeliklerle kıyaslandığında oldukça fazladır. Eyre (1975) karbürleme ve borlama işlemi uygulanmış EN1A (AISI 1100 serisi) çeliklerinin aşınma davranışları karşılaştırıldığında (Şekil 2.24.); borlamanın karbürlemeye göre özellikle geçiş bölgesi üzerindeki yüklemelerde adhesiv aşınma direnci açısından çok daha iyi sonuçlar verdiğini ve bu özelliğı yüksek sıcaklıklarda dahi muhafaza ettiğini belirtmektedir. Abrasiv aşınmanın meydana geldiğı ve borlama ile önemli ölçüde düşürüldüğü sistemlere; pnömatik transport sistemleri, plastik işleme makineleri, haddeleme elemanları, pompalar, valflar vs. örnek olarak verilebilir (Emekçiler, 2006; Ulutan 2007; Döngel 2008; Tabur, 2008).



2.24. Çeşitli yayınma işlemleri uygulanmış EN1A çeliğinin aşınma davranışları (Tabur, 2008)

Borlanan çeliğin eroziv aşınmaya karşı gösterdiği direnç sertlikten ziyade oluşan bor tabakasının derinliğiyle alakalıdır. Bu sebeple işletme şartlarında yüksek tabaka kalınlığı oluşturmaya yönelik parametrelerin belirlenmesi gerekir (Emekçiler, 2006).

Adhesiv aşınma mukavemetleri demirbor tabakalarında Cr ve Mo ilavesiyle iyileştirilebilir. Abrasiv aşınma Cr, Mo, V veya bunların hepsi üzerine vanadyum karbidlerin solüsyonlarıyla düşürülür. Yüzey yorulmasına karşı düşük mukavemet Mo ve V'la yükseltilir. Tribosidatif aşınma alaşım elementleriyle çok az etkilenir. Demir dışı metallerin borlanmasında özellikle Ti, Ta ve Ni metallerinin abrasiv aşınma özelliklerinde çok büyük iyileşme gözlenmektedir. Ti ve Ta'nın aşınma mukavemetine olumlu yönde etki ettiği saptanmıştır (Emekçiler, 2006).

Borlanmış yüzeylerin aşınma açısından diğer bir üstünlüğü, gerek çalışma ortamından kaynaklanan, gerekse kayma sürtünmesi sonucunda ortaya çıkan ısının, borlu tabakanın sertliklerinde ve aşınma dayanımlarında büyük bir düşüşe neden olmamasıdır (Emekçiler, 2006; Tabur, 2008).

Kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı, sementasyonla sertleştirilmiş tabakanın yumuşamasına sebep olurken borlu tabakaya etki etmez. Borlu tabakanın 900-

1000°C sıcaklıklara kadar sertliğini koruması, aşınma direncini yüksek sıcaklıklarda da muhafaza etmektedir. Ve 650°C'den sonra borlanmış yüzeyin üstündeki oksidasyondan dolayı aşınma dayanımları mükemmeldir. Oksidasyondan filmi metal-metal temasını korur ve sürtünme katsayısını düşürür (Özsoy, 1991; Ayter, 2005; Ulutan 2007; Döngel 2008).

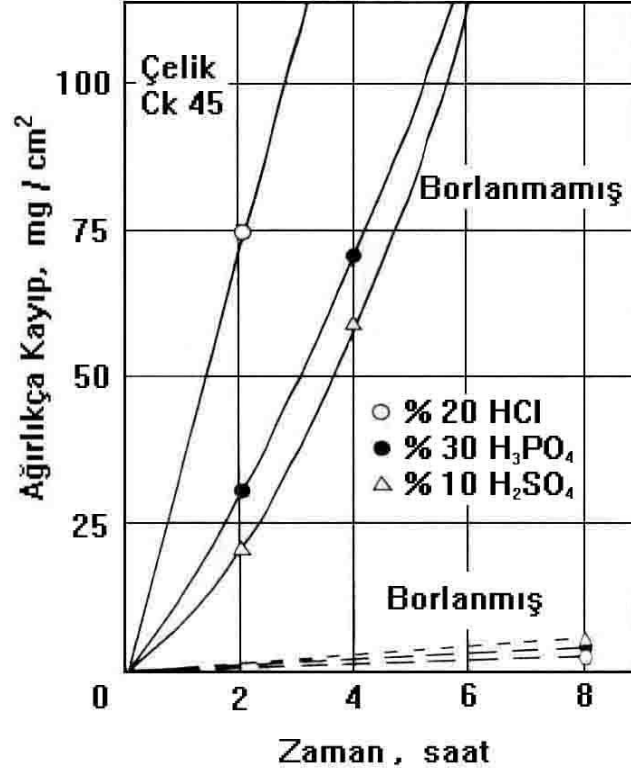
Borlanmış çelik yüzeylerin aşınma davranışlarını inceleyen araştırmacıların çoğunluğu, tek fazlı (Fe₂B) tabakalarının, çift fazlı (FeB+Fe₂B) tabakalarından daha üstün aşınma direncine sahip olduğu konusunda görüş birliği içerisinde (Tabur, 2008; Döngel, 2008).

2.4.5.4. Borür Tabakasının Korozyon Davranışı

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 (Uzun, 2002; Yılmaz, 2005).

Borlama, düşük alaşımlı çeliklerin, asitlere ve sıvı çinkonun korozyonuna karşı direnci arttırır. Borlamayla, özellikle östenitik çeliklerin, hidroklorik asitlere karşı korozyon direncinde büyük bir artış sağlanır. Tuz ve sodanın sudaki çözeltilerinde takım çeliklerinin korozyon direnci borlama sonrasında artar, alkali çözeltilerinde ise azalır (Özsoy, 2001; Karaman, 2003; Yılmaz, 2005).

Demir grubu malzemelerin borlanması, atmosferik korozyona karşı az, fakat bazı asit ve sıvı metallere karşı büyük dayanıklılık kazandırır. Özellikle HCl, H₂SO₄ (sülfürik asit) ve H₃PO₄ (fosforik asit) gibi asitlere Al, Pb ve Zn metallerinin sıvı banyolarında borlu malzemelerin korozyon direnci çok yüksektir. Buna karşılık HNO₃ (nitrik asit) gibi oksitlendirici asitlerde tekrar kötüleşir. Borlanmış ve borlanmamış AISI 1045 çeliğinin 56°C'deki; %20 HCl, %30 H₂PO₄ ve %10 H₂SO₄ asitlerinde zamana bağlı korozyon durumu Şekil 2.25.'de görülmektedir (Uzun, 2002; Barış, 2007; Yurtseven, 2008).



2.25. AISI 1045 çeliğinin 56°C'deki değişik asit ortamlarındaki korozyonu(Karaman, 2003; Ayter, 2005)

Yüksek Cr'lu çeliklerde borlama ile koruyucu krom oksit yerine daha az koruyucu olan Cr-borür meydana gelmektedir. Bu bakımdan yüksek alaşımlı malzemelerin borlanmasıyla daha iyi korozyon özelliği her zaman elde edilemeyebilir (Uzun, 2002).

2.4.5.5. Borür Tabakasının Sürtünme Davranışı

Sürtünme, bir katı cismin kendisiyle temas eden başka bir katı cismin bağlı hareketine veya hareket haline karşı gösterdiği dirençtir. Birbiri ile temasta olan yüzeyler arasındaki sürtünme hareketi kayma, yuvarlanma veya bu iki hareketin bileşimi şeklindedir. Sürtünme, pek çok alanda istenmeyen bir durumdur. Bir başka sorunsu parçaların sürtünmeden dolayı aşınmaya uğrayarak hızla yıpranmaları ve bunun doğuracağı bakım masraflarıdır (Selçuk,1994; Yılmaz, 2002).

Borun oksijene karşı ilgisi yüksek olduğundan yüzeyde koruyucu ince bir oksit filmi oluşturmaktadır. Bu oksit filmi yüzeyde yağlayıcı vazifesi görerek, sürtünmeli aşınma esnasında sürtünme katsayısını düşürürken yüzeylerin birbirine kaynamasını da önlemektedir. Kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı semente edilmiş tabakanın yumuşamasına neden olurken borlu tabakaya etki etmemektedir (Yılmaz, 2005).

Borlamanın, aşınma esnasındaki sürtünme katsayılarına etkisi üzerine yapılan bir çalışmada; borlanmamış gri dökme demir numuneler ile 800-1000°C sıcaklıklarda 2-11 saat süre ile borlanmış gri dökme demir numuneler kullanılmıştır. Çizelge 2.5.'de farklı sürelerde borlanmış numuneler ile borlanmamış numunelerin sürtünme katsayıları verilmiştir (Karaman, 2003; Yılmaz, 2005).

Çizelge 2.5. 800-1000°C sıcaklıklarda, 2-6 saatte borlanan ve borsuz numunelerin aşınma esnasındaki sürtünme katsayıları (Yılmaz, 2005)

Normal Yük (N)	Kayma Hızı (m/sn)	Kayma Süresi (sn)	Kayma Yolu (m)	Sürtünme Katsayısı				
				Borlama Sıcaklığı: 900°C				Bor- suz
				2 saat	3 saat	4 saat	5 saat	
50	1	10	10	0,45	0,46	0,40	0,36	0,70
		30	30	0,55	0,60	0,55	0,44	0,76
		80	80	0,70	0,80	0,86	0,70	1,00
		180	180	0,85	0,85	0,73	0,72	1,30
		350	350	0,90	0,87	0,80	0,81	1,25
		650	650	1,10	1,00	1,30	0,95	1,25
		1000	1000	1,10	1,20	1,20	1,05	1,25

2.4.5.6. Borür Tabakasının Kalıntı Gerilme Davranışı

Borür tabakasının mekanik özellikleri kalıntı gerilme ile ilgilidir. Isıl işlem, malzeme cinsi ve borlama şartlarına bağlı olarak, borür tabakası ve tabaka-ana metal ara yüzeyinde iç gerilmeler oluşur. Tabakanın faz yapısı (çift fazlı Fe₂B+FeB, tek fazlı FeB) ve geometrisi (girintili çıkıntılı veya düz oluşu), iç gerilmelerin tabakada yapacağı hasara etki eder. İdeal tabaka için tek faz (Fe₂B) ve iç gerilmenin daha geniş bir alana yayılması için tabaka geometrisinin girintili çıkıntılı olması arzu edilir.

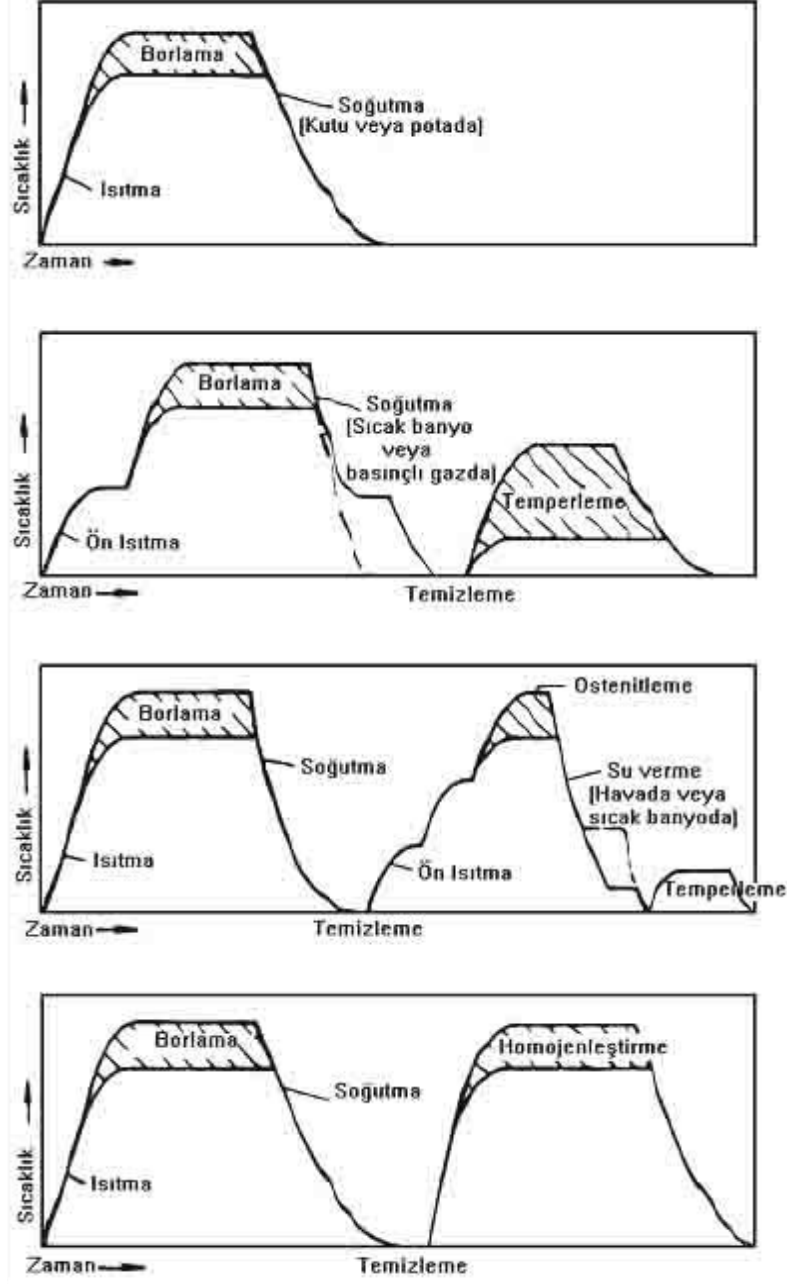
Tabakanın Fe₂B yanında FeB’de içermesinin sakıncası, iki tabakada da farklı yönlenmiş iç gerilmelerin oluşmasıdır. İç gerilmeler, FeB, Fe₂B ve ana malzemenin ısı genleşme katsayılarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Çizelge 2.6.’da borür tabakası ve saf demire ait ısı genleşme katsayıları verilmektedir. İç gerilmeler Fe₂B’de basma, FeB’de ise çekme gerilmesi şeklindedir. Fe₂B ile FeB arasında 90 HV kadar bir basma gerilmesi oluşabilmektedir. Bu tür gerilmeler tabakanın çatlamasına ve FeB tabakasının dökülerek malzeme yüzeyinin bozulmasına neden olur. Yaklaşık 60-80 µm kalınlığındaki tek fazlı borür tabakasına eğme testi uygulandığında %8, 150-200 µm tabaka kalınlığında ise %4 deformasyona çatlama olmaksızın dayanmaktadır. İki fazlı borür tabakaları farklı davranışlar göstermektedir (Şimşek, 2005; Ayter, 2005; Çelikyürek, 2006; Yurtseven, 2008).

Çizelge 2.6. Borür tabakası ve Fe’e ait ısı genleşme katsayıları (Ayter, 2005)

Malzeme	Isıl Genleşme Katsayısı
Fe	15,6x10 ⁻⁶ /°C
FeB	23x10 ⁻⁶ /°C
Fe ₂ B	7,85x10 ⁻⁶ /°C

2.4.6. Borlama Sonrası Uygulanabilen İşlemler

Borlama işleminin en önemli üstünlüklerinden biri de, borlamadan sonra matriks malzemesine istenilen ısı işlemin yapılabilmesidir. Matriks, malzemesinin mekanik özelliklerini iyileştirmek için yapılacak ısı işlemlerin koruyucu gaz, vakum veya nötr tuz banyolarında yapılması önerilmektedir. Bu ısı işlemler, eğer katı borlama yapılmışsa borlama kutusuyla birlikte, borlama işleminin ardından hızlı soğutma olarak yapılabilir. Ayrıca ılık banyo ve basınçlı gazda hızlı soğutma, ardından temperleme, östenitleme veya matriks malzemesini homojenleştirme (Şekil 2.26.) gibi işlemler yapılabilir. Parçaların merkez sertliklerini artırmak için borlanmış iş parçaları sertleştirilip temperlenirler. Uygun işlem yapıldığında 120-150 µm’ye kadar kalınlıktaki borür tabakalarının temperlenmesi, tabakada çatlaklara yol açmaz (Karaman, 2003; Yılmaz, 2005; Yurtseven, 2008).



Şekil 2.26. Borlamadan sonra yapılabilen ısıl işlem örnekleri (Karaman, 2003)

Yüksek basınçlara maruz kalacak borlanmış parçalar, ısıl işleme tabi tutulmadan kullanılamaz. Borlu tabakanın altı (ana yapı) yumuşaksa, lokal basınçlar yüzünden tabaka çökmesi ve dökülmesi olabilir. Bütün difüzyon yöntemlerinde olduğu gibi borür tabakasının oluşumunda da bir hacim artışı olmaktadır. Boyut değişimi, tabaka kalınlığı ve kullanılan malzemeye bağlıdır. Boyut artışı genel olarak tabaka kalınlığının %20'si kadardır. Alaşımli çeliklerde ise, bu değer %80'e kadar

çıkabilmektedir. Borür tabakasının (Fe_2B) genişleme katsayısı, çelik grubu malzemelerin ortalama genişleme katsayılarına yakın olduğundan, bu tür malzemelere borür tabakasına hasar vermeden alışlagelmiş metotlarla ısıl işlem uygulanabilmektedir. Östenitleme, $1150^{\circ}C$ 'nin üstüne çıkmama koşuluyla, nötr atmosferde yapılmalıdır. Borlu tabakalar, borlama işleminden sonra yapılan ısıl işlemlerde sertliğini muhafaza eder (Karaman, 2003; Şimşek, 2005; Yurtseven, 2008).

2.4.7. Borlama Uygulamaları

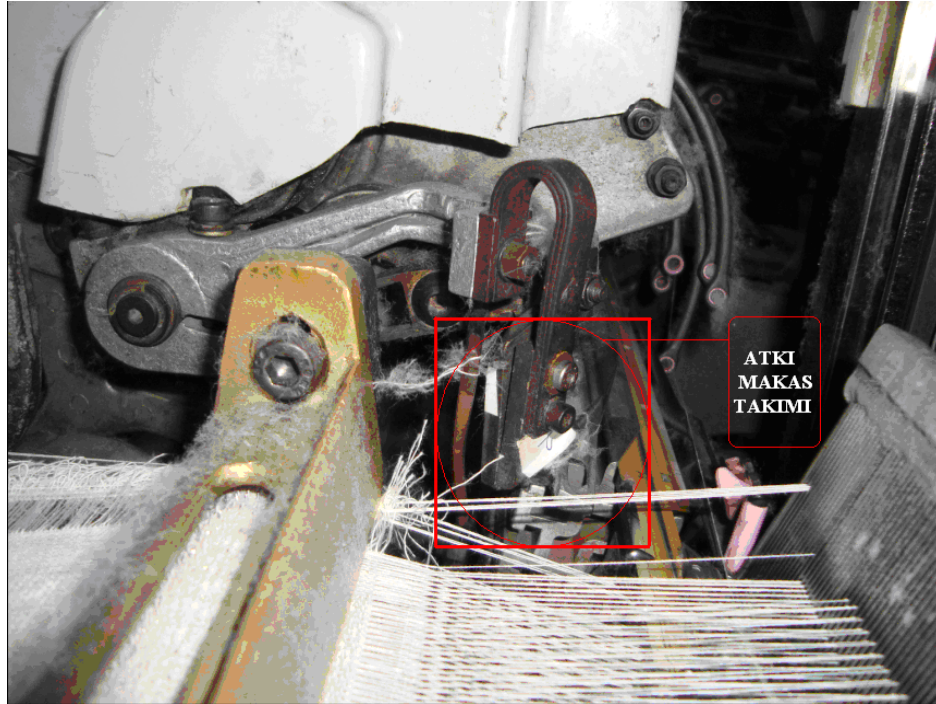
Bor mineralleri kullanım alanı olan sektörlerde çoğunlukla bor kimyasalları şeklinde tüketildiği gibi konsantre bor olarak doğrudan da tüketilmektedir. Bor ürünleri uzay ve hava araçları, nükleer uygulamalar, askeri araçlar, yakıtlar, elektronik ve iletişim sektörü, tarım, cam sanayi, kimya ve deterjan sektörü, seramik ve polimerik malzemeler, nanoteknolojiler, otomotiv ve enerji sektörü, metalürji ve inşaat gibi 500'e yakın alanda kullanılmaktadır (Çarboğa, 2010).

Endüstride çok yaygın ve çeşitli kullanım alanlarına sahip bor bileşiklerinin, önemi ve kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Ticari anlamda borlar, genelde içerdikleri B_2O_3 içeriğine göre tanımlanmakta ve satılmaktadır. Kullanım alanları bölgelere göre değişiklikler göstermektedir. Çok özel kimyasal karakteristiklerinden dolayı, özellikle II. Dünya Savaşı'ndan sonra bor kimyasının hızla gelişmesi sayesinde, bugün hammadde, rafine ürün ve bor bileşikleri şeklinde, en az 200'ünde alternatifsiz olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Bor, ilave edildiği malzemelerin katma değerlerini olağanüstü derecede yükseltmekte, bu sebeple bugün sanayinin tuzu olarak isimlendirilmektedir. Gelişen teknolojiler, bor kullanımını ve bora bağımlılığı artırmakta, borun stratejik mineral olma özelliği giderek daha da belirgin hale gelmektedir (Turhan, 2008; Tabur, 2008).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada; akademik ve ticari olarak borlama işlemiyle uğraşan bilim adamları ve şirketler üzerine bir araştırma yapılmıştır. Türkiye’de ve dünyada borlama üzerine yapılan çalışmaların dokümanlarına ulaşılmış ve firmalarla görüşülmüştür. Yine çalışmanın saha araştırması kapsamında tekstil sektöründe sık sık arızalanan ve kısa ömürlü parçalar üzerinde bir araştırma yürütülmüş ve Denizli Organize Sanayi Bölgesinde faaliyet gösteren hemen hemen bütün fabrikalarla ve yedek parça sanayisiyle uğraşan firmalarla görüşülmüştür.

Çalışmanın saha araştırması sırasında Denizli Organize Sanayi Bölgesinde faaliyet gösteren Shamrock Tekstil firması yetkilileri görüşülmüştür. Yetkililer çalışmada kullanmam için sık sık aşınan ve arızalanan parça olarak Vamatex dokuma tezgahına ait atkı makas takımının bu çalışma için uygun olduğunu belirttiler (Şekil 3.1.). Kullanılan makas takımı dakikada 250 devir yapmakta olup, dokuma tezgahında atkı ipliğini kesmeye yarar. Yaklaşık olarak 720-1080 saatlik çalışma ömrüne sahiptir. Bu parça sürekli olarak sürtünmekte, dolayısıyla çabuk aşınarak arızaya sebep olmaktadır.



Şekil 3.1. Dokuma tezgahında kullanılan atkı makas takımı

Çalışmada kullanılan atkı makas takımları Denizli I. Sanayi Bölgesinde faaliyet gösteren Denizli Lazer Teknolojileri Kesim Sanayi ve Tic. LTD. ŞTİ. firmasında istenilen altlık malzemeler (AISI 1050 ve AISI 1010) kullanılarak yeniden üretilmiştir.

Bu parçaya borlama işlemi uygulanarak, gerçek çalışma şartlarında (dokuma tezgahında) aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Borlanan parçalar ve orijinal makas takımları mukavemet özellikleri ve kullanım ömürleri bakımından karşılaştırılmıştır. Borlama işlemi neticesinde borlanan malzeme ile diğer malzemenin aşınma deneyi sonuçları bu iki malzeme arasındaki farklar tablolar ve grafiklerle açıklanmıştır.

Borlamada kullanılacak altlık malzemelerin Spektral analizleri yapılmış ve bu analiz sonuçlarına göre uygulanacak olan borlama prosesi belirlenmiştir.

Borlanan parçaların;

- Spektral,
- Mikroyapı,
- SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu),
- SEM-EDX (Enerji Saçılımlı X-Işınları Spektrometresi),
- X-ışınları difraksiyonları,
- Mikro sertlik,

analizleri yapılmış ve bu analiz sonuçları incelenmiştir.

Yapılan tüm deney ve analizler ayrı ayrı incelenmiş ve her bir analiz alt başlıklar halinde değerlendirilmiştir. Analizlere ait görüntü ve fotoğraflarla da yapılan işlemler desteklenmeye çalışılmıştır.

3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada kullanılan malzemeler yüksek borlama kabiliyetleri nedeniyle AISI 1050 ve AISI 1010 olarak belirlenmiştir. Tezgahda kullanılan orijinal atkı makasları ve seçilen malzemeler temin edilip Denizli KOSGEB Kimyasal Analiz Laboratuvarında spektral analizler sonuçlarına ulaşılmıştır. Spektral analizler ARL 3480 DE SPECTROMETER marka cihazda (Şekil 3.2.) yapılmıştır. AISI 1050'nin, AISI 1010'nun ve orijinal parçaların spektral analiz sonuçları ve sertlik değeri gösterilmiştir (Çizelge 3.1., Çizelge 3.2., Çizelge 3.3.).



Şekil 3.2. ARL 3480 DE SPECTROMETER Spektral analiz cihazı

Çizelge 3.1. AISI 1050'ye ait Spektral analiz sonuçları (% bileşim) ve Sertlik değeri

C	P	Mo	Co	Ti	Sn	Si	S	Ni	V
0,49231	0,01100	0,03548	-	-	0,01524	0,25652	0,00547	0,13875	-
Mg	Mn	Cr	Al	Nb	W	Bi	Cu	Fe	<u>Sertlik</u>
-	0,66183	0,16987	0,17324	0,0144	0,00103	-	0,25364	Kalan	250 HV

Çizelge 3.2. AISI 1010'a ait Spektral analiz sonuçları (% bileşim) ve Sertlik değeri

C	P	Mo	Co	Ti	Sn	Si	S	Ni	V
0,09781	0,02200	-	0,002	-	-	0,20081	0,1807	0,1673	-
Mg	Mn	Cr	Al	Nb	W	Bi	Cu	Fe	Sertlik
-	0,57110	0,03879	0,006	0,0144	0,00103	-	0,02124	Kalan	120 HV

Çizelge 3.3. Orijinal atkı makas takımına ait Spektral analiz sonuçları (% bileşim)

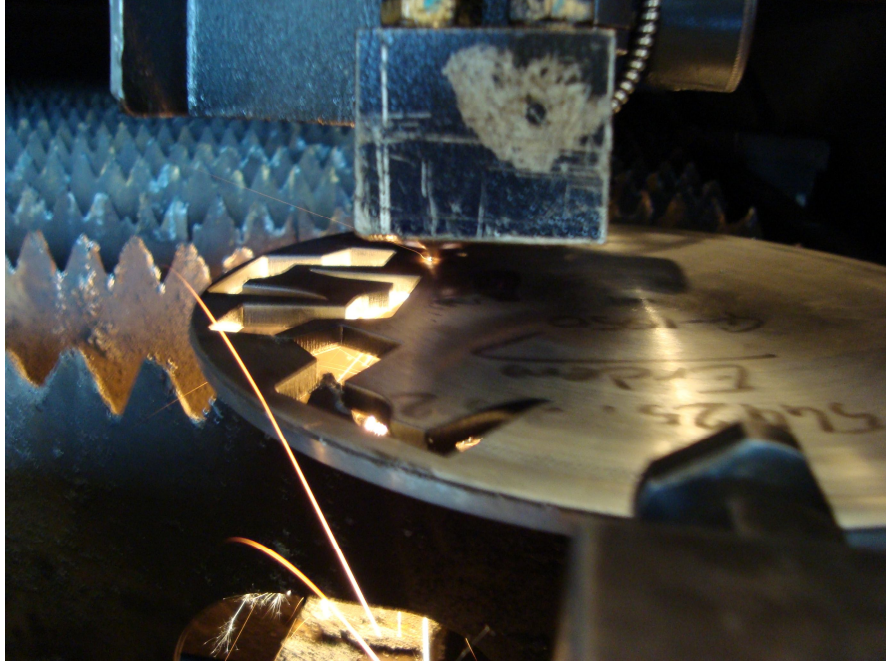
Alt Bıçak	Ti	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ag	Pt	W
	0,400	0,400	10,900	0,310	0,180	0,440	0,630	0,890	85,850
Üst Bıçak	Ti	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ag	Pt	W
	-	1,790	10,800	0,380	0,240	0,380	0,620	1,050	84,740

Temin edilen parçalar orijinal numune boyutlarında AutoCad programında modellenmiştir. Modellenen parçalar çapı 250 mm, et kalınlığı 5 mm olan ham çelik bloğundan istenilen formda lazer kesim teknolojisi kullanılarak kesimi yapılmıştır. Lazer kesiminde kullanılan cihaz Mazak Super Turbo-X 48 marka lazer kesim cihazdır (Şekil 3.3.). Lazerle kesilen parçaların, kesim esnasında oluşan iç gerilmelerini gidermek için kesilen numuneler 600°C'ye kadar ısıtılıp 2 saat süre ile bekletilmiştir.



Şekil 3.3. Mazak Super Turbo-X 48 Lazer kesim cihazı

Numuneler lazerle kesim esnasında Şekil 3.4.'de gösterilmektedir. Kesilen numuneler orijinali ile birebir boyutlarda tamamen kusursuz bir şekilde elde edilmiştir. Elde edilen numuneler Şekil 3.5.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Lazer kesimi yapılan numuneler



Şekil 3.5. Lazer kesimle üretilen parçalar

Daha sonra kesimi yapılan numuneler Shamrock Tekstil Bakım ve Onarım Atelyelerinde zımparalanarak çapakları alınmış (şekil 3.6.), taşlama işlemi (şekil 3.7.) ve kılavuzlama yöntemiyle (şekil 3.8.) tezgahta kullanılabilecek kalitede numuneler üretilmiştir.



şekil 3.6. Zımpara işlemi ile çapaklarının alınan numuneler



şekil 3.7. Taşlama ile istenilen kesme yüzeyi elde edilen numuneler



şekil 3.8. Kılavuzlama işlemi ile civata yatakları açılan numuneler

3.2. Çalışmada Kullanılan Malzemeleri Borlama İşlemi

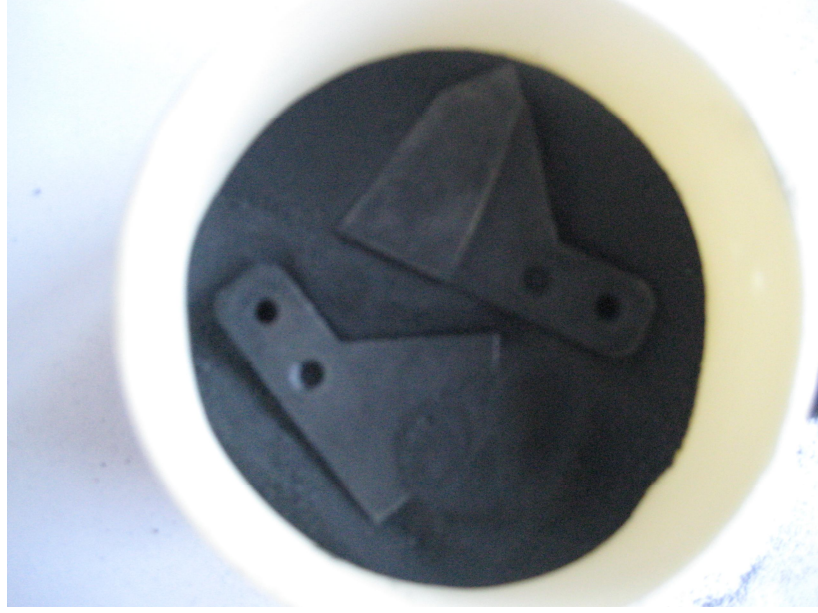
Borlama işlemi S.D.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Borlama yöntemi olarak katı ortamda borlama yöntemi tercih edilmiştir. İşlemin kolay olması, kullanılan toz bileşiminin kolayca değiştirilebilmesi, borlama yapmak için gerekli olan cihaz ve donanımın basitliği ve işlemin ekonomik yönden de ucuz olması gibi faktörler dolayısıyla katı ortamda borlama yöntemi seçilmiştir. Borlama işlemi için Ekabor-II tozu kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü açısından çok yüksek kaliteye sahip olması ve düşük alaşımlı çeliklerde kullanılabilir olması nedeniyle Ekabor-II tozu tercih edilmiştir. Borlamanın yapılacağı potalar için 150 mm çapında, 50 mm yüksekliğinde, 2 mm et kalınlığında alümina ve seramik potalar üretilmiştir. Borlama işlemi bu potaların içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Borlama işlemi için Nüve firmasına ait kül fırın kullanılmıştır. Kullanılan kül fırın, 1200°C sıcaklık kapasiteli, $\pm 5^{\circ}\text{C}$ hassasiyetli mikro işlemci kontrollü, elektrik rezistanslı, dijital göstergeli ve 200x250x200 mm kapasiteye sahiptir (Şekil 3.9.).



Şekil 3.9. Borlama işleminde kullanılan Nüve marka kül fırını

Borlama işlemi için hazırlanan potanın taban yüzeyi, yaklaşık olarak 15 mm yükseklikte, hazırlanan Ekabor-II ile doldurulmuştur. Devamında borlanacak olan numuneler karışımın üzerine konulmuştur (Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. Karışım üzerine yerleştiril numuneler

Daha sonra kalan boşluklar karışım ile tamamen doldurulmuştur (Şekil 3.11.).



Şekil 3.11. Karışımla tamamen doldurulan pota

Katı bor malzemesinin hava ile temasının önlenmesi için kutu ile kapak arası ve kutu çevresi şamot çamuru ile sıvanmıştır (Şekil 3.12.).



Şekil 3.12. Şamotla sıvanan pota

Daha sonra pota, kül fırının için 600°C iken yerleştirilmiş ve 900°C (Şekil 3.13.) sıcaklıkta, 6 saat süreyle bekletilmiştir.



Şekil 3.13. 900°C fırınlanan potalar

Süre sonunda pota fırından çıkarılmış ve havada soğumaya bırakılmıştır. Soğutulan numuneler potadan çıkartılmış ve numune üzerindeki çapakları temizlemek için kaynar suda 1 saat süreyle bekletilmiştir. Ve orta sertlikte süngerle çapaklar giderilmiş ve böylece borlama işlemi tamamlanmıştır.

3.3. Aşınma Uygulamaları

Borlanmış atkı makaslarının aşınma deneyleri gerçek çalışma şartlarında, borlanmamış atkı makasları ile birlikte Shamrock Tekstil Fabrikasının dokuma departmanında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.14.).



Şekil 3.14. Shamrock Tekstil Fabrikası dokuma departmanı

Deneyler Vamatex dokuma tezgahında yapılmıştır (Şekil 3.15.).



Şekil 3.15. Vamatex dokuma tezgahı

Aşınmanın boyutlarının anlaşılabilmesi için ağırlık farkı yöntemi kullanılmıştır. Ekonomik ve kolay uygulanabilir olması sebebiyle bu yöntem tercih edilmiştir. Ağırlık kaybını belirleyebilmek için 1/1000 hassasiyetinde R-Scale WTB 200 hassas terazi (Şekil 3.16.) kullanılmıştır. Periyodik olarak ($\cong 30$ günlük aralıklarla) malzemenin ağırlık kaybı ölçülerek aşınma durumu tespit edilmiştir.



Şekil 3.16. R-Scale WTB 200 hassas terazi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

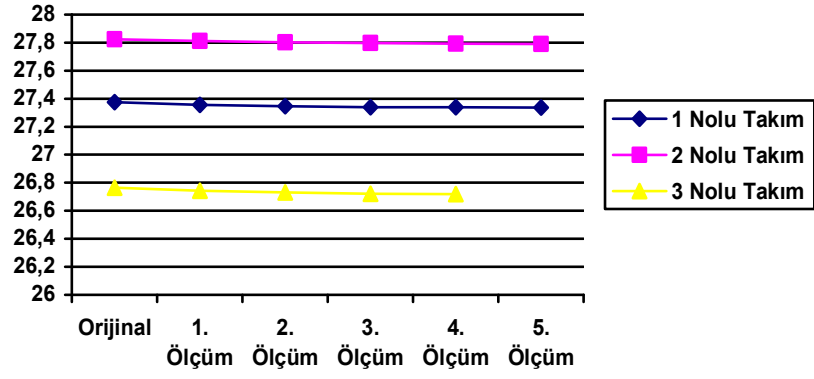
Bu çalışmada; tekstil sektöründe, dokuma tezgahlarında kullanılan atkı makas takımlarına borlama işlemi uygulanmış ve gerçek çalışma şartlarında borlanmamış atkı makas takımları ile birlikte çalıştırılmıştır. Yaklaşık olarak 6 aydır çalışan takımlar, aşınma deneyi bulguları göz önüne alındığında yaklaşık olarak bir altı ay daha çalışması (yani toplam 12 ay) yönündedir. Borlama işlemi görmüş parçalardan alınan sonuçlar oldukça tatmin edicidir.

Orijinal atkı makasları günlük 20 saat üzerinden değerlendirildiğinde (net çalışma süresi) yaklaşık olarak 600-900 saat arasında çalışmaktadır. Fakat borlanan parçalar 3600 saattir çalışmakta ve halen kullanıma uygun bir şekilde mekanik özelliklerini muhafaza etmektedir.

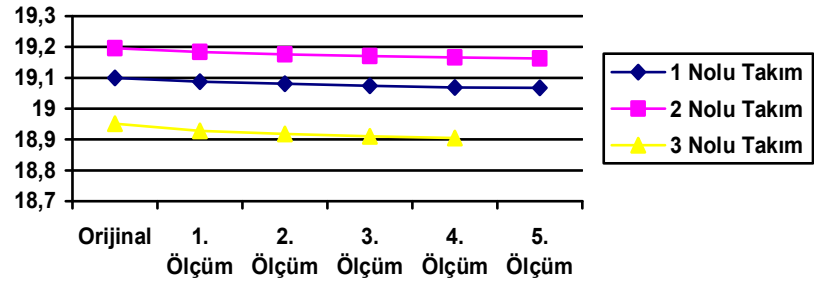
Ölçümler aylık periyotlarla yapılmıştır ve malzemenin ağırlık kaybı ölçülerek aşınma durumu tespit edilmiştir. Orijinal takımlarda, 600 saatlik çalışma sonunda ortalama 2 gr'lık bir ağırlık kaybı söz konusu iken (tamamen kullanılmaz hale geldiği andan sonraki ölçümler), 2400 saatlik çalışma sonunda borlanmış AISI 1050 takımında 0,0385 gr AISI 1010 takımında ise 0,0277 gr'lık bir ağırlık kaybı söz konusudur. Borlanmış parçaların ağırlık kayıpları tablo halinde (Çizelge 4.1.) ve grafik halinde (Şekil 4.1., Şekil 4.2., Şekil 4.3., Şekil 4.4.) gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Borlanmış AISI 1050-1010 takımlarının aşınma deney sonuçları (gr)

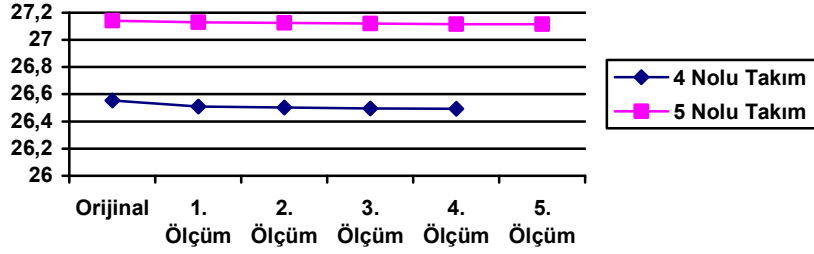
	Borlanmış AISI 1050(1) Alt Bıçak / Üst Bıçak	Borlanmış AISI 1050(2) Alt Bıçak / Üst Bıçak	Borlanmış AISI 1050(3) Alt Bıçak / Üst Bıçak
Orijinal	27,376 19,100	27,825 19,196	26,764 18,951
1. Ölçüm (25.01.2011)	27,357 19,088	27,811 19,184	26,742 18,928
2. Ölçüm (22.02.2011)	27,347 19,081	27,803 19,176	26,730 18,918
3. Ölçüm (24.03.2011)	27,340 19,074	27,797 19,170	26,722 18,910
4. Ölçüm (29.04.2011)	27,338 19,069	27,792 19,166	26,719 18,905
5. Ölçüm (27.05.2011)	27,337 19,067	27,790 19,163	- (Analize gönderildi)
Toplam Ağırlık Kaybı	0,039 0,033	0,035 0,033	0,045 0,046
	Borlanmış AISI 1010(4) Alt Bıçak / Üst Bıçak	Borlanmış AISI 1010(5) Alt Bıçak / Üst Bıçak	
Orijinal	26,525 19,165	27,142 18,785	
1. Ölçüm (25.01.2011)	26,510 19,154	27,130 18,770	
2. Ölçüm (22.02.2011)	26,502 19,147	27,124 18,764	
3. Ölçüm (24.03.2011)	26,495 19,144	27,120 18,761	
4. Ölçüm (29.04.2011)	26,493 19,141	27,116 18,758	
5. Ölçüm (27.05.2011)	- (Analize gönderildi)	27,115 18,757	
Toplam Ağırlık Kaybı	0,032 0,024	0,027 0,028	



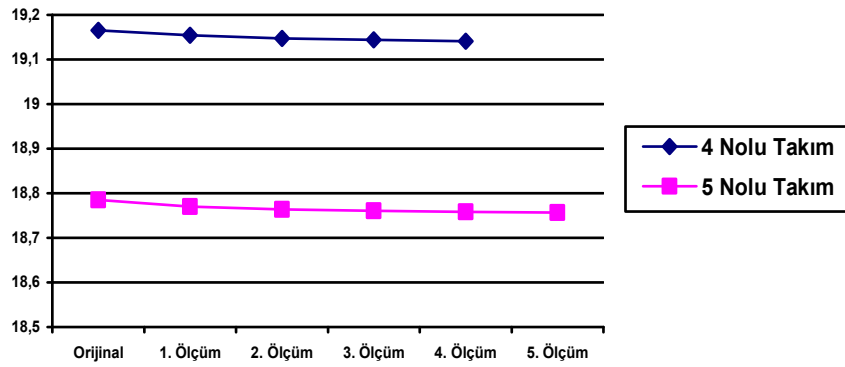
Şekil 4.1. Borlanmış AISI 1050'ye ait gr olarak ağırlık kayıpları (alt bıçak)



Şekil 4.2. Borlanmış AISI 1050'ye ait gr olarak ağırlık kayıpları (üst bıçak)



Şekil 4.3. Borlanmış AISI 1010'a ait gr olarak ağırlık kayıpları (alt bıçak)

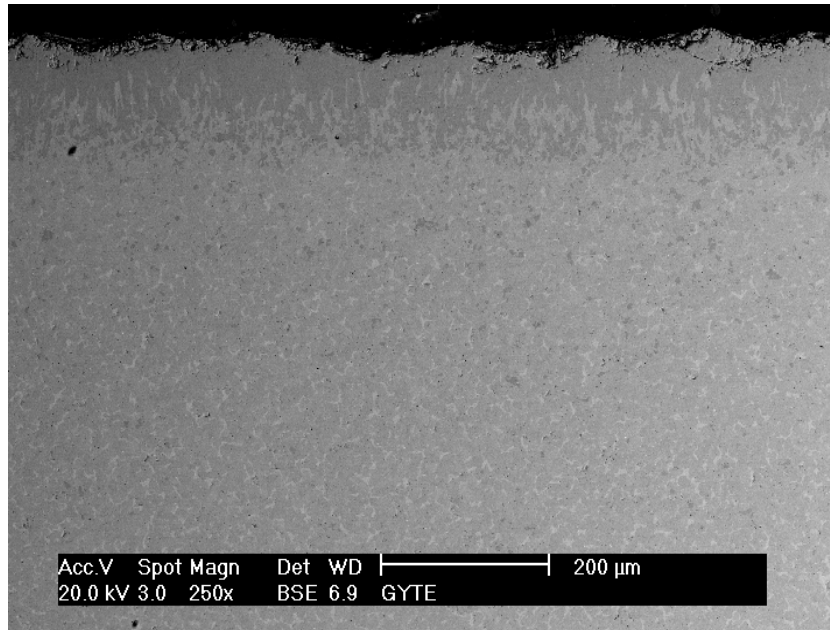


Şekil 4.4. Borlanmış AISI 1010'a ait gr olarak ağırlık kayıpları (üst bıçak)

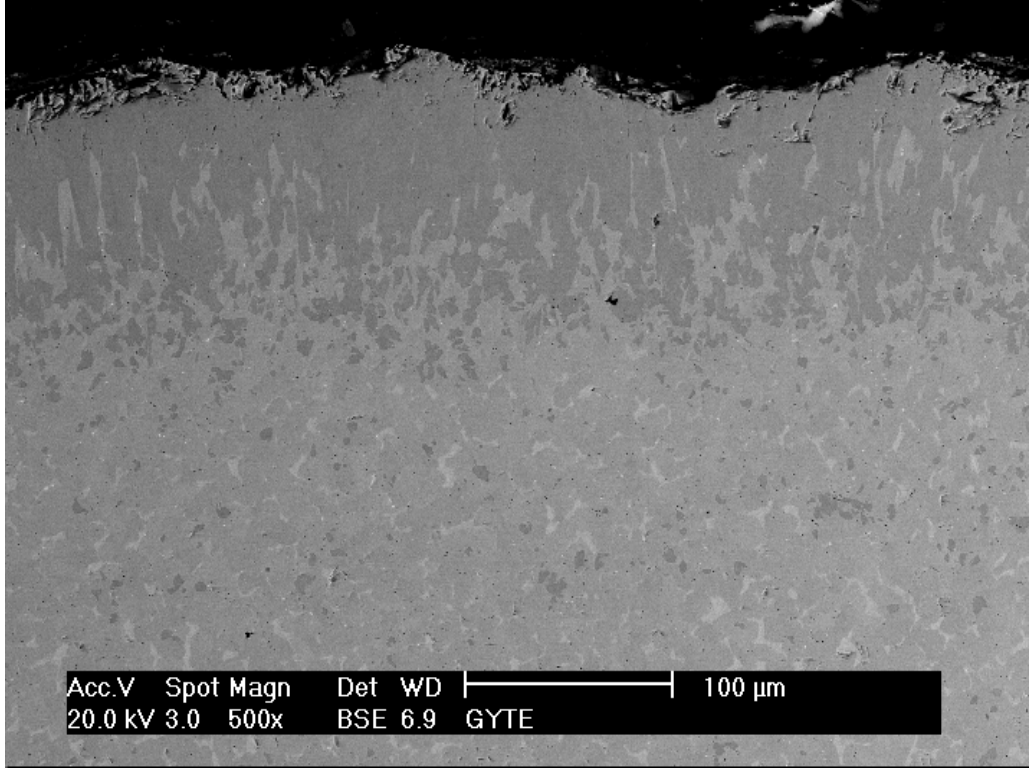
Borlanan numunelerin borür tabakalarını net görebilmek için SEM analizi yapılmıştır. SEM analizi Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Sem analizleri Philips XL 30S marka taramalı elektron mikroskobunda (Şekil 4.5.) yapılmıştır. AISI 1050'ye ait Sem görüntüleri Şekil 4.6., Şekil 4.7., Şekil 4.8.'de gösterilmektedir.



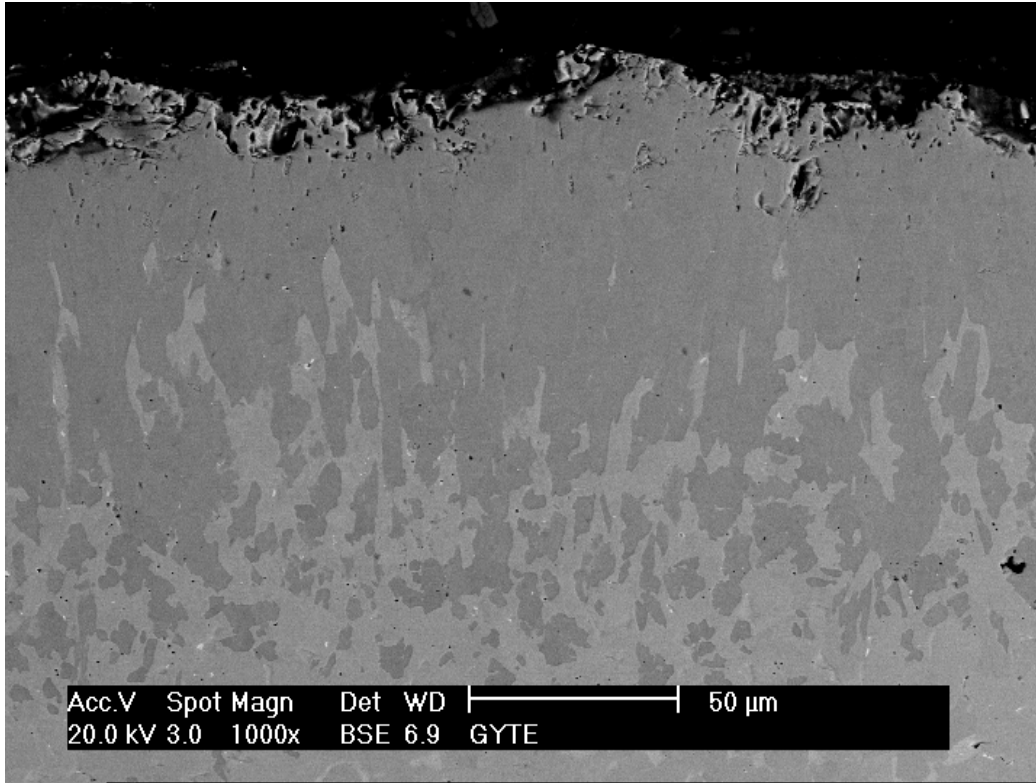
Şekil 4.5. Philips XL 30S marka taramalı elektron mikroskobu



Şekil 4.6. AISI 1050'ye ait SEM görüntüsü (250 büyütme)

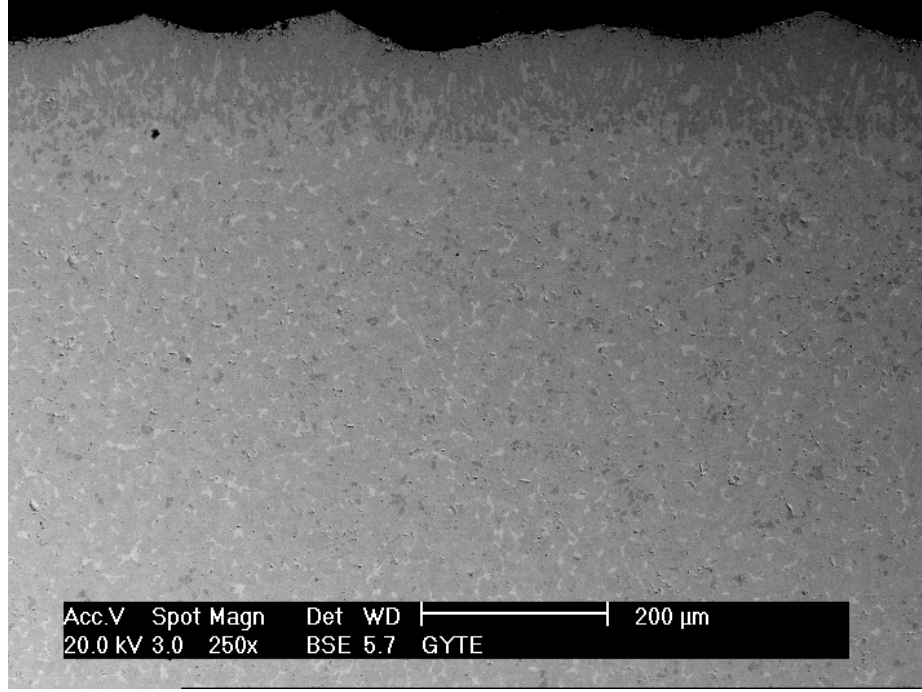


Şekil 4.7. AISI 1050'ye ait SEM görüntüsü (500 büyütme)

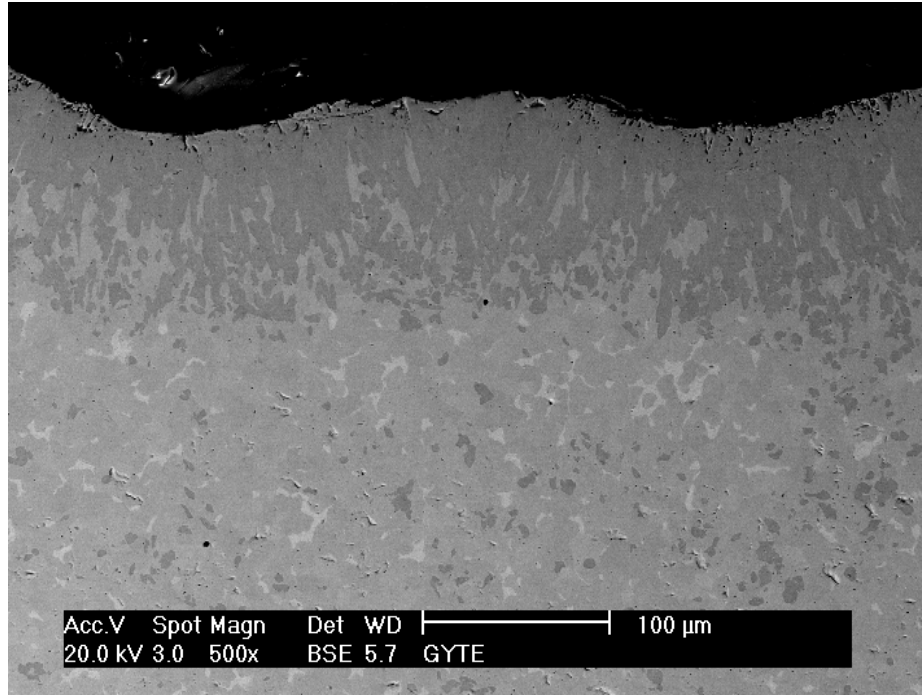


Şekil 4.8. AISI 1050'ye ait SEM görüntüsü (1000 büyütme)

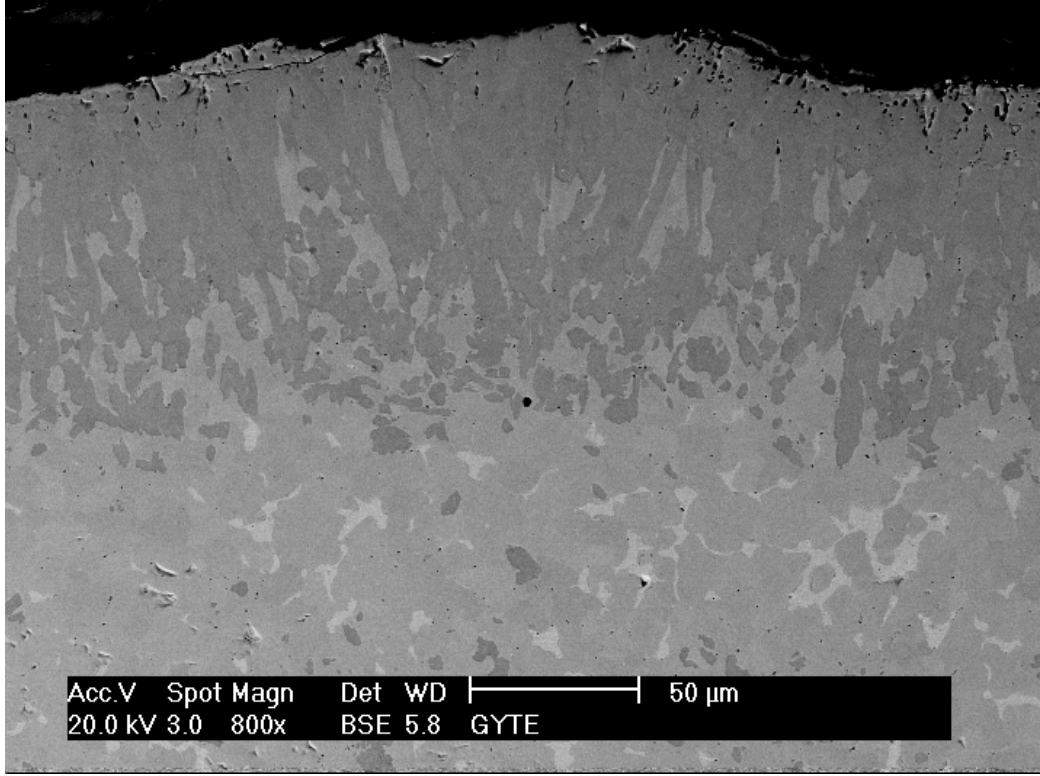
AISI 1010'a ait Sem görüntüleri Şekil 4.9., Şekil 4.10., Şekil 4.11.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.9. AISI 1010'a ait SEM görüntüsü (250 büyütme)

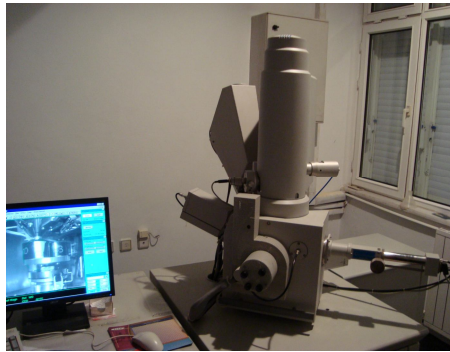


Şekil 4.10. AISI 1010'a ait SEM görüntüsü (500 büyütme)

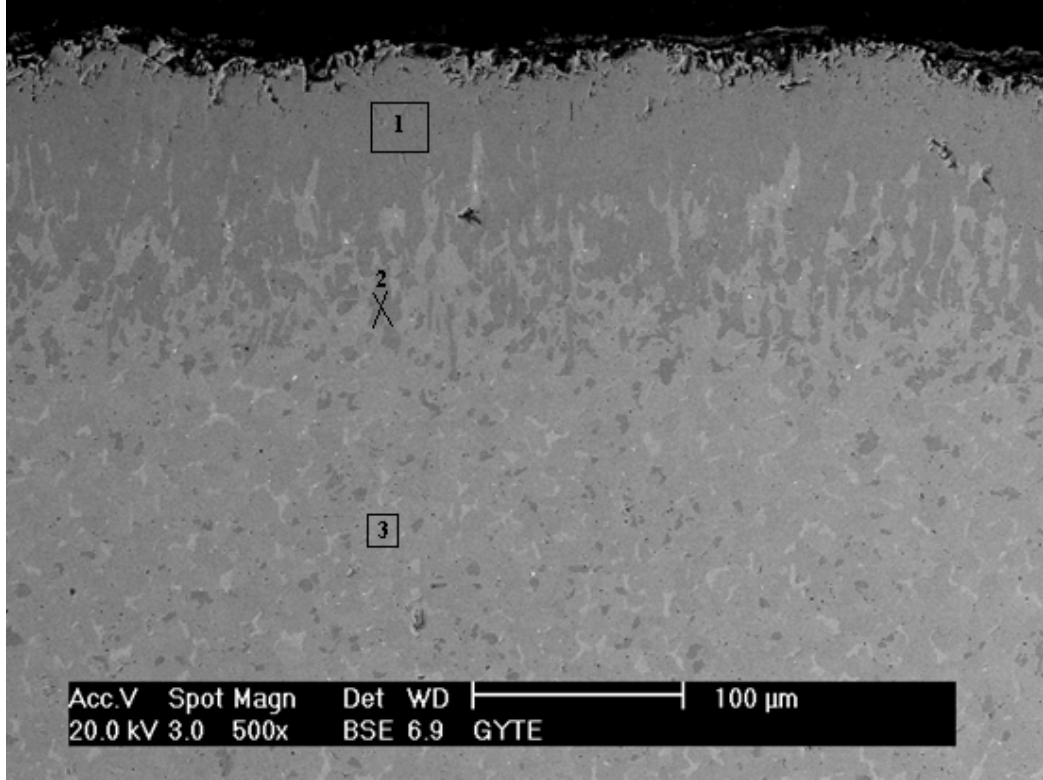


Şekil 4.11. AISI 1010'a ait SEM görüntüsü (800 büyütme)

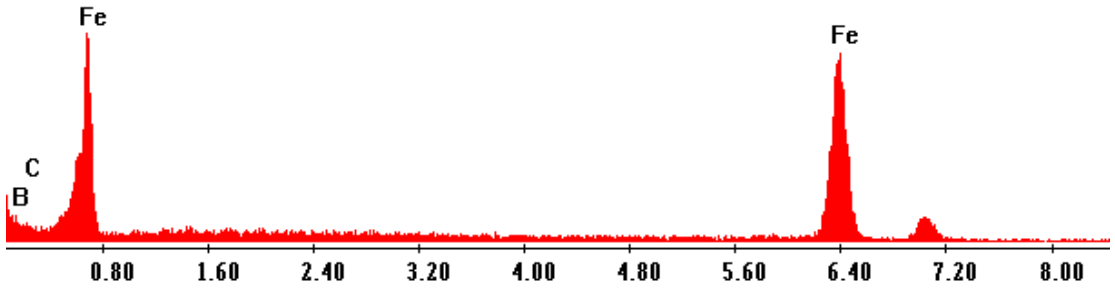
Borlanan numunelerin borür tabakasının ve ana matriksin kimyasal bileşimini görmek için SEM-EDX analizi yapılmıştır. SEM-EDX analizi Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında yapılmıştır. SEM-EDX analizleri Philips XL 30S marka taramalı elektron mikroskobunda (Şekil 4.12.) yapılmıştır. Kimyasal içerik bilgilerinin hangi bölge veya noktadan alındığını görebilmek için bir adet SEM görüntüsü verilmiştir (Şekil 4.13.). AISI 1050'ye ait SEM-EDX içerikleri Şekil 4.14., Şekil 4.15., Şekil 4.16.'da gösterilmektedir.



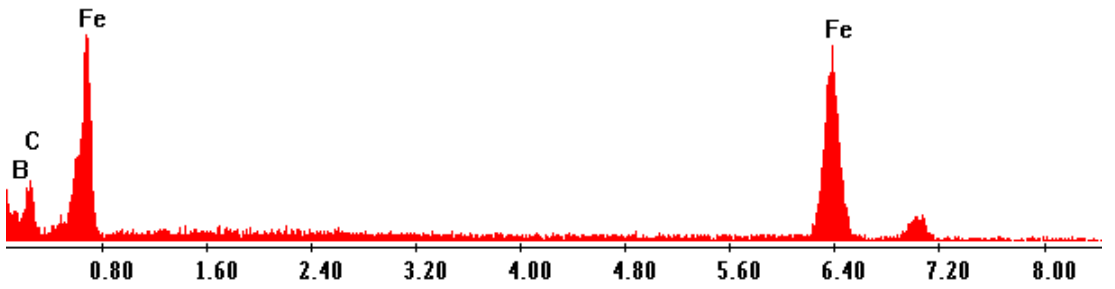
Şekil 4.12. Philips XL 30S marka taramalı elektron mikroskobu



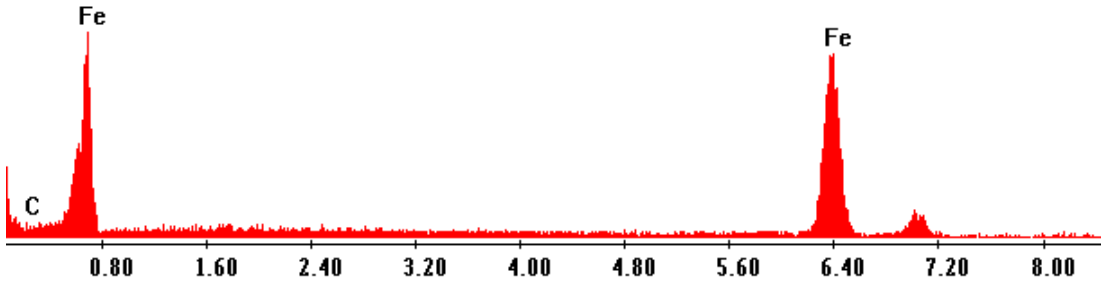
Şekil 4.13. AISI 1050'ye ait SEM görüntüsü (500 büyütme)



Şekil 4.14. AISI 1050'ye ait SEM-EDX çıktısı (1 numaralı bölge)

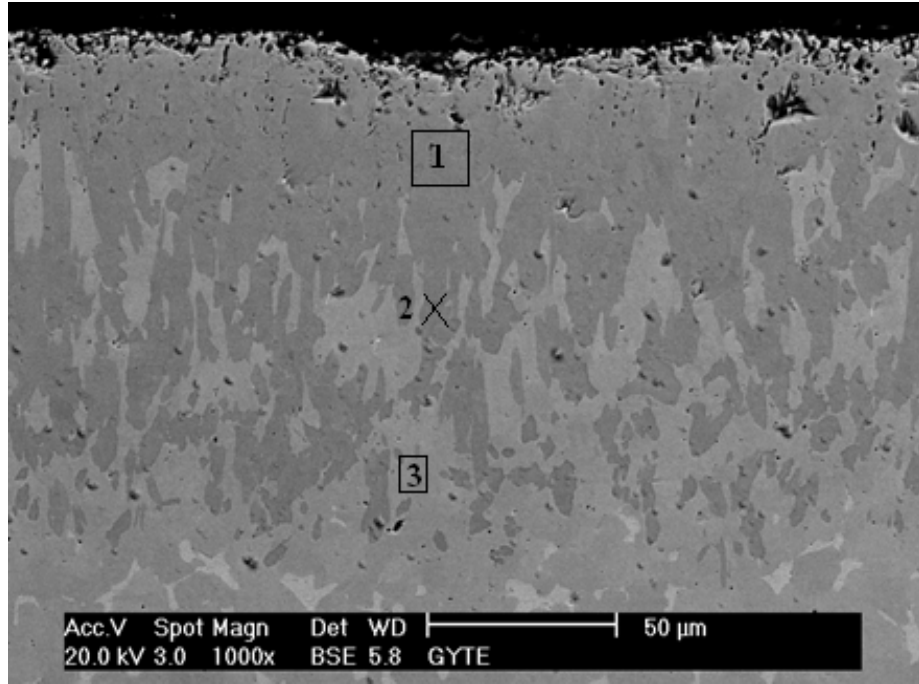


Şekil 4.15. AISI 1050'ye ait SEM-EDX çıktısı (2 numaralı nokta)

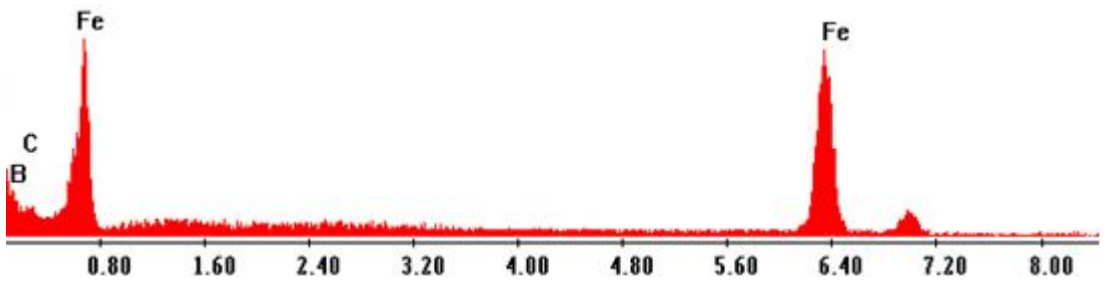


Şekil 4.16. AISI 1050'ye ait SEM-EDX çıktısı (3 numaralı bölge)

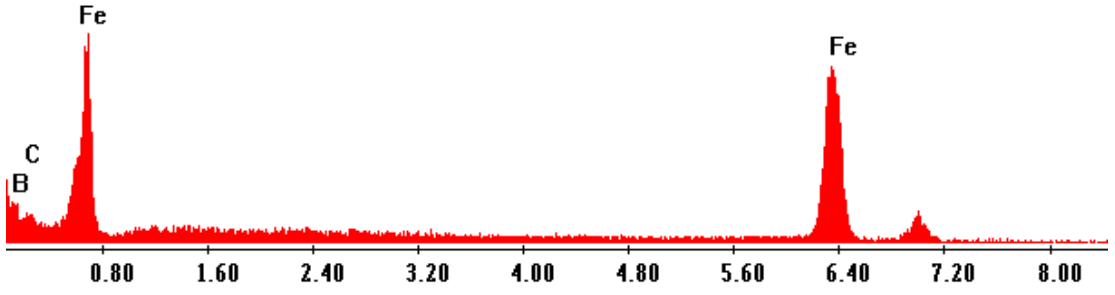
AISI 1010'a ait SEM görüntüsü (Şekil 4.17.) ve SEM-EDX içerikleri Şekil 4.18., Şekil 4.19., Şekil 4.20.'de gösterilmektedir.



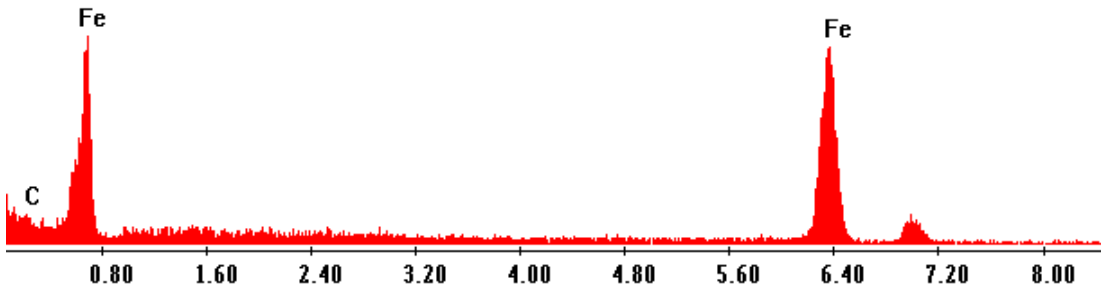
Şekil 4.17. AISI 1010'a ait SEM görüntüsü (1000 büyütme)



Şekil 4.18. AISI 1010'a ait SEM-EDX çıktısı (1 numaralı bölge)

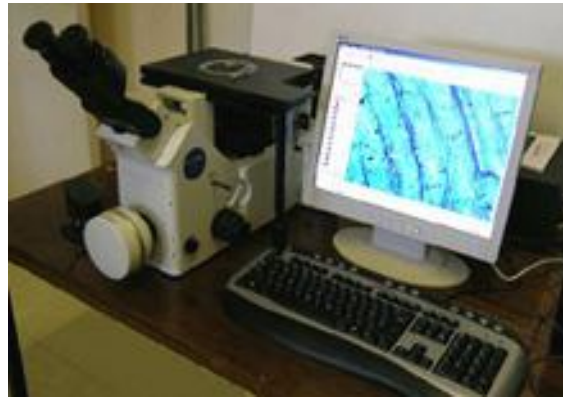


Şekil 4.19. AISI 1010'a ait SEM-EDX çıktısı (2 numaralı nokta)



Şekil 4.20. AISI 1010'a ait SEM-EDX çıktısı (3 numaralı bölge)

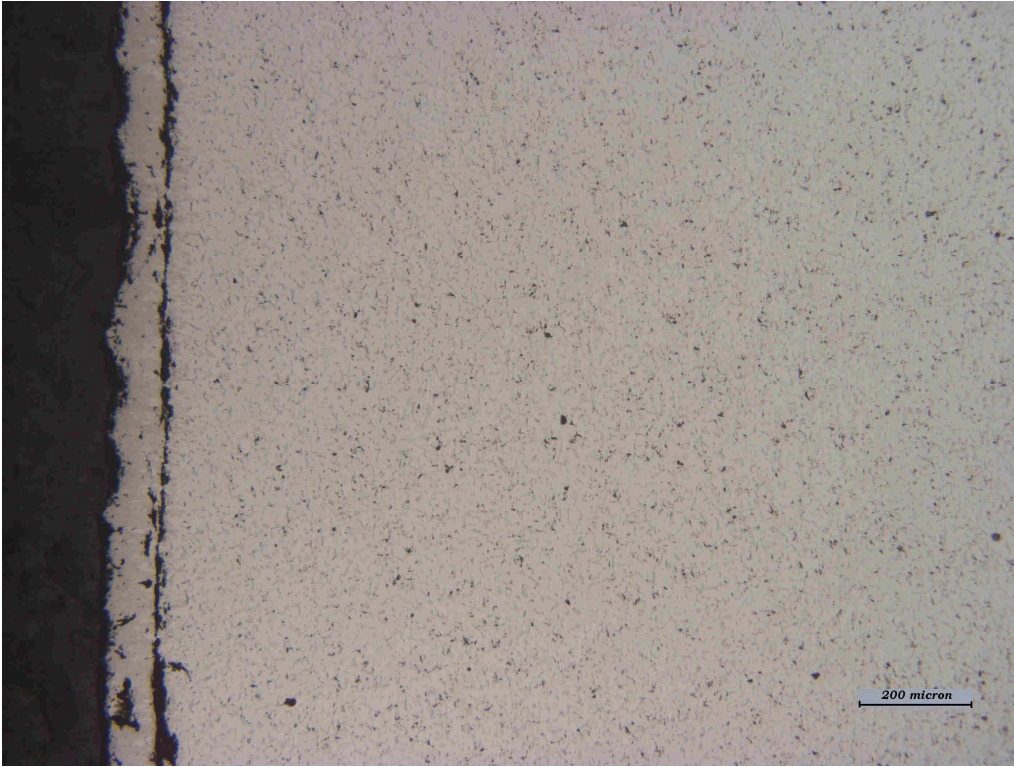
Borlanan numunelerin borür tabakasını, geçiş bölgesini ve ana matriksi belirgin bir şekilde görmek için metalografik inceleme yapılmıştır. Metalografik inceleme Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında yapılmıştır. Metalografik inceleme için Olympus GX-51 marka optik mikroskop (Şekil 4.21.) kullanılmıştır. Borlanan numunelerin borür tabakası, geçiş bölgesi ve anayapının belirgin bir şekilde ayrıldığı ortaya çıkmıştır. AISI 1050'ye ait mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.22., Şekil 4.23., Şekil 4.24., Şekil 4.25.'de görülmektedir.



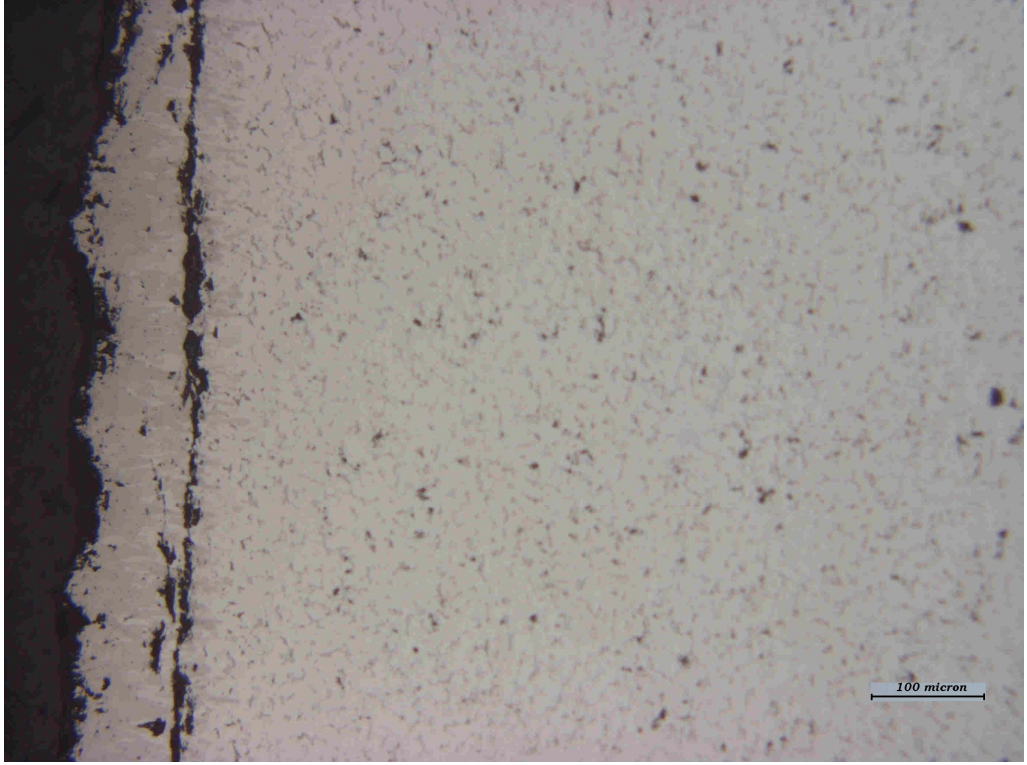
Şekil 4.21. Olympus GX-51 marka optik mikroskop



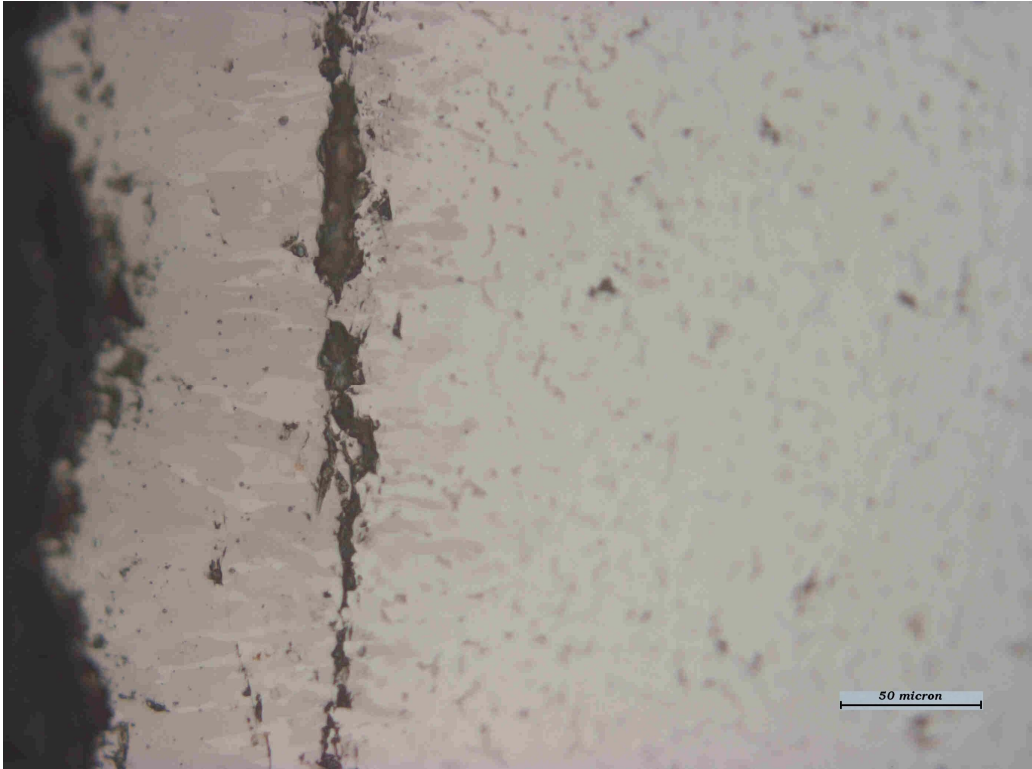
Şekil 4.22. AISI 1050'ye ait mikroyapı fotoğrafı (300 mikron)



Şekil 4.23. AISI 1050'ye ait mikroyapı fotoğrafı (200 mikron)

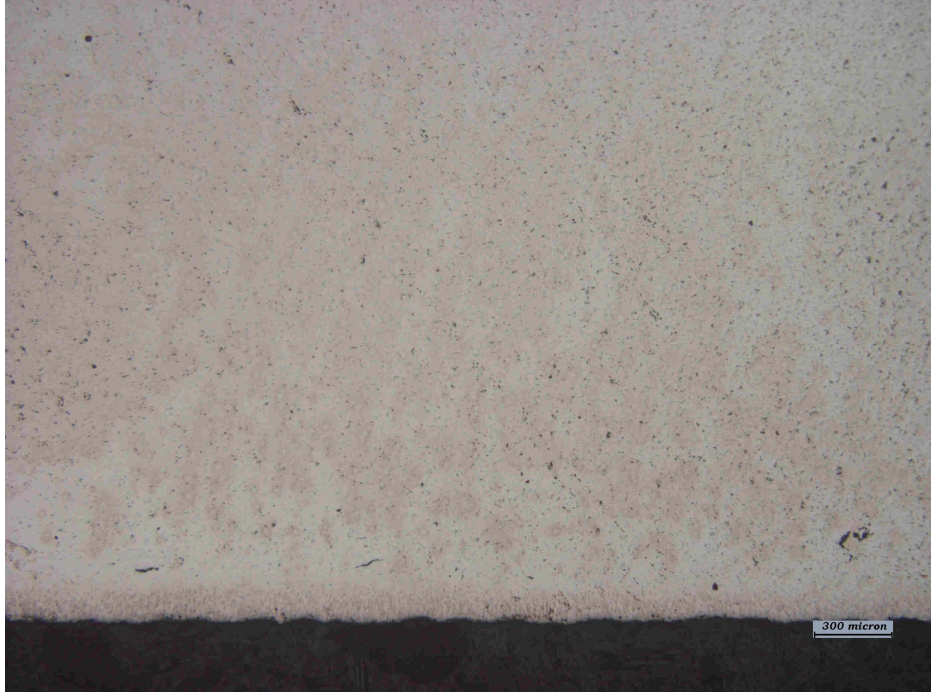


Şekil 4.24. AISI 1050'ye ait mikroyapı fotoğrafı (100 mikron)



Şekil 4.25. AISI 1050'ye ait mikroyapı fotoğrafı (50 mikron)

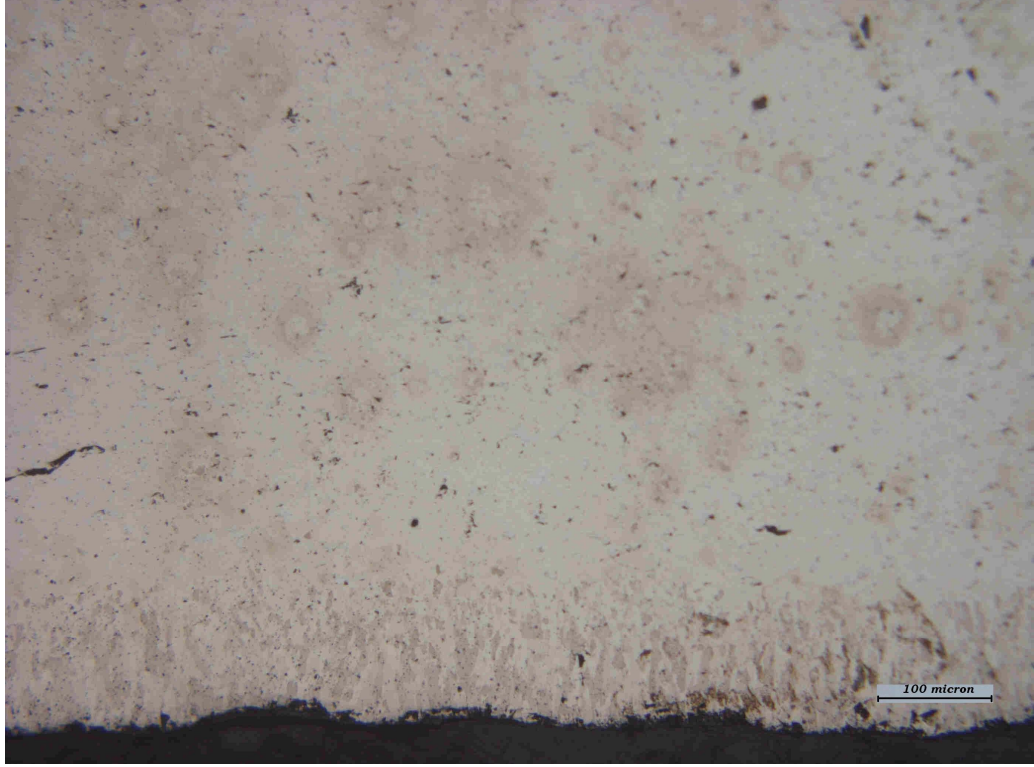
AISI 1010'a ait mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.26., Şekil 4.27., Şekil 4.28., Şekil 4.29.'da görülmektedir.



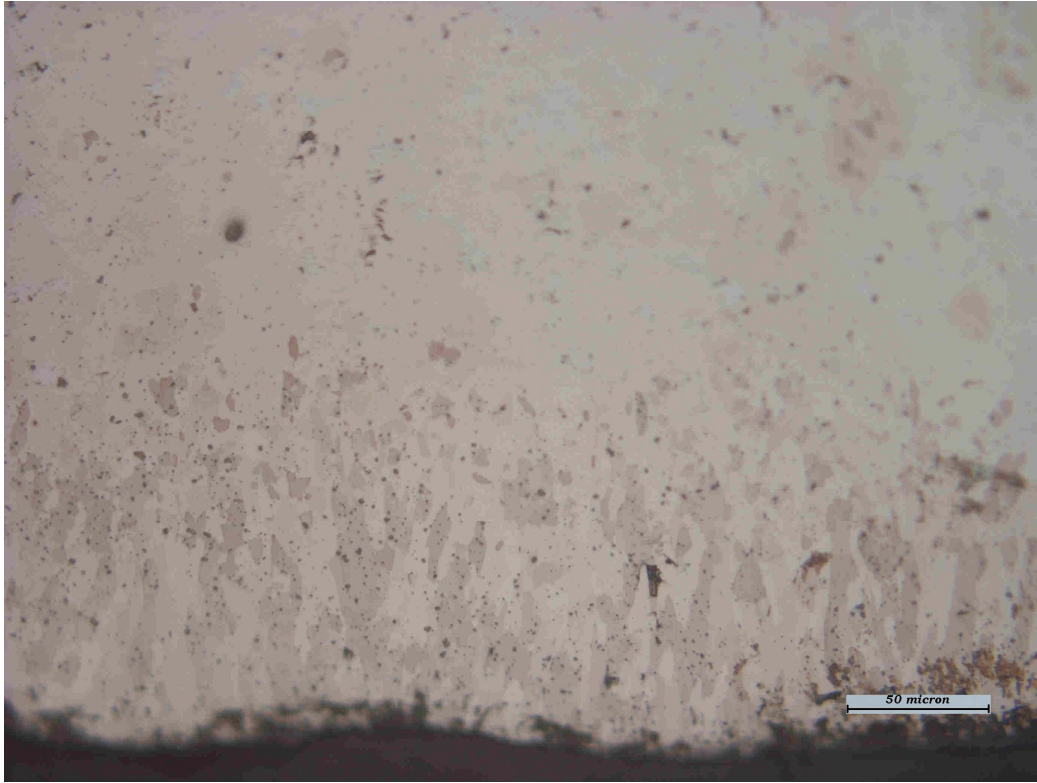
Şekil 4.26. AISI 1010'a ait mikroyapı fotoğrafı (300 mikron)



Şekil 4.27. AISI 1010'a ait mikroyapı fotoğrafı (200 mikron)



Şekil 4.28. AISI 1010'a ait mikroyapı fotoğrafı (100 mikron)

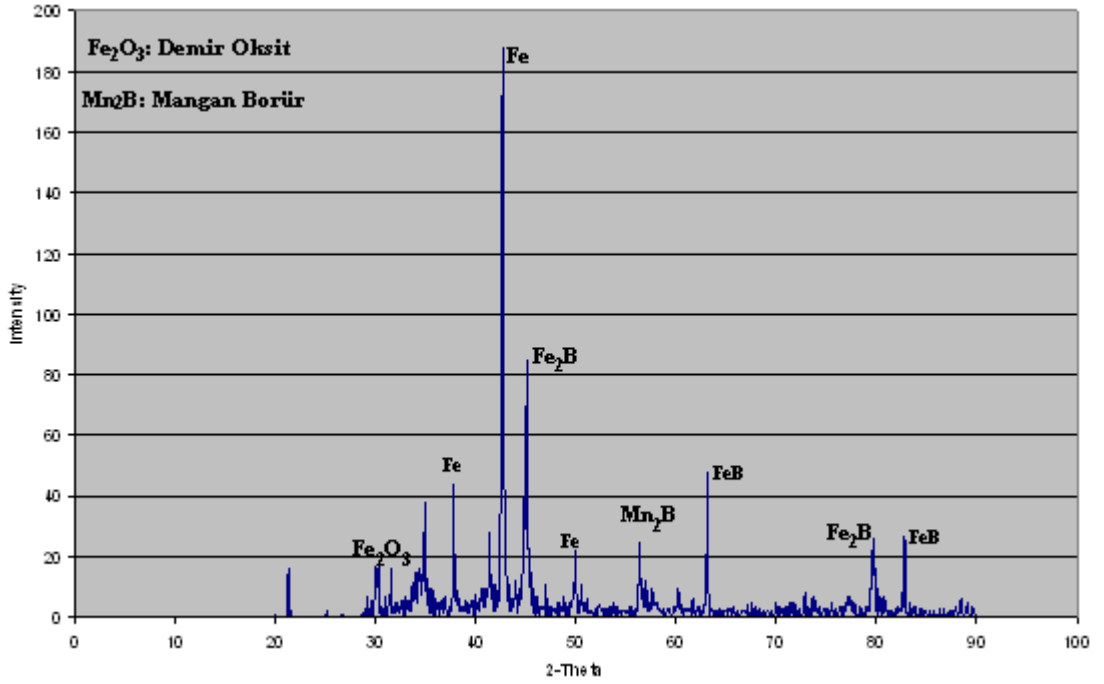


Şekil 4.29. AISI 1010'a ait mikroyapı fotoğrafı (50 mikron)

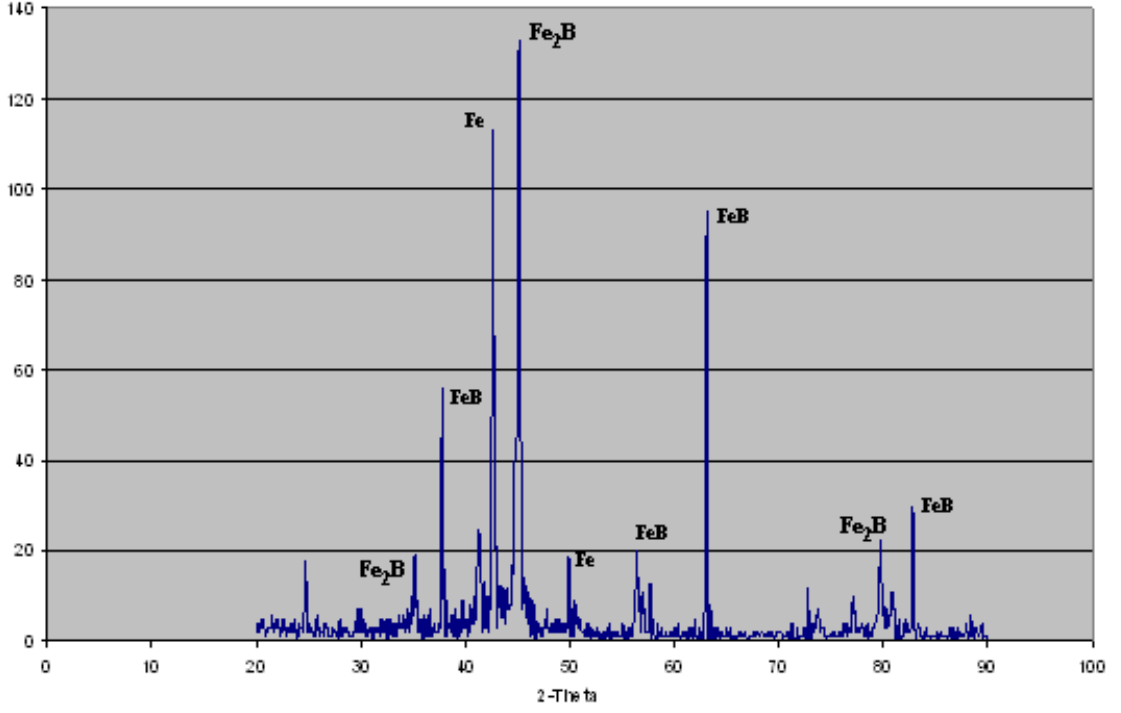
Borlanan numunelerin, borlama işlemi uygulandığı esnada numunenin iç yapısında hangi fazların ve ne gibi bileşimlerin oluştuğunu anlamak için X-ışınları difraksiyonları analizi yapılmıştır. X-ışınları difraksiyonları analizi Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. X-ışınları difraksiyonları analizi için Bruker D8 Advance marka XRD cihazı (Şekil 4.30.) kullanılmıştır. AISI 1050'ye ait XRD çıktısı Şekil 4.31.'de, AISI 1010'a ait XRD çıktısı Şekil 4.32.'de görülmektedir.



Şekil 4.30. Bruker D8 Advance marka XRD cihazı



Şekil 4.31. AISI 1050'ye ait X-ışınları difraksiyonu çıktısı



Şekil 4.32. AISI 1010'a ait X-ışınları difraksiyonu çıktısı

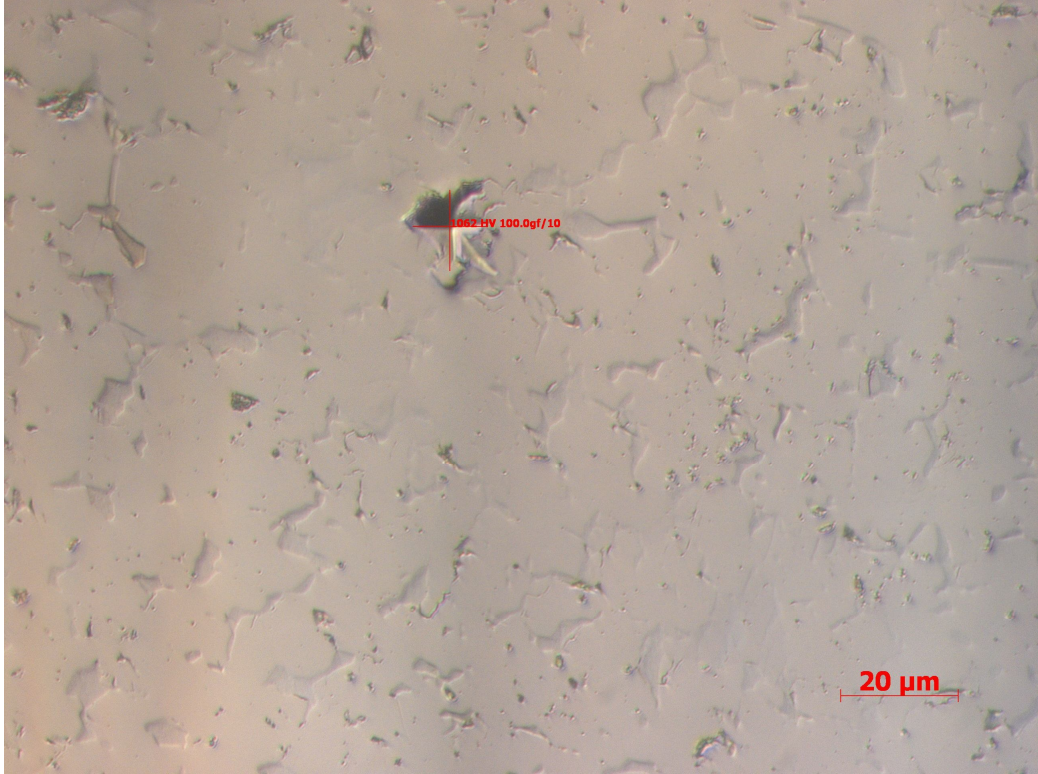
Borlanan numunelerin sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik değerleri Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında ölçülmüştür. Sertlik değerleri analizi için Instron Wolpert Testor 2100 Series marka sertlik ölçüm cihazı (Şekil 4.33.) kullanılmıştır. AISI 1050'ye ait sertlik değerleri Şekil 4.34. ve 4.35.'de görülmektedir.



Şekil 4.33. Instron Wolpert Testor 2100 Series marka sertlik ölçüm cihazı

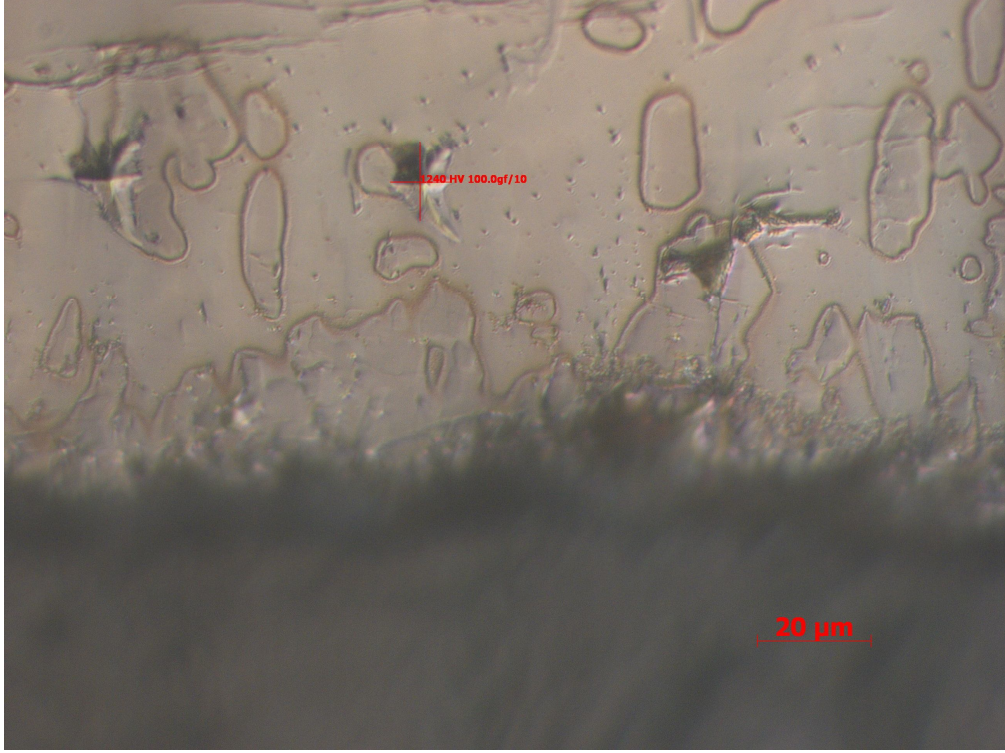


Şekil 4.34. AISI 1050'ye ait kaplama sertliği (1365 HV)

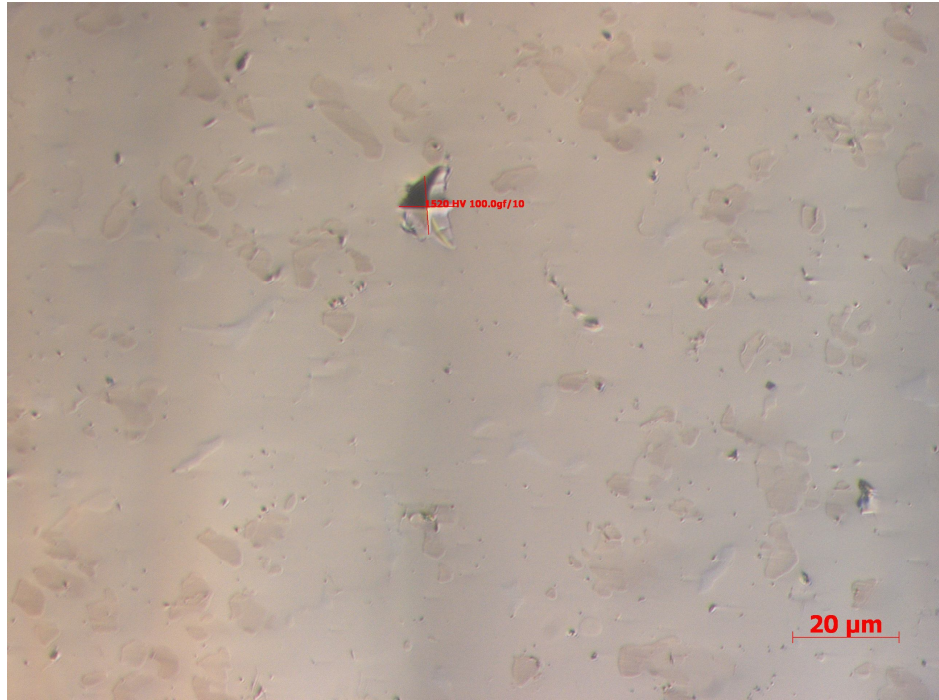


Şekil 4.35. AISI 1050'ye ait yüzey sertliği (1062 HV)

AISI 1010'a ait sertlik değerleri Şekil 4.36. ve 4.37.'de görülmektedir.



Şekil 4.36. AISI 1010'a ait kaplama sertliği (1520 HV)



Şekil 4.37. AISI 1010'a ait yüzey sertliği (1240 HV)

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Yürütülen çalışma çerçevesinde birçok deney, görüşme ve analiz yapılmıştır. Öncelikle borlama işlemi ve borlanan parçaların maliyet analizleri yapılacak olursa, yürütülen çalışmanın katma değeri ve sanayiye olan faydası daha çok anlaşılacaktır.

Yan sanayiden alt makas bıçağı 28,32 €'ya, üst makas bıçağı 16,52 €'ya temin edilmektedir. Buda bir adet makas takımının 44,84 €'ya yani yaklaşık olarak 102,00 TL (€=2,2784 TL) civarındadır (fiyat 1000 adet parça temini üzerinden alınmıştır).

Lazer kesimle aynı parçalar yeniden üretilerek, alt makas bıçağı 0,50 €'ya, üst makas bıçağı 0,40 €'ya yani yaklaşık olarak 2,00 TL (€=2,2784 TL) civarındadır (fiyat 1000 adet parça üretimi üzerinden alınmıştır).

Borlama işlemi maliyeti, borlama işleminin gerçekleştirileceği ortamın katı, sıvı, gaz olmasına göre; borlanacak malzemenin çeşidine, borlama süresine göre değişmektedir. Borlama işlemi için, borlama malzemesi fiyatları, üretici firmaya göre değişiklikler göstermektedir.

Mersinde faaliyet gösteren Karizma Makina şirketinden alınan borlama fiyatına göre bir adet makas takımı 5,90 €'ya yani yaklaşık olarak 13,50 TL (€=2,2784 TL) civarındadır (fiyat 1000 adet parçanın borlanması üzerinden alınmıştır).

Piyasadan yaklaşık olarak 100,00 TL'ye temin edilen bir makas takımı, lazerle kesilip borlanması halinde yaklaşık olarak 15,50 TL'ye mal edilmektedir. Piyasadaki bulunan atkı makas takımının kullanım ömrü yaklaşık olarak 600-900 (1-1,5 ay)saat arasındadır (günlük ort. 20 saat). Bunun yanında borlanan parçalar yaklaşık olarak 3600 (6 ay) saat çalışmakta ve çalışma performansı bu şekilde devam ederse yaklaşık olarak minimum 7200-9000 (12-15 ay) saat civarında çalışması beklenmektedir.

Bu doğrultuda genel bir değerlendirme yapılacak olursa borlanan parçalar orijinallerine göre ömür olarak yaklaşık 6 kat (şu ana kadar devam eden net çalışma süresi, beklenen çalışma süresi hariç), maliyet olarak da yaklaşık olarak 6,5 kat daha avantajlıdır. 100 adet dokuma tezgahı bulunan Shamrock Tekstil firmasının 100 adet takım masrafı $100 \times 100 = 10.000,00$ TL, 6 ayda her ay yenilenmesi halinde ise yaklaşık

olarak masrafı 60.000,00 TL civarındadır. Şayet borlanmış takım kullanırsa yaklaşık olarak $100 \times 15 = 1.500,00$ TL masraf ederek 6 ay süre boyunca başka hiçbir masrafa gerek duymadan takımlarını kullanabilecektir. Bu da 6 aylık bir süreçte firmaya yaklaşık olarak 58.500,00 TL'lık, yani yaklaşık olarak %97,5'luk bir tasarruf sağlayacaktır. Bu avantaj kullanım ömrünün artmasıyla daha da artacaktır.

Bu çalışmanın sonuçları genel olarak incelenecek olursa;

- AISI 1050 ve AISI 1010 malzemelerinin çok iyi borlama kabiliyetleri olduğu tespit edilmiştir.
- 900°C'de, 6 saat borlama sonucunda AISI 1050'de 1365 HV'lik, AISI 1010'da ise 1520 HV'lik bir sertlik değeri elde edilmiştir.
- Yapılan analizler sonucunda, borlama işlemi sonrası her iki malzemede de FeB ve Fe₂B fazları tespit edilmiştir.
- Yapılan deneylerde, borlama işlemi sonucunda borlanan malzemelerin mükemmel aşınma davranışı gösterdiği tespit edilmiştir.
- Borlama işlemi ile malzeme ömürlerinin, kullanım şartlarına bağlı olarak yaklaşık 6-12 kat arttırılabileceği gözlenmektedir.
- Borlama işleminin, sanayideki aşınma problemlerinde maliyeti ne kadar büyük oranda azaltılabileceği gösterilmektedir.
- Türkiye'de ticari olarak borlama işlemini birkaç şirketinin yaptığı, Türkiye'de borlama işleminin endüstriyel uygulamalarda pek kullanılmadığı tespit edilmiştir.
- Borlama işlemi ile ilgili olarak Türkiye'de yapılan çalışmaların çok büyük bir kısmının akademik düzeyde olduğu, sanayi ile birlikte çalışmaların yapılmadığı tespit edilmiştir.

Elde edilen veriler doğrultusunda bir değerlendirme yapılacak olursa;

- Sanayide kullanılan ve çok arıza çıkaran parçalar üzerinde çalışmalar yapılabilir.
- Altlık malzeme olarak daha farklı çelik türleri seçilip, bu parçalar üzerinde çalışmalar yapılabilir.
- Sanayinin kanayan yarası olan, kullanım ömrü az parçaların, ömrü uzatılarak çok ciddi tasarruflar sağlanabilir. Ülke ekonomisine katkı daha çok arttırılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Acarkan, N., 2002. Bor Ürün Çeşitleri ve Kullanım Alanları. I. Uluslararası Bor Sempozyumu, S 1-3, Kütahya.
- Akbayır, Ö., 2005. Katı Ortamda Borlanmış AISI 1030 Çeliğinde İşlem Parametrelerinin Yüzey ve Aşınma Özelliklerine Etkisi. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 108s, Eskişehir.
- Anonim, 2001. DPT, 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu. Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Kimya Sanayii Hammaddeleri Cilt II, Çalışma Grubu Raporu, 179 s, Ankara.
- Anonim, 2003. Bor Raporu. TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, 50s, Ankara.
- Anonim, 2005. Bor Raporu. TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 31s, Ankara.
- Anonim, 2006. DPT, 9. Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu. Kimya Sanayi Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 103 s, Ankara.
- Anonim, 2008. DPT. 9. Kalkınma Planı (2007-2013) Kimya Sanayii Özel İhtisas Komisyonu Raporu. Bor, Soda Külü, Krom Kimyasalları Çalışma Grubu Raporu, Yayın No 2776, ISBN 978-975-19-4353-8, 133 s, Ankara.
- Anonim, 2011. Bor Sektör Raporu 2010. Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 11s, Ankara.
- Ayter, T., 2005. Borlama İşleminin Çeliklerin Yüzey Kalitesi ve Aşınma Davranışına Etkisinin İncelenmesi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 96s, Manisa.
- Barış, M., 2007. Farklı Borlama Sürelerinin Transmisyon Çeliğinde Abrasiv Aşınma Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 81s, Ankara.
- Baykal, E.D., 2003. Hidrotermal ve Mikrodalga Enerjiyle Lityum İçeren Boratlı, Fosfatlı ve Borfosfatlı Bileşiklerin Sentezlenmesi, Kristal Yapı ve Termokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 175s, Balıkesir.
- Bejar, M.A., Moreno, E., 2006. Abrasive Wear Resistance of Boronized Carbon And Low-Alloy Steels. Journal of Materials Processing Technology, ISSN 0924-0136, V 173, P 352-358.
- Can, H., 2009. Borlanmış AISI L6 Çeliğinde Metalografik ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 75s, Eskişehir.

- Çalık, A., Özsoy A., 2002. The Effects on the SAE 1010 Steel of Thermal Cycling Boronizing Process. 11th International Metallurgy and Material Congress, P 1281-1288, İstanbul.
- Çalık, A., Delikanlı, K., Uzun H.A., 2002. Ç 1040 Çeliğinin Borlanması Oluşan Borür Tabakasının Özelliklerinin İncelenmesi. I. Uluslararası Bor Sempozyumu, S 109-113, Kütahya.
- Çalık, A., Yakut, A.K., Taylan, F., 2007. Boraks Banyosunda Borlama Ve Karbürleme İşleminin Araştırılması. TÜBİTAK Temel Bilimler Araştırma Projesi. Proje No 105M359. 25s. Ankara.
- Çarboğa, C., 2010. Düşük Karbonlu Çeliklere Bor İlavesinin Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 238s, Ankara.
- Çeğil, Ö., 2002. AISI 8620 Çeliğinin Bor-Vanadyumlanması ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 88s, Sakarya.
- Çelikyürek, İ., Baksan, B., Gürler, R., 2004. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Borlanması. II. Uluslararası Bor Sempozyumu, S 231-234, Eskişehir.
- Çelikyürek, İ., 2006. Demir Aluminatların Borlanması ve Aşınma Özelliklerinin Belirlenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 195s, Eskişehir.
- Delikanlı, K., Ulusoy, N., Uzun, H.A., 2003. Yüzeyleri Borlama İle Sertleştirilen Ç 1040 Çeliğinin Abrasiv Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımı. II. Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu, S 59-66, Ankara.
- Demir, C., 2006. Bor Minerallerinin Enerji Kaynağı Olarak Değerlendirilmesi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 53s, Konya.
- Develi, F., 2010. Plazma Nitrürleme ve Borlama İle Çift Yüzey İşlem Uygulanmış AISI 8620 Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s, Afyon.
- Döngel, A., 2008. Bortemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışının İncelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 96s, Afyon.
- Ediz, N., Özday H., 1999. Bor Mineralleri ve Ekonomisi. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, ISSN 1302-3055, Sayı 2, S 131-151, Kütahya.

- Ekmekçiler E., 2006. Borlanmış Demir Aluminat (FeAl) Malzemenin Kinetik ve Mekanik Özellikleri. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 72s, Gebze.
- Eroğlu, M., Kurt, B., Güler, H., Güler, Ö., 2007. Bor Yüzey Kaplama Örtülü Elektrot İmalı. TÜBİTAK Temel Bilimler Araştırma Projesi. Proje No 105M344. 72s. Ankara.
- Ersöz A., 2008. Elektrokimyasal Borlama İle Çeliklerin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 106s, İstanbul.
- Eskişehir Osmangazi Üniversitesi. Bor Uygulama ve Araştırma Merkezi. İnternet sitesi. <http://www2.ogu.edu.tr/~boram/boram.html>. Erişim tarihi: 31.12.2009
- Fichtl, W., Trausner, N., Matuschka, A.G., 1988. Boronizing With Ekabor, ESK GmbH.
- Goeuriot, P.Y., Fillit, P., Thevenot, F., Driver, J.H., Bruyas, H., 1982. The Influence Of Alloying Element Additions On The Boriding Of Steels. Materials Science and Engineering, ISSN 0921-5093, V 3, P 9-19.
- Görgülü A.O., Arslan M., 2003. Alternatif Bor Bileşikleri. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, ISSN 1301-7985, Cilt 5, No 1, S 42-50.
- Güyağüler, T., 2001. Türkiye Bor Potansiyeli. IV. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, S 18-27, İzmir.
- Kalafatoğlu, İ.E., Örs, S.N., 2003. 21. Yüzyılda Bor Teknolojileri ve Uygulamaları. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, ISSN 1301-7985, Cilt 5, No 1, S 59-71.
- Kantürk, A., 2006. Borakstan Sodyum Borhidrür Üretimi ve Üretimi Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 115s, İstanbul.
- Karaman, Y., 2003. Endüstriyel Borlama ve Tekstil Endüstrisinde Bir Uygulama. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 121s, Isparta.
- Kayalı, Y., 2006. Bortemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Mekanik Özellikleri ve Aşınma Davranışının Araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 116s, Afyon.
- Kılıç, A.M., 2004. Bor Madeninin Türkiye Açısından Önemi ve Gelecekteki Yeri. II. Uluslararası Bor Sempozyumu, S 31-41, Eskişehir.

- Köseli B., 2008. Bor İçerikli Elektrotlarla Düşük Karbonlu Çelik Yüzeylerinin Kaplanması ve Aşınma Direncinin İncelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 109s, Elazığ.
- Maden Teknik Arama Genel Müdürlüğü. İnternet sitesi. <http://www.mta.gov.tr>
Erişim tarihi: 10.10.2010
- Matuschka, A.G., 1980. Boronizing. Carl Hanser Verlag, München Wien, 100p.
- Mineralienatlas. İnternet sitesi: <http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/MineralData?mineral=Probertit>. Erişim tarihi: 15.06.2011
- Mu, D., and Shen, B., 2010. Oxidation Resistance Of Boronized CoCrMo Alloy. International Journal of Refractory Metals And Hard Materials, V 28, I 3, P 424-428.
- Oliveira, C.K.N., Casteletti, L.C., Neto, A.L., Totten G.E., Heck S.C., 2009. Production and Characterization of Boride Layers on AISI D2 Tool Steel. Vacuum, Surface Engineering, Surface Instrumentation & Vacuum Technology, V 84, I 6, P 792-796.
- Öner, U., 2007. Türkiye'nin Alternatif Enerji Kaynakları ve Bor Madeninin Endüstride Kullanım Alanlarının Araştırılması. İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 102s, İstanbul.
- Önder, S., 2006. Türkiye Bor Madenciliğinde Verimlilik Analizleri. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 154s, Eskişehir.
- Özmen, T., 2007. Katı Ortamda Borlanmış DDK 60 Dökme Demirin Borür Tabakası Büyüme Kinetiği ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 100s, Eskişehir.
- Özsoy, A., 1991. Çeliğin Borlanması Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 101s, Eskişehir.
- Özsoy, A., 2001. Borlama İle İlgili Genel Bir Değerlendirme. Endüstriyel Yüzey Teknolojileri Dergisi, Sayı 22, S 10-13.
- Pazarlıoğlu, S.S., 2006. Çeliklerin Niobyum Borür Kaplanması ve Özellikleri. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 184s, Sakarya.
- Sapmaz, A., Gözen, M., Gözler, M.Z., 2002. Dünya Bor Sektörü ve Türkiye Açısından Önemi. I. Uluslararası Bor Sempozyumu, S 285-290, Kütahya.

- Saygın M., 2006. AISI 1020 Çeliklerinde Borlamanın Yorulma Dayanımına Etkisi. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 59s, Eskişehir.
- Seilnachts Periodensystem. İnternet sitesi. <http://www.seilnact.com>.Erişim:15.02.211
- Selçuk, B., 1994. Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 156s, Kayseri.
- Sinha, A. K., 1991. Boriding (Boronizing). ASM International, ASM Handbook, Vol 4, Heat Treating, P 437-447.
- Şen, Ş., Bindal, C., (1999). AISI 5140 Çeliğinin Yüzeyinde Oluşan Borürlerin Bazı Özellikleri. TMMOB Denizli Makina Mühendisleri Odası Bilim Günleri Bildiriler Kitabı, Yayın No 221, S 670-675.
- Şimşek, M., İçten Yanmalı Motorlarda Borlama İle Mukavemet Özelliklerinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 121s, Isparta.
- Tabur, M., 2008. Bor Karbür Kaplanmış AISI 8620 ve Hardox 400 Çeliklerinin Abrasiv Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 220s, Ankara.
- Tabur, M., İzciler, M., Gül, F., 2009. Borlanmış Hardox 400 Çeliğinin Abrasiv Aşınma Davranışları. V. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, S 363-365, Karabük.
- Toprak, H., 2002. Borlanmış ve PVD Yöntemiyle TiN Kaplanmış KGDD Kam Milleri İle Kaplamasız ve Sertleştirilmiş Çelik Dövme Kam Millerinin Çalışma Performanslarının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 101s, Ankara.
- Turhan A., 2008. Borlamanın Paslanmaz Çeliğin Radyasyon Zırhlama Özelliğine Etkisinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 83s, Isparta.
- Uluköy A., 2005. 21NiCrMo₂ (AISI 8620) Çeliğinden Yapılmış Dişli Çarklara Karbürleme İle Beraber Borlama İşleminin Uygulanması. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 126s, Denizli.
- Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü. İnternet Sitesi. <http://www.boren.gov.tr>
Erişim tarihi: 15.10.2010
- Ulutan, M., 2007. AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 289s, Eskişehir.

- Uzun, H.A., 2002. Borlama İle Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 75s, Isparta.
- Venkataraman, B., Sundararajan, G., 1995. The High Speed Sliding Wear Behaviour of Boronized Medium Carbon Steel. Surface And Coatings Technology, ISSN 0257-8972, V 73, P 177-184.
- Yazıcı A.M., 2006. Küresel Grafitli Dökme Demirin Bortemperlenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 94s, Afyon.
- Yılmaz, A., 2002. Her Derde Deva Hazineimiz Bor. TÜBİTAK, Bilim ve Teknik Dergisi, ISSN 1300-3380 S 414, S 38-48.
- Yılmaz, E., 2005. Borla Kaplanmış Taşıt Aktarma Organlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 90s, Isparta.
- Yılmaz, S.S., Ünlü, B.S., Varol, R., 2007. Borlamanın Demir Esaslı T/M Malzemelerde Yorulma Davranışına Etkisi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, ISSN 1305-1385, Cilt 3, N 1, S 15-21.
- Yılmaz, S.S., Ünlü, B.S., Varol, R., 2008. Borlama ve Bilyalı Dövmenin Demir Esaslı T/M Malzemelerde Aşınma ve Mikro Yapı Özelliklerine Etkisi. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, ISSN 1305-1385, S 1-8.
- Yu L.G., Chen X.J., Khor K.A., Sundararajan G., 2005. Fe/Fe₂B Phase Transformation During SPS Pack-Boriding: Boride Layer Growth Kinetics. Acta Materialia, V 53, I 8, P 2361-2368.
- Yurtseven, R., 2008. Tel Çekme Sanayinde Borlamanın Endüstriyel Uygulaması. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 101s. Denizli.
- Yüksel M., Can A.Ç., Özmen, Y., 1996. X210Cr12 (1.2080 Çeliği) Soğuk İş Takım Çeliğinin Tuz Banyosunda Borlanması. TÜBİTAK Makine, Kimyasal Teknolojiler, Malzeme ve İmalat Teknolojileri Araştırma Projesi. 25s. Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Erdem ALPARSLAN

Doğum Yeri ve Yılı : Denizli / 1984

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce



Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl):

Lise : Denizli Cumhuriyet Lisesi / 2002

Lisans : Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi / 2008