

**KATI ORTAMDA BORLANMIŞ
AISI 1030 ÇELİĞİNDE İŞLEM
PARAMETRELERİNİN YÜZEY VE
AŞINMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Ömür AKBAYIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalürji Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos 2005

**THE EFFECT OF TREATMENT PARAMETERS
ON SURFACE AND WEAR PROPERTIES
OF BORONIZED AISI 1030
STEEL BY PACK METHOD**

Ömür AKBAYIR

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Metallurgical Engineering

August 2005

KATI ORTAMDA BORLANMIŞ AISI 1030 ÇELİĞİNDE İŞLEM
PARAMETRELERİNİN YÜZEY VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Ömür AKBAYIR

Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Metalürji Mühendisliği Anabilim Dalı
Metalürji Mühendisliği Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Ağustos 2005

Ömür AKBAYIR'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Katı ortamda borlanmış AISI 1030 çeliğinde işlem parametrelerinin yüzey ve aşınma özelliklerine etkisi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye: Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Üye: Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN

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

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU
Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmada, katı ortamda borlanmış AISI 1030 çeliğinde ısıtım işlem parametrelerinin yüzey ve aşınma özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Borlanmış numuneler; mikroyapı, mikrosertlik ölçümleri, tabaka kalınlığı ölçümleri, borlama tabakasının büyüme kinetiği ve abrazyon aşınma deneyleri ile karakterize edilmiştir. Kutu borlama yöntemi ile yüzeyi sertleştirilmiş AISI 1030 çelik numunelerin abrazyon aşınma direnci incelenmiştir. Tabakanın büyüme kinetiği, işlem sıcaklığı ve süresine bağımlı olan tabaka kalınlığının ölçülmesi ile analiz edilmiştir. Borlama deneyleri 900°C, 950°C, 1000°C ve 1050°C’de 2, 4 ve 6 saat sürelerde, EKabor®2 tozunda yapılmıştır. Borür tabakası fazlarının (FeB + Fe₂B) varlığı mikroyapı analizleriyle tespit edilmiştir. Borlanmış numunelerin sertliği yüzeyden içeriye doğru ilerledikçe azalmaktadır. İşlem sıcaklığına ve borlama süresine bağımlı olarak, borür tabakasının kalınlığı 80,6 µm ile 340,9 µm arasında değişmektedir. Borlama süresinin uzaması, yüzey tabakasının kalınlaşması ile sonuçlanmaktadır. Yapılan kinetik çalışmaları sonucu; aktivasyon enerjisi (Q) 121,3 kJ mol⁻¹ olarak bulunmuştur. Difüzyon katsayısı (K); 1,3112x10⁻⁸ ile 5,3852x10⁻⁸ cm²s⁻¹ arasında değişmektedir. Bu çalışmanın sonunda AISI 1030 çeliğinin yüzey özelliklerinin borlama ısıtım işlemiyle iyileştirilmiş olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Borlama, abrazyon aşınma, kinetik.

SUMMARY

In this study, the effect of heat treatment parameters on surface and wear properties of boronized AISI 1030 steel by pack method was investigated. The borided samples were characterized by means of microstructure, microhardness measurements, thickness of coating layer measurements, growth kinetics of borided layer and abrasive wear tests. The adhesive wear resistance of surface hardened AISI 1030 steel specimens by pack boronizing method is investigated. The growth kinetics of the layer is analyzed by measuring the thickness of the layer as a function of the treatment time and temperature. Boronizing was performed in EKabor®2 powders. Boronizing treatments were conducted at 900°C, 950°C, 1000°C and 1050°C, for 2, 4 and 6 h, respectively. The presence of borides (FeB + Fe₂B) formed on the surface of steel substrate was confirmed by microstructure analysis. The hardness of borided specimens decreased with the distance from the surface to the interior of the test material. Depending on process temperature and boronizing time the thickness of boride layers ranged from 80,6 to 340,9 µm. The longer boronizing time resulted in the thicker surface layer. It was also observed that boride layers have three different regions: (a) boride layer; (b) transition zone; and (c) matrix. The results of kinetic studies show that activation energy (Q) was found to be 121,3 kJ mol⁻¹. The growth rate constant (K) ranged from 1,3112x10⁻⁸ to 5,3852x10⁻⁸ cm²s⁻¹. Consequently, the boride layer improved the tribological properties of AISI 1030 steel.

Keywords: Boronizing, abrasive wear behavior, kinetics.

TEŞEKKÜR

Günümüzde ülkemiz için önem taşıyan bor bileşiklerinin değerlendirilmesi konusunda çalışmamı sağlayan, çalışmam süresince bilgi ve desteğini esirgemeyerek bu çalışmaya önderlik eden Sayın Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK hocama teşekkür ederim.

Ayrıca; Sayın Prof. Dr. Fazıl TEKİN, Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ, Yrd. Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN, Dr. Ümit ER, Mustafa ULUTAN, Hakan GAŞAN, Derya ERAYDIN, Akif TUTGUN, Zülkane SÜZER, İbrahim PAMUK, Recep DERE, Ahmet YAVUZ, İsmail İNAN, Metin SOL, İrfan BARANSEL, Fahrettin BAKICI, Cevdet AYVAZ, Nazif COŞKUN, Beynabi ŞENTUNA, Hüseyin ATMAN, Gürbüz ÖNKAN, İrfan İDACI, Fedail KORKMAZ'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xii
1. BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
2. BÖLÜM 2.....	2
2.1. Bor Madeni ve Bor Pazarının Yapısı	2
2.2. Alaşım-sız Karbon Çeliklerinin Sınıflandırılması ve Örnek-sel Mekanik Özellikleri	7
2.3. Aşınma ve Aşınmanın Özellikleri.....	8
2.3.1. Aşınma tipleri	13
2.4. Kaynakça Taraması.....	18
3. BÖLÜM 3. BORLAMA VE ÖZELLİKLERİ	26
3.1. Giriş	26
3.2. Borlama İşlemi.....	27
3.2.1. Borlama işleminin avantajları.....	28
3.2.2. Borlama işleminin dezavantajları	30
3.3. Borlama Yöntemleri	31
3.3.1. Kutu borlama	31
3.3.2. Sıvı borlama.....	34
3.3.3. Gaz borlama.....	35
3.3.4. Plazma borlama.....	36
3.3.5. Pasta borlama.....	38
3.3.6. Çok bileşenli borlama	38

İÇİNDEKİLER (devamı)

	<u>Sayfa</u>
3.3.7. Akışkan yataklı fırında borlama	39
3.4. Borlanabilen Malzemeler ve Borürlerin Genel Özellikleri.....	39
3.4.1. Borürlerin özellikleri.....	41
3.4.2. Fe-B ikili denge diyagramı	41
3.4.3. Borür tabakası	42
3.4.4. Borür tabakası kalınlığı.....	46
3.4.5. Demir borürlerin büyüme mekanizması	48
3.4.6. Borür tabakasının büyüme kinetiği.....	49
3.5. Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulamaları	51
4. BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR	54
4.1. Giriş	55
4.2. Deneylede Kullanılan Malzeme	55
4.3. Borlama İşlemi.....	55
4.4. Metalografik İncelemeler.....	56
4.5. Sertlik Ölçümleri.....	65
4.6. Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği.....	69
4.7. Aşınma Deneyleleri	73
5. BÖLÜM 5. SONUÇLARIN İRDELENMESİ.....	84
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	89

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>şekil</u>	<u>sayfa</u>
Şekil 2.1	Yüzeyler arasındaki bağlantıların izafi kayma hareketi ile ayrılması..... 15
Şekil 2.2	(a) iki-cisimli abrazif, (b) üç-cisimli abrazif ve (c) erozif aşınmalar arasındaki farklılıkların şematik gösterimi 17
Şekil 3.1	Fe-B ikili denge diagramı 42
Şekil 3.2	Borür tabakasının şematik olarak gösterimi 44
Şekil 3.3	Borür tabakalarının türleri a) FeB; b) Fe ₂ B 44
Şekil 3.4	Çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi 48
Şekil 3.5	Bor konsantrasyonunun yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak değişimi 51
Şekil 4.1	DeneySEL çalışmada kullanılan cihazlar 57
Şekil 4.2	900 °C’de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 mikroyapısı 58
Şekil 4.3	900 °C’de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı 58
Şekil 4.4	900 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı 59
Şekil 4.5	950 °C’de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı 59
Şekil 4.6	950 °C’de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı 60
Şekil 4.7	950 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı 60
Şekil 4.8	1000 °C’de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı 61
Şekil 4.9	1000 °C’de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı 61
Şekil 4.10	1000 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı 62

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

<u>şekil</u>	<u>sayfa</u>
Şekil 4.11 1050 °C’de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı	62
Şekil 4.12 1050 °C’de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı	63
Şekil 4.13 1050 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı	63
Şekil 4.14 900 °C’de farklı sürelerde borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (100X). a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat.....	64
Şekil 4.15 950 °C’de farklı sürelerde borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (100X). a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat.....	64
Şekil 4.16 1000 °C’de farklı sürelerde borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (100X). a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat.....	64
Şekil 4.17 1050 °C’de farklı sürelerde borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (100X). a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat.....	64
Şekil 4.18 Borlanmış AISI 1030 çeliğinin sıcaklık ve zamana bağlı borür tabaka kalınlığının değişimi	65
Şekil 4.19 900 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan AISI 1030 çeliğinin yüzeyden itibaren mesafeye (µm) bağlı olarak sertlik (HV) dağılımı	67
Şekil 4.20 950 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan AISI 1030 çeliğinin yüzeyden itibaren mesafeye (µm) bağlı olarak sertlik (HV) dağılımı	67
Şekil 4.21 1000 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan AISI 1030 çeliğinin yüzeyden itibaren mesafeye (µm) bağlı olarak sertlik (HV) dağılımı	68
Şekil 4.22 1050 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan AISI 1030 çeliğinin yüzeyden itibaren mesafeye (µm) bağlı olarak sertlik (HV) dağılımı	68
Şekil 4.23 900 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 çeliğinin difüzyon katsayı eğrisi.....	70
Şekil 4.24 950 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 çeliğinin difüzyon katsayı eğrisi.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

<u>şekil</u>	<u>sayfa</u>
Şekil 4.25 1000 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 çeliğinin difüzyon katsayı eğrisi.....	71
Şekil 4.26 1050 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 çeliğinin difüzyon katsayı eğrisi.....	71
Şekil 4.27 Borlanmış AISI 1030 çeliğinin Arrhenius eğrisi	72
Şekil 4.28 Aşınma test düzeneğinin şematik görünümü	77
Şekil 4.29 İşlemsiz numunelerin Al ₂ O ₃ ve SiC aşındırıcı karşısında her 500 tur sonundaki ortalama ağırlık kaybı.....	77
Şekil 4.30 Bütün numunelerin Al ₂ O ₃ aşındırıcı karşısındaki aşınma miktarları	78
Şekil 4.31 Bütün numunelerin SiC aşındırıcı karşısındaki aşınma miktarları	78
Şekil 4.32 Borlanmış numunelerin Al ₂ O ₃ aşındırıcı karşısındaki aşınma miktarları	79
Şekil 4.33 Borlanmış numunelerin SiC aşındırıcı karşısındaki aşınma miktarları.....	79
Şekil 4.34 Al ₂ O ₃ aşındırıcıda 900 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı	80
Şekil 4.35 Al ₂ O ₃ aşındırıcıda 950 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı	80
Şekil 4.36 Al ₂ O ₃ aşındırıcıda 1000 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı	81
Şekil 4.37 Al ₂ O ₃ aşındırıcıda 1050 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı	81
Şekil 4.38 SiC aşındırıcıda 900 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı	82
Şekil 4.39 SiC aşındırıcıda 950 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı	82
Şekil 4.40 SiC aşındırıcıda 1000 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı	83
Şekil 4.41 SiC aşındırıcıda 1050 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı	83

TABLOLAR DİZİNİ

<u>tablo</u>	<u>sayfa</u>
Tablo 2.1 Bölgelerin bor tüketim miktarlarının % dağılımı	5
Tablo 2.2 Alaşım-sız karbon çeliklerinin örneksel mekanik özellikleri ve uygulama alanları	9
Tablo 3.1 Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması	30
Tablo 3.2 Katı ortamda borlama işleminde kullanılan bor kaynakları	33
Tablo 3.3 EKabor borlama ürünleri.....	33
Tablo 3.4 Fe ₂ B ve FeB fazlarının tipik özellikleri.....	45
Tablo 4.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan 1030 çeliğinin % ağırlık cinsinden kimyasal bileşimleri.....	55
Tablo 4.2 AISI 1030 çeliğinin değişik sıcaklık ve sürelerde borlanması sonucu oluşan borür tabakasının kalınlığı ve mikrosertlik değişimi.....	66
Tablo 4.3 Al ₂ O ₃ aşındırıcı karşısında; değişik sıcaklık ve sürelerde borlanmış AISI 1030 numunelerin, her bir tur sonundaki ağırlıkları	74
Tablo 4.4 SiC aşındırıcı karşısında; değişik sıcaklık ve sürelerde borlanmış AISI 1030 numunelerin, her bir tur sonundaki ağırlıkları	75
Tablo 4.5 Bütün numunelerin her 500 tur sonunda ortalama ağırlık kayıpları.....	76

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Makinelerde ortaya çıkan arızaların ve konstrüksiyon elemanlarının kullanım dışı kalmasının en önemli sebeplerinden birisi, belki de en önemlisi aşınmadır. Sürtünme nasıl bir enerji kaybı nedeni ise, aşınma da tekrar geriye kazanılmayan bir madde kaybı sebebidir. Bu yüzden dünyada her yıl önemli ölçüde kayıplar meydana gelmekte buna paralel olarak, kayıpların önlenmesi için çeşitli tedbirler geliştirilmeye çalışılmaktadır (Özbek, 1999).

Yüzey işlemleri, daha ucuz ve daha kolay üretilebilen altlık malzemesinin yüzeyini çeşitli işlemlerle değiştirerek, istenilen özellikte malzeme elde edilmesini ve bunu çok amaçlı kullanarak ekonomik fayda kazanılmasını da sağlamaktır. Bu işlemlerin en önemli avantajı, ucuz bir altlık malzeme yüzeyine yapılacak işlemlerle yüzey-ortam etkileşimine dayanan optik, manyetik, elektriksel, termal, kimyasal, korozyon, oksidasyon ve tribolojik gibi mühendislik özelliklerinin istenilen şekilde değiştirilebilmesidir (Özbek, 1999).

Türkiye'nin dünyada en büyük bor rezervine sahip olan ülke olması sebebiyle ve bor bileşiklerinin üstün özellikleri göz önüne alındığı takdirde, bor kaplamaların ülkemiz açısından önemi ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla bu çalışma; AISI 1030 çeliklerinin borlanarak bazı özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine yapılmıştır.

Bölüm 2 'de bor madeni ve bor pazarının yapısından bahsedilmiştir. AISI 1030 çeliği alaşımsız karbon çeliği olduğundan, alaşımsız karbon çeliklerinin sınıflandırılması ve örneksel mekanik özellikleri anlatılmıştır. Aşınma ve aşınma tipleri belirtilmiştir. Borlama ile ilgili son yıllarda Uluslararası dergilerde yayınlanmış 30 adet makale özetlenmiştir. Bölüm 3 'de borlama işlemi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bölüm 4 'de deneysel çalışmalar ve sonuçları vardır. Bölüm 5 'de sonuçlar ayrıntılı olarak irdelenmeye çalışılmıştır.

BÖLÜM 2

2.1. Bor Madeni ve Bor Pazarının Yapısı

Bor, Türkiye'nin sahip olduğu çok önemli, ancak yeterince değerlendirmediği endüstriyel hammaddelerinden biridir. Ülkemiz, gerek bor minerallerinin sahip olduğu rezerv potansiyeli, gerekse işletme maliyeti ve tenor avantajları ile dünyada en önemli potansiyele sahiptir. Eti grubunun en büyük rakibi US Borax'ın web sayfasında da belirttiği üzere dünyada Bor kullanan endüstriler gün geçtikçe gelişmekte ve yeni kullanım alanları ortaya çıkmaktadır (Üncü ve Yerlikayalar, 2004).

İlk tanınan ve kullanılan bor bileşiği Tinkâl'dır. Tinkâl'ın bazı medeniyetlerce çok eski zamanlardan beri kullanıldığı bilinmektedir. Sümerler ve Etiler dönemlerinde metallerin yüzeyindeki oksit tabakasını çözme işlevi nedeniyle altın ve gümüş işletmeciliğinde, lehim elemanı olarak, yine Mezopotamya ve Mısır medeniyetlerinde antiseptik olarak, Çin'de seramik ve cam üretiminde, Romalılarda arenaların tabanına dezenfektan olarak ve cam yapımında, Arap doktorların ilaç olarak boraks kullandığına dair kaynaklar bulunmuştur. Bu dönemlerdeki bor bileşenlerinin Tibet'ten getirildiği belirtilmekteyse de, Romalıların Anadolu kaynaklarını da kullanmış olmaları büyük bir olasılıktır (Ulutan, 1985: Üncü ve Yerlikayalar'dan 2004). Bor, ham ürün/rafine ürün/kimyasal ürün/nihai ürün şeklinde, başta ABD, Japonya, Fransa, Almanya, İngiltere olmak üzere gelişmiş endüstri ve teknolojiye sahip ülkelerde, 250'yi aşkın kullanım alanı bulması sebebiyle sanayinin en temel girdilerinden birisi konumundadır. Bu kullanım alanlarından yaklaşık 200'ünde ikame ürünü bulunmayan alternatifsiz bir hammaddedir.

Günümüzde bor; nükleer yakıt teknolojisinden motorlu taşıt yakıtlarına, hidrojen elde edilmesine, seramik ve ilaç sanayisine, deterjandan tekstile, cam endüstrisinden yüksek ısı transistörlerine, süper iletkenlere kadar sayısız alanda en az petrol kadar önemli bir üründür. Gelişen teknolojiler, bugün sanayinin tuzu olarak adlandırılan bor'un kullanımını ve bağımlılığını artırmakta ve borun stratejik mineral olma özelliği giderek daha da belirginleşmektedir (BOR, KESK, TMMOB Jeoloji, Metalürji, Kimya, 2003: Üncü ve Yerlikayalar'dan 2004).

1970'li yılların son dönemlerine kadar ülkemizde bor cevheri üretim ve ihracatı Etibank dışında Şayakçı, Yırcalı, Yakal'lar Madencilik Şirketlerinin yanı sıra büyük oranda İngiliz kökenli Borax Consolidated Limited (Rio Tinto Grubuna ait US Borax'ın İngiltere'de yerleşik kolu) şirketinin elinde ve kontrolünde kalmıştır. Ancak ülkemiz-bor cevherlerinin dünya piyasa değerine ulaşabilmesi amacıyla 1978 yılında bor cevherleri ile ilgili verilen ruhsat hakları, 2172 sayılı kanunla geri alınmış ve bunun sonucu yüksek katma değer yaratan ürünlerin üretilmesi görevi Etibank'a devredilmiştir. Günümüzde Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü (Etibank) bu konuda yasal olarak tek yetkili kuruluştur (Üncü ve Yerlikayalar, 2004).

Bor madenlerimiz 1978 yılına kadar sadece ham olarak ve değerinin altında fiyatlarla ihraç edilmekteydi. 1978 yılına kadar geçen süre içerisinde yerli ve yabancı sermayenin hiç birisi katma değerinin yanı sıra piyasa getirisi çok daha yüksek borlu kompozit malzemeler, borlu metalürjik alaşımlar, fiberglas-cam türü bor yatırımlarını bir kenara bırakın rafine bor ve kimyasal bor ürünleri yatırımlarını bile yapmamış veya yaptırmamıştır. Bunun temel nedenini, Lozan'dan bugüne kadar sanayileşmiş ve ekonomisi güçlenmiş bir Türkiye istemeyen batının ülkemiz üstündeki karanlık emelleri olarak değerlendirmek yanlış olamaz sanırım. 1978 den sonra kamuya verilen tekel hakkı ile rafine bor yatırımları artırılmış ve halende devam ettirilmektedir. (Üncü ve Yerlikayalar, 2004).

Bugün, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü ve US Borax ikilisi toplam dünya bor arzının %75'ine yakınına karşılıktamaktadır (Peever, 2002: Üncü ve Yerlikayalar'dan 2004). Günümüz de Bor ürünleri ile ilgili olarak Dünyada bir rezerv sorunu bulunmamaktadır (Robison, 2002: Üncü ve Yerlikayalar'dan 2004). Bu nedenle Dünya Bor pazarı, sınırlı üretici olması ve ürün grubunun birbirlerini ikame edebilme özelliklerinin ürün çeşitlendirmesi gerektirmesi nedeni ile diğer maden ve metal pazarlarından çok ayrı bir yapıya sahiptir. Dünya bor pazarı; diğer maden veya metal borsalarında olduğu gibi, piyasa şartlarında oluşan fiyatlara göre alım-satım işlemlerinin gerçekleştirildiği bir pazar olarak görülmemelidir. Bor pazarındaki fiyatlar ürün ve pazar şartlarının dikkate alınarak belirlendiği iddia edilen ancak ağırlıklı müşterilerle yapılan pazarlıklar sonucu ortaya çıkan ve rakip US Borax'ın ürünlerini ABD dışındaki sattığı pazarlarda yarattığı yapay denge fiyatlarıdır (Üncü, 2001: Üncü ve Yerlikayalar'dan 2004). Dolayısı ile sahip olduğumuz yüksek miktar ve kalitedeki rezervlerden sağlanacak faydanın en üst düzeye çıkarılabilmesi için katma değerleri

daha yüksek ürünlere yönelmek ve ülkemizde borlu sanayileri kurmak büyük önem taşımaktadır.

Bugün B_2O_3 bazında dünya bor üretimi 1.5 milyon civarında olup, bu üretimin %33'ü Eti Maden, %42'si ABD'li US Borax tarafından yapılmaktadır. Ancak, pazarlardaki ürün çeşitliliğinde ve hizmet sunumunda henüz rakibimizin düzeyine ve kapasitesine erişebildiğimizi söylemek mümkün değildir (www.etimaden.gov.tr: Üncü ve Yerlikayalar'dan 2004). Dünya bor arzının yaklaşık %75'ini karşılayan Eti Maden ve US Borax ikilisinden, US Borax'ın yaklaşık 1.2 milyar dolar olduğu söylenen pazardan %65-70, Eti'nin ise %17-18'ler civarında bir pay almasını bu durumda normal karşılamamak gerekir (Roskill, 2002: Üncü ve Yerlikayalar'dan 2004). US Borax'ın ürün yelpazesi (sektörel bazdaki pazarlara yönelik ürünleri), bilgilendirme hatları, araştırma yatırımları, ISO 9001 ve 14001 sertifikaları, hizmet sunumları ve pazarlama ağları göz önüne alındığında (www.usborax.com: Üncü ve Yerlikayalar'dan 2004) Eti Maden'in çok gerilerde olduğunu görürüz.

2001 yılında dünya'da bor tüketiminin, %43'ü (645.000 ton B_2O_3) Fiberglas-cam sektöründe, %16'sı (240.000 ton B_2O_3) deterjan, sabun ve kişisel bakım ürünlerinde, %13'ü (195.000 ton B_2O_3) seramik, sır ve sırça sektöründe, %5'i (75.000 ton B_2O_3) ziraat sektöründe kullanılmıştır (Roskill, 2002: Üncü ve Yerlikayalar'dan 2004). ABD rafine bor üreticisi bir ülkedir. Ürettiği rafine bor ürünlerinin 2/3'ünü kendi ülkesindeki borlu sanayilerde kullanarak katma değeri ve teknolojisi yüksek ürünlere çevirmektedir. ABD'de kullanılan borların %78'i fiberglas-cam ve seramik sektörlerinde, %6'sı rafine bor satıcısı bir ülkedir. Ülkemiz, borlu sanayileri geliştiremediği için ham ve rafine bor ürünlerini yurt dışına ihraç ederek bir-iki yüz milyon dolarlık bir gelir elde etmektedir. Ülkemizdeki bor tüketimi, dünya tüketiminin %1-2'si kadardır. Türkiye deterjan sanayisinin hammaddesi olan perborat'ın önemli bir kısmını da Avrupa'dan kendi borundan elde edilmiş halde yeni bir ürün gibi daha pahalıya geri almaktadır. 2000 yılında ülkemizin bor tüketimi 19.546 ton B_2O_3 'e eşdeğer olup, bunun %27'si demir çelik, %12'si cam ve cam elyafı, %38'i seramik ve firit, %12'si deterjan, %5'i kimya ve %6'sı da diğer sektörlerde tüketilmiştir (Üncü, 2001: Üncü ve Yerlikayalar'dan 2004). 2000 yılından sonra Demir Çelik Sanayisi Bor kullanımını bırakmıştır (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. Bölgelerin bor tüketim miktarlarının % dağılımı (Üncü ve Yerlikayalar'dan 2004).

000 ton	ABD		Avrupa		Asya	Afrika Orta Doğu	Toplam Miktar	Pay %
	Kuzey	Latin	Batı	Doğu				
İzolasyon Fiberglas	180	5	100	5	10	--	300	20
Tekstil Fiberglas	80	20	75	10	40	--	225	15
Borosilikat Cam	25	10	70	5	10	--	120	8
Ara Toplam	285	35	245	20	60	--	645	43
Seramik, Sır, Sırça	15	30	80	20	45	5	195	13
Tarım	15	10	35	5	5	5	75	5
Deterjan	25	--	185	10	20	--	240	16
Diğerleri	35	75	140	45	35	15	345	23
TOPLAM	375	150	685	100	165	25	1500	100
Pay %	25	10	45,65	6,75	11	1,6	100	

Dünya bor üretimi B_2O_3 bazında 1.5 milyon ton olup bu üretimin %42'si US Borax, %33'ü de ülkemizde Eti Maden tarafından gerçekleştirilmektedir. Bugün dünyada yaklaşık 1,2 milyar \$'lık B_2O_3 pazarı bulunmaktadır. Eti Maden bu pazarın parasal bazda ancak 17–18 %'ine sahip olabilmıştır. Rakibimiz US Borax şirketi bu pazarın parasal bazda 65–70 %'ine sahiptir. Buradaki gelire ilgili çelişkiyi Eti Madencilik'in bu pazarı yeterince kontrol edememesi, kullandığı araçların hemen hepsinin yabancı firmalardan oluşması, yurt dışı şirketlerinin kontrolünü elinde tutamaması ve rakip şirketin bıraktığı alanlarda hareket etmesinin yanı sıra US Borax'ın pazarda sadece rafine bor ürünleri satması (ham bor satmamaktadır), Eti Maden ise pazarda hem rafine hem de ham bor satması diye düşünebiliriz. Bor üretiminde 1970'de 770.000 tonun altında olan üretim değeri, 1995'den itibaren yılda 1,5 milyon tona yükselmiştir. Ülkemizde bor üretimi 1970'de 122.000 ton B_2O_3 'ten, son yıllarda 500.000 ton B_2O_3 'e ulaşmıştır. ABD'nin bor üretimi ise tersine, nispeten sabit kalarak aynı dönem için üretim değerleri 510.00–730.000 ton B_2O_3 arasında değişim göstermiştir (Roskill, 2002: Üncü ve Yerlikayalar'dan 2004). Tüketim değeri, üretim gibi 1970'den bu yana ikiye katlanmış olup, bu değere sabit yıllık artışlarla değil, daha ziyade yoğun talep dönemlerinin sonucu olarak ulaşılmıştır. 20 yıllık bir dönem içinde bir misli artan bor kullanımı ve tüketiminin önümüzdeki 30-50 yıllık dönem içinde araçlarda hidrojen taşımak üzere (www.millenniumcell.com: Üncü ve Yerlikayalar'dan 2004) kullanım alanının uygulamaya ve Füzyon Reaktörlerinin de devreye girme olasılığı göz önüne alındığında, 4 veya 5 misli artma ihtimali bulunmaktadır.

Dünya bor sektöründe, Türkiye ve ABD bor üretiminin %75'ini temin etmekte olup bor tüketim pazarını gelişmiş ülkeler oluşturmaktadır. Dolayısıyla Türkiye

ihracatının büyük çoğunluğunu bu ülkelere yapmaktadır. Dünya bor tüketiminin büyük bir kısmı Batı Avrupa ve Kuzey Amerika'dadır. Bu iki bölge tüketimin yaklaşık %70'ini oluşturmaktadır. ABD'nin satışlarında kendi iç pazarı %64, Uzak Doğu %18, Avrupa %6, Kanada %6 olup Eti Maden'in ihracat dağılımında ise Avrupa (D.Avrupa, ve İskandinavya dahil) %55 ile 1. sırada, Uzak Doğu %23 ile 2. sırada ve ABD % 16,5 ile 3.sırada yer aldığını görülmektedir. Dünya pazar oluşumu Avrupa ve ABD'de yoğunlaşmış, ancak Uzak Doğu pazarında da sürekli talep artış ivmesi izlenilmektedir (Üncü ve Yerlikayalar, 2004).

Ürünler ile ilgili olarak şimdilik Dünya'da bir rezerv sorunu bulunmamaktadır, ancak bugünkü tüketim hızı ve artış trendi ile 50-60 sene sonrasında Türkiye'nin dışında ekonomik bor rezervine sahip başka bir ülke kalmayacağı tahmin edilmektedir. Sadece Türkiye'deki görünür rezerv, günümüzdeki dünya bor tüketim düzeyi ile bütün dünyanın ihtiyacını tek başına yaklaşık dört yüzyıl karşılayacak düzeydedir. US Borax'ın elindeki görünür rezerv ise söz konusu ihtiyacı bir elli veya yüzyıl karşılamaya yeterlidir. Bu sebeple, büyük rezervlere sahip olmak kendi başına bir anlam ifade etmemektedir. Bu rezervden sağlanacak faydanın en üst seviyeye çıkarılabilmesinin şartlarını oluşturmak çok daha önem kazanmaktadır (Üncü ve Yerlikayalar, 2004).

Dünya bor pazarının yapısı nedeniyle bor ürünleri üretim teknolojileri, diğer birçok üründe olduğu gibi kolay ulaşılan teknolojiler değildir. Eti Maden, dışarıdan temin imkânı bulamadığı teknolojileri büyük masraflar yaparak, sınama-yanılma yoluyla geliştirmek zorunda kalmış ve bu alanda önemli bir mesafe kat etmiştir. Türkiye'nin bu alandaki ilk yatırımları, Batı Avrupa'nın teknoloji ihracındaki olumsuz ve kıskanç tutumu nedeniyle o zamanki Doğu Bloğu ülkelerinin nispeten daha geri teknolojilerinin transferi ile gerçekleştirilmiştir. Batı Avrupa'dan Türkiye'ye değişik konulardaki teknoloji transferi çevre etkileri nedeniyle şimdilerde yeni yapılmaktadır (Üncü ve Yerlikayalar, 2004).

Eti Maden dünyadaki iki büyük bor üreticisinden biri olup, dünya bor rezervlerinin büyük ve zengin bir kısmının elinde olmasının verdiği bir imkâna sahiptir. Uluslararası bor pazarının diğer güçlü oyuncusu ve bugün için lideri US Borax, çok uluslu bir şirketin parçası olması sebebi ile ileri teknoloji, geniş bir pazarlama-satış ve üretim ağı avantajını elinde tutan rakip firma konumundadır. Eti Maden dünya bor rezervlerinin %65-70'ine sahip iken dünya bor pazarının parasal anlamda ancak %17-

18'ini elinde bulundurmaktadır. Dünya bor pazarının en az %50'sine sahip olması gereken Eti Maden, küresel rekabet'in zorunlu kıldığı koşulları yerine getirmesi gerekmektedir.

2.2. Alaşimsız Karbon Çeliklerinin Sınıflandırılması ve Örneksel Mekanik Özellikleri

Metaller ve alaşımlar faydalı birçok mühendislik özelliğine sahip olduklarından mühendislik tasarımlarında yaygın bir uygulama alanı bulur. Özellikle iyi dayanım, tokluk ve süneklik, nispeten düşük maliyet gibi özellikleri bir arada buldukları için demir asıllı alaşımlar (çoğunlukla çelikler) dünya metal üretiminin yüzde doksanını oluşturur. Her bir metal, mühendislik tasarımlarında yararlanılabilecek farklı bir özelliğe sahiptir ve maliyetleri de göz önüne alınarak diğer metal ve malzemelerle birlikte kullanılır (Kınıkoğlu, 2001).

% 0,03 gibi çok düşük miktarlardan yaklaşık % 1,2'ye kadar karbon ve % 0,25'ten 1,00'e kadar mangan ve önemsiz miktarlarda diğer bazı elementleri (silisyum, fosfor, kükürt ve diğer bazı katışkılar) içeren demir-karbon alaşımlarına alaşimsız karbon çeliği denir (Kınıkoğlu, 2001).

Alaşimsız karbon çelikleri ABD standartlarında "plain-carbon steels" diye geçer, yaygın olarak dört rakamlı AISI-SAE (AISI, American Iron and Steel Institute'un, SAE ise Society for Automotive Engineers'in kısaltılmışıdır.) işaretiyle tanımlanır. İlk iki rakam 10'dur ve çeliğin alaşimsız karbon çeliği olduğunu gösterir. Son iki rakam çeliğin yüzde olarak anma karbon miktarını vermektedir. Örneğin, çeliğin AISI-SAE sayısının 1030 olması, çeliğin alaşimsız karbon çeliği olduğunu ve anma % 0,30 karbonu bulunduğunu göstermektedir. Bütün alaşimsız karbon çelikleri dayanımı artırmak için alaşım elementi olarak mangan içerir. Alaşimsız karbon çeliklerinin çoğunda mangan miktarı % 0,30 ile 0,95 arasında değişir. Alaşimsız karbon çelikleri katışkı olarak kükürt, fosfor, silisyum ve diğer bazı elementlerde içerebilir (Kınıkoğlu, 2001).

Bazı AISI-SAE alaşimsız karbon çeliklerinin örneksel mekanik özellikleri Tablo

2.2’de sıralanmıştır. Çok düşük karbonlu alaşımsız karbon çelikleri, nisbeten düşük dayanıma fakat yüksek sünekliğe sahiptir. Bu çelikler otomobil kaportasında olduğu gibi şekil verilen sac ve şerit malzeme olarak kullanılır. Alaşımsız karbon çeliğinin karbonu arttıkça çelikler daha dayanımlı fakat daha az sünek olmaktadır. Orta karbonlu çelikler (1020-1040) miller ve dişliler için kullanılır. Yüksek karbonlu çelikler (1060-1095) yaylarda, dövme kalıplarında, bıçak ve makasların kesici ağızlarında kullanılırlar (Kınıkoğlu, 2001).

2.3. Aşınma ve Aşınmanın özellikleri

Aşınma, evde kullandığımız en basit aletten, fabrikalardaki en gelişmiş cihazlarda bile oluşan ve istenmeyen bir malzeme sorunudur. Küresel ekonominin getirdiği yeni rekabet kuralları gereği işlem maliyetlerinin azaltılması ihtiyacı aşınmadan kaynaklanan sorunların da en düşük düzeyde tutulmasını mecburi kılmaktadır. Bu yüzden, aşınmaya daha dayanıklı yeni malzeme veya bilinen malzemelere uygulanabilecek yeni yüzey işlem arayışları, problemler çözülmünceye kadar devam edecektir (Er, 2003).

Bir yüzey başka bir yüzey üzerinde hareket ettiğinde oluşacak olan aşınma, genelde gittikçe artan malzeme kaybı şeklinde, bir yüzeyde veya her iki yüzeyde hasar meydana getirecektir. Pek çok durum için aşınma; hareketli parçalar arasındaki açıklığın artmasına, istenmeyen hareket serbestliğine, hassasiyet kaybına, sıklıkla titreşime, artan mekanik yüklenmeye ve en sonunda daha hızlı aşınmaya ve bazen de yorulma kırılmasına neden olduğundan istenmeyen bir durumdur (Hutchings, 1992: Er’den 2003).

Sürtünme, yağlama ve aşınma ile ilgili tüm çalışmaları içine alan Triboloji bilimi, kelime olarak ilk kez 1966 yılında, bir İngiliz hükümeti komisyonu tarafından önerilmiştir. Aynı komisyonun raporunda, Tribolojik esasların uygulamaya aktarılması halinde İngiltere endüstrisinde mümkün olabilecek ekonomik kazanımın 1965 yılı fiyatlarına göre yıllık 515 milyon pound civarında olacağı tahmin edilmiştir (Hurricks, 1972; Hutchings. 1992: Er’den 2003). Bu tutarın içinde sadece tamir ve değiştirme maliyetlerindeki tasarruf ise 230 milyon pounddur. İngiliz endüstrisinin bakım maliyetleri ile ilgili yapılmış olan başka bir çalışmaya göre de sadece malzeme tutarları

Tablo 2.2 Alaşımız karbon çeliklerinin örneksel mekanik özellikleri ve uygulama alanları (Kınkoğlu'dan: 2001).

Alaşımın AISI-SAE numarası	Kimyasal bileşim, ağı. %	Durumu	Çekme dayanımı, Mpa	Akma dayanımı, Mpa	Uzama %	Örneksel uygulamalar
1010	0,10 C, 0,40 Mn	Sıcak haddelenmiş Soğuk haddelenmiş	276-414 290-400	170-310 159-262	28-47 30-35	Derin çekme saç ve şeridi; tel, çubuk, çivi ve vidalar; beton güçlendiricileri
1020	0,20 C, 0,45 Mn	Haddelenmiş Tavlanmış	448 398	331 297	36 36	Levha ve profiller; miller ve dişliler
1040	0,40 C, 0,45 Mn	Haddelenmiş Tavlanmış Menevişlenmiş*	621 517 800	414 352 593	25 30 20	Miller, yüksek çekme dayanımlı borular, dişliler
1060	0,60 C, 0,65 Mn	Haddelenmiş Tavlanmış Menevişlenmiş*	814 628 110	483 483 780	17 22 13	Yay teli, dövme kalıpları, vagon tekerleri
1080	0,80 C, 0,80 Mn	Haddelenmiş Tavlanmış Menevişlenmiş*	957 614 1304	586 373 980	12 25 12	Müzik telleri, helisel yaylar, kesimler, dövme kalıpları
1095	0,95 C, 0,40 Mn	Haddelenmiş Tavlanmış Menevişlenmiş*	966 655 1263	573 379 814	9 13 10	Kalıplar, zimbalar, kılavuzlar, freze kesici takımları, makas bıçakları, yüksek çekme dayanımlı teller

için doğrudan doğruya yıllık 286 milyon poundluk bir değer tahmin edilmektedir (Hurricks, 1972: Er'den 2003). Bu tutar, aşınmanın yanında yorulma ve korozyondan kaynaklanan malzemedeki tahribatında hesaba katılması ile bulunmuştur.

1982 yılında Amerikan Ulusal Teknoloji Enstitüsü'nün araştırmasına göre korozyon ve aşınmadan dolayı meydana gelen zarar, Amerikan gayri safi milli hâsılasının %6'sını (178,5 milyar USD) teşkil ettiği görülmüş ve bu yüzden korozyon ve aşınma konularındaki çalışmalara ağırlık verilmesi araştırma raporunun sonunda önerilmiştir (Karakan vd, 2002: Er'den 2003).

Yu ve Bhole (1990), aşınmadan dolayı Kanada ekonomisinin yıllık 3.9 milyar dolar kaybı olduğunu ve bu tutarın yalnız abrazif aşınmadan kaynaklanan kısmının yılda 2.5 milyar dolar civarında olduğunu bildirmişlerdir (Er, 2003).

Almanya'da ise abrazif aşınmadan dolayı oluşan zararın yıllık 5 milyar DM'dan fazla olduğu tespit edilmiştir (Karamış., 1985 ; Sarı ve Kaluç, 1996; Tarhuni, 1996: Er'den 2003). Bu maliyetlerin endüstriyel alanlara göre dağılımı; linyit ve antrasit madenciliğinde 1.5 milyar DM, metalürji dallarında 2 milyar DM, plastik imalat sanayinde 0.5 milyar DM ve öğütme, ziraat, inşaat iş kollarında ise 1 milyar DM olarak belirlenmiştir.

Sarı ve arkadaşlarının 1997 yılındaki çalışmalarında, OECD araştırma grubunca yapılan bir araştırmada, aşınmadan dolayı meydana gelen ekonomik kaybın A.B.D.'de Gayri Safi Milli Hasıla'nın %2.5'ni, Almanya'da ise %4.5'ni oluşturduğunu belirtmişlerdir (Sarı vd, 1997: Er'den 2003).

Görülüyor ki aşınma, sanayileşmiş ülkeler başta olmak üzere tüm dünya ülkelerini ekonomik açıdan rahatsız eden oldukça ciddi bir teknik sorundur. Aşınmanın tam anlamıyla önlenmesi mümkün görülme de olabildiğince azaltılabilmesi ile ekonomik açıdan çok büyük tasarrufların elde edileceği bir gerçektir (Er, 2003).

En genel anlamı ile aşınma, mekanik etkenler sonucu yüzeyden arzu edilmeyen bir şekilde malzemenin akışıdır şeklinde tanımlanabilir. Mekanik etkenlerden başka

kimyasal ve elektrokimyasal yani korozif etkenler de malzeme akışına neden olabilmektedirler. Mühendislik malzemelerinde meydana gelen yıpranma olayının aşınma olarak adlandırılabilmesi için şu gerek ve yeter şartları sağlaması zorunludur (Karamış, 1985: Er'den 2003);

- 1- Mekanik bir etkinin olması.
- 2- Sürtünmenin olması (izafi hareket),
- 3- Yavaş fakat sürekli olması,
- 4- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- 5-İstenilmediği halde (isteğimiz dışında) meydana gelmesidir.

Korozif etkenlerden kaynaklanan korozyon veya korozyon yenimi; bu ana şartlardan ilk ikisini sağlamaksızın meydana gelir ve aşınma kavramından ayrı olarak değerlendirilmelidir. Korozyon ürünleri yani korozif etkilerle parça yüzeyinden kopan mikro tanecikler veya yüzey bölgesi değişiklikleri eğer tribolojik sistemin içine dahil oluyorsa bu durum aşınma kavramı içinde düşünülmelidir (Karamış, 1985: Er'den 2003).

Aşınmayı, aşınmaya yol açan etkenlerin tümünü dikkate alarak incelemek gerekir. Aşınma, tribolojik sistem adı verilen sistem bütünlüğü içinde ele alınmalıdır. Aşınma özelliği veya aşınma direnci bu sistemin bir özelliği olup sertlik veya çekme direnci gibi bir malzeme özelliği değildir. Aşınma direnci, tribosistem olarak adlandırılan ana cisim, karşıt cisim ve ara maddeden oluşan ve birbirleri ile karşılıklı etkileşen bu elemanlardaki yük ile hız ve termal şartların birleşik etkisinin bir sonucudur (Uetz ve Föhl, 1978: Er'den 2003).

Benzer şekilde Hurricks'de 1972 ve 1973 yıllarındaki çalışmalarında aşınma durumunda malzemelerin davranışını; temas şekline, gerilme seviyelerine, ortaya çıkan ısıya ve çevrenin doğasına bağlı olarak tanımlamış ve bunların sonucu olarak aşınmanın

bir sistem özelliği olarak incelenmesi gerektiğini belirtmiştir (Hurrieks, 1972; Hurrieks, 1973: Er'den 2003). Bir tribolojik sistemde aşınma olayını gerçekleştiren, etkileyen ve aşınmanın karakterini belirleyen beş başlangıç şartı vardır ve bunlar; -ana cisim, -karşıt cisim, -ara madde, -hareket ve -yük olarak belirlenmiştir (Mutaf ve Ulusoy, 1977: Er'den 2003). Eğer ortamda vakum tam anlamıyla sağlanmış ise bu ana unsurların etrafında aşınma başlar ve gelişir. Vakum ortamından söz edemiyorsak çevre faktörünün de sisteme dahil olup aşınmayı etkileyeceği unutulmamalıdır.

Ana cisim, aşınma davranışı araştırılan herhangi bir katı cisimdir. Karşıt cisim, aşındıran eleman olup katı, sıvı, gaz fazında veya bunların karışımı halinde olabilir. Karşıt cisimle ana cisim aşınma çifti olarak da adlandırılmaktadırlar. Ara madde, sürtünen ana ve karşıt cisimler arasında kalan ve katı, sıvı veya gaz veya bunların karışımları şeklinde bulunabilen bir sistem elemanıdır. Aşınma ürünü olarak yüzeyden kopmuş mikro parçacıklar, yağlama maddeleri, kimyasal etkiyle kopmuş mikro parçacıklar ara madde olarak düşünülebilir. Aşınma çiftlerinin birbirlerine göre yaptıkları izafi hareketin cinsi, büyüklüğü, yönü ve süresi aşınmanın miktarına ve cinsine doğrudan etki eder. Hareket; akma, kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, çarpma vb. şekillerde olabilir. Uygulanan yükün de büyüklüğü, uygulanma şekli, doğrultusu ve zamana göre değişimi de aşınma miktarları üzerinde oldukça etkilidir (Bayhan, 1996: Er'den 2003).

Birbiriyle temas eden iki katı cismin gerçek temas alanı, görünen temas alanından küçüktür bunun sebebi de temas yüzeyleri ne kadar düz işlenirse işlensin yine de yüzeyde kalan pürüzlerdir. İki yüzey arasında ilk temas birbiriyle karşılaşan pürüzler arasında kurulur. Uygulanan yükün arttırılması ile daha çok sayıda pürüzün karşılaşması sağlanacak ve zamanla deforme olan pürüzlerden dolayı da temas alanı gittikçe büyüyecektir. Bu alanın artması, uygulanan yük miktarı ile birlikte malzeme özelliğine ve yüzey geometrisine de bağlıdır. Yük; statik, dinamik, titreşimli ve darbeli olabildiği gibi artan veya azalan bir şekilde de etki edebilir (Karamış, 1985: Er'den 2003).

Bir tribolojik işlem süresince sistemden çıkan faydalı enerji, sisteme verilen giriş enerjisinden küçüktür. Bu aradaki fark ise sürtünme enerjisine eşittir ve sürtünme enerjisi de birkaç alt dala ayrılır. Bu alt dalların başlıkları da plastik deformasyon için harcanan enerji, küçük parçacıkların yüzeyden ayrılmasına (aşınma parçacıklarına)

harcanan kırılma veya yüzey enerjisi, ikincil işlemler için harcanan enerji, mekanik titreşimlere, sese ve termal enerjiye harcanan enerjilerdir (Uetz ve Föhl, 1978: Er'den 2003).

2.3.1. Aşınma tipleri

Bahsedilen bu genel özellikler bize aşınmanın niçin bir malzeme özelliği olmadığını ve bir sistem (tribolojik) içinde ele alınması zorunlu bir kavram olduğunu açıklamaktadır. Aşınmayı belirleyici ve gelişmesini etkileyici pek çok unsurun olması, bunların tek tek veya çeşitli kombinasyonlarla birlikte olaya etki edebiliyor olmaları aşınmanın da çeşitli ana başlıklar altında sınıflandırılmasına neden olmaktadır. Çeşitli araştırmacılara göre aşınmanın sınıflandırılması; izafi hareketin şekline (kayma aşınması, yuvarlanma aşınması, titreşim aşınması vb.), karşıt cismin fiziksel durumuna ve etki açısına (katı, sıvı tanecikli ve değişik etki açılarında), aşınma mekanizmalarına (adhezyon, abrazyon, yüzey yorulması, tribooksidasyon, ablativ. erozyon, korozyon, kavitasyon vb.), aşınma izinin görünüşüne (pullanma, çizilme, ovulma, kazıma vb.), aşınmanın gerçekleştiği fiziksel mekanizmaya (adhezyon, abrazyon ve oksitlenme) ve aşınma ortamına (yağlı aşınma, kuru aşınma, yüksek sıcaklık metalik aşınma vb.) göre yapılabilmektedir (Karamış. 1985; Bayhan, 1996; Sarı vd. 1997: Er'den 2003).

Endüstride en sık karşılaşılan ve çeşitli arızalara neden olan aşınma tipleri ve bunlarla karşılaşılma oranları; abrazif aşınma %50, yenme (fretting) aşınması %8, adhezif aşınma %15, kimyasal aşınma %5, erozif aşınma %8 ve diğerleri %14'dür (Misra ve Finnie, 1982: Er'den 2003).

Görüldüğü gibi en sık karşılaşılan aşınma tipleri abrazif ve adhezif aşınmalardır. Hurricks'de 1972 yılındaki çalışmasında aşınmayı tanımlamada kullanılan terminolojinin anlam karmaşasına yol açabileceğini belirtmiş ve mühendislik uygulamalarında büyük bir çoğunlukla dört ana aşınma tipiyle karşılaşılacağını ifade etmiştir. Bunlar; abrazif aşınma, adhezif aşınma, yorulma aşınması ve korozif aşınmadır (Hurricks, 1972: Er'den 2003).

2.3.1.1. Adhezif aşınma

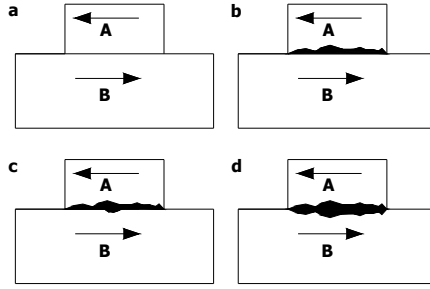
Adhezif aşınma veya adhezyon'da - ki sıklıkla şiddetli aşınma olarak betimlenir - aşınma olayı genellikle birbiriyle sürtünerek çalışan iki metal yüzey arasında başlar ve

gelişir (Hurricks, 1972; Hurricks, 1973: Er'den 2003). Adhezif aşınma, moleküler kuvvetlerin etkisi altındaki temas yüzeylerinde oluşan bölgesel kaynak bağlarının kırılması sonucuyla oluşan malzeme kaybıdır (Karamış, 1985; Bayhan, 1996: Er'den 2003).

Karşılıklı çalışan metal yüzeyleri ne kadar hassas işlenmiş olursa olsun yine de moleküler düzgünlükte değildirler. Cisimlerin üst yüzeylerindeki bu pürüzlerin tepeleri birbirleriyle temas ettikleri anda moleküler adhezyon sonucu kaynama olayını meydana getirirler (Mutaf ve Ulusoy, 1977; Bayhan, 1996: Er'den 2003).

Metal malzemenin kendi ağırlığından veya herhangi bir dış kuvvet etkisiyle çok küçük olan pürüz tepelerine gelecek olan basınç veya gerçek gerilme, geometrik temas yüzeyine göre hesaplanan ortalama gerilmelere göre çok büyük olacaktır (Karamış, 1985; Bayhan, 1996: Er'den 2003). Bunun sonucunda temas noktalarında malzemenin akma sınırı aşılabacak yani bu kuvveti taşıyamayan pürüzler plastik deformasyona uğrayacaklardır (Mutaf ve Ulusoy, 1977; Karamış, 1985; Bayhan, 1996: Er'den 2003). Yüzeyde absorbe edilmiş olan sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları bu basınç altında parçalanır ve malzemelerin moleküllerinin direkt temas haline geçmelerine imkân verilmiş olunur. Böylelikle bölgesel kaynak bağları meydana gelir (soğuk kaynama) (Karamış, 1985; Bayhan, 1996: Er'den 2003). Bu sırada eğer izafi hareket de varsa yüzeydeki sıcaklık yükselir hatta ergime noktasına kadar çıkabilir ve böylece kaynama yerinden veya metal yüzeyinden bir miktar parçacık kopar. Bu metalik parçacıklar, ara yüzeyde serbest halde kalabilecekleri gibi metallerden birisine bağlanabilirler. Her iki durumda da malzeme kaybı yani aşınma meydana gelmekte, ikinci durumda malzemelerin birinden diğerine malzeme transferi söz konusu olmaktadır (Karamış, 1985: Er'den 2003).

Birbirlerine karşı izafi kayma hareketi uygulayan yüzeylerde kaynak bağlarının ayrılma durumları Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Yüzeyler arasındaki bağlantıların izafi kayma hareketi ile ayrılması (Er'den 2003).

Bölgesel bağlantıların kayma mukavemeti, bağlantıyı oluşturan malzemelerin kayma mukavemetinden düşük ise temasta bulunan yüzeyler birbirlerinden ara yüzeyde ayrılırlar (Şekil 2.1.a). Bu durum, yüzeylerin adhezyonunu azaltan oksit filmi ile kaplı olmaları durumunda meydana gelmektedir. Fakat, "A" malzemesi bağlantılardan veya "B" malzemesinden daha düşük mukavemete sahipse bağlantıların ayrılması sadece "A" malzemesinde olur (Şekil 2.1.b). Yüksek mukavemetli bölgesel bağlantılarda ise yine "A" malzemesinin düşük mukavemetinden dolayı ayrılmalar baskın olarak "A" malzemesinde meydana gelir (Şekil 2.1.c). Malzemeler aynı veya eşit özelliklerde iseler adhezyondan dolayı yüksek mukavemetli bağlantılar, ara yüzeyin her iki tarafında eşit olarak ayrılırlar (Şekil 2.1.d) (Sarı vd, 1997; Er'den 2003).

2.3.1.2. Koroziif aşınma

Kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonların etkisiyle metalik malzemelerin yüzeyinden kopan korozyon ürünlerinin mekanik etkenlerle taşınması bir aşınma olayıdır ve bu tip aşınmaya koroziif aşınma denir. Koroziif aşınma, kayma yüzeyleriyle kimyasalların karşılıklı olarak birbirlerini etkileyebildikleri bir ortamla çevrelenmiş olmaları durumunda meydana gelir (Hurricks, 1972; Er'den 2003). Görülüyor ki koroziif aşınmadan söz edebilmemiz için mekanik ve kimyasal etkileşimin bir arada olması şarttır.

2.3.1.3. Yorulma aşınması

Mühendislik malzemelerinde yüzey yorulması olayı ve ardından parçacıkların koparak aşınmaya neden olması periyodik zorlanmalarda ve zamanla görülür (Mutaf ve Ulusoy, 1977; Karamış, 1985; Er'den 2003). Malzeme yüzeyinin periyodik bir

zorlanmaya maruz kalması sonucunda yüzeyin altında mikro çatlak ve zayıf noktalar oluşur. Önceleri malzeme yüzeyinde herhangi bir değişiklik fark edilmezken belirli bir çalışma süresinin sonunda yüzey altındaki bu kusurlardan dolayı yüzeyden adhezif aşınmada kopan parçacıklardan daha büyük parçacıklar ayrılarak, yüzeye gözenekli bir görünüş (pitting) verirler (Mutaf ve Ulusoy, 1977: Er'den 2003). Bu aşınma tipi dişlilerde ve yuvarlanma hareketi yapan temas elemanlarında görülür (Hurricks. 1972: Er'den 2003).

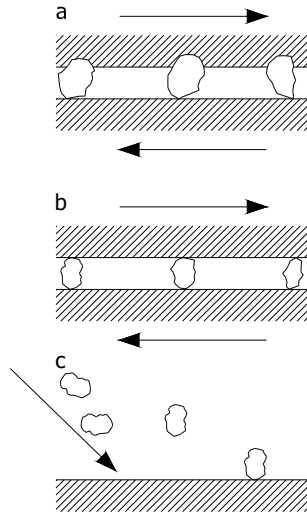
2.3.1.4. Abrazif aşınma

Aşındırıcı sert partiküller ya abrazif aşınmaya ya da erozif aşınmaya neden olurlar. Endüstriyel uygulamalarda en sık karşılaşılan mekanik hasarlara genelde abrazif aşınmalar sebep olmaktadır. Bu tip aşınma; toprak kazıma aletlerinde, madencilik uygulamalarında, minerallerin işlenmesinde, tarım aletlerinde ve diğer pek çok uygulamalarda oluşmaktadır (Misra ve Finnie. 1982: Er'den 2003). Genel olarak bir metal yüzeyin abrazif aşınması o yüzeyin aşındırıcı sert partiküllerle veya kendisinden daha sert pürüzlü bir karşı metal yüzeyle bir yük etkisi altında ve birbirlerine göre zıt yönlerde yüzey boyunca kayma temasında bulunmaları halinde yüzeyinden malzeme parçacıklarının kaldırılması veya yer değiştirmesi şeklinde tanımlanır (Khrushov, 1974; Vijh, 1975; Hutchings, 1992; Axen ve Zum Gahr. 1992; Venkatesan vd, 1997: Er'den 2003).

Makine parçalarında çeşitli hasarlara yol açan ve bu yüzden üretimin durması, iş kalitesinin düşmesi, büyük miktarlarda bakım-onarım, parça değiştirme ve işçilik masraflarına neden olan abrazif aşınmayla; aşınma dirençli malzemeler veya kaplamalar kullanarak, dizayn değişikliği yaparak, sisteme istenmeyen sert partiküllerin girmesinin sızdırmazlık elemanları ile önlenmesi ve sistemdeki hava ve yağlayıcıların filitrasyonu ile mücadele etmek mümkündür (Khrushov, 1974: Er'den 2003).

Abrazif aşınma, iki-cisimli abrazif aşınma ve üç-cisimli abrazif aşınma olarak ikiye ayrılır. İki-cisimli aşınmaya karşıt yüzeydeki sert çıkıntılar veya sabit aşındırıcı partiküller neden olurken üç-cisimli aşınmaya iki kayma yüzeyi arasındaki kayma ve yuvarlanma hareketi yapan serbest sert tanecikler neden olurlar (Hurricks, 1972; Hurricks, 1973; Misra ve Finnie, 1982; Hutchings, 1992; Venkatesan vd, 1997: Er'den 2003). Üç-cisimli abrazif aşınmadaki serbest sert tanecikler dış kaynaklı olabildiği gibi (toz, mineral tanecikleri gibi) adhezif aşınma ürünü olan ve sistemde kalan artık aşınma

parçacıkları veya parçalanmış oksit parçacıkları gibi iç kaynaklı da olabilirler (Hurricks, 1972; Hurricks, 1973; Karamış, 1985; Er'den 2003). Endüstriyel uygulamalarda iki-cisimli abrazif aşınmayla çok daha büyük oranlarda karşılaşılmaktadır (Hurricks, 1973; Er'den 2003). Üç-cisimli abrazif aşınmada karşılaşılan aşınma oranları genelde, iki-cisimli de karşılaşılanlardan daha düşüktür (Hutchings, 1992; Er'den 2003). Aşındırıcı sert partiküller bazı durumlarda da erozif aşınmaya neden olurlar. Erozif aşınma, aşındırıcı parçacıkların yüzeye çeşitli açı ve hızlarda çarparak, talaş (filing) veya kazıntı (scraping) tipinde malzeme kaldırmalarıyla olan tip aşınmadır (Misra ve Finnie, 1982; Er'den 2003). Şekil 2.2'de sert partiküllerin neden olduğu üç farklı aşınma tipi şematize edilmiştir.



Şekil 2.2. (a) iki-cisimli abrazif, (b) üç-cisimli abrazif ve (c) erozif aşınmalar arasındaki farklılıkların şematik gösterimi (Er'den 2003).

Misra ve Finnie'nin 1982 yılındaki çalışmalarında, Khruschov ve Babichev'den aktardıkları bilgiye göre iki-cisimli abrazif aşınmada aşındırıcı taneciklerle temas eden metalik yüzeyde sırasıyla şu iki prosesin aşınmaya neden olduğu sonucuna varmışlardır;

1- Metal parçacıklar kalkmaksızın, yüzeyin plastik şekil değişimine uğraması

2- Yüzeyden mikro talaş formunda parçacıkların ayrılması (Misra ve Finnie,

1982).

Üç-cisimli abrazif aşınma ayrıca kendi içinde üç gruba ayrılabilir: oyucu (gouging), yüksek gerilimli ve düşük gerilimli. Oyucu abrazif aşınma, kaya veya diğer kaba aşındırıcı parçaların malzeme yüzeyinden göreceli olarak daha büyük miktarlarda malzeme kaldırmaları şeklinde olan aşınmadır (Misra ve Finnie, 1982; Er'den 2003). Eğer uygulanan yük aşındırıcı tanecikleri aşınma işlemi süresince sıkıştırıp ezecek yani ufalayacak derecede büyük ise buna yüksek gerilimli abrazif aşınma, eğer değil ise yani aşındırıcı tanecikler kırılmıyor ise buna da düşük gerilimli abrazif aşınma denir (Misra ve Finnie, 1982; Hutchings, 1992; Venkatesan vd., 1997; Er'den 2003).

2.4. Kaynakça Taraması

Bu kısımda uluslararası dergilerde yayınlanan borlama ile ilgili makaleler taranmış ve özetlenmiştir.

Üçisik ve Bindal (1997) “borlanmış düşük alaşımli çeliklerin kırılma tokluğu” adında makale yayınlamışlardır. Düşük alaşımli çeliğe 940 °C’de 5 ve 7 saat süreyle borlayarak; optik mikroskop, SEM, XRD, sertlik ölçümü ve kırılma tokluğu ölçümü çalışmaları yapmışlardır. Kırılma tokluğunu 4-6 MPa m^{1/2} arası bulmuşlar. Kırılma tokluğunun malzemenin kimyasal bileşimine ve borlama süresine bağlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Mann (1997) 13Cr-4Ni paslanmaz çeliğe borlama yaparak; abrasiv ve kavitasyon erozyonu dayanımına çalışmıştır.

Yoon ve arkadaşları (1999) 750, 800, 850, 900, 950 °C sıcaklıklarda 3, 5 ve 7 saat Ar/H₂ : 2/1 atmosferinde %30 bor, %70 boraks’dan oluşan pastayla plazma pasta borlama yapmışlardır. Mikrosertlik, SEM, XRD ve EPMA çalışmışlardır. FeB, Ni₃B ve CrB fazlarını elde etmişlerdir. Plazma pasta borlama yöntemini kullanarak geleneksel borlama yöntemine nazaran aynı kalınlıkta bor tabakasını daha kısa zamanda ve düşük sıcaklıkta elde etmişlerdir. Aktivasyon enerjisini 180 kJ mol⁻¹ ve bor tabakasının sertlik dağılımını 180-2000 HV arası bulmuşlardır. Bor tabakası, Ni ce

zengin tabaka, Cr ca zengin tabaka olmak üzere 3 farklı tabaka görmüşlerdir.

Özbek ve arkadaşları (2000) “borlanmış saf nikelin karakterizasyonu” adında makale yayınlamışlardır. Saf nikelde 950 °C’de 2, 4 ve 8 saat süreyle borlayarak; optik mikroskop, SEM, XRD, EDS, sertlik ölçümü ve tabaka kalınlığı ölçümü çalışmaları yapmışlardır. Bor tabakasının sertliğini 747-805 HV (borlanmamış sertlik 100 HV), tabaka kalınlığını 123-281 µm bulmuşlardır. Bor tabakası üzerinde Ni₅Si₂ ve Ni₂B fazlarını görmüşlerdir.

Selçuk ve arkadaşları (2000) “borlama ve karbürizasyon yapılmış AISI 1020 ve 5115 çeliğinin yüzey özellikleri üzerine bir araştırma” adında makale yayınlamışlardır. AISI 5115 çeliği yerine, borlanmış AISI 1020 çeliğini önermişlerdir. Hazırladıkları numuneleri borlama ve karburizasyon işlemine tabi tutmuşlardır. Laboratuvar çalışmaları sonucunda, sertlik, sürtünme ve adhezif aşınma direnci açısından borlanmış düşük karbonlu çeliklerin, hafif yüklü kuru kaymalı çalışma şartları altında karburize edilmiş alaşımlı çeliklerin yerine kullanılabileceklerinin anlaşıldığını belirtmişlerdir.

Ge ve Ye (2000) bor tabakasındaki kırılma sorunun üstesinden gelmek için ilk defa kendinden yayımlı ötektoid borlama (self-propagating eutectic boriding) üzerine çalışmışlardır.

Ueda ve arkadaşları (2000) nikelde Ekabor Ni ile kutu borlama yaparak; XRD, EPMA, SEM, sertlik ölçümü, tabaka kalınlığı ölçümü, sürtünme ve aşınma dayanımı çalışmaları yapmışlardır. Ni₂B fazının oluştuğunu görmüşlerdir. 1300 HK sertlik elde etmişlerdir. Aşınma dayanımı ve sürtünmenin oldukça iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Silisyum olmadığından kalın bor tabakaları elde etmişlerdir. Sürtünme katsayısının borlanmış nikelde borlanmamış nikelde göre az olduğunu belirtmişlerdir.

Şen ve arkadaşları (2001) “borlanmış düşük alaşımlı takım çeliğinin mekaniksel davranışları” adında makale yayınlamışlardır. Düşük alaşımlı takım çeliğine 1000 °C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlayarak; optik mikroskop, SEM, XRD, sertlik ölçümü, tabaka kalınlığı ölçümü ve kırılma tokluğu ölçümü çalışmaları yapmışlardır. Bor tabakasının sertliğini 1854 kg/mm² (borlanmamış sertlik 290 kg/mm²), tabaka kalınlığını 70-140 µm, kırılma tokluğunu 2.52-3.07 MPa m^{1/2} arası bulmuşlar. Artan

borlama süresi ve sıcaklığının tabaka kalınlığını artırıcı bir etkisi olduğunu açıklamışlardır. Borlar, geçiş bölgesi ve matris olmak üzere üç farklı bölge gözlemlenmişlerdir. Borlama süresinin uzaması FeB fazı oluşumu nedeniyle kırılma tokluğu değerini düşürdüğü sonucuna ulaşmışlardır.

Kaestner ve arkadaşları (2001) saf titanyum ve TiAl6V4 e plazma borlama yaparak; SEM, XRD, GDOS, sertlik ölçümü ve adhezif aşınma dayanımı çalışmaları yapmışlardır. Ti₂B ve TiB fazlarını elde etmişlerdir. Borun titanyum içindeki çözünürlüğünün az olması nedeniyle birkaç µm lik tabaka kalınlığı elde etmişlerdir.

Yu ve arkadaşları (2002) kıvılcım plazma sinterleme (spark plasma sintering (SPS)) tekniğini kullanarak çeliğe borlama yapmışlardır. SPS tekniği ile borlama yaparak aktivasyon enerjisini büyük oranda düşürmüşlerdir. Sonuç olarak bu teknik ile daha düşük sıcaklıkta ve sürede borlama yapılabileceğini bulmuşlardır.

Genel ve arkadaşları (2002) “AISI W1 çeliğinin borlama kinetiği” adında makale yayınlamışlardır. AISI W1 çeliği 850, 900, 950, 1000, 1050 °C’de 2, 4 ve 8 saat süreyle borlayarak; optik mikroskop, SEM, XRD, sertlik ölçümü ve tabaka kalınlığı ölçümü çalışmaları yapmışlardır. Bor tabakasının sertliğini 1690-1800 HV (borlanmamış sertlik 260 HV), aktivasyon enerjisini 171±16,6 kJ/mol⁻¹ bulmuşlardır. İşlem süresi ve sıcaklığına bağlı olarak tabaka kalınlığını tahmin etmek için ampirik eşitlik önermişlerdir.

Özbek ve arkadaşları (2002) “borlanmış AISI 316L paslanmaz çeliğin karakterizasyonu” adında makale yayınlamışlardır. AISI 316L paslanmaz çeliğe 850, 900, 950, 1000 °C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlayarak; optik mikroskop, SEM, XRD, EDS, sertlik ölçümü ve tabaka kalınlığı ölçümü çalışmaları yapmışlardır. Bor tabakasının sertliğini 1500 VHN üzerinde, tabaka kalınlığını 12-40 µm bulmuşlardır.

Özbek ve Bindal (2002) “borlanmış AISI W4 çeliğinin mekaniksel karakterizasyonu” adında makale yayınlamışlardır. AISI W4 paslanmaz çeliğe 850, 950, 950 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süreyle borlayarak; optik mikroskop, SEM, XRD, EDS, sertlik ölçümü, tabaka kalınlığı ölçümü ve kırılma tokluğu ölçümü çalışmaları yapmışlardır. Bor tabakasının sertliğini 1407-2093 HV (borlanmamış sertlik 330

HV_{0,05}), tabaka kalınlığını 8-386 µm, kırılma tokluğunu 1.39-6.40 MPa m^{1/2} arası bulmuşlar. Artan borlama süresi ve sıcaklığının tabaka kalınlığını artırıcı bir etkisi olduğunu açıklamışlardır. W4 çeliği için, 4 saati geçen işlem sürelerinde – tüm değerleri için – iki fazlı tabaka elde edildiğini, 4 saat ve daha kısa süren işlem sürelerinde ise tek Fe₂B fazı elde edildiğini belirtmişlerdir.

Anthymidis ve arkadaşları (2002) akışkan yataklı reaktörde (fluidized bed reactor) demirdışı metaller borlama yaparak; mikrosertlik, optik mikroskop, XRD çalışmaları yapmışlardır. Düz ve iyi kalitede bor tabakası elde etmişlerdir. Bu yöntem basit, esnek, ucuz, çevre dostu olduğunu söylemişlerdir.

Anthymidis ve arkadaşları (2002) akışkan yataklı reaktörde (fluidized bed reactor) 950 °C de 5 saat borlama yaparak; mikrosertlik, optik mikroskop, XRD ve kuru aşınma dayanımı çalışmaları yapmışlardır. Sonuç olarak; 870 HV sertlik, 35 µm tabaka kalınlığı ve Ni₃B fazı elde etmişlerdir. Borlanmış nikelin kuru aşınma dayanımını çok iyi olduğunu görmüşlerdir

Bourithis ve arkadaşları (2002) AISI 1018 çeliğe PTA (plasma transferred arc) borlama yaparak aşınma ve mikroyapı özelliklerini incelemişlerdir.

Selçuk ve arkadaşları (2003) “karbürleme, karbonitrüleme, borlama yapılmış AISI 1020 ve 5115 çeliklerinin sürtünme ve aşınma davranışları” adında makale yayınlamışlardır. Borlanmış çeliklerde düşük yük altında karbürleme ve karbonitrülemeye göre daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

Atık ve arkadaşları (2003) “SAE 1010, 1040, D2, 304 çeliklerinin abrasif aşınma ve korozyonuna geleneksel ısıl işlemlerin ve borlamanın etkisi adında makale yayınlamışlardır. Çalışmalarında geleneksel ısıl işlemler ve borlamayı kendi aralarında karşılaştırmışlardır. En iyi abrasif aşınma değerini AISI 1010 ve 1040 çeliklerinde 900 °C 8 saat borlamada, D2 çeliğinde 900 °C 4 saat borlamada elde etmişlerdir. En iyi korozyon aşınma değerini AISI 1010, 1040, D2 ve 304 çeliklerinde 900 °C 4 saat borlamada elde etmişlerdir. En iyi mikrosertlik, korozyon ve abrasif aşınma değerini borlanmış numunelerde görmüşlerdir. Aşınma dayanımının; tabaka kalınlığı, sertlik ve korozyon direnci ile doğrudan etkili olmadığı sonucuna ulaşmışlardır.

Kulka ve Petek (2003) borokabonitrüleme (borocarbonitriding) üzerine çalışmışlardır.

Şen ve arkadaşları (2004) “borlanmış küresel grafitli dökme demirdeki bor tabakasının bazı özelliklerini değerlendirme” adında makale yayınlamışlardır. Perlitik küresel grafitli dökme demiri 950 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süreyle borlayarak; optik mikroskop, SEM, XRD, EDAX, sertlik ölçümü, tabaka kalınlığı ölçümü ve kırılma tokluğu ölçümü çalışmaları yapmışlardır. Bor tabakasının sertliğini 1160-2140 VHN (borlanmamış sertlik 258 HVN), tabaka kalınlığını 114-185 µm, kırılma tokluğunu 2.19-4.47 MPa m^{1/2} arası bulmuşlar. Bor tabakasında üç farklı bölge görmüşler. Bunlar; numunenin dış yüzeyi üzerindeki FeB ve Fe₂B tabakası, FeB ve Fe₂B tabakası ile matris arasında bulunan silisyumca zengin ferritik bölge, matris. Borlama süresinin uzaması bor tabakasının kalınlaşmasıyla sonuçlanmakta olduğunu söylemişlerdir. Borlama süresinin uzaması FeB fazının artmasından dolayı kırılma tokluğu değerinin azalmasıyla sonuçlanmakta olduğuna ulaşmışlardır.

Usta (2004) “borlanmış niobiyumun karakterizasyonu” adında makale yayınlamıştır. Niobiyumu 940 °C’de 2, 4 ve 8 saat süreyle borlayarak; optik mikroskop, SEM, XRD, sertlik ölçümü ve tabaka kalınlığı ölçümü çalışmaları yapmıştır. Bor tabakasının sertliğini 2500 VHN (borlanmamış sertlik 110 HVN), tabaka kalınlığını 8-22 µm bulmuştur. Borlanmış saf niobiyumun düz ve yoğun morfolojiye sahip olduğunu, XRD çalışması sonucu NbB₂ fazına sahip olduğunu görmüştür .

Şen ve arkadaşları (2004) “borlanmış küresel grafitli dökme demirdeki bor tabakasının yapısal karakterizasyonu” adında makale yayınlamışlardır. Küresel grafitli dökme demiri 850 °C ve 950 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süreyle borlayarak; optik mikroskop, SEM, XRD, sertlik ölçümü ve tabaka kalınlığı ölçümü çalışmaları yapmışlardır. GGG-50, GGG-60 ve GGG-80 küresel grafitli dökme demirin tabaka kalınlıklarını sırasıyla 65-265 µm, 45-218 µm ve 41-185 µm arası bulmuşlar. Bor tabakalarının sertliklerini ise 1800-2140 HV_{0,1} arası görmüşler. Kısa işlem süresi ve düşük sıcaklık da borlanmış yüksek bakır alaşımli küresel grafitli dökme demirde tek fazın (Fe₂B) oluştuğunu ileri sürmüşlerdir. Borlanmış GGG 80 küresel grafitli dökme demirde 850 °C de sadece Fe₂B fazına ulaşmışlardır.

Özbek ve arkadaşları (2004) “borlanmış AISI 440C paslanmaz çeliğinde oluşan

borlara mekaniksel bakış” adında makale yayınlamışlardır. AISI 440C paslanmaz çeliğini 950 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süreyle borlayarak; optik mikroskop, SEM, XRD, EDS, sertlik ölçümü ve tabaka kalınlığı ölçümü çalışmaları yapmışlardır. Bor tabakasının sertliğini 2500 VHN üzerinde (borlanmamış sertlik 600 HVN), tabaka kalınlığını 10-50 µm arası bulmuşlar. Borlama süresine ve alaşım elementlerine bağlı olarak bor tabakasının düz ve sıkı olduğunu görmüşler. XRD analizi sonucu FeB, Fe₂B, CrB, Cr₂B, Mn₂B ve MnB fazlarını bulmuşlar. Bor tabakası kalınlığının işlem süresine, alaşım elementlerine bağlı olarak değiştiğini belirtmişlerdir. Uzun borlama süresinin borlama tabakasının kalınlaşmasıyla sonuçlandığına ulaşmışlardır.

Martini ve arkadaşları (2004) Armco demire ve orta karbonlu çeliğe (UNI 38 NiCr Mo4) 850 °C de 15 saat borlama yaparak optik mikroskop, SEM, XRD, sertlik ölçümü ve aşınma dayanımı çalışmaları yapmışlardır. Sonuç olarak Fe₂B ve FeB fazının oluştuğunu görmüşlerdir. Bu iki faz arasında çatlak oluştuğunu bulmuşlardır. Yaptıkları abrazyon aşınma deneylerinde abrazyon aşınma değerinin tabakanın değişik derinliklerinde farklı olduğu sonucuna varmışlardır. Abrazyon aşınma değerinin FeB fazının olduğu üst kısımlarda yüksek olduğu, derinlere inildikçe FeB-Fe₂B fazlarının olduğu yerde çok azaldığı, daha derinlerde Fe₂B fazının bulunduğu yerde maksimuma ulaştığını görmüşlerdir.

Keddam (2004) bilgisayar simülasyon programı ile bor tabakasının kalınlığını ve içeriğini tahmin etmiştir. Bor tabakasının büyüme kinetiğine dayanan bu programı deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır. Deneysel sonuçlarla simülasyon sonuçlarının uyduğunu bulmuştur.

Usta ve arkadaşları (2004) “borlanmış saf tungstenin karakterizasyonu” adında makale yayınlamışlardır. Saf tungsteni 940 °C’de 2, 4 ve 8 saat süreyle borlayarak; optik mikroskop, SEM, XRD, sertlik ölçümü ve tabaka kalınlığı ölçümü çalışmaları yapmışlardır. Bor tabakasının sertliğini 2500 VHN (borlanmamış sertlik 445 HVN), tabaka kalınlığını 10-42 µm bulmuşlardır. Borlanmış saf tungstenin düz ve yoğun morfolojiye sahip olduğunu, XRD çalışması sonucu WB fazına sahip olduğunu görmüşlerdir.

Şen ve arkadaşları (2005) “borlanmış küresel grafitli dökme demirin kırılma tokluğu” adında makale yayınlamışlardır. Küresel grafitli dökme demiri 850°C ve

950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süreyle borlayarak; optik mikroskop, SEM, XRD, kırılma tokluğu, sertlik ölçümü ve tabaka kalınlığı ölçümü çalışmaları yapmışlardır. Zamana ve sıcaklığa bağlı olarak bor tabakasının sertliğini 1160-2140 HV_{0,1} (borlanmamış sertlik 260 ± 8 HV_{1,0}), kırılma tokluğunu 2.19-4.47 MPa m^{1/2} ve tabaka kalınlığını 45-185 µm arası bulmuşlar. Fe₂B ve FeB fazının ikisinin birden bulunması çatlak oluşumunu kolaylaştığı sonucuna ulaşmışlardır.

Şen ve arkadaşları (2005) “borlanmış çeliklerin kinetik çalışmasına bir yaklaşım” adında makale yayınlamışlardır. AISI 5140, AISI 4340 ve AISI D2 çeliklerini 800°C ve 1000°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süreyle borlayarak; optik mikroskop, SEM, XRD, sertlik ölçümü ve tabaka kalınlığı ölçümü çalışmaları yapmışlardır. İşlem sıcaklığı, süresi ve alaşım elementleri miktarına bağlı olarak AISI 5140 çeliğindeki bor tabakasının sertliğini 1198-1739 HV_{0,1} (borlanmamış sertlik 253 HV_{0,1}), tabaka kalınlığını 45-238 µm arası ve aktivasyon enerjisini 223 kJ/mol⁻¹ bulmuşlar. AISI 4340 çeliğindeki bor tabakasının sertliğini 1077-1632 HV_{0,1} (borlanmamış sertlik 300 HV_{0,1}), tabaka kalınlığını 36-213 µm arası ve aktivasyon enerjisini 234 kJ/mol⁻¹ bulmuşlar. AISI D2 çeliğindeki bor tabakasının sertliğini 1500-2140 HV_{0,1} (borlanmamış sertlik 600 HV_{0,1}), tabaka kalınlığını 21-173 µm arası ve aktivasyon enerjisini 170 kJ/mol⁻¹ bulmuşlar. Bulunan difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi değerlerinin önceki çalışmalarla uyduğunu görmüşlerdir. İşlem parametrelerine bağlı tabaka kalınlığını tahmin eden matematiksel eşitlikler çıkarmışlardır.

Şen ve arkadaşları (2005) “borlanmış AISI 4140 çeliğinde oluşan borların büyüme kinetiği” adında makale yayınlamışlardır. AISI 4140 çeliğini 850 °C, 900 °C ve 950 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süreyle borlayarak; optik mikroskop, SEM, XRD, EDS, sertlik ölçümü ve tabaka kalınlığı ölçümü çalışmaları yapmışlardır. AISI 4140 çeliğindeki bor tabakasının sertliğini 1446-1739 HV_{0,1}, tabaka kalınlığını 38,4-225 µm arası, aktivasyon enerjisini 215 kJ/mol⁻¹ ve difüzyon katsayısını 3x10⁻⁹-2x10⁻⁸ cm⁻²s⁻¹ bulmuşlar.

Yu ve arkadaşları (2005) AISI 1018 çeliğe; 850 °C de 5, 15, 30, 60, 120 ve 240 dakika sürelerde SPS (spark plasma sintering) borlama yaparak SEM ve XRD çalışmaları yapmışlardır. Sonuç olarak; borlamada 90 dakikadan az sürede Fe₂B ve FeB tabakalarının (FeB fazı Fe₂B fazının üzerinde oluşuyor) oluşarak büyüdüğünü görmüşlerdir. Daha önceki çalışmalardan farklı olarak, 90 dakikadan fazla borlama

süresinde üstteki FeB fazının büyümesinin durduğu, azalmaya başladığı ve Fe₂B içinde dönüşerek kaybolduğunu bulmuşlardır. Sayısal simülasyonun bu fikri doğruladığını belirtmişlerdir. Difüzyon katsayısını FeB için $2,33 \cdot 10^{-9}$ ve Fe₂B için $4,67 \cdot 10^{-9}$ cm²/s bulmuşlardır.

BÖLÜM 3. BORLAMA VE ÖZELLİKLERİ

3.1. Giriş

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 (Holmberg, 1994: Özbek'den).

Malzeme yüzeylerine uygulanan klasik ve modern kaplama yöntemleri dünyada ve ülkemizde hızla gelişerek yaygınlaşmaktadır. 1982 yılında Amerikan Ulusal Teknoloji Enstitüsü'nün araştırmasına göre korozyon ve aşınmadan dolayı meydana gelen zarar, gayri safi milli hâsılanın % 6'sını (178,5 milyar dolar) teşkil ettiği görülmüş ve bu yönde çalışmalara ağırlık verilmesi önerilmiştir (Karakan vd., 2002).

Rekabet şartlarının çok ağırlaştığı günümüzde, bilim adamları ve araştırmacılar, daha yüksek performans sergileyen parçalar üretmek için çok yoğun bir gayret sarf etmektedirler. Yüzey işlemleri sayesinde, malzemenin sahip olması istenen özelliklerinin hemen hemen çoğu elde edilebilmektedir. Yüksek mukavemet ve tokluğa sahip olacak şekilde dizayn edilen bir malzemeye uygulanan kaplama işlemi ile parçanın; aşınmaya, termal yüklere ve korozyona da dirençli hale gelmesi sağlanmaktadır (Holmberg, 1994: Özbek'den 1999).

Günümüzde tasarımcılar ve kullanıcılar için oldukça zengin bir yelpazeye sahip olan yüzey işlemleri, uygulanan yüzey işlemlerine bağlı olarak, altlık malzemenin özellikleri üç şekilde değiştirilebilir. Bunlar:

1. Malzeme yüzeyine değişik metal veya bileşikleri kaplayarak (PVD,

CVD plazma püskürtme gibi yöntemlerle metalik, seramik ve organik kaplamalar gerçekleştirmek),

2. Yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirerek yani farklı bir elementin difüzyonu yoluyla altlık malzeme yüzeyinde bileşik oluşturarak (borlama, nitrürleme, karbürleme, borsilisyumlama ve karbonitrürleme işlemleri gibi),

3. Altlık malzemesinin kendisinden kaynaklanan oksit tabakasını kalınlaştırarak (alüminyum ve titanyumun anodizasyonu gibi), başka maddelerle reaksiyona sokarak (kromatlama ve fosfatlama gibi) veya yüzeyin mikroyapısını (İndüksiyonla Sertleştirme, Alevle Sertleştirme vb.) değiştirerek (James, 1975: Özbek'den 1999)

gerçekleştirilmektedir. Yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirerek gerçekleştirilen yüzey sertleştirme işlemleri, katı, sıvı veya gaz fazındaki elementlerin yüksek sıcaklıklar yardımıyla malzeme yüzeyine yayındırılması esasına dayanır. Değişik elementlerin, farklı proseslerle metalik yüzeylere yayındırıldığı difüzyon işlemleri, endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptir (Holmberg, 1994: Özbek'den 1999).

3.2. Borlama İşlemi

Ülkemiz, dünya bor rezervlerinin %65-70'ine sahiptir. Bu rezerv, ticari ve yüksek kalitede bor minerallerinden oluştuğu için Türkiye, bor cevheri piyasasında rakipsiz konumdadır (www.etimaden.gov.tr). Oksit olmayan seramiklerden olan borürler, üstün özelliklere sahip olduklarından bor ve bor bileşikleri üzerine çok sayıda çalışmalar yapılmaktadır (Özbek, 1999).

Son yıllarda özellikle demir esaslı alaşımlar üzerine termokimyasal yöntemle bor kaplamalar ilgi odağı olmuştur. Böylece kaplanan malzemenin matris özellikleri yanında, yüzeyinde oluşacak bor bileşiklerinin özelliklerine bağlı olarak yüksek aşınma, oksidasyon ve korozyon direnci ile üstün mekanik özellikler elde edilmesi mümkün olmaktadır (Özbek, 1999).

Bor elementi, periyodik sistemde 3 A grubunda yer almakta olup, atom ağırlığı 10,81 gram ve atom numarası 5'tir. Yoğunluğu $2,33 \text{ g/cm}^3$ olan borun, ergime noktası 2092°C iken kaynama noktası 2550°C , atom yarıçapı $0,46\text{Å}$ ve iyon yarıçapı da $0,23\text{Å}$ olup valansı +3'tür. Bor elementi genellikle hem tetragonal ve hegzagonal kristal yapıda, hem de amorf yapıda olabilir. Amorf yapıdaki yoğunluğu 2.34 g/cm^3 olan bor elementinin sertliği ise 9,3 Mohs'dur (Özbek, 1999).

Borlama, Alman Endüstri Standardı DİN 17014'e göre 'termokimyasal işlem yoluyla iş parçasının yüzeyinin bor atomlarıyla zenginleştirilmesi' olarak tarif edilen termofüzyon yüzey işlemidir. Yani, borlama, termal enerji yoluyla bor atomlarının iş parçasının yüzeyindeki metal latisin içerisine yayılması ve orada ana malzemenin atomları ile borürlerin oluşturulmasıdır (Fichtl, et al., 1988).

Borlama işlemi; yüzey sertleştirilmiş çelikler, temperlenmiş çelikler, takım çelikleri, paslanmaz çelikler gibi yapısal çeliklerle, döküm çeliklere, Armco demirine, gri ve sfero dökme demirlere; sinterlenmiş metal tozlarına, çeliklere ve karbürler; nikel, kobalt, molibden ve titanyum gibi demirdışı alaşımlara uygulanabilmektedir (Sinha, 1991: Özbek'den 1999).

Genellikle borlama işlemi, $700-1050^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında 1-12 saat sürelerde çeşitli borlama ortamlarında gerçekleştirilmektedir. Borlama ortamı katı, sıvı veya gaz olup bor kaynağı (B_4C , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, H_2B_6), aktivatör (KBF_4), dolgu malzemesi ve deoksidanlardan meydana gelmektedir. 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 (Matuschka, 1980; Fichtl, et al., 1988: Özbek'den 1999).

3.2.1. Borlama işleminin avantajları

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

kaplanmış çeliklerin ve diğer sert metallerin yüzey sertlikleri Tablo 3.1'de verilmektedir.

2. Borür tabakalarının yüksek yüzey sertliğine ve düşük sürtünme katsayısına sahip olmaları; adhezif, tribo-oksidasyon (kimyasal), yüzey yorulması ve abrazyon aşınma gibi temel aşınma mekanizmalarının oluşumunu önlemede çok önemli fayda sağlar. Bu sayede kalıp üreticilerinin, pahalı ve zor işlenen takım çelikleri yerine, üstelik orijinal malzemeninkinden daha üstün özelliklere ve aşınma direncine sahip olan kolay işlenen çelikleri kullanabilmeleri mümkün olmuştur. Bu ise takım ve kalıp ömrünü artırdığı gibi yağlayıcı kullanımını da azaltır.

3. Borür tabakası, 550-660°C sıcaklıklarda bile sertliğini korumaktadır.

4. Isıl işlem uygulanabilen malzemeler performanslarını optimize etmek için borlama sonrası tamamen sertleştirilebilirler.

5. Borlama, bir iş parçasının sertleştirilmesi istenen seçilmiş bölgelerine, düzensiz karmaşık şekillere üniform bir şekilde uygulanabilir.

6. Soğuk yapışma kaynağına eğilimi azaltmaktadır.

7. Borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin oksitleyici olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerin erozyon dirençlerini artırmaktadır. Bu özellikleri sebebiyle de endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Borlama işlemi ile, düşük alaşımlı çeliklerin, H_2SO_4 , H_3PO_4 ve HCl gibi asitlere karşı direncini artırmak mümkündür.

8. Borlanmış yüzeyler çok yüksek sıcaklıklarda (850°C) orta seviyede oksidasyon direncine ve oldukça yüksek ergimiş metal korozyon direncine sahiptir.

9. Oksitleyici ve korozif ortamlarda parçanın yorulma ömrünü artırır.

10. Borlama yüzeyi, çok hassas bir şekilde parlatılabilir (Özbek, 1999; Şen, 1997).

Tablo 3.1. Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması (Şen'den 1997).

Malzeme	Mikrosertlik (Kg/mm ² veya
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 çeliği	630-700
Yüksek hız çeliği BM 42	900-910
Nitrülenmiş çelik	650-1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
Sementit karbürler, WC+Co	1160-1820(30kg)
Al ₂ O ₃ +ZrO ₂ seramikler	1483(30kg)
Al ₂ O ₃ +TiC+ZrO ₂ seramikler	1730(30kg)
Sialon seramikler	1768(30kg)
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Elmas	~10000

3.2.2. Borlama işleminin dezavantajları

Borlama işleminin bu avantajlarının yanı sıra bazı sınırlamaları da mevcuttur:

1. Borlama teknikleri esnek değildirler. Gaz ortamında sementasyon ve plazma nitrürasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre işçilik ve işletim maliyeti daha yüksektir. Daha esnek olan gaz karbürizasyonu ve plazma nitrürasyonu işlemlerinin kısa sürede ve daha kolay gerçekleşmesi borlamaya göre avantajlar sağlamaktadır. Buna rağmen; yüksek sertlik ve kalıcı yüksek aşınma ve korozyon direncinin arzu edildiği durumlarda borlama işlemi tercih edilmektedir. Ucuz iş gücü temin edilebilen yerlerde de borlama tercih edilen bir işlemdir.

2. Borlamaya tabi tutulan malzemelerde bor tabaka kalınlığının %5-20'si oranında boyutsal olarak artış gözlenmektedir. Örneğin, 25µm'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.

3. Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde (2000 N) karbürizasyon ve nitrasyonla kıyaslandığı zaman çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği sebebiyle, dişli üretiminde bir sınırlama söz konusudur.

4. Borlama sonrası ısıtılacak olan çeliklerde borür tabakasının özelliklerinin korunması için inert atmosfer veya vakum gerekmektedir (Özbek, 1999; Şen, 1997).

3.3. Borlama Yöntemleri

Borlama işlemi yüzeyi iyi temizlenmiş malzemelere 700-1050°C sıcaklık aralığında 1-12 saat sürelerde uygulanabilmektedir. Borlama işlemleri termokimyasal ve termokimyasal olmayan yöntemler olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Bu yöntemlerden en çok kullanılanı termokimyasal yöntemlerdir. Termokimyasal bor kaplama yöntemleri sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak bor atomunun metale difüzyonu prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemler; kutu borlama, sıvı borlama, pasta borlama ve gaz ortamda borlama şeklinde sıralanabilir. Termokimyasal olmayan fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey ve iyon biriktirme gibi yöntemler ile de son yıllarda borlama işlemi gerçekleştirilebilmektedir (Fichtl, et al., 1988; Sinha, 1991; Özbek'den 1999).

3.3.1. Kutu borlama

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

kullanılabilmektedir. Kutu borlamada kullanılan toz karışımlarını meydana getiren bileşenler; katı bor kaynağı, akışkanlar ve aktivatörlerdir. Ticari uygulamalarda genellikle bu toz karışımları kullanılarak yapılan kutu borlama tercih edilmektedir. Sementasyona benzeyen bu yöntem; işlem kolaylığı, toz bileşiminin kolayca değiştirilebilmesi, faz bileşenlerinin fazla değişikliğe uğramaması, gerekli cihaz ve donanımın basitliği ve ekonomik yönden de ucuz olması gibi faktörler dolayısı ile geniş bir uygulama alanına sahiptir. Pota veya kutunun, yüksek iç gerilmeler, çatlaklar ve kalkmalara sebebiyet vermemesi ve yeniden toz ilavesiyle (%20-50) borlamaya devam edilebilmesi açısından fırın hacminin %60'ını geçmemesi tavsiye edilmektedir. Kutu olarak, alaşımsız çelik, paslanmaz çelik veya alümina kutular kullanılabilmektedir. Homojen bir ısı dağılımı için borlanacak parçaların şekli fırına uygun olmalı ve yerleştirme bu durum göz önüne alınarak yapılmalıdır. Katı ortam borlamasında kullanılan bazı bor kaynakları Tablo 3.2'de, literatürde rastlanan katı ortamda borlama bileşiklerine ait örnekler ise aşağıda verilmiştir (Şen, 1997; Özbek, 1999):

Tipik borlama toz karışımlarının bileşimleri (% ağırlıkça);

- %5 B₄C, %90 SiC, %5 KBF₄
- %50 B₄C, %45 SiC, %5 KBF₄
- %85 B₄C, %15 Na₂CO₃
- %95 B₄C, %5 Na₂B₄O₇
- %84 B₄C, %16 Na₂B₄O₇
- Amorf bor (%95-97)
- %(40-80) B₄C +%(20-60)Fe₂O₃
- %60 B₄C+%5 B₂O₃+%5NaF+%30 Demir oksit
- %50 Amorf bor+%1NH₄F.HF+%49Al₂O₃
- %100B₄C
- %20 B₄C +%5KBF₄+%75 Grafit
- %95 Amorf bor, %5 KBF₄

Yaygın olarak kullanılan bor kaynakları; bor karbür (B₄C), ferrobor ve amorf bordur. Ferrobor ve amorf bor çok iyi bor kaynakları olup kalın borür tabakası oluştururlar. Akışkan olarak SiC ve Al₂O₃, aktivatör olarak NaBF₄, KBF₄, (NH₄)₃BF₄, NH₄Cl, Na₂CO₃, BaF₂ ve Na₂B₄O₇ kullanılmaktadır. Amorf bor oldukça pahalıdır. Ferro bor

ucuz olsa bile ne ticari miktarlarda, ne de yeterli safiyette üretilmemektedir. Endüstriyel uygulamalar için sadece bor karbür kullanılmakta olup fiyatı hem nispeten daha ucuzdur, hem de kalitesinde bir değişim söz konusu değildir. Borlama işlemi uygun bir toz karışımı ile yapılabileceği gibi değişik ticari toz karışımları (Tablo 3.3) ile de yapılabilmektedir (Şen, 1997; Özbek, 1999).

Tablo 3.2. Katı ortamda borlama işleminde kullanılan bor kaynakları (Özbek'den 1999).

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

Kutu borlamada kullanılan pota, borlama işlemi boyunca bor kaynağının kaybını önlemek için kaplanarak tüm malzemeler doldurulduktan sonra ağız kısmı demir curufu veya oksitlenmeyi önleyecek bir madde ile kapatılmaktadır. Hazırlanan kutular, işlem sıcaklığına getirilmiş fırına yerleştirilir. İşlem sıcaklığı borlanacak malzemeye bağlı olarak 840-1050 °C arasında, borlama süresi ise 1-8 saat arasında seçilmektedir. İşlem süreleri; sıcaklığın yanında, kullanılan borlama ortamının ne kadar reaktif olduğuna da bağlıdır.

Tablo 3.3. EKabor borlama ürünleri (Fichtl, et al., 1988).

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

3.3.2. Sıvı borlama

Bu yöntemde borlama banyosu sıvı haldedir. Borlama işlemi 670-1000°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. Sıvı ortamda borlama, elektrolitik sıvı borlama ve elektrolizle sıvı borlama olarak iki ana grupta toplanmaktadır. Bu proses bir çok dezavantaja sahiptir. Bunlar (Özbek, 1999):

1. Borlama sonrasında parça yüzeyinde tuz kalıntıları ve reaksiyona girmeyen bor vardır. Bunların giderilmesi zaman ve para kaybına yol açar.
2. Borlamanın başarılı olabilmesi, borlama sırasında banyo viskozitesinin artmamasına bağlıdır. Bu sebeple sıvı banyoya tuz ilavesi yapılmaktadır ki bu da maliyeti yükseltir.
3. Korozif ortamlara dayanıklı fırınlara ihtiyaç vardır.

3.3.2.1. Elektrolitik sıvı borlama

Demir esaslı malzemelerin elektrolitik sıvı borlama işlemi, 900-950 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. Borlama işlemi aynı zamanda, %55 boraks, %40-50 ferro-bor ve %4-5 ferro-alüminyum ilavesiyle de yapılmaktadır. Nikel alaşımlarının borlanması, $\text{KBF}_4:\text{KF}$ tuz banyosu, 670 °C'nin altındaki uygulamalarda 75:25 oranında kullanılarak istenen kalınlıkta bor tabakası elde edilebilmektedir. Aynı zamanda daha yüksek sıcaklıklarda demir esaslı malzemeler için de iyi sonuçlar sağlanmaktadır. %55 boraks, %45 B_4C karışımı ve 1:1 oranında NaCl ve BaCl_2 kullanılarak çok yüksek tabaka kalınlıkları elde edilmektedir. Sıvı borlama ayrıca, boraks, ferro-silis, borik asit ve sodyum sülfat (Na_2SO_4) esaslı tuz banyolarında da gerçekleştirilmektedir (Özbek, 1999).

3.3.2.2. Elektrolize sıvı borlama

Tuz banyosunda elektrolizle borlama işleminde, katot olarak borlanacak demir esaslı malzeme, anot olarak grafit elektrot ve elektrolit olarak ise boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) kullanılmaktadır. Borlama işlemi, 900-950°C sıcaklık aralığında 4-6 saat süre ile 0,15-0,20 A/cm^2 akım altında gerçekleştirilmektedir. Parçanın her tarafında homojen bir

kaplama tabaka kalınlığı elde edebilmek için elektroliz sırasında parça döndürülmektedir. Düşük alaşımlı çeliklerde çok ince kaplamaların elde edilmesinde, yüksek akım yoğunluğu kullanılarak çok kısa sürelerde borlama yeterli olmaktadır. Alaşımlı çeliklerde ise kalın kaplama tabakalarının elde edilmesi için düşük akım yoğunluğu ve uzun sürelerde borlama işlemi gerekmektedir. Yapılan araştırmalarda borür tabaka kalınlığının borlama süresi, borlama sıcaklığı ve akım yoğunluğundaki artışa bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Ancak, tabakanın yapısal karakteri bu durumdan etkilenmemektedir. Elektrolizle sıvı borlama işlemi sırasında, ergimiş haldeki tetraborat, borik asit ve elementel oksijene dönüşmektedir (Eşitlik 3.1). Elektroliz banyosunda şu reaksiyonlar cereyan etmektedir (Bozkurt, 1984; Sinha, 1991; Samsanov and Epik, 1966; Özsoy and Yaman, 1993; Özbek'den 1999)



Bu durumda katoda yakın bölgede bol miktarda bor oluşturulmaktadır. Benzer şekilde iyi sonuçlar veren elektrolit bileşikleri aşağıda verilmektedir (Matuschka, 1980: Özbek'den 1999).

- $\text{KBF}_4\text{-LiF-NaF-KF}$ karışımı 600-900 °C arasında,
- $20\text{KF-30NaF-50LiF-0.7BF}_2$, 800-900 °C arasında (%mol) $90\text{N}_2\text{-10H}_2$ ortamında,
- 9:1 (KF-LiF)- KBF_4 karışımı argon atmosferinde,
- $\text{KBF}_4\text{-NaCl}$ karışımı 650 °C'de
- $90(30\text{LiF} + 70\text{KF}) - 10\text{KBF}_4$ karışımı 700-850 °C'de,
- $80\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 - 20\text{NaCl}$, 800-900 °C'de.

3.3.3. Gaz borlama

Gaz ortamda borlama, bor kaynağı olarak bor halojenürleri, diporan ve organik bor bileşikleri kullanılır. Gaz borlayıcıların en önemli üstünlüğü, gaz sirkülasyonun sonucu olarak daha üniform bir bor dağılımının sağlanabilmesi ve elde edilmelerinin kolay olmasıdır (Matuschka, 1980: Özsoy'dan 1991). Prensip olarak gaz ortamda borlamada, bor potansiyelinin ayarlanabilmesinden dolayı, tek fazlı tabaka elde etmek

mümkündür. Gaz borlama bileşikleriyle çalışmak için komplike cihazlar gereklidir. Buna ilaveten bazı sakıncalı tarafları daha vardır:

1. Diboran, kullanılan temel bileşiktir ve çok zehirlidir. Diporan için en düşük zehirlilik sınırı 0.1 ppm'dir. Çok tehlikeli olarak bilinen hidrojen siyanür (prussik asit) için bile 10 ppm'e kadar müsaade edilmektedir (Fichtl, 1981: Özsoy'dan 1991).

2. Diporan, hidrojen ile karıştırıldığında bile çok pahalıdır (Fichtl, 1981: Özsoy'dan 1991).

3. 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. Bu etki trietilborda, trimetilbordan daha kuvvetlidir (Matuschka, 1980: Özsoy'dan 1991).

4. Bor halojenürleri korozyona sebep olabilir (Matuschka, 1980: Özsoy'dan 1991).

3.3.4. Plazma Borlama

Katı haldeki bir maddeyi enerji vererek sıvı, sıvı haldeki maddeyi enerji vererek gaz; ve gaz durumdaki maddeyi enerji vererek plazma haline getirmek mümkündür. Plazma, içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve 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. Bir elektrik gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa belirli şartlar gerçekleştiği takdirde uygulanan gerilim plakalar arasındaki gazın delinme geriliminin üzerinde ise, bu iki plaka arasında bir elektrik akışı olur (Küper, et al., 2000: Bayça ve Şahin'den 2004)

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 bir 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 akımın yoğunluğu ile kontrol edilebilmektedir (Nam, et al., 1999; Küper, et al., 2000; Yoon, et al., 1999; Qiao, et al., 2000; Hunger, et al., 1997: Karakan vd.'den 2002).

Plazma borlamanın avantajları (Karakan vd., 2002):

1. Bilinen borlama işlemlerinde (katı, sıvı, gaz) tabaka kalınlığı ve homojenliği kontrol edilemezken, plazma borlamada mümkündür.

2. Kompleks parçalarda homojen difüzyon tabakası ve sertlik

3. Daha düşük sıcaklık ve işlem süresi

4. İşlem çok yoğun enerjide gerçekleştirilir.

5. Bu yöntemle yüzeyde tek fazlı Fe₂B tabakası elde edilebilir.

6. Daha büyük boyutlu taban malzemeleri (özellikle katı borlamaya göre) işleme tabi tutulabilir.

7. Zehirlilik, patlayıcı yapı ve çevre kirliliğinin kontrol olanağı

8. İşlem sonrası daha düşük distorsiyon.

Plazma borlamanın endüstriyel uygulamaları:

Mükemmel aşınma mukavemeti nedeniyle plazma borlama üzerine endüstride birçok çalışma yapılmıştır. Otomobil parçalarındaki aşınmayı azaltmak için Volkswagen firması tarafından konuyla ilgili geniş çalışmalar yapılarak, özellikle dişlilerin aşınmasında uygulanmıştır (Cabeo, 1999: Karakan vd.'den 2002). Hindistan'da da birçok hidroelektrik santralde çok ciddi hasarlara sebep olan erozyonun önlenmesi, borlama ile sağlanmıştır (Mann, 2000: Karakan vd.'den 2002). Aynı şekilde

İsveç'te buhar türbinlerinde, çalışma esnasında yüzeyin parçacıklar tarafından erozyona uğratılması problemi de bu yöntemle çözülmüştür (Mann, 1999; Karakan vd.'den 2002). Yüksek aşınmanın gerekli olduğu pnömatik transport sistemleri, plastik işleme makineleri, haddelme elemanları, pompalar, valfler, yüksek sıcaklık mukavemetine gereksinim duyulan yerlerde (1000 °C), otomotiv ve uzay endüstrisinde, medikal araçlarda vazgeçilmez bir şekilde kullanılmakta olan bir yöntemdir (Bhushan and Gupta, 1991; Kaestner, et al., 2001; Karamış, vd., 1995; Karakan vd.'den 2002).

3.3.5. Pasta Borlama

Pasta borlama, kutu borlamanın zor ve daha pahalı olduğu veya fazla zaman kaybının olduğu durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Pastalarla yapılan kısmi borlama işlemleri, son zamanlarda yaygınlaşmaktadır. Karmaşık şekilli veya kitlesel üretilmiş parçaların tamamen veya kısmen seri bir şekilde borlanması, borlama pastası ile yapılabilir. Bu proseste %45 B₄C (200-400 mesh arası) ve %55 kriyolit (Na₃AlF₆, fluks ilaveli) veya geleneksel borlama toz karışımı B₄C + SiC + KBF₄ iyi bir bağlayıcı ajan ile (Bütül asetatı çözünmüş nitroselüloz, metil selülozun sulu çözeltisi veya hidrolize edilmiş etil silikat) uygulanmaktadır. Hazırlanan borlayıcı karışım yani pasta, malzemenin yüzeyine püskürtülerek 1-2mm civarında tabaka oluşturulmakta ve kurutulmaktadır. İşlem, demir esaslı malzemelere geleneksel fırınlarda 800-1000 °C sıcaklık aralığında 5 saat süreyle uygulanmaktadır. Bu işlemde koruyucu atmosfer olarak Argon, NH₃, veya N₂ kullanılmaktadır. Borlayıcı ürünün davranışı, gaz özellikleri tarafından büyük oranda etkilenir. Argon en iyi sonucu verse de NH₃ de kullanılabilir. Endotermik veya CO ihtiva eden gazlar kullanılamazlar. Pasta borlama işleminde 1000 °C'de 20 dakika süre sonunda 50 µm kaplama kalınlığı elde edilebilmektedir. Büyük parçaların veya seçilmiş alanların borlanması için oldukça elverişlidir (Sinha, 1991; Şen'den 1997).

3.3.6. Çok bileşenli borlama

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

birisiyle 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 (Sinha, 1991; Fisher, 1986; Özbek'den 1999).

3.3.7. Akışkan yataklı fırında borlama

Katı ortamda borlamanın bir versiyonu olan akışkan yatakta borlama yönteminde, akıcı ortam olarak özel borlama tozu (EKabor WB gibi) kullanılır. Bu toz, oksijensiz gaz (örn. N₂ /H₂ karışımı) ile akıcı hale gelmektedir. Bu prosesin sahip olduğu bazı avantajlar şunlardır (Özbek, 1999):

1. İşlem sıcaklığına hızlı ısıtma ve daha kısa süreli işlem görecektir parçaları doğrudan dışarıya alabilme mümkündür.
2. Borlanan parça ve hareketli partiküller arasındaki çok yüksek ısı transfer hızı sebebiyle mükemmel termal kararlılığa sahiptir.
3. Sürekli ve otomatik çalışma imkânı vardır. Borlanacak parçalar aralıklı bir şekilde şarj edilebilir ve fırından dışarı alınabilir.
4. Borlama sonrasında parçaya doğrudan su verilebilir. Bu ise borlama ve su verme işlemlerini tek bir işleme indirgeme demektir.
5. Kitlesel üretilmiş parçaların işlemlerinde zaman ve enerji tasarrufu sağlar.

3.4. Borlanabilen Malzemeler ve Borürlerin Genel Özellikleri

Endüstriyel olarak borlama işlemi, çok geniş bir yelpazedeki demir esaslı

alaşımların hemen hepsine ve bazı demir dışı alaşımlara uygulanmaktadır. Sade karbonlu, paslanmaz ve takım çelikleri gibi yapısal çeliklere, 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 ve tantalyum gibi demir dışı metal ve alaşımlarına, bazı seramiklere de uygulanmaktadır. Alüminyum, çinko ve magnezyum alaşımları düşük ergime sıcaklıklarından dolayı borlanamayan alaşımlardır. Borlama işleminin ostenit 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 kükürtlü ve kurşunlu çelikler yüzeyde çatlak oluşturma eğilimleri, nitrürlenmiş çelikler ise çatlak hassasiyetleri sebebiyle borlama işlemine tabi tutulmamaktadır. Alüminyum içeren çeliklerin (mesela nitrüleme çeliği 34CrAlNi7, malzeme no: 1.8550) borlanması tavsiye edilmemektedir. İçerisinde ağırlıkça ~%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 iletecek ve borür tabakasının parçalanmasına (yumurta kabuğu etkisi) yol açacaktır. Titanyum ve alaşımlarının borlanması sonucunda, aşınmaya karşı oldukça dayanıklı bir yüzey oluşmaktadır. Kobalt ve nikel gibi metaller ve alaşımları ile bu elementleri ihtiva eden sert metaller borlanabilen malzemelerdir. Kobalt ve nikel esaslı WC ve TiC gibi karbürler çok sert ve yüksek ergime sıcaklığına sahip olmalarına karşılık, nemli atmosferik şartlarda, oksidasyon dayanımları düşüktür. Bunu önlemek için borlama uygulanabilir. Nikel ve kobalt gibi yumuşak metallerin borlanması ile sinterlenmiş karbürlerin aşınma dirençleri yükseltilebilir. Bakır atomları, bor atomlarının difüzyonuna engel olduğu için bakır veya bakır alaşımları borlanmaya uygun değildirler. Fakat bölgesel borlama işleminde borlanmayacak kısımların maskelenmesinde kendinden yapışan ince film veya sac olarak kullanılırlar. Alaşım elementleri borür tabakası içerisinde katı eriyik borürleri oluşturduğu için borür tabakasının sertliğini artırır. Titanyum, nikel ve kobalt gibi alaşım elementlerinin ilavesi, borür tabakasının büyümesini yavaşlatıp, yüksek bor konsantrasyonuna sahip borürlerin oluşumuna sebebiyet vererek çok fazlı, daha kaliteli borür tabakaları meydana getirirler (Mesela, titanyumda TiB₂ fazının meydana gelmesi gibi). Kobalt ve titanyumun

borlanması meydana gelen borür tabakası kolonsal değil oldukça üniform düz bir yapıdadır (Sinha, 1991; Fichtl, 1981; Fichtl, 1988; Matuschka, 1980; Özbek'den 1999).

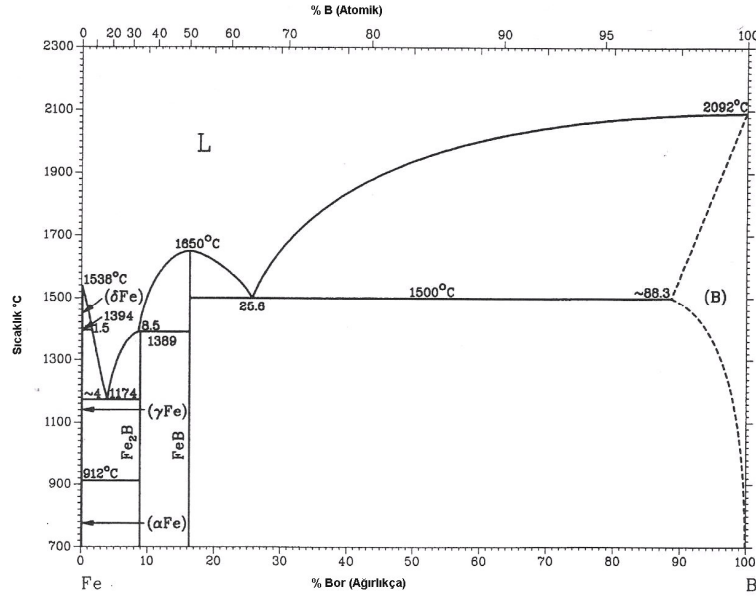
3.4.1. Borürlerin özellikleri

Seramikler içerisinde borürlerin termal genişleme katsayıları orta seviyelerdedir. Genelde borürlerin ısı iletkenlik katsayıları ve termal şok dirençleri oldukça yüksektir. Borürlerin diğer seramiklerle kıyaslandığı zaman, son yıllarda yapılan çalışmalarda, yüksek sertlik ve mukavemet değerleri sergilemelerine rağmen gerçekte orta derece mukavemet ve tokluk değerlerine sahiptirler. Birçok borür, 5-80 $\mu\Omega$ -cm aralığında elektriksel dirence sahiptir ve seramikler arasında iyi elektriksel 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 sahiptirler. Benzer kristal yapıları ve latis parametrelerinde olan borürler katı çözeltili oluşturmaktadırlar (Reymond, 1991: Şen'den 1997).

3.4.2. Fe-B ikili denge diyagramı

Periyodik tablonun IIIA grubunda yer alan bor elementinin atom numarası 5 ve atom ağırlığı 10.81 gram'dır. Borun atom yarıçapı, 0.46Å ve ergime sıcaklığı 2092°C'dir. Bor elementinin valansı +3, iyon yarıçapı 0.23Å'dur. Bor elementi, rombohedral kristal yapısına sahip olup latis parametreleri sırasıyla $a=1.093\text{nm}$ ve $c=2.381\text{nm}$ 'dir. Bor, amorf yapıda da olabilmektedir. Bir alaşımda katı eriyik oluşum şartları arasında en önemli olanı, atomik boyut faktörüdür. Bor elementi 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 (Şekil 3.1). Denge diyagramından demir ile bor arasında Fe_2B (ağırlıkça %8.83 B) ve FeB (ağırlıkça %16.23 B) bileşikleri oluşmaktadır. Ötektik reaksiyon bor iyon difüzyonunun hakim olduğu γ -Fe tane sınırlarında ve/veya Fe_2B , $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ 'de başlamaktadır. Ötektiğin yapısı ve özellikleri, bileşimin yanında sıvı tabakanın hızına da bağlıdır. Yüksek soğuma hızında ince mikroyapı, yüksek sertlik ve tokluk elde edilmektedir. Çeşitli

araştırmacılar tarafından, Fe_2B fazının ergime sıcaklığının 1389-1410°C arasında ve FeB fazının ise 1550-1657°C arasında olduğu belirtilmektedir (Hayashi and Sugeno, 1970; Liao and Spear, 1974; Stjohn and Sammels, 1981; Kubaschewski, 1982; Massalski, 1990: Özbek'den 1999).



Şekil 3.1. Fe-B ikili denge diagramı (ASM Handbook'dan, 1990).

3.4.3. Borür tabakası

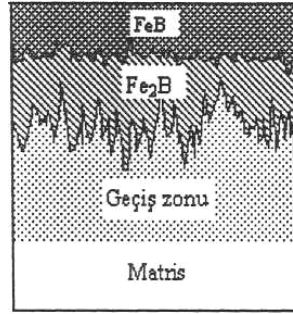
Borür tabakasının özellikleri; borlanacak malzemenin bileşimine, borlama metoduna, borlama ortamına ve borlama sıcaklığı ve süresi gibi işlem şartlarına bağlı olarak, ya düz bir formda veya dişli/kolonsal formda olabilir. Dişli form göreceli olarak daha düzgün olan arayüze göre mekanik özellikler açısından daha iyi sonuçlar sergiler. Bununla birlikte, dişli formdaki sınır yapının borür tabakanın ana malzemeye çok daha iyi tutmasını sağlamasıdır (Eyre, 1975; Hunger and True, 1994; Er'den 2003). Borlama işlemi sonucunda çeliklerde başlıca iki tabaka meydana gelmektedir. Bunlar; borür tabakası ve geçiş zonedir (Şekil 3.2). Borür tabakasının kalınlığı, borlanan parçanın kullanım şartlarına göre; borlanan malzemenin cinsi, borlayıcı ortamın bileşimi, işlem süresi ve borlama sıcaklığına bağlı olarak belirli sınırlar dahilinde istenilen kalınlıkta ayarlanabilir. Optimum borür tabaka kalınlığı mümkün olan en kalın tabaka demek değildir. Tabaka kalınlığı, daima amaca uygun olmalıdır. Eroziyon için (seramik

endüstrisinde kullanılan pres takımlarında olduğu gibi) kalın tabakalar uygundur. Adhezif aşınma için ise (zımba takımlarında olduğu gibi) ince tabakalar gereklidir. Teorik olarak borür tabakasının kalınlığı yaklaşık olarak $5\mu\text{m}$ olması adhezif 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 ($\text{Fe}_2\text{B}+\text{FeB}$) tabakalarda, tabakanın çok kalın olmamasına dikkat edilmelidir. Alaşım elementlerinin oranı arttıkça çelik içerisine bor yayılımı daha zorlaşacak, oluşan borür dişleri daha yoğun, daha üniform ve kapalı olacaktır (Fichtl, 1981: Özbek'den 1999).

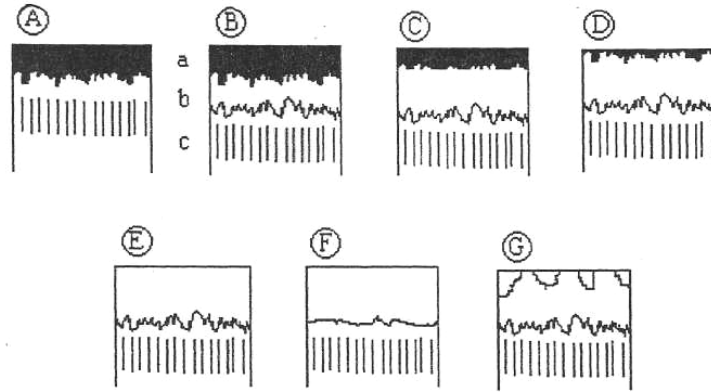
Borür tabakasının sertlik ölçümleri genellikle 50 ve 100 gr'lık yükler kullanılarak Vickers ve Knoop uçlarıyla, mikrosertlik yöntemiyle yapılmaktadır. Vickers ve Knoop uçlarıyla yapılan ölçümlerde çok yüksek yükler, tabakada çok yüksek oranda çatlama veya dökülmeye neden olduğundan uygulanmaz. Brinell ve Rockwell sertlik ölçüm yöntemleri ise borlu tabakayı yok ettiği için ve aynı zamanda ana malzeme yapısını da deforme ettiği için bu tip tabakaların serliğini ölçmeye uygun yöntemler değildirler (Fichtl vd, 1987: Er'den 2004).

3.4.3.1. Borür tabakasının çeşitleri

Borür tabakalarının şekli ile ilgili olarak kaplama tabakalarının bileşim ve belirleyici görünüşleri esas alınarak geliştirilmiş bir sınıflandırma sistemi Şekil 3.3'da görülmektedir. Borlanmış bir numunenin metalografik olarak hazırlanması sonucunda, borür tabakasının kalınlığı, yapısı (kolonsal veya düz), porozite içerip içermediği tespit edilebilir. Bu tabaka türlerinin görünüşlerinden, kaplama yapısının özelliklerini belirlemek mümkün değildir. Oluşturulan bu sınıflandırma sistemi borür tabakasının görünüşünü karakterize etmek ve borlama işleminin uygun olup olmadığına karar vermek için imkân sağlamaktadır (Matuchka, 1980: Özsoy'dan 1991).



Şekil 3.2. Borür tabakasının şematik olarak gösterimi (Taşçı 'dan 1993).



Şekil 3.3. Borür tabakalarının türleri a) FeB; b) Fe₂B (Matuschka, 1980; Özbek'den 1999).

3.4.3.2. Borür tabakasının özellikleri

Borür tabaka türlerinden E ve F grubu borürler yani tek fazlı (Fe₂B) tabakalar endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu tip tabakalar her zaman elde edilmeyebilir. Özellikle kalın tabakalarda daha çok D tipi borür tabakası elde edilmektedir. Yüksek silisyum veya alüminyum ihtiva eden çeliklerde, bu elementlerin kaplama-matris arayüzeyinde birikerek yumuşak ferrit fazı oluşturmaları sebebiyle, borlama işlemi tercih edilmemektedir (Şekil 3.3 G tipi). Borlama işlemi sonucunda elde edilen tek fazlı (Fe₂B) borür tabakasının bazı avantajları vardır. Bunlar; Fe₂B fazının, FeB fazına göre daha az kırılğan olması, borlama sonrası ısıl işleme veya işlemlere uygun olması ve kaplamanın özellikleridir. Difüzyon yönüne bağlı olarak, kolonsal yapı sergileyen tek fazlı Fe₂B fazı, çift fazlı Fe₂B+FeB fazlarına göre daha çok tercih edilmektedir. Gerçekte FeB ve Fe₂B fazları birbirlerine basma ve çekme gerilmeleri uygulamakta ve çoğu zaman bu gerilmeler sebebiyle, iki faz arasında yüzeye paralel veya

dik ilerleyen çatlaklar oluşmaktadır. Fe₂B basma, FeB fazı çekme etkisi yapmaktadır. Genellikle FeB/Fe₂B arayüzeyinde, FeB fazının çekme gerilmelerine Fe₂B fazının ise basma gerilmelerine maruz kaldığı ileri sürülmektedir. Bu yüzden termal şok veya mekanik etkiler altında ayrılmalar ve tabaka halinde kalkmalar meydana gelmektedir. Bu sebeple, minimum FeB içeriğine sahip kaplama tabakaları elde edilmeye çalışılmaktadır. Çift fazlı borür tabakalarında yüzeyin hemen altında porozite oluşumu görülür. Bor kaplamalarda, borür tabakasının ince olması durumunda, porozite oluşumu ve tabakanın kalkma riskinin düşük olduğu düşünülmektedir (Sinha, 1991; Fichtl, 1981; Matuschka, 1980; Özbek'den 1999). Tablo 3.4'de FeB ve Fe₂B fazlarının tipik özellikleri verilmektedir.

Tablo 3.4. Fe₂B ve FeB fazlarının tipik özellikleri (Şen'den 1997).

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Kristal Yapı	Hacim Merkezli Tetragonal	Ortorombik
Latis Parametresi	a=5.099, c=4.240	a=4.053, b=5.495, c=2.946
Bor İçeriği (%Ağırlıkça)	8.83	16.23
Yoğunluk (gr/cm ³)	7.43	6.75
Elastisite Modülü (GPa)	284	343
Mikrosertlik (Gpa)	18-20	19-21
Oluşum Entalpisi (ΔH) (kJ/mol)	-71.13 (298°K) -77.82 (1000°K)	-71.13 (298°K) -72.96 (1000°K)
Gibbs Sebest Enerjisi (kJ/mol)	-71.75 (298°K) -68.19 (1000°K)	-69.47 (298°K) -68.05 (1000°K)
Ergime Sıcaklığı (°C)	1389-1410	1540-1657
Termal Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ /K)	7.65 (200-600°C) 9.20 (100-800°C)	23 (200-600°C)
Termal İletkenlik (W/m.K)	30.1 (20°C)	12.0 (20°C)
Elektriksel Direnç (10 ⁻⁶ Ω.cm)	38	80

3.4.3.3. Geçiş bölgesi

Borlama işlemi esnasında çelik bileşiminde bulunan elementler yeniden dağılırlar. Bu arada FeB ve Fe₂B tabakalarının, karbon ve silisyum çözündürme kabiliyeti olmamasından dolayı, bor yayını esnasında karbon ve silisyum borür tabakasından içeriye doğru itilirler. Bunun sonucu olarak borür tabakası ile borlanan metal matris arasında 'geçiş bölgesi' olarak adlandırılan bir yapı meydana gelir. Geçiş

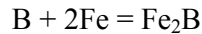
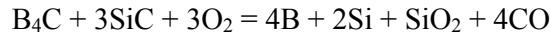
bölgesindeki mikroyapı, matrisin mikroyapısından farklı bir görünüme sahiptir ve borür tabakasına göre daha kalındır. Borür tabakası tarafından karbonun içeriye doğru itilmesi sonucunda geçiş bölgesinde, esas malzemeye göre daha fazla perlit bulunacağı, çeşitli araştırmacılar tarafından ileri sürülmektedir (Bozkurt, 1984).

3.4.4. Borür tabakası kalınlığı

Metal yüzeyinde borlama işlemi ile oluşturulan borür tabakasının kalınlığını etkileyen faktörler borlayıcı ortamın bileşimi ve konsantrasyonu, işlem sıcaklığı ve süresi, alt tabaka metal bileşimidir (Şahin, 1999; Bayça ve Şahin'den 2004).

3.4.4.1. 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 (redükten) bulunmalıdır. Böylece redükten bir madde olan SiC ile B_4C bileşiminden B (elementel 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. Redüksiyonu sağlayan SiC aynı zamanda demiri de redükler, böylece serbest kalan bor, demire yayılır. Böylece FeB ve Fe_2B tabakaları oluşur. Borun demire yayılmasını KBF_4 hızlandırır (Jain ve Sundararajan 2002; Bayça ve Şahin'den 2004).



3.4.4.2. 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) Fe_2B ve FeB borürlerinin oluşumundan dolayı tek tek redüksiyonundan daha hızlıdır. İşlem devam ettikçe çelik yüzeyine bor yayılması devam edecektir. Böylece borür tabaka kalınlığı artacaktır.

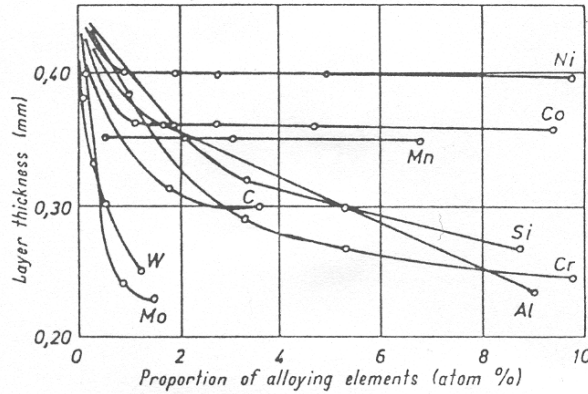
Ancak işlem sırasında redüksiyon işlemi de devam etmelidir. Redüksiyon işlemi için borlama sıcaklığı gereklidir. Borlama süresi, borlama sıcaklığında bekleme süresidir. Borlama süresinin artması ile tabaka kalınlığı artar. İşlem sıcaklığını sınırlayan erimedir. FeB denge diyagramında ötektik sıcaklığın 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 (Bayça ve Şahin, 2004).

3.4.4.3. 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 (Şekil 3.4). Borür tabakası içerisindeki alaşım elementlerinin cins ve miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerde önemli ölçüde değişiklik görülür. Alaşım elementleri, altlık malzemedeki ana elementin bor'a karşı olan aktivitesine, yani borun yayınmasına ve reaktifliğine tesir ederek, genellikle tabaka kalınlığını azaltıcı yönde etki gösterirler. Alaşım elementleri, borür tabakası içerisinde çözünebilme durumuna göre de iki gruba ayrılırlar. Bunlardan birincisi, borür tabakası içerisinde az veya oldukça kararlı borür oluşturarak çözünebilirler (Cr, Ni, Mn, V, Mo gibi), ikincisi ise borür tabakasında çözünlüğü olmayan (C, Si, Al, Cu gibi) elementlerdir.

Borür tabakasında önemli bir çözünlüğü 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 arayüzeyinde yer alır. Kromun, atom numarası demirin atom numarasından düşük olduğundan, altlık malzemedeki ziyade borür tabakasında, yani $(Fe,Cr)B$ ve $(Fe,Cr)_2B'$ 'de daha fazla çözünür ve yüzeye doğru yayınır. 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 yayınır 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 arayüzeyinde yoğunlaşır ve burada ferrit fazı meydana gelir. Bu bölgede meydana gelen $FeSi_{0.4}B_{0.6}$ ve Fe_4SiB_2 bileşikleri 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 (Özbek 1999).



Şekil 3.4. Çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi (Sinha, 1991; Bayça ve Şahin'den 2004).

3.4.5. Demir borürlerin büyüme mekanizması

Borlama süreci iki ana adımda meydana gelmektedir. Birinci adımda, borlama bileşenleri arasında cismin yüzeyinde reaksiyonlar meydana gelir. Parçalanmış bileşenler, yüzeyde çok hızlı bir şekilde, sıkı ve ince bir borür tabakası oluştururlar. Bu oluşumun süresi, sıcaklığa bağlıdır ve $900^{\circ}C$ 'de 10 dakika civarındadır. Bu aşama, toplam borlama süresine oranla çok kısa bir zaman aldığından ihmal edilebilir. İnce ve sağlam olan birinci tabakanın oluşumundan hemen sonra ikinci adım başlar. Bu adım yayınma kontrollüdür. Oluşacak borlu tabakaların kalınlığı, yayınma kanunlarına uygun şekilde, borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak parabolik bir artış göstermektedir (Chatterjee, 1986; Özbek'den 1999).

Genellikle sade karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin termo-kimyasal yöntemlerle borlanması sırasında oluşan borürlerin, kolonsal kümecikler halinde

büyüdüğü görülmektedir. Oluşan borür tabakasında en dış yüzeyde FeB fazı, matrise doğru Fe₂B fazı ve iç kısımda geçiş bölgesi yer almaktadır. FeB fazı ile Fe₂B ve Fe₂B ile matris arayüzeyindeki yapının kolansal olduğu bilinmektedir. Ancak, yüksek alaşımli çeliklerde arayüz yapısının kolansal yerine düz bir çizgi halinde olduğu bilinmektedir. Borlama işlemi sonucu oluşan borür fazları, borlama ortamının aktif bor konsantrasyonuna bağlı olarak, yüzey çizikleri ve pürüzlülükleri gibi makro hataların, tane sınırları ve dislokasyonlar gibi mikro hataların bulunduğu bölgelerde başlamaktadır. Fe₂B tabakasının büyümesi konusunda, difüzyon kanalı büyüme mekanizması ve uçtan büyüme mekanizması olmak üzere iki mekanizma ileri sürülmektedir (Palombarini and Carbucicchio, 1984; Palombarini and Carbucicchio, 1987; Şen'den 1997).

3.4.6. Borür tabakasının büyüme kinetiği

Metallere uygulanan yüzey işlemlerinin çoğu, alaşım elementinin malzemenin yüzeyine yayılması esasına dayanmaktadır. Genel olarak difüzyon işleminin gerçekleşmesi için iki temel kavram önem kazanmaktadır. Bunlar; difüzyonlanabilme ve difüzyon için gerekli olan itici güçtür. Kaplama işlemlerinde bu özellik, sadece ana metalin yapısına bağlı değil, aynı zamanda kaplama tabakasının yapısına da bağlı olmaktadır. Bu temel karakteristikler difüzyonla metal kaplama işlemlerinde, kaplama kinetiğinin temelini teşkil etmektedir. Kaplama işleminde, difüzyon hacimsel yayınma ile kontrol edilmektedir. Çeliğin iki klasik yüzey sertleştirme işlemi olan semantasyon ve nitrasyon, matris malzeme içerisinde C ve N'un yayılması esasına dayanmaktadır. Benzer şekilde bor difüzyonu da kütle taşıyıcıyla gerçekleşmektedir. Bunun yanında matris metalin içerdiği alaşım elementlerinin bor difüzyonuna tek ya da birlikte etkileri de mevcuttur. Demir ve demir esaslı malzemeler borlama işlemine tabi tutuldukları zaman, malzeme yüzeyi üzerinde borür fazı başlangıçta çekirdek halinde büyümektedir. Kaplama, en dış yüzeyde (Fe,M)B ve daha iç kısımda yani matrisin hemen üzerinde (Fe,M)₂B fazlarını içeren iki farklı borür tabakasından meydana gelmektedir. Borür fazları içerisinde hakim faz olarak Fe₂B ve FeB fazları yer almaktadır. Difüzyon işlemi, bor atomlarının FeB ve Fe₂B fazlarının içerisinde difüzyonu ile kontrollü olarak gerçekleşmektedir.

Brakman ve arkadaşları, borlama işlemi sırasında bor konsantrasyonlarının yüzey ve arayüzey boyunca değişiklik göstermediklerini kabul ederek aşağıdaki bağıntıları geliştirmişlerdir.

$C_0 = 0$ $C_b - C_c = 0$ kabul edilirse,

$$C_{FeB} = D_{FeB} (C_s - C_a) \quad (3.3)$$

$$C_{Fe_2B} = D_{Fe_2B} (C_b - C_c) \quad (3.4)$$

Konsantrasyon yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak Şekil 3.5’da verilmektedir.

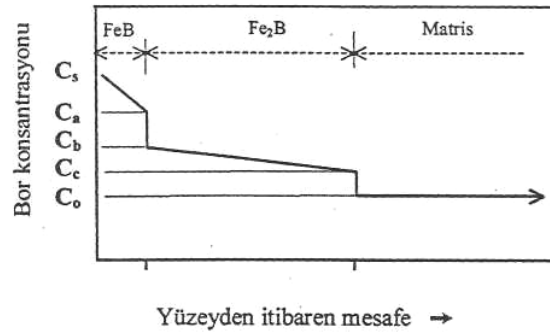
$C_s - C_a$ ve $C_b - C_c$ sıcaklığa önemli ölçüde bağlı değildir. C_{FeB} ve C_{Fe_2B} ‘nin sıcaklığa bağımlılığı D_{FeB} ve D_{Fe_2B} difüzyon katsayılarından kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı,

$$C_{FeB} = K_{FeB} \exp (-Q_{FeB}/RT) \quad (3.5)$$

$$C_{Fe_2B} = K_{Fe_2B} \exp (-Q_{Fe_2B}/RT) \quad (3.6)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, K_{FeB} ve K_{Fe_2B} sabit değerlerdir.

Netice olarak, FeB ve Fe₂B fazlarında bor difüzyon için gerekli olan aktivasyon enerjisi Q ve ön eksponansiyel K faktörü değerleri, sıcaklığın (1/T) fonksiyonu olarak ln C_{FeB} ve ln C_{Fe₂B} ile arasında çizilen eğriler yardımıyla ordinatı kesim noktasından ve eğimden bulunabilmektedir. Her iki tabaka birbirine bağlı olarak büyümektedir. Bu yüzden, Fe₂B ve FeB fazlarının büyümesi ile ilgili kinetik parametrelerin belirlenmesinde her iki tabaka için verilerin bulunması gerekmektedir. Bu, yukarıda aktivasyon enerjisinin belirlenmesi için örneklendirilmiştir (Gupta vd., 1980; Wendong vd., 1995; Mats vd., 1981; Brakman vd., 1989; Şen’den 1997).



Şekil 3.5. Bor konsantrasyonunun yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak değişimi (Brakman vd., 1989; Özsoy'dan 1999).

3.5. Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulamaları

Bor kaplanmış malzemeler, göstermiş oldukları üstün özellikler sebebiyle otomotiv, makine, kimya, tekstil ve gıda endüstrileri başta olmak üzere çok geniş bir endüstriyel kullanım alanına sahiptir. Özellikle adhezif ve abrazif aşınma şartlarında birçok kullanım alanı mevcuttur. Aşınmanın büyük bir problem teşkil ettiği alanlarda borlama işlemi parçaların kullanım ömrünün artmasını sağlayarak büyük ekonomik katkılar sağlamaktadır. Borlamanın bazı endüstriyel uygulamaları şunlardır (Fichtl,1988; Sinha, 1991; Fichtl, 1981; Özbek'den 1997):

Tütün yapraklarının delip şerit halinde kesen %17 Cr'lu paslanmaz çelik parça, tütün yaprakları üzerindeki mineral parçacıkları sebebiyle şiddetli bir erezyona uğrar. Her 4 haftada bir değiştirilmek zorunda kalan bu parça 850°C'de 5 saat süreyle borlanması sonucunda servis ömrü 2 yıla kadar çıkmış yani 25 kat artmıştır.

Seramik pota üretimi için %0,9C, %2Mn CrV (DIN 1.2842) çeliğinden yapılan alt ve üst kalıpların servis ömrü, 900°C'de 5 saat borlamakla 3 kat artmıştır.

Çok büyük kimya fabrikalarında kullanılan ve 18/10 CrNiMoTi (DIN no: 1.4571) çeliğinden yapılan dört delikli su besleme regülatörü valfinde, erozyon nedeniyle 2.000 saatlik bir çalışma süresi sonunda yarık oluşmuştur. Stellit kaplı parça ise yaklaşık 8.000 saat çalışma sonrasında kullanılamaz hale gelmiştir. Fakat, %13Cr'lu

çelikten (DIN no: 1.4006) yapılan bu valfin 900°C'de 6 saat borlanıp uygun bir ısıtma işleminden geçirildikten sonra 18.000 saat çalışma süresi sonunda bile hala kullanılabilir durumda olduğu tespit edilmiştir.

Daha önceleri 90° açılı ve 100 mm çapındaki boru dirseği ve bunun sürgüsü ostenitik CrNi çeliğinden yapılıyor ve servis ömrü en fazla 6 hafta oluyordu. Bu dirsek St.37 çeliğinden yapıp 1000°C'de 6 saat borlanmış ve servis ömrü 4-6 kat artmıştır.

Japonya'da 1972'den beri geniş çapta ve başarılı bir şekilde dövme kalıpları borlanmaktadır. Bu kalıplar %0,4C, %5Cr, %1Mo, %1V (SKD 61) çeliğinden yapılmış olup 900°C'de 3 saat EKabor 1 ile borlanmıştır. Kalıplar havada sertleştirilip temperlenmiş ve servis ömürleri 2-3 ila 10 kat arasında artmıştır.

Ticari kahve kavurma fabrikaları için %0,45C'lu çelikten (DIN no: 1.0503) yapıp 850°C'de 4 saat süreyle borlanmış kahve öğütme diskleri, borlanmamış olanlarına nazaran 5 kat daha uzun ömürlü olmuştur.

Endüstriyel yakıt yakma üniteleri ve kimya endüstrisinde sıvı kimyasal atıkların depolandığı yerlerde, yakma nozülleri, pervane gibi dönen parçalar ve enjektör başları başarı ile senelerden beri borlanmaktadır. Bu endüstrilerde yanan yakıt, buhar ve atıklar nozüle 8 barlık bir basınçla gelirler. Çoğunlukla düşük P ve S'lü %0,45 C'lu (DIN no: 1.1191, Ck 45) çelikten yapılan bu parçalar, 900°C'de 6 saat EKabor 2 ile borlama sonucunda servis ömrü yaklaşık 2-3 kat artmıştır. Sıvı atıkların prüsik asit içermesi durumunda ise (DIN no: 1.4571) AISI 316 Ti çeliğinden yapılan bu parçalar, 850 °C'de 6 saat EKabor 2 ile borlanması sonucunda servis ömrü yine yaklaşık 2-3 kat artmıştır.

Ağırlığı yaklaşık 500 kg olan daralan dirseğin (çapı 400/250 mm) iç yüzeyi borlama pastası ile 950°C'de 10 saat süre ile ve argon gazı altında borlanmıştır. Pasta ile borlama maliyeti 3.000 DM olurken, borlama tozu ile yapılanda ise 5.000 DM olmuştur. Yani maliyet %40 azalmıştır.

Demiryolu taşıyıcı bojilerin süspansiyon parçaları %3Ni, %1Cr, %0,5Mo (DIN no: 1.6746) çeliğinden yapılmaktadır. Çok pahalı olan bu parçalar, 100.000 km.de bir değiştirilirken, 900°C'de 4 saat borlama sonrasında 200.000 km'den sonra bile hala

kullanılabilir özelliklerde olduğu tespit edilmiştir.

Boru klipi yapımında kullanılan kalıplar %0,9C, %2Mo CrV (DIN no: 1.2842) çeliğinden yapıp sert krom kaplanmaktadır. Bu kalıplardan 10.000 parça ancak üretilebilirken, 900°C'de 6 saat EKabor 1 tozu ile borlanıp ısıtılmış olan kalıplardan 17.000 parça üretildikten sonra bile temiz yüzeyli ve gerekli boyut toleransına sahip parçalar üretilebilmiştir.

Geri dönüşsüz valfler %1Cr Mo çeliğinden yapılırlar. Nitrülenmiş olan bu valfler silikon içeren elastomerlerin işlenmesinde kullanıldığında 5 ila 8 gün içerisinde ömrünü tamamlamaktadır. Bu valfin, 950°C'de 5 saat süreyle EKabor 2 ile borlandıktan sonra vakum altında uygulanan ısıtılmış işlem ile çekirdek sertliğinin de artırılması sonucunda, servis ömrü ortalama 8 kat artmıştır.

Kayaları delmekte kullanılan kesici uç, SAE EX 30 CrNi çeliğinden yapılmaktadır. Yüzeyden içeriye doğru homojen bir sertlik dağılımı sağlamak için önce karbürizasyon yapılan ve sonra 900-920°C'de 10 saat süreyle EKabor ile borlanan bu parçanın ömrü 3 kat artmış, %15 daha fazla yük uygulamak ve de dönme hızını daha da arttırmak mümkün hale gelmiştir.

Kesici takımlarda genellikle iki farklı tipde aşınma meydana gelir. Bunlar, işlenen metal ise soğuk kaynak (adhezif aşınma), plastik gibi metalik olmayan bir malzeme ise erozif aşınmadır. Kesici takımların borlanması sonucunda her iki aşınma türü de büyük oranda ortadan kalkmaktadır.

Mekanik test cihazları tutucu çenelerinin borlanması durumunda tutucu dişlerin daha fazla yüke dayandığı gözlenmiştir. Bu ise, tutucu çenelerin orijinal testere dişli profil yerine trapezoidal bir profile yapılabilmesine imkan sağlar ve böylece üretimi daha kolay olur. Borlama işlemi ile üretim maliyetlerinin azaltılmasından başka, malzeme maliyetleri de düşürülür. Bu tutucu çenelerde yüksek alaşımli takım çelikleri (%2,1C, %12Cr'lu çelik gibi) yerine, ısıtılmış işlem görmüş daha ucuz çelikler (%1Cr Mo'li veya %1Cr V'lu çelikler gibi) kullanılabilir. Bu çeliklerin borlanması 900°C'de 4-5 saat süre ile gerçekleştirilir. Borlanmış tutucu çeneler, yüksek basma gerilmelerinde borür tabakasının altlık malzemeden ayrılmasını önlemek ve yeterli çekirdek sertliğine

ulaşmasını sağlamak için; ostenitleme nötral tuz banyosunda (siyanürsüz), su verme ise yağda gerçekleştirilir.

PVC üreten bir fabrikada vinil klorür taşıyan %18 Cr, %9 NiTi ile 18/10 CrNiMoTi (1.4571) çeliklerinden yapılan boruların servis ömrü 6 ay kadar iken, 850°C'de 4 saat süreyle EKabor 2 ile borlama sonrası ise borür tabakası kalınlığı 15 µm olmasına rağmen, 2 yılın üzerine çıkmıştır.

Rotorlar ve darbe ile kesici parçalardan %18 Cr, %9 NiTi çeliğinden yapılanların, 850°C'de 6 saat borlanmak suretiyle kullanım ömürleri 3 kat artmıştır.

Volkswagen Golf ve Audi otomobillerinin dizel motorlarının DIN 42CrMo4 çeliğinden yapılan yağ pompası dişlilerinin, 920°C'de 1,5 saat EKabor 1 ortamında borlandıktan sonra su verme ısıl işlemleri ile sertliği 52-55 Rc'ye getirilmiş ve böylece adhezif aşınmaya karşı direnç sağlanarak servis ömürleri artırılmıştır.

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR

4.1. Giriş

Bu çalışmada AISI 1030 ötektoid altı çeliğine ait numuneler 900, 950, 1000 ve 1050 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat sürelerde borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işlemi katı ortamda EKabor®2 tozları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Borlama sonrasında oluşan borür tabakalarının morfolojileri, optik mikroskop yardımıyla incelenmiştir. Ayrıca borür tabakasının zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kalınlıkları, yüzey sertlikleri ve yüzeyden matrise doğru sertlik dağılımları ölçülmüştür. Borür tabakasının büyüme kinetiği ve abrazyon davranışı incelenmiştir.

4.2. Deneylede Kullanılan Malzeme

Deneylede AISI 1030 çeliği kullanılmıştır. Bu çeliklerin kimyasal analizi Eskişehir Entil A.Ş. laboratuvarlarında gerçekleştirilmiş olup, sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan 1030 çeliğinin % ağırlık cinsinden kimyasal bileşimleri.

MalzemeAdı	% C	% Si	% S	% P	% Mn
AISI 1030	0,331	0.285	0.032	0.012	0.648

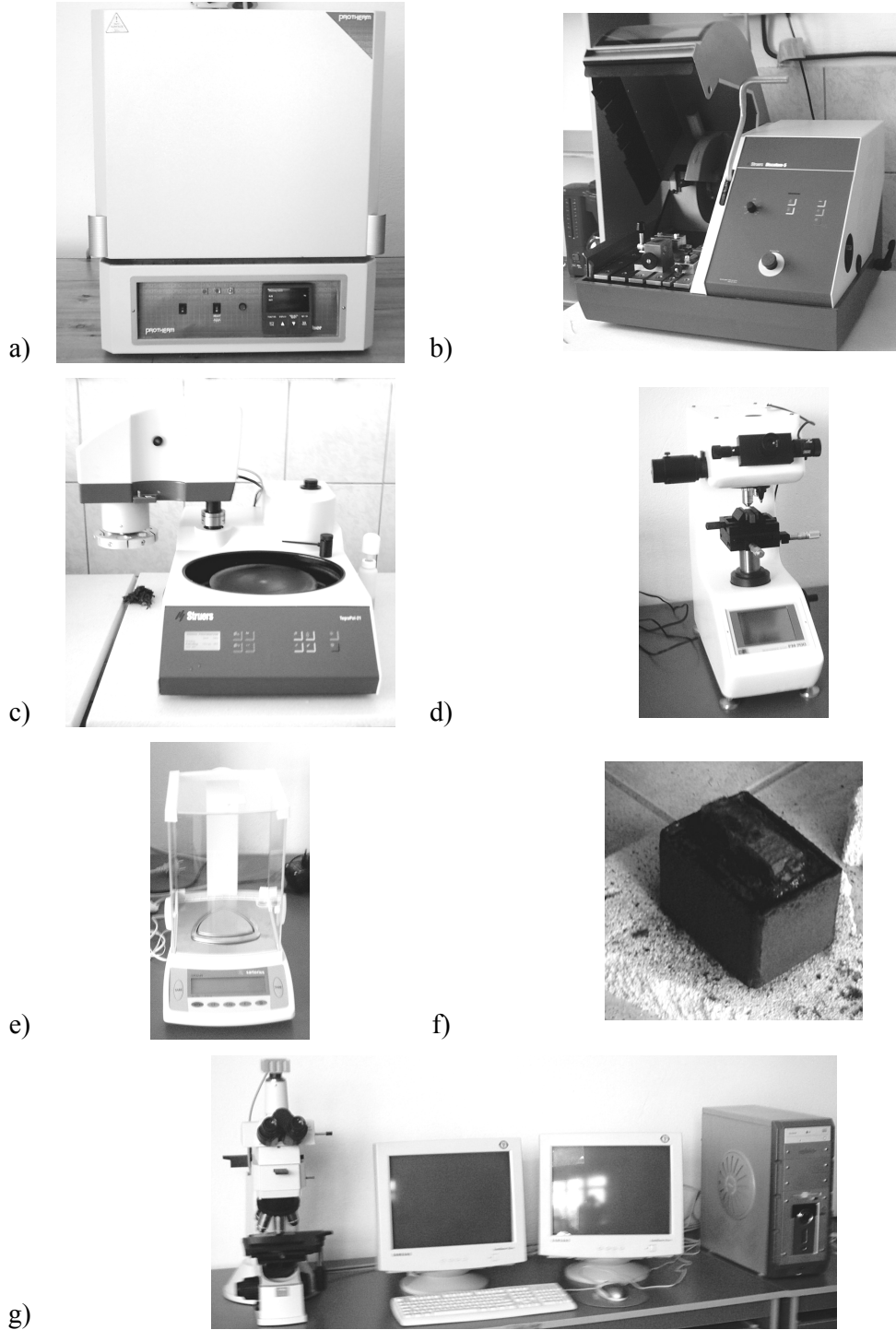
4.3. Borlama İşlemi

Borlama işleme katı-toz ortamda gerçekleştirilmiştir. Bor kaynağı olarak EKabor®2 ve deoksidan olarak Ekrit® toz karışımları kullanılmıştır (Bkz Tablo 3.3). Borlama işlemi 900, 950, 1000 ve 1050 °C sıcaklıklarda; 2, 4 ve 6 saat sürelerle atmosferik şartlarda yapılmıştır. Borlama işleminde AISI 304 kalite 3 mm kalınlığında paslanmaz çelik saçtan yapılmış 11×8×7 cm ölçülerinde ağzı kapaklı potalar

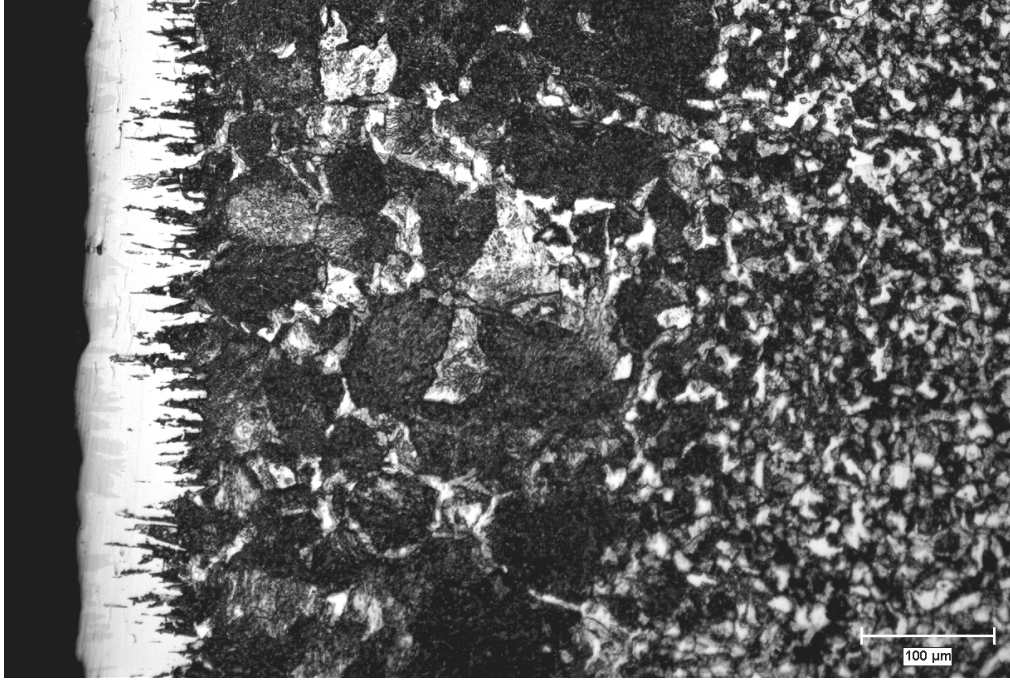
kullanılmıştır (Şekil 4.1.f). Çelik numuneler kesici disk ile sulu ortamda 12.7×12.7×12.7 mm ebatlarında kesilmişlerdir. Çelik pota içine tabandan itibaren 1 cm. yüksekliğinde EKabor®2 tozu konuldu. İçinde 1 cm. yüksekliğinde EKabor®2 tozu olan çelik pota içine numuneler aralarında en az birer cm. boşluk bırakılarak her numuneden altışar adet olmak üzere yerleştirildi. Numuneler yerleştirildikten sonra numunelerin üzeri 1 cm. yüksekliğinde EKabor®2 tozu ile dolduruldu. Borlama yapılırken numunelerin hava ile temas etmemesi için çelik kutuya Ekrit® tozu ilave edilerek kutunun kapağı sıkıca kapatıldı. Her bir borlama işlemi için yeni toz karışımları kullanılmıştır. Potalar Protherm marka elektrik direnç fırınına yerleştirilmiştir (Şekil 4.1.a). Max. Sıcaklığı 1500 °C olan cihazda ısıtma kontrollü olarak yapılmaktadır. Borlama sonrası numuneler potadan bir maşa ile çıkarılarak havada soğutulmuştur.

4.4. Metalografik İncelemeler

Numuneler Struers Discotom-5 kesme cihazında (Şekil 4.1.b) ortadan kesildi. Cihazda manuel ve otomatik kesme seçeneği olup, istenilen hızda kesme işlemi yapılabilmektedir. Numuneler Struers Tegrapol-21 cihazında (Şekil 4.1.c) önce MD-Piano 220 mesh daha sonra MD-Piano 600 mesh SiC zımpara ile kademeli olarak zımparalandı. Zımparalanan numuneler yine Struers Tegrapol-21 cihazında MD-Dac 3 µm'lik parlatma çuhasında parlatılarak numunelerin hazırlanma işlemi bitirildi. Hazırlanan numuneler, % 2'lik Nital dağlayıcısı ile dağlanarak Nikon-eclipse L150 marka görüntü alma sisteminde (optik mikroskop) (Şekil 4.1.g) 200X büyütmede incelenmiştir. Tabaka kalınlığı ölçümleri ise, net görülen 30 adet dişin uzunluklarının ortalaması alınarak tek bir değer cinsinden belirlenmiştir (Tablo 4.2). Ölçümler görüntü alma sisteminin programıyla bilgisayarda yapılmıştır. Sıcaklık ve zamana bağlı borür tabaka kalınlığının değişimi Şekil 4.18'de verilmektedir. Metalografik olarak hazırlanan numuneler optik mikroskop ile incelenmiştir. Yüzeye yakın olan FeB fazı ile bunun altında yer alan Fe₂B fazı, dağlama ile elde edilen renk farkından dolayı kalitatif olarak ayırt edilmiştir (FeB fazı Fe₂B'ye göre daha koyu gri). Farklı süre ve sıcaklıklarda borlanan AISI 1030 çeliklerinin mikro yapılarının optik metalografi incelemelerinde elde edilen görüntüleri Şekil 4.2-4.17'de verilmektedir.



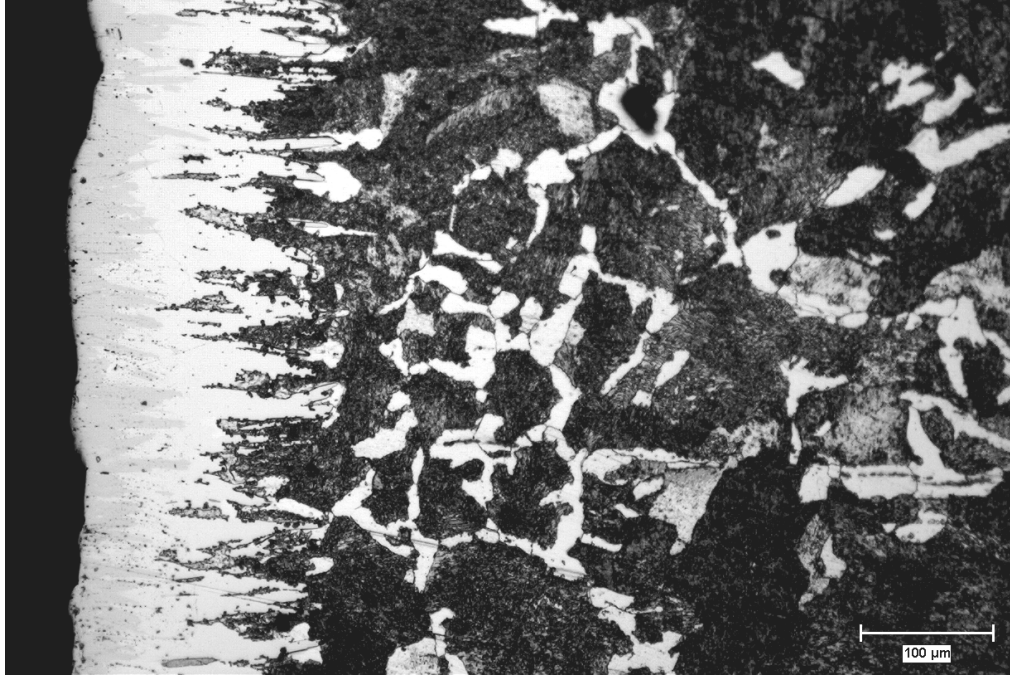
Şekil 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan cihazlar: a) Borlama işlemlerinin yapıldığı Protherm marka fırın. b) Struers Discotom-5 kesme cihazı. c) Struers Tegrapol-21 zımpara ve parlatma cihazı. d) Sertlik ölçüm cihazı. e) Hassas terazi f) Borlamanın yapıldığı pota. g) Görüntü analiz sistemi.



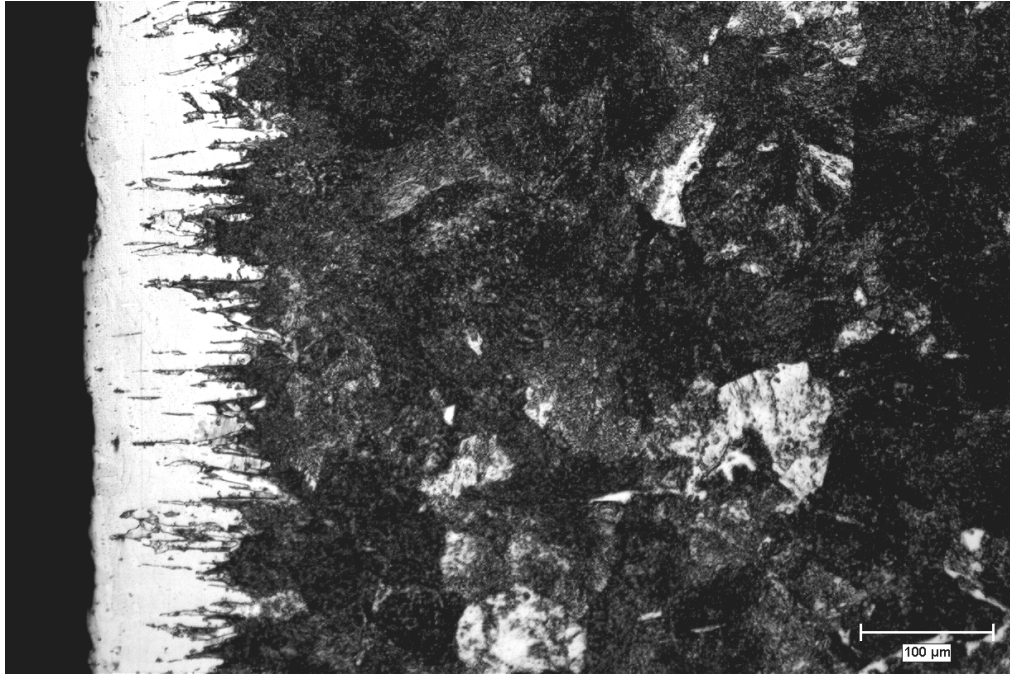
Şekil 4.2. 900 °C'de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (200X).



Şekil 4.3. 900 °C'de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (200X).



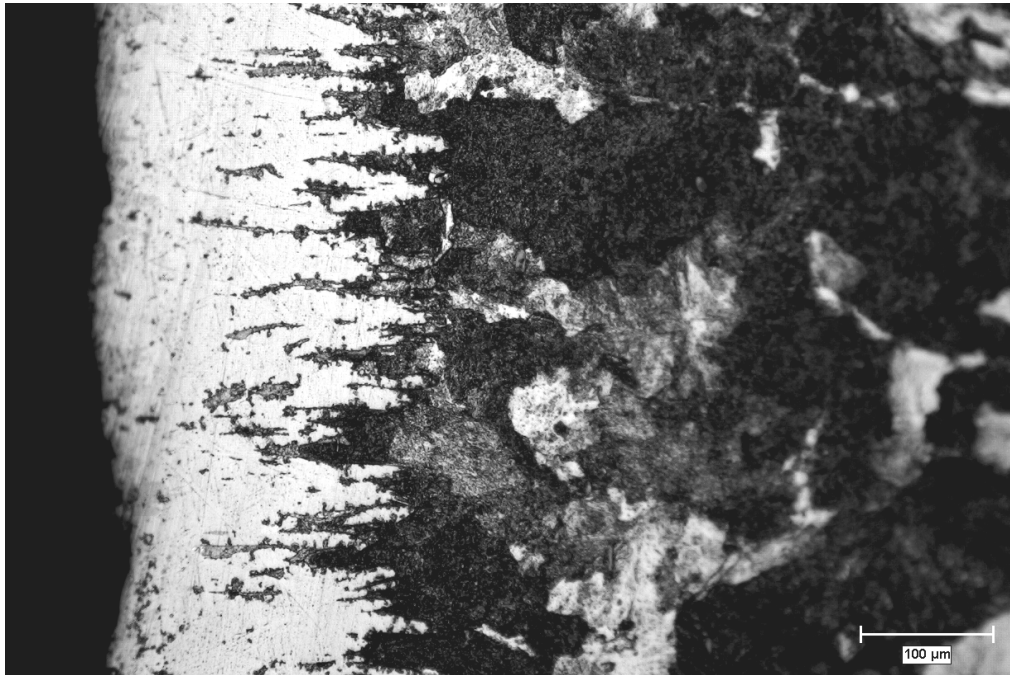
Şekil 4.4. 900 °C'de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (200X).



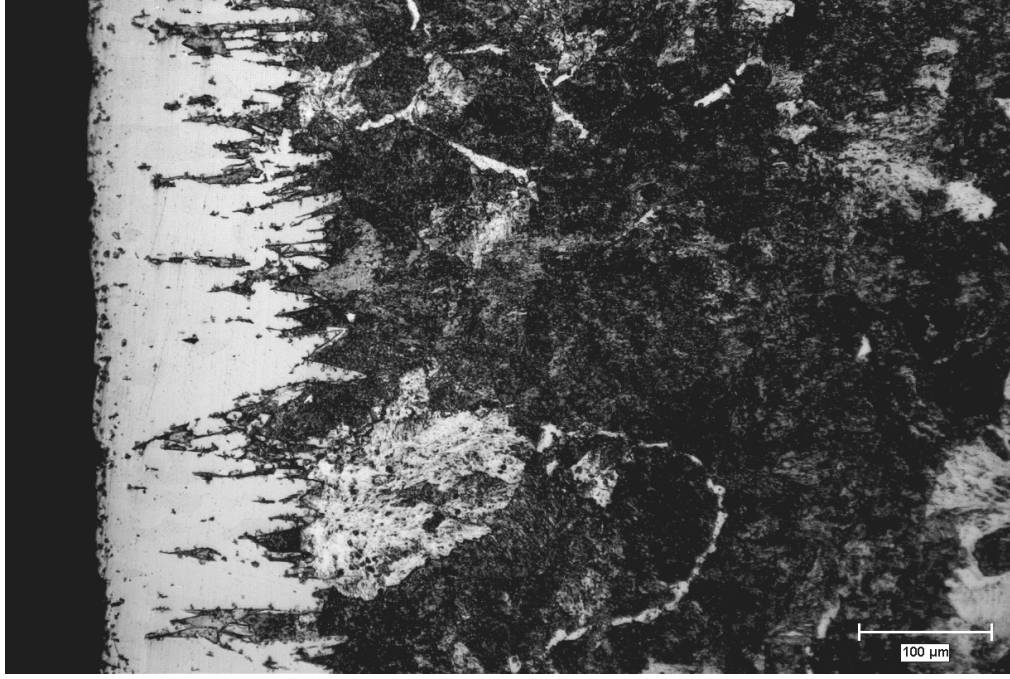
Şekil 4.5. 950 °C'de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (200X).



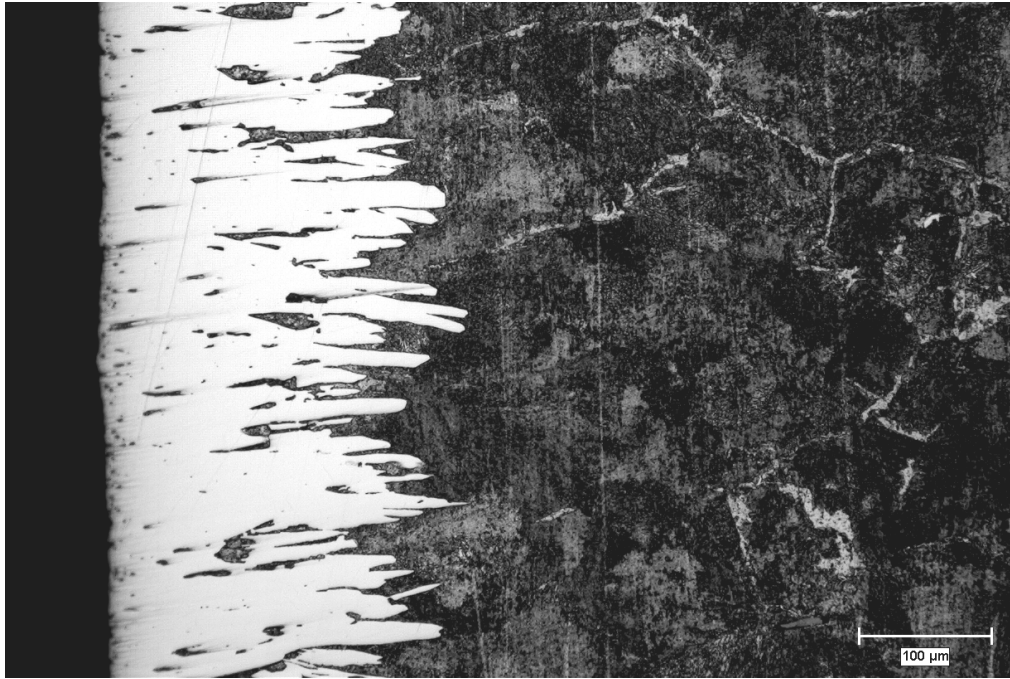
Şekil 4.6. 950 °C'de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (200X).



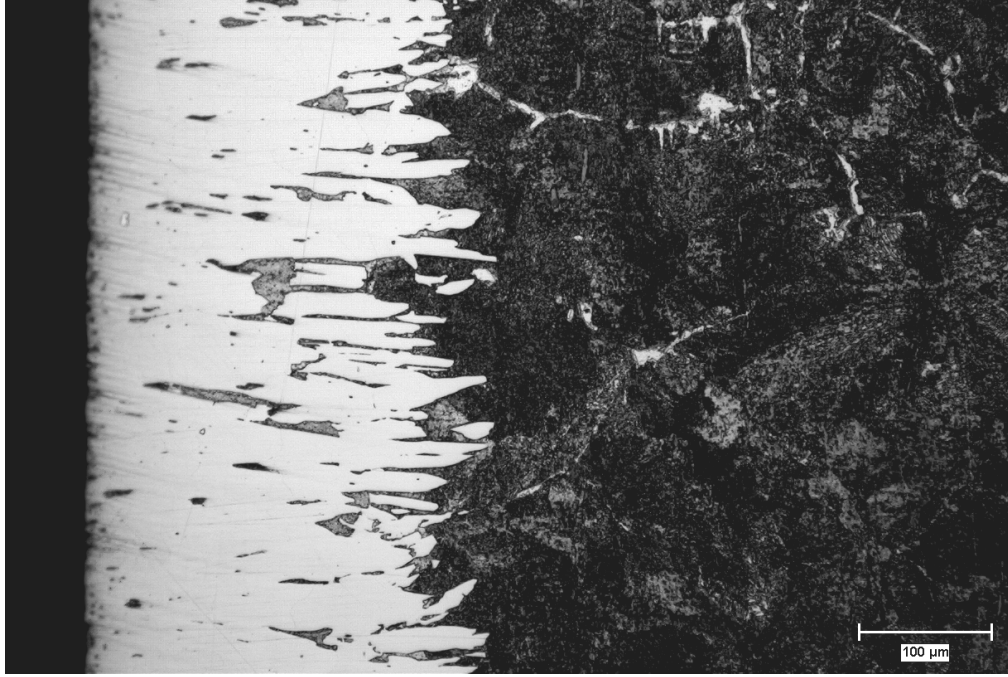
Şekil 4.7. 950 °C'de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (200X).



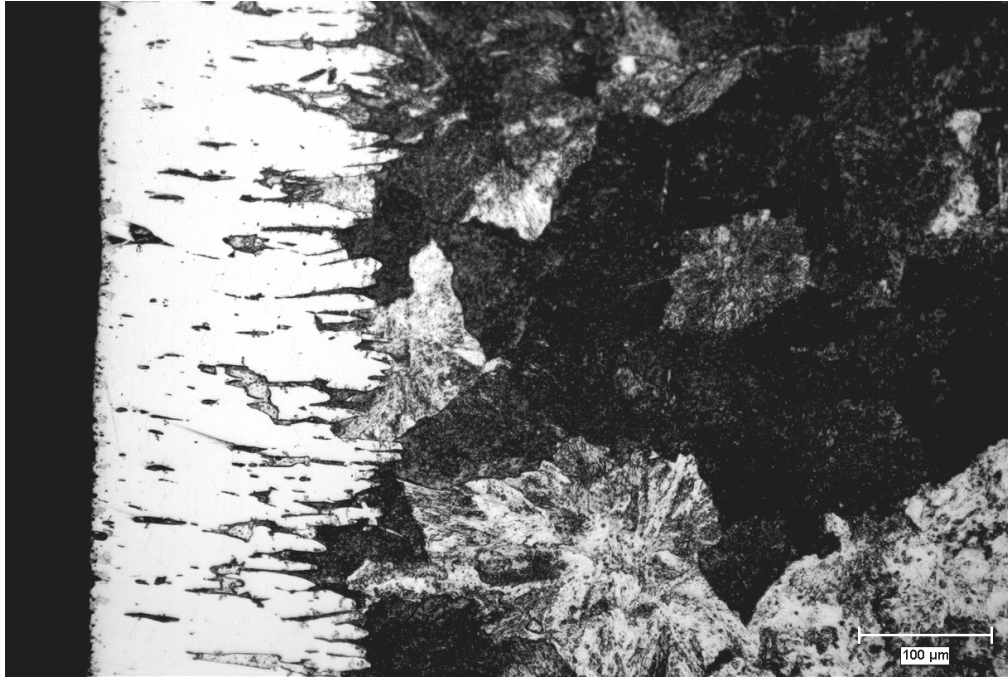
Şekil 4.8. 1000 °C'de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (200X).



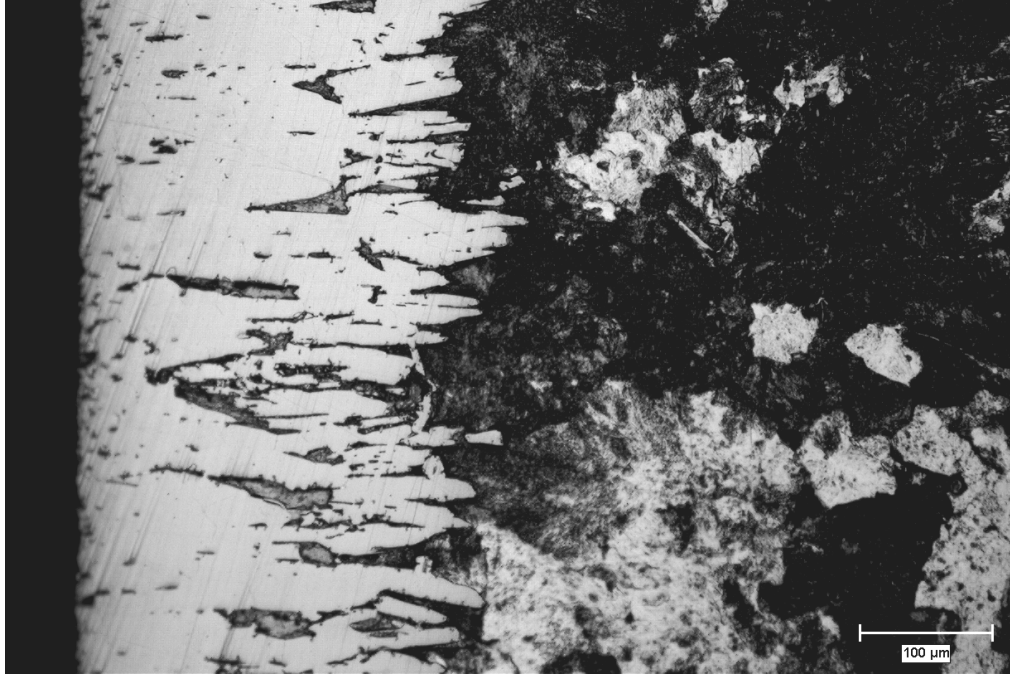
Şekil 4.9. 1000 °C'de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (200X).



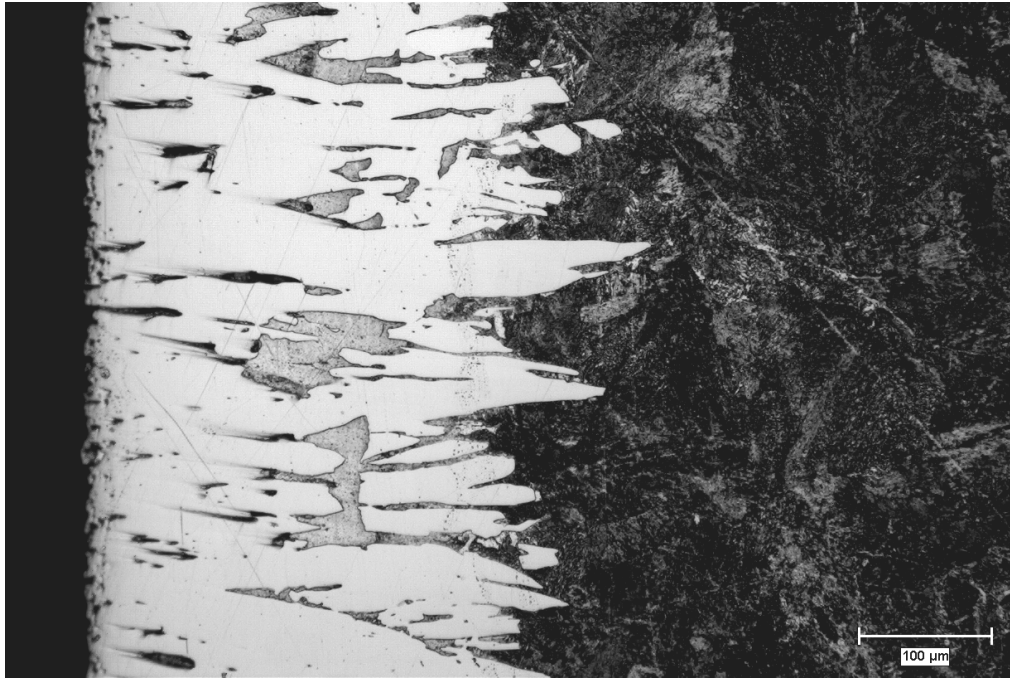
Şekil 4.10. 1000 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (200X).



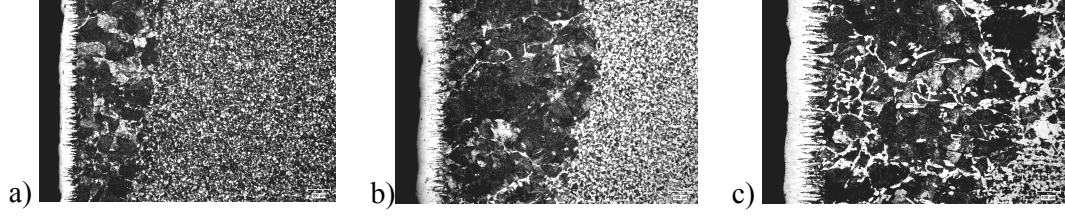
Şekil 4.11. 1050 °C’de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (200X).



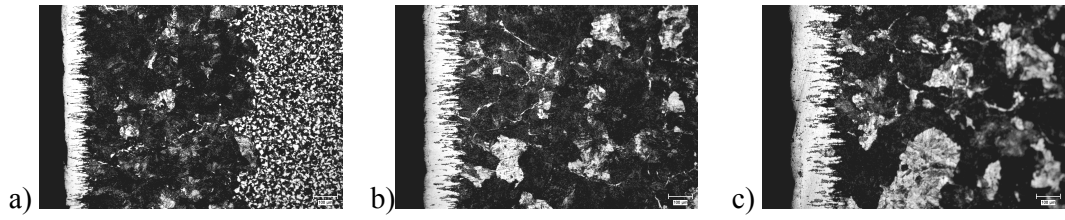
Şekil 4.12. 1050 °C’de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (200X).



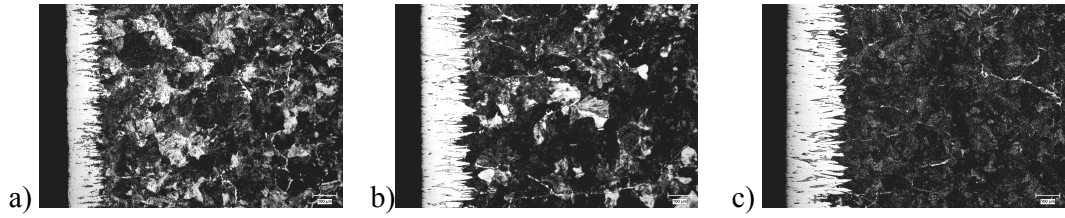
Şekil 4.13. 1050 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (200X).



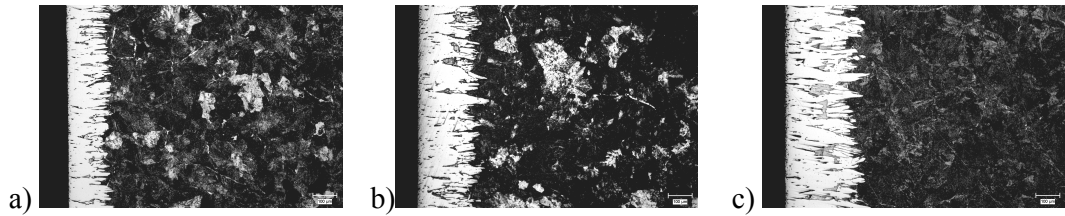
Şekil 4.14. 900 °C’de farklı sürelerde borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (100X). a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat.



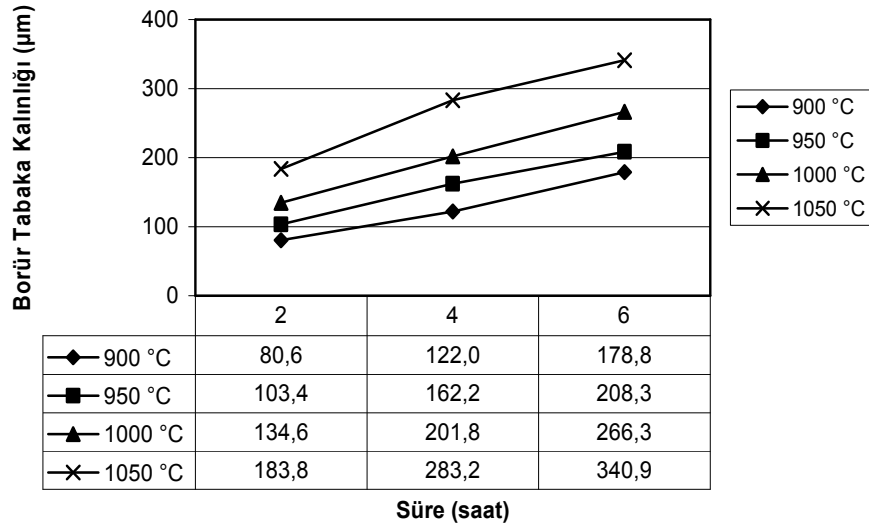
Şekil 4.15. 950 °C’de farklı sürelerde borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (100X). a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat.



Şekil 4.16. 1000 °C’de farklı sürelerde borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (100X). a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat.



Şekil 4.17. 1050 °C’de farklı sürelerde borlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin mikroyapısı (100X). a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat.



Şekil 4.18. Borlanmış AISI 1030 çeliğinin sıcaklık ve zamana bağlı borür tabaka kalınlığının değişimi.

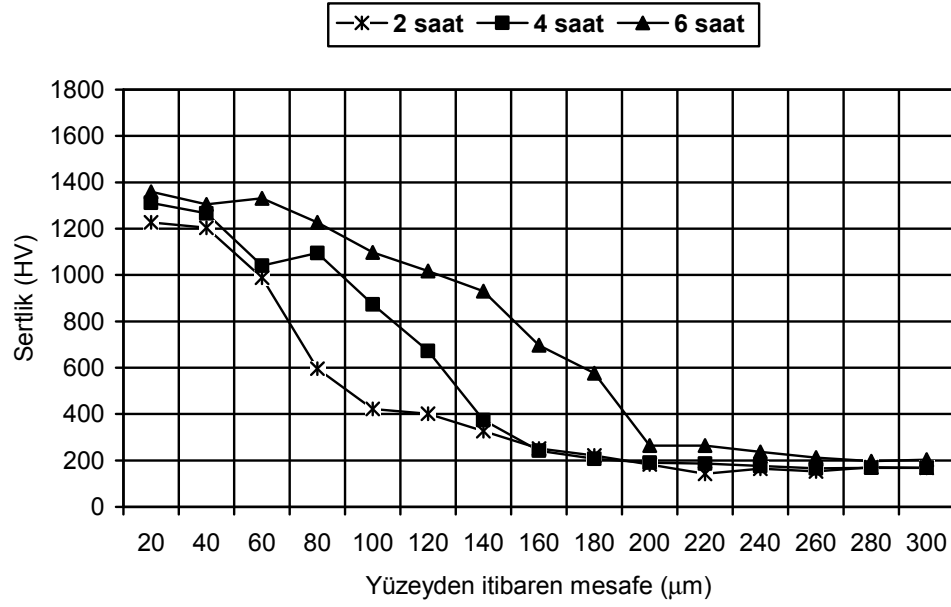
4.5. Sertlik Ölçümleri

Borlanmış numunelerin sertlik ölçümleri; Future-tech FM-700 marka mikrosertlik cihazında Vickers uç kullanılarak 25 gram yük altında 10 saniye sürede gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1.d). Ölçümler borür tabakası boyunca yüzeyden itibaren matrisin içerisine kadar, belirli bir doğrultuda ve sabit aralıklarla (20 µm) yapılmıştır. Sertlikteki değişim, borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak tespit edilmiştir.

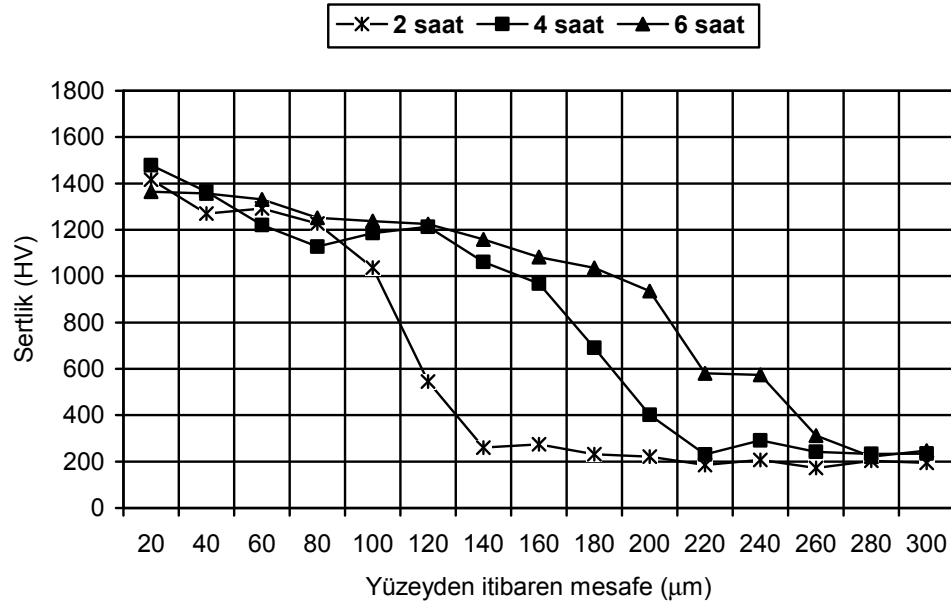
Sertlik ölçümleri, borlanan malzemenin yüzey sertliği, kırılma tokluğu ve aşınma gibi mekanik özelliklerine etkisinin ortaya çıkarılması açısından önemlidir. Sertlik ölçümleri borlanmış numuneye dik doğrultuda 20 µm aralıklarla ilerleyerek gerçekleştirilmektedir. Tabaka kalınlığının sıra sertlik ölçümüne izin vermeyecek derecede ince olduğu durumlarda düzgün doğrusal bir çizgi üzerinde değil, zik zaklar çizerek bir zon üzerinde ölçülmüştür. Yüzeyden itibaren ölçülen sertlik dağılımları, kolonların boylarına göre değişmektedir. Ölçüm yapılan yerdeki kolon boyu her zaman gerçek tabaka kalınlığını temsil etmemekle birlikte, ortalama bir değer vermektedir. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanan her numune için, yüzeyden itibaren mesafeye (µm) bağlı olarak belirlenen sertlik değerleri (HV) ve dağılımı Tablo 4.2 ve Şekil 4.19-22'de verilmektedir.

Tablo 4.2. AISI 1030 çeliğinin değişik sıcaklık ve sürelerde borlanması sonucu oluşan borür tabakasının kalınlığı ve mikrosertlik değişimi.

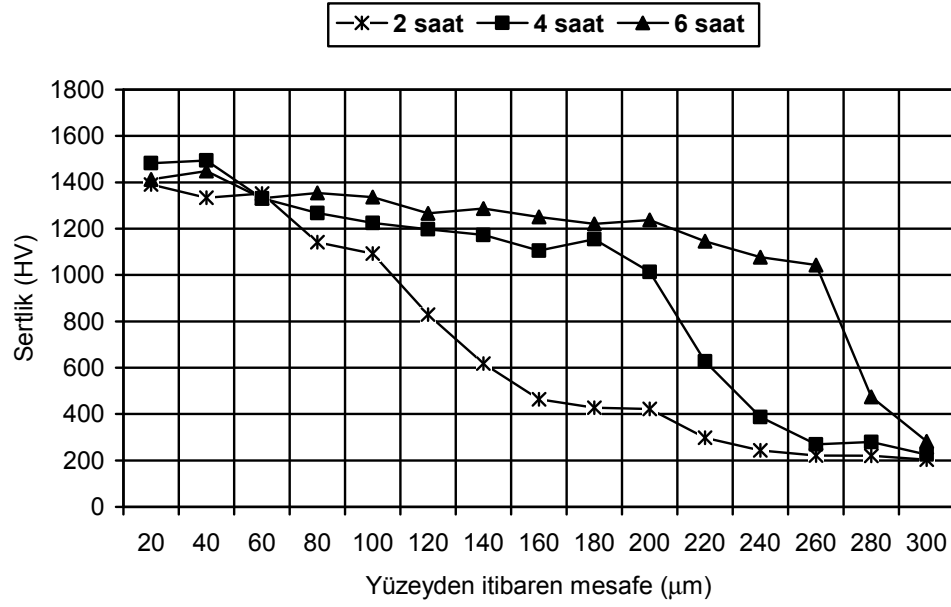
Sıcaklık	900 °C			950 °C			1000 °C			1050 °C		
Süre (h)	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
Tabaka Kalınlığı (µm)	80,6	122,0	178,8	103,4	162,2	208,3	134,6	201,8	266,3	183,8	283,2	340,9
Yüzeyden İtibaren Mesafe (µm)	Borür Tabakasının Mikrosertlik Değişimi (HV)											
20	1227	1311	1359	1416	1478	1364	1390	1483	1412	1543	1505	1625
40	1204	1266	1305	1270	1364	1357	1334	1494	1449	1437	1454	1601
60	989	1040	1331	1292	1221	1331	1352	1331	1331	1340	1447	1578
80	596	1095	1227	1227	1128	1252	1142	1268	1354	1378	1364	1532
100	422	873	1097	1037	1186	1237	1093	1225	1336	1305	1331	1473
120	402	673	1017	546	1213	1225	830	1198	1266	1217	1331	1402
140	327	374	931	261	1061	1158	618	1173	1287	1130	1322	1412
160	251	242	697	275	968	1082	464	1105	1250	1229	1359	1462
180	221	207	577	232	691	1035	427	1155	1221	674	1316	1442
200	183	190	264	222	402	935	422	1013	1237	530	1275	1462
220	142	186	265	185	231	580	298	627	1146	352	1217	1375
240	164	176	237	207	291	574	243	388	1077	250	1217	1292
260	153	166	213	173	242	312	221	270	1043	239	1206	1254
280	171	169	197	204	233	221	220	280	474	218	1260	1331
300	168	168	203	195	235	247	204	225	282	224	450	1313



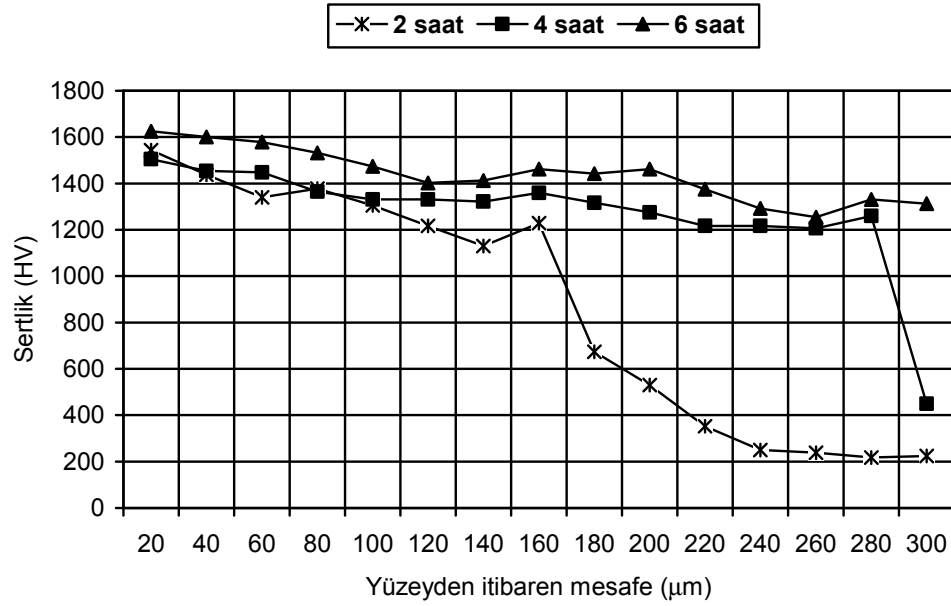
Şekil 4.19. 900 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan AISI 1030 çeliğinin yüzeyden itibaren mesafeye (μm) bağlı olarak sertlik (HV) dağılımı.



Şekil 4.20. 950 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan AISI 1030 çeliğinin yüzeyden itibaren mesafeye (μm) bağlı olarak sertlik (HV) dağılımı.



Şekil 4.21. 1000 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan AISI 1030 çeliğinin yüzeyden itibaren mesafeye (μm) bağlı olarak sertlik (HV) dağılımı.



Şekil 4.22. 1050 °C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan AISI 1030 çeliğinin yüzeyden itibaren mesafeye (μm) bağlı olarak sertlik (HV) dağılımı.

4.6. Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği

Numunelerde borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak elde edilen tabaka kalınlıkları, Tablo 4.2’de verilmektedir. Tabaka kalınlığı değerleri ve aşağıdaki eşitlikler vasıtası ile Şekil 4.23-4.27’deki grafikler çizilmiştir. Borür tabaka kalınlığının kinetik açıdan incelenmesi sırasında, difüzyon katsayısı (K) ve aktivasyon enerjisinin hesaplanması için Eşitlik 4.1’den faydalanılmıştır.

$$d^2 = Kt \quad (4.1)$$

d = Tabaka kalınlığı (cm)

t = Zaman (sn)

K = Difüzyon katsayısı (cm²/sn)’nı göstermektedir.

Aktivasyon enerjisi (Q) belirlenmesinde ise Eşitlik 4.2’den yararlanılmıştır.

$$K = K_0 \exp (-Q/RT) \quad (4.2)$$

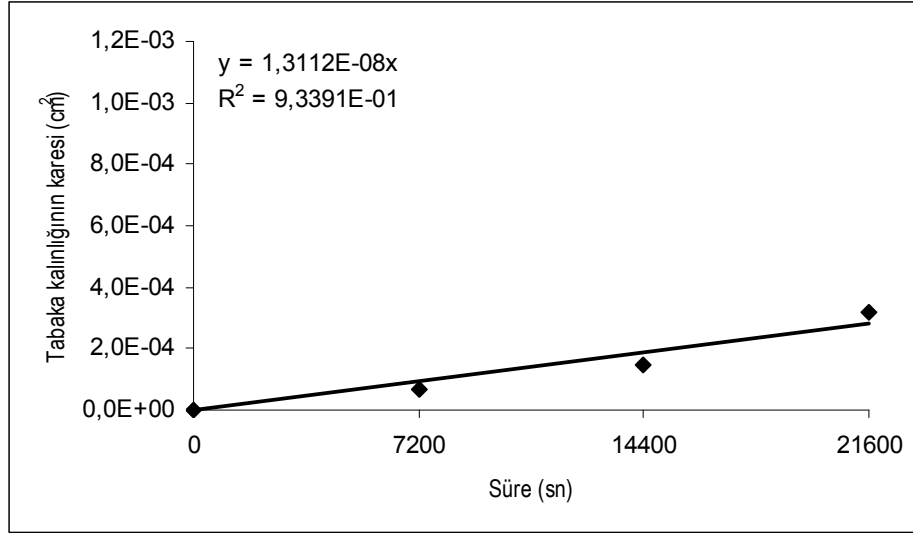
K = Difüzyon katsayısı (cm²/sn)

K₀ = Frekans faktörü (cm²/sn)

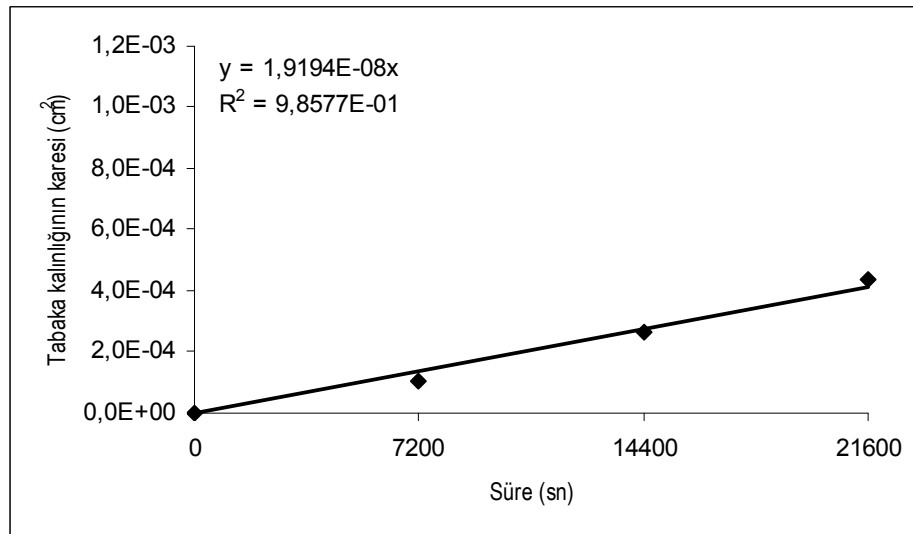
Q = Aktivasyon enerjisi (J/mol.)

R = Gaz sabiti, 8,314 (J/mol.°K)

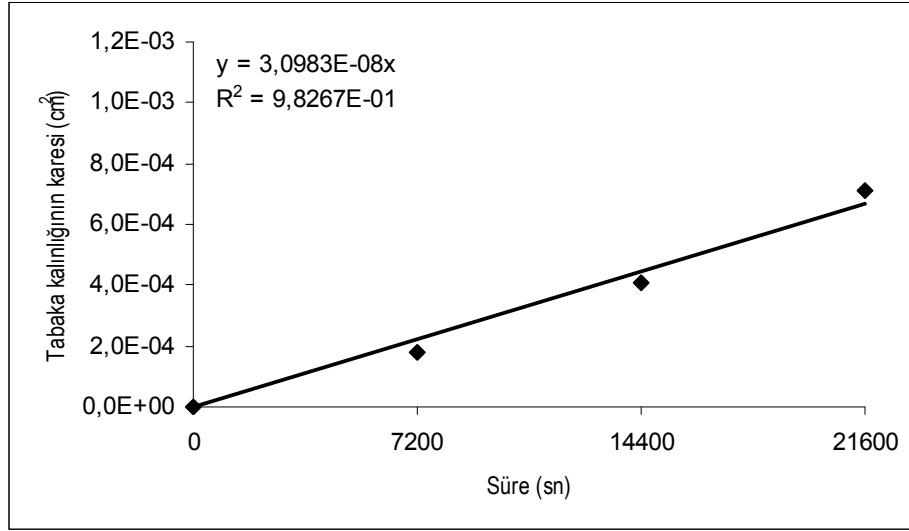
T = Sıcaklık (°K)



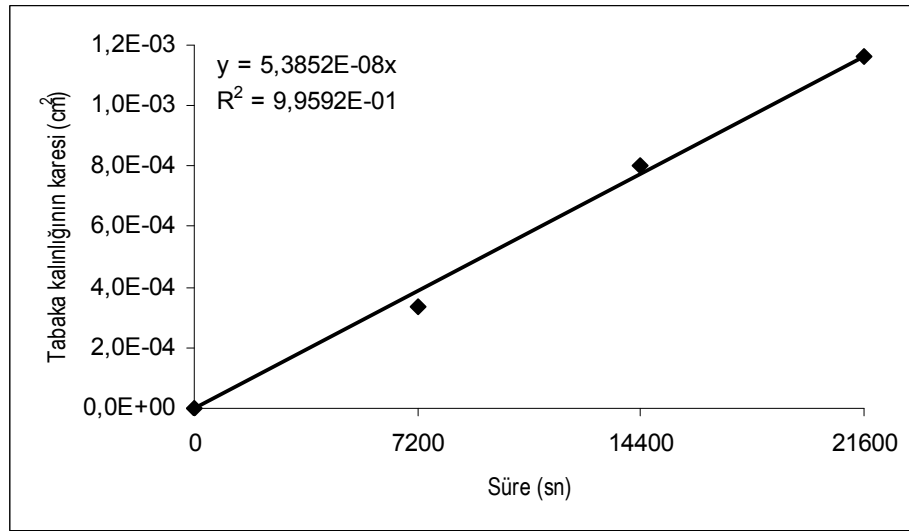
Şekil 4.23. 900 ° C'de 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 çeliğinin difüzyon katsayı eğrisi.



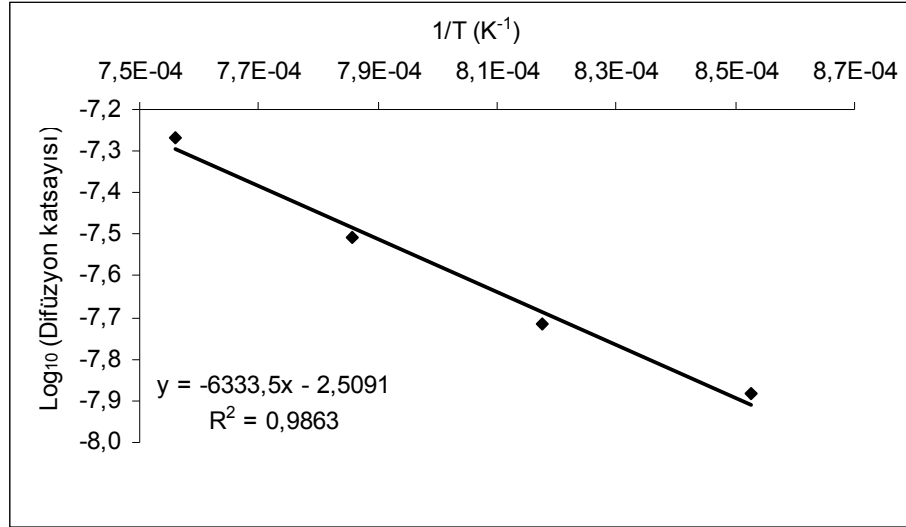
Şekil 4.24. 950 ° C'de 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 çeliğinin difüzyon katsayı eğrisi.



Şekil 4.25. 1000 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 çeliğinin difüzyon katsayı eğrisi.



Şekil 4.26. 1050 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 çeliğinin difüzyon katsayı eğrisi.



Şekil 4.27. Borlanmış AISI 1030 çeliğinin Arrhenius eğrisi.

Şekil 4.23-26'nin eğimleri difüzyon katsayılarını verir:

$$K_{900}=1,3112 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$$

$$K_{950}=1,9194 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$$

$$K_{1000}=3,0983 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$$

$$K_{1050}=5,3852 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$$

Şekil 4.27'deki Arrhenius eğrisi kullanılarak aktivasyon enerjisi:

$$E_{gim} = -\frac{Q}{2.303R}$$

$$-6333,5 = -\frac{Q}{2.303R}$$

$Q=121268 \text{ Jmol}^{-1}$ bulunur.

Elde edilen bu kinetik verilerden faydalanılarak, pratik açıdan verilen bir sıcaklık ve süre için tabaka kalınlıkları önceden belirlenebilmektedir.

4.6. Aşınma Deneyleri

Abrazif aşınma deneyleri, Şekil 4.28’de şematik şekli gösterilen Plint TE53 marka aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı karşıt cisim olarak Alüminyum Oksitli (Al_2O_3) ve Silisyum Karbürlü (SiC) 400 gritlik 3M marka zımpara kâğıtları kullanılmıştır. Cihazın aşındırıcı metal diski, çift taraflı Ve-ge marka yapışkan bant kullanılarak zımpara kâğıtları ile kaplanmış ve her numune için yeni bir zımpara kâğıdı kullanılmıştır. Üzeri zımpara kâğıdı kaplı aşındırıcı diskin çapı 60 mm dir. Aşındırma işleminden sonra numunelerin ağırlıklarında olan değişimlerin ölçümü Sartorius CP3245 markalı 10^{-4} gr hassasiyetli terazi ile yapılmıştır (Şekil 4.1.e). Aşınma deneylerinde aşındırıcı zımpara kâğıdı kaplı disk ile numune yüzeyi arasındaki temas, 42 N sabit yük ile sağlanmıştır. Tüm aşınma deneylerinde diskin dönme hızı 150 devir/dakika seçilmiş ve aşınmayla oluşan ağırlık kayıpları 500, 1000, 1500, 2000, 2500 ve 3000 tur sonunda ölçülmüştür. Aşınma deneyleri aynı numunelerin farklı yüzeyler üzerinde 3 er kez tekrarlanmış ve aritmetik ortalamaları alınarak değerlendirilmiştir. Ağırlık kayıpları, 3000 tur sonundaki ağırlığın ilk ağırlıktan çıkarılması sureti ile tanımlanmıştır. Tablo 4.3’ de Al_2O_3 aşındırıcı karşısında; değişik sıcaklık ve sürelerde borlanmış numunelerin, her 500 tur sonundaki ağırlıkları verilmiştir. Tablo 4.4’de SiC aşındırıcı karşısında; değişik sıcaklık ve sürelerde borlanmış numunelerin, her 500 tur sonundaki ağırlıkları verilmiştir. Tablo 4.5’de bütün numunelerin her 500 tur sonunda ortalama ağırlık kayıpları verilmiştir. Şekil 4.29’de işlemsiz numunelerin Al_2O_3 ve SiC aşındırıcı karşısında her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı verilmiştir. Bütün numunelerin Al_2O_3 ve SiC aşındırıcı karşısındaki aşınma miktarları Şekil 30 ve 31’de verilmiştir. Borlanmış numunelerin Al_2O_3 ve SiC aşındırıcı karşısındaki aşınma miktarları Şekil 32 ve 33’de verilmiştir. Şekil 4.34-37’de Al_2O_3 aşındırıcıda değişik sıcaklık ve sürelerde borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı verilmiştir. Şekil 4.38-41’de SiC aşındırıcıda değişik sıcaklık ve sürelerde borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı verilmiştir.

Tablo 4.3. Al₂O₃ aşındırıcı karşısında; değişik sıcaklık ve sürelerde borlanmış numunelerin, her 500 tur sonundaki ağırlıkları.

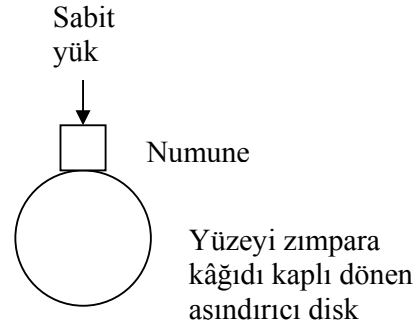
	Tur	İşlemsiz	900 °C			950 °C			1000 °C			1050 °C		
			2 saat	4 saat	6 saat	2 saat	2 saat	4 saat	6 saat	2 saat	2 saat	4 saat	6 saat	2 saat
Birinci ölçümler	0	15,9833	16,1504	15,9571	16,0007	15,9264	16,6214	16,1932	15,9049	16,2995	15,8717	15,9195	15,9009	16,3471
	500	15,9583	16,1489	15,9551	15,9983	15,9229	16,6192	16,1915	15,9013	16,2960	15,8670	15,9151	15,8964	16,3427
	1000	15,9495	16,1485	15,9539	15,9975	15,9222	16,6187	16,1911	15,9003	16,2954	15,8656	15,9141	15,8952	16,3416
	1500	15,9414	16,1475	15,9533	15,9967	15,9216	16,6181	16,1907	15,8997	16,2947	15,8649	15,9135	15,8946	16,3411
	2000	15,9340	16,1469	15,9529	15,9962	15,9211	16,6176	16,1902	15,8994	16,2943	15,8642	15,9129	15,8939	16,3403
	2500	15,9280	16,1465	15,9524	15,9958	15,9205	16,6171	16,1900	15,8988	16,2940	15,8619	15,9125	15,8934	16,3398
	3000	15,9211	16,1463	15,9517	15,9951	15,9201	16,6167	16,1893	15,8985	16,2930	15,8612	15,9117	15,8928	16,3391
İkinci ölçümler	0	15,8923	16,1353	16,9447	15,9878	15,9098	16,6090	16,1831	15,8917	16,2816	15,8617	15,8986	15,8816	16,3186
	500	15,8608	16,1337	16,9432	15,9865	15,9090	16,6068	16,1817	15,8901	16,2805	15,8581	15,8947	15,8766	16,3148
	1000	15,8415	16,1332	16,9427	15,9862	15,9085	16,6063	16,1813	15,8897	16,2786	15,8571	15,8939	15,8744	16,3138
	1500	15,8241	16,1328	16,9423	15,9859	15,9083	16,6059	16,1809	15,8893	16,2778	15,8565	15,8932	15,8739	16,3132
	2000	15,8111	16,1324	16,9418	15,9857	15,9077	16,6053	16,1802	15,8891	16,2774	15,8559	15,8926	15,8734	16,3125
	2500	15,8008	16,1319	16,9413	15,9854	15,9073	16,6048	16,1799	15,8888	16,2768	15,8554	15,8918	15,8724	16,3120
	3000	15,8000	16,1315	16,9409	15,9852	15,9067	16,6042	16,1795	15,8885	16,2762	15,8546	15,8912	15,8721	16,3113
Üçüncü ölçümler	0	15,8884	15,7473	15,9744	15,9034	16,4443	16,7229	16,2668	16,2098	16,0537	16,2540	15,9566	17,1234	15,5535
	500	15,8527	15,7459	15,9732	15,9019	16,4431	16,7211	16,2652	16,2083	16,0497	16,2509	15,9527	17,1155	15,5497
	1000	15,8358	15,7455	15,9728	15,9017	16,4426	16,7208	16,2651	16,2077	16,0490	16,2503	15,9518	17,1143	15,5489
	1500	15,8233	15,7452	15,9725	15,9013	16,4421	16,7203	16,2648	16,2074	16,0482	16,2497	15,9513	17,1132	15,5483
	2000	15,8116	15,7449	15,9721	15,9012	16,4418	16,7200	16,2647	16,2071	16,0476	16,2462	15,9506	17,1125	15,5476
	2500	15,8023	15,7445	15,9720	15,9007	16,4413	16,7195	16,2644	16,2067	16,0470	16,2486	15,9501	17,1119	15,5468
	3000	15,7926	15,7441	15,9714	15,9003	16,4409	16,7190	16,2642	16,2061	16,0464	16,2480	15,9494	17,1111	15,5462

Tablo 4.4. SiC aşındırıcı karşısında; değişik sıcaklık ve sürelerde borlanmış numunelerin, her 500 tur sonundaki ağırlıkları.

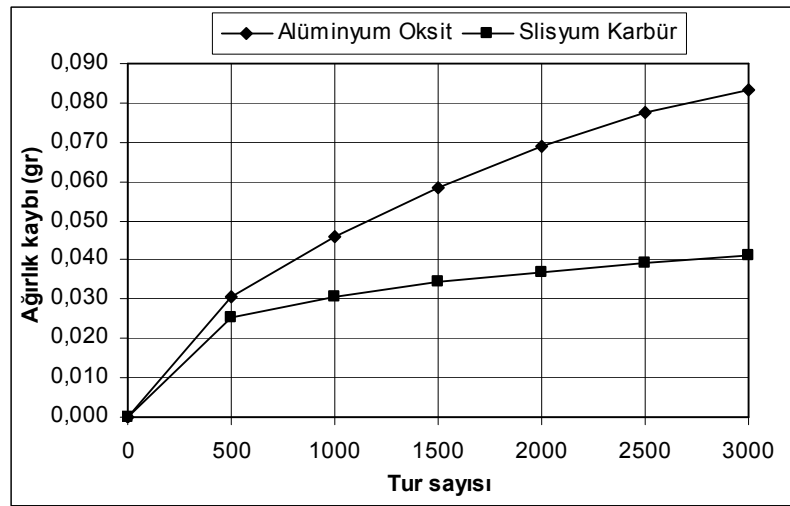
	Tur	İşlemsiz	900 °C			950 °C			1000 °C			1050 °C		
			2 saat	4 saat	6 saat	2 saat	2 saat	4 saat	6 saat	2 saat	2 saat	4 saat	6 saat	2 saat
Birinci ölçümler	0	15,9704	16,1461	15,9521	15,9960	15,9205	16,6171	16,1900	15,8986	16,2927	15,8553	15,9124	15,8928	16,3320
	500	15,9456	16,1416	15,9474	15,9907	15,9152	16,6125	16,1849	15,8942	16,2878	15,8485	15,9044	15,8859	16,3244
	1000	15,9425	16,1399	15,9464	15,9897	15,9134	16,6108	16,1841	15,8927	16,2862	15,8471	15,9023	15,8842	16,3222
	1500	15,9390	16,1370	15,9460	15,9892	15,9123	16,6102	16,1838	15,8920	16,2848	15,8462	15,9009	15,8836	16,3207
	2000	15,9356	16,1362	15,9454	15,9886	15,9114	16,6097	16,1833	15,8915	16,2841	15,8454	15,8997	15,8826	16,3195
	2500	15,9326	16,1356	15,9450	15,9881	15,9109	16,6093	16,1830	15,8914	16,2837	15,8449	15,8988	15,8818	16,3189
	3000	15,9308	16,1351	15,9443	15,9877	15,9103	16,6090	16,1828	15,8913	16,2831	15,8443	15,8983	15,8815	16,3185
İkinci ölçümler	0	15,9300	15,7644	15,9888	15,9178	16,4615	16,7395	16,2825	16,2299	16,8985	16,2768	15,9825	17,1504	15,5797
	500	15,9053	15,7595	15,9840	15,9134	16,4560	16,7345	16,2779	16,2232	16,8927	16,2798	15,9766	17,1416	15,5717
	1000	15,8988	15,7578	15,9832	15,9123	16,4545	16,7332	16,2767	16,2206	16,8909	16,2775	15,9727	17,1390	15,5669
	1500	15,8953	15,7565	15,9828	15,9118	16,4535	16,7322	16,2759	16,2195	16,8894	16,2658	15,9704	17,1383	15,5655
	2000	15,8933	15,7558	15,9822	15,9114	16,4531	16,7320	16,2755	16,2189	16,8885	16,2654	15,9694	17,1377	15,5647
	2500	15,8913	15,7550	15,9818	15,9109	16,4525	16,7315	16,2751	16,2189	16,8880	16,2651	15,9684	17,1374	15,5644
	3000	15,8884	15,7546	15,9815	15,9106	16,4519	16,7311	16,2748	16,2181	16,8874	16,2648	15,9679	17,1370	15,5641
Üçüncü ölçümler	0	15,7924	15,7549	15,9818	15,9106	16,4522	16,7314	16,2750	16,2182	16,2765	16,2649	15,9680	17,1370	15,5643
	500	15,7665	15,7508	15,9774	15,9061	16,4476	16,7262	16,2700	16,2130	16,2705	16,2592	15,9616	17,1281	15,5573
	1000	15,7597	15,7594	15,9761	15,9050	16,4464	16,7251	16,2689	16,2116	16,2683	16,2572	15,9593	17,1260	15,5559
	1500	15,7557	15,7484	15,9756	15,9042	16,4457	16,7243	16,2681	16,2111	16,2667	16,2560	15,9582	17,1250	15,5553
	2000	15,7537	15,7479	15,9751	15,9038	16,4451	16,7236	16,2674	16,2106	16,2661	16,2552	15,9576	17,1243	15,5548
	2500	15,7517	15,7474	15,9744	15,9034	16,4444	16,7232	16,2671	16,2100	16,2654	16,2545	15,9569	17,1238	15,5541
	3000	15,7501	15,7467	15,9741	15,9031	16,4441	16,7227	16,2666	16,2095	16,2649	16,2541	15,9565	17,1231	15,5533

Tablo 4.5. Bütün numunelerin her 500 tur sonunda ortalama ağırlık kayıpları (gr).

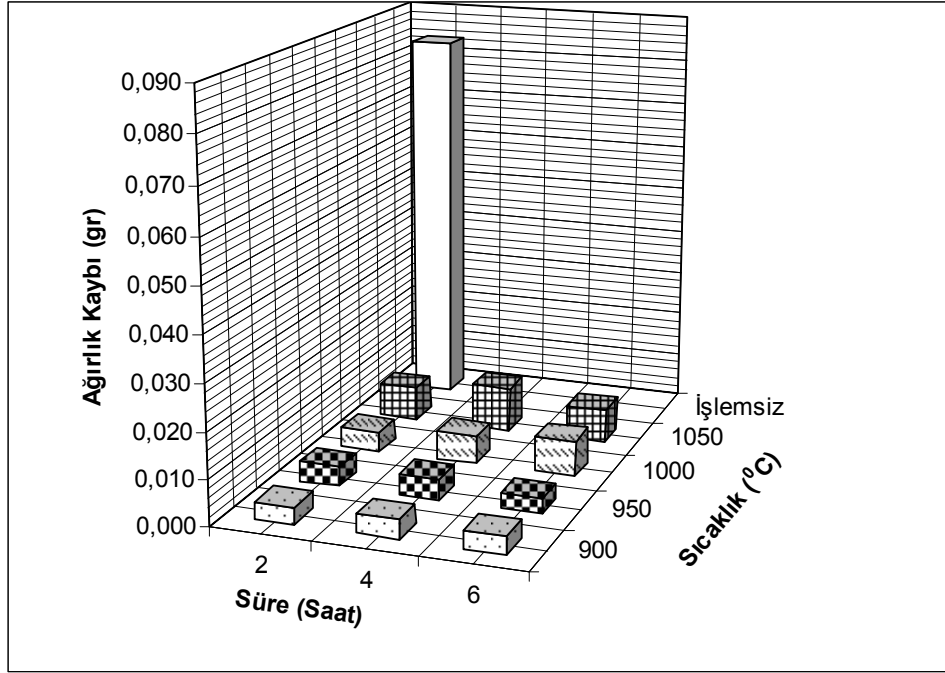
	Tur	İşlemsiz	900 °C			950 °C			1000 °C			1050 °C		
			2 saat	4 saat	6 saat	2 saat	2 saat	4 saat	6 saat	2 saat	2 saat	4 saat	6 saat	2 saat
Al ₂ O ₃	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	500	0,0307	0,0015	0,0016	0,0017	0,0018	0,0021	0,0016	0,0022	0,0029	0,0038	0,0041	0,0058	0,0040
	1000	0,0457	0,0019	0,0023	0,0022	0,0024	0,0025	0,0019	0,0029	0,0039	0,0048	0,0050	0,0073	0,0050
	1500	0,0584	0,0025	0,0027	0,0027	0,0028	0,0030	0,0022	0,0033	0,0047	0,0054	0,0056	0,0081	0,0055
	2000	0,0691	0,0029	0,0031	0,0029	0,0033	0,0035	0,0027	0,0036	0,0052	0,0070	0,0062	0,0087	0,0063
	2500	0,0776	0,0034	0,0035	0,0033	0,0038	0,0040	0,0029	0,0040	0,0057	0,0072	0,0068	0,0094	0,0069
	3000	0,0834	0,0037	0,0041	0,0038	0,0043	0,0045	0,0034	0,0044	0,0064	0,0079	0,0075	0,0100	0,0075
SiC	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	500	0,0251	0,0045	0,0046	0,0047	0,0051	0,0049	0,0049	0,0054	0,0056	0,0032	0,0068	0,0082	0,0075
	1000	0,0306	0,0061	0,0057	0,0058	0,0066	0,0063	0,0059	0,0073	0,0074	0,0051	0,0095	0,0103	0,0103
	1500	0,0343	0,0078	0,0061	0,0064	0,0076	0,0071	0,0066	0,0080	0,0089	0,0097	0,0111	0,0111	0,0115
	2000	0,0367	0,0085	0,0067	0,0069	0,0082	0,0076	0,0071	0,0086	0,0097	0,0103	0,0121	0,0119	0,0123
	2500	0,0391	0,0091	0,0072	0,0073	0,0088	0,0080	0,0074	0,0088	0,0102	0,0108	0,0129	0,0124	0,0129
	3000	0,0412	0,0097	0,0076	0,0077	0,0093	0,0084	0,0078	0,0093	0,0108	0,0113	0,0134	0,0129	0,0134



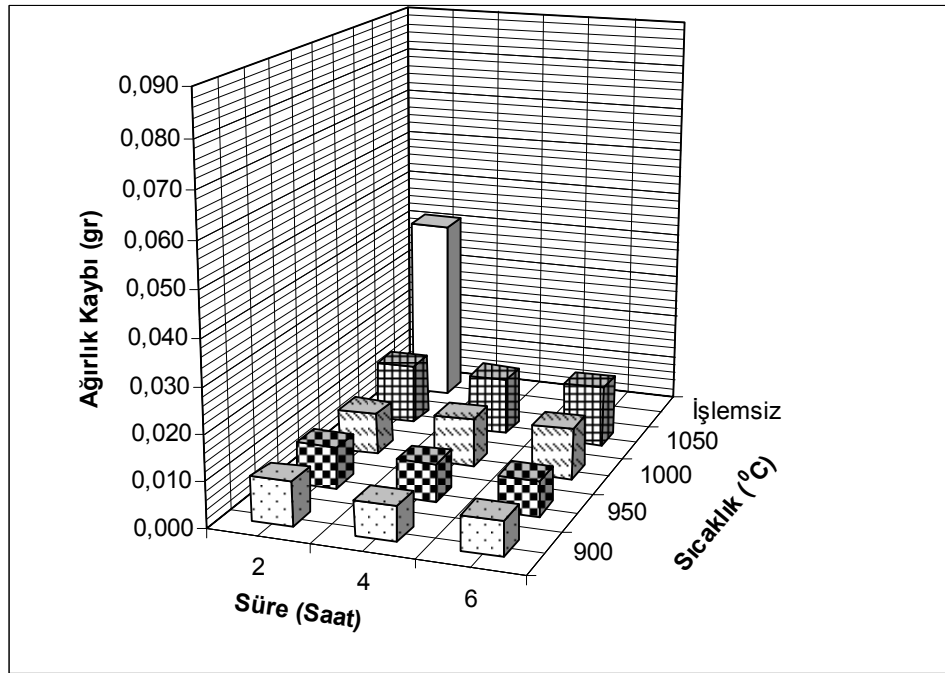
Şekil 4.28. Aşınma test düzeneğinin şematik görünümü.



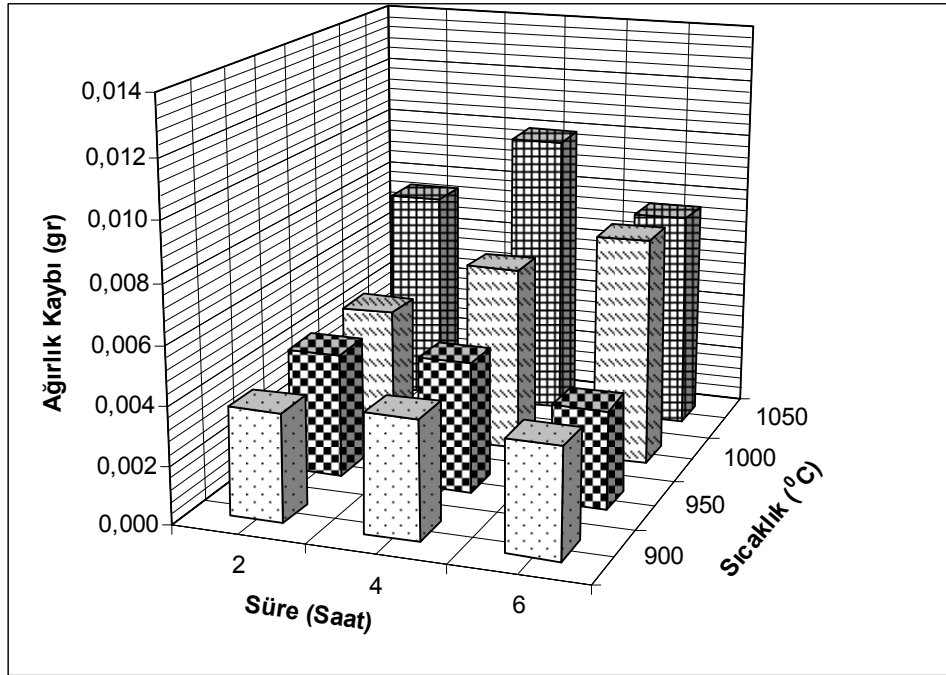
Şekil 4.29. İşlemsiz numunelerin Al_2O_3 ve SiC aşındırıcı karşısında her 500 tur sonundaki ortalama ağırlık kaybı.



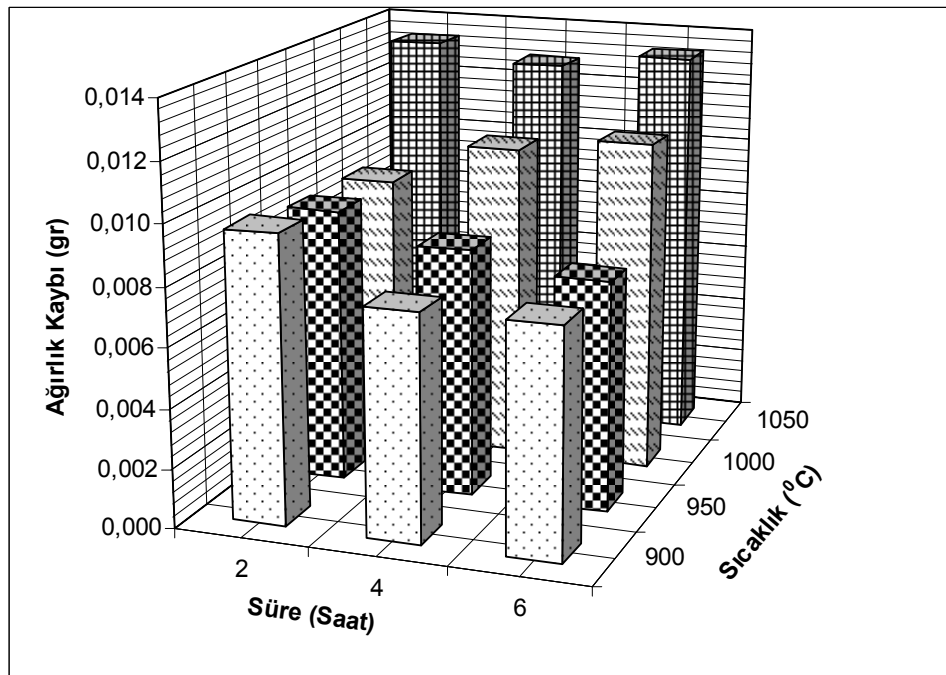
Şekil 4.30. Bütün numunelerin Al₂O₃ aşındırıcı karşısındaki aşınma miktarları.



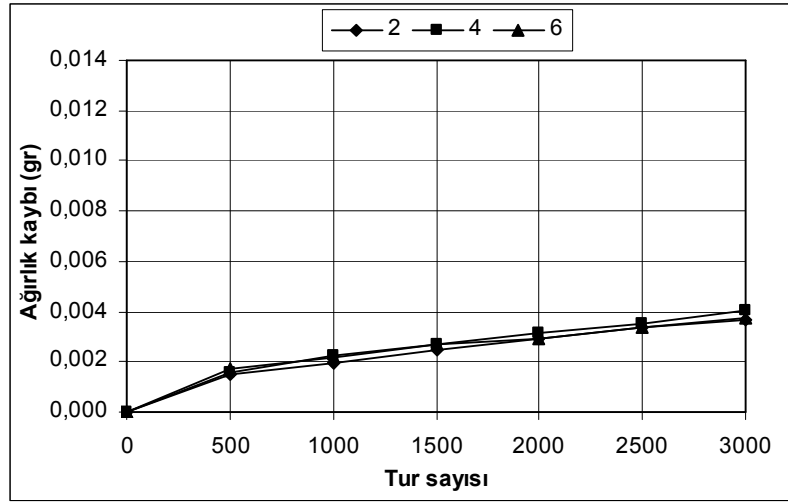
Şekil 4.31. Bütün numunelerin SiC aşındırıcı karşısındaki aşınma miktarları.



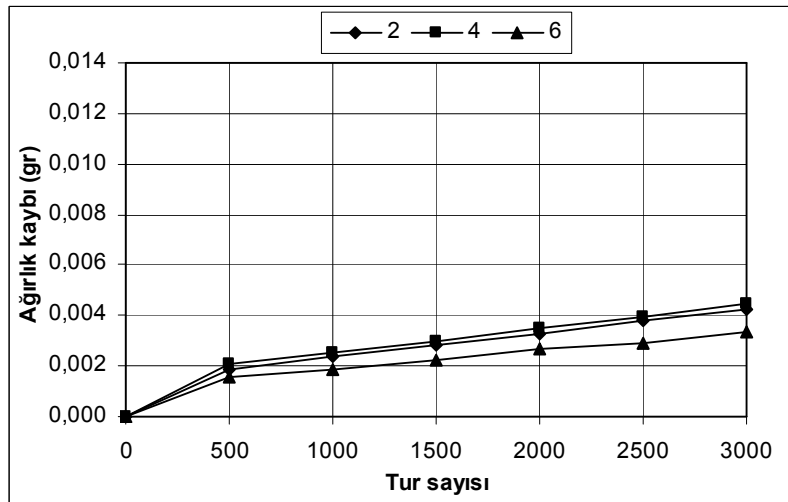
Şekil 4.32. Borlanmış numunelerin Al_2O_3 aşındırıcı karşısındaki aşınma miktarları.



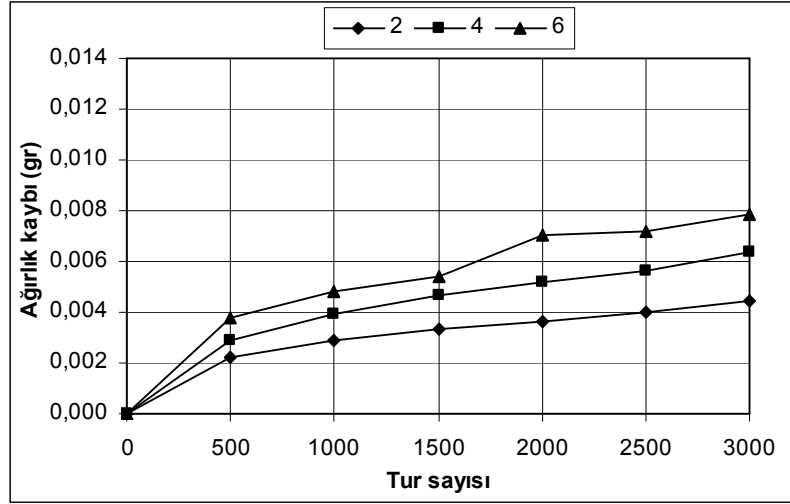
Şekil 4.33. Borlanmış numunelerin SiC aşındırıcı karşısındaki aşınma miktarları.



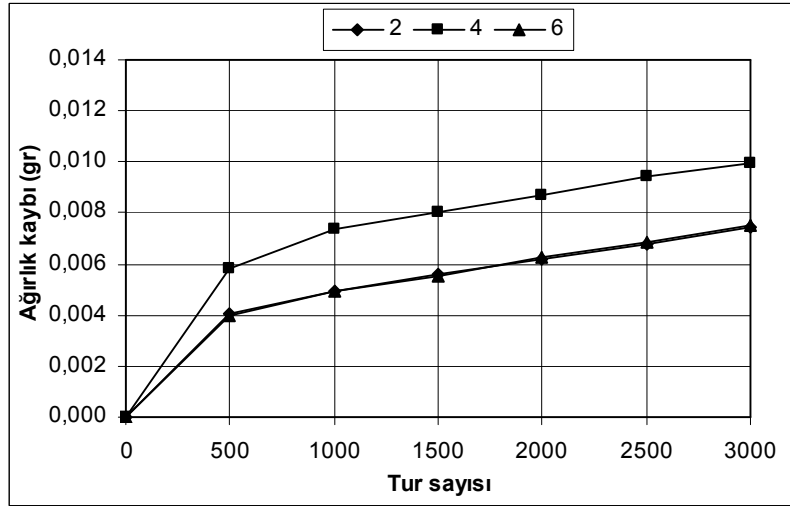
Şekil 4.34. Al_2O_3 aşındırıcıda $900\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 2,4 ve 6 saat borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı.



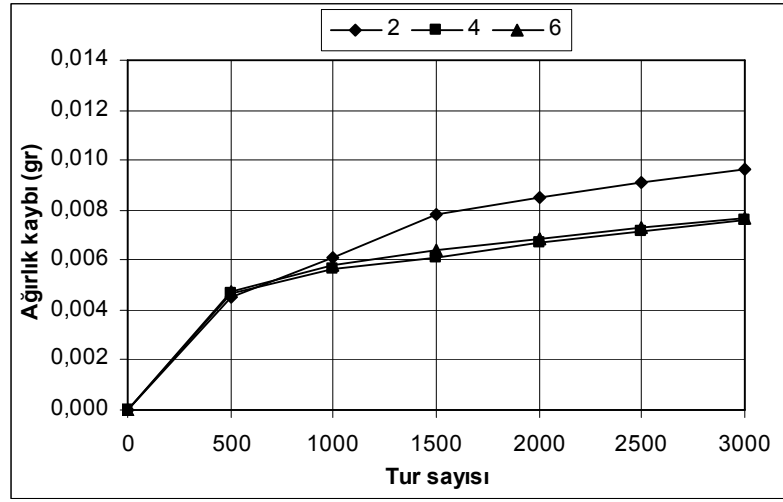
Şekil 4.35. Al_2O_3 aşındırıcıda $950\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 2,4 ve 6 saat borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı.



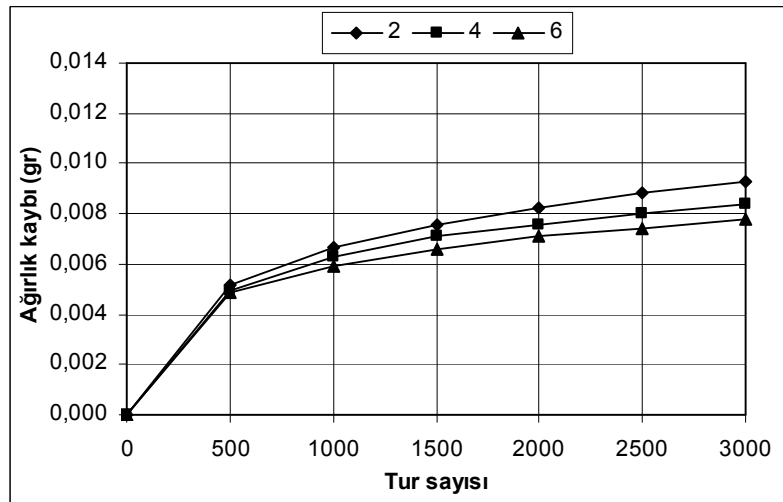
Şekil 4.36. Al_2O_3 aşındırıcıda $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 2,4 ve 6 saat borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı.



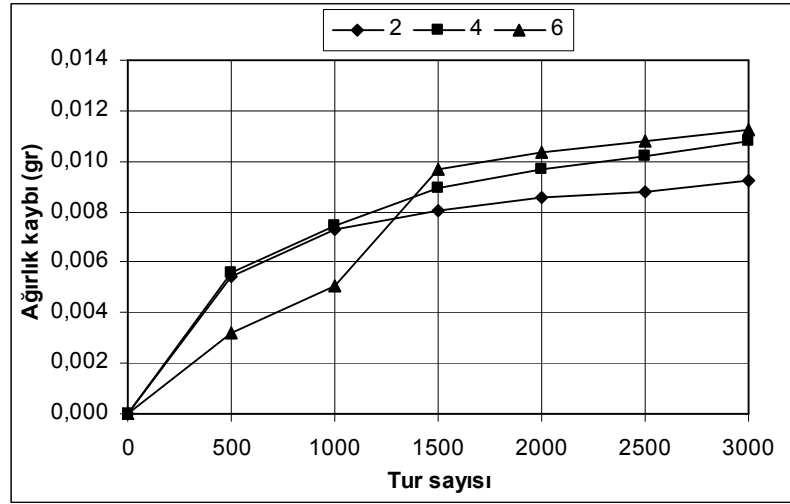
Şekil 4.37. Al_2O_3 aşındırıcıda $1050\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 2,4 ve 6 saat borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı.



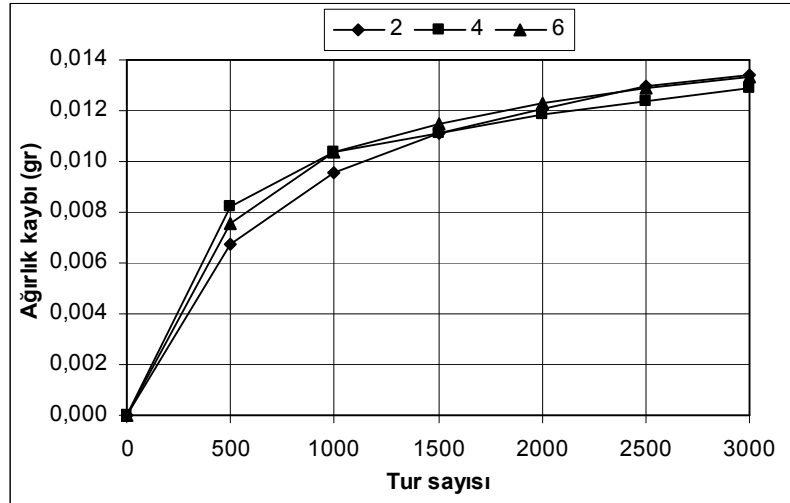
Şekil 4.38. SiC aşındırıcıda 900 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı.



Şekil 4.39. SiC aşındırıcıda 950 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı.



Şekil 4.40. SiC aşındırıcıda 1000 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı.



Şekil 4.41. SiC aşındırıcıda 1050 ° C’de 2,4 ve 6 saat borlanmış numunelerin her 500 tur sonundaki ağırlık kaybı.

BÖLÜM 5. SONUÇLARIN İRDELENMESİ

Bu çalışmada, AISI 1030 çeliği 900, 950, 1000 ve 1050 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat sürelerle borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işlemi, termokimyasal borlama tekniklerinden kutu borlama tekniği ile EKabor®2 ticari borlama toz karışımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemi sonrasında, borlama süresi ve sıcaklığının söz konusu malzemenin bazı özellikleri üzerine olan etkileri incelenmiştir. İşlem şartlarına bağlı olarak, mikroyapının ve çeliğin yüzeyinde oluşan borür tabakasının özelliklerinin ve faz dağılımlarının değiştiği görülmüştür. Borlama sonrasında elde edilen yüzey özelliklerinin belirlenmesi, işlemin teknolojik açıdan önemini ortaya koymak açısından büyük önem taşımaktadır.

1. Metalografik incelemeler sonucunda, malzeme yüzeyindeki kaplama tabakalarında birbirinden farklı üç bölge gözlenmiştir. Demir borür bileşimine sahip seramik esaslı borür tabakası, hemen altında yer alan karbon ve silisyum esaslı kaplama/matris arayüzeyi (geçiş bölgesi) ve matris açık bir şekilde ortaya çıkmıştır.

2. Borlamadan sonra, kaplama/matris arayüzey morfolojisinin kolonsal bir yapı sergilediği; borür tabakası, kaplama/matris arayüzeyi ve matrisin belirgin bir şekilde birbirinden ayrıldığı açıkça görülmüştür.

3. Genel olarak çelikler üzerine yapılan borlama işlemi sonucunda işlem şartlarına bağlı olarak hem tek fazlı (Fe_2B), hem de çift fazlı (FeB ve Fe_2B) borür tabakalarının meydana geldiği ve bu fazların metalografik olarak birbirinden ayrıldığı önceki çalışmalarda ifade edilmektedir. Sunulan çalışmada da düşük borlama sürelerinde borlanan numunelerde tek fazlı (Fe_2B) yapı elde edilirken, daha uzun süreli borlama işlemlerinde yüzeyde FeB fazı ve hemen altında Fe_2B fazının yer aldığı çift fazlı yapı tespit edilmiştir. Bu sonuç, literatürde yer alan tespitlerle de uyum içerisindedir.

4. Oluşan borür fazlarının (hem FeB , hem de Fe_2B) dişli bir yapı sergilediği görülmektedir. Borür tabakasının matrise yapışmasında kohezif kuvvetler etkin olduğundan, kolonların meydana getirdiği girinti ve çıkıntıların atması, yapışma mukavemetini artırır.

5. Silisyum ve karbonun kaplama tabakası içersinde çözünürlüğü oldukça sınırlı olduğundan itilerek kaplama/matris arayüzeyinde (geçiş bölgesinde) birikmiştir. Borlama işlemi sırasında malzemenin bileşiminde bulunan elementler yeniden dağılmakta ve bu arada FeB ve Fe₂B tabakalarının bu elementleri çözündürmemesinden dolayı bor difüzyonu sırasında borür tabakasından içeriye doğru itilmekte ve geçiş bölgesini oluşturmaktadır.

6. Yapılan borlama işlemlerinde borür tabaka kalınlıkları numunenin her tarafında homojen olarak gerçekleşmesine rağmen, yer yer farklı boylarda borür kolonlarına rastlanmaktadır.

7. En yüksek sertlik değeri, borür fazlarının yer aldığı kaplama tabakalarında ölçülmüştür. Dolayısıyla borun demirle oluşturduğu bileşikler ve seramik kompozitler (FeB, Fe₂B) en sert kısımları meydana getirmektedir.

8. Ölçülen sertlik değerlerine bakıldığında seramik karaktere sahip borür fazlarından oluşan kaplama tabakasında en yüksek değere ulaştığı, daha sonra geçiş zonunda bir düşüşe geçerek matris sertliğine düştüğü görülmektedir.

9. Yapılan incelemelerde, borür tabakasının sertliğinin FeB ve Fe₂B faz dağılımından etkilendiği görülmektedir.

10. Borlama süre ve sıcaklığının artması neticesinde, elde edilen borür tabakasının kalitesinde de azalmalar meydana gelmektedir. Kaplamanın bazı bölgelerinde borür tabakası yüzeyine paralel doğrultuda, FeB ve Fe₂B fazları arayüzeyi boyunca çatlakların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu çatlakların sebebi borür tabakasındaki kalıntı gerilmeleri ve termal genleşme katsayıları arasındaki farktır. FeB fazında çekme, Fe₂B fazında ise basma gerilmesi şeklinde ortaya çıkan bu kalıntı gerilmeler neticesinde, borür tabakasında yüzeye paralel çatlaklar meydana gelmekte ve kaplama özelliklerini bozmaktadır. Mevcut çalışmada bu görülmüş ve literatürde verilen bulgular kanıtlanmıştır.

11. Borlama sıcaklığı ve süresi arttıkça, özellikle borür tabakası yüzeyinden matrise doğru porozite miktarı ve boyutlarının arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin

ne olduğu kesin olarak belirlenememiştir. Sertlik ölçümü yapılır kene, tabaka yüzeyinde daha büyük ve sık oluşmuş poroziteye sahip tabakaların sertlik değerlerinde düşüş meydana geldiği görülmektedir.

12. Borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak borür tabakasının kalınlığı değişmektedir. Daha yüksek sıcaklık ve daha uzun borlama sürelerinde yüksek tabaka kalınlıklarına ulaşılmaktadır. Sementasyon, karbürizasyon, nitrasyon ve borlama işlemleri, difüzyon kontrollü işlem olduklarından işlem sıcaklığı ve süresinin artmasıyla tabaka kalınlığının artması beklenen bir sonuçtur.

13. Sertlik değerlerindeki artış borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak değişmektedir. Kısa süre ve düşük sıcaklıklarda elde edilen değerler daha az iken, sıcaklık ve süre arttıkça sertlik artmıştır.

14. Yüzeyden aynı uzaklıkta yapılan farklı sertlik ölçümlerinde, elde edilen değerlerin farklı olması; borürlerin farklı elastik-plastik davranış göstermesine, oryantasyon farklılıklarına, tabakadaki porozite ve çatlak yoğunluğu ve dağılımına, ölçümler sırasında Vickers sertlik ucunun hangi faz üzerine vurulduğuna bağlı olduğu ileri sürülebilir.

15. Yüzeyden itibaren ölçülen sertlik dağılımları, kolonların boylarına göre değişmektedir. Ölçüm yapılan yerdeki kolon boyu her zaman gerçek tabaka kalınlığını temsil etmemekle birlikte, ortalama bir değer vermektedir.

16. İşlem sıcaklığına ve borlama süresine bağlı olarak, kaplama tabakasının kalınlığı 80,6 µm ile 340,9 µm arasında değişmektedir.

17. Çeliğin kaplama yüzeyinde oluşan en yüksek sertlik 1625 HV ile 1050 °C ve 6 saat borlama süresinde elde edildi.

18. Elde edilen kinetik verilerden faydalanılarak, pratik açıdan verilen bir sıcaklık ve süre için tabaka kalınlıkları önceden belirlenebilmektedir.

19. Yapılan kinetik çalışmalar sonucunda aktivasyon enerjisi (Q) 121268 Jmol^{-1} bulunmuştur.

20. Yapılan kinetik çalışmalar sonucunda difüzyon katsayısı (K) $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ de $1,3112 \times 10^{-8} \text{ cm}^2\text{sn}^{-1}$, $950 \text{ }^{\circ}\text{C}$ de $1,9194 \times 10^{-8} \text{ cm}^2\text{sn}^{-1}$, $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ de $3,0983 \times 10^{-8} \text{ cm}^2\text{sn}^{-1}$, $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ de $5,3852 \times 10^{-8} \text{ cm}^2\text{sn}^{-1}$ elde edilmiştir.

21. Yapılan aşınma deneyleri sonunda borlama işleminin abrazif aşınma dayanımının beklenildiği gibi oldukça artırdığı gözlenmiştir.

22. Borlanmış AISI 1030 çeliğinin Alüminyum Oksitli zımpara kâğıtları ile yapılan abrazif aşınma deney sonuçları incelendiğinde en az aşınmanın $950 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 6 saat, en çok aşınmanın da $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 4 saat işlem uygulanmış numunelerde olduğu tespit edilmiştir.

23. Borlanmış AISI 1030 çeliğinin Silisyum Karbürlü zımpara kâğıtları ile yapılan abrazif aşınma deney sonuçları incelendiğinde en az aşınmanın $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 4 saat, en çok aşınmanın da $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 2 saat işlem uygulanmış numunelerde olduğu tespit edilmiştir.

24. En az aşınmaların bulunduğu $950 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 6 saat borlanmış örnekler, Alüminyum Oksitli aşındırıcı karşısında işlemsiz örneklere göre 24,5 kat az aşınmıştır.

25. En az aşınmaların bulunduğu $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 4 saat borlanmış örnekler, Silisyum Karbürlü aşındırıcı karşısında işlemsiz örneklere göre 5,4 kat az aşınmıştır.

26. Laboratuarda yapılan aşınma deneylerinde, Alüminyum Oksitli aşındırıcıların Silisyum Karbürlü aşındırıcılara göre borlanmış çelikleri daha az aşındırdığı tespit edilmiştir.

27. Alüminyum Oksitli zımpara kâğıdının işlemsiz çelikleri Silisyum Karbürlü zımpara kâğıdına göre daha çok aşındırdığı tespit edilmiştir.

28. Malzemelerin aşınma dayanımları sertikleri ile doğrudan ilintilidir. Ancak; yapılan borlama deneyleri sonucu elde edilen borür tabaka sertliklerinin aşınma üzerindeki etkileri Al_2O_3 aşındırıcı için net bir şekilde görülememiştir. SiC aşındırıcıda ise daha yüksek sertlikte olmasına rağmen $1000^{\circ}C$ ve $1050^{\circ}C$ 'de 4 ve 6 saat sürelerle yapılan deneylerin 2 saat süreyle yapılanaya göre daha çok aşındığı görülmüştür. Bu durum bu sıcaklık ve sürelerde elde edilen FeB ve Fe_2B fazları arayüzeyinde oluşan çatlakların bir sonucu olarak değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, AISI 1030 malzeme başarıyla termokimyasal olarak borlanabilmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Anthymidis, K.G., Stergioudis, G. and Tsipas, D.N., 2002, Boride coatings on non-ferrous materials in a fluidized bed reactor and their properties, *Advanced Materials*.
- Anthymidis, K.G., Zinoviadis, P., Roussos, D. and Tsipas, D.N., 2002, Boriding of nickel in a fluidized bed reactor, *Materials Research Bulletin*.
- Atık, E., Yunker, U. and Meric, C., 2003, The affects of conventional heat treatment and boronizing on abrasive wear and corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 steels, *Tribology*.
- Axen, N. and Zum Gahr, K.H., 1992, Abrasive wear of TiC-Steel Composite Clad Layers on Tool Steel, *Wear*, 157, 189-201.
- Bayça, S.U. ve Şahin, S., 2004, *Borlama, Mühendis ve Makine*, 532, 51-59.
- Bayhan, Y., 1996, Trakya bölgesinde imal edilen bazı toprak işleme aletlerinin uç demirlerindeki aşınma ve aşınmaya etkili bazı etkenlerin saptanması üzerinde bir araştırma, *Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ*, 84 s.
- Bhushan, B. and Gupta, B.K., 1991, *Handbook of Tribology*. McGRAW-HILL, INC., USA.
- Bor, 2003, KESK, TMMOB Jeoloji, Kimya, Metalürji Mühendisleri Odası.
- Boron fuel, www.millenniumcell.com.
- Bourithis, L., Papaefthymiou, S. and Papadimitriou, G.D., 2002, Plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: microstructure and wear properties, *Applied Surface Science*.
- Bozkurt, N., 1984, Bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme, *Doktora Tezi, İTÜ*.
- Brakman, C.M., Gommers, A.W.J. and Mittemeijer, E.J., 1989, Boriding of iron and Fe-C, Fe-Cr, Fe-Ni alloys: Boride layers growth kinetics, *J. Mater. Res.*, Vol. 4, No. 6, pp. 1354-70.
- Cabeo, E.R., Laudien, G., Biemer, S., Rie, K.T. and Hoppe, S., 1999, Plasma-assisted boriding of industrial components in a pulsed D.C. glow discharge, *Surface and Coatings Technology*.
- Chatterjee-Fisher, R., 1986, *Boriding and diffusion metallizing*, Institut für Harterei Technik, Bremen, Germany.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Er, Ü., 2003, Bor yayınımla yüzeyi sertleştirilmiş çeliklerin aşınmaya karşı dayanımlarının ve pulluk uç demirlerinde uygulama olanaklarının araştırılması, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 124 s.
- Eyre, T.S., 1975, Effect of boronising on friction and wear of ferrous metals, *Wear*, 34, 383-397.
- Fichtl, W., 1981, Boronizing and its practical applications, *Materials in Engineering*, Vol.2.
- Fichtl, W., Trausner, N. and Matuschka, A.G., 1988, Boronizing with Ekabor, ESK GmbH.
- Fisher, R.C., 1986, Time to take a look at multi component boriding, *Metal Progress*.
- Ge, C.L. and Ye, R.C., 2002, Research on self-propagating eutectic boriding, *Journal of Materials Processing Technology*.
- Genel, K., Ozbek, I. and Bindal, C., 2003, Kinetics of boriding of AISI W1 steel, *Materials Science Engineering*.
- Gupta, D. and Ho, P.S., 1980, Diffusion processing thin solid film.
- Hayaslı, Y. and Sugeno, T., 1970, Nature of boron in α -iron, *Acta. Met.*, Vol.18, 693-697.
- Holmberg, K. and Matthews, A., 1994, *Coatings Tribology*, Elsevier Science B.V.
- Hunger, H.J. and Löbig, G., 1997, Generation of boride layers on steel and nickel alloys by plasma activation of boron trifluoride, *Thin Solid Films*.
- Hurricks, P.L., 1972, Reviews Paper: Some aspects of the metallurgy and wear resistance of surface coatings, *Wear*, 22, 291-320.
- Hurricks, P.L., 1973, Some metallurgical factors controlling the adhesive and abrasive wear resistance of steels. A Review, *Wear*, 26, 285-304.
- Hutchings, I.M., 1992, Surface engineering in tribology, chapter 8, In: *Tribology: Friction and wear of engineering materials*, Edward Arnold Pub., London, 273 p.
- Jain, V. and Sundararajan, G., 2002, Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel, *Surface and Coatings Technology*.
- James, D.H., Smart, R.F. and Reynolds, J.A., 1975, Surface treatments in engine component technology, *Wear*.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Kaestner, P., Olfe, J. and Rie, K.T., 2001, Plasma-assisted boriding of pure titanium and TiAl6V4, Surface and Coatings Technology.
- Karakan, M., A. Alsan ve A. Çelik, 2002, Plazma borlama, Mühendis ve Makine, 43, 512, 51-54.
- Karamış, M.B., 1985, Toprak işleme aletlerinde iş organının aşınmasının etüdü, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri, 120 s.
- Karamış, M.B., Nair, F. ve Selçuk, B., 1995, Borlanmış malzemelerin tribolojik özellikleri, 6.Denizli Malzeme Sempozyumu.
- Keddam, M., 2004, A kinetic model for the borided layers by the paste-boriding process, Applied Surface Science.
- Khruschov, M.M., 1974, Principles of abrasive wear, Wear, 28, 69-88.
- Kubaschewski, O., 1982, Iron binary phase diagrams, Springer, Verlag, 15.
- Kulka, M. and Pertek, A., 2003, Characterization of complex (B+C+N) diffusion layers formed on chromium and nickel-based low-carbon steel, Applied Surface Science.
- Küper, A., Qiao, X. and Stock, H.R., 2000, A novel approach to gas boronizing, Surface and Coatings Technology.
- Liao, P.K. and Spear, K.E., 1974, Binary diagrams of binary iron alloy, B-Fe (Boron-Iron), pp. 41-47.
- Mann, B.S., 1997, Boronizing of cast martensitic chromium nickel stainless steel and its abrasion and cavitation-erosion behaviour, Wear.
- Mann, B.S., 1999, Solid-particle erosion and protective layers for steam turbine blading, Wear.
- Mann, B.S., 2000, High-energy particle impact wear resistance of hard coatings and their application in hydroturbines, Wear.
- Martini, C., Palombarini, G., Poli, G. and Prandstraller, D., 2004, Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings, Wear.
- Massalski, T.B., 1990, Binary alloy phase diagrams, Second Ed., Vol.1, ASM Int.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Mats, H.A. and Li, C., 1981, On the grain boundary diffusion in surface alloying, Scandinavian Journal of Metallurgy, 10, pp. 171-76.
- Matuschka, A.G., 1980, 'Boronizing' Carl Hanser Verlag, München.
- Misra, A. and Finnie, 1982, A Review of the abrasive wear of metals, Journal of Engineering Materials and Technology, 104, 94-101.
- Mutaf, E. ve Ulusoy, E., 1977, Toprak işleme aletlerinin iş organlarında kullanılan bazı çeliklerin farklı ısıl işlemlere göre laboratuvar ve tarla şartlarında aşınma dirençleri, TBTA Yayınları No:337, TOAG Seri No.61, Ankara, 64 s.
- Nam, K.S., Lee, K.H., Lee, S.R. and Kwon, S.C., 1999, A study on plasma-assisted boriding of steels, Surface and Coating Technology.
- Ozbek, I. and Bindal, C., 2002 Mechanical properties of boronized AISI W4 steel, Surface Coatings Technology.
- Ozbek, I., Sen, S., Ipek, M., Bindal, C., Zeytin, S. and Ucisik, H., 2004, A mechanical aspect of borides formed on the AISI 440C stainless-steel, Vacuum.
- Özbek, I., Kondul, B.A., Bindal, C. and Ucisik, A.H., 2002, Characterization of borided AISI 316L stainless steel implant, Vacuum.
- Özbek, İ., 1999, Borlama yöntemi ile (AISI M50, AISI M2) yüksek hız çeliklerinin ve AISI W1 çeliğinin yüzey performanslarının geliştirilmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 161 s.
- Özbek, İ., Akbulut, H., Zeytin, S., Bindal, C. and Ucisik, A.H., 2000, The characterization of borided 99.5% purity nickel, Surface Coatings Technology.
- Özsoy, A. and Yaman, Y.M., 1993, The effect of thermocycling liquid boronizing on the thickness of the boride layer and the transition zone, Scripta Metallurgica et materialia.
- Özsoy, A., 1991, Çeliğin borlanması borür tabakası geçiş zonu ve ana matriksin özelliklerinin iyileştirilmesi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 91 s.
- Palombarini and Carbuicchio, 1984, On the morphology of thermochemically produced Fe₂B/Fe interface, J. Mater. Sci. Let., Vol. 3, 791-794.
- Palombarini and Carbuicchio, 1987, Growth of boride coatings on iron, J. Mater. Sci. Let., Vol. 6, 415-416.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Peever, D., 2002, Raising the standart in the global borate business, Industrial Minerals.
- Peever, D., 2002, Rio tinto north america analyst tour borates for the new millenium, World Borate Market Outlook.
- Qiao, X., Stock, H.R., Kueper, A. and Jarms, C., 2000, Effect of B(CH₃)₃ Content on A PACVD Plasma-boriding Process, Surface and Coatings Technology.
- Reymond, A.C., 1991, Engineering properties of borides, Engineering materials handbook, Vol.4, Ceramic an Glasses, ASM International, pp. 787-803.
- Robison, C., 2002, Rio tinto north america analyst tour borates for the new millenium, Operations Overview.
- Samsanov, G.V. and Epik, A.P., 1966, Coatings of high temperature materials, Ed. HAUSNER, H.H., Plenium Press.
- Sarı, N.Y., Şirin, Ş.Y., Kaluç, E. ve Tülbentçi, K., 1997, Makine parçalarının aşınmasına karşı modern yüzey işlemleri (1), Makine Magazin, 14, 48-51.
- Sarı, N.Y., ve Kaluç, E., 1996, Endüstride aşınma problemleri, Makine ve Metal Teknolojisi, 50, 64-68.
- Selçuk, B., Ipek, R. and Karamış M.B., 2003, A study on friction and wear behaviour of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115 steels, Journal of Materials Processing Technology.
- Selçuk, B., Ipek, R., Karamış, M.B. and Kuzucu, V., 2000, An investigation on surface properties of treated low carbon and alloyed steels (boriding and carburizing), Journal of Materials Processing Technology.
- Sen, S., Ozbek, I., Sen, U. and Bindal, C., 2001, Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel, Surface Coatings Technology.
- Sen, S., Sen, U. and Bindal, C., 2005, An approach yo kinetic study of borided steels, Surface Coatings Technology.
- Sen, S., Sen, U. and Bindal, C., 2005, The growth kinetics of borides formed on boronized AISI 4140 steel, Vacuum.
- Sen, U., Sen S. and Yilmaz, F., 2004, An evaluation of some properties of borides deposited on boronized ductile iron, Journal of Materials Processing Technology.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Sen, U., Sen, S. and Yilmaz, F., 2004, Structural characterization of boride layer on boronized ductile irons, Surface Coatings Technology.
- Sen, U., Sen, S., Koksal, S. and Yilmaz, F., 2005, Fracture toughness of borides formed on boronized ductile iron, Materials Design.
- Sinha, A.K., 1991, ASM Handbook, Vol 4. Boriding (Boronizing).
- Smith, W.F., 2001, Malzeme bilimi ve mühendisliği, (Çev. Kımıkoğlu, N.G.), Literatür Yayıncılık, 855 s.
- St John, M.R. and Sammels, A.F., 1981, Characterisation of an iron boride coating produced by pack boronization of low carbon steel, Mater. Sci. Let., Vol.16, pp.2327-2329.
- Şahin, S., 1999, Katı borlama yöntemi ile ferrobor üretimi ve özelliklerinin belirlenmesi, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Şen, U., 1997, Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve özellikleri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 178 s.
- Tarhuni, M., 1996, Bazı kültüratör uç demirlerinde aşınmanın azaltılabilmesini sağlayan yöntemler üzerinde araştırmalar, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Bornova, İzmir, 100 s.
- Taşçı, A., 1993, Borlanmış çeliklerin aşınma ve korozyon dayanımları, Y.Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul.
- Ueda, N., Mizukoshi, T., Demizu, K., Sone, T., Ikenaga, A. and Kawamoto, M., 2000, Boriding of nickel by the powder-pack method, Surface Coatings Technology.
- Uetz, H. and Föhl, J., 1978, Wear as an energy transformation process, Wear, 49, 253-264.
- Ulatan, B., Etibank, 1935-1985.
- Us Borax Products and Services, www.usborax.com.
- Usta, M., 2004, The characterization of borided pure niobium, Surface Coatings Technology.
- Usta, M., Ozbek, I., Ipek, M., Bindal, C. and Ucisik A.H., 2004, The characterization of borided pure tungsten, Surface Coatings Technology.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Üçişik, A.H. and Bindal, C., 1997, Fracture toughness of boride formed on low-alloy steels, Surface Coatings Technology.
- Üncü, Ü.R. ve Yerlikayalar, C., 2004, Küreselleşme sürecinde, küresel baronların göz diktiği ulusal maden varlığımız “bor pazarının yapısı”, II. Uluslar arası bor sempozyumu.
- Üncü, Ü.R., 2001, Dünya ham ve rafine bor pazarına bir bakış, 4 . Endüstriyel hammaddeler sempozyumu.
- Venkatesan, K., Subramania, C. and Summerville, E., 1997, Three-body abrasion of surface engineered die steel at elevated temperatures, Wear, 203-204, 129-138.
- Vijh, A.K., 1975, The influence of solid state cohesion of metals and non-metals on the magnitude of their abrasive wear resistance, Wear, 35, 205-209.
- Wendong, W., Sanhong, Z. and Xinlai, H.E., 1995, Diffusion of boron in alloys, Acta Metall., Vol. 43. No. 4, pp. 1693-99.
- www.etimaden.gov.tr.
- www.kimyaevi.com.
- Yoon, J.H., Jee, Y.K. and Lee S.Y., 1999, Plasma paste boronizing treatment of the stainless steel AISI 304, Surface Coatings Technology.
- Yoon, J.H., Jee, Y.K. and Lee, S.Y., 1999, Plasma paste boronizing treatment of the stainless steel AISI 304, Surface Coatings Technology.
- Yu, H.-J. and S.D. Bhole, 1990, Development of a prototype abrasive wear tester for tillage tool materials, Tribology International, 23, 5, 309-316.
- Yu, L.G., Chen, X.J., Khor, K.A. and Sundararajan, G., 2005, FeB/Fe₂B phase transformation during SPS pack-boriding: Boride layer growth kinetics, Acta Materialia.
- Yu, L.G., Khor, K.A. and Sundararajan, G., 2002, Boriding of mild steel using the spark plasma sintering (SPS) technique, Surface Coatings Technology.