

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÜÇ FARKLI ÇELİĞE KATI BORLAMA İŞLEMİ YAPILMASININ İÇYAPI
VE SERTLİK ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet ÖZER

Balıkesir, Eylül-2011

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÜÇ FARKLI ÇELİĞE KATI BORLAMA İŞLEMİ YAPILMASININ İÇYAPI
VE SERTLİK ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet ÖZER

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İrfan AY

Sınav Tarihi: 30.09.2011

Jüri Üyeleri: Prof. Dr. İrfan AY (BAÜ) (Danışman-BAÜ)

Yrd. Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ (BAÜ)

Yrd. Doç. Dr. Davut AKDAŞ (BAÜ)

Enstitü Yönetim Kurulunun tarih sayılı oturumunun
nolu kararı ile Mezun olmuştur.

Balıkesir, Eylül-2011

**Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Birim tarafından 2010 / 15 nolu proje ile desteklenmiştir.**

ÖZET

ÜÇ FARKLI ÇELİĞE KATI BORLAMA İŞLEMİ YAPILMASININ İÇYAPI VE SERTLİK ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mehmet ÖZER
Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

(Yüksek Lisans Tezi / Tez Danışmanı: Prof. Dr. İrfan AY)

Balıkesir, Türkiye, 2011

Borlama ısıt işlemleri demir esaslı malzemelere uygulanan, önemli yüzey sertleştirme ısıt işlemlerinden birisidir. Bu yöntemle demir esaslı malzemelerin, aşınmaya ve çalışma koşullarına yüksek dayanım gösterebilen borür tabakası elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada AISI 1020, AISI 1060 ve AISI 4140 çeliklerinden imal edilmiş olan borlama numunelerine 840 – 880 – 920 ve 960°C’ de 2 – 4 – 6 ve 8 saat sürelerle katı borlama işlemleri uygulanmıştır. Bor kaynağı olarak da “ **Ekabor – 2** ” tozu kullanılmıştır. Borlanan numunelerin optik mikro yapı fotoğrafları çekilmiştir. Difüzyon bölgesinin kalınlığı ve sertliği ölçülmüştür. Aynı çelik malzemeler alevle yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Böylece borlamanın alevle sertleştirmeye göre üstünlükleri ve karbonun, borlama işlemine çıkardığı zorluk üzerinde yorumlar yapılmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Borlama / AISI 4140 Çeliği / AISI 1020 çeliği / AISI 1060 çeliği / Alevle sertleştirme.

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF EFFECT OF SOLID BORONIZING PROCESS ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS IN THREE DIFFERENT STEEL

Mehmet OZER
Balikesir University, Institute of Science,
Department of Mechanical Engineering

(M.Sc. Thesis / Supervisor: Prof. Dr. Irfan AY)

Balikesir-Turkey, 2011

Boronizing as heat treatment applied to ferrous materials is one of the important surface hardening processes. It can be obtained layer of boron that shows higher strength to service conditions and abrasion for ferrous materials by this method.

In this study, solid boronizing is applied in conditions 840 – 880 – 920 – 960 °C temperature and 2 – 4 – 6 – 8 hours to the samples which are manufactured from AISI 1020 – AISI 1060 – AISI 4140 steels. In boronizing (Ekabor – 2) powder is used. The optical microstructures of the samples boronized have been taken photos. It is measured hardness and thickness of diffusion zone for boron. The same steel samples are also hardened by flame hardening process. The results obtained are compared with each other. So comments on the advantages of boronizing according to flame hardening and the difficulties of carbon boronizing are made.

KEY WORDS: Boronizing / AISI 4140 Steel / AISI 1020 Steel / AISI 1060 Steel / Flame Hardening.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
SEMBOL ve KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÖNSÖZ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. BOR ELEMENTİ	3
2.1 Bor Elementinin Özellikleri	4
2.2 Bor Ürünleri	6
2.2.a Boraks Dekahidrat.....	6
2.2.b Boraks Pentahidrat	6
2.2.c Susuz Boraks	6
2.2.d Borik Asit	7
2.2.e Bor Oksit (Susuz Borik Asit.)	7
2.2.f Sodyum Perborat.....	7
2.2.g Diğer Bor Bileşikleri	8
2.3 Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları.....	9
3. BORLAMA YÖNTEMLERİ	10
3.1 Katı Ortamda Borlama	13
3.1.1 Toz Ortamda Borlama.....	13
3.1.2 Macunlama İle Borlama.....	15
3.2 Sıvı Ortamda Borlama	16
3.2.1 Daldırma Yöntemi.....	17
3.2.2 Elektroliz Yöntemi	17
3.2.3 Derişik Çözeltide Borlama.....	18
3.3 Gaz Ortamda Borlama.....	18
3.4 Plazma Borlama	20
3.5 Borlama İşleminin Avantaj ve Dezavantajları	21
3.5.1 Borlama İşleminin Avantajları.....	21
3.5.2 Borlama İşleminin Dezavantajları	23
4. BORÜR TABAKASININ ÖZELLİKLERİ.....	25
4.1 Borür Tabakası	25

4.2 Geçiş Bölgesi	30
4.3 Borürlü Tabakanın Yapı ve Bileşimine Alaşım Elemanlarının Etkisi	32
4.4 Borlu Tabakanın Mekanik Özellikleri	33
4.4.1 Sertlik	34
4.4.2 Aşınma Özellikleri	35
4.4.3 Borlanmış Çeliklerin Korozyona Karşı Dayanıklılığı	37
4.5 Borlu Tabakanın Kalınlığı	40
4.6 Bor Tabakası Çeşitleri.....	41
4.7 Borür Tabakasındaki Kalıntı Gerilmeler.....	43
4.8 Borlama İşlemi Sonrası Uygulanabilen Isıl İşlemler	43
4.9 Borlanabilen Malzemeler	45
5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	48
6. MATERYAL VE METOD.....	53
6.1 Deney Amacı.....	53
6.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler	53
6.3 Deney Programı	55
6.4 Metalografik Çalışmalar.....	58
6.5 Sertlik Ölçümü	60
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	61
7.1 Mikroyapı İnceleme Sonuçları.....	61
7.2 Borlama Sonucu Oluşan Fazların İnceleme Sonuçları.....	62
7.3 Sıcaklık ve Zamana Bağlı Optik Görüntülerin ve Mikrosertliklerin İnceleme Sonuçları	66
7.4 Bor Tabakası Kalınlıklarının İnceleme Sonuçları.....	90
8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	96
KAYNAKÇA.....	98

SEMBOL ve KISALTMA LİSTESİ

<u>Adı</u>	<u>Açıklama</u>
HV	Hard Vickers
VSD	Vickers Sertlik Değeri
Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
B	Bor
B ₄ C	Bor karbür
BCl ₃	Bortriklorit
BN	Bor nitrür
C	Karbon
Fe	Demir
FeB	Demir borür
Fe ₂ B	Demirdiborür
AISI	American Iron and Steel Institute

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge Numarası</u>	<u>Adı</u>	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1	Kristal Borun Yapısı ve Kafes Parametreleri.....	4
Çizelge 2.2	Bor ve Bazı Bileşiklerin Sertlikleri.....	5
Çizelge 2.3	Bor ürünlerinin Kullanım Sektörleri.....	9
Çizelge 3.1	Koruyucu Gaz Atmosferinin Özellikleri.....	15
Çizelge 3.2	Sıvı Ortam Borlanmasında Kullanılan Ana Bor Kaynakları ve Özellikleri.....	16
Çizelge 4.1	FeB ve Fe ₂ B Fazlarının Tipik Özellikleri	26
Çizelge 4.2	Fe ₂ B ve FeB'nin Bazı Özellikleri	29
Çizelge 4.3	Çeşitli İşlemlere Tabi Tutulmuş Malzemelerin Mikrosertlik Değerleri Çizelgesi.....	34
Çizelge 4.4	T = 800 – 1000 °C Sıcaklıklarda, t = 2 – 6 Saatte Borlanan ve Borsuz Numunelerin Aşınma Esnasındaki Sürtünme Katsayıları.....	37
Çizelge 4.5	4 Saat Süreyle Borlanmış ve Borlanmamış “3” Adet Özel Hazırlanan Alaşımında 56 °C Sıcaklıktaki % 10 H ₂ SO ₄ Koroziif Ortamında Ağırlık Kaybı Testi İle Elde Edilen Korozyon Değerleri	39
Çizelge 4.6	Sementasyon ve Borlama İle Elde Edilen Sertliklere Isıl İşlem Sıcaklığının Etkisi	45
Çizelge 4.7	Borlanabilen Bazı Ferro Malzemeler ve Kullanım Alanları.....	46
Çizelge 6.1	Malzeme Bileşimi	54
Çizelge 6.2	Borlama Deney Programı ve Numune Kodlamaları.....	55
Çizelge 7.2	Borlama Sonucu Oluşan Fazların Derinlikleri ve FeB Fazının Oluşum Biçiminin Yorumu	63
Çizelge 7.4	Sıcaklık ve Zamana Bağlı Borlu Tabaka Kalınlığı	90
Çizelge 8.1	Hiç Isıl İşlem Görmemiş Numunelere Göre, Isıl İşlemlenmiş Numunelerde %'de Olarak Mikrosertlik Değerlerindeki Artış.	95

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil Numarası</u>	<u>Adı</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1	Siyah - Gri, Beta Boru; 5 Değişik Bor Yapısından Sadece Birisi	3
Şekil 2.2	Borun Kafes Yapısı.....	6
Şekil 3.1	Borlama İşleminde, Sertlik - Yüzeyden Mesafe İlişkisi	11
Şekil 3.2	Fe - B Diyagramı	12
Şekil 3.3	Gaz Ortamda Borlama Tertibatının Şematik Gösterimi	19
Şekil 3.4	Plazma Borlama Tesisat Şeması	21
Şekil 4.1	Borlama Sonrası Alaşım Sız Çelikte FeB ve Fe ₂ B Fazlarının İçyapı Görüntüsü.....	28
Şekil 4.2	Dişli Biçimli Demirborür Kristalleri (Fe ₂ B).....	29
Şekil 4.3	Borlanmış AISI 1020 Çeliğinde Yüzeyin Mikroyapısı	31
Şekil 4.4	Borlanmış AISI 4140 Çeliğinde Yüzeyin Mikroyapısı	31
Şekil 4.5	Alaşım Sız ve Alaşım Sız Çeliklerde Eşit Şartlarda Borlama İle Elde Edilen Borür Tabaka Kalınlıkları.....	32
Şekil 4.6	Borlu Tabaka İle Sementasyonlu Tabakanın Sertlik Dağılımları Kıyaslaması.....	35
Şekil 4.7	Yüzeyi Borlu ve Borsuz AISI 1116 Çeliğinin Yüke Karşı Aşınma Davranışı	36
Şekil 4.8	% Alaşım Elementleri Miktarının Borür Tabakası Kalınlığına Etkisi. 41	
Şekil 4.9	Borür Tabakası Çeşitleri	42
Şekil 4.10	Borlamadan Sonra Yapılan Isıl İşlem Örnekleri.....	44
Şekil 6.1	Deney Numunelerinin Görünümü	54
Şekil 6.2	Borlama İşleminde Kullanılan Potanın ve Numunelerin Pota İçerisindeki Yerleşiminin Dikey Kesit Görünüşü	57
Şekil 6.3	Borlama İşleminin Yapıldığı Fırın.....	58

Şekil 6.4	Numunelerin Kesilmesinde Kullanılan Hassas Kesme Cihazı	58
Şekil 6.5	Numunelerin Parlatılmasında Kullanılan Parlatma Cihazı	59
Şekil 6.6	Metalografik İncelemede Kullanılan Nikon MA-100 Marka Optik Mikroskop	60
Şekil 6.7	Shimadzu Marka Mikrosertlik Ölçme Cihazı	60
Şekil 7.2.1	AISI 4140 İçin 960 °C ve 8 Saat Borlama İşlemi Sonrası Oluşan Mikroyapı Fotoğrafi	64
Şekil 7.2.2	Yüksek Karbonlu Çelik Olan AISI 1060 İçin 960 °C ve 8 Saat Borlama İşlemi Sonrası Oluşan Mikroyapı Fotoğrafi	65
Şekil 7.3.1	AISI 1020 Çeliği İçin 840 °C ve 8 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	66
Şekil 7.3.2	AISI 1020 Çeliği İçin 880 °C ve 8 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	67
Şekil 7.3.3	AISI 1020 Çeliği İçin 920 °C ve 8 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	68
Şekil 7.3.4	AISI 1020 Çeliği İçin 960 °C ve 2 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	69
Şekil 7.3.5	AISI 1020 Çeliği İçin 960 °C ve 4 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	70
Şekil 7.3.6	AISI 1020 Çeliği İçin 960 °C ve 6 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	71
Şekil 7.3.7	AISI 1020 Çeliği İçin 960 °C ve 8 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	72
Şekil 7.3.8	AISI 1020 Deney Numunesinin Bor Difüzyon Derinliği Grafiği	73
Şekil 7.3.9	AISI 1060 Çeliği İçin 840 °C ve 8 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	74
Şekil 7.3.10	AISI 1060 Çeliği İçin 880 °C ve 8 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	75
Şekil 7.3.11	AISI 1060 Çeliği İçin 920 °C ve 8 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	76
Şekil 7.3.12	AISI 1060 Çeliği İçin 960 °C ve 2 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	77
Şekil 7.3.13	AISI 1060 Çeliği İçin 960 °C ve 4 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	78

Şekil 7.3.14	AISI 1060 Çeliği İçin 960 °C ve 6 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	79
Şekil 7.3.15	AISI 1060 Çeliği İçin 960 °C ve 8 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	80
Şekil 7.3.16	AISI 1060 Deney Numunesinin Bor Difüzyon Derinliği Grafiği.....	81
Şekil 7.3.17	AISI 4140 Çeliği İçin 840 °C ve 8 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	82
Şekil 7.3.18	AISI 4140 Çeliği İçin 880 °C ve 8 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	83
Şekil 7.3.19	AISI 4140 Çeliği İçin 920 °C ve 8 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	84
Şekil 7.3.20	AISI 4140 Çeliği İçin 960 °C ve 2 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	85
Şekil 7.3.21	AISI 4140 Çeliği İçin 960 °C ve 4 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	86
Şekil 7.3.22	AISI 4140 Çeliği İçin 960 °C ve 6 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	87
Şekil 7.3.23	AISI 4140 Çeliği İçin 960 °C ve 8 Saatlik Metalografik İnceleme Sonuçları	88
Şekil 7.3.24	AISI 4140 Deney Numunesinin Bor Difüzyon Derinliği Grafiği.....	89
Şekil 7.4.1	Üç Farklı Numunenin 840 °C ve 8 Saat İçin Mikrosertlik Değerleri Grafiği	91
Şekil 7.4.2	Üç Farklı Numunenin 880 °C ve 8 Saat İçin Mikrosertlik Değerleri Grafiği	91
Şekil 7.4.3	Üç Farklı Numunenin 920 °C ve 8 Saat İçin Mikrosertlik Değerleri Grafiği	92
Şekil 7.4.4	Üç Farklı Numunenin 960 °C ve 2 Saat İçin Mikrosertlik Değerleri Grafiği	92
Şekil 7.4.5	Üç Farklı Numunenin 960 °C ve 4 Saat İçin Mikrosertlik Değerleri Grafiği	93
Şekil 7.4.6	Üç Farklı Numunenin 960 °C ve 6 Saat İçin Mikrosertlik Değerleri Grafiği	93
Şekil 7.4.7	Üç Farklı Numunenin 960 °C ve 8 Saat İçin Mikrosertlik Değerleri Grafiği	94

Şekil 7.4.8	Numunelerin Borlanmış ve Borlanmamış Hallerinin Mikrosertlik Açısından Mukayesesi	94
Şekil 7.4.9	Numunelerin Alevle Sertleştirilip Su ve Yağda Soğutulmuş Hallerinin Mikrosertlik Açısından Mukayesesi.	95

ÖNSÖZ

Bu tezi ortaya çıkarmam esnasında bilgisi ve tecrübesini benden esirgemeyen, yol gösteren ve her zaman destek olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. İrfan AY' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında yakın ilgi ve desteğini gördüğüm. Yrd. Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ' a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince beni sürekli motive eden ve yardımlarını esirgemeyen “ YAŞAM KOÇUM” Yaşar ŞAVKIN'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Ayrıca çalışmalarım esnasında manevi olarak sürekli destek olan aileme de minnettirim.

Balıkesir, 2011

Mehmet ÖZER

1. GİRİŞ

Makine Sanayindeki uygulamalarda kullanılan malzemelerin aşınma korozyon ve sürtünme gibi tribolojik etkiler neticesinde azalan kullanım ömürlerinin arttırılması ancak çalışan yüzey bölgelerinin iyileştirilmesi ile mümkün olabilmektedir. Aşınma ve korozyondan dolayı dünya da her yıl önemli malzeme kayıplar olmaktadır. Ülkelerin korozyon nedeniyle kayıpları gayrisafi milli hâsıllarının % 3,5 – 5 'i arasında değişmektedir. Yalnız Türkiye'deki 1991 yılı kaybı 4,5 milyar dolar olarak tahmin edilmektedir [1].

Makinayı oluşturan parçalarının mukavemetleri ısıl işlemlerle de arttırılabilir. Bunlardan birisi de Borlama' dır. Borlama işlemi uzun bir geçmişe sahiptir. Çeliklerde bor yayınımla yüzey sertleştirme, ilk kez 1895 yılında Moissan tarafından yapılmıştır. 1970 'li yıllardan itibaren borlama konusunda çalışmalar hızlanmıştır. Günümüzde borlama, teknolojik olarak gelişmiş ve endüstride, özellikle alternatif bir yüzey sertleştirme yöntemidir [2].

Demir esaslı malzemeler 850 – 1150 °C sıcaklıkta, 2 – 8 saat sürelerde borlandığında, malzeme yüzeyinde demir – borür (Fe₂B, FeB) fazından oluşan ≈ 250µm tabaka derinliğine, ≈ 2500 HV_{0,06} tabaka sertliğine ulaşabilen bir difüzyon tabakası meydana gelir. Bu tabaka dişli forma sahip olup ana malzemeye tutunma mukavemeti çok iyidir ve tabaka özellikleri, işlem parametrelerine bağlı olarak değişir [3, 4].

Çok genel bir tarif olarak, % 2 'den daha az karbon içeren demire çelik adı verilmektedir. % 2 'den fazla karbon içeren alaşım ise Dökme-Demir olarak adlandırılır [5]. Genel tarifte % 2 üst sınırı konulmuş olmakla beraber sade karbonlu takım çeliklerinin dışında kalan çeliklerde karbon % 1,2 değerini pek aşmaz. Çeliklerde; Demir ve Karbonun dışında üretimden gelen Mangan, Silisyum

ve az miktarda Fosfor ve Kükürt bulunur. Özellikle P ve S gerek karbon çeliklerinde, gerekse alaşımllı çeliklerde en düşük miktarda tutulmaya çalışılır [5].

AISI 1020 sementasyon çelikleri, makine imalat endüstrisinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Dövmelik parça, soğuk çekilmiş çubuk, tellik çubuk ve dikişsiz boru ürünlerin üretimine uygun yapıdadır.

AISI 4140 ıslah çelikleri, otomobil ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca içerdiği alaşım elementleri nedeniyle yapılacak işlemler sonrasında iyi sonuç vereceği düşünüldüğünden araştırma konusu olarak seçilen çeliklerdendir.

AISI 1060 çelikleri ise miller, şaftlar, cıvatalar yapımında, makine ve taşıt imalatında, aks, pim v.b. çok fazla zorlanan parçalarda yaygın olarak kullanılan imalat çelikleridir.

Bu çalışmada borlama ısıl işlemine tabi tutulmuş AISI 1020, AISI 1060 ve AISI 4140 çeliklerinde borlamanın ısıl işlem parametrelerine bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmiştir. Bu amaçla hazırlanan deney numuneleri katı ortamda 840 – 880 – 920 ve 960 °C sıcaklıklarda 2 – 4 – 6 ve 8 saat sürelerle ısıl işleme tabi tutulmuştur. Ayrıca borlama işlemine tabi tutulan tüm numunelerin metalografik incelemeleri yapılmış ve yüzeyde oluşan Borür tabakasının mikro sertlik değerleri tespit edilmiştir. Borlamanın yanı sıra birde Alevle sertleştirmeye maruz kalan deney numunelerin bu yöntem sonucunda sertlikleri ölçülerek borlama sonuçlarıyla mukayese edilmiştir.

2. BOR ELEMENTİ



Şekil 2.1. Siyah-Gri, beta Boru; 5 değişik bor yapısından sadece birisi

Yaklaşık Atom Ölçüsü	: 10,811
Peryodik Atom Numarası	: 5
Ergime Noktası	: 2180°C
Kaynama Noktası	: 3650°C (Basınç altında)
Oksidasyon sayısı	: 3
Yoğunluk	: 2,35 g/cm ³
Sertlik (Mohs)	: ca. 10 9,3
Atom çapı	: 85 pm
Elektron dağılımı.	: [He]2s ² 2p ¹
Doğadaki İzotopları	: B – 10 19,57% B – 11 80,43%
Elektronegatiflik	: 2,04 (Pauling)

*) Yukarıdaki verilerin geneli resimdeki beta bor'una istinadendir

Kökeni Buraq/Baurach (Arapça) ve Burah (Farsça) kelimelerinden gelen ağırlıklı olarak metalimsi davranış gösteren Bor (B), ilk defa 1808 yılında Gay-Lussac ve Jacques Thenard ile Sir Humphry Davy tarafından Bor Oksit'in Potasyum ile ısıtılmasıyla elde edilmiştir. Kimyasal olarak ametal bir element olan kristal bor, normal sıcaklıklarda su, hava ve hidroklorik/hidroflorik asitler ile soy davranış göstermekte olup sadece yüksek konsantrasyonlu Nitrik Asit ile sıcak ortamda Borik Asit'e dönüşebilmektedir. Öte yandan yüksek sıcaklıklarda saf oksijen ile reaksiyona girerek Bor Oksit(B_2O_3), aynı koşullarda nitrojen ile Bor Nitrit(BN), ayrıca bazı metaller ile Magnezyum Borit(Mg_3B_2) ve Titanyum Diborit(TiB_2) gibi endüstride kullanılan bileşikler oluşabilmektedir [6, 7, 8, 9].

Bor cevherlerinin Türkiye'de en çok bulunduğu yerler Uludağ'ın güneyine çizilecek büyük bir yarım dairenin içinde kalır. Bor yatakları, Eskişehir/Kırka, Kütahya/Emet, Balıkesir/Bandırma, Kestelek, Hisarcık, Bigadiç, Susurluk-Sultansazlığı ile sınırlanmaktadır. Bu bölge aynı zamanda dünya bor cevherlerinin de % 70'ini bünyesinde barındırır. Türkiye'nin bugüne kadar bulunmuş bor rezervleri (B_2O_3) bazında toplam 2.064 milyon ton olup şu anki tüketim hızıyla dünyaya 700 yıl yetecek kadardır [10, 11, 7].

2.1. Bor Elementinin Özellikleri:

Periyodik sistemin III. grubunda bulunan borun atom numarası 5, atom ağırlığı 10.81, atom çapı 1.78 \AA (7) ve ergime noktası 2400°C ' dir [12, 13]. Bor $2.33 \pm 0.002 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluklu kristal ve 2.3 gr/cm^3 yoğunluklu amorf olmak üzere iki şekilde bulunur. Kristalin borun yapısı ve kafes parametreleri çizelge 2.1' de, bor ve bazı bileşiklerin sertlikleri ise çizelge 2.2' de verilmiştir [12].

Çizelge 2.1. Kristalin borun yapısı ve kafes parametreleri

Kristal Şekli	Kafes Parametreleri (Å)	
	B	C
Tetragonal	8,13	8,57
Hegzagonal	9,54	11,98

Çizelge 2.2. Bor ve bazı bileşiklerin sertlikleri

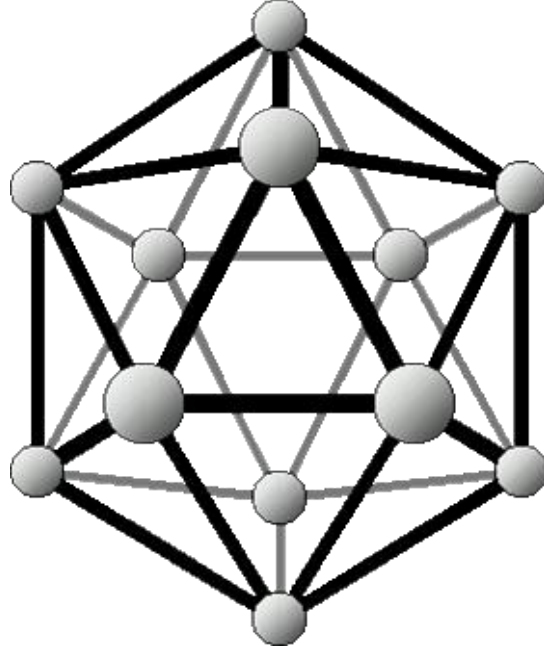
Malzeme	Mohs sertlik
Bor (element)	9,3
Bor karbür (B ₄ C)	9,32
Bor nitrür (BN)	1,2
Elmas (standart)	10

Bor; ısıya dayanımı, ergime ve kaynama sıcaklığı çok yüksek olan bir elementtir. Bor, Karbon esaslı Elmas madeninden sonra dünyanın en sert 2. madenidir. 20°C'deki elektrik geçirgenliği düşük olsa da, ısınmasıyla birlikte ciddi anlamda artış göstermektedir. Öyle ki 600°C civarında, oda sıcaklığına oranla bu katsayı 100 misli artar. Saydam olmayan siyah amorf yapının yanında 4 değişik kristal yapısı daha vardır [14].

- α – orthorombal Bor (kırmızı, saydam)
- β – orthorombal Bor (siyah, gri parlak)
- α – tetragonal Bor (siyah)
- β – tetragonal Bor (kırmızı)

Tüm kristal yapılarda birleşme B – 12 köşeli olarak meydana gelmektedir. Bu tür bir kristali 20 yüzeyli olarak da tanımlamak mümkündür. Borun en sağlam yapısı ; Amorf bordan yada yüksek derecede (1200 °C) β – hegzagonal bor dan elde edilen α – orthorombal bordur.

Bor madeni ilk bakışta beyaz bir kayayı andırıyor. Çok sert ve ısıya dayanıklı. Doğada serbest bir element olarak değil, tuz şeklinde bulunuyor. Ülkemizde bulunana Bor' un kalitesi de diğerlerine oranla daha yüksek. Toprağın 40 metre altında bulunan borun işlenmesi de, diğer elementlerle az karıştığı için kolaydır [15].



Şekil 2.2. Borun kafes yapısı

2.2. Bor Ürünleri:

Bor ürünleri şunlardır [16]:

2.2.a. Boraks Dekahidrat: Teknolojik olarak alkali metal boratlarının en önemlilerinden biri, disodyum tetraborat dekahidrat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) olarak da adlandırılan boraks dekahidrattır ve tabiatta tinkal minerali olarak bulunur. Molekül ağırlığı 381,4 gr./mol, özgül ağırlığı 1,71 (20°C), özgül ısısı 0,385 kcal/gr/ $^\circ\text{C}$ (25- 50°C), oluşum ısısı $-1497,2$ kcal/mol' dür. Renksiz monoklinik kristal yapısında bir tuzdur. Sulu çözeltileri yaklaşık, konsantrasyondan bağımsız olarak hafif alkali reaksiyon gösterir. (pH=9,2). Doymuş boraks çözeltisi 105°C ' de kaynar.

2.2.b. Boraks Pentahidrat: Disodyum tetraborat pentahidratın ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) molekül ağırlığı 291,35 gr/mol, özgül ağırlığı 1.88, özgül ısısı 0,316 kcal /gr/ $^\circ\text{C}$ ve oluşum ısısı , $-1143,5$ kcal/mol' dür. Mineral adı tinkalkonit olan pentahidrat boraksın dehidrasyonundan oluşan birikintiler halinde bulunur. Doymuş boraks çözüntüsünün 60°C ' nin üzerinde kristallenmesi ile oluşur.

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

2.2.d. Borik Asit: Borik asit(H_3BO_3) molekül ağırlığı 61,83 gr/mol, B_2O_3 içeriği %56,3, ergime noktası 169°C , özgül ağırlığı 1.44, oluşum ısısı , -1089 kJ/mol, çözünme ısısı 22,2 kJ/mol olan kristal yapılu bir maddedir. Oda sıcaklığında sudaki çözünürlüğü az olmasına rağmen, sıcaklık yükseldikçe çözünürlüğü de önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle sanayide borik asidi kristallendirmek için genellikle doymuş çözeltiyi 80°C ' den 40°C ' ye soğutmak yeterli olmaktadır. Bor minerallerinden geniş ölçüde üretilen borik asit başlıca; cam, seramik ve cam yünü sanayiinde kullanılmakta olup, kullanım alanları çok çeşitlidir. Borik asit, bor minerallerinin genel olarak sülfürik asit ile asitlendirilmesi ile elde edilmektedir. Türkiye'de borik asit üretimi başlıca; Bandırma'daki Eti Bor A.Ş. Boraks ve Asit Fabrika İşletmeleri tarafından yapılmaktadır.

2.2.e. Bor Oksit (susuz borik asit) : Ticari bor oksit, B_2O_3 'tür ve genellikle %1 su içerir. Genellikle borik asitten uygun sıcaklıkta su kaybettirilerek elde edilir. Renksiz cam görünüşlüdür. Oda sıcaklığında higroskopiktir. Bor oksit ve susuz boraks cam sanayiinde çok kullanılır. Yüksek sıcaklıkta borik asitten su buharlaşırken B_2O_3 kaybı artmaktadır. Cam üretim prosesinde, borik asit yerine, bor oksit kullanılması enerji ve hammadde avantajı sağlamaktadır. Bor oksit porselen sırlarının hazırlanmasında, çeşitli camlarda, ergitme işlemlerinde, seramik kaplamalarda kullanılır. Ayrıca pek çok organik reaksiyonun katalizörüdür. Pek çok bor bileşiğinde başlangıç maddesidir.

2.2.f. Sodyum Perborat: Sodyum perborat ($\text{NaBO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) genellikle tetrahidrat yapısındadır. Perborat üretiminde %33 B_2O_3 içeren boraks minerali kullanılmaktadır. Sodyum perborat, Bandırma' daki Eti Bor A.Ş. Boraks ve Asit Fabrikaları İşletmeleri tarafından üretilmektedir. Sodyum perborat, ağartıcı etkisi dolayısıyla yaygın olarak sabun ve deterjan sanayiinde kullanılmaktadır. Ayrıca

kozmetik maddelerin yapımında, tekstil endüstrisinde, mum, reçine, tutkal ve sünger sanayiinde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır.

2.2.g. Diğer Bor Bileşikleri: Yukarıda açıklanan bor ürünleri dışında yaygın olarak kullanılan diğer bor bileşikleri aşağıda özet olarak verilmiştir.

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

-Bor Karbür: Bor-karbon sistemindeki tek bileşik olan bor karbür, genellikle granül katı olarak elde edilir. Masif ürün olarak elde edilmek istendiğinde, 1800 - 2000 °C 'de garafit kalıplarda preslenir. Saf bor karbür kristalleri hafif parlak görünümündedir. Yoğunluğu 2,52 gr/cm³, ergime sıcaklığı 2450 ° C 'dir. Sıcak preslenmiş bor karbür, aşındırıcı parçalarda, contalarda, seramik zırlı yüzeylerin yapılmasında kullanılır. 2000 ° C 'nin üzerindeki sıcaklıkların ölçülmesinde termoçift olarak kullanılır. Sertliği nedeniyle abrasiv malzeme yapımında kullanılır.

-Bor Nitrür: Bor nitrür genellikle hegzagonal yapıda oluşur. Hegzagonal sistemde iken beyaz, talk 'a benzeyen, 2,27 gr/cm³ yoğunluğunda bir tozudur. Kübik sistemde ise oldukça serttir. Teorik yoğunluğu 3,45 gr/cm³ 'tür ve iyi bir elektrik izolatörüdür. Ergitilerek masifleştirilmiş bor nitrit büyük bir kimyasal dirence sahiptir. Kübik yapıdaki bor nitrit çok iyi bir abrasiv malzemedir. Bu özelliğinden dolayı, kesici aletlerin yapımında ve sert alaşımların işlenmesinde kullanılır.

-Bor Halojenürler: Borun flor, klor, brom, iyot gibi halojenlerle yaptığı bileşiklerdir. Bor oksitin derişik sülfirik asit ve florit, klorit, bromit, iyodit gibi halojenlerle ısıtılmasıyla elde edilir. Bor klorür, düşük viskoziteli, renksiz, ışığı kıran bir sıvıdır ve % 95 'i bor - fiber üretiminde kullanılır.

2.3. Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları

Bor ürünlerinin kullanım sektörlerini çizelge 2.3 'de maddeler halinde verilmiştir [8].

Çizelge 2.3. Bor ürünlerinin kullanım sektörleri

Kullanım Alanı	Kullanım
Savunma Sanayi	Zırh Plakalar, Seramik Plakalar, Ateşli Silah Namluları, Fişek vb
Cam Sanayi	Bor Silikat Camlar, Laboratuvar Camları, Uçak Camları, Borcam, Pyrex, İzole Cam Elyafı, Tekstil Cam Elyafı, Optik Lifler, Cam Seramikleri, Şişe, diğer Düz Camlar, Otomotiv
Elektronik ve Bilgisayar Sanayi	Mikro Chipler, LCD Ekranları, CD-Sürücüler, Akım Levhaları, Bilgisayar Ağlarında; Isıya- Aşınmaya Dayanıklı Fiber Optik Kablolar, Yarı İletkenler, Vakum Tüpler, Dielektrik Malzemeler, Elektrik Kondansatörleri, Kapasitörler, Gecikmeli Sigortalar, Bataryalar, Laser
Enerji Sektörü	Gaz türbinleri, Yüksek ısı transistörleri, Bor hidrür yakıtları(boranlar), Isı enerjisi depolayıcılar, Piller, Hidrojen depolayıcılar, Güneş Enerjisinin Depolanması
Görüş Sistemleri	Kamera ve Mercek Camları, Fotoğraf Makinaları, Dürbünler, Banyo ve Film İmalatları
İlaç ve Kozmetik Sanayi	Dezenfekte Ediciler, Antiseptikler, Diş Macunları, Lens Solüsyonları, Kolonya, Parfüm
İletişim Araçları	Cep Telefonları, Modemler, Televizyonlar vb.
Kağıt Sanayi	Geri kazanılan kâğıtların mürekkeplerinden arındırılması, Yüksek kaliteli kâğıtların parlaklaştırılması, kâğıt hamurunu beyazlatılması
Kimya Sanayi	Bazı kimyasalların indirgenmesi, Elektrolitik işlemler, Flotasyon İlaçları, Banyo Çözeltileri, Katalistler, Atık Temizleme Amaçlı olarak, Petrol Boyaları, Yanmayan ve Erimeyen Boyalar, Tekstil Boyaları, Yapıştırıcılar, Soğutucu Kimyasallar, Korozyon Önleyiciler, Mürekkep, Pasta ve Cilalar, Kibrit, Kireçlenme Önleyicileri,
Koruyucu	Ahşap Malzemeler ve Ağaçlarda Koruyucu olarak, Boya ve vernik Kurutucularında, Küf ve mantar önleyiciler, vb.
Makine Sanayii	Manyetik Cihazlar, Zımpara ve Aşındırıcılar Kompozit Malzemeler, Titreşim söndürücü malzemeler, Sert malzemeler, Motorlar, Katı yağlayıcılar, Yüksek sıcaklık sızdırmazlık contaları, Yüksek performanslı motor yağları, vb.
Metalürji	Kaplama elemanları, Yüksek sıcaklık refrakterleri, Kaplama Sanayiinde Elektrolit Olarak, Paslanmaz ve Alaşımli Çelik, Sürtünmeye-Aşınmaya Karşı Dayanıklı Malzemeler, Kaynak Elektrotları, Metalurjik Flaks, Briket Malzemeleri, Lehimleme, Döküm Malzemelerinde Katkı Maddesi olarak, Kesiciler, Kompozit Malzemeler
Nükleer Sanayi	Nükleer atık depolama (kolemanit cam bloklar), Reaktör Aksamları, Nötron Emiciler, Reaktör Kontrol Çubukları, Nükleer Kazalarda Güvenlik Amaçlı ve Nükleer Atık Depolayıcı olarak, Nükleer teknolojiide emniyet malzemeleri, vb.
Otomobil Sanayi	Titreşim söndürücü malzemeler, Hava yastığı şişirme mekanizmaları, Bor hidrür yakıtları (boranlar), Isı enerjisi depolayıcılar, Hidrojen depolayıcılar, Hava Yastıklarında, Hidroliklerde, Plastik Aksamda, Yağlarda ve Metal Aksamalarda, Isı ve Ses Yalıtımı Sağlamak Amacıyla, Antifrizler, vb.
Seramik Sanayi	Emaye, Fayans, Porselen Boyaları, sırlar, vb
Spor Malzemeleri	Kayak Aksamları, Tenis Raketleri, Ok-yay, Balık Oltaları, Golf Sopaları, Darbe söndürücüler vb.
Tarım Sektörü	Sentetik gübreler, Biyolojik Gelişim ve Kontrol Kimyasalları, Küf ve mantar önleyiciler, Böcek-Bitki Öldürücüler, Yabani Otlar, vb
Tekstil Sektörü	Isıya Dayanıklı Kumaşlar, Yanmayı Geciktirici ve Önleyici Selülozik Malzemeler, İzolasyon Malzemeleri, Tekstil Boyaları Deri Renklendiricileri, Dericilikte kireç çöktürücü, Suni İpek Parlatma Malzemeleri, vb.
Tıp	Yapay organlar, Antibiyotikler(boromicyn), Osteopoz Tedavilerinde, Alerjik Hastalıklarda, Psikiyatride, Kemik Gelişiminde ve Artiritte, Menopoz Görüntüleme Cihazlarında vb
Uzay ve Havacılık Sanayii	Sürtünmeye-Aşınmaya ve Isıya Dayanıklı Malzemeler, Roket Yakıtı, Uydular, Uçaklar, Helikopterler, Zeplinler, Balonlar, Radar dalgası soğurucular, vb.

3. BORLAMA YÖNTEMLERİ

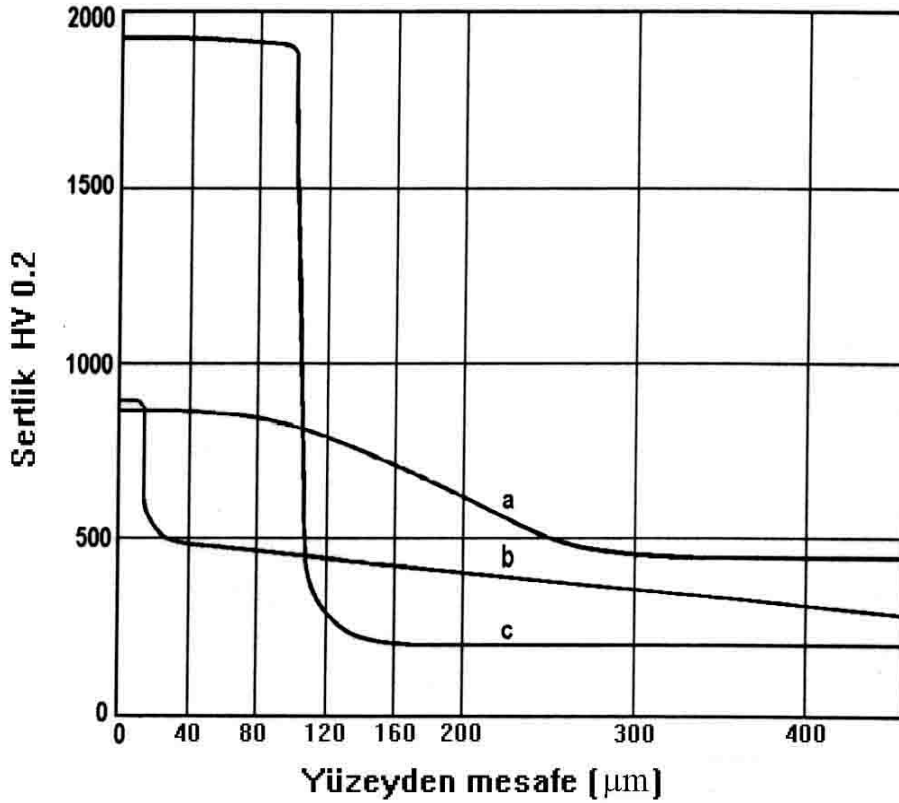
1895 yılında Mossion, çeliklerin borlanabileceğini söylemiş ve bu konuda çalışmalar yapmıştır. Ancak özellikle II. Dünya Savaşı'ndan sonra bu konudaki araştırma ve çalışmalar yoğunluk kazanmıştır [17].

Borlama, esas olarak yayınma işlemidir. Bor kaynağının fiziksel durumu katı, sıvı, gaz olabilir. Genel olarak çelik, borlama ortamında 2 - 10 saat, 850 °C – 1000 °C 'de bekletilerek borlama işlemine tabi tutulur. Borlama ortamı, bor kaynağı (B_4C , $Na_2B_4O_7$, H_2B_6), aktivatör (KBF_4), dolgu veya deoksidantlardan oluşur. Aktivatörler tabakanın büyüme düzenine etki eder. Deoksidantlar, borlama sıcaklığında oksijeni tutarak hızlandırıcı bir ortam oluşturur ve borlama maddelerinin ana malzemeye yapışmasını önlerler [18, 19, 20].

Borlama yöntemleri, kullanılan bor kaynağının fiziki durumuna göre belirlenir. Gaz, bir ısı işlemi ortamı olarak teknik avantajlar sergiler ve nitrürleme, karbürleme, kromlama gibi ısı işlemlerle başarıyla uygulanır. Ancak; gaz ve sıvı fazda borlama, ortamın oluşturulması bakımından ciddi zorluklar gösterdiğinden sık kullanılan bir yöntem değildir, bu nedenle farklı borlama teknikleri katı bor verici kaynaklar esas alınarak geliştirilmiştir [21].

Borlanmış parçaların yüzeyinde ölçülen sertlik, kullanılan çeliğin kimyasal bileşimi ve borlama pratiğine bağlı olarak 2000 - 2500 VSD (Vickers Sertlik Değeri) mertebelerine çıkabilmektedir. Malzemeye, yüksek yüzey sertliği, düşük sürtünme katsayısı, yüksek korozyon direnci kazandırması ve işlem sonrası ana malzemeye ısı işlem uygulanabilmesi borlamanın diğer yüzey sertleştirme işlemlerine olan üstünlükleri arasında yer alır [22, 23].

Malzemelerin yüzeyine değişik metotlarla kaplamalar yapılır. Örneğin; hem karbürleme yapılması istendiğinde sertleşmeden sonra sürekli bir geçişle sert kenar bölgesinden yumuşak çekirdek halinde tutabilmek için, hem tuz banyosunda nitro karbürlemede, nitrür tabaka özelliğinin yanında, tabaka altındaki yarı metal difüzyon bölgesi çok önemli bir rol oynar. Bor kaplamada ise sadece kenar bölgesi, yani borür tabakası ilgili alandır. Buna göre değişik ısıl işlemler sonucu oluşan, sertlik-yüzeyden mesafe ilişkileri Şekil 3.1 'de görülmektedir [3].

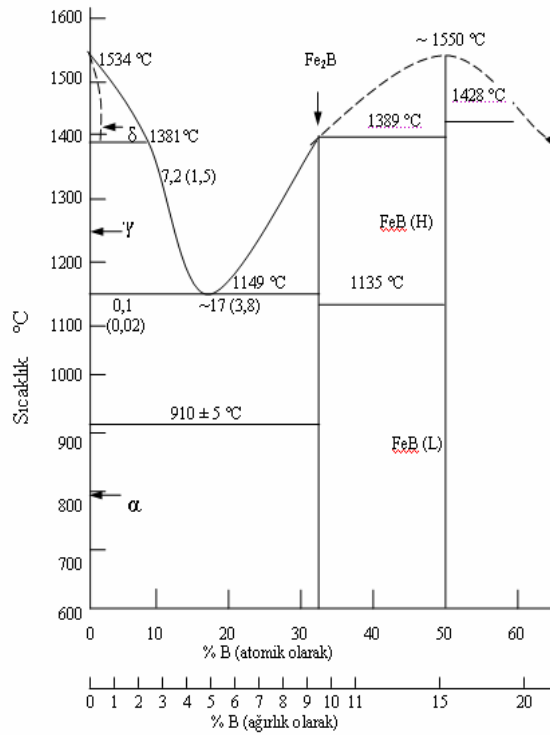


Şekil 3.1. Borlama işleminde, sertlik-yüzeyden mesafe ilişkisi [3].

- İlave sertleştirme (16MnCr5 , 1 saat, 860 °C , sementasyon işlemi ve yağda sertleştirme)
- Tuz banyosunda nitro karbürleme (C15, 90 dakika, 580 °C banyoda su verme.)
- Borlama (C45, 3 saat, 900 °C, Durborid 2, yavaş soğutma.)

Yüksek sıcaklıkta (850 – 1050 °C) yapılan borlama işlemi ile demir yüzeyine bor yayılması gerçekleşir. Bu yayılma işlemi ile tek fazlı Fe₂B veya iki fazlı Fe₂B + FeB den oluşan ferrobor tabakası elde edilir. Tek faz Fe₂B oluşumu, iki faz Fe₂B + FeB ‘nin oluşumundan daha fazla istenir. Çünkü borca zengin FeB fazının kırılabilirliği yüksektir; bu yüzden FeB fazının oluşması istenmez. FeB nin ısıl genişleme katsayısı (23.10 – 6 / °C), Fe₂B nin genişleme katsayısından (7,85.10 – 6 / °C) büyüktür. İki fazlı sistemde oluşan Fe₂B ve FeB fazları arasındaki ısıl genişleme farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlama oluşur. Bu çatlama önlemek FeB fazını azaltmak veya FeB fazının oluşmasını önlemek ile mümkündür [19, 24, 25, 20].

Bor α , γ ve δ -demirinde çok az çözünebilmektedir. α – demirinde, 910 °C civarındaki maksimum çözünebilirlik sıcaklıklarında 20 – 80 ppm borun çözünebildiği; buna karşılık, 1150 – 1170 °C sıcaklıklarda γ – demirinde 55 - 260 ppm bor çözünebildiği belirlenmiştir. Çözünebilirlik sınırlarının genişliğinin, esas malzemenin saflığı ve tane boyutundaki değişikliklerden kaynaklandığına inanılmaktadır [2, 3].



Şekil 3.2. Fe-B denge diyagramı [26].

Şekil 3.2 'de Fe - B ikili denge diyagramı görülmektedir. Fe ile B arasında Fe_2B (% 8,83 B), FeB (% 16,23 B) bileşikleri ve 1149 °C 'da , % 3.8 B bileşiminde bir ötektik nokta oluşmaktadır. Dolayısıyla borlanmış yüzey 1149 °C sıcaklığına kadar ısıdan etkilenmemektedir. Fe - B sisteminde alaşım elementleri, örneğin % 1 C ötektik sıcaklığını 50 °C aşağıya düşürmektedir [2, 3, 26].

3.1. Katı Ortamda Borlama

Yüzeyi borlanacak malzeme, toz halindeki bor verici ortam içinde genellikle 850 - 1000 °C sıcaklıklarda 2 – 10 saat bekletilmesi ile yapılan işlemdir. Kutu sementasyona benzeyen bu yöntem soygaz atmosferinde yapılabildiği gibi sıkı kapatılmış kutularda olmak şartı ile normal, atmosferde de yapılabilir. Sistem ucuzdur. Özel teçhizat ve teknik gerektirmez [27]. Ticari alanda katı ortam borlama maddeleri kullanım alanlarına göre sınıflanılarak satılmaktadır [12].

Ekabor 1: Tozdur. Optimum tabaka kalınlığının elde edilmesinde kullanılır. Yüzey pürüzlülüğü açısından yüksek kaliteye erişilir ve genel maksatlı demir ve çelik malzemelerde kullanılır.

Ekabor 2 : Granüllüdür. Yüzey pürüzlülüğü açısından çok yüksek kaliteye sahiptir. Düşük alaşımlı çelikler için kullanılır.

Ekabor 3 : Granüllüdür. Ekabor 2 'den daha iri taneli olup yüzey kalitesi daha iyidir. Yüksek alaşımlı çelikler için kullanılır.

Ekabor HM: Sert metallerin borlanması için özel olarak üretilmiştir.

Ekabor Pasta: Macun şeklide olup metalik malzemelerin borlanması istenen bölgelerine sürülerek uygulanır.

3.1.1. Toz Ortamda Borlama

Yüzeyi borlanacak malzeme, toz halindeki bor verici ortam içinde 800 - 1000 °C sıcaklıklarda 4 - 10 saat bekletilerek borlama işlemi yapılır. Borlama tozu ısıya dayanıklı çelik saç kutu içine konur ve borlanacak parça bu tozun içine gömülür. Bu toz, parçanın tüm yüzeylerinde en az 10 mm kalınlığında olmalıdır. Kutuların ağzı bir kapak ile kapatılarak önceden belirli bir sıcaklığa ısıtılmış fırına

konur ve fırın kapağı kapatılarak fırın içi sıcaklığı borlama sıcaklığına yükseltilir. Bir süre bekletildikten sonra kutu fırından alınarak soğutulur ve parça içinden çıkarılır. Bu sırada çelik kutunun kapağı kutunun üzerinde kendi ağırlığı ile durmalıdır. Sementasyonda olduğu gibi sıkıca kapatılmasına gerek yoktur. Eğer işlem normal atmosfer de yapılacaksa kapak sıkıca kapatılır. Bu yöntem koruyucu gaz atmosferi içinde de yapılabilir. Yöntem ucuzdur ve özel bir teknik gerektirmez [28].

Borlama ortamının ana bileşeni borkarbür, ferrobor ve amorf bordur. Bor korbür diğerlerine göre ucuzdur. Amorf borun saf halinin çok pahalı oluşu ve saf ferroborun eldesinin endüstriyel olarak çok zor olması bu metotların bırakılmasına neden olmuştur. Diğer bor verici toz ortam bor karbür ise amorf bor ve ferrobordan ucuz olup, bileşimi zamana göre sabittir. Elverişli tane boyutunun ve etkin aktivatörün seçimi ile iyi sonuçlar alınmıştır. Bütün bunlara rağmen amorf bor tuzuna aktivatör olarak amonyum klorür eklenerek yapılabilir. Ferrobor ortamında yapılan borlama sonucu elde edilen tabaka teknik açıdan kullanılamaz. Aktivatör dolgu maddeleri ile kullanılabilir [29].

Katı ortam borlamasında kullanılan bazı borlama bileşiklerine ait örnekler % ağırlık olarak aşağıda verilmiştir [2].

1. % 60 B₄C + % 5 B₂O₃ + % 5 NaF + % 30 Demir oksit
2. % 50 Amorf bor + % 1 NH₄F.HF + % 49Al₂O₃
3. % 100 B₄C
4. % (7,5 - 40) B₄C + % (2,5 - 10) KBF₄ + % (50-90) SiC
5. % 84 B₄C + % 16 Na₂B₄O₇
6. % 95 Amorf bor + % 5 KBF₄
7. % 20 B₄C + % 5 KBF₄ + % 75 Grafit
8. % (40 – 80) B₄C + % (20 – 60) Fe₂O₃
9. % 80 B₄C + % 20 Na₂CO₃

10. % 98 [% 75 Al₂O₃ + % 25 (% 30 Al + % 70 B₂O₃)] + % 2 NaF

11. % 100 B₄C

12. % 48 Amorf bor + % 4 Cr + % 1 NH₄ . HF + % 47 Al₂O₃

3.1.2. Macunlama ile Borlama

Borlama için kullanılacak tozlar macun haline getirilir ve borlanacak parçanın üzerine 2 mm kalınlıkta sürülür. Parça yüzeyine sürülen macun derhal sıcak hava akımında, ön ısıtma odasında veya kurutma fırınında maksimum 150 °C 'de kurutulması gerekir. Gerektiği takdirde macun üzerine tekrar birkaç kez daha sürülebilir. Kurutma işleminden sonra macun ile kaplanmış parçalar önceden ısıtılmış fırına konur ve fırın ağzı kapatılarak borlama sıcaklığına ısıtılır. Belirli süre bu sıcaklıkta tutulan parçalar dışarı alınır ve soğumaya terk edilir. Parçalar soğuduktan sonra yüzeyinde yapışmış olan artıklar temizlenir ve böylece borlama yapılmış olur [28].

Bu yöntemle borlama mutlaka koruyucu gaz ortamında yapılması gerekir. Aksi takdirde kötü bir borür tabakası oluşur. Bu yöntemle kısmi borlama yapılabilir. Bor korbür (B₄C), kriyolit (Na₃AlF₆) ve bağlayıcı olarak da hidrolize edilmiş etilsilikat karışımından macun yaparak borlama yapılmıştır. Bu yöntemde kullanılan koruyucu gazlar; Argon, Formier Gazı, NH₃ ve saf azottur. Bu yöntemde kullanılan koruyucu gazlar ise çizelge 1.4 'te verilmiştir [17].

Çizelge 3.1. Koruyucu gaz atmosferinin özellikleri [17].

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

3.2. Sıvı Ortamda Borlama

Borlama şartlarında ortam sıvıdır. Borlanacak malzeme 800 - 1000 °C arasındaki sıcaklığa sahip sıvı bir borlu ortam içinde 2 - 6 saat bekletilerek bor yayılımı gerçekleştirilir [17]. Sıvı ortamda kimyasal reaksiyonların daha hızlı olmasından kaynaklanan yüksek aktivite nedeniyle, sıvı ortamda borlama geniş ölçüde kullanılmaktadır. İşlem normal atmosfer altında yapılır, koruyucu atmosfere gerek yoktur. Ayrıca işlemde kullanılan cihaz ve donanım basit olduğu gibi, gerekli kimyasal maddeler de ucuzdur. Borlama sonrası parçaların temizlenmesi önemli bir problemdir [2].

Sıvı ortamda borlama tuz eriği içinde elektrolitli veya elektrolitsiz (daldırma) ve derişik çözeltide olmak üzere yapılabilir [27].

Çizelge 3.2. Sıvı ortam borlanmasında kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri [30].

Malzeme	Formül	Molekül Ağırlığı(gr/mol)	Teorik Bor Miktarı(%)	Erime Sıcaklığı(°C)	Açıklama
Borax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 10 \text{H}_2\text{O}$	381.42	11.35	----	Su miktarından dolayı eritmek için
Susuz Borax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	201.26	21.50	741 °C	20 °C de 25,2 gr/lt H_2O çözünür.
Metabor Asidi	HBO_2	43.83	24.69	---	---
Sodyum Borflorit	NaBF_4	109.81	9.85	---	---
Borik Asit	B_2O_3	69.64	31.07	450 °C	20 °C de 25,2 gr/lt H_2O çözünür.
Borkarbür	B_4C	55.29	78.28	2450 °C	---

3.2.1. Daldırma Yöntemi

Elektrolizsiz ergitilmiş tuz eriyiği veya normal sıvı ortam borlaması olarak da adlandırılır. Bu yöntem genelde B_4C 'in katı fazı ile sıvı sodyum klorit ($NaCl$) den ibarettir. Bu da boraksın viskozite azaltma yöntemleriyle elektrolit olarak erimesi esasına dayanır [17].

Ortamın esas bileşeni boraks olup, aktivatör olarak B_4C , SiC , Zr , B , vs. kullanılır. Klorürlerin karışımı veya klorürler ile floritlerin karışımına bor karbür ilavesi ile yada erimiş boraks banyolarına bor karbür ilave edilerek yapılır. Bu yöntem ucuz ve fazla ihtisas istemez. Fakat termal şok, borlamadan sonra parçanın temizlenmesi, büyük boyutlu ve kompleks parçalara uygulanmaması, metodun kötü yönleridir. Çalışma sıcaklığı $800 - 1000$ °C ve borlama süresi 2 - 6 saattir [27].

3.2.2. Elektroliz Yöntemi

Yüksek sıcaklıkta tuz banyosu, elektrolit iş parçası katot ve grafit çubuk anot olarak işlem gerçekleştirilir. Tuz banyosu ise ergitilmiş boraktır. Bu yöntem laboratuvar çalışmalarında gayet iyi sonuçlar vermiştir. Ancak ergimiş boraksın viskozitesinin çok yüksek olması, endüstriyel uygulamalarda sıcaklığın homojenliğini engeller yani boraks eriğinin yüksek viskozitesi 850 °C 'nin altında borlamayı pratik olarak imkânsız kılar. 850 °C 'nin üzerinde ise banyodaki düzgün sıcaklık dağılımı oldukça güçleşir [27].

Farklı akım şiddetleri, özellikle karmaşık şekilli parçalarda borür tabakasının kalınlığının düzgün olmasına neden olur. Bu yöntemde iş parçası bir tuz tabakasıyla kaplanır ki bunu temizlemek oldukça masraflıdır. Elektrolizle borlama da anodun bir tarafında ince borür tabakası oluşur. Bu da gölge etkisi yaparak değişik ve düzensiz kalınlıklara sebep olur. Sodyum klorür ve borasit anhidritin karışımı ile yapılan çalışma sonucu banyodaki sıcaklık dağılımının eşit olduğu, parçaların daha kolay yıkandığı ve viskozitenin azaldığı görülmektedir. Ayrıca $NaCl$, B_4C ve $NaBF$ bileşiminden oluşan tuz eriğinde diğer problemler çıkmaktadır. Bu yöntemin tesisatı pahalıdır ve karmaşık şekilli parçalarda homojen kalınlıklı tabaka oluşumu oldukça zordur. İşlem $800 - 1000$ °C arasında 0,5 - 5 saat süre ile yapılır. Banyo

bileşimlerinde 0.2 A/cm^2 akım yoğunluğu, $600 - 700 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık ve 2 - 6 süre şartlarını kullanarak sade karbonlu çelikte $15 - 70 \text{ }\mu\text{m}$ kalınlıkta borlu tabaka elde edilmiştir [17].

Elektrolizin ana bileşimi boraks ve borik asittir. Ana bileşene ilaveten NaF, NaCl gibi aktivatörler kullanır. Bu aktivatörlerden ayrıca banyonun akışkanlığını artırması istenir [27].

3.2.3. Derişik Çözeltide Borlama

Boraks ve Borasitli anhidriti içeren derişik ortamlarda yüksek frekanslı ısıtmayla deneyler yapılmıştır. Belli bir bor difüzyonu sağlandığı halde birleşik tabakalar elde edilememiştir. Boraks ve borasidi anhidriti içeren değişik miktarlı çözeltilerde yapılan deneyler kapalı borür tabakası vermemiş ve $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 10 dakika süre ile $0,1 \text{ A/cm}^2$ ve 450 kHz frekans ile doymuş boraks çözeltisinde tabakalar elde edilmiştir. Bu yöntem esnasında açığa çıkan bor halojenleri ilgili (uygun) asit oluşumları altında su ile kuvvetli reaksiyona girerler. Bu sebeple derişik çözeltide borlama başarılı olmamıştır [29].

3.3. Gaz Ortamda Borlama

Gaz ortamda borlamada, bor kaynağı olarak bor halojenürleri, diboran ve organik bor bileşikleri kullanılır. Gaz borlayıcıların en önemli üstünlüğü, gaz sirkülasyonunun sonucu olarak daha üniform bir bor dağılımının sağlanabilmesi ve elde edilmelerinin kolay olmasıdır. Prensip olarak gaz ortamda borlamada, bor potansiyelinin ayarlanabilmesinden dolayı, tek fazlı tabaka elde etmek mümkündür [2].

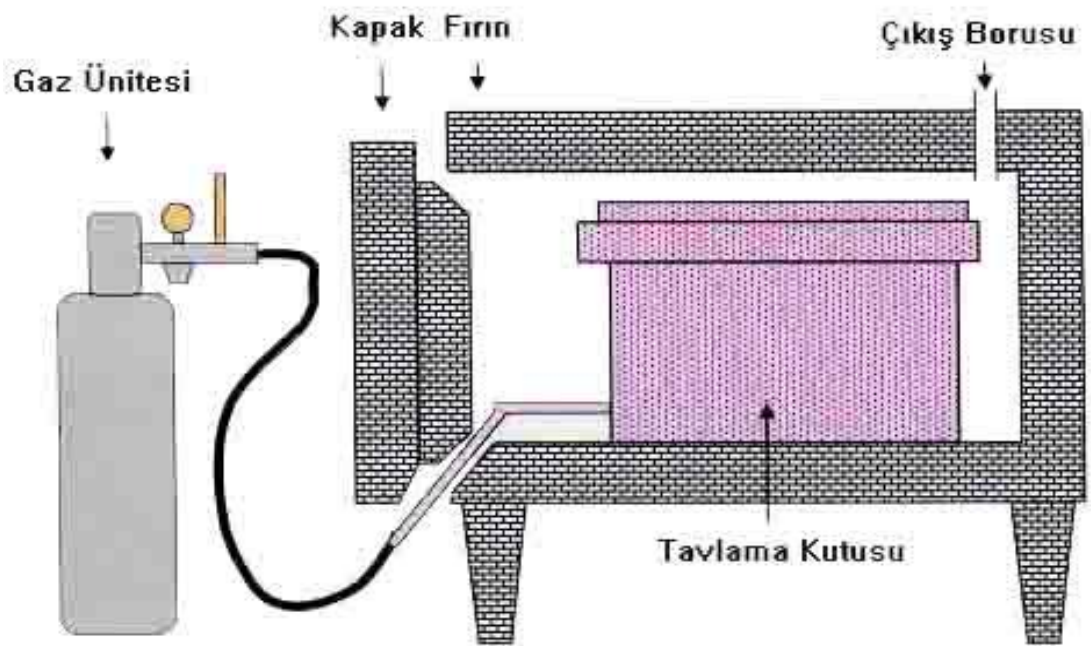
Gaz borlama bileşikleriyle çalışmak için komplike cihazlar gereklidir. Buna ilaveten bazı sakıncalı tarafları daha vardır [2].

1) Diboran, kullanılan temel bileşiktir ve çok zehirlidir. Diboran 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.

2) Diboran, hidrojen ile karıştırıldığında bile çok pahalıdır.

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, triemetilbordan daha kuvvetlidir.

4) Bor halojenürleri korozyona sebep olabilirler. Gaz ortamın bileşimi, basıncı ve gazın tanktan akış hızı borlamayı etkiler.



Şekil 3.3. Gaz ortamda borlama tertibatının şematik gösterimi [3].

3.4. Plazma Borlama

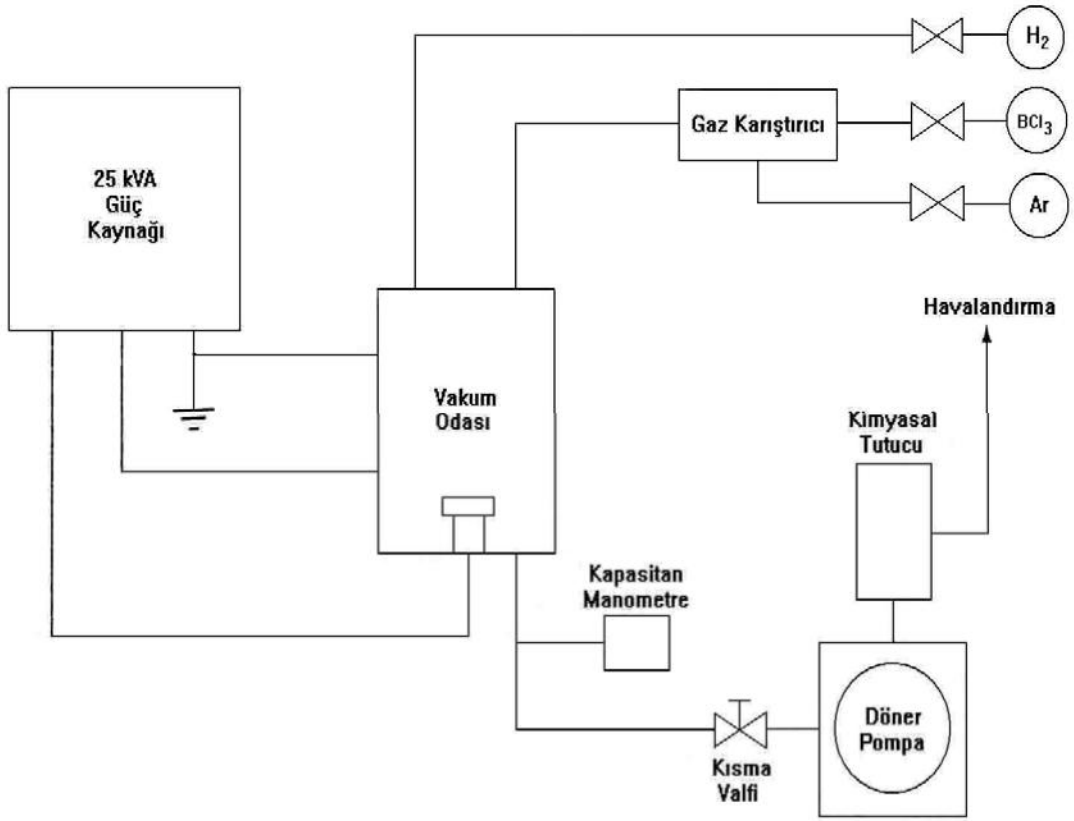
$B_2H_6-H_2$ ve BCl_3-H_2Ar 'un karışımları plazma borlama işleminde başarılı bir şekilde kullanılır. Bahsedilen $B_2H_6-H_2$ gaz karışımı bir paket veya sıvı ortam borlama prosesi ile mümkün olmayan 600 °C gibi düşük sıcaklıklarda çeşitli çelikler üzerinde borlu tabaka üretmek için kullanılmaktadır [31].

BCl_3-H_2Ar gazlarının karışımı içinde plazma borlamanın BCl_3 konsantrasyonunun daha iyi kontrol edilmesi, kalıntı gerilmenin azalması ve borlu film tabakalarının daha yüksek mikro sertliği gibi olumlu özellikler gösterdiği iddia edilmektedir. Şekil 3.4 'te bir plazma borlama imalathanesinin şematik bir planı gösterilmektedir [31].

Plazma borlamanın avantajları şunlardır [31].

- 1- Borlanan tabakanın bileşim ve derinlik kontrolü yapılabilmektedir.
- 2- Klasik paket borlamaya kıyasla daha yüksek bir bor potansiyeli vardır.
- 3- Daha ince borlu tabakalar elde edilebilmektedir.
- 4- İşleminde kullanılan sıcaklık ve uygulanan işlem süresinde azalma vardır.
- 5- Yüksek sıcaklık fırınlarına ve gerekli aksesuarlara ihtiyaç yoktur.
- 6- Enerji ve gaz sarfiyatında tasarruf sağlanmaktadır.

Plazma borlama işleminin en önemli dezavantajı, kullanılan atmosferin aşırı zehirli olmasıdır. Sonuçta bu işlem ticari yönüyle kabul görmemiştir [31].



Şekil 3.4. Plazma borlama tesisat şeması [31].

3.5. Borlama İşleminin Avantaj ve Dezavantajları

3.5.1. Borlama İşleminin Avantajları

- Borlama işleminin en önemli özelliği, elde edilen borür tabakasının çok yüksek sertlik (1450 - 5000 HV) ve yüksek ergime sıcaklığına sahip olmasıdır. Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme yöntemleri olan sementasyon ve nitrürasyonla elde edilenlere göre çok daha yüksektir.
- Borür tabakalarının yüksek yüzey sertliğine ve düşük sürtünme katsayısına sahip olmaları; adhesiv, kimyasal tribo - oksidasyon, yüzey yorulması ve abrasiv aşınma gibi temel aşınma mekanizmalarının oluşumunu önlemede çok önemli yararlar sağlar. Bu sayede kalıp üreticilerinin, pahalı ve zor

işlenebilen takım çelikleri yerine, üstelik orijinal malzemeninkinden daha üstün özelliklere ve aşınma direncine sahip olan kolay işlenebilen çelikleri kullanabilmeleri mümkün olmuştur. Bu da takım ve kalıp ömrünü artırdığı gibi yağlayıcı kullanımını da azaltır.

- Borür tabakası, yüksek sıcaklıklarda bile sertliğini korumaktadır.
- Katı ortam borlamasında yüzey oldukça temiz çıkmakta, ayrıca temizleme işlemine gerek kalmamaktadır.
- Kutu borlamasının kolay uygulanması, toz bileşiminin değiştirilebilmesi, çok az ilk yatırım maliyetinin olması nedenleriyle oldukça ekonomiktir.
- Isıl işlem uygulanabilen malzemeler, performanslarının geliştirilmesi amacı ile borlama sonrası tamamen sertleştirilebilirler.
- Borlama; bir iş parçasının sertleştirilmesi istenen seçilmiş bölgelerin ve düzensiz karmaşık şekilli parçalara düzgün ve dengeli olacak şekilde uygulanabilir.
- Soğuk yapışma kaynağına olan eğilim azalır.
- Borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin oksitleyici olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerin erozyon direncini arttırdığından; bu özellikleri nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Borlama işlemiyle, düşük alaşımlı çeliklerin H₂SO₄, H₃PO₄ ve HCl gibi etkili asitlere karşı direncini artırmak mümkündür.
- Borlanmış yüzeyler, 850 °C dolaylarındaki yüksek sayılabilecek sıcaklıklarda orta seviyede oksidasyon direncine ve oldukça yüksek sayılabilecek düzeyde ergimiş metal korozyon direncine sahiptir.

- Borlama, oksitleyici ve korozif ortamlarda parçanın yorulma ömrünü artırır.
- Borlama yüzeyini çok hassas bir şekilde parlatmak mümkündür [32, 33, 34, 35, 36].

3.5.2. Borlama İşleminin Dezavantajları

- Borlama teknikleri esnek değildir. Gaz ortamda sementasyon ve plazma nitrürasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre işçilik ve işletim maliyetleri daha yüksektir. Daha esnek olan gaz karbürizasyonu ve plazma nitrürasyonu işlemlerinin kısa sürede ve daha kolay gerçekleşmesi borlamaya göre bazı avantajlar sağlamaktadır. Buna rağmen; yüksek sertlik ve kalıcı yüksek aşınma korozyon direncinin arzu edildiği durumlarda borlama işlemi tercih edilmektedir. Ucuz iş gücü temin edilebilen yerlerde de borlama tercih edilen bir işlemdir.
- Borlamaya tabi tutulan malzemelerde bor tabaka kalınlığının % 5 – 20 'si oranında boyutsal artış gözlenmektedir. Örneğin, 25 μm 'lik bir tabaka kalınlığı, 1,25 – 6,25 μm 'lik bir büyümeye neden olmaktadır. Bu kalınlık artışı borlanan malzemenin cinsine ve borlama koşullarına 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.
- Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı zorlanmalarda yorulma özellikleri, ~ 2000 N 'luk yük altında bulunan yüksek basınçlı yüzeylerde karbürizasyon ve nitrürasyonla kıyaslandığı zaman çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği nedeniyle, dişli üretiminde bir sınırlama söz konusu olmaktadır.

- Bu yöntemin işlem parametrelerinin kontrol yeteneğinin çok kötü olması, otomasyonun mümkün olmaması nedeniyle, elle çalışma zorunluluğu gerektirmesi ve atık ürünlerin çevreye verdiği olumsuz ve zararlı etkilere sahiptir.
- Borlama sonrası ısıtılacak olan çeliklerde borür tabakasının özelliklerinin korunması için soy gaz atmosferi veya vakum altında çalışmak gerekmektedir [32, 34].

4. BORÜR TABAKASININ ÖZELLİKLERİ

4.1 Borür Tabakası

Borür tabakalarının yapısı; borlama yöntemine, borlanan malzeme bileşimine, borlama ortamına ve işlem şartlarına bağlı olmak üzere ya düz bir şekilde (örneğin yüksek alaşımlı çeliklerde) ya da parmaklı türde (zig zag) şekilli olabilir. İşlem süresi arttıkça parmaklı türdeki borür tabakalarında maximum ve minimum kalınlıklar arasında ki farklar artar [37].

Yayınma yönüne bağlı olarak; kolonsal bir yapı sergileyen tek fazlı Fe_2B fazı, çift fazlı $Fe_2B + FeB$ fazlarına göre daha çok tercih edilir. Çünkü oluşum sırasında FeB ve Fe_2B fazları birbirlerine basma ve çekme gerilmeleri uygulamakta ve çoğu zaman bu gerilmeler nedeniyle iki faz arasında çatlaklar oluşmaktadır. (FeB : Çekme gerilmesi, Fe_2B : Basma gerilmesi oluşturmaktadır) [38].

Dış etkenler, örneğin termal şok ve mekanik zorlamalar, bu yapıların zamanla ayrılmasına ve yüzeyden kopmalara neden olur. Farklı termal katsayılarından dolayı FeB / Fe_2B çift faz tabakasının ara yüzeyinde çatlaklar oluşur. Bu durum nedeniyle mekanik yüke maruz kaldıklarında pul pul dökülme gerçekleşir [39].

Bu nedenle minimum FeB fazı içeren tabakalar elde edilmeye çalışılmalıdır. Tek Fe_2B fazı çift fazlı yapıdan daha yüksek aşınma direnci ve mekanik özellikler gösterir. En az aşınma Fe_2B fazında, en fazla aşınma ise daha sert (1800 – 2000 VSD) FeB fazında olan tabakada meydana gelmektedir. En yüksek aşınma dayanımının FeB içermeyen tabakalarda, yani sadece Fe_2B fazından oluşan tabakalarda elde edildiği deneylerle bulunmuştur [40].

Demir esaslı malzemelerde borlama sonucunda, Fe₂B fazının hakim olduğu dış yapısına benzer kolonsal bir yapı oluşur. Çift fazlı Fe₂B + FeB tabakası, vakum altında 800 °C 'de uzun süreli ısıl işleme tabi tutulduğunda tek fazlı Fe₂B fazı elde edilebilmektedir. Bu fazların yanında yüksek karbonlu çeliklerde ve dökme demirlerde Fe₃(B, C) ve Fe₅(B, C) tipi fazlar da oluşabilir. Tablo 4.1 'de FeB ve Fe₂B fazlarının tipik özellikleri verilmektedir [38].

Çizelge 4.1. FeB ve Fe₂B fazlarının tipik özellikleri [38].

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Kristal Yapı	Hacim merkezli tetragonal	Ortorombik
Kafes Parametresi (Å)	a = 5.078, c = 4.28	a = 4.053 , b = 5.495 c = 2.946
Mikrosertlik (GPa)	18 - 20	19 - 21
Elastisite Modülü (Gpa)	280 - 295	590
Bor içeriği (% ağırlıkça)	8.83	16.23
Yoğunluk (gr / cm ³)	7.43	6.75
Termal genişleme katsayısı Ppm / °C	7.65 (200 - 600 °C) 4.25 (100 - 800 °C)	23 (200 - 600 °C)
Ergime sıcaklığı (°C)	1389 - 1410	1540 - 1657
Termal İletkenlik (W / m.°K)	30.1 (20 °C)	12.0 (20 °C)
Elektriksel Direnç (10 ⁻⁶ cm)	38	80
Curie Noktası (°C)	742	325
Renk	Gri	Gri

Borlama demir grubu malzemelerin akma ve kopma dayanımlarını % 10 - 20, yorulma dayanımını % 25 ve korozyonlu yorulma ömrünü % 200 arttırmasına karşın, plastisite özelliklerini kötü yönde etkiler [37].

Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertlikleri ve yüksek aşınma mukavemetleri ile tanınırlar. Eğer ortamda aşırı bor oranı mevcutsa ya da yüzeye geçişen bor oranı yüksekse, Fe₂B fazı (% 8,84 B) yanında, borca zengin FeB (% 16,25 B) fazı da meydana gelebilir. Yüksek iç gerilmeye sahip olduğundan ve Fe₂B tabakasının üzerinden kavlanarak döküldüğünden dolayı FeB fazının oluşumu arzu edilmez [30, 41]. Borlu tabakanın aşınma dayanımı ve özellikleri, tabakanın tek veya çift fazlı olduğuna ve oluşum biçimine bağlıdır. En az aşınmanın daha tok ve sünek Fe₂B fazında, en fazla aşınmanın ise daha sert ve

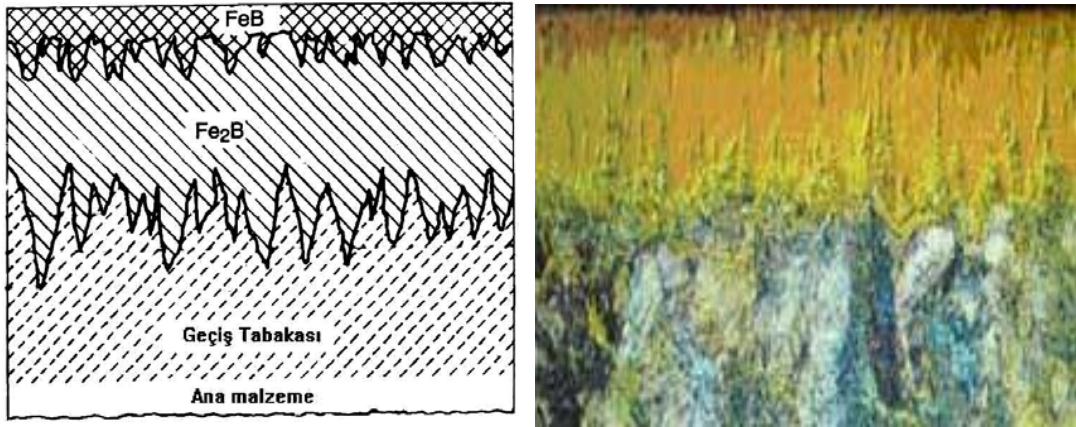
gevrek olan FeB fazında (1800 - 2000 HV) olan tabakada meydana geldiği bilinmektedir. En yüksek aşınma dayanımının FeB içermeyen, yani sadece Fe₂B fazından oluşan tabakalarda elde edildiği deneylerle bulunmuştur [41]. Borlama işleminde, borun yüzeye yayılması sonucu parçanın en üst bölümünde bileşik tabaka adı verilen borlu bölge, onun altında yayınma bölgesi ve en iç kısımda ise matrisi oluşturan çekirdek bölgesi yer alır. Yüzeyde borca zengin FeB en üstte oluşurken, onun hemen altında daha homojen ve sünek olan Fe₂B olmak üzere iki demirborür fazı meydana gelir. Termal uzama katsayıları farklı olan bu iki fazın, yapıda aynı anda birlikte bulunmaları istenmez. Yapıda bulunan krom (Cr), tungsten (W), molibden (Mo) vs. alaşım elementleri, bor elementine karşı gösterdikleri yüksek afiniteden dolayı, tabaka kalınlığının düşmesine neden olurlar [42].

Paslanmaz çelik malzemeler üzerine yapılan borlamalarda, yüzey üzerinde nikelin az çözünürlük gösterdiği bir bor tabakası oluşur ve fazla nikel, bor tabakasının altında nikelce zengin tabaka oluşturacak şekilde malzeme içine doğru yayılır. Krom elementinin bir kısmı bor tabakasında çözünürken, geri kalan kısmı nikelce zengin alt tabakada ve bor karbürlerin oluşturdukları tabakalar arasında birikerek kromca zengin bir tabaka oluşumuna neden olurlar [43].

Demir dışı alaşımlarda, örneğin titanyum ve alaşımlarının borlanması, yüzeyde sertlik değeri 3200 HV 'e ulaşan TiB ve TiB₂ tabakaları elde edilmektedir [36].

Alaşımız çeliklerde borlama şartlarına bağlı olarak tek fazlı (Fe₂B) yada çok fazlı (FeB + Fe₂B) borür tabakası oluşur. Borlama ortamındaki bor miktarı Fe₂B fazı oluşumu için gerekli olan miktardan fazla ise uygun sıcaklık ve zaman şartlarında borür tabakasında Fe₂B fazına ilaveten FeB fazı da oluşur. Alaşımlı çeliklerde ise bunlara ilaveten alaşım elementine bağlı olarak Cr₂B, TiB₂, NiB₂, CoB gibi bileşiklerden biri yada birkaçı oluşabilir [18].

Şekil 4.1 'de alaşımsız bir çelikte iki fazlı bir borür tabakası gösterilmiştir. En dış bölümde FeB fazı, onun altında Fe₂B, onun altında geçiş bölgesi, onun da altında ana malzeme görülmektedir. Borür tabakasının pürüzlülük derecesi, temel materyal ile söz konusu malzemenin ihtiva ettiği alaşım miktarına bağlıdır. Kuvvetli pürüzlülük karbonlu çelikler ve düşük alaşımlı dökme çeliklerde ortaya çıkar. Alaşım elementinin miktarının artması ile pürüzlülük zayıflar, öyle ki örneğin ; % 18 Cr ve % 8 Ni ile çeliklerde düz katmanlı tabaka meydana gelir [3].

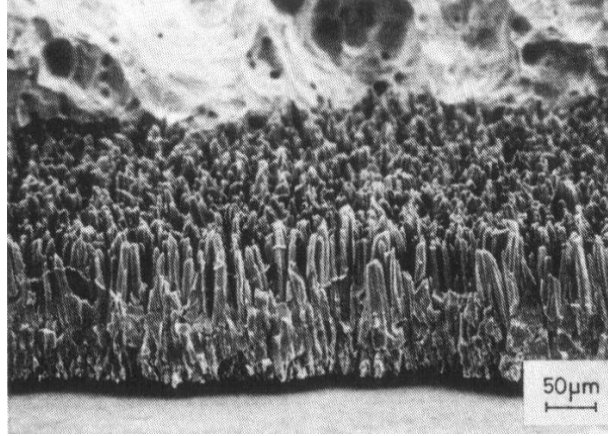


Şekil 4.1. Borlama sonrası alaşımsız çelikte FeB ve Fe₂B fazlarının içyapı görüntüsü [3, 44].

FeB ve Fe₂B optik mikroskop altında kontrast farkıyla birbirlerinde ayırt edilmesi mümkün olmuştur. FeB fazı Fe₂B fazından daha koyu renkte olduğu görülmüştür. Ayrıca FeB ile Fe₂B ve Fe₂B ile matris ara yüzeyindeki yapı kolonsaldır. FeB fazı, Fe₂B üzerinde oluşmakta ve Fe₂B fazından daha fazla bor içermektedir. Bor tabakasının kalınlığı borlama sıcaklık ve süresine bağlı olarak artış göstermektedir [45].

Borür tabakasının karakteristik özelliği dış şeklinde bir yapıya sahip olmasıdır. Çeliklerdeki alaşım elementi ve karbon oranının artmasıyla bor difüzyonu yavaşlamaktadır. Bunun sonucu olarak borür tabakasında hem kalınlık azalmakta, hem de borür tabakası ile ana malzeme ara yüzeyindeki dış şeklindeki yapı düzleşmektedir [18].

Taramalı elektron mikroskopunda elde edilen; borlanmış bir çeliğin % 18 hidroklorik çözeltisi içinde birkaç saat kaynatılması sonrası çözünmüş, yaklaşık 120 µm uzunluğunda dış biçimli demirborür kristalleri (Fe₂B) Şekil 4.2. 'de görülmektedir [3].



Şekil 4.2. Dış biçimli demirborür kristalleri (Fe₂B) [3, 26]

Fe₂B ve FeB'ye ait bazı özellikler Çizelge 4.2 'de verilmiştir [27].

Çizelge 4.2. Fe₂B ve FeB'nin bazı özellikleri [27, 44].

Özellik	Borür	
	Fe ₂ B	FeB
Ergime Noktası (° C))	1390	1550
Mikro sertlik (Vickers)	1600-1800	1800-2400
Uzama Katsayısı (1000 ° C)	8.0x10 ⁻⁶ K ⁻¹	10-160x10 ⁻⁶ K ⁻¹
Termal İletkenlik (1000 ° C)	0.2-0.3 W/cm °C	0.1-0.2 W/cm °C
Kuri (Curie) Noktası (° C)	742	325
Kristal Sistemi	Tetragonal Hacim Merkezli	Ortorombik
Kafes Parametreleri (Å ⁰)	a: 5.075 b: 4.249	a: 4.053 b: 5.495 c: 2.496
Yoğunluk (gr/cm ³)	7.32	-

4.2. Geçiş Bölgesi:

Borür tabakası ile borlanan matris (ana) arasındaki bölge, geçiş bölgesi olarak adlandırılır. Borlama işlemi esnasında çelik bileşiminde bulunan elementler bu bölgede yeniden dağılırlar [46, 47].

Geçiş bölgesi, borlanmış metalde borür tabakası ile ana metal arasındaki ara bölgeyi tanımlar. Geçiş bölgesi ile alakalı farklı görüşler olmakla birlikte yaygın olan görüş; borlama sonucu oluşan borür tabakasında karbon çözünemediği için metalin yapısında bulunan karbon, bor difüzyonu sırasında yüzeyden iç kısımlara itilir. Bunun sonucu olarak karbonca zengin geçiş bölgesi oluşur [30].

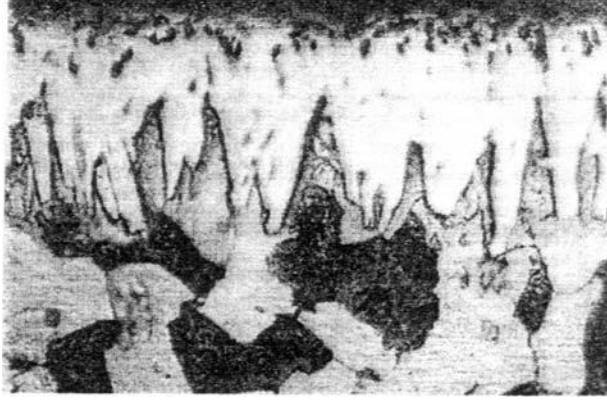
Borür tabakası tarafından karbonun içeri doğru itilmesi sonucu bu bölgede esas malzemeye göre daha fazla perlit bulunduğu ileri sürülmektedir. Geçiş bölgesindeki karbon miktarının ana malzemedeki seviyesini koruduğunu, buna karşılık borun yüzeyden içe doğru tedrici olarak azaldığını tespit etmiştir [27].

Geçiş bölgesi hakkında başka bir görüş; bu bölgedeki borun çeliklerde alaşım elementi olarak gösterdiği etkiyi göstermesinden kaynaklanan farklı özelliklere sahip olmasıdır. Bu bölgenin ısıtılma hassasiyeti, borun ostenit dönüşümünü yavaşlatmasındandır. Ayrıca bu bölgede gözlenen ostenit tane irileşmesi de, borun alaşım elementi olarak çeliklerde gösterdiği tipik özelliklerdendir [27].

Geçiş bölgesinin kalınlığı konusunda da farklı değerlendirmeler mevcuttur, geçiş bölgesi kalınlığını borür tabakasının 3 - 4 katı olarak bildirmişlerdir [48]. Bu oranın 10 - 15 kat olduğunu tespit etmiştir [27]. Geçiş bölgesinin tane büyüklüğü ise ana malzemeye göre oldukça fazladır demiştir [18].

Yüzey tabakalarının incelendiği bir borlama işlemi deneyinde, deney numunesi olarak kullanılan AISI 1020, AISI 1040 çeliklerinin aynı şartlarda borlandığında, birbirinden farklı özelliklere sahip yüzey tabakaları sergiledikleri görülmüştür. Bu özellikler alaşım ve alaşımsız çeliklerde aşağıdaki şekilde gözlenmiştir. Düşük ve alaşımsız çeliklerde borlama sonucu oluşan yüzey tabakası

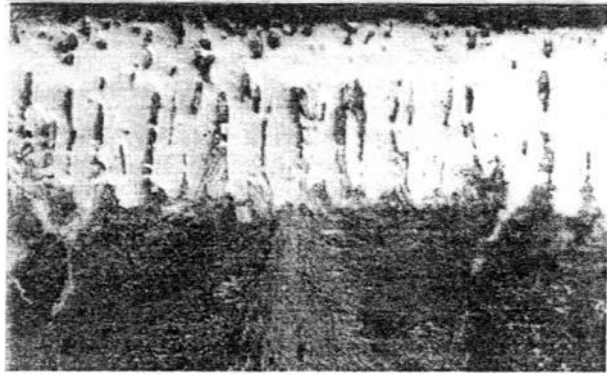
Şekil 4.3. 'de görüldüğü gibidir [21].



Şekil 4.3. Borlanmış AISI 1020 çeliğinde yüzeyin mikroyapısı [21].

Burada en dışta (malzeme yüzeyinde) borür tabakası görülmektedir. Borür tabakası; dişli forma sahip, açık beyaz renktedir. Borür tabakasının ana malzemeye bağlantısı bir geçiş bölgesi üzerinden olmayıp, doğrudan tane sınırlarına ve tane içlerine uzanan dişlerle gerçekleşmiştir [21].

Alaşımli AISI 4140 çeliğinin borlanması neticesinde elde edilen yapı Şekil 4.4. 'de görülmektedir. Malzeme yüzeyinde açık renkli dişli forma sahip borür tabakası bulunmaktadır. Borür tabakasının ana malzemeye bağlantısı, ana malzemeden ve borür tabakasından farklı özelliklere sahip bir geçiş bölgesi üzerinden gerçekleşir. Geçiş bölgesi alaşımli ve yüksek karbonlu çeliklerde meydana gelmektedir. Tane sınırları belirli olmayıp koyu renkte perlitik bir görünüme sahiptir [21].

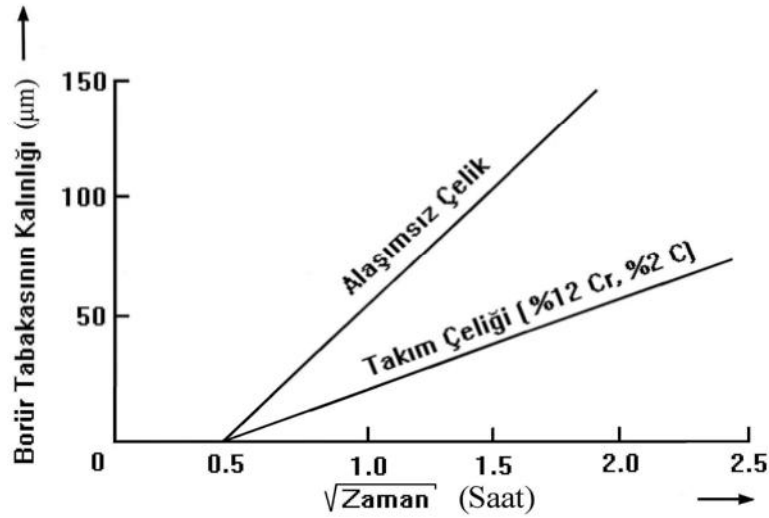


Şekil 4.4. Borlanmış AISI 4140 çeliğinde yüzeyin mikroyapısı [21]

4.3. Borürlü Tabakanın Yapı ve Bileşimine Alaşım Elemanlarının Etkisi:

Genel olarak bütün alaşım elementleri için tabaka kalınlığında bir azalma tespit edilmiştir. Alaşım elementleri bor difüzyonunu azaltmakta, ana malzeme ve borür tabakasının özelliklerini değiştirmektedir [18].

Çelik içinde C ve Si miktarı arttıkça FeB stabilitesi azalmakta, % 1.2 - 1.25 C 'lu çelikte FeB tamamen yok olmaktadır. Periyodik tablonun aynı bölgesinde yer alan Si, P, N, Ti, V, Nb, Ta 'da karbon gibi etki etmektedir. V 'nin % 0.15 'i geçmemesi istenir. Cr, Mo, W, Mn, Ni 'nin FeB ve Fe₂B 'ye etkisi aynıdır ve alışla gelmiş konsantrasyonları için bor difüzyonuna etkisi ihmal edilebilir. Ayrıca bu alaşım elementlerinden W, Mo ve Cr 'un miktarı çelik içinde arttıkça borlanmış parçanın yüzey pürüzlülüğü azalır. Şekil 4.5. 'de eşit şartlarda Borlama işlemiyle, alaşımlı (takım çeliği) ve alaşımsız çeliklerde elde edilen borür tabaka kalınlıkları gösterilmektedir [27].



Şekil 4.5. Alaşımlı ve alaşımsız çeliklerde eşit şartlarda borlama ile elde edilen borür tabaka kalınlıkları [27].

Alaşımlı çeliklerin borlanması sırasında alaşım elementlerinden Co, Ni ve Mn 'nın oluşan Fe₂B tabakasının derinliğini artırdıkları saptanmıştır. Dikkati çeken bir nokta da, borür tabakasının karbon içermemesi ve silisyum çözünürlüğünün de

çok düşük olmasıdır. Borlama esnasında Si ve C, borür tabakası tarafından içeri doğru itilerek geçiş zonunda C ve Si zenginleşmesine yol açtığı ileri sürülmüştür. % 1 'in üzerinde Si içeren çeliklerde borür tabakası altında silisyumca zengin bir tabaka görülmekte ve bu ferrit çukuru olarak adlandırılmaktadır. Özellikle darbe ve lokal basınçlara maruz kalan borlanmış parçalarda Si içeriği % 0.7 'nin altında olması istenir [3].

Karbon, borür tabakasının sertliğinde artışa sebep olmakta ancak bu artış % 0.4 karbona kadar devam etmektedir [49]. Karbon, ötektoid üstü çeliklerde borun difüzyonuna kuvvetle engel olur ve esasen daha ince tabaka kalınlığına neden olur. Bu görünüm ostenit içinde karbonun çözünürlüğünün artması ile borun toplanması sayesinde ve böylece borür dışların büyüme frontunda sementitten ayrılmaya sebep olduğu izah edilmektedir. Ötektoid altı çeliklerde karbonun borlanabilirliğe etkisi farklı şekillerde yorumlanır. Artan karbon miktarı, borür tabakası kalınlığının açıkça azalmasına götürdüğü anlayışı kabul edilmektedir [50].

Alaşım elemanının orijinal malzemede yaptığı etki, borlanan yüzeyde “bor” un etkisiyle birleşerek daha büyük ölçülere varabilmektedir. Yani borlu yüzeylerdeki sertlik, borürlerin cinsi, miktarı ve oryantasyonuna bağlıdır. Her ne kadar Mn ve Cr borürlerle birlikte demir borürlerin rolü var ise de, yüzeyi borla kaplı karbon çelikler ve özel alaşımlı çelikler arasındaki yüzey sertlik farkı izahını sadece alaşım elementlerine bağlamak gerekir [49].

4.4. Borlu Tabakanın Mekanik Özellikleri

Borlama demir grubu malzemelerin kopma ve akma mukavemetlerini % 10 - 20, yorulma dayanımlarını % 25 ve korozyonlu yorulma ömrünü % 200 arttırmasına karşılık plastisite özelliklerini azaltır. Borlu tabaka özelliklerine ait çalışmalar daha ziyade sertlik, aşınma ve korozyon özelliklerine yöneliktir [18].

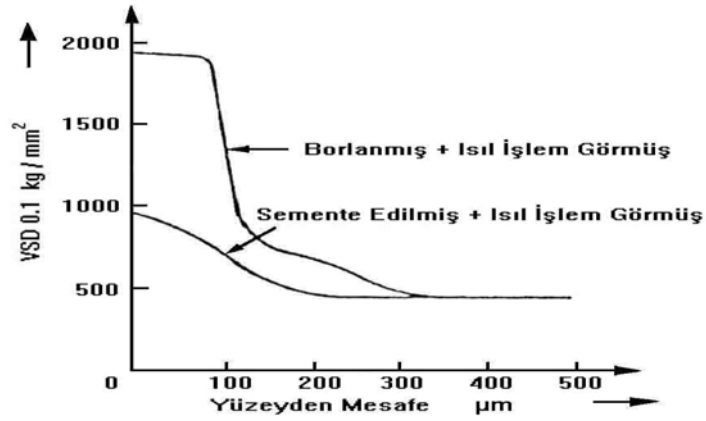
4.4.1. Sertlik

Borlamanın en büyük etkisi sertlik üzerine olup, ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak borür fazlarına bağlıdır. FeB fazı Fe₂B 'den daha sert ve gevreklerdir [5 1] .

Borlamada elde edilen sertlik; karbon çeliklerinde 1800 - 2000 HV, alaşımlı çeliklerde 2500 - 2800 HV, titanyumda ise 3000 HV civarındadır. Şekil 4.6. 'da borlu ve sementasyonlu tabakalardaki sertlik dağılımları kıyaslanması görülmektedir. Çizelge 4.3. 'de ise borlama ve diğer işlemlerle elde edilmiş yüzeylerin sertlik kıyaslamaları yapılmıştır [18].

Çizelge 4.3. Çeşitli işlemlere tabi tutulmuş malzemelerin mikrosertlik değerleri çizelgesi [45].

malzeme	Mikrosertlik, HV
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 kalıp çeliği	630-700
Yüksek hız takım çeliği BM42	900-910
Nitrülenmiş çelik	650-1700
Karbürlenmiş düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
Sementit karbürler WC + CO	1160-1820 (30 kg)
Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ seramikler	1483 (30 kg)
Al ₂ O ₃ + TiC + ZrO ₂	1730 (30 kg)
Sialon seramikler	1768 (30 kg)
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Elmas	≈ 10000



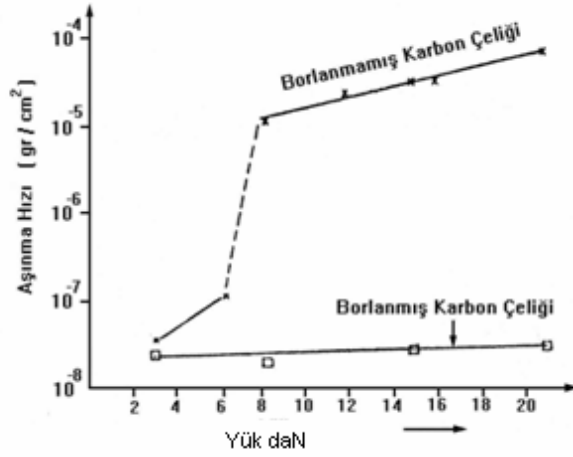
Şekil 4.6. Borlu tabaka ile semantasyonlu tabakanın sertlik dağılımları kıyaslaması [27].

4.4.2. Aşınma özellikleri

Sürtünme katsayısı ve aşınma dayanımı bir sistem özelliği olmakla birlikte, genellikle yüksek aşınma direnci için malzemenin aşındırıcıdan daha sert ve sürtünme katsayısının düşük olması istenir [51].

Borlama sonucu oldukça yüksek sertliğe sahip bir yüzey tabakası elde edilir. Her ne kadar sertlik ve aşınma dayanımı arasında doğrudan doğruya bir bağlantı yoksa da, borlama sonucu yüzeyin sertliğinin ve akma direncinin artması, sürtünen yüzeyler arasındaki temas yüzeyini azaltarak aşınma hızını düşürür. Borlanmış çelikler yüksek sertliklerinden dolayı, abrasiv aşınmaya karşı son derece dirençlidirler. Borür tabakasının kalınlığı işlem şartlarına bağlı olarak 20 µm – 300 µm arasında değişir ve teknik ömründeki artış birkaç kattır. Borun oksijene karşı ilgisi yüksek olduğundan borür tabakası üzerinde ince bir oksit filmi oluşmakta, bu tabaka metal – metal temasını geciktirir, katı yağlayıcı görevi yaparak sürtünme katsayısını düşürmektedir. Yüzeyin kimyasal bileşimi ve sürtünen yüzeylerin kimyasal kararlılığı eleman çifti arasındaki yüzey çekim kuvvetini azaltır ve dolayısıyla aşınma dayanımı artırır. Borlu tabakaların soğuk kaynak eğilimi düşüktür, ayrıca aşınmayı önlemek için yağlanmasına gerek yoktur. Bu durum özellikle adhesiv aşınmayı önlemede büyük yarar sağlar [21].

Standart “ Pin – disk ” aşınma makinesinde pim olarak borlu AISI 1116, disk olarak AISI E4340 çeliğiyle borlu veya borsuz durumların aşınma kıyaslanması şekil 4.7.’de verilmiştir [27].



Şekil 4.7. Yüze borlu ve borsuz AISI 1116 çeliğinin yüke karşı aşınma davranışı [27].

Bir başka çalışmada, borlamanın aşınma esnasındaki sürtünme katsayılarına etkisi üzerine; borlanmamış gri dökme demir numuneler ile % 66 Boraks, % 20 Ferro - Silis ve % 14 Kalsine Borik asit kullanılarak, 800 – 1000 ° C sıcaklıklarda 2 - 11 saat süre ile borlanmış gri dökme demir numuneler kullanılarak yapılan deneylerde çizelge 4.4. ’de farklı sürelerde borlanmış numuneler ile borlanmamış numunelerin sürtünme katsayıları verilmiştir [52].

Çizelge 4.4. T = 800 - 1000 °C sıcaklıklarda, t = 2 – 6 saatte borlanan ve borsuz numunelerin aşınma esnasındaki sürtünme katsayıları [52].

Normal Yük (N)	Kayma Hızı (m/sn)	Kayma Süresi (sn)	Kayma Yolu (m)	SÜRTÜNME KATSAYISI				
				Borlama Sıcaklığı: 900 °C				Borsuz
				2 saat	3 saat	4 saat	5 saat	
50	1	10	10	0.45	0.46	0.40	0.36	0.70
		30	30	0.55	0.60	0.55	0.44	0.76
		80	80	0.70	0.80	0.86	0.70	1.00
		180	180	0.85	0.85	0.73	0.72	1.30
		350	350	0.90	0.87	0.80	0.81	1.25
		650	650	1.10	1.00	1.30	0.95	1.25
		1000	1000	1.10	1.20	1.20	1.05	1.25

Sürtünme sırasında açığa çıkan ısı yüzeyin yumuşamasına ve termal kararlılığa etki eder. Borlanmış yüzeylerde ise demir - borür fazının ötektik noktası ≈ 1149 °C olduğundan sertliklerini 1000 °C 'ye kadar koruyabilmektedirler. Borlanmış yüzeyde 1000 °C 'de 1560 HV sertlik değeri elde edilmiştir. Bu nedenle borlanmış yüzeylerde; yüksek parlama sıcaklığına sebep olan yüksek kayma hızlarında dahi adhezyonun artmadığı gözlenmiştir. Borlanmış yüzeylerin iyi aşınma özellikleri; borlanmış yüzeylerde daha az yağ kullanılmasını sağlar. Daha az ya da hiç yağ kullanılmaması ekonomik açıdan ve çevrenin korunması açısından önemlidir [21].

4.4.3. Borlanmış Çeliklerin Korozyona Karşı Dayanıklılığı

Çevrenin kimyasal ve elektrokimyasal etkilerinden dolayı metalik malzemelerde meydana gelen hasara korozyon denir. Aslında malzemelerin rutubetin veya başka kimyasal bileşenlerin bulunduğu bir ortamla reaksiyona girmeleri korozyon olayını ve kuru hava ile reaksiyona girmelerini oksidasyon olayını meydana getirir [28].

Borlama, düşük alaşımlı çeliklerin, asitlere ve sıvı çinkonun korozyonuna karşı direnci artırır. Borlamaya, özellikle ostenitik çeliklerin, hidroklorik asitlere karşı korozyon direncinde büyük bir artış sağlanır. Tuz ve

sodanın sudaki çözeltilerinde takım çeliklerinin korozyon direnci borlama sonrasında artar, alkali çözeltilerinde ise azalır [46].

Demir grubu malzemelerin borlanması, bu malzemelerin bazı asit ve sıvı metallere karşı olan direncini büyük ölçüde artırmaktadır. Özellikle HCl asidi ile Al, Pb ve Zn metallerin sıvı banyolarında borlu malzemelerin korozyon dayanımı çok yüksektir [12].

Yüksek Cr 'lu çeliklerde borlama ile koruyucu krom oksit yerine daha az koruyucu olan Cr - borür meydana gelmektedir. Bu bakımdan yüksek alaşımlı malzemelerin borlanmasıyla daha iyi korozyon özelliği her zaman elde edilmeyebilir [28].

Yapılan bir çalışmada 3 saat süreyle borlanan 3 adet çeliğin % 10 H₂SO₄ içerisinde 56 °C 'deki borlanmış ve borlanmamış durumdaki kıyaslamaları çizelge 1.9 'de verilmiştir [49].

Çizelge 4.5. 4 saat süreyle borlanmış ve borlanmamış “ 3 ” adet özel hazırlanan alaşımda 56 °C sıcaklıktaki % 10 H₂SO₄ korozif ortamında ağırlık kaybı testi ile elde korozyon değerleri [49].

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

** : P₀: İlk Ağırlık P₁: Son Ağırlık P₀-P₁: Ağırlık Farkı

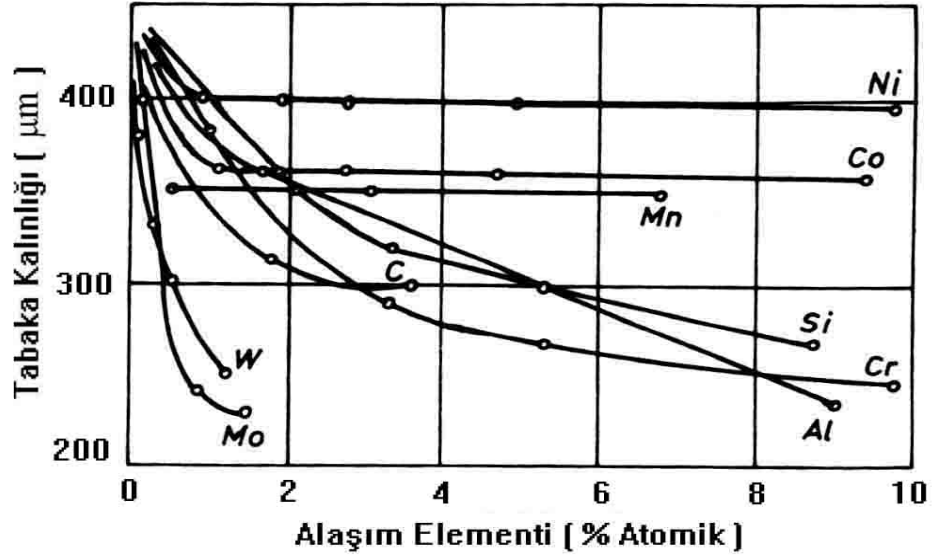
4.5. Borlu Tabakanın Kalınlığı

Teorik olarak tabaka kalınlığı sınırsızdır. Bu da işlem süresinin ve sıcaklığın artması sayesinde olur. İşlem sıcaklığının Fe - B denge diyagramındaki ötektik sıcaklığının (1149 °C) altında olması gerekir. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklar lokal erimeler yaparak malzeme yüzeyinin bozulmasına neden olur. Zaman faktörünün de ekonomik yönden mantıksal bir değeri geçmemesi gerekmektedir. Kalınlığının artmasını sınırlayan bir faktörde kırılgenlıktır. Borlanmış tabakanın kırılgenlığı, kalınlık arttıkça artar. Dolayısıyla çelik esaslı malzemeler için 20 - 200 µm 'lik kalınlık kullanma şartlarına, su verilip verilmeme ve borlanan malzeme cinsine göre ayarlanır. Kırılgenlık yönünden alaşımlı çeliklerde maksimum 100 µm alaşımsız çeliklerde 150 - 200 µm kalınlığa; hatta darbesiz aşınmaya maruz kalacak parçalarda su verme koşulu ile 400 µm ' lik kalınlığa kadar çıkılabilmektedir [18].

Bor yayındırma sıcaklığı, malzemenin cinsine, istenilen derinlik miktarına bağlı olarak değişmektedir. Borlama ile elde edilen kaplama derinliği, temel olarak malzemenin işleme hassasiyetine bağlıdır. Örneğin 130 µm 'luk kaplama derinlikleri, düşük alaşımlı ve karbon çelikleri üzerinde elde edilebilir. 50 µm 'dan daha büyük kaplama derinlikleri genellikle paslanmaz çelikler ve takım çelikleri gibi yüksek alaşımlı malzemeler için ekonomik değildir. Borlama işlemi parçalarda boyutsal değişiklik meydana getirmez [31].

Deneysel çalışmalarda, borür tabaka kalınlığının borlama süresine bağlı olarak artması, işlemin difüzyon kontrollü olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Çeliklerin yüzeyinde oluşan borür tabaka sertliğinin, yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak azalması ve süreyle birlikte artması, muhtemelen Fe₂B borürüne nazaran daha sert olan FeB borürünün derinliğinin artmasından kaynaklanmaktadır [53].

Genel olarak alaşım elementleri çelikteki bor difüzyonunu yavaşlatarak tabaka kalınlığını azaltmaktadır. % 'de alaşım elementi miktarının borür tabakası kalınlığına etkisi şekil 4.8. 'de görülmektedir [27].



Şekil 4.8. % Alaşım elementleri miktarının borür tabakası kalınlığına etkisi [27].

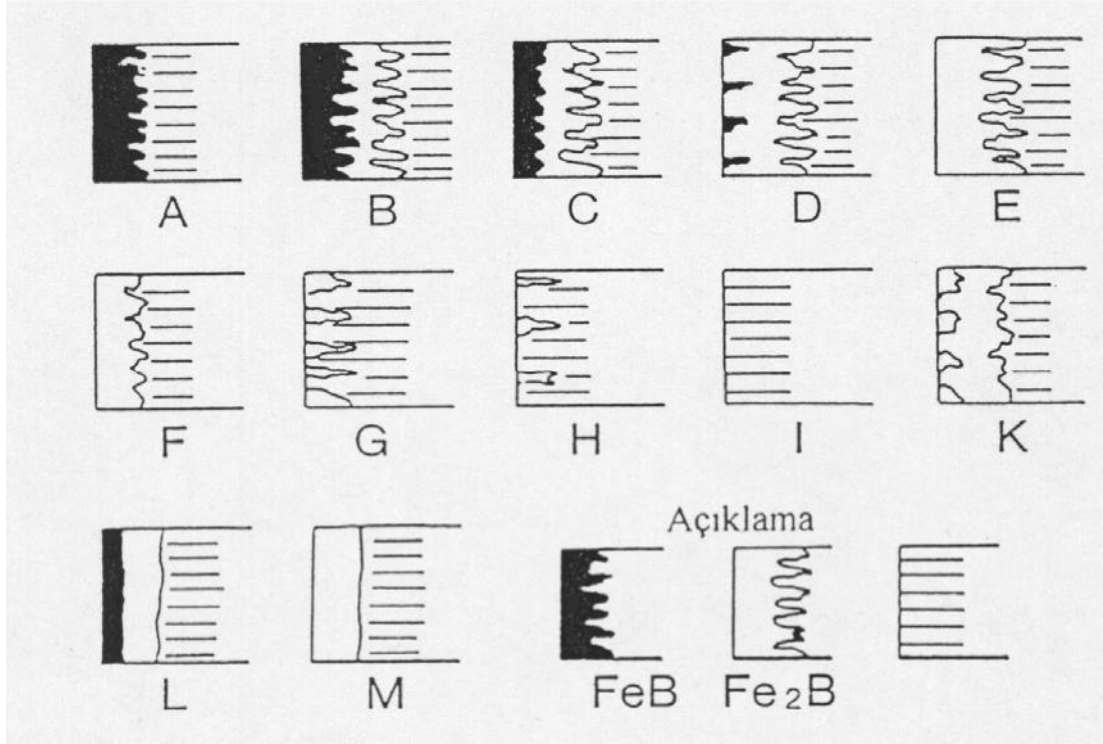
Çeliğin yüzeyinde oluşan borür tabakasının kalınlığı, borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak artmaktadır. Aynı şekilde sıcaklığın ve sürenin artmasıyla birlikte yüzeyde oluşan FeB borürünün derinliği de artmaktadır. Borür tabakası kalınlığı üzerine AISI 5140 çeliği ile yapılan bir deneyde; 850 °C 'da 2 saat borlama sonucu yaklaşık 45 (± 5) μm , 8 saat borlama sonucu yaklaşık 91 (± 7) μm ; 950 °C 'de 2 saat borlama sonucu yaklaşık 134 (± 9) μm , 8 saat borlama sonucu yaklaşık 238 (± 15) μm borür tabaka kalınlığı elde edilmiştir [53].

4.6. Bor Tabakası Çeşitleri

Çeşitli borlama yöntemleri ile 14 farklı yapıda borür tabakası elde edilebilmektedir. Kunst ve Schaaber tarafından geliştirilerek düzenlenen sistematik sınıflandırma şekil 4.9. ' da gösterilmiştir [30].

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

Bu özel tabaka tipleri aşağıdaki gibi karakterize edilebilir:



- A: Tek fazlı tabaka, sadece FeB
B: İki fazlı tabaka, Fe₂B ve FeB
C: İki fazlı tabaka, B'dekinden daha ince bir FeB tab.
D: İki fazlı tabaka, yalnız FeB dişleri izole edilmiş
E: Tek fazlı tabaka, sadece Fe₂B, kuvvetli dişler
F: Tek fazlı tabaka, sadece Fe₂B, daha az kuvvetli dişler
G: Fe₂B dişli özel tabaka
H: Fe₂B dişleri çok izole edilmiş tabaka
I: Geçiş bölgesi
K: Bozulmuş tabaka
L: İki fazlı tabaka, düz yani parmaksız değil
M: Tek fazlı tabaka, FeB ve Fe₂B, düz

F tipi Endüstride E ve yani tek fazlı borür tabakası (Fe₂B) tercih

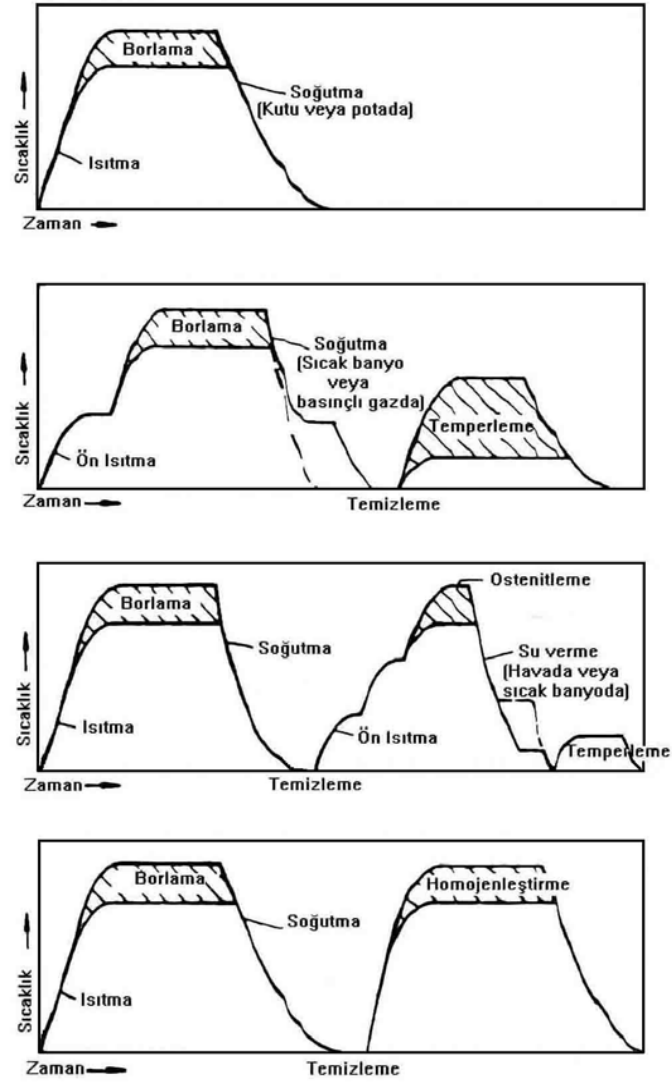
edilmektedir. Bu tabakalar, düşük kırılma katsayısına sahiptir ve ana malzemeye, borlu tabakanın özelliklerini olumsuz yönde etkilemeden; borlama sonrası ısıtma işlemleri uygulanabilir [30].

4.7. Borür Tabakasındaki Kalıntı Gerilmeler

Borür tabakasının mekanik özellikleri kalıntı gerilme ile ilgilidir. Isıl işlem, malzeme cinsi ve borlama şartlarına bağlı olarak, borür tabakası ve tabaka - ana metal ara yüzeyinde iç gerilmeler oluşur. Tabakanın faz yapısı (çift fazlı Fe_2B + FeB , tek fazlı FeB) ve geometrisi (girintili çıkıntılı veya düz oluşu), iç gerilmelerin tabakada yapacağı hasara etki eder. İdeal tabaka için tek faz (Fe_2B) ve iç gerilmenin daha geniş bir alana yayılması için tabaka geometrisinin girintili çıkıntılı olması arzu edilir. Tabakanın Fe_2B yanında FeB de içermesinin sakıncası, iki tabakada da farklı yönelmiş iç gerilmelerin oluşmasıdır. İç gerilmeler Fe_2B 'de basma, FeB 'de ise çekme gerilmesi şeklindedir. Fe_2B ile FeB arasında 90 kg/mm^2 kadar bir basma gerilmesi oluşabilmektedir. Bu tür gerilmeler tabakanın çatlamasına ve FeB tabakasının dökülerek malzeme yüzeyinin bozulmasına neden olur [18].

4.8. Borlama İşlemi Sonrası Uygulanabilen Isıl İşlemler

Borlama işleminin en önemli üstünlüklerinden biri de, borlamadan sonra matriks malzemesine istenilen ısıtma işleminin yapılabilmesidir. Matriks, malzemesinin mekanik özelliklerini iyileştirmek için yapılacak ısıtma işlemlerinin koruyucu gaz, vakum veya nötr tuz banyolarında yapılması önerilmektedir. Bu ısıtma işlemleri, eğer katı borlama yapılmışsa borlama kutusuyla birlikte, borlama işleminin ardından hızlı soğutma olarak yapılabilir. Ayrıca ılık banyo ve basınçlı gazda hızlı soğutma, ardından temperleme, ostenitleme veya matriks malzemesini homojenleştirme şekli 4.10. 'daki gibi işlemler yapılabilir [54].



Şekil 4.10. Borlamadan sonra yapılabilen ısıtım örnekleri [54].

Yüksek basınçlara maruz kalacak borlanmış parçalar, ısıtım işlemine tabi tutulmadan kullanılamaz. Borlu tabakanın altı (ana yapı) yumuşaksa, lokal basınçlar yüzünden tabaka çökmesi ve dökülmesi olabilir. Bütün difüzyon yöntemlerinde olduğu gibi borür tabakasının oluşumunda da bir hacim artışı olmaktadır. Boyut değişimi, tabaka kalınlığı ve kullanılan malzemeye bağlıdır. Boyut artışı genel olarak tabaka kalınlığının % 20 'si kadardır. Alaşımli çeliklerde ise, bu değer % 80 'e kadar çıkabilmektedir. Borür tabakasının (Fe_2B) genişleme katsayısı, çelik grubu malzemelerin ortalama genişleme katsayılarına yakın olduğundan, bu tür malzemelere borür tabakasına hasar vermeden alışılagelmiş metotlarla ısıtım işlemi uygulanabilmektedir. Ostenitleme, 1150 °C 'nin üstüne çıkmama koşuluyla, nötr atmosferde yapılmalıdır [27].

Borlu tabakalar, borlama işleminden sonra yapılan ısıl işlemlerden, sertliğini muhafaza eder. Sementasyon ve borlama işlemine tabi tutulmuş 1010 çeliğinin, sonradan farklı sıcaklıklarda ısıl işleme tabi tutulduktan sonraki sertlik mukayesesi çizelge 4.6. 'da verilmiştir [31].

Çizelge 4.6. Sementasyon ve borlama ile elde edilen sertliklere ısıl işlem sıcaklığının etkisi [31].

Isıl İşlem Sıcaklığı °C	1010 Çeliği	
	Sementasyonlu Tabaka Sertliği, HV	Borlu tabaka Sertliği, HV
200	680	1680
300	380	1500
600	330	1600
800	220	1575
1000	200	1565
% Değişim (Sertlik)	% 70	% 6

Numuneler söz konusu sıcaklıklara kontrollü atmosferde ısıtılmış ve 30 dakika bu sıcaklıklarda bekledikten sonra havada soğutulmuştur. Sertlikler oda sıcaklığında 30 gr 'lık yüklerle Vickers olarak alınmıştır. Çizelge 1.9 'dan anlaşıldığı gibi yüzey işleminden sonraki ısıl işlem, sementasyon tabakasını yumuşatırken, borlu tabaka sertliğini 900 °C 'lara kadar muhafaza etmektedir [27].

4.9. Borlanabilen Malzemeler

Borlama ile iş parçalarının ömürleri önemli derecede arttırılabilir. Daha kalın ve matris malzeme ile iyi bağlantılı borür tabakalarının, yüksek alaşımlılardan daha çok, düşük alaşımlı ve alaşımsız çeliklerde elde edildiği düşünülürse; alaşımlı çelikler, alaşımsız çeliklerle değiştirilerek iş parçası maliyetleri düşürülebilir. Keza talaşlı imalat vb. yöntemlerle üretilen parçalar toz metal tekniği ile üretilenlerle değiştirilebilir [2].

Borlama işlemi yapılabilen bazı ferro malzemeler ve kullanım alanları çizelge 4.7 'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Borlanabilen bazı ferro malzemeler ve kullanım alanları [26].

Malzeme Numarası	DIN	AISI	Kullanım Alanları
1.0037	St 37		Kovanlar, manifoldlar, nakil boruları, darbe plakaları,yatak levhaları, civatalar, çarklar, diş kılavuzları
1.0401	C15 (Ck15)	C1020	Dişli kutuları, pompa şaftları
1.0503	C 45	C1043	Pimler, taşlama diskleri, civatalar, bilyalar
1.0052	St50-1		Manivelalar, hamlaçlar
1.0727	45 S 20 (K)	C1138	Bilezikler, miller, zımbalar
1.1191	Ck 45	C1042	Helezon gövdeler, hamlaçlar, civatalar, haddeleme silindirleri
1.1730	C 45 W 3		Döküm levhalar
1.1740	C 60 W 3	W1	Bağlama kelepçeleri, kılavuz çubuklar
1.2080	X 210 Cr 12	D3	Pres kalıpları, zımbalar, matrisler (dişi kalıplar), burçlar, pleytler, mandrenler
1.2210	115 CrV 3	C2	Sementasyonlu pimler ve saplamalar, kalıp zımbaları
1.2311	40 CrMnMo 7		Döküm levhalar, bükme çeneleri
1.2343 1.2344	X 38 CrMoV 51 X 40 CrMoV 51	H11 H13	Delme takımları, Pistonlar, baskı silindirleri, ağızlıklar (zivanalar), ingot (kütük) kalıpları
1.2365	X 32 CrMoV 33	H10	Enjeksiyon zımbaları, dövme kalıpları
1.2379	X155 Cr V Mo 121	D2	Değişik formlardaki haddeler
1.2419	105 WCr 6		Gravür merdaneleri
1.2436	X 210 CrW 12	D6	Doğrultma merdaneleri
1.2550	60 WCrV 7	S1	Mandrenler, matrisler, çekme ve hadde kalıpları, zımbalar, kalıp bilezikleri
1.2601	X 165 CrMoV 12	D2	Çekme takımları, soğuk haddeleme silindirleri
1.2714	56 NiCrMoV 7	L6	Civatalar, dövme kalıpları
1.2767 1.2842	X 45 Ni Cr Mo 4 90 MnCrV 8	O2	Baskı aletleri, bükme kalıpları çeneleri, pres kalıpları, çekme kalıpları, delici zımbalar
1.3505 (2067)	100 Cr 6		Bilyalarda (rulmalar), kılavuzlar
1.3947	X 50 CrMnNiV 22 9		Mıknatıslanmayan aletler (avadanlıklar)
1.4006 1.4034	X 10 Cr 13 X 40 Cr 13	410 420	Valf parçaları
1.4300	X 12 CrNi 18 8	302	Dişli gövdeleri ve kovanları
1.4401	X 5 CrNiMo 18 10	316	Eleğin delikli parçaları
1.4410	G-X 10 CrNiMo 18 9		Erkek kılavuzlar
1.4541	X 10 CrNiMo 8	321	Bağlama bilezikleri, besleme memeleri, dişli gövdeleri
1.6580	30 CrNiMo 8		Haddeleme silindirleri
1.6587	17 CrNiMo 6	4317	Konik dişli çarklar (konik mahrutu dişliler)
1.7131	16 Mn Cr 5	5115	Helisel dişliler, kızak yatakları
1.7147	20 Mn Cr 5		Kızak kolonları
1.7225 1.7228	42 CrMo 4 50 CrMo 4	4140 4150	Pres matrisleri, ekstrüder sonsuz vidaları, helisel kovanlar ve silindirleri, pistonlar, geri hareket mandalları
1.7707	30 CrMoV 9		Sonsuz dişliler, silindirler, enjektör meme plakları
	Gri pik döküm Örneğin: GG 20		Tekstil makinesi parçaları, bilezikler, kalıplar

Borlama işlemi gerek toz ve gerekse diğer metotlar ile bütün ferro alaşımlara uygulanabilmektedir. Refrakter metaller (W, Ta, Mo, Zr, Hf, Nb), karbürler (özellikle Co ile bağlı WC) ve Ni esaslı alaşımlara başarı ile uygulanarak özel yapıda borlu tabakalar elde edilebilmektedir. Ti ve Ti esaslı alaşımlarda bor yayılımı ile aşınmaya dayanıklı TiB₂ tabakası elde edilebilmektedir [27].

Yeni geliştirilen metotlar ile Cu ve alaşımlarına da tatbik edilebilmektedir. Fakat düşük ergime sıcaklığına sahip Zn ve Al 'a uygulanamamaktadır [18]. Borlama termokimyasal bir ısıl işlem olup çeliklere, dökme demirlere ve hatta demir olmayan metallere de uygulanabilir [17].

Demir esaslı tüm malzemeler, örneğin yapı çelikleri, semente çelikleri, ıslah çelikleri ve takım çelikleri, aynı zamanda çelik döküm, armco demir, gri döküm, sfero döküm, sinter demir ve sinter çelik borlama için uygun malzemelerdir. Demir esaslı malzemelerin yanı sıra diğer elementler ve alaşımlara da, mesela sert metal, Wolfram, molibden, Titan vb. de borlanabilmektedir. Ayrıca karbonlu çelikler, hafif ve düşük alaşımlı çelikler, yüksek alaşımlı çelikler de borlanmaya elverişli malzemelerdir [17].

Sıcak ve soğuk şekillendirme de kullanılan makine ve takım parçalarının, dövme kalıpları parçalarının yapıldığı çelikler, dökümler ve demir dışı malzemeler ömür artırmak için borlanırlar. Ayrıca cam endüstrisi, otomobil, uçak, gemi ve silah sanayinde kullanılan aynı cins malzemeler (çelik, döküm, demir dışı metaller ve sert metaller) borlanmaktadır [29].

Borlama, işleminin uygulanabileceği malzemelerden, sadece yüzey sertliğinin gerekli olduğu elemanlarda pahalı ve işlenmesi zor yüksek alaşımlı çelikler yerine, düşük alaşımlı çelikler kullanılması avantajıyla ilgi çeken bir işlemdir. Alüminyum alaşımlı çeliklerde ve ağırlıkça % 0,5 `ten daha fazla Si içeren çeliklerde borlama işlemi uygun sonuçlar vermemektedir. Yüksek hız çelikleri de borlama için uygun olmayan çeliklerdir [54].

5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Borlama işlemi üzerine bir araştırma yapmıştır. Borlama işlemi yapılan malzemelerde amaç; yüksek sertlik ve çok yüksek aşınma direncine sahip olması ve bu özelliklerini yüksek sıcaklıklarda koruyabilmektedir. Bu gibi nedenlerden dolayı gelişen endüstride önem kazanan bir yüzey sertleştirme işlemi olduğunu, ayrıca borlanmış yüzeylerde sürtünme katsayısının da önemli miktarda azaldığını ve makine parçalarındaki aşınma kayıplarının azaltılması çalışmalarında borlama işleminin alternatif bir yöntem olduğunu belirtmektedir [25].

SAE 1030 ve SAE 1050 çeliklerine ısıl çevrimli (Malzemeye çeşitli özellikler kazandırmak amacıyla, iş parçasını belirli sıcaklıklar arasında, belirli ısıtma-soğutma hızında birçok kez ısıtılması soğutulması işlemidir.) uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlardan görüldüğü üzere borlama işlemlerinde kısmen tabaka kalınlığında artışlar olmuştur. Bununla birlikte tabakaların altındaki geçiş bölgesi kalınlıkları ısıl çevrimli borlama işlemlerinde azalmıştır. Isıl çevrimli borlama işlemlerinde, normal borlama işlemine göre borür tabakası ve geçiş bölgesi sertlikleri azalmıştır. Normal borlama işlemlerinde geçiş bölgesi optik mikroskopta belirgin olarak ayırt edilebilirken, ısıl çevrimli borlama işleminde geçiş bölgesi çok net olarak ayırt edilememektedir. Isıl çevrimli borlamada tanelerin inceldiğini ve karbon oranı artışının borür tabakası kalınlığını azalttığını tespit etmişlerdir [44].

AISI 1030 ve AISI 1050 çeliğine bor kaplama işlemi uygulamış bu çeliklerin abrazif aşınmasını deneysel araştırmışlar ve de sonucunda yüzey sertliklerinin ve aşınma dayanımlarının işlemsiz borlanmamış hallerine göre 8 - 10 kat arttığını, sade karbonlu çelik malzemelerde artan karbon miktarının elde edilen borür tabaka kalınlıklarını belirgin bir şekilde azalttığı buna karşılık yüzey sertlik değerlerinde ise az da olsa artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir [55].

AISI 1035 çeliğinin borlanma özellikleri incelemişler ve Bor verici kaynak olarak yurt dışından ithal edilen Ekabor, Tigranit gibi ticari bor tozlarının yerine ülkemizin bor kaynaklarının da borlama ısıl işlemi amacı ile rahatlıkla kullanılabilceğini belirlemişlerdir [44].

Bu çalışmasında makine ve metalürji sanayinde bor ve bileşiklerinin kullanımını incelemiştir. Bor ve bileşiklerinin kullanımının yaygınlaştırılmasını ve bunun için yapılması gerekli olanları sıralayarak, aşınma, sürtünme, korozyon gibi konularda sanayicilere yardımcı olmak için, borlama ısıl işleminin yaygınlaştırılması gerektiğini belirtmiştir. Borlama ısıl işlemi ile elde edilen çok yüksek sertlik, aşınma direnci, korozyon dayanımı ve düşük sürtünme katsayısı gibi sonuçların laboratuvar ölçeğinden gerçek iş parçası ölçeğinde uygulamaların gerçekleştirilmesini belirtmektedir [26].

Bu çalışmasında Hadfield çeliğine (Yüksek Manganlı çelik, bileşimi; % 1 – 1.4 C, % 10 – 14 Mn ve Fe) borlama işlemi yapmış borlu tabakayı ve aşınma davranışını incelemiştir. Yapmış olduğu aşınma deneyleri sonucu borlama yapılmamış olan numunede aşınma miktarının daha fazla olduğunu tespit etmiştir. 1000 °C 'de iki saat borlanmış numuneler ile havada soğutulan numunelerde suda soğutulanlara göre daha az aşınma olduğunu belirtmektedir. 1050 °C 'de borlanarak havada soğutulan numunelerde borlama süresinin aşınma miktarı üzerine etkisinin olmadığı, 2 saat borlama ile 6 saat borlamanın aşınma miktarının yaklaşık aynı olduğunu tespit etmiştir. 1000 °C ile 1100 °C 'de 2 saat yapılan borlamalar sonucunda aşınma miktarının yaklaşık olarak aynı olduğunu görmüştür [29].

Bu çalışmada AISI 1010 çeliğine iki türlü borlama işlemi uygulanmıştır. Birinci grup deneylerde AISI 1010 malzemeye 900 °C sabit sıcaklıkta 205 dakika süreyle normal borlama işlemine tabi tutulmuştur. İkinci grup numuneler ise yine aynı şartlarda 900 °C sıcaklıkta 60 dakika bekleme ve daha sonra potayı fırın dışına alarak 5 dakika süre ile havada soğumaya terk edildikten sonra potalar tekrar 900 °C sıcaklıktaki fırına alınarak borlama işlemine devam edilmiş ve bu çevrim üç defa tekrarlanmıştır. Numunelerin mikroyapıları,

mikrosertlikleri ve tabaka kalınlıkları incelenmiştir. Normal borlamada tabaka kalınlıklarının termal çevrimli borlamadan daha yüksek çıktığını; termal çevrimli borlamada geçiş bölgesine rastlanılmadığını; termal çevrimli borlamada belirgin olarak tanelerin küçüldüğü ve homojen dağıldığını tespit etmişler ve normal borlama da tabaka kalınlığının 7 - 8 katı kadar bir geçiş bölgesinin oluştuğunu tespit etmişlerdir [47].

Bu doktora çalışmasında termokimyasal borlama işlemiyle AISI 5140, AISI 4140 ve AISI 4340 çeliklerinin yüzey performanslarının geliştirilmesi konusu ele alınmıştır. Borlama işlemi, değişik süre ve sıcaklıklarda boraks, borik asit ve ferro silisyum esaslı sıvı banyoda gerçekleştirmiştir. Borür tabaka kalınlıkları, borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak bir artış sergilediğini ve çeliklerin bünyesinde bulunan alaşım elementinin etkili olduğunu, aşınma deneylerinde borlanmış malzemelerdeki aşınma miktarı borlanmamış malzemelere kıyasla yedi kat daha az olduğu ve aşınma sırasında ölçülen sürtünme katsayısı değerlerinin 0.40 - 0.66 arasında değiştiğini borlama sonrasında kısa süreli tavlama ısıl işlemleri ile bu değerlerin 0.096 - 0.16 'ya düşebildiğini tespit etmiştir [56].

Yapmış olduğu çalışmasında az alaşımlı olan AISI 1020 çeliğini katı ortamda 800 °C, 850 °C, 900 °C, 950 °C, 1000 °C ve 1050 °C sıcaklıklarda borlamıştır. Tabaka kalınlığının borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olduğunu ve en ideal borlamanın 950 °C de 2 saat, 950 °C de 3 saat ve 950 °C de 4 saat olduğunu, 950 °C üzerinde yapılan borlama işleminde borlu tabakanın bozulduğunu tespit etmiştir [57].

Bu çalışmasında küresel grafitli dökme demir (KGDD) malzemelerin termokimyasal olarak borlanabileceği üzerine çalışmalar yapmış ve başarıyla uygulanabileceğini ancak, KGDD malzemelerin kimyasal kompozisyonu, kaplama kalitesi üzerinde oldukça etkili olduğunu, örneğin silisyum içeren çeliklerin borlanmasının sakıncalı olduğunu belirtmektedir. KGDD malzemeler yüksek seviyede silisyum içermektedir. Yapılan araştırma, KGDD malzemelerin bor kaplanmasında çelikler için önerilenlerden daha çok parametreler olduğu alaşımsız veya düşük seviyede alaşım elementi içeren KGDD malzemelerin yüzeyinde

oluşturulan borür tabakası, kaplama - matris ara yüzeyinde karbon esaslı bir ara bölge oluşturmakta ve bu tabakanın zayıf olması sebebiyle, kaplama tabakasında kısmi ayrılmalar olduğunu belirtmiştir. Ancak alaşım elementi olarak % 1 bakır ilavesi karbon birikimini engellemekte ve tek fazlı Fe₂B fazının oluşmasını sağlamakta olduğunu belirtmiştir. Oluşan kaplama tabakası homojen olarak malzemenin bütün yüzeyinde elde edildiğini ayrıca bor kaplanmış KGDD malzemenin kaplama tabakasında, grafit kürelerinin dağılımıyla kompozit karakterli bir yapı sergilendiğini belirtmiş. Bu sayede, sürtünme katsayısı çeliklere göre oldukça düşük seviyelere çekilebildiğini ve KGDD 'lere önerilen bileşim ve işlem parametrelerine bağlı olarak, borlama endüstriyel boyutlarda uygulanabilirliğini belirtmiştir [32].

Bu çalışmada gri dökme demirin yüzeyini borlamış ve aşınma dayanımını incelemiştir. Borlu tabakanın aşınma dayanımını yüksek olduğunu tespit etmiştir. Kayma yolunun artmasıyla sürtünme katsayısı numunelerdeki bor tabakası kalınlığına ters orantılı olarak arttığını, artan yük ve hız değerlerinde borsuz numunelerin aşınma miktarlarının borlu numunelere göre daha fazla olduğunu ifade etmiştir [52].

Borlama işlemi ve endüstriyel uygulamaları konusunda yapmış olduğu bu çalışmada, borlama işlemi üzerine yapılmış çalışmalardan bir derleme yapmıştır. Değişik borlama metotlarını ele almış ve endüstride çeşitli makine parçalarında uygulama örneklerinden bahsetmektedir [31].

Bu çalışmada sementasyon ile sertleştirilerek kam mili üretiminde kullanılan AISI 5115 çeliğinin yerine yüzeyi borlanarak sertleştirilen AISI 1020 çeliğinin kullanılabilirliği üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır. Aşınma deneyleri kuru sürtünme şartlarında yapılmış ve deneyler için plaka disk deney düzeneği seçilmiştir. Deney sonunda aşınmış ve aşınmamış sertleştirilmiş yüzey partikülleri x-ışını analiz metoduyla analiz edilmiş ve beklenen faz gözlenmiştir. Yapılan deneylerin sonuçları birbirleri ile mukayese edilmiş, buna göre borlama ile sertleştirilen semente etmeye göre daha etkili olduğu ve borlanarak yüzeyi sertleştirilen AISI 1020 çeliğinin düşük yüklerde semente edilmiş AISI 5115

çeliğinin yerine kam mili üretiminde ve diğer kullanım alanlarında kullanılabileceği sonucunu varmıştır [17].

Borlanmış çeliklerin aşınma ve korozyon dayanımları ile ilgili bir araştırma yapmıştır. Borlanan demir grubu malzemelerin bazı asitlere karşı dayanıklılık kazandığını, kopma ve akma mukavemetlerinin % 10 - 20, yorulma dayanımının % 25 ve korozyonlu yorulma ömrünün % 200 artırmasına karşılık plastisite özelliklerini azaldığını tespit etmiştir [12].

Yapılan bu çalışmada değişik sürelerde borlanan, üç ticari karbon çeliği (AISI 1020, 1040 ve 1050) ile özel olarak hazırlanmış altı adet az alaşımlı çelik malzemelerde, bileşim ve borlama süresi ile; borür tabakasının kalınlığı, faz analizi, sertlik, kırılma tokluğu ve korozyon davranışının değişimini araştırmıştır. Borlama süresiyle borür tabakası kalınlığı azalan bir hızla arttığını bunun yanında sertlik ve kırılma tokluğu gibi mekanik parametreler borlama süresinden çok, oluşan borür bileşiminin cinsi ile ilişkili odlunu, alaşım elementi ilavesi ise tabaka kalınlığını çarpıcı bir şekilde etkilemediğini fakat borür tabakasının sıklığını (kolonların birbirleriyle yakınlığını) artırmıştır. Sertlik ve kırılma tokluğu, mangan ilavesi ile krom ilavesine göre nispi bir artış gösterdiğini belirtmiştir. 56 °C 'de hacimce % 10 'luk H₂SO₄ ortamında korozyon davranışının da alaşım elementi ilavesiyle relatif olarak iyileştiği ve Mn 'ın bu hususta daha etkili olduğunu tespit etmiştir [49].

Çeliğin borlanması borür tabakası, geçiş zonu ve ana matriksin özelliklerinin iyileştirilmesi konusunda çalışmıştır. Termal çevrimli borlamayla elde edilen borür tabaka kalınlıklarının, sabit sıcaklıkta borlamayla elde edilene göre daha ince veya eşit olduğu, sabit sıcaklıkta ve termal çevrimli şartlarda borlanan numunelerin de mikro sertlikleri arasında belirgin bir fark olmadığı sonucuna varmıştır [2].

Bor yayınıyla çeliklerde yüzey sertleştirme konusunda çalışmıştır. Sıvı ortamda borlama işlemini gerçekleştirmiş ve borlama maddesi olarak da “ boraks ”ı seçmiştir. Borlu tabakanın özelliklerini araştırmıştır [27].

6. MATERYAL METOT

6.1 Deney Amacı

Bu araştırmanın yapıış amacı: katı borlama işlemleri sonrasında, çeliklerin yüzeyinde oluşan bor difüzyonu derinliğinin değişimi, ayrıca düşük karbonlu, yüksek karbonlu ve de alaşımlı olan bu çeliklerde karbonun borlama işlemine karşı çıkardığı zorluk ve bir başka yüzey sertleştirme işlemi olan alevle sertleştirmenin borlama işlemiyle mukayesesi incelenmiştir. Amaca yönelik ayrıntılı bir çalışma yapabilmek için piyasadan kolay bulunabilen düşük ve yüksek karbonlu çelikler ile bir adet de alaşımlı çelik temin edilmiştir. Üç farklı çelikten oluşan toplam 48 adet numune 2, 4, 6 ve 8 saatlik sürelerle borlanmıştır. Ayrıca yine bu üç farklı çelikten oluşan toplam 3 adet numune ise alevle yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Tüm bu işlemler sonucunda borlanmış numunelerden 21 tanesi seçilmiş ve mikro sertlik ölçümleri yapılarak alevle sertleştirmeye olan farklılıkları araştırılmıştır.

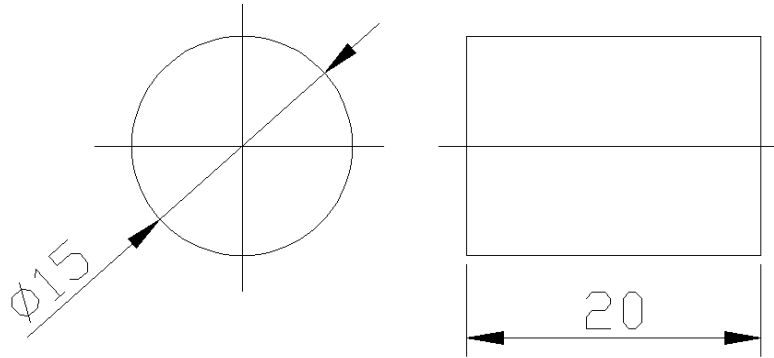
6.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler:

Deneye başlayabilmek için temin edilen ilk ana malzemeler 3 farklı yapıya sahip çeliklerdir. Malzeme seçimindeki bu kıstas ilerideki deneylerde değişimleri daha iyi ayırt edebilmek amacıyla yapılmıştır. Çalışma kapsamında Asil Çelik A.Ş. tarafından üretilmiş AISI 1020, AISI 1060 ve AISI 4140 çelik malzemeler kullanılmıştır. Malzeme bileşimleri Çizelge 6.1 'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Malzeme bileşimleri

MALZEME	% C	% Si	% Mn	P<	S<	Cr	Mo	Ni
AISI 4140	0,38	0,15	0,50	0,035	0,035	0,90	0,15	—
	0,45	0,40	0,80			1,20	0,30	
AISI 1020	0,18	0,15	0,30	0,035	0,035	—	—	—
	0,25	0,35	0,60					
AISI 1060	0,55	0,10	0,60	0,040	0,050	—	—	—
	0,64	0,30	0,90	ençok	ençok			

Deneysel çalışmalar için hazırlanan deney numunelerinin görünümü şekil 6.1 'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Deney numunelerinin görünümü.

Yapılacak olan deney için her bir koşulda 3 'er numune kullanılacak şekilde borlama ısıl işlemine yeter sayıda numune hazırlanmıştır. Numuneler işlenirken boyut farklılıklarından oluşabilecek hataları en düşük seviyede tutabilmek için gereken hassasiyet gösterilmiştir.

6.3. Deneş Programı:

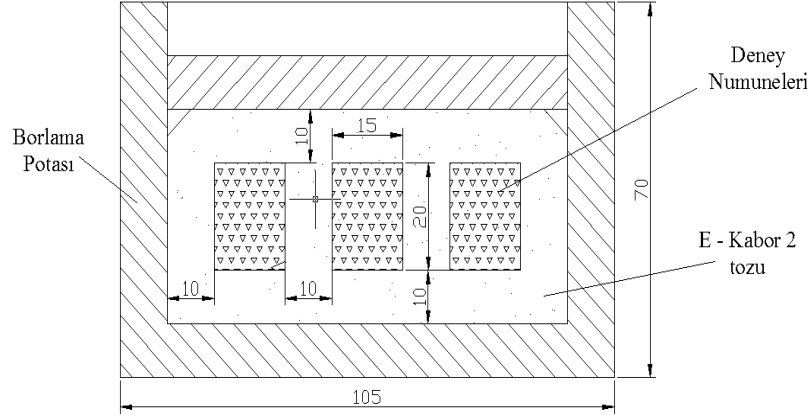
AISI 1020, AISI 1060 ve AISI 4140 eliklerinde borlamanın yūzey sertlięine etkisi, borun karbonla olan iliřkisi ve borlama ile yapılan yūzey sertleřtirmenin alevle yapılan yūzey sertleřtirmeye űstūnlüklerinin belirlenmesi için farklı sıcaklık ve zaman parametreleri için 3 'er adet numune hazırlanmıřtır. Bu numuneler deęiřik sıcaklık ve sūrelerde borlama iřlemine tabi tutulmuř, kıyaslamalar için gerekli bir' er adedi de borlama veya alevle sertleřtirme yapılmadan gerekli űlūmlere tabi tutulmuřtur. Borlama deney programı ve numune kodlamaları izelge 6.2' de gűsterilmektedir.

Çizelge 6.2. Borlama deney programı ve numune kodlamaları.

NUMUNE NO	NUMUNE	BORLAMA SICAKLIğI (°C)	BORLAMA SūRESİ (Saat)
A-2-1	AISI 4140	840	2
A-4-1		840	4
A-6-1		840	6
A-8-1		840	8
A-2-2		880	2
A-4-2		880	4
A-6-2		880	6
A-8-2		880	8
A-2-3		920	2
A-4-3		920	4
A-6-3		920	6
A-8-3		920	8
A-2-4		960	2
A-4-4		960	4
A-6-4		960	6
A-8-4		960	8

B-2-1	AISI 1060	840	2
B-4-1		840	4
B-6-1		840	6
B-8-1		840	8
B-2-2		880	2
B-4-2		880	4
B-6-2		880	6
B-8-2		880	8
B-2-3		920	2
B-4-3		920	4
B-6-3		920	6
B-8-3		920	8
B-2-4		960	2
B-4-4		960	4
B-6-4		960	6
B-8-4		960	8
C-2-1	AISI 1020	840	2
C-4-1		840	4
C-6-1		840	6
C-8-1		840	8
C-2-2		880	2
C-4-2		880	4
C-6-2		880	6
C-8-2		880	8
C-2-3		920	2
C-4-3		920	4
C-6-3		920	6
C-8-3		920	8
C-2-4		960	2
C-4-4		960	4
C-6-4		960	6
C-8-4		960	8

Borlama işlemi Çizelge 6.2 'de verilen koşullarda yapılmıştır. Her ısıl işlem koşulu için 3 adet numune borlanmıştır. Isıl işlemden önce tüm numuneler kodlanmış ve işlem sonrasında bu kodlara göre ayırt edilmiştir.



Şekil 6.2. Borlama işleminde kullanılan potanın ve numunelerin pota içerisindeki yerleşiminin dikey kesit görünüşü.

Borlama ısıl işlemi, katı ortamda yapılmıştır. Paslanmaz çelikten imal edilen kutu içine her koşul için 9 adet numune konmuş ve kutu fırın içine yerleştirilerek, fırınla beraber ısıtılmıştır. Deney süresi, fırın istenen sıcaklığa ulaştığı andan itibaren tutulmuştur. Bor sağlayıcı olarak “ **E - Kabor 2** ” adlı bor tozu kullanılmıştır. Tozların tane büyüklükleri (75 – 106 μm) kadardır. E - Kabor 2 'nin içeriği; $\text{B}_4\text{C} - \text{SiC} - \text{KBF}_4$ şeklindeki bir bor sağlayıcı bileşik olup içeriğindeki bileşiğin oranları Vezneli A.Ş. (Salihli – MANİSA) firması tarafından açıklanmamaktadır. Paslanmaz çelik kutu tabanına 2 cm yüksekliğinde (E – Kabor 2) konduktan sonra numuneler yan kısımlarından ve birbirinden en az 1cm mesafede olacak şekilde kutuya yerleştirilmiştir. Daha sonra numunelerin üzeri 2 cm (E – Kabor 2) ile doldurulmuş, en üst kısma (“ Ekrit ” = Deoksitan) tozu konarak kapak kapatılmıştır. Ekrit de; saf demir ve oksit tutucu bileşenlerden oluşmaktadır. Tüm numuneler bu şekilde değişik sıcaklık ve sürelerde borlama işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 6.3. Borlama işleminin yapıldığı fırın.

Borlama ısıtma işleminde sonra kutuda soğutulan numuneler, kutudan çıkartılıp temizlenmiştir.

6.4. Metalografik Çalışmalar :

Borlama işlemine tabi tutulan numunelerden metalografik incelemeler için hazırlanmış olan numuneler Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında (\varnothing 15 X 20 mm) boyutlarında olan numuneler yarıçap ekseni boyunca 20 mm yükseklik doğrultusunda tam ortadan şekil 6.4 'de görülen hassas kesme cihazında kesilerek hazır hale getirilmiştir.



Şekil 6.4. Numunelerin kesilmesinde kullanılan hassas kesme cihazı.

Dikdörtgen kesite sahip olan yüzey kısımları şekil 6.5'te görülen “ **Buehler-Metaserv** “ marka parlatma cihazında 200 dev/dk hızda sırasıyla 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 numaralı zımparalardan geçirilmiştir. Daha sonra aynı cihazda 6 µm ve 1 µm 'luk elmas parlaticılarla çuhada parlatılmıştır. Parlatılan numuneler % 4 Nital (Nital:HNO₃+Etil Alkol) çözeltisiyle 10 sn süreyle dağlanmıştır.



Şekil 6.5. Numunelerin parlatılmasında kullanılan parlatma cihazı.

Metalografik incelemeye hazır hale getirilen numuneler şekil 6.6 'da “ **Nikon MA 100** “ marka optik mikroskopta mikro yapı fotoğrafları çekilmiştir. Yüzeye yakın FeB fazı ile bu fazın altında yer alan Fe₂B fazı dağlama ile elde edilen renk farkından dolayı ayırt edilebilmektedir. Aynı zaman da bu optik mikroskopla numunelerin kesit yüzeylerinde oluşan borür tabakası kalınlığı (derinliği) ölçümleri yapılmış ve çekilen fotoğraflar üzerinde işaretlenmiştir.



Şekil 6.6. Metalografik incelemede kullanılan Nikon MA-100 marka optik mikroskop.

6.5. Sertlik Ölçümü:

Kaplama kalınlıklarının ve matrisin sertlik dağılımları şekil 6.7 'da görülen Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan “**Shimadzu**” marka mikrosertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Mikro – Vickers sertlik ucu kullanılarak 50 gr. Yük ve 10 sn süreyle gerçekleştirilmiştir. Ölçme işlemi yüzeyden itibaren matrise kadar belirli aralıklarla yapılmış ve en az beş değer aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur.



Şekil 6.7. Shimadzu marka mikrosertlik ölçme cihazı.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. Mikroyapı İnceleme Sonuçları

Borlama işlemi yapılmış AISI 1020, AISI 1060 ve AISI 4140 çeliği olan numunelerin mikro yapı incelemeleri sonucunda borür tabakası, geçiş bölgesi ve ana yapının optik mikroskop fotoğrafları çekilerek ve mikro sertlik ölçümleri yapılarak borür tabakası, geçiş bölgesi ve ana yapı tespit edilmiştir.

Mikroyapı incelemelerinde üç farklı deney numunesi için 960 °C 'nin 2 ve 4 saatlik borlama süresi sonucunda sertlik değeri daha fazla olup aynı zamanda içeriğinde daha fazla bor barındıran ve bunun yanında istenmeyen faz olan FeB fazı oluşumu görülmemiştir. Ancak üç farklı deney numunesinin 960 °C ve 6 saatlik borlama süresinde ve bunun yanı sıra 840 – 880 – 920 ve 960 °C ve 8 saat borlamaya maruz kalmış numunelerde ise Fe₂B fazına ek olarak FeB fazının belirgin bir şekilde oluştuğu görülmüştür.

AISI 1020 çeliği düşük karbonlu bir çelik olması münasebetiyle tüm parametrelerinde oluşan borür tabakasının (Fe₂B, FeB ve Fe₂B + FeB) şekli kolonsal yapıda ve uçlara doğru daha ince ve daha sivri dişli bir formda oluştuğu görülmüştür.

AISI 1060 çeliği ise yüksek karbonlu bir çelik olması münasebetiyle tüm parametrelerinde oluşan borür tabakasının (Fe₂B, FeB ve Fe₂B + FeB) şekli kolonsal yapıda ve AISI 1020 ye nazaran yine sivri dişli olmasına karşın uçlar daha yuvarlak ve dişlerin gövdeleri daha kalın formda oluştuğu görülmüştür.

AISI 4140 çeliğinden olan numunelerde ise bor tabakası (Fe₂B, FeB ve Fe₂B + FeB) oluşumu; alaşımlı çelik olması bunun yanında orta düzeyde karbon miktarına sahip olmasından dolayı AISI 1060 'a göre daha az kolonsal yapıda

olduğu görülmüştür. Yani kolonsal görünümü oluşturan dişli formdan diğer numunelere göre oldukça uzaktır.

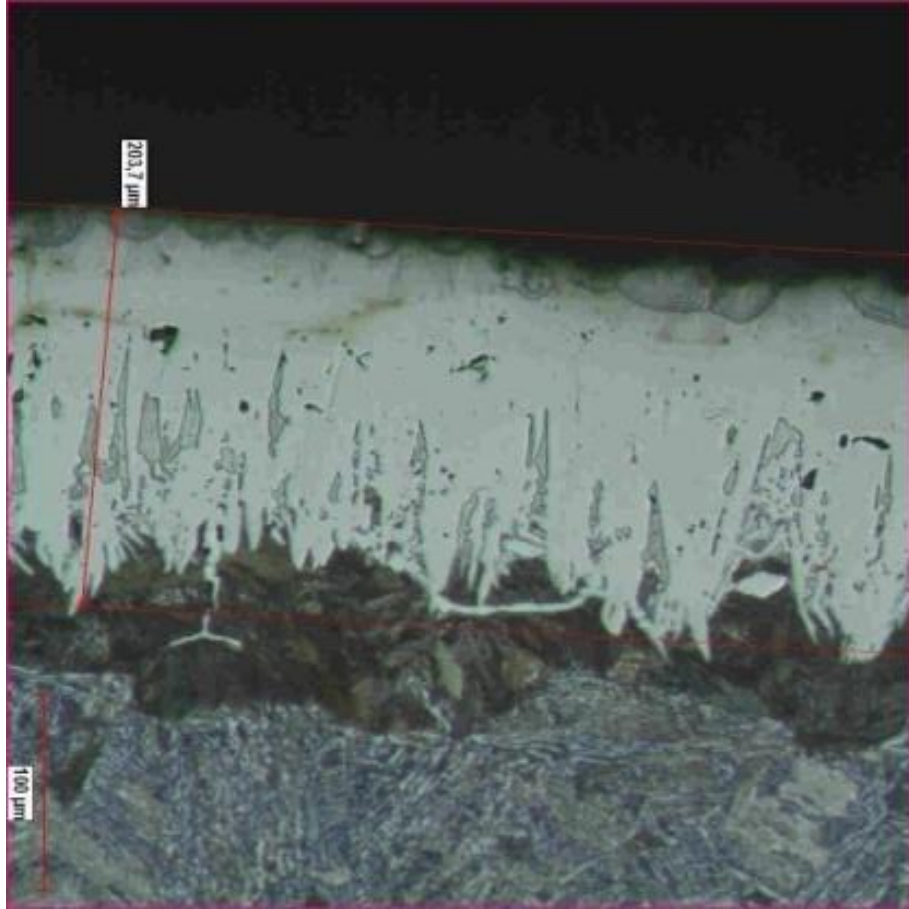
7.2. Borlama Sonucu Oluşan Fazların İnceleme Sonuçları.

Çizelge 7.2. 'de AISI 1020, AISI 1060 ve AISI 4140 eliklerinin değişik zaman ve sıcaklık parametrelerine göre borlanması sonucunda meydana gelen FeB, Fe₂B ve Fe₂B + FeB fazlarının derinlikleri ve nasıl bir geometriye sahip oldukları hakkında bilgi verilmiştir.

Çizelge 7.2. Borlama sonucu oluşan fazların derinlikleri ve FeB fazının oluşum biçiminin yorumu. (Maksimum pik değerleri alınarak yazılmıştır.)

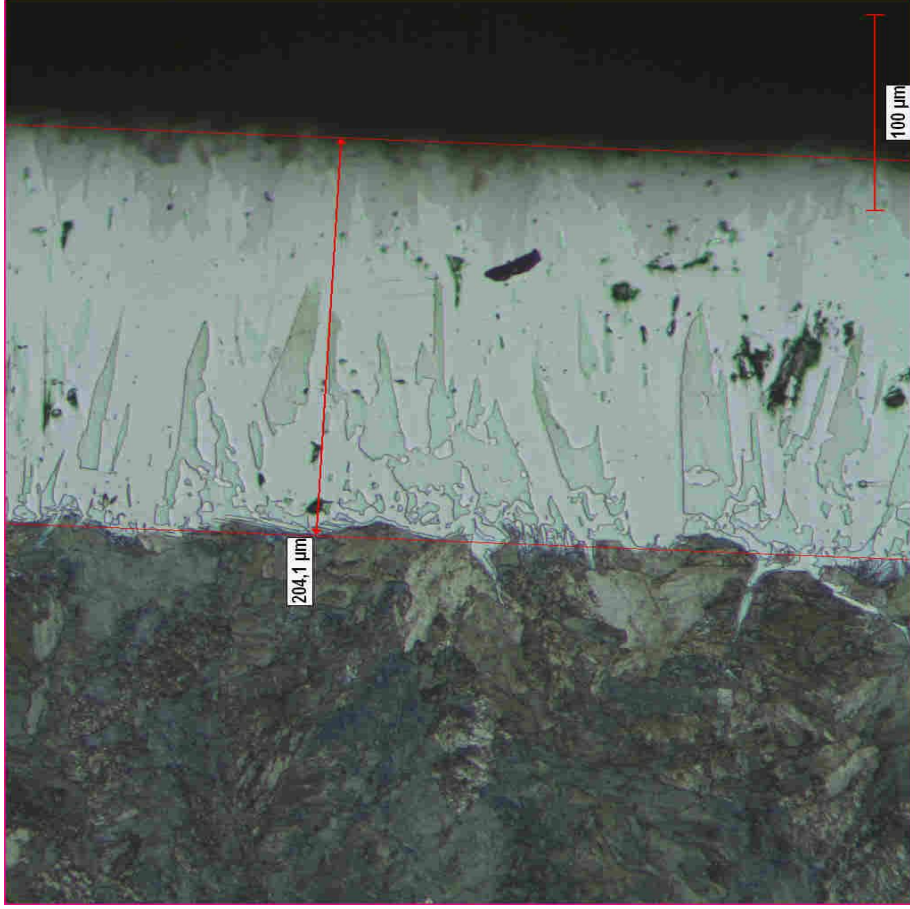
NUMUNE CİNSİ	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)	OLUŞAN FAZLARIN DERİNLİĞİ (µm)			FeB FAZININ GÖRÜNÜMÜ
			Fe ₂ B (µm)	FeB (µm)	Fe ₂ B + FeB (µm)	
AISI 1020	840	8	95,7	15,9	111,6	Birleşik dişli yapıdan yeni oluşan kolonsal yapıya geçiş.
	880	8	99,6	20,2	119,8	Uçları sivri form almış kolonsalyapı görünümü.
	920	8	119	79,7	198,7	Uçları çok sivri fakat dipte birleşik üçgenimsi dişlenmeler görülmüştür.
	960	2	24,85	YOK	24,85	Yok
	960	4	64,1	YOK	64,1	Yok
	960	6	112,7	28,9	141,6	Çok çok seyrek aynı zamanda ince uzun formda dişli oluşum.
	960	8	149	62,2	211,2	Daha sivri formda üçgenimsi dişli yapı.
AISI 1060	840	8	80,01	16,17	99,18	Çok seyrek geniş dişli yapı.
	880	8	77,26	46,64	123,9	Sık dişli yapıdan kolonsal yapıya geçiş.
	920	8	122,47	64,83	187,3	Kolonsal yapı oluşmuş ve daha sık dişli yapı vardır.
	960	2	21,67	YOK	21,67	Yok
	960	4	57,06	YOK	57,06	Yok
	960	6	98,8	62,8	161,6	İnce uzun geometride ve seyrek dişli yapı oluşmuştur.
	960	8	157,7	46,03	204	Sık dişli tam kolonsal yapı oluşmuştur.
AISI 4140	840	8	76,71	7,23	83,94	Seyrek dişli yapı oluşmuştur.
	880	8	99,75	14,25	114	Sık dişli kolonsala yakın yapı oluşmuştur.
	920	8	126,42	29,27	155,69	Kolonsal yapı görünümünü almıştır.
	960	2	21,67	YOK	21,67	Yok.
	960	4	59,81	YOK	59,81	Yok.
	960	6	88,38	45,61	134	Daha sık dişli kolonsal yapı oluşmuştur.
	960	8	138,22	65,48	203,7	Daha da sık dişli kolonsal yapıdan uçları düz geometriye sahip yapıya geçiş görülmüştür.

Çizelge 7.2. 'de görüldüğü gibi tıpkı daha önceki çalışmalarda olduğu gibi 2 ve 4 saatlik zaman dilimlerinde FeB fazının oluştuğu görülmemiştir. FeB fazının oluştuğu parametrelerin yüksek sıcaklık ve zaman dilimlerinde ortaya çıktığı belirlenmiştir. Çelik içerisinde alaşım elementi oranının fazla olması, bor tabakası bölgesinin dişli kolonsal yapıdan ziyade yüzeyden içe doğru oluşan tabakada uçları düz forma yakın olan bor tabakası oluşumuna neden olduğu görülmüştür. Bakınız şekil 7.1. 'de bu mikro yapı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 7.2.1. AISI 4140 için 960 °C ve 8 saat borlama işlemi sonrası oluşan mikroyapı fotoğrafı.

Ayrıca çelik içerisindeki karbon elementinin etkisi ise yine borür tabakasının yapısını direkt etkilediği görülmüştür. Bu etki çeliklerde karbon oranı arttıkça, bor tabakasının yapısının da belirgin dişlenmelerin olduğu kolonsal yapıdan uçları düz geometriye sahip kolonsal yapıya doğru geçiş olur sonucunu çıkarabiliriz. Bakınız şekil 7.2. 2.'de bu mikro yapı görüntüsü verilmiştir.

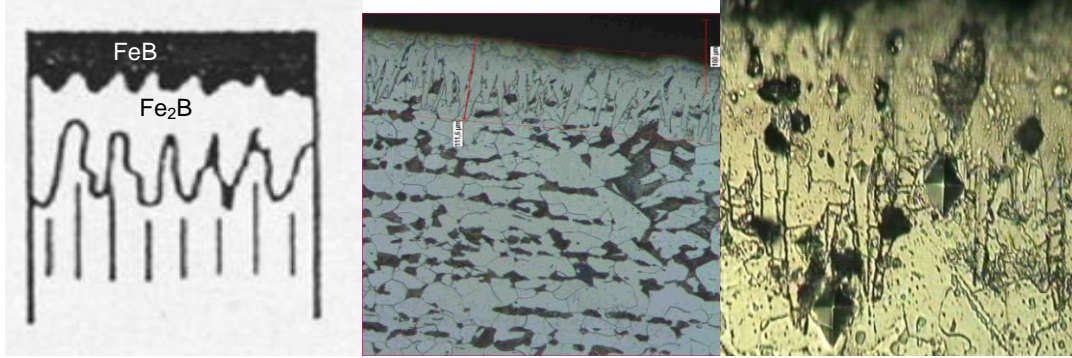


Şekil 7.2.2. Yüksek Karbonlu çelik olan AISI 1060 için 960 °C ve 8 saat borlama işlemi sonrası oluşan mikroyapı fotoğrafı.

Ayrıca Bor atom yarıçapı: 85 pm ve Karbon atom yarıçapı: 70 pm olması münasebetiyle borlama işlemi sırasında bor atomları demir atomları ile bağ oluşturamamaktadır. Karbonun borlanmaya karşı çıkardığı zorluğu bu şekilde ifade edebiliriz.

7.3. Sıcaklık ve Zamana Bağlı Optik Görüntülerin ve Mikro Sertliklerin İnceleme Sonuçları.

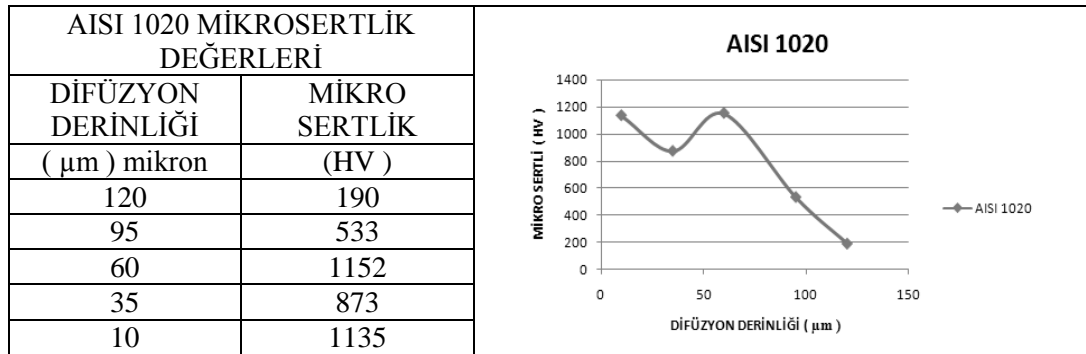
NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 1020	840	8



(a)

(b)

(c)

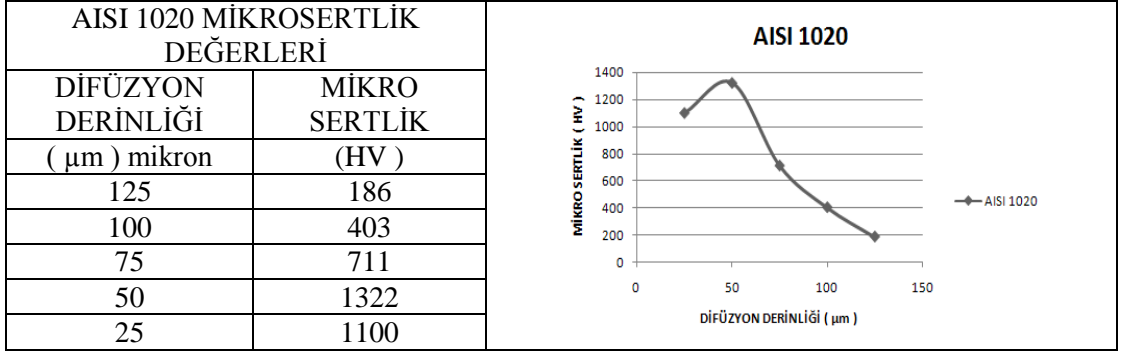
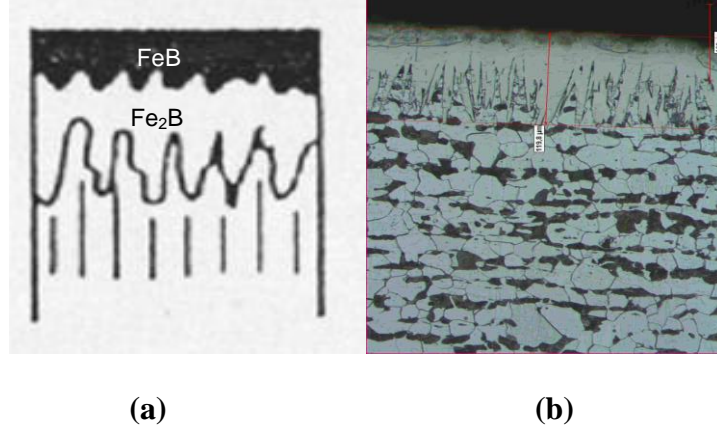


(d)

Şekil 7.3.1 AISI 1020 çeliği için 840 °C ve 8 saatlik metalografik inceleme sonuçları

(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan iki fazlı (Fe_2B ve FeB) teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 840 °C 'de borlanmış AISI 1020 çeliğine ait gerçek iki fazlı (Fe_2B ve FeB) iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 110 µm (± 2 µm) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numuneye ait mikro sertlik için ölçüm alınan noktalar görülmektedir. (d) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

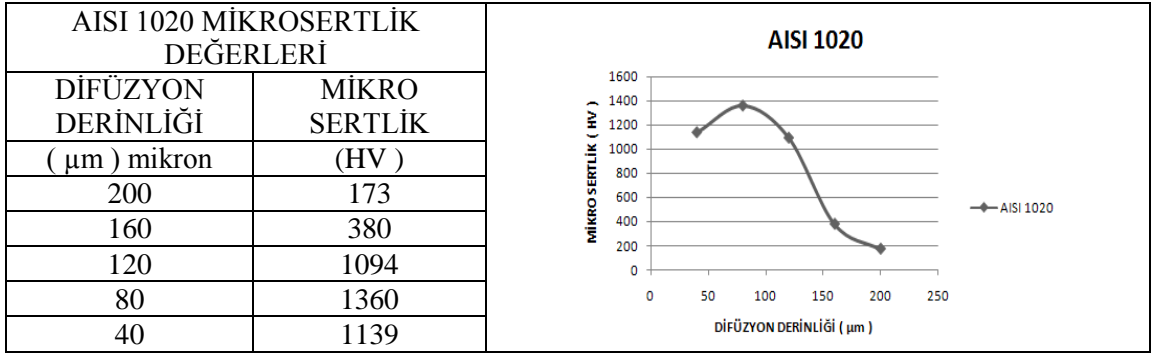
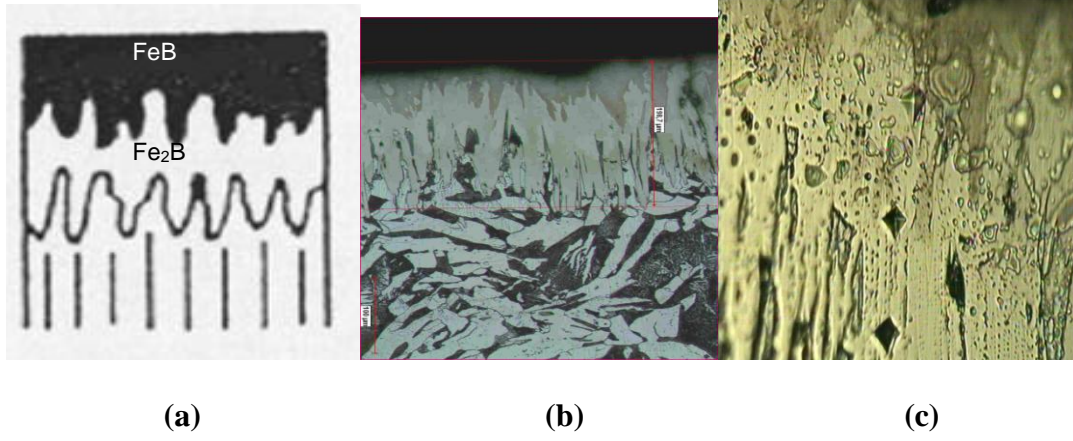
NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 1020	880	8



Şekil 7.3.2 AISI 1020 çeliği için 880 °C ve 8 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan iki fazlı (Fe₂B ve FeB) teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 880 °C' de borlanmış AISI 1020 çeliğine ait gerçek iki fazlı (Fe₂B ve FeB) iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 119 μm (± 5 μm) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 1020	920	8

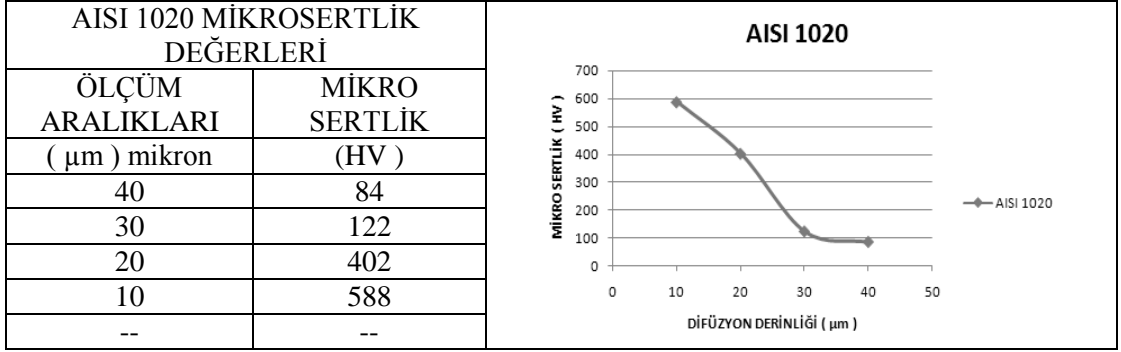
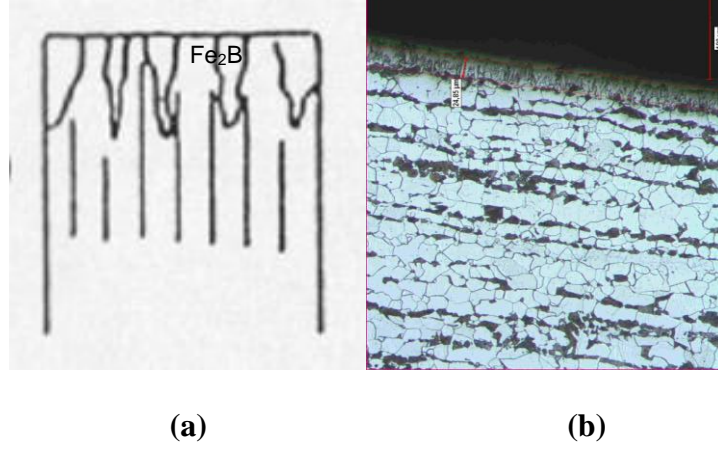


(d)

Şekil 7.3.3 AISI 1020 çeliği için 920 °C ve 8 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan iki fazlı (Fe_2B ve FeB) teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 920 °C 'de borlanmış AISI 1020 çeliğine ait gerçek iki fazlı (Fe_2B ve FeB) iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 199 μm ($\pm 5 \mu\text{m}$) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numuneye ait mikro sertlik için ölçüm alınan noktalar görülmektedir. (d) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 1020	960	2

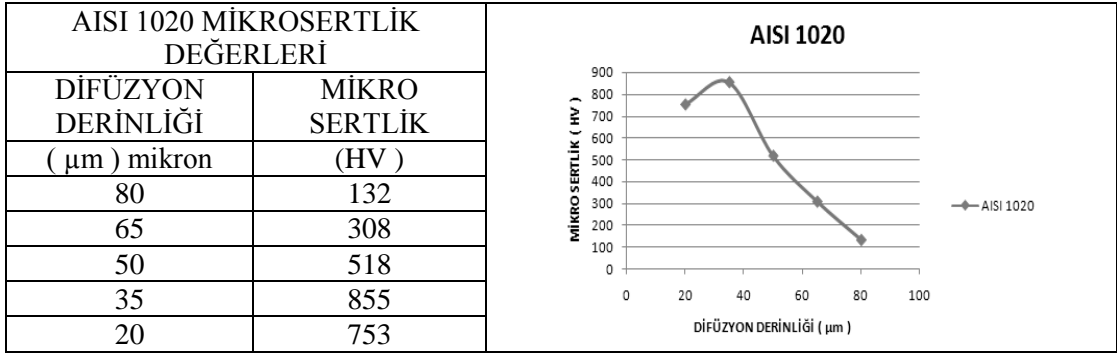
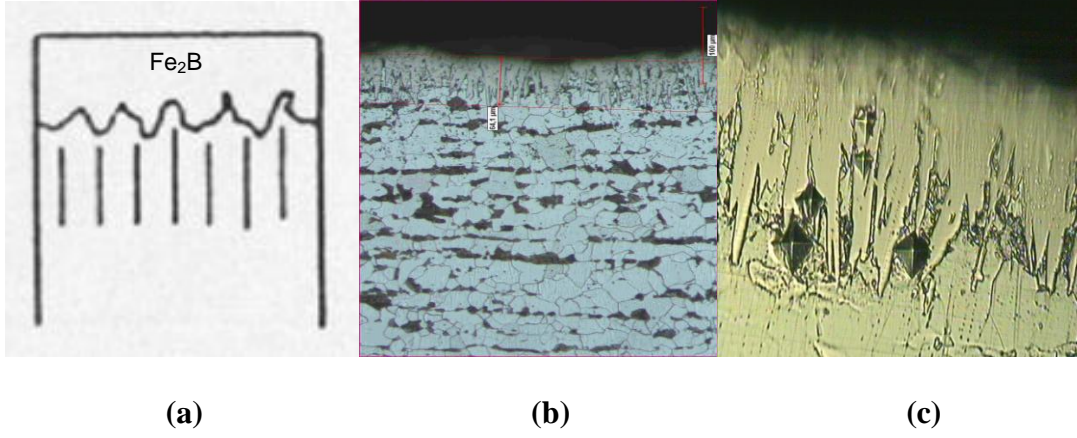


(c)

Şekil 7.3.4 AISI 1020 çeliği için 960 °C ve 2 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan Fe_2B dişli özel tabakalı teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 960 °C 'de borlanmış AISI 1020 çeliğine ait gerçek Fe_2B dişli özel tabakalı iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği $24 \mu m (\pm 1 \mu m)$ olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

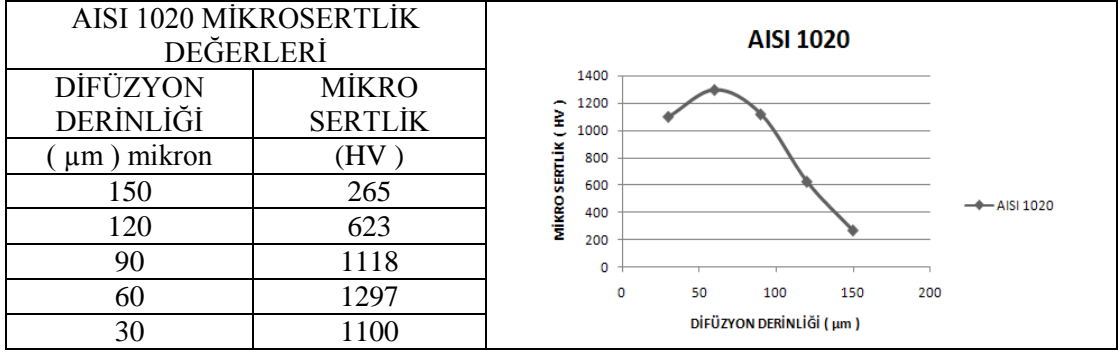
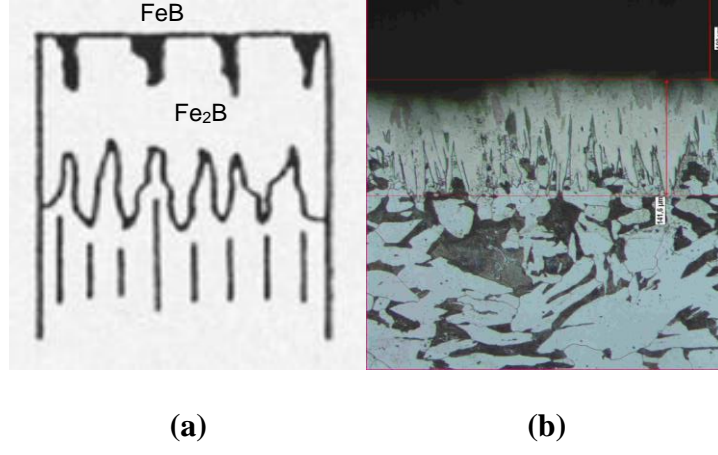
NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 1020	960	4



Şekil 7.3.5 AISI 1020 çeliği için 960 °C ve 4 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan tek fazlı tabaka, sadece Fe_2B kuvvetli dışları olan teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 960 °C 'de borlanmış AISI 1020 çeliğine ait gerçek tek fazlı tabaka, sadece Fe_2B kuvvetli dışları olan iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği $64 \mu\text{m}$ ($\pm 3 \mu\text{m}$) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numuneye ait mikro sertlik için ölçüm alınan noktalar görülmektedir. (d) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler ait mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 1020	960	6

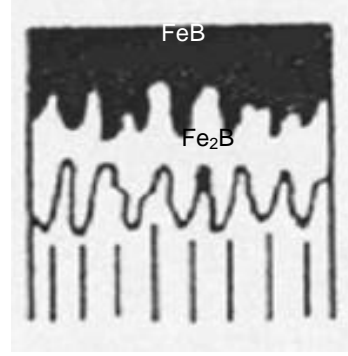


(c)

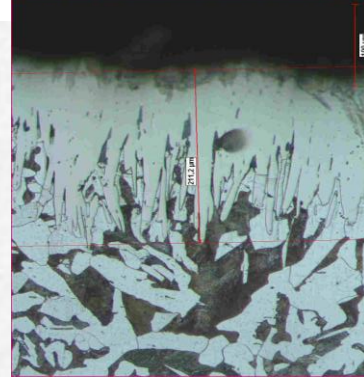
Şekil 7.3.6 AISI 1020 çeliği için 960 °C ve 6 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan iki fazlı tabaka, yalnız FeB dışları izole edilmiş teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 960 °C 'de borlanmış AISI 1020 çeliğine ait gerçek iki fazlı tabaka, yalnız FeB dışları izole edilmiş iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 141 μm (± 7 μm) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler ait mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

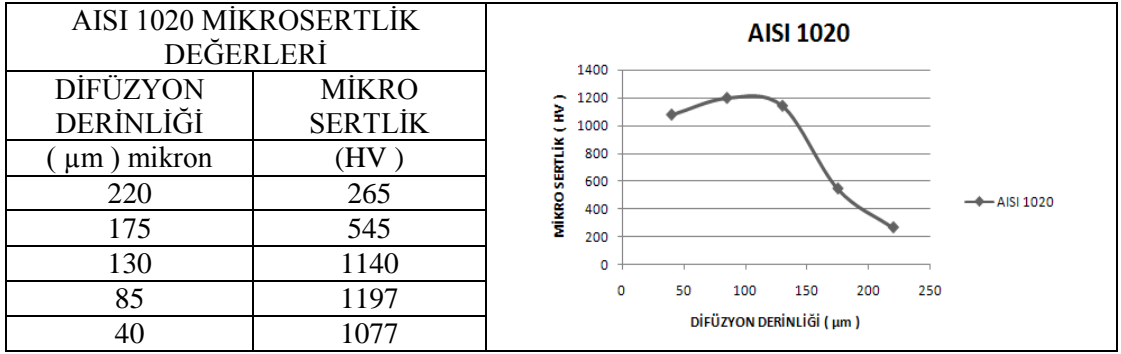
NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 1020	960	8



(a)



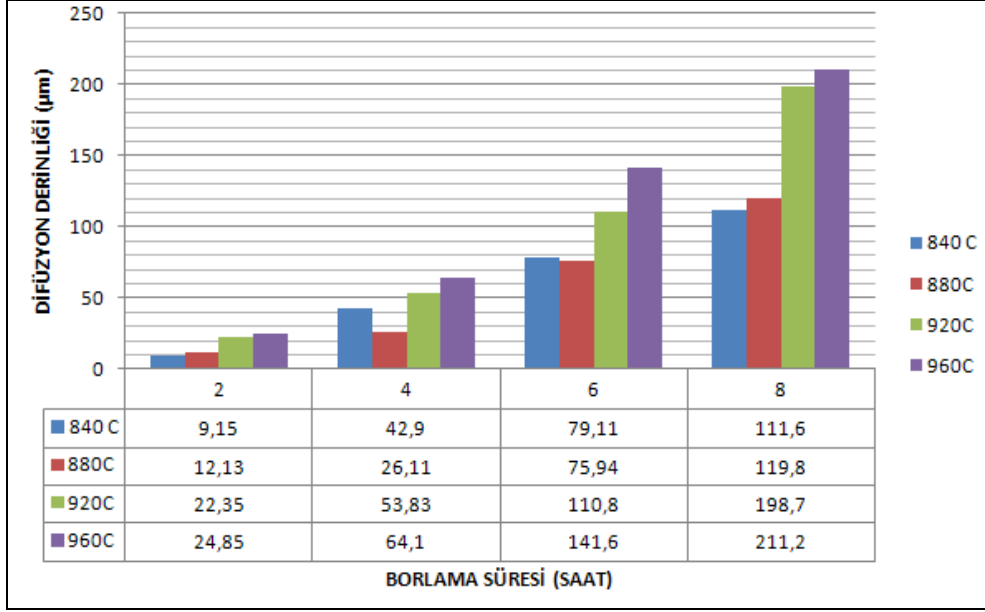
(b)



(c)

Şekil 7.3.7 AISI 1020 çeliği için 960 °C ve 8 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

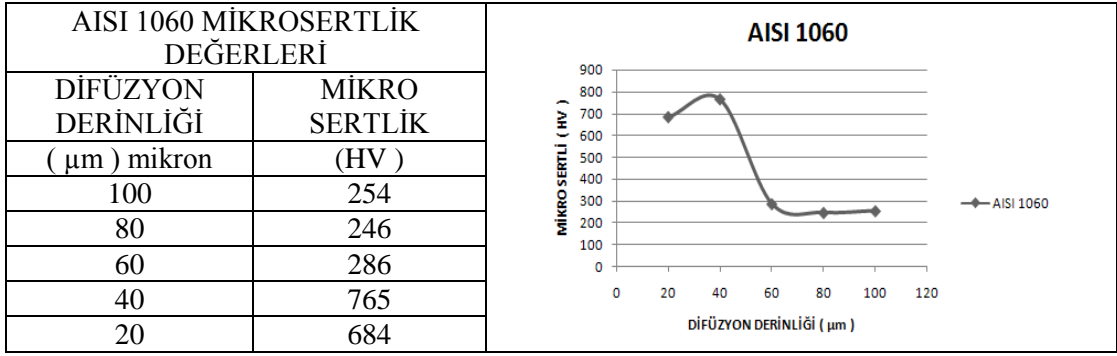
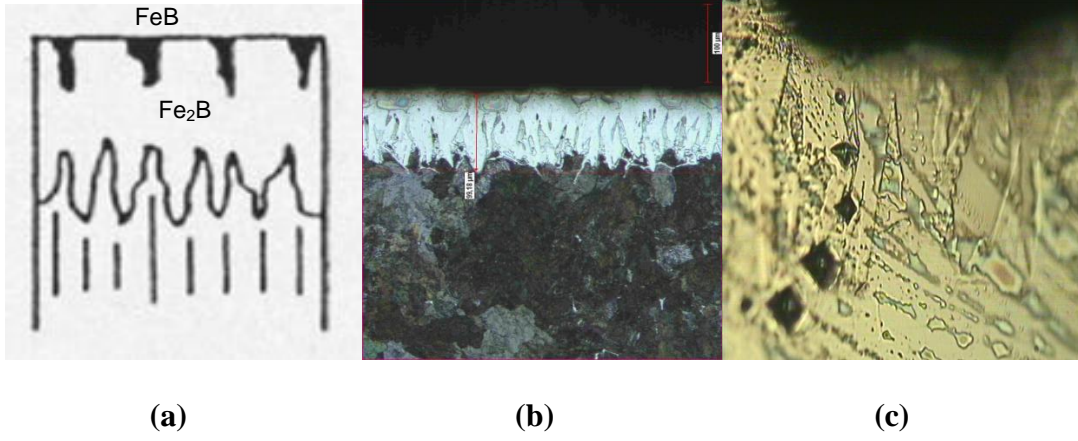
(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan iki fazlı tabakanın (Fe₂B ve FeB) teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 960 °C 'de borlanmış AISI 1020 çeliğine ait gerçek iki fazlı tabakanın (Fe₂B ve FeB) iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 211 µm (± 8 µm) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler ait mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.



Şekil 7.3.8. AISI 1020 deney numunesinin bor difüzyon derinliği grafiği.

Şekil 7.3.8. 'de görülen grafikte AISI 1020 deney numunesi için, 6 ve 8 saatlik borlama sürelerinde 840 ile 880 °C, 920 ile de 960 °C 'de borlanan numunelerde birbirine yakın difüzyon derinlikleri olduğu görülmüştür. Ayrıca 960 °C 'nin her zaman diliminde diğer sıcaklık koşullarına göre daha derin difüzyon katmanı olduğu görülmüş, bu durumun daha önceki çalışmalarda elde edilen sonuçlarla örtüşen bir durum olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak sıcaklık yükseldikçe ve Borlama süresi arttıkça, difüzyon derinliği (Borür tabakası kalınlığı) artmaktadır.

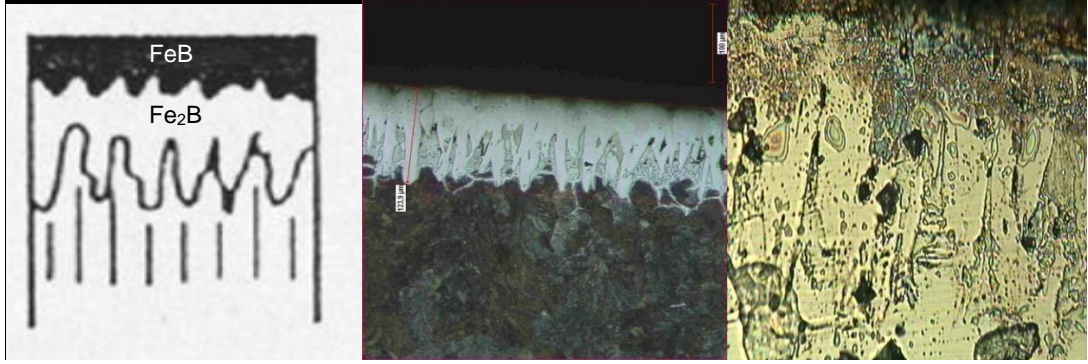
NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 1060	840	8



Şekil 7.3.9 AISI 1060 çeliği için 840 °C ve 8 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan iki fazlı tabaka, yalnız FeB dışları izole edilmiş teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 840 °C 'de borlanmış AISI 1060 çeliğine ait gerçek iki fazlı tabaka, yalnız FeB dışları izole edilmiş iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 100 µm (± 2 µm) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numuneye ait mikro sertlik için ölçüm alınan noktalar görülmektedir. (d) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

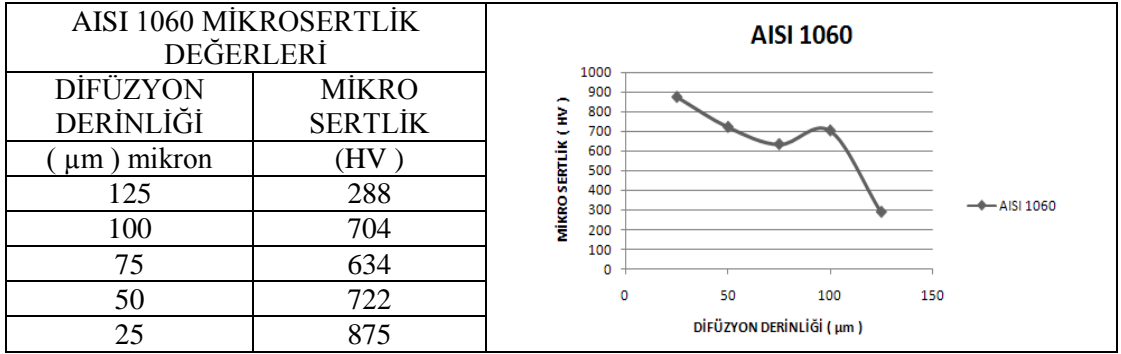
NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 1060	880	8



(a)

(b)

(c)

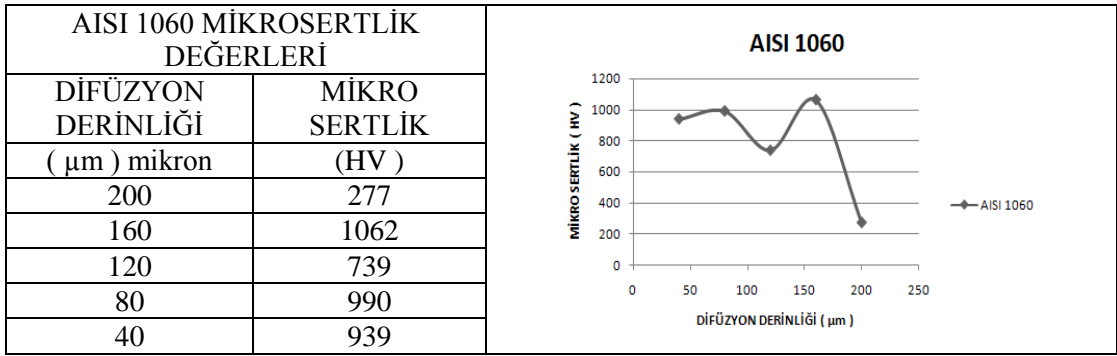
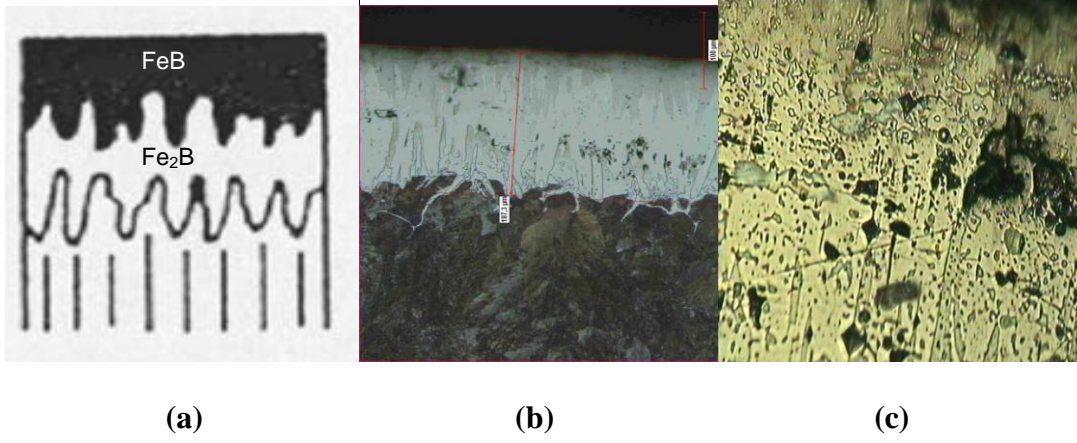


(d)

Şekil 7.3.10 AISI 1060 çeliği için 880 °C ve 8 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan iki fazlı tabaka, daha daha ince bir FeB tabakasının teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 880 °C 'de borlanmış AISI 1060 çeliğine ait gerçek iki fazlı tabaka, daha daha ince bir FeB tabakasının iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 124 μm ($\pm 3 \mu\text{m}$) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numuneye ait mikro sertlik için ölçüm alınan noktalar görülmektedir. (d) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

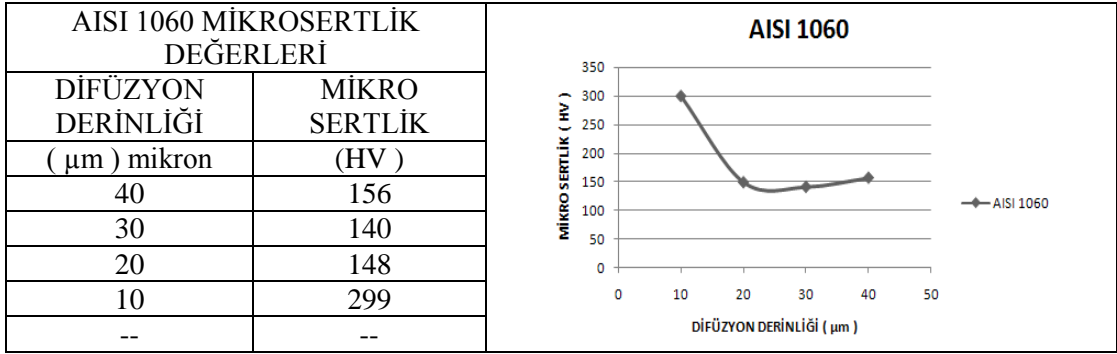
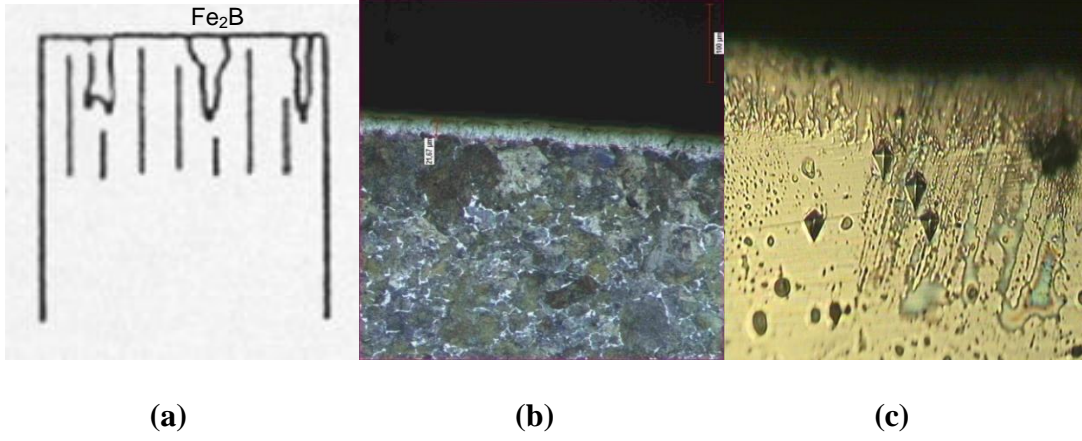
NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 1060	920	8



Şekil 7.3.11 AISI 1060 çeliği için 920 °C ve 8 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan iki fazlı tabakanın (Fe_2B ve FeB) teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 920 °C 'de borlanmış AISI 1060 çeliğine ait gerçek iki fazlı tabakanın (Fe_2B ve FeB) iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 188 μm ($\pm 5 \mu\text{m}$) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numuneye ait mikro sertlik için ölçüm alınan noktalar görülmektedir. (d) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

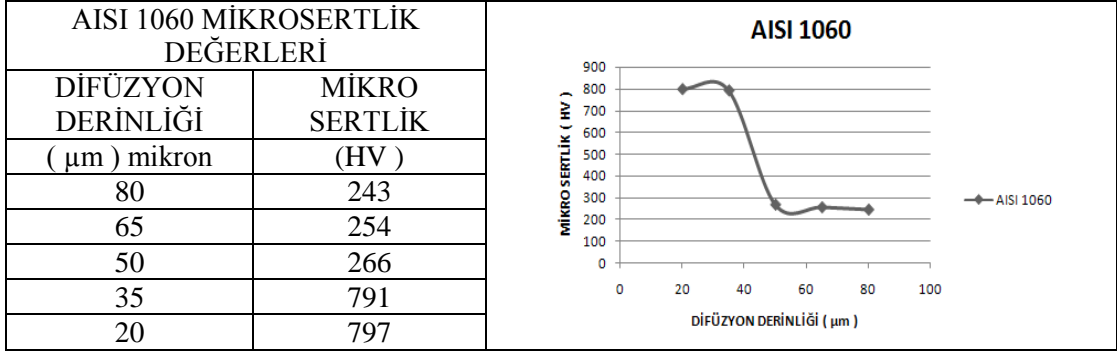
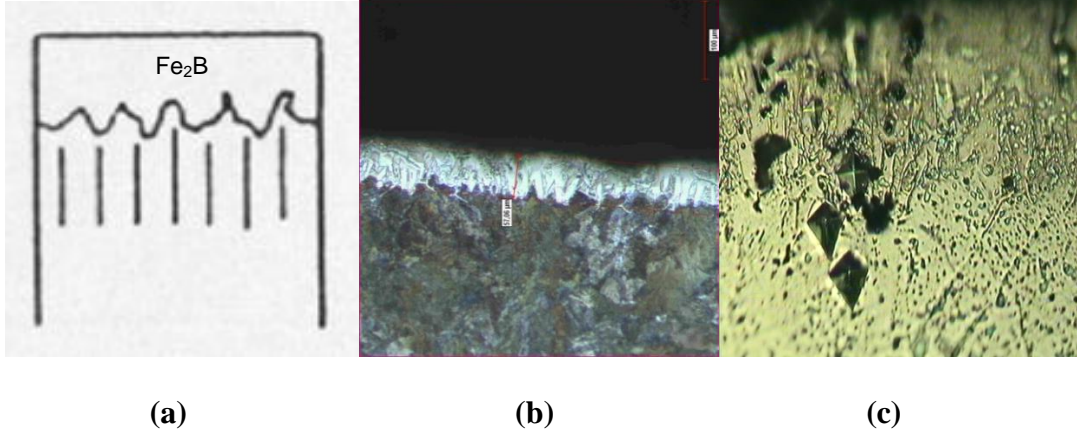
NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 1060	960	2



Şekil 7.3.12 AISI 1060 çeliği için 960 °C ve 2 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan Fe_2B dişleri çok izole edilmiş tabakanın teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 960 °C 'de borlanmış AISI 1060 çeliğine ait gerçek Fe_2B dişleri çok izole edilmiş tabakanın iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 22 μm ($\pm 1 \mu\text{m}$) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numuneye ait mikro sertlik için ölçüm alınan noktalar görülmektedir. (d) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

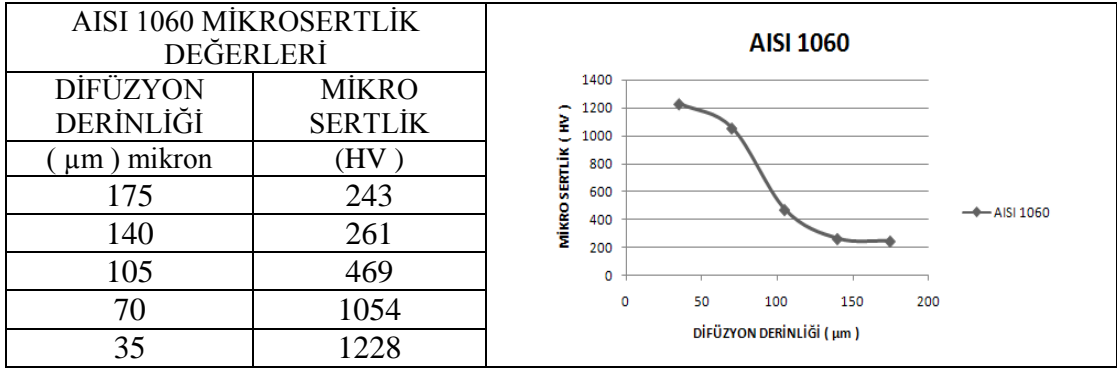
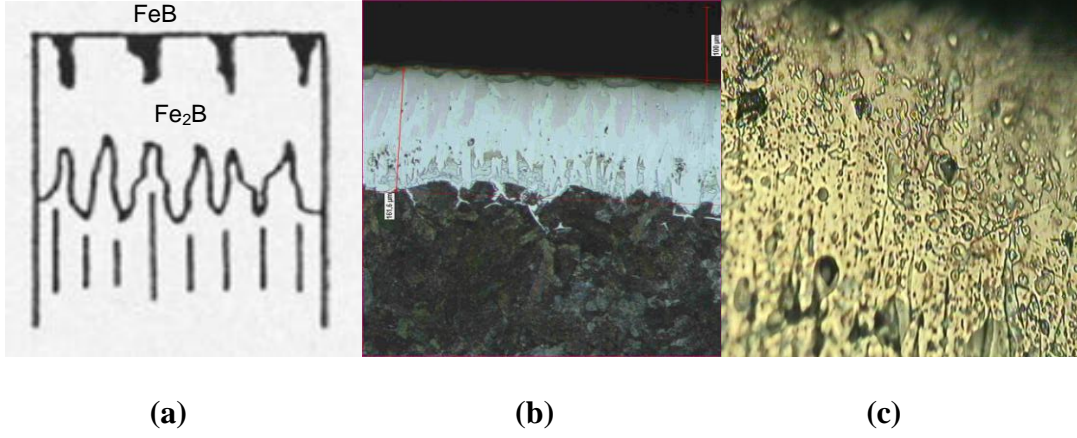
NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 1060	960	4



Şekil 7.3.13 AISI 1060 çeliği için 960 °C ve 4 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan tek fazlı ve kuvvetli dişlenmenin olduğu Fe_2B fazının teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 960 °C 'de borlanmış AISI 1060 çeliğine ait gerçek tek fazlı ve kuvvetli dişlenmenin olduğu Fe_2B fazının iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği $58 \mu\text{m}$ ($\pm 2 \mu\text{m}$) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numuneye ait mikro sertlik için ölçüm alınan noktalar görülmektedir. (d) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

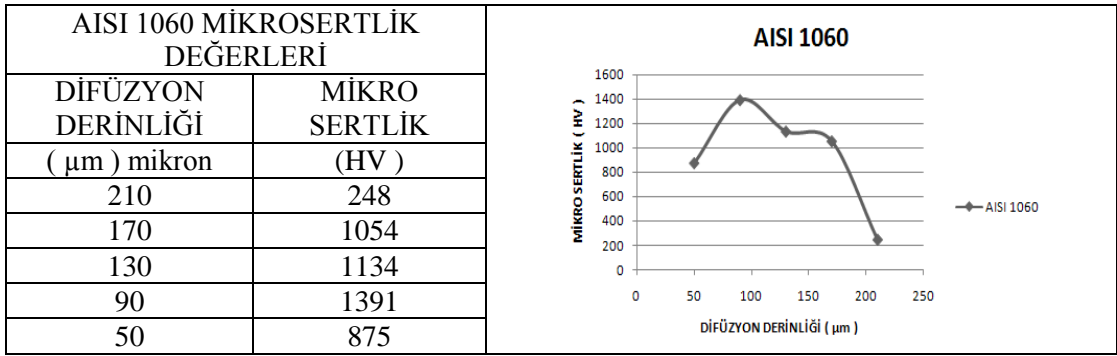
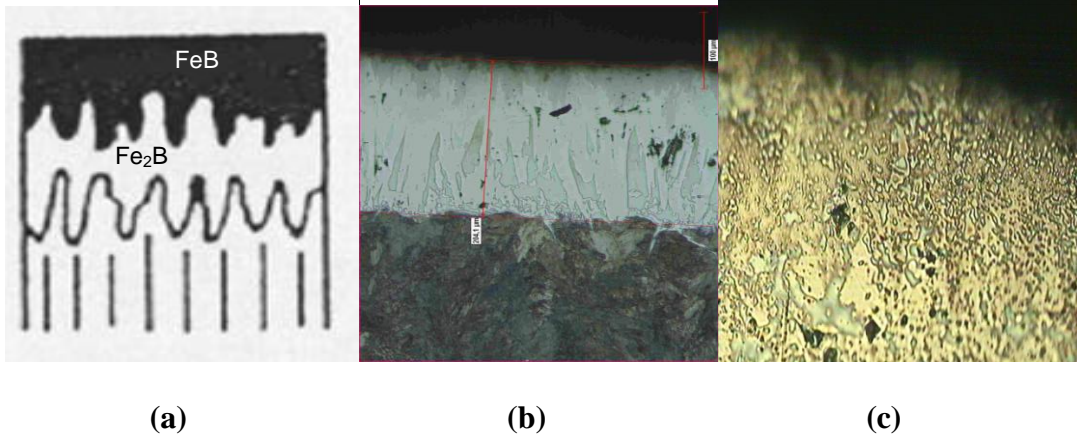
NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 1060	960	6



Şekil 7.3.14 AISI 1060 çeliği için 960 °C ve 6 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan iki fazlı tabakanın (yalnız FeB dişleri izole edilmiş) teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 960 °C 'de borlanmış AISI 1060 çeliğine ait gerçek iki fazlı tabakanın (yalnız FeB dişleri izole edilmiş) iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 162 μm (± 4 μm) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numuneye ait mikro sertlik için ölçüm alınan noktalar görülmektedir. (d) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

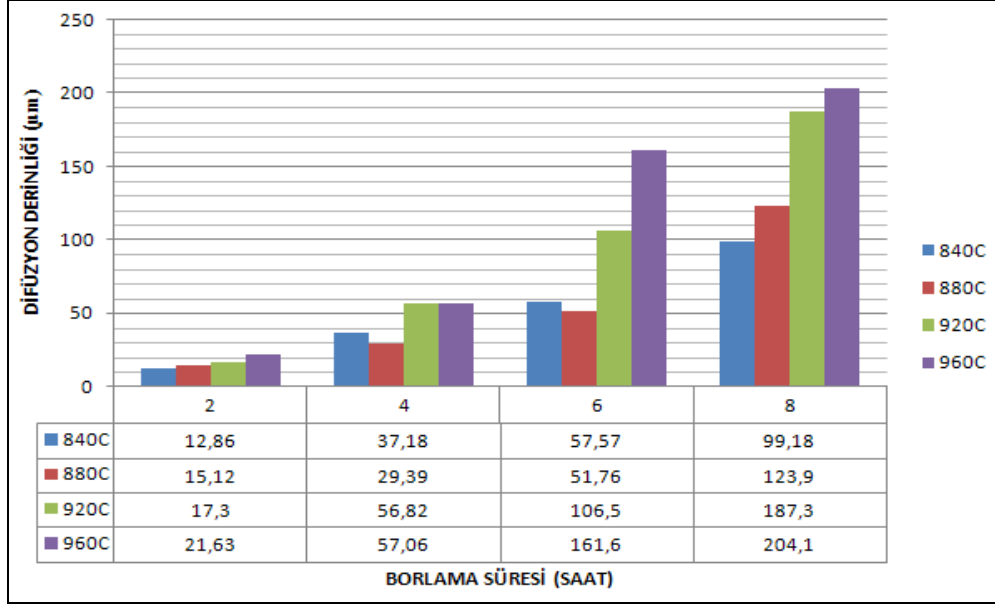
NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 1060	960	8



(d)

Şekil 7.3.15 AISI 1060 çeliği için 960 °C ve 8 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

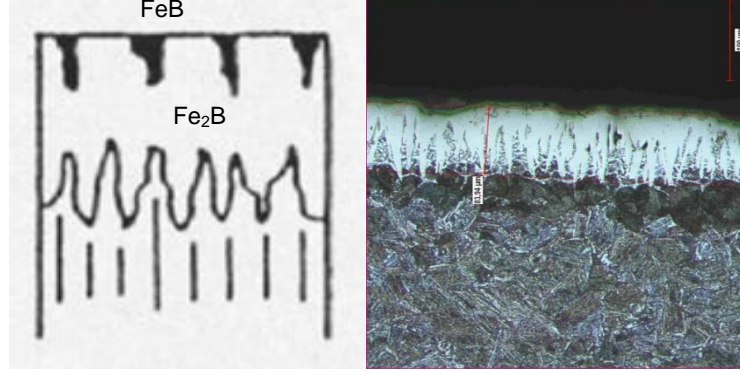
(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan iki fazlı tabakanın (FeB ve Fe₂B) teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 960 °C 'de borlanmış AISI 1060 çeliğine ait gerçek iki fazlı tabakanın (FeB ve Fe₂B) iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 204 μm ($\pm 6 \mu\text{m}$) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numuneye ait mikro sertlik için ölçüm alınan noktalar görülmektedir. (d) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.



Şekil 7.3.16. AISI 1060 deney numunesinin bor difüzyon derinliği grafiği.

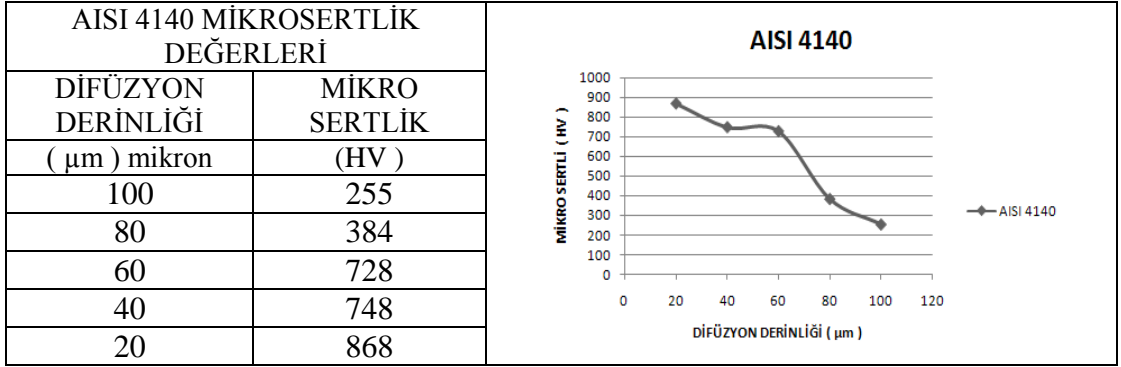
Şekil 7.3.16. 'da görülen grafikte AISI 1060 deney numunesi için düşük sıcaklık ve düşük zaman değerlerinin bor difüzyon derinliklerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca 4 saatlik borlama süresi sonunda oluşan difüzyon derinliği değerleri ile 6 saatlik borlama süresi sonunda oluşan difüzyon derinliği değerleri arasında neredeyse 2 kat fark olduğu görülmektedir. Sonuç olarak sıcaklık yükseldikçe ve Borlama süresi arttıkça, difüzyon derinliği (Borür tabakası kalınlığı) artmaktadır.

NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 4140	840	8



(a)

(b)

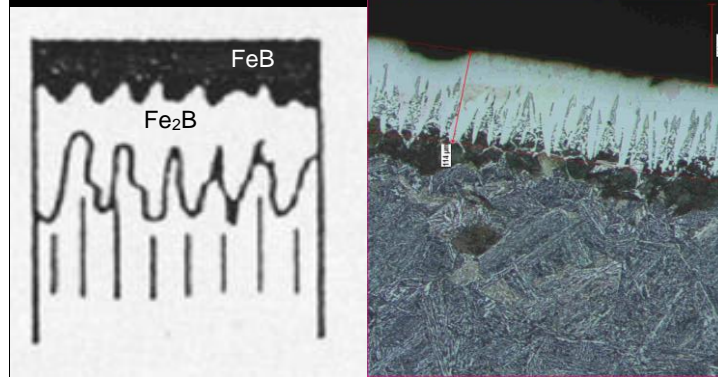


(c)

Şekil 7.3.17 AISI 4140 çeliği için 840 °C ve 8 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

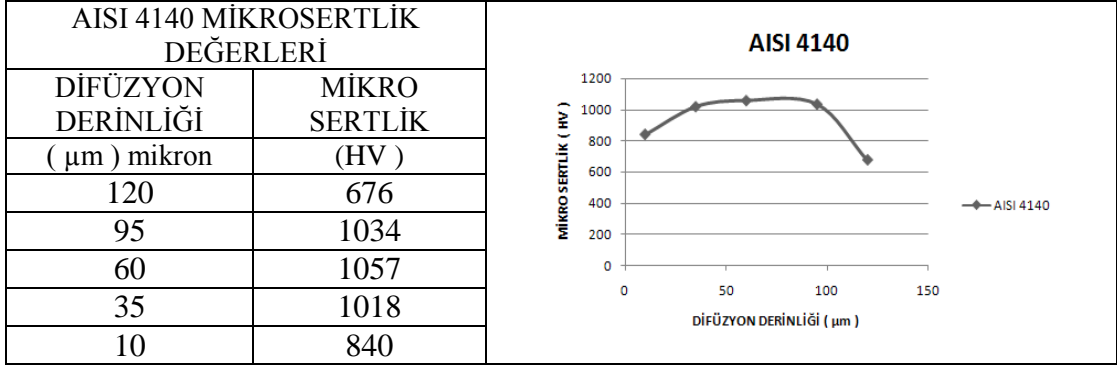
(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan iki fazlı tabakanın (yalnız FeB dişleri izole edilmiş) teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 840 °C 'de borlanmış AISI 4140 çeliğine ait gerçek iki fazlı tabakanın (yalnız FeB dişleri izole edilmiş) iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 110 μm (± 2 μm) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 4140	880	8



(a)

(b)

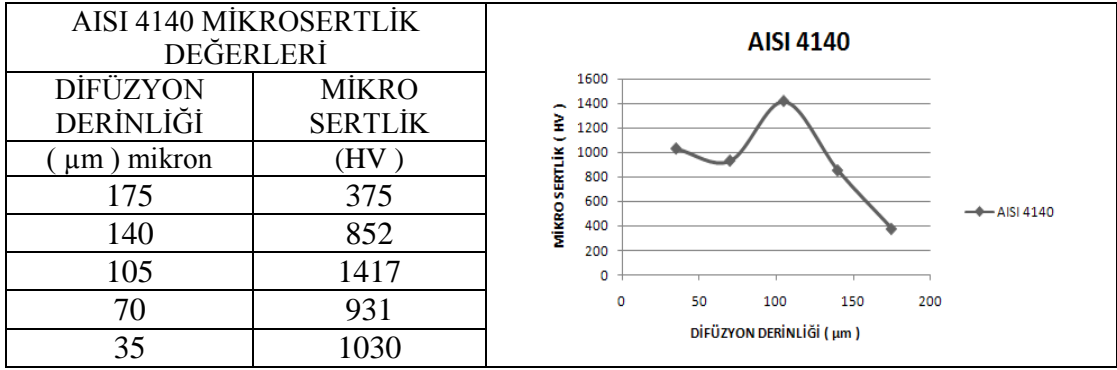
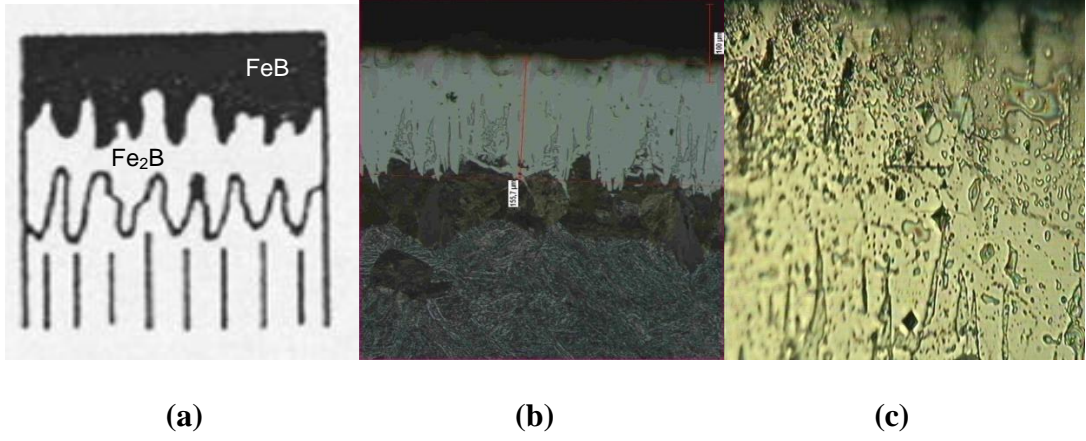


(c)

Şekil 7.3.18 AISI 4140 çeliği için 880 °C ve 8 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan iki fazlı tabaka ve ince bir FeB tabakasının teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 880 °C 'de borlanmış AISI 4140 çeliğine ait gerçek iki fazlı tabaka ve ince bir FeB tabakasının iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 110 μm ($\pm 2 \mu\text{m}$) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 4140	920	8

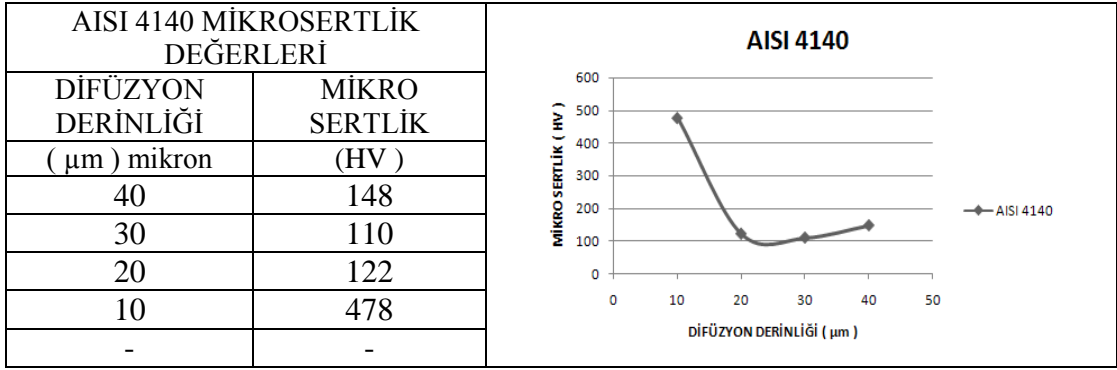
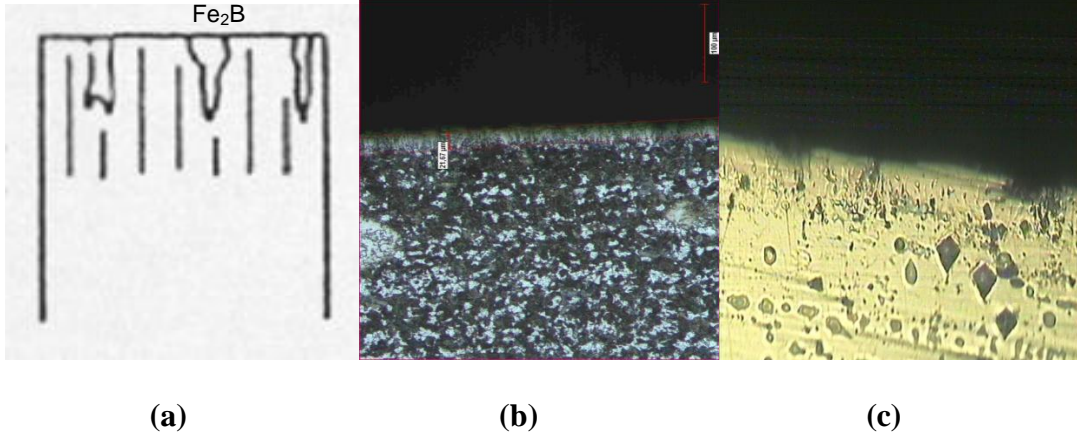


(d)

Şekil 7.3.19 AISI 4140 çeliği için 920 °C ve 8 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan iki fazlı tabakanın (Fe₂B ve FeB) teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 920 °C 'de borlanmış AISI 4140 çeliğine ait gerçek iki fazlı tabakanın (Fe₂B ve FeB) iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 110 µm (± 2 µm) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numuneye ait mikro sertlik için ölçüm alınan noktalar görülmektedir. (d) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

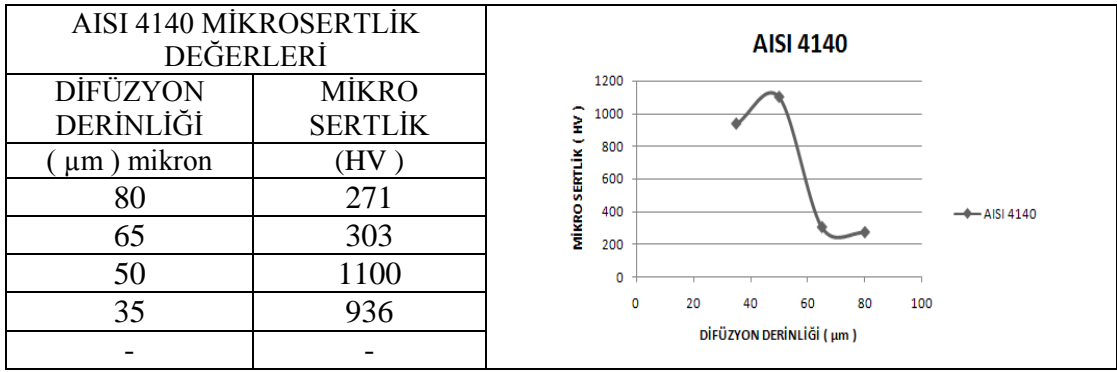
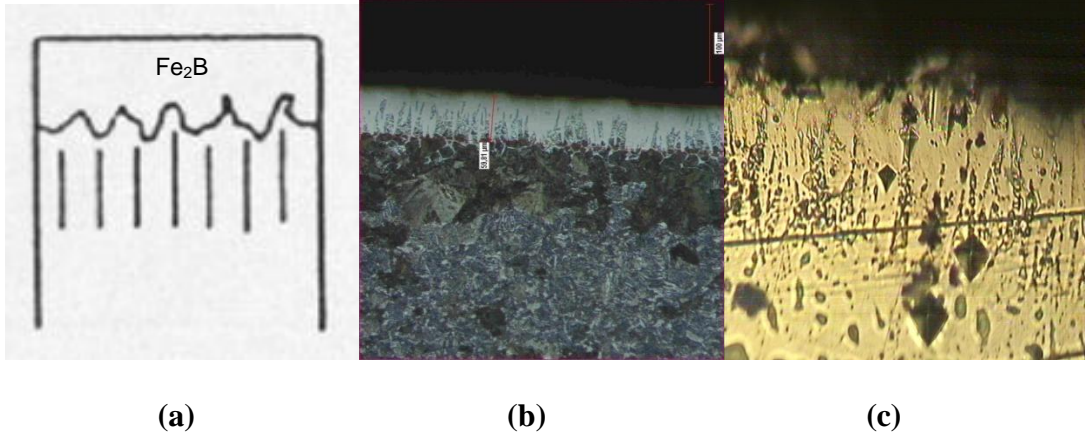
NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 4140	960	2



Şekil 7.3.20 AISI 4140 çeliği için 960 °C ve 2 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan Fe_2B fazının dışlarının çok izole edilmiş tabakanın teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 960 °C 'de borlanmış AISI 4140 çeliğine ait gerçek Fe_2B fazının dışlarının çok izole edilmiş tabakanın iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 110 μm ($\pm 2 \mu m$) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numuneye ait mikro sertlik için ölçüm alınan noktalar görülmektedir. (d) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

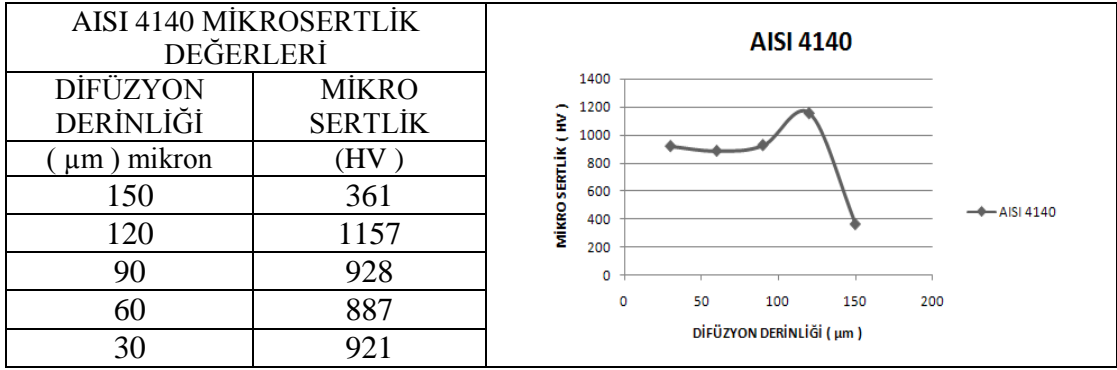
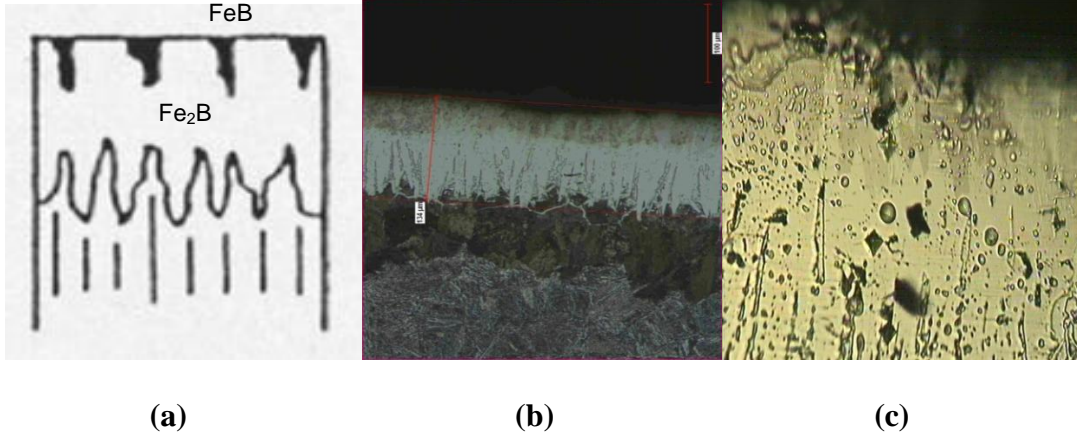
NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 4140	960	4



Şekil 7.3.21 AISI 4140 çeliği için 960 °C ve 4 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan tek fazlı Fe_2B 'nin az kuvvetli dişli tabakasının teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 960 °C 'de borlanmış AISI 4140 çeliğine ait gerçek tek fazlı Fe_2B 'nin az kuvvetli dişli tabakasının iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 110 μm ($\pm 2 \mu\text{m}$) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numuneye ait mikro sertlik için ölçüm alınan noktalar görülmektedir. (d) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

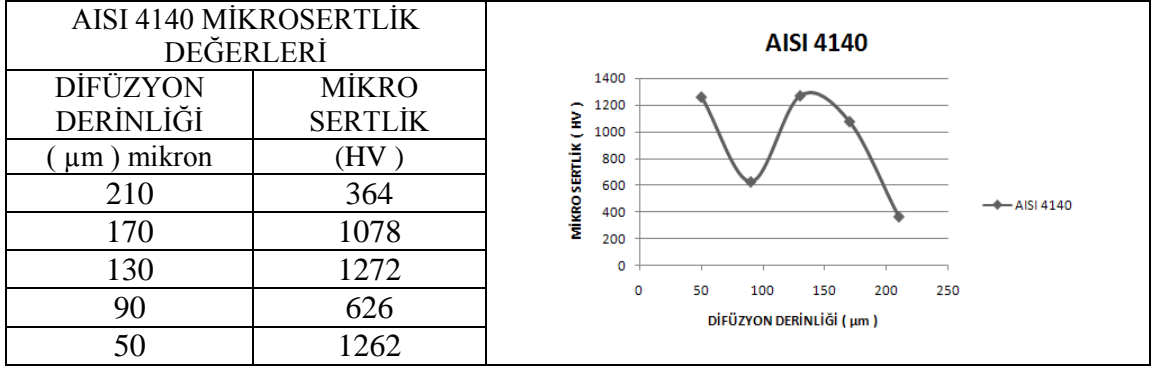
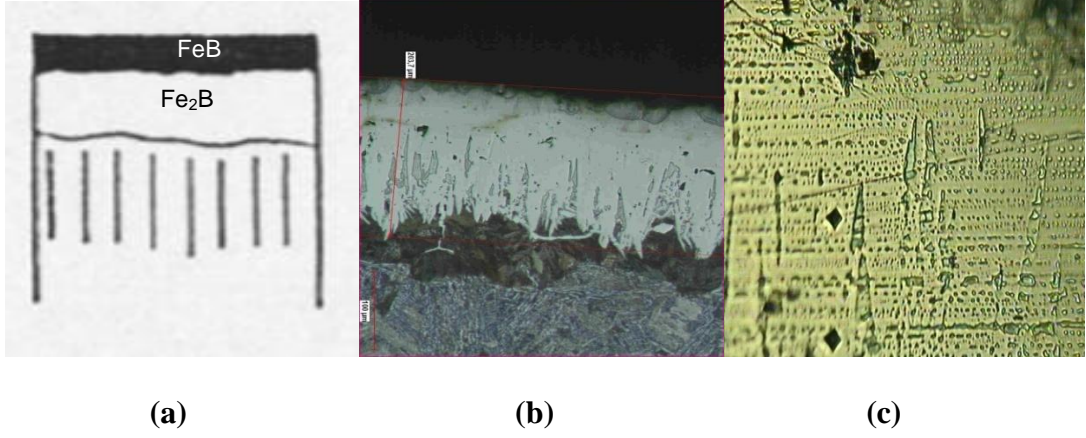
NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 4140	960	6



Şekil 7.3.22 AISI 4140 çeliği için 960 °C ve 6 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

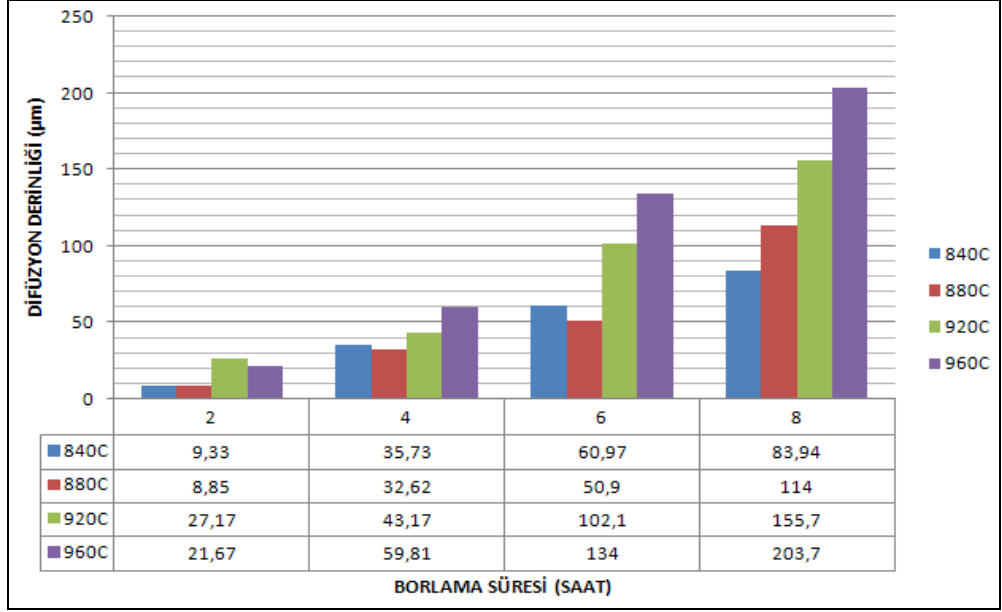
(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan iki fazlı tabakanın (yalnız FeB dışları izole edilmiş) teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 960 °C 'de borlanmış AISI 4140 çeliğine ait gerçek iki fazlı tabakanın (yalnız FeB dışları izole edilmiş) iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 110 μm ($\pm 2 \mu\text{m}$) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numuneye ait mikro sertlik için ölçüm alınan noktalar görülmektedir. (d) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.

NUMUNE	SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)
AISI 4140	960	8



Şekil 7.3.23 AISI 4140 çeliği için 960 °C ve 8 saatlik metalografik inceleme sonuçları.

(a) 'da bu parametrelere uygun olan borlama işlemi sonrasında oluşan iki fazlı tabakanın (düz, dişli yapıda olmayan) teorik iç yapı fotoğrafı görülmektedir [36]. (b) 'de ise 960 °C 'de borlanmış AISI 4140 çeliğine ait gerçek iki fazlı tabakanın (düz, dişli yapıda olmayan) iç yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu numunenin maruz kaldığı borlama şartları sonucunda oluşan difüzyon derinliği 110 μm ($\pm 2 \mu\text{m}$) olarak ölçülmüştür. Bu durumun daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. (c) Numuneye ait mikro sertlik için ölçüm alınan noktalar görülmektedir. (d) Numunede oluşan borlama difüzyon bölgesi için kesit yüzeyden içe doğru belirli mesafeler için mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler grafik haline getirilmiştir.



Şekil 7.3.24. AISI 4140 deney numunesinin bor difüzyon derinliği grafiği.

Şekil 7.3.24. 'de görülen grafikte; AISI 4140 çeliği deney numunesi için de tıpkı AISI 1060 çeliğinde görülen düşük sıcaklık ve zaman parametrelerinde yapılan borlamada difüzyon derinliklerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu durumu net bir şekilde görülmüştür. Ayrıca 4 farklı zaman ve sıcaklık parametrelerine bağlı yapılan borlama neticesinde bor difüzyon derinliğinin belli bir düzgünlükte arttığı görülmüştür. Sonuç olarak sıcaklık yükseldikçe ve Borlama süresi arttıkça, difüzyon derinliği (Borür tabakası kalınlığı) artmaktadır.

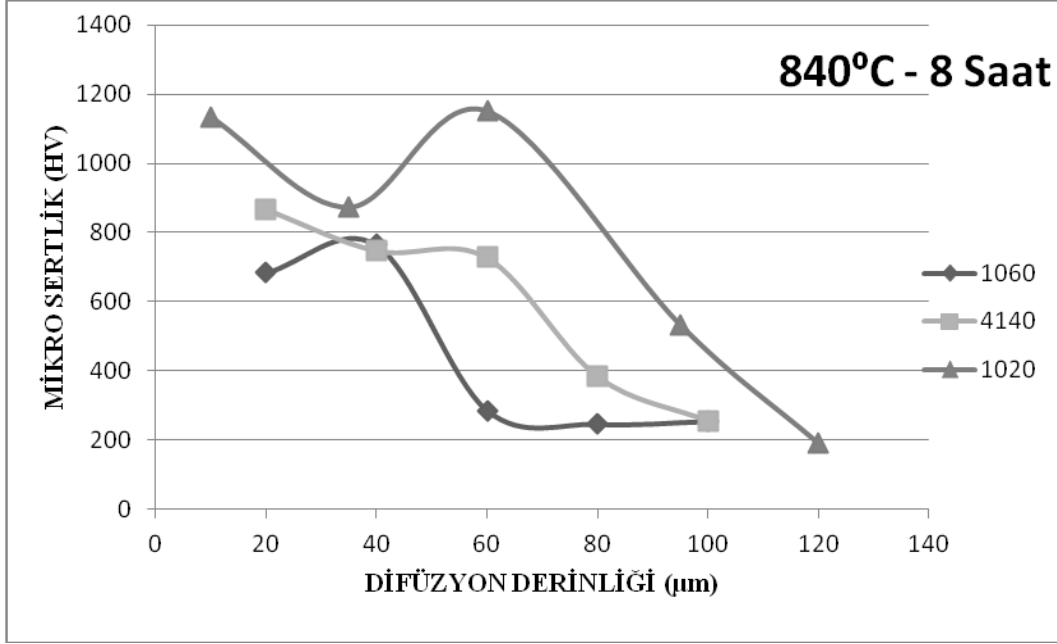
7.4. Bor Tabakası Kalınlıklarının İnceleme Sonuçları.

Çizelge 7.4. Sıcaklık ve zamana bağlı borlu tabaka kalınlığı.

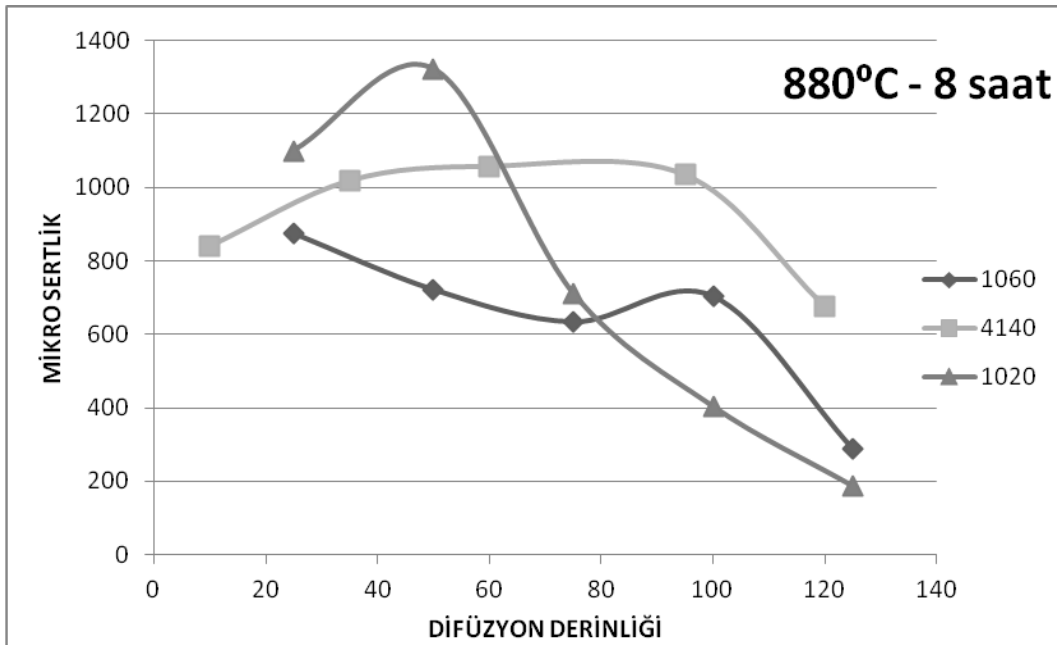
BOR TABAKASI KALINLIĞI				
BORLAMA PARAMETRELERİ		NUMUNE GURUPLARI DEMİRBORÜR TABAKASI KALINLIKLARI		
SICAKLIK (°C)	ZAMAN (SAAT)	AISI 4140 (µm)	AISI 1060 (µm)	AISI 1020 (µm)
840	2	9,33	12,86	9,15
	4	35,73	37,18	42,9
	6	60,97	57,57	79,11
	8	83,94	99,18	111,6
880	2	8,85	15,12	12,13
	4	32,62	29,39	26,11
	6	50,9	51,76	75,94
	8	114	123,9	119,8
920	2	27,17	17,3	22,35
	4	43,17	56,82	53,83
	6	102,1	106,5	110,8
	8	155,7	187,3	198,7
960	2	21,67	21,63	24,85
	4	59,81	57,06	64,1
	6	134	161,6	141,6
	8	203,7	204,1	211,2

Çizelge 7.4. 'de de görüldüğü gibi kalınlığı en düşük tabaka oluşumu 840 °C 'de ve 2 saat sürede AISI 1020 çeliği borlandıktan sonra oluşmuştur. Yine Tablo 7.4. 'de görüldüğü gibi en fazla tabaka kalınlığı ise 960 °C 'de ve 8 saatlik borlama işlemi sonrasında AISI 1020 çeliğinde oluştuğu görülmektedir.

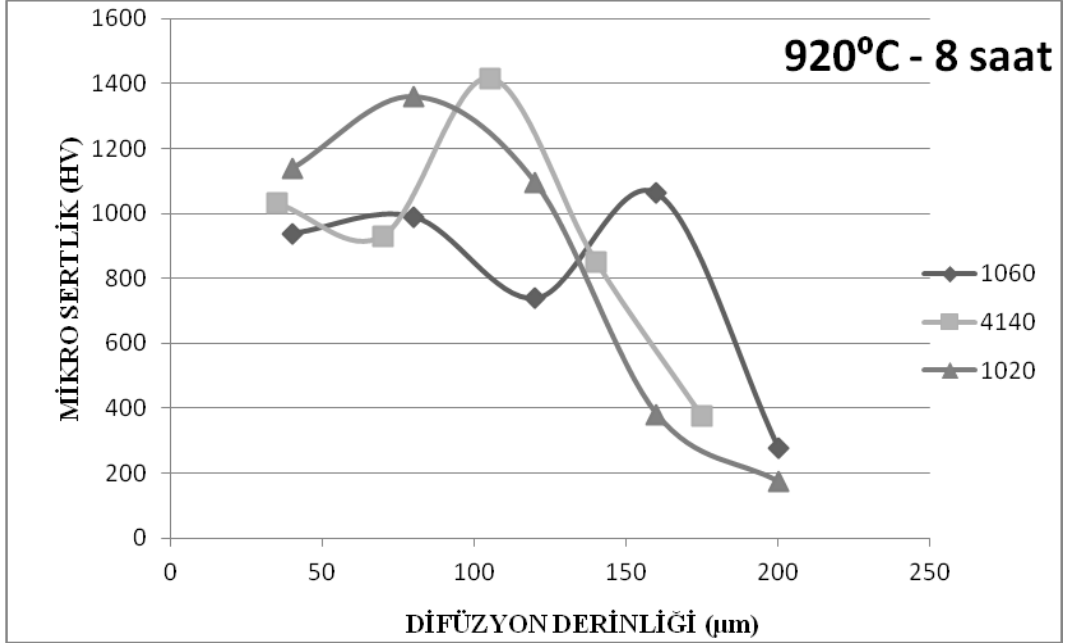
Şekil 7.4.1., 7.4.2., 7.4.3., 7.4.4., 7.4.5., 7.4.6. ve 7.4.7. 'de mikro sertlik – difüzyon derinliği ilişkileri gösterilmiştir.



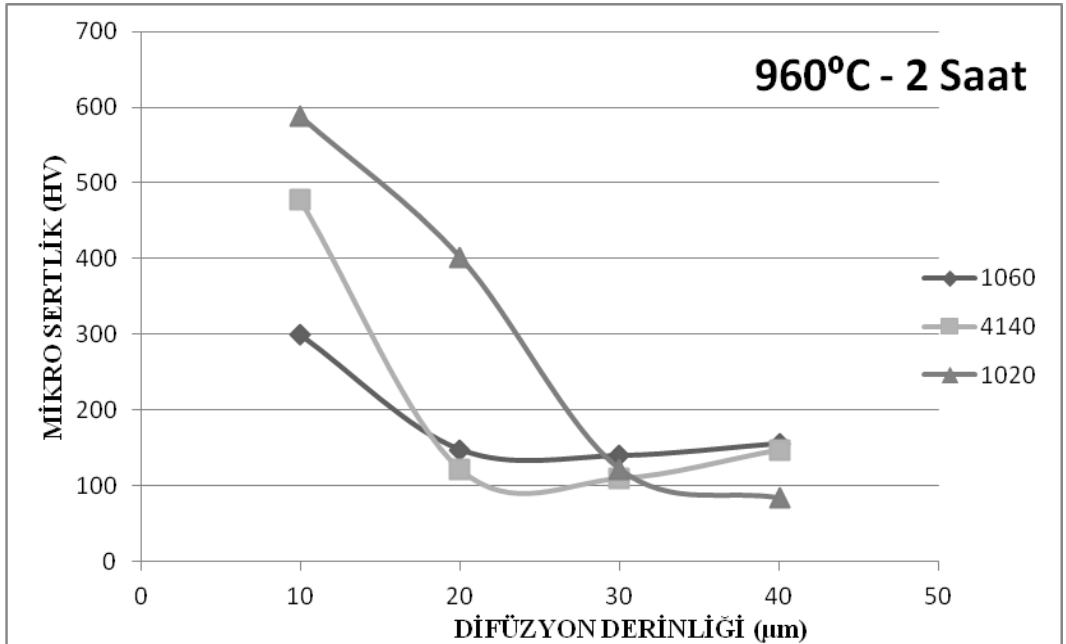
Şekil 7.4.1. Üç farklı numunenin 840 °C ve 8 saat için mikrosertlik değerleri grafiği.



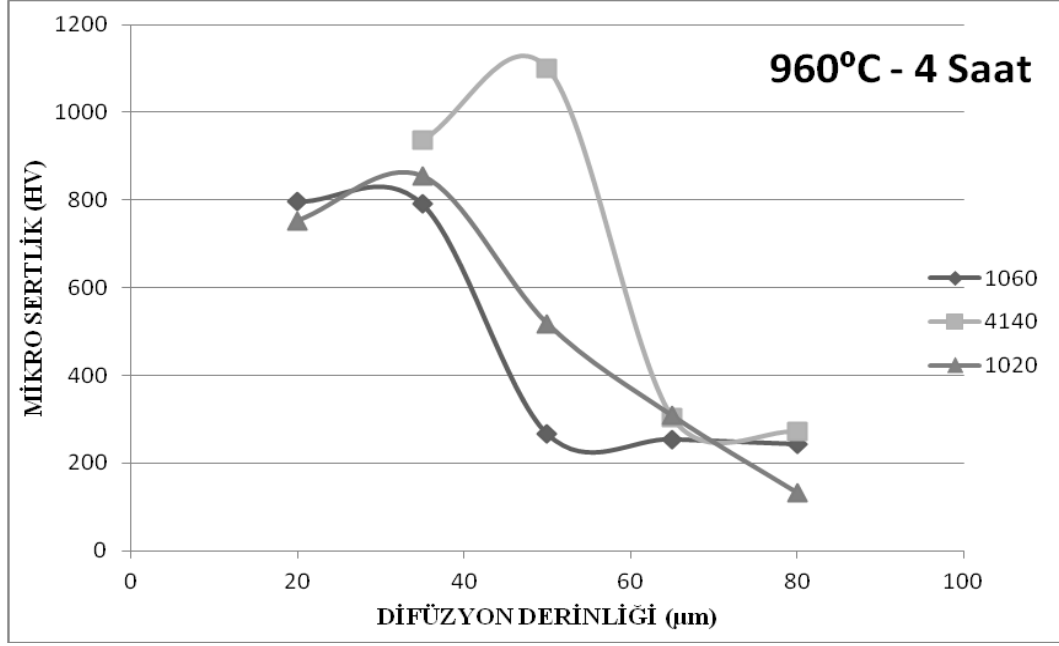
Şekil 7.4.2. Üç farklı numunenin 880 °C ve 8 saat için mikrosertlik değerleri grafiği.



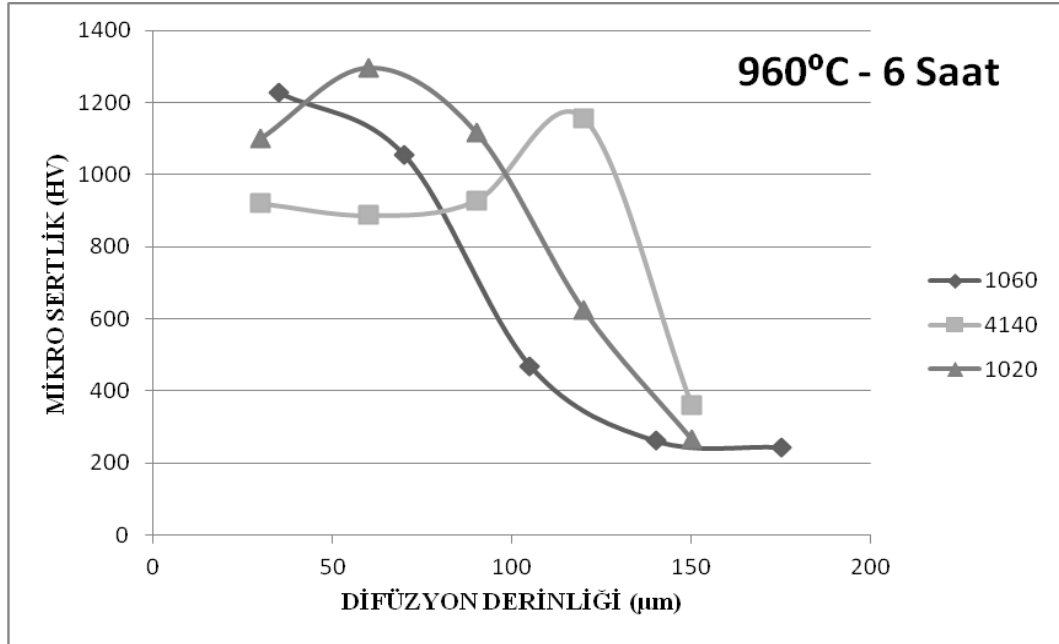
Şekil 7.4.3. Üç farklı numunenin 920 °C ve 8 saat için mikrosertlik değerleri grafiği.



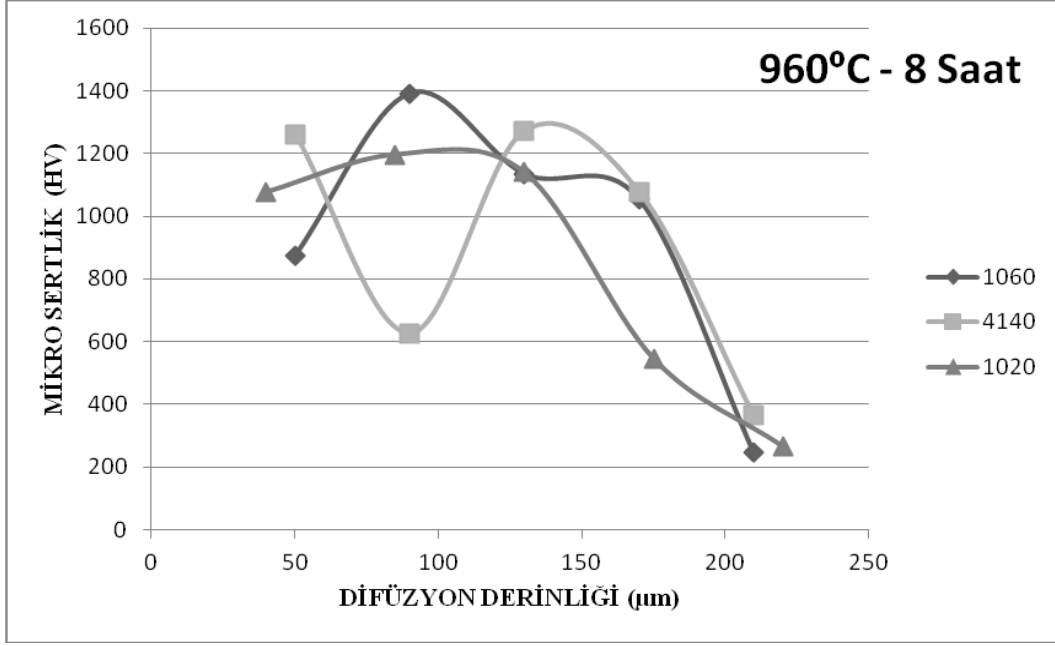
Şekil 7.4.4. Üç farklı numunenin 960 °C ve 2 saat için mikrosertlik değerleri grafiği.



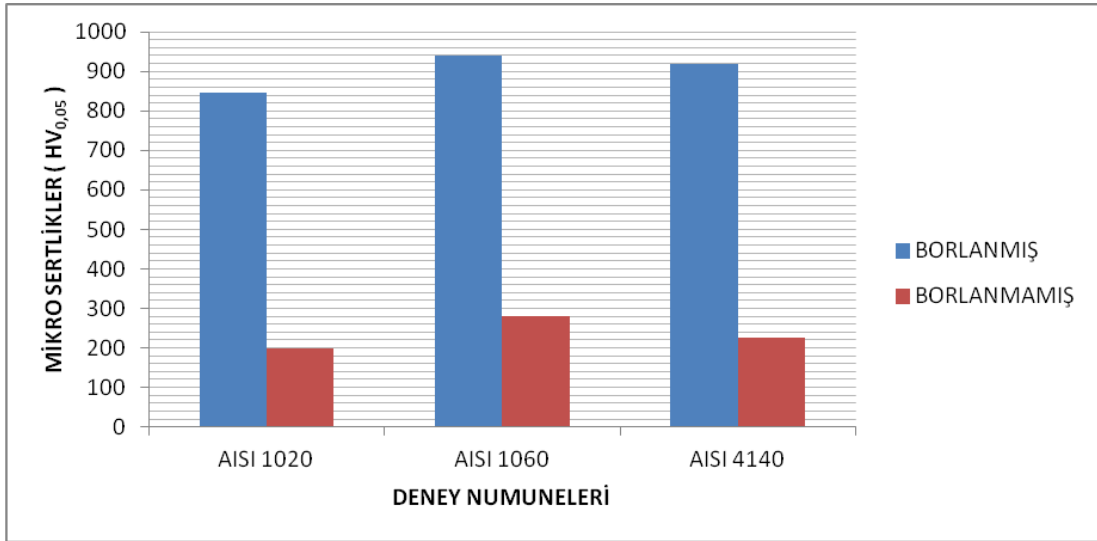
Şekil 7.4.5. Üç farklı numunenin 960 °C ve 4 saat için mikrosertlik değerleri grafiği.



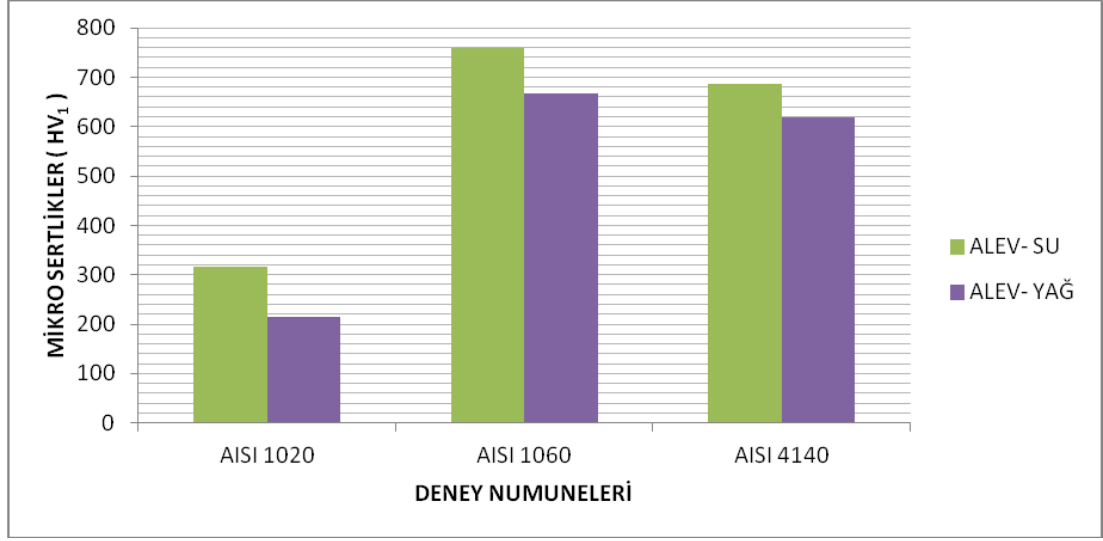
Şekil 7.4.6. Üç farklı numunenin 960 °C ve 6 saat için mikrosertlik değerleri grafiği.



Şekil 7.4.7. Üç farklı numunenin 960 °C ve 8 saat için mikrosertlik değerleri grafiği.



Şekil 7.4.8. Numunelerin borlanmış ve borlanmamış hallerinin mikrosertlik açısından mukayesesi.



Şekil 7.4.9. Numunelerin alevle sertleştirilip su ve yağda soğutulmuş hallerinin mikrosertlik açısından mukayesesi.

Numunelerin hiç ısıtılmış işlem görmemiş olanlarına göre ısıtılmış işlem görmüş olanlarındaki mikrosertliklerinin %'de olarak artışı çizelge 8.1.'deki gibidir.

Çizelge 8.1. Hiç ısıtılmış işlem görmemiş numunelere göre, ısıtılmış işlemli numunelerde %'de olarak mikrosertlik değerlerindeki artış.

NUMUNE	ALEVLE SERTLEŞTİRME / YAĞDA SOĞUTMA İLE MİKROSERTLİĞİN %' DE ARTIŞI	ALEVLE SERTLEŞTİRME / SUDA SOĞUTMA İLE MİKROSERTLİĞİN %' DE ARTIŞI	BORLAMA İLE MİKROSERTLİĞİN %' DE ARTIŞI
AISI 1020	% 108	% 158	% 423
AISI 1060	% 238	% 271	% 336
AISI 4140	% 274	% 304	% 411

8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapmış olduğumuz tüm deneyler sonucunda varmış olduğumuz sonuçlar:

1. Herhangi bir yüzey işlemi uygulanmamış, normalize edilmiş halde bulunan deney numunelerinde AISI 4140 çeliğinin sertliği 226 HV, AISI 1020 çeliğinin sertliği 200 HV ve AISI 1060 çeliğinin sertliği ise 280 HV'dir.
2. Borlama işlemi süresi arttıkça bor difüzyon derinliği de artacağından bu durum malzemelerin hacimlerinin artmasına neden olur. Borlanacak malzemelerin boyutlandırılmasında bu artış göz önüne alınmalıdır.
3. AISI 1020 çeliğinde bor difüzyon derinliği fazla olduğundan bu durumla orantılı olarak malzeme boyutları da diğer numunelere göre büyümüştür. Bu verileri AISI 1060 ve 4140 takip etmektedir. AISI 1020 çeliğinin diğer çeliklerden daha fazla boyut değişimine sahip olabilmesi alaşımsız yapısı ve daha az (C) oranına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. AISI 1060 çeliğide alaşımsız çeliklerden sayılsa da, 1020 çeliğine oranla neredeyse 3 kat (C) oranına sahip olması nedeniyle, borun çelik içine difüzyonu zorlaşmaktadır. AISI 4140 çeliğinin bor gelişimini olumsuz etkileyen ise yapısındaki alaşım elementleri bulundurmasıdır.
4. Bor tabakası; aynı çelik numuneleri için, süre artışı ile yükseliş göstermektedir. En düşük bor tabakası 2 saatlik borlamada, en geniş bor tabakası ise 8 saatlik borlamada meydana gelmektedir.
5. 8 saatlik borlanmış numuneler, 2 saatlik borlanmış numunelerden daha geniş bor tabakası oluşturduğundan dolayı, 8 saatlik numuneler – 2 saatliklere oranla ana malzemenin içine doğru daha yüksek mikrosertlikler göstermektedir. Mesafeler karşılaştırıldığında ise AISI 1020 çeliklerinin, AISI 1060 çeliğine ve AISI 4140 çeliğine karşı daha derin mesafelere dek mikro sertlik yüksekliğini koruduğu görülmektedir.

6. Borlanan üç numunede de sertlik, en dış yüzeyden matrise doğru gidildikçe azalma göstermektedir. Bor difüzyonunun bor yapmadığı kısımdan itibaren de matrisin sertliğine düşmüştür. En yüksek sertlik değerleri borürlerin bulunduğu kolonlarda ölçülmüştür.

7. Çizelge 8.1.'e bakıldığında numunelerde mikrosertlik açısından borlama işlemi sonrasında AISI 1020' de % 423, AISI 1060' da % 336 ve AISI 41040' da % 411' lik bir artış olduğu görülmüştür.

8. Metalografi teknikleriyle hazırlanan numuneler üzerinde yapılan optik mikroskopik incelemeler sonucu borür tabakası, geçiş bölgesi ve anayapının mikroyapısını net olarak ortaya çıkarmıştır. Bununla beraber, borlu tabaka kalınlığı, oluşan borür dişleri arası mesafe ile mikrosertlik ölçümlerinde metalografik incelemelerden faydalanılmıştır. Metalografik incelemeler bor bileşiklerinin AISI 1020 numunede meydana getirdiği borür tabakasının kolonsal ve dişli yapıda olduğunu ortaya çıkarmıştır. AISI 1060 çeliğinde ise tabaka karbonun fazla olmasından dolayı AISI 1020 numuneye göre daha az kolonsal ve daha az dişli yapıda oluşmuştur. AISI 4140 numunede ise alaşım elementi fazlalığından dolayı diğer iki numuneye göre kolonsal yapıdan uzak daha düz bir geometriye sahip tabaka oluştuğu görülmüştür.

Bu alanda çalışma yapacaklara önerilerim:

1. Borlama yapılmış numunelerde, mikro çatlakların oluşma mekanizması ve ısı işlemlere bağlılığı araştırılabilir.

2. Borlanabilen malzemelerin çalışma şartları genel olarak göz önüne alınıp hangi sıcaklık, süre ve hangi yöntemle borlanmasının uygun olacağına dair bir araştırma yapılabilirler.

3. Termokimyasal borlama yöntemi ile borlanmış çeliklerin yüzey performanslarının geliştirilmesine yönelik araştırma yapılabilirler.

4. Küresel Grafitli dökme demirin borlanması ve sonrasında yüzey özelliklerinin belirlenmesine yönelik araştırma yapılabilirler.

KAYNAKÇA

- [1] Khoee, S.M.M., “Ergimiş Boraks Banyosunda Çeliklere Vanadyum Karbür Kaplama”, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (1992).
- [2] Özsoy, A., “Çeliğin Borlanması ve Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi”, Doktora Tezi, Anadolu Ü. Fen Bil. Ens., Eskişehir, (1991) 101.
- [3] Karaman, Y., “Endüstriyel Borlama ve Tekstil Endüstrisinde Bir Uygulama”, Y.Lisans Tezi, Süleyman Demirel Ü. Fen Bil. Ens., Isparta. (2003) 12.
- [4] Çelikyürek, İ., Baksan, B., Gürler, R., “Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Borlanması” II. Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir. (2004).
- [5] VAROL R., “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, (2000).
- [6] Komisyon., “Bor Stratejik Bir Madendir”, Bilim ve Ütopya Dergisi, (2002) 94
- [7] Çalık A., “Türkiye’nin Bor Madenleri ve Özellikleri”, *Mühendis ve Makine*, **508**, (2002) 17.
- [8] Komisyon, “Bor Raporu”, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, (2003).
- [9] Altun, F., “Bor”, Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, Ankara, (2005).
- [10] Helvacı, C., “Türkiye Borat Yatakları: Jeolojik Konumu, Ekonomik Önemi ve Bor Politikası”, 5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, (2004).
- [11] Duman, İ., “Bor Madenleri ve Stratejik Bor Ürünleri”, *Bilim ve Ütopya*, **114**, (2003) 18-21.
- [12] Taşcı, A., “Borlanmış Çeliklerin Aşınma ve Korozyon Dayanımları”, Y.Lisans Tezi, İstanbul Ü. Fen Bil. Ens., İstanbul, (1993) 45.
- [13] Delikanlı, K., Çalık, A., Uzun, H.A., “Sade Karbonlu Bir Çeliğin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi”, 1.Uluslararası Bor Sempozyumu, (2002) 109-113.
- [14] www.periodensystem.net.de (Son Erişim 05.07.2011).

- [15] Şahin, S., “Katı Borlama Yöntemi İle Ferrobör Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, Celal Bayar Ü. Fen Bil. Ens., Manisa, (1999).
- [16] Ediz, N., Seyfettinoğlu, M. A., Özdağ, H., “Kil Minerallerinin Tügsaş-Kütahya Azot Fabrikası Baca Gazlarının Filtrasyonunda Kullanımın Araştırılması”, 8. ulusal Kil Sempozyumu, Dumlupınar Ü., Ed. Işık, Kütahya, (1997) 315-325.
- [17] Selçuk B., “Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Doktora Tezi, Erciyes Ü. Fen Bil. Ens., Kayseri, (1994).
- [18] Yünker U., “Borlanmış Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi”, Y.Lisans Tezi, Celal Bayar Ü. Fen Bil. Ens., Manisa, (2000) 161.
- [19] Aydemir, T., Şen, U., “Borlanmış Soğuk İş Takım Çeliklerinin Aşınma Davranışları”, Sakarya.Ü., *Fen Bilimleri Enstitüsü*, 73, Sakarya, (2003) 28-31.
- [20] Çalık, A., “Borlama ve Endüstriyel Uygulama Alanları”, I. Ulusal Bor Çalıştayı, Ankara, (2005).
- [21] Nair, F., Karamış, M.B., “Borlanmış Çeliklerde Malzeme Bileşiminin Mikrosertliğe Etkileri”, 7. Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli, (1997) 354-360.
- [22] Akkurt, M., “Makine Elemanları Cilt II”, Birsen Kitabevi, İstanbul, (1987) 42-51.
- [23] Varol, R., Yılmaz, S., S., Tunay, R., F., “Borlamanın T/M Çelik Parçaların Mikroyapı ve Yüzey Sertliğine Etkisi”, *III. International Powder Metallurgy Conference*, Ankara, (2002).
- [24] Körpe, N., Ö., Körpe, E., Baksan, B., Çelikyürek, İ., Gürler, R., “Fe₃Al (Fe₇₄Al₂₆) Alaşımının Borlanması”, II. Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir, (2004).
- [25] Bayça, S.U., Şahin, S., “Borlama”, *Mühendis ve Makine*, Ankara, (2004).
- [26] Çalık, A., “Makine ve Metalurji Sanayinde Bor Kullanımı”, 2.Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir, (2004).
- [27] Bozkurt, N., “Bor Yayınımla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme”, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bil. Ens., İstanbul, (1984).
- [28] Uzun, H. A., “Borlama İle Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları”, Y.Lisans Tezi, Süleyman Demirel Ü. Fen Bil. Ens., Isparta, (2002).

- [29] Çetin M., “Borlanmış Hadfield Çeliklerinin Aşınma Dayanımını İncelenmesi”, Y.Lisans Tezi, Dumlupınar Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, (2003).
- [30] Matuschka, A.G.V., “Boronizing”, München, Wien, Hanser, (1980).
- [31] Tezcan, R., “Borlama İşlemi ve Endüstriyel Uygulamaları”, Y.Lisans Tezi, Osmangazi Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (1996).
- [32] Şen U., “Küresel Grafitli Dökme Demirin Borlanması ve Özellikleri”, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (1997).
- [33] Cabeo, E.R., Laudien, G., Biemer, S., Rie, K. T. and Hoppe, S., “Plasma-assisted boriding of industrial components in a pulsed D.C. glow discharge”, *Surface and Coating Technology*, **116–119**, (1999) 229–233.
- [34] Özbek, I., “Borlama Yöntemi İle (AISI M50, AISI M2) Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi”, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, (1999).
- [35] Küper, A., Qiao, X., Stock, H.R. and Mayr, P., “A novel approach to gas boronizing”, *Surface and Coating Technology*, **130**, (2000) 87-94.
- [36] Kaestner, P., Olfe, J. and Rie, K.T., “Plasma-assisted boriding of pure titanium and TiAl6V4”, *Surface and Coating Technology*, **142-144**, (2001) 248-252.
- [37] Özsoy A.; “Termal Çevrimli Borlama Uygulamaları”, Doktora Tezi, A.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (1988).
- [38] Yapar U., Başman G., Arısoy C.F., Şeşen M.K., “Çeliklerde Borlama Yoluyla Yüzey Sertleştirme”, *Metal Dünyası*, **115**, (2002) 69 – 74.
- [39] Vipin J., Sundararajan G., “Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel”, *Surface and Coatings Technology*, **149**, (2002) 21 – 26.
- [40] Karakan, M., Alsaran, A., Çelik, A., “Plazma Borlama”, *Mühendis ve Makine*, **512**, (2002).
- [41] Karamış, M. B., Nair, F., Selçuk, B., “Borlanmış Malzemelerin Tribolojik Özellikleri”, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, (1995).
- [42] Bhushan, B. and Gupta, B.K., “Handbook of Tribology”, McGraw-Hill, Inc., USA., **1168**, (1991).
- [43] Yoon, J.H., Jee, Y.K. and Lee, S.Y., “Plasma paste boronizing treatment of the stainless steel AISI 304”, *Surface and Coating Technology*, **112**, (1999) 71-75.

- [44] Çalık, A., Delikanlı, K., Uzun A., “Ç 1035 Çeliğin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi”, II. Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir, (2004).
- [45] Çeğil, Ö., Şen.Ş., “AISI 8620 Çeliğinin Bor-Vanadyumlanması ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Sakarya, **63**, (2002) 113-117.
- [46] Özsoy, A., “Borlama ile İlgili Genel Bir Değerlendirme”, *Endüstriyel Yüzey Teknolojileri*, **22**, (2001) 10-13.
- [47] Çalık A., Özsoy A., “Termal Çevirimli Borlama İşleminin Ç1010 Çeliğine Etkileri”, 11. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, İstanbul, (2002).
- [48] Yılmaz, A., “Her Derde Deva Hazinesimiz Bor”, *Bilim ve Teknik*, **414**, (2002) 38-48.
- [49] Bindal C., “Az Alaşımli ve Karbon Çeliklerinde Borlama ile Yüzeye Kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tesbiti”, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (1991).
- [50] Lu, M., J., “Erhöhung der Lebensdauer von Bauteilen und Werkzeugen durch Boralitieren”, *HTM*, **37**, (1983) 73-82.
- [51] Atik, E., “Çeliklerin Borlanarak Aşınma Dayanımlarının Arttırılması”, *Mühendis ve Makine*, **445**, (1997) 17-20.
- [52] Selam M., “Borlanmış Gri Dökme Demirin Aşınma Davranışlarının Deneysel Araştırılması”, Y.Lisans Tezi, Erciyes Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, (1996).
- [53] Şen, Ş., Bindal, C., “AISI 5140 Çeliğinin Yüzeyinde Oluşan Borürlerin Bazı Özellikleri”, Denizli Makina Mühendisleri Odası Bilim Günleri, Denizli, (1999) 670-675.
- [54] Atik, E., “Farklı Bir Yüzey Sertleştirme Yöntemi: Borlama”, *Makina & Metal*, **117**, (2001) 86-90.
- [55] Er, Ü., Par, B., “Bor Yayınımla Yüzeyi Sertleştirilmiş AISI 1030 ve AISI 1050 Çeliklerinin Abrazif Aşınma Dayanımlarının İncelenmesi”, *Osman Gazi Ü. Müh. Mih. Fak. Dergisi*, Eskişehir, **17**, (2004) 1.
- [56] Şen, Ş., “Termokimyasal Borlama İşlemiyle AISI 5140, AISI 4140 ve AISI 4340 Çeliklerinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, Sakarya Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, (1998).
- [57] Yılmaz S. S., “Çeliklerde Bor İle Yüzey Sertleştirme”, Y.Lisans Tezi, Celalayar Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, (1997).