

ÇELİĞİN BORLANMASINDA BORÜR TABAKASI,  
GEÇİŞ ZONU VE ANA MATRİKSİN  
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Abdullah ÖZSOY

Doktora Tezi  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

1991

**ÇELİĞİN BORLANMASINDA BORÜR TABAKASI,  
GEÇİŞ ZONU VE ANA MATRİKSİN ÖZELLİKLERİNİN  
İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Abdullah ÖZSOY**

**Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalında  
DOKTORA TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Danışman: Prof.Dr. Macit YAMAN**

**Eylül-1991**

ABDULLAH ÖZSOY'un DOKTORA TEZİ olarak hazırladığı "ÇELİĞİN BORLANMASINDA BORÜR TABAKASI, GEÇİS ZONU VE ANA MATRİKSİN ÖZELLİKLERİNİN İYİLESTİRİLMESİ " başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

23/10/1991

Üye : Prof.Dr.Macit YAMAN  
(Danışman)

Üye : Prof.Dr.Halim DEMİRCİ

Üye : Prof.Dr.Erdoğan FIRATLI

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun..... gün ve 29-4 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof.Dr. Rüstem KAYA  
Enstitü Müdürü

## ÖZET

Borlama, malzeme yüzeyine bor yayındırma işlemidir. Çeliklerde bor yayınımla yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayılarının yanında bazı asitlere ve ergiyik metal banyolarındaki korozyona karşı dirençli bir tabaka elde edilir. Borür tabakalarının yüksek sertliğe karşın, gevrek olmaları endüstriyel kullanım alanlarını daraltmaktadır. Bu çalışmanın amacı, sıvı ortamda borlamada termal çevrimli ısıtma işlemlerinin uygulanmasıyla borür tabakası, geçiş zonu ve ana matriksin özelliklerinin iyileştirilmesidir.

Ç 1045 çeliğinden hazırlanan numunelerde 900°C sabit sıcaklıkta ve termal çevrimli şartlarda, % 65 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> + % 20 Fe-Si + % 15 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> bileşimli sıvı banyoda borlama yapılmıştır. Daha sonra metalografik inceleme, mikrosertlik, x-ışınları ve aşınma testleri yapılarak sabit sıcaklıkta ve termal çevrimli şartlarda borlanan numunelerin özellikleri tesbit edilmiştir. Ayrıca borlanmış numunelerde borür tabakası, geçiş zonu ve ana matrikste detaylı mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda, sabit sıcaklıkta borlamaya göre termal çevrimli borlamada; borür tabakası kalınlığının daha üniform ve daha az poroziteli olduğu, geçiş zonu ve matriksin tane boyutunun küçüldüğü görülmüştür. Sabit sıcaklıkta gözlenen karışık tane boyutunun termal çevrimli borlamada yok olduğu tabakanın sertlik değerlerinde belirgin bir değişimin olmadığı ve borür tabakasının gevrekliğinin azalarak, aşınma v.b. mekanik özelliklerinin iyileştiği tesbit edilmiştir.

## SUMMARY

Boriding is the bor diffusing treatment of the material surface. In steels, a resistive layer can be obtained against corrosion which can happen in some acids and molten metals, besides high hardness values and low friction coefficient. The use of boride layer in industry is restricted due to brittle behaviour although it shows high hardness values. The aim of this study is to improve the properties of boride layer, transition zone and base material by using the thermal cycling heat treatment in liquid boriding.

Liquid boriding for specimens prepared of Ç 1045 steel has been realised in 65 %  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + 20 % Fe-Si + 15 %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  liquid bath at constant temperature of 900°C and thermal cycling conditions. The properties of the specimens which are borided under the thermal cycling conditions and the constant temperatures, have been determined by applying metallographic inspections, microhardness, x-rays and wear tests. Moreover, in borided specimens, detailed microstructure pictures of boride layer, transition zone and base material have been taken.

After the experiments, it has been seen that, boride layer thickness is more uniform and less porous; grain size of transition zone and base material got finer in thermal cycling boriding than constant temperature. Moreover, mixed grain size observed in constant temperature disappeared in thermal cycling boriding. Besides, it has been determined mechanical properties like wear etc. have been improved by lessening the brittleness of boride layer. Also, hardness values of boride layer have not shown a considerable change.

**TEŞEKKÜR**

Akademik hayatımın başlangıcından bugüne kadar her aşamada yapıcı uyarı ve desteklerini gördüğüm hocam sayın Prof.Dr. Macit YAMAN'a bu çalışmadaki değerli katkıları için şükranlarımı sunarım.

Tezin yazımını gerçekleştiren sayın Neriman ÖNER'e, şekillerin çizimini yapan sayın Azime SUNTER'e teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	iv
SUMMARY .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. BOR VE MİNERALLERİ HAKKINDA GENEL BİLGİ .....	2
3. BORLAMANIN FİZİKSEL KİMYASAL PRENSİPLERİ .....	3
3.1. Metal Borürlere Genel Bakış .....	5
3.2. Demir-Bor Denge Diyagramı .....	6
4. BORLAMA İŞLEMİ VE REAKSİYON MEKANİZMASI .....	8
4.1. Katı Ortamda Borlama .....	9
4.2. Sıvı Ortamda Borlama .....	11
4.2.1. Normal sıvı ortamda borlama .....	12
4.2.2. Elektrolitik borlama .....	16
4.3. Gaz Ortamda Borlama .....	17
4.4. Borür Tabakasının Büyümesi .....	18
4.5. Borür Tabakasının Yapısı ve Çeşitleri .....	21
4.5.1. Borür tabakası .....	22
4.5.2. Geçiş zonu .....	23
4.5.3. Borür tabakasının kalınlığı .....	24
4.5.4. Borür tabakasının çeşitleri .....	24
5. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN BORLAMAYA ETKİSİ .....	25
6. BORÜR TABAKASININ ÖZELLİKLERİ .....	31
6.1. Fiziksel Özellikler .....	31
6.1.1. Sertlik .....	32
6.1.2. Aşınma direnci .....	34
6.1.3. Kalıntı gerilmeler .....	38
6.1.4. Yüzey kalitesi .....	41
6.1.5. Gevreklik .....	41
6.2. Kimyasal Özellikler .....	44

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
7. BORLAMA SONRASI ÖZELLİKLERİN GELİŞTİRİLMESİ .....	45
7.1. Klasik Borlama Sonrası Uygulanan Isıl İşlemler ...	45
7.2. Termal Çevrimli Isıl İşlemlerle Borlama .....	47
8. BORLAMANIN TEKNOLOJİK ÖNEMİ VE UYGULAMALARI .....	51
9. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	54
9.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler .....	54
9.2. Deneylerin Yapılışı .....	55
9.2.1. Bor yayını deneylerinin yapılışı .....	55
9.2.2. Mikroyapı ve sertlik ile ilgili deneylerin yapılışı .....	62
9.2.3. Aşınma deneylerinin yapılışı .....	62
9.3. Deney Sonuçları .....	64
9.3.1. Termal çevrimli borlamanın, borür tabakasının ve geçiş zonunun kalınlığına ve mikroyapısına etkisi .....	64
9.3.2. Termal çevrimli borlamanın, borür tabakasının ve geçiş zonunun aşınma özelliklerine etkisi .....	76
9.3.3. Termal çevrimli borlamanın, sertlik ve gevrekliğe etkisi .....	84
10. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	86
KAYNAKLAR DİZİNİ .....	91

ÖZGEÇMİŞ



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Fe-B denge diyagramı . . . . .	7
3.2. Fe <sub>2</sub> B kristalinin birim kafesi (a) ve (001) düzlemindeki projeksiyonu (b). . . . .	8
4.1. 900°C sıcaklıkta boraks banyosunda borlamada çeşitli malzemelerin elektrod potansiyelleri. . . . .	15
4.2. FeB ve Fe <sub>2</sub> B tabakalarında, demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan kolonsal büyümenin şematik gösterilişi. . . . .	21
4.3. Borlama işlemi sonrasında mikroyapıda görülen farklı bölgeler . . . . .	22
4.4. Borür tabakası çeşitleri. . . . .	25
5.1. Çeliklerde, alaşım elementi miktarının tabaka kalınlığına etkisi. . . . .	27
5.2. % 1 C içeren çeliğin, borlama sonrası, yüzeyden mesafe ile karbon bileşimindeki değişim. 1000°C sıcaklık, 25 saat süre ve amorf bor ortamı. . . . .	28
6.1. Çeliklerde borlamanın burulma eğrisine etkisi, a) % 0.1 C, b) % 0.35 C. . . . .	32
6.2. 42 CrMo4 çeliğinde farklı yüzey tabakalarının, dinamik yüksek sıcaklık sertlikleri. . . . .	34
6.3. Düşük karbonlu çelikte, farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin aşınma direncine etkisi. . . . .	36
6.4. Farklı borür tabakaları ve düşük karbonlu çelik için aşınma hızları. . . . .	37
6.5. Tek fazlı ve çift fazlı borür tabakalarında kalıntı gerilme dağılımı. . . . .	40
6.6. % 0.45 karbonlu çelikte; a) Borlama sonrası soğuma hızının kalıntı gerilme dağılımına etkisi, 1-Borlama sıcaklığından fırında soğuma, 2-840°C'dan suda soğuma, 3-300°C'daki banyoda soğutma, 4-500°C'daki banyoda soğuma, 5-havada soğuma, b) Borlama sonrası temperleme sıcaklığının kalıntı gerilme dağılımına etkisi, 1-Suda soğuma, 2-200°C'da 2 saat temperleme, 3-400°C'da 2 saat temperleme. . . . .	40
6.7. Borür tabakasının gevrekliğini ve servis özelliklerini etkileyen faktörler. . . . .	42
6.8. Matriks malzeme ile borür tabakasının özgül hacimleri arasındaki farkın gevrekliğe etkisi. Borlama sonrası; a) ısıtma işlemi yapılmaz, b) normalizasyon, c) normalizasyon, su verme ve 650°C'da temperleme, d) normalizasyon, su verme ve 450°C'da temperleme, e) normalizasyon, su verme ve 200°C'da temperleme. . . . .	43

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)**

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.9. % 0.45C'lu çelikte borlamanın 56°C sıcaklıkta korozyon direncine etkisi.....	44
9.1. Deneylerde kullanılan grafit potaların sekil ve boyutları.....	56
9.2. 900°C sabit sıcaklıkta farklı sürelerle yapılan (klasik) borlama deneylerinin ısıl işlem programı. ..	56
9.3. 900-660°C sıcaklıklar arasında program kontrolsuz, ortalama 8.6 °C/dak ısıtma ve 6.0°C/dak soğutma hızıyla yapılan termal çevrimli borlama deneyi ısıl işlem programı. ....	57
9.4. 900-660°C sıcaklıklar arasında program kontrollu soğutma/ısıtma hızıyla yapılan termal çevrimli borlama deneyleri ısıl işlem programı, a) 2.8 °C/dak, b) 4.1 °C/dak, c) 5.6 °C/dak hız.....	58
9.5. 900-660°C sıcaklıklar arasında 4.1 °C/dak soğutma/ısıtma hızıyla ve 660°C'da 3 dak, 900°C'da; a) 10 dak., b) 37 dak. beklemeli termal çevrimli borlama deneyleri ısıl işlem programı.....	59
9.6. 900-740°C sıcaklıklar arasında 4.1 °C/dak soğutma/ısıtma hızıyla yapılan, program kontrollu termal çevrimli borlama deneyi ısıl işlem programı...	60
9.7. 900°C sıcaklıkta farklı sürelerle bekleme sonrası, havada 5 dakika süreyle soğutmali, termal çevrimli borlama deneyleri ısıl işlem programı, a) 25 dak. bekleme, b) 54 dak. bekleme, c) 83 dak. bekleme.....	61
9.8. Aşınma deneylerinin yapıldığı aşınma setinin fotoğrafı.....	63
9.9. Aşınma deneylerinde CNC cihaza monte edilen a) adaptör parça, b) ağırlık parçası, c) kalıplanmış ve aşınma deneyi için hazırlanmış numuneler.....	64
9.10. Ç 1045 çeliğinde deneylerde elde edilen borür tabakalarının süre ile ilişkisi. ....	66
9.11. Ç 1045 çeliğinde borür tabakası kalınlığı karesinin süre ile ilişkisi.....	67
9.12. Deneylerde elde edilen, geçiş zonu kalınlığı süre ilişkisi.....	67
9.13. Ç 1045 çeliğinde, logaritmik eksen takımında geçiş zonu kalınlığı - süre ilişkisi.....	68
9.14. 900°C sabit sıcaklıkta ve termal çevrimli borlama şartlarında; geçiş zonu kalınlığının borür tabakası kalınlığına oranının, borür tabakası kalınlığı ile değişimi, a) Sabit sıcaklıkta borlama, b) Termal çevrimli borlama. ....	68

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)**

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
9.15. 900-660°C sıcaklıklar arasında 5.6°C/dak soğutma/ısıtma hızı program kontrollü termal çevrim şartlarında 265 dak süreyle borlanmış numunenin x-ışınları grafiği. ....	69
9.16. Borlama deneylerinde kullanılan Ç1045 çeliğinin numunelerin normalizasyon sonrası orjinal mikro yapısı, a) 100 büyütme, b) 200 büyütme.....	70
9.17. 900°C sabit sıcaklıkta borlanan numunelerin mikro yapısı, a) 240 dak süreli, b) 360 dak süreli.....	70
9.18. 900°C sıcaklıkta farklı sürelerle bekleme sonrası, havada 5 dak süreyle soğutmalı, termal çevrimli borlama uygulanan numunelerin mikro yapıları, a) 25 dak bekleme, b) 54 dak bekleme, c) 83 dak bekleme. ....	71
9.19. 900-660°C sıcaklıklar arasında program kontrollü termal çevrimle borlanan numunelerin mikro yapıları, a) 2.8°C/dak hız, b) 4.1°C/dak, c) 5.6°C/dak hız, d) 6.0/8.2°C/dak soğutma/ısıtma hızı.....	72
9.20. 900-660°C sıcaklıklar arasında 4.1°C/dak hızla program kontrollü termal çevrimli borlanan numunelerin mikro yapıları, a) 900°C'da 10 dak bekleme, 660°C'da 3 dak bekleme, b) 900°C'da 37 dak bekleme, 660°C'da 3 dak bekleme.....	73
9.21. 900°C sabit sıcaklıkta, 240 dak süreyle borlanmış numunenin mikro yapısı, a) geçiş zonu, b) matriks malzeme.....	73
9.22. 900°C sabit sıcaklıkta, 360 dak süreyle borlanmış numunenin mikro yapısı, a) geçiş zonu, b) matriks malzeme.....	74
9.23. 900°C sıcaklıkta, 25 dak bekleme ve havada 5 dak süreyle bekleme ile yapılan termal çevrimli borlama sonrası mikro yapılar, a) geçiş zonu, b) matriks malzeme.....	74
9.24. 900°C sıcaklıkta, 54 dak bekleme ve havada 5 dak süreyle bekleme ile yapılan termal çevrimli borlama sonrası mikro yapılar, a) geçiş zonu, b) matriks malzeme.....	75
9.25. 900-660°C sıcaklıklar arasında 4.1C/dak hızla program kontrollü termal çevrimle, 232 dak süreyle borlanan numunelerin mikro yapısı, a) geçiş zonu, b) matriks malzeme. ....	75
9.26. 900-660°C sıcaklıklar arasında 4.1°C/dak hızla program kontrollü termal çevrimle, 348 dak süreyle borlanan numunelerin mikro yapısı, a) geçiş zonu, b) matriks malzeme. ....	76

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
9.27. 900°C sabit sıcaklıkta, 360 dak süreyle borlanan numunelerle yapılan aşınma deneyi sonuçları.....	78
9.28. 900°C sıcaklıkta, farklı sürelerle bekletme sonrası havada 5 dak süreyle soğutmalı termal çevrimle borlanan numunelerin aşınma deneyi sonuçları.....	79
9.29. 900-660°C sıcaklıklar arasında farklı hızlarla program kontrollü termal çevrimle borlanan numunelerin aşınma deneyi sonuçları. ....	80
9.30. 900-660°C ve 900-740°C sıcaklıklar arasında 4.1°C/dak hızla program kontrollü termal çevrimle borlanan numunelerin aşınma deneyi sonuçları.....	81
9.31. Şekil 9.27-9.30'daki en düşük aşınma kayıplarının elde edildiği numunelerin karşılaştırılması. ....	82
9.32. Şekil 9.31'deki numunelerde boy kısalmasına göre aşınma kayıplarının karşılaştırılması.....	83
9.33. Mikrosertlik ölçüleriyle gevrekliğin belirlenmesi.....	84

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Endüstride kullanılan bor cevherleri. ....	3
2.2. Kristal borun yapısı ve kafes parametreleri. ....	3
3.1. Borür ve karbo-borürlerin sınıflandırılması. ....	6
3.2. FeB ve Fe <sub>2</sub> B'un bazı fiziksel özellikleri. ....	8
4.1. Katı ortamda borlamada kullanılan bazı bor kaynakları. ....	11
4.2. Sıvı ortamda borlamada kullanılan bor sağlayıcı bileşikler. ....	12
4.3. Gaz ortamda borlamada kullanılan bor sağlayıcı gazlar. ....	18
6.1. Farklı yüzey sertleştirme işlemleri uygulanan çeliklerin mikrosertlik değerleri. ....	33
6.2. % 0.1 C'lu çelikte sementasyon ve borlamayla yüzey sertleştirmede, yüzey tabakasının sertliğine sıcaklığın etkisi, HV-30 gr yük. ....	34
6.3. Borlanmış ve borlanmamış şartlarda, çeşitli malzemelere ait statik sürtünme katsayıları. ....	35
6.4. Börür tabakaları ve çelik malzemenin ısıl genleşme katsayıları. ....	39
7.1. % 0.45 C'lu çelikte, borlama sonrası uygulanan ısıl işlemlerle matriks amlzeme özgül hacminin değişimi. .	46
7.2. % 0.22C'lu çelikte normalizasyon ve termal çevrimli ısıl işlemlerde (5 çevrim) elde edilen mekanik özellikler. ....	49
7.3. %0.22C'lu çelikte su verme ve termal çevrim sonunda su verme sonucu elde edilen mekanik özellikler. Çizelgedeki ilk değerler suda su vermeyle ikinci değerler yağda su vermeyle elde edilmiştir. ....	50
9.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan Ç 1045 numunelerin kimyasal bileşimi (% Ağırlık olarak). ....	55
9.2. 900°C sabit sıcaklıkta yapılan (klasik) borlama deneyleri. ....	57
9.3. 900-660C sıcaklıklar arasında farklı soğutma/ısıtma hızlarıyla yapılan termal çevrimli borlama deneyleri işlem parametreleri. ....	57
9.4. 900-660°C sıcaklıklar arasında, 4.1°C/dak soğutma/ısıtma hızı ve alt ve üst sıcaklıklarda beklemeli termal çevrimli borlama deneyleri işlem parametreleri. ....	59
9.5. 900-740°C sıcaklıklar arasında, 4.1°C/dak soğutma/ısıtma hızıyla yapılan termal çevrimli borlama deneyi işlem parametreleri. ....	60

**ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)**

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
9.6. 900°C sıcaklıkta farklı sürelerle bekleme sonrası havada 5 dakika süreyle soğutmalı, termal çevrimli borlama deneylerinin işlem parametreleri. ....	60
9.7. Ç 1045 çeliğinde, deneylerde elde edilen borür tabakası ve geçiş zonu kalınlıkları.....	66
9.8. CNC freze tezgahında 800 mesh SiC zımpara ile yapılan aşınma deneylerinde 2.5 dakikalık aralıklarla numunelerde ağırlık kaybı olarak ölçülen aşınma kayıpları.....	77
9.9. CNC freze tezgahında 800 mesh SiC zımpara ile yapılan aşınma deneylerinde 2.5 dakikalık aralıklarla numunelerde boy kısalması olarak ölçülen aşınma kayıpları.....	83
9.10. Sabit sıcaklıkta termal çevrimli şartlarda borlanan numunelerde borür tabakası, geçiş zonu ve matrikste ölçülen sertlik değerleri. ....	85

## 1. GİRİŞ

Metal yüzeyleri üzerinde bor bileşiklerinin kullanımı, insanlık tarihinin en eski teknolojilerinden birisidir. Babilliler, 4000 yıl kadar önce boraks olduğu zannedilen kristalleri altının işlenmesinde ve kaynağında kullanmışlardır. Daha sonraları, bor bileşikleri demir dışı metaller için temizleyici madde olarak, yüksek sıcaklıklardaki oksitlenmeyi engelleyici olarak ve çeliklerde tel çekme işlemlerinde yağlayıcı ve korozyon önleyici tabaka olarak kullanılmıştır. Ayrıca çelik üretimde curuf yapıcı olarak, çeliklerde alaşım elementi ve yüzey sertleştirici olarak kullanılmaktadır.

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

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

Dünyada bor cevherleri, nükleer alanda jet roket yakıtından seramik sanayiine kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu cevherlerden amorf bor, bor karbür ( $B_4C$ ) ve ferro-bor gibi ticari ürünler elde edilmektedir. Bor

mineralleri bakımından, dünyada en zengin devletler arasından yer almamıza rağmen; ne yazık ki bu minerallerden sadece boraks, borikasit ve sodyum perborat üretmekteyiz. Katı ve gaz ortam borlamasında kullanılan bor bileşikleri, henüz ülkemizde üretilmemektedir. Bu bileşikler yurt dışından sağlandığında ise pahalı olmaktadır. Örneğin, amorf borun kg fiatı 250 DM (Alman Markı), ferro-borun 7 DM ve  $B_4C$ 'ün ise 40 DM'dir. Sıvı ortam borlamasında kullanılan ve ülkemizde bol miktarda üretilen boraks ve borik asitin kg fiatları ise, 0.2-0.4 DM civarındadır.

Ülke şartları göz önüne alınarak, bu çalışmada sıvı ortamda borlama yöntemi seçilmiştir. Çalışmanın amacı, sıvı ortamda borlamayla elde edilen borür tabakası, geçiş zonu ve matriks malzeme özelliklerinin difüzyon esnasında termal çevrimli ısıl işlemlerin kullanılmasıyla geliştirilmesidir. Sonuç olarak, klasik borlamaya göre; daha az gevrek ve daha kaliteli borür tabakaları elde ederek ve matriks malzemenin tokluğunu artırarak daha kaliteli borür tabakaları elde etmek suretiyle ülke ekonomisine ve teknolojisine katkıda bulunmak amaçlanmıştır.

## - 2. BOR VE MİNERALLERİ HAKKINDA GENEL BİLGİ

Bor, yerkabuğunun yapısında %0.001 oranında bulunur. Tabiatta serbest olarak bulunmayan, Çizelge 2.1.'de belirtilen minerallerinden elde edilen elementer bor, iki farklı şekilde olabilir. Kristal halde olan, parlak siyah renkli ve sert, amorf yapıda olan, yeşilimsi sarı renkli, tatsız ve kokusuz bir tozdur (Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü, 1982). Kristalin borun yapısı ve kafes parametreleri Çizelge 2.2.'de verilmiştir.

Bir element olarak 1808 yılında keşfedilen bor, periyodik sistemin üçüncü grubunun başında yer alır. Atom sayısı 5, atom ağırlığı 10.82, atom çapı  $1.78\text{Å}$ , özgül ağırlığı  $2.84\text{ gr/cm}^3$  ve ergime noktası  $2300^\circ\text{C}$ 'dir.



Çizelge 2.1. Endüstride kullanılan bor cevherleri (Etibank, 1983).

Adı	% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Kimyasal formülü
Tinkal	36.5	Na <sub>2</sub> O . 2 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . 10 H <sub>2</sub> O
Kolemanit	50.8	2 CaO . 3 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . 5 H <sub>2</sub> O
Kernit	51.0	Na <sub>2</sub> O . 2 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . 4 H <sub>2</sub> O
Üloksit	43.0	Na <sub>2</sub> O . 2 CaO . 5 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . 16 H <sub>2</sub> O

Çizelge 2.2. Kristal borun yapısı ve kafes parametreleri (Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü, 1982).

Kristal şekli	Kafes Parametreleri (Å°)	
	a	c
Tetragonal	8.13	8.57
Hegzagonal	9.54	11.98

Tabiatta, bor cevheri olarak nitelendirilen 58 bileşiğin olduğu bilinmektedir (Etibank, 1983). En çok rastlanan bor bileşikleri, asit borik ve borun sodyum ve kalsiyumla oluşturduğu bileşiklerdir.

Ülkemiz dünya bor rezervlerinin %53.11 gibi önemli bir oranına sahip olmasına rağmen, dünya borat üretiminin ancak % 18'ini sağlayabilmektedir. Gelişmiş ülkeler bu boratlardan; bor trioksit (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), saf bor (B), bor-karbür (B<sub>4</sub>C), bor-nitrür (BN), diboran (B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) ve ferrobör gibi bileşikler elde ederek çeşitli endüstri dallarında kullanmaktadırlar.

### 3. BORLAMANNIN FİZİKSEL-KİMYASAL PRENSİPLERİ

20-50 ppm seviyesinde bor, genellikle alaşımlı ve paslanmaz çeliklere katılır. Düşük alaşımlı çeliklerde borun sertleşebilirliği artırdığı, bununla birlikte, darbe özelliklerini kötü yönde etkilediği iyi bilinmektedir. Sertleşebilirlikteki en büyük artış 20-40 ppm bor miktarlarında sağlanır (Krishtal and Grinberg, 1974). Borun aynı zamanda, çeliklerin sıcak işlenebilirliğini geliştirdiği, aşırı miktarlarda ilave edildiğinde ise,

özellikle paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklıklardaki sertliğini geliştirme eğilimi gösterdiği söylenmektedir. Düşük alaşımlı ve paslanmaz çeliklerin sürünme direnci ve süneklikleri de bor ilavesiyle gelişmektedir. Ancak bu gelişimin geçici olduğu da belirtilmiştir. (Keown and Pickering, 1977). 120 ppm'in üzerinde bor ilavesi süneklik v.b. özellikleri kötü yönde etkiler (Brown et al., 1974). Zabil'skiy and Obukhov (1985) yaptıkları çalışmada, düşük karbonlu bir çeliğe bor ilavesinin, ostenitik sıcaklıkta sünekliği kötü yönde etkilediğini belirtmişlerdir.

Borun atom çapı demir, kobalt ve nikelin atom çapına göre % 25 daha küçüktür, dolayısıyla da bu metallerde çözünebilmektedir (Mal and Tarkan, 1973). Ancak borun demirle yer alan mı, yoksa ara yer katı eriyiği mi, yaptığı konusu tartışmalıdır (Keown and Pickering, 1977; Brown et al., 1974). Borun atomik boyutu, her iki tür katı eriyik oluşumu için gerekli olan değerlere yakındır. X-ışınlarıyla  $\alpha$ -demirinin kafes parametrelerinin ölçülmesi sonucunda, borun  $\alpha$ -demirinde yer alan türde katı eriyik yaptığını; diğer taraftan iç sürtünme ölçümleri esaslı çalışmalar ise, borun  $\alpha$ -demirinde ara yer katı eriyiği oluşturduğu sonucuna varırken, bir diğer çalışmada da bu fikri çürütür yönde sonuca ulaşıldığı belirtilmiştir (Keown and Pickering, 1977). Bazı araştırmacılar da, borun  $\alpha$ -demirinde hem yer alan ve hem de ara yer katı eriyiği bölgelerini işgal edebileceğini (Keown and Pickering, 1977) ve aynı zamanda yer alan bor atomlarının karbon gibi diğer ara yer atomlarıyla etkileşebileceklerini ve onlar tarafından stabilize edilebileceklerini ileri sürmüşlerdir (Keown and Pickering, 1977; Brown et al., 1974). Difüzyon araştırmaları,  $\alpha$ -demirinde bor yayılımı için gerekli aktivasyon enerjisinin, yer alan katı eriyik için beklenen mertebede olduğunu göstermiştir.  $\gamma$ -demiriyle yapılan difüzyon çalışması verileri, aktivasyon enerjisinin ara yer çözünürlük için uygun olduğunu göstermiştir (Keown and Pickering, 1977).

Bor  $\alpha$ ,  $\gamma$  ve  $\delta$ -demirinde çok az çözünebilmektedir. (Eyre, 1975).  $\alpha$ -demirinde,  $910^{\circ}\text{C}$  civarındaki max çözünebilirlik sıcaklıklarında 20-80 ppm borun çözünebildiği; buna karışılık,  $1150-1170^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarda  $\gamma$ -demirinde 55-260 ppm bor çözünebildiği bildirilmiştir. Çözünebilirlik sınırlarının genişliğinin, esas malzemenin safiyeti ve tane boyutundaki değişikliklerden kaynaklandığına inanılmaktadır (Keown and Pickering, 1977)./

### 3.1. Metal Borürlere Genel Bakış

Metallerin pek çoğu ile en azından bir borür oluşturmak mümkündür. Bazı metaller için daha fazla metal/bor ilişkisinin mümkün olmasından dolayı, normal valans kuralları geçerli değildir. Borür oluşturan bir element, bor ile uygun şartlar altında etkileştirildiğinde oluşacak borürün yapısı, diğer atomlara karşı bor atomlarının afinitesi (eğilimi) ve bu atomların izafi boyutlarıyla belirlenir. Metal ile bor arasındaki sayısal ilişki 2 veya 3'ten daha büyük olduğunda (örneğin  $\text{Co}_3\text{B}$  ve  $\text{Ni}_3\text{B}$ ), bor atomları birbirlerinden çok ayrı olarak dağıldıklarından, bunlar arasında bağ oluşumu mümkün olmaz. Bağlar, sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ve  $\text{CuAl}_2$  yapısındadır. Bor konsantrasyonunun artışıyla ve daha büyük metal atomlarının seçilmesiyle, bor atomları önce çiftler, daha sonra basit zik-zak zincirler, çift zincirler, hegzagonal sınırlar ve son olarak üç boyutlu kafesler oluştururlar. İzole bor atomları durumunda ( $\text{Co}_2\text{B}$ ), bor atomları arasındaki mesafe  $2.1\text{\AA}$ 'den daha büyük olup, tekli zincirler durumunda, FeB için ise  $1.77\text{\AA}$ 'dir (Matuschka, 1980).

Borür yapısı ve stokiyometrisini prensip olarak valans etkisinden ziyade, boyut faktörü kontrol eder. Bunun nedeni, diğer bileşiklerdeki atomlarla karşılaştırıldığında borun atom boyutunun daha büyük olmasıdır. Yeterli bor konsantrasyonlarında B-B bağı oluşur ve bu bağıın konfigürasyonu, borür fazının kristal yapısını kontrol eder. Genel olarak çeliklerde oluşan, metalik elementlerin borürleri

Çizelge 3.1.'de gösterilmiştir. Aynı stokiyometriye sahip borürler, genellikle aynı kristal yapıdadır. Örneğin  $M_2B$  tipi borürler,  $CuAl_2$  yapısında ve tetragonal;  $MB_2$  tipi borürler,  $AlB_2$  yapılı ve hegzagonaldir.  $MB$  tipi borürler bu genellemeye uymazlar, fakat hepsi ortorombik olup,  $FeB$  ve  $CrB$  türü iki yapıda olabilir. Bununla birlikte kristal yapısı ve stokiyometri arasındaki ilişki geçerlidir (Keown and Pickering, 1977).

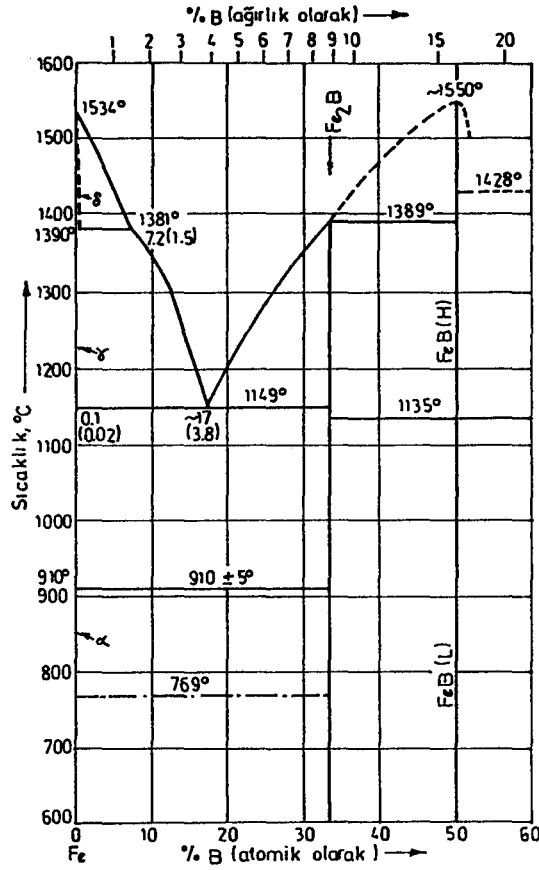
Bunlara ilaveten Co esaslı alaşımlarda  $CoB$ ,  $Co_2B$  ve  $Co_3B$ , sementite karbürlerde  $WB$  ve  $W_2B_5$  (Knotek et al., 1977),  $W_2(CB)_5$  veya  $W(CB)_2$  (Linial and Lavella, 1973) gibi borürlerin oluştuğu belirtilmiştir.

Çizelge 3.1. Borür ve karbo-borürlerin sınıflandırılması (Keown and Pickering, 1977).

Element	Borür tipi ve yapısı							
	$M_4B$ Ortorombik ( $Mn_4B$ )	$M_3B$ Ortorombik ( $Fe_3C$ )	$M_2B$ Tetragonal ( $CuAl_2$ )	$M_3B_2$ Tetragonal ( $Si_2U_3$ )	$MB$ Ortorombik ( $FeB, CrB$ )	$M_3B_4$ Ortorombik ( $Ta_3B_4$ )	$MB_2$ Hegzagonal ( $AlB_2$ )	$M_2B_5$ Hegzagonal ( $Mo_2B_5$ )
Demir	$[Fe_3(CB)_6]$	$(Fe_3(CB))$	$Fe_2B$	$M_3B_2$	$FeB$	$FeMo_2B_4$	-	-
Nikel	-	$Ni_3B$	$Ni_2B$	-	$NiB$	$NiMo_2B_4$	-	-
Krom	$Cr_4B$	$Cr_3B$	$Cr_2B$	-	$CrB$	$Cr_3B_4$	$CrB_2$	-
Mangenez	$Mn_4B$	-	$Mn_2B$	-	$MnB$	$Mn_3B_4$	$MnB_2$	-
Titanyum	-	-	$Ti_2B$	-	$TiB$	-	$TiB_2$	$Ti_2B_5$
Molibden	-	-	$Mo_2B$	$Mo_3B_2$	$MoB$	$FeMo_2B_4$ $NiMo_2B_4$	$MoB_2$ $NbB_2$	$Mo_2B_5$ -
Niobiyum	-	-	-	$Nb_3B_2$	$NbB$	$Nb_3B_4$	$Vb_2$	-
Vanadyum	-	-	-	$V_3B_2$	$VB$	$V_3B_4$	-	-

### 3.2. Demir-Bor Denge Diyagramı

Hansen'in (1958) belirttiği Fe-B denge diyagramına göre; ağırlık olarak % 8.83 bor oranında  $Fe_2B$  ve % 16.23 bor oranında  $FeB$  olmak üzere iki tür borür ve ergime noktası  $1149^\circ C$  olan % 3.8 bor oranında bir ötektik oluşmaktadır. Fe-B sisteminde alaşım elementleri, örneğin % 1 C ötektik sıcaklığını  $50^\circ C$  aşağıya düşürür. Şekil 3.1.'de Fe-B denge diyagramı gösterilmiştir.

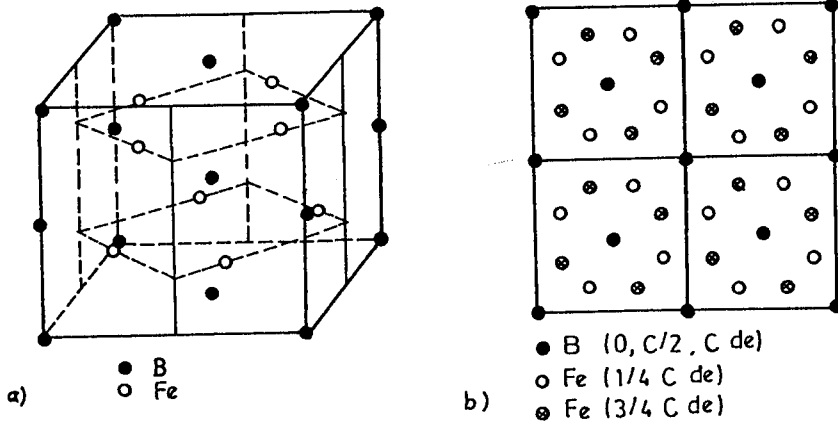


Şekil 3.1. Fe-B denge diyagramı (Hansen, 1958).

Demir borürlerin yapısı birçok araştırmacı tarafından incelenmiş olup, FeB'un ortorombik yapıya sahip olduğu, birim kafesin 4Fe ve 4B atomundan meydana geldiği bilinmektedir. Bor atomları c eksenine yönünde zik-zak şekilli zincirler oluştururlar. Bor atomları arasındaki mesafe (B-B) 1.77Å'dir. Fe<sub>2</sub>B, 12 atomlu olup tetragonal yapıdadır (Matuschka, 1980). Fe<sub>2</sub>B kristalinin birim kafesi ve (001) düzlemindeki projeksiyonu Şekil.3.2.'de, FeB ve Fe<sub>2</sub>B'un bazı fiziksel özellikleri Çizelge 3.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. FeB ve Fe<sub>2</sub>B'un bazı fiziksel özellikleri (Eyre, 1975; Matuschka, 1980; John and Sammels, 1981).

Özellik	Fe <sub>2</sub> B	FeB
Ergime noktası, °C	1390	1550
Genleşme katsayısı (100°C), K <sup>-1</sup>	8.0x10 <sup>-6</sup>	10-16x10 <sup>-6</sup>
Isıliletkenlik katsayısı (100°C), W/cm°C	0.2-0.3	0.1-0.2
Özdirenç (20°C), μohmcm	~38	~80
Küri sıcaklığı, °C	742	325
Teorikyoğunluk, g/cm <sup>3</sup>	7.43	6.75
Kristal sistemi	Tetragonal hacimmerkezli	Ortorombik
Kafes parametreleri, Å	a=5.078 c=4.249	a=4.053 b=5.495 c=2.946



Şekil 3.2. Fe<sub>2</sub>B kristalinin birim kafesi (a) ve (001) düzlemindeki projeksiyonu (b), (Qing'en and Zaizhi, 1983).

#### 4. BORLAMA İŞLEMİ VE REAKSİYON MEKANİZMASI

Borlama DIN 17014 numaralı Alman standardında, termo-kimyasal işlemle iş parçası yüzeyine bor difüzyonunun sağlanması, şeklinde tarif edilen bir yüzey sertleştirme işlemidir. Bor atomları ısı enerjisi yardımıyla, iş parçası yüzeyindeki metalik latislere yayındırılır ve burada esas malzeme atomlarıyla birlikte uygun borürleri oluştururlar. Eğer demir ve çelik türü malzemeler borlanıyorsa, demir borürler oluşur (Fichtl et. al., 1987). İşlem, esas malzeme ve bor kaynağı arasındaki kimyasal ve elektrokimyasal

reaksiyonlara dayanmaktadır. Bor kaynağı veya bor sağlayıcı bileşikler katı, sıvı ve gaz fazda olabilirler (Fichtl, 1981). Borlamada borür tabakasının oluşumu (Rus et al., 1985):

a. Kimyasal yöntemler (Katı, sıvı ve gaz ortamda borlama) ile veya,

b. Fiziksel yöntemler (bor iyon aşılama, fiziksel vakum biriktirme, saçılma ve iyon kaplama gibi) ile sağlanabilir.

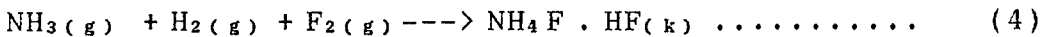
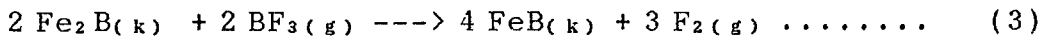
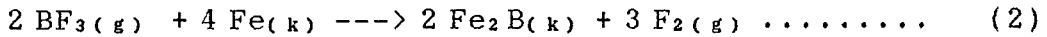
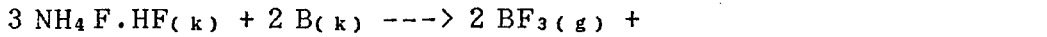
Borlama ile; amorf bor,  $B_4C$ ,  $Na_2B_4O_7$ ,  $B_2H_6$  gibi bor verici bileşikler; alkali metaller, amonyum boroflorürler,  $KBF_4$  gibi aktivatörler ve  $SiC$ ,  $Al_2O_3$  v.b. dolgu maddeleriyle hazırlanan borlayıcı ortamlarda; 800-1050°C sıcaklıklar arasında, 1-8 saatlik işlem sürelerinde iş parçası yüzeyinde sert, aşınmaya, oksitlenmeye ve özellikle de asitlere ve bazı metallerin ergiyik banyolarındaki korozyona karşı dirençli, iyi elektrik iletkenliğine sahip borür tabakası ve/veya tabakaları elde edilir. Elde edilen tabakalar, kullanılan yöntem, ortamın bor potansiyeline, borlanacak malzemeye, işlem sıcaklığı ve süresine bağlıdır.

#### 4.1. Katı Ortamda Borlama

Katı ortamda sementasyona (karbürizasyona) benzeyen bu yöntem; işlem kolaylığı, toz bileşiminin kolayca değiştirilebilmesi, gerekli cihaz ve donanımın basitliği ve ekonomik yönden de ucuz olması gibi faktörler dolayısıyla geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bor karbür, amorf bor ve ferro-bor gibi bor verici bileşikler; alkali metaller, amonyum bor-florürler,  $KBF_4$ ,  $AlF_3$ ,  $NaCl$ ,  $NH_4Cl$  gibi aktivatörler ve  $SiC$  ve  $Al_2O_3$  gibi dolgu maddeleri veya reaktif olmayan bileşikler belirli oranlarda karıştırılarak borlama işlemi yapılır. Borlama ortamı bileşenleri, özel olarak hazırlanmış alaşımsız çelik, paslanmaz çelik veya alümina kutular içerisine her bir numunenin etrafında en az 1-2 cm kalınlıkta olacak şekilde doldurularak, ya hava sızdırmaz bir kapakla kapatılır veya işlem nötr bir atmosferde yapılır. Katı ortamda borlamada,

borlama bileşikleri bazen pasta şeklinde numune yüzeyine sürülebilir. Bu durumda cam suyu ve gliserin gibi maddeler bağlayıcı olarak kullanılır.

Hazırlanan kutular, önceden işlem sıcaklığına getirilmiş olan fırınlar içerisine yerleştirilmek suretiyle borlama işlemi yapılır. İşlem sıcaklıkları genellikle 800-1000°C ve işlem süreleri de 1-8 saat arasında değişir. İşlem süreleri; sıcaklığın yanında, kullanılan borlama bileşiminin ne kadar reaktif olduğuna da bağlıdır. Katı ortam bileşiklerinden, metale bor transferi mekanizmasının tam olarak açıklanamamış olmasına rağmen, gaz fazı reaksiyonlarının önemli olduğu bildirilmiştir (Singhal, 1977). % 50 (amorf) B + % 1 NH<sub>4</sub>F . HF + % 49 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşimli bir kutuda, katı ortam borlaması esnasında aşağıdaki reaksiyonların meydana geldiğine inanılmaktadır (Singhal, 1977):



Katı ortam borlamasında kullanılan bazı bor kaynakları Çizelge 4.1.'de, literatürde rastlanan katı ortamda borlama bileşiklerine ait örnekler ise aşağıda verilmiştir (% ağırlık olarak).

1. % 60 B<sub>4</sub>C + % 5 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + % 5 NAF + % 30 Demir oksit ... (Bel'skii et al., 1979).
2. %50 Amorf bor+%1 NH<sub>4</sub>F.HF+%49 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ... (Singhal, 1977).
3. %(7.5-40) B<sub>4</sub>C+% (2.5-10) KBF<sub>4</sub>+% (50-90) Si C ... (Badini et al., 1986; Carbucicchio and Palombarini, 1984; Carbucicchio et al., 1983).
4. %84 B<sub>4</sub>C+%16 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> ... (Vasil'eva et al., 1985)
5. B + NaF + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ... (Tsipas and Rus, 1987).
6. % 95 Amorf bor + % 5 KBF<sub>4</sub> ... (Knotek et al., 1987).
7. % 20 B<sub>4</sub>C + 5 KBF<sub>4</sub> + % 75 Grafit ... (Michael and Anthony, 1981; Rus et al., 1984)



8. % (40-80)  $B_4C$  + % (20-60)  $Fe_2O_3$  ... (Yakhnina et al., 1979)
9. % 80  $B_4C$  + % 20  $Na_2CO_3$  ... (Yakhnina et al., 1979)
10. % 98 [% 75  $Al_2O_3$  + % 25 (% 30 Al + % 70  $B_2O_3$ )] + % 2 NaF ... (Plumb, 1985)
11. % 100  $B_4C$  ... (Permyakov and Loskutov, 1974; Nadolskii and Ivinskii, 1972).
12. %48 Amorf bor + % 4 Cr + % 1  $NH_4F$  . HF + % 47  $Al_2O_3$  ... (Singhal, 1977).

Çizelge 4.1. Katı ortamda borlamada kullanılan bazı bor kaynakları (Matuschka, 1980).

Malzeme	Formülü	Molekül Ağırlığı	Teorik Bor içeriği (%)	Ergime Sıcaklığı(°C)
Amorf bor	B	10.82	95-97	2050
Ferrobör	Fe-B	-	17-19	-
Borkarbür	$B_4C$	55.29	77.28	2450

#### 4.2. Sıvı Ortamda Borlama

Borlama sırasında, bor kaynağı sıvı halde olup, elektrik akımı uygulanıp (elektroliz)-uygulanmamasına göre iki farklı şekilde işlem tamamlanabilir. Elektrik akımı uygulanıyorsa, elektrolitik borlama; uygulanmıyorsa, normal sıvı ortamda borlama söz konusudur. Borlama banyosunda, bor kaynağı olarak boraks ve redükleyici madde olarak da genelde  $B_4C$  ve  $SiC$  tozları kullanılmaktadır. Çizelge 4.2.'de sıvı ortam borlamasında kullanılan bor kaynakları gösterilmiştir.

Sıvı ortamda kimyasal reaksiyonların daha hızlı olmasından kaynaklanan yüksek aktivite nedeniyle, sıvı ortamda borlama geniş ölçüde kullanılmaktadır (Belyaeva et al., 1979). İşlem normal atmosfer altında yapılır, koruyucu atmosfere gerek yoktur. Ayrıca işlemde kullanılan cihaz ve donanım basit olduğu gibi, gerekli kimyasal maddeler de ucuzdur (Arai, 1979). Borlama sonrası parçaların temizlenmesi önemli bir problemdir.

Çizelge 4.2. Sıvı ortamda borlamada kullanılan bor sağlayıcı bileşikler (Matuschka, 1980).

Malzeme	Formülü	Molekül Ağırlığı	Teorik Bor Miktarı (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	381.42	11.35	-
Susuz Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	201.26	21.50	741
Borikasit	$\text{HBO}_2$	43.83	2469	-
Sodyum borfluorür	$\text{NaBF}_4$	109.81	9.85	-
Borikasit (susuz)	$\text{B}_2\text{O}_3$	69.64	31.07	450
Borkarbür	$\text{B}_4\text{C}$	55.29	78.28	2450

#### 4.2.1. Normal sıvı ortamda borlama

Sıvı ortamda borlamada kullanılan maddelerin en başında boraks gelmektedir, Banyo bileşimleri genellikle; % (60-80) boraks ve % (20-40) oranında  $\text{B}_4\text{C}$ , ferro-bor, B, kalsiyum hegzabor gibi bor içeren maddeler veya  $\text{SiC}$ ,  $\text{Ca-Si}$ ,  $\text{Fe-Si}$ ,  $\text{Fe-Mn}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Be}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Li}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Ge}$  ve nadir toprak metalleri gibi redükleyici maddelerden oluşur. Boraksa ilaveten banyoya  $\text{Fe-V}$ ,  $\text{Fe-Nb}$ ,  $\text{Fe-Cr}$  veya  $\text{Cr}$  tozlarının katılması durumunda  $\text{V}$ ,  $\text{Nb}$  veya krom karbür tabakaları oluşur (Arai, 1979). Boraks banyolarında, oksit oluşum serbest enerjileri  $\text{B}_2\text{O}_3$ 'ün oluşum serbest enerjisinden daha düşük elementleri içeren banyolarda borür; daha yüksek oluşum serbest enerjili elementleri içeren banyolarda da karbür tabakaları oluşur (Arai, 1979).

Sıvı ortamda borlama işlemi  $800-1000^\circ\text{C}$  sıcaklıklarda, 2-6 saatlik sürelerde yapılır. İşlem esnasında banyonun akışkanlığı iyi olmalıdır. Banyo akışkanlığını artırmak amacıyla banyoya  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaF}$  veya  $\text{B}_2\text{O}_3$  ilave edilmesi tavsiye edilir.

Sıvı ortam borlamasında kullanılan banyonun özgül hacmi (numunenin birim yüzeyi başına hacim) en azından  $10-20 \text{ cm}^3$  olmalıdır. Daha küçük hacimlerde tabaka kalınlığı azalırken, numunede banyonun yüksekliği boyunca difüzyonun düzensiz olduğu görülür. Redükleyici maddeler zamanla banyonun dibine çökelirler. Bunları önlemek için, ya banyo belirli aralıklarla

karıştırılmalı veya mekanik karıştırma mümkün değilse, banyo özgül hacminin 10-20 cm<sup>3</sup>'den fazla olması sağlanmalıdır (Lyakhovich et al., 1976).

Sıvı borlama işleminde çelik, yüksek ısı dirençli paslanmaz çelik ve grafit potalar kullanılmaktadır. Karbon çeliğinden hazırlanan potalar, uzun süreli işlemlerde pota malzemesinin oksitlenmesinden kaynaklanan dökülme ve parçalanmalar nedeniyle tavsiye edilmez (Simonenko et al., 1985). İndüksiyon akımıyla ısıtma yapıldığında, grafit potaların kullanılması sonucu borlama hızının (aktivite), geleneksel sıvı borlamaya göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Simonenko et al., 1982). Grafit potaların daha uzun süre kullanılabilmesi için, koruyucu bir seramik kılıfla korunmalıdır. Ayrıca grafit, banyo ile fırın atmosferi ve pota cidarları arasındaki reaksiyonlar sonucu oluşan oksitleri temizler.

Bu kısımda, elektroliz olmaksızın borlanacak parça ile sıvı boraks banyosu ve banyodaki redükleyici madde partikülleri arasında, borür tabakası oluşumu reaksiyonlarının gelişim mekanizması ve sıvı ortamda borlama için sistem seçiminin nasıl yapılacağı açıklanmaya çalışılmıştır. Lyakhovich and Kasachovskii (1972) tarafından açıklanan mekanizmaya göre; normal sıvı ortam borlaması esnasında, borlanan metal ve redükleyici maddeden oluşan galvanik piller (çiftler) oluşur. Aktif bor oluşumu için metal yüzeyinde katodik bir reaksiyon olurken, redükleyici madde yüzeyinde de anodik bir reaksiyon olmaktadır. Bu işlemin meydana gelebilmesi için; işleme tabi tutulan metal ile redükleyici madde partikülleri arasında, elektrokimyasal bir farkın bulunması ve bunlar arasında elektriksel bir temasın olması gerekir. Metal yüzeyinde katodik reaksiyon olması, belirlenen şartlarda (elektrolitin bileşimi, sıcaklığı), metalin elektrod potansiyelinin pozitif ve redükleyici maddenin potansiyelinden daha yüksek olmasına bağlıdır. Galvanik çiftlerin etkinliği metal ve redükleyici madde arasındaki elektrod potansiyel farkına ve aynı zamanda

ergiyiğin (banyonun) rezistivitesine olduğu kadar, metal ve redükleyici madde partikülleri arasındaki temas direncine bağlı olarak galvanik elemanın toplam omik direncine bağlıdır.

Difüzyon işlemi esnasında galvanik elementlerin elektrod potansiyelleri polarizasyon sonucunda değişir. Difüzyon dolayısıyla katotta yüzey bileşiminin değişmesi ( $FeB$ ,  $Fe_2B$ , v.b.) nedeniyle, katodun elektrod potansiyeli negatif yönde değişir (Simonenko, 1985; Lyakhovich and Kosachavskii, 1972). Anod potansiyelinin değişimi, düşük anodik akım yoğunluğu ve redükleyici madde yüzeyinin değişimi sebebiyle belirsizdir. Difüzyon reaksiyonu esnasında katod potansiyeli, yüzeyde oluşan fazın potansiyelinin işaretini (değerini) alır ve katı eriyik oluşumu esnasında yüzeyde yayılan elementin konsantrasyonundaki değişimle birlikte sürekli değişir. Potansiyel her iki durumda da; difüzyon yüzeyi potansiyelinin, redükleyici madde potansiyeline göre daha pozitif olduğu zamana kadar değişir. Bu şekilde, oluşan fazların potansiyeli veya katı eriyiğin potansiyelinin konsantrasyonla olan ilişkisi biliniyorsa; oluşacak difüzyon tabakasının faz bileşimi veya katı eriyiğin sınır konsantrasyonu, redükleyici maddenin potansiyelinden belirlenebilir. İki fazlı yüzeylerin potansiyeli için ilave kurallar gereklidir (Lyakhovich and Kosachovskii, 1972),  $900^{\circ}C$  sıcaklıkta, boraks banyosunda borlama için, çeşitli malzemelerin potansiyelleri Lyakhovich and Kosachavskii (1972) tarafından belirlenmiştir. Karşılaştırma için grafit bir elektrod kullanmışlardır. Şekil 4.1.'de bu değerler gösterilmiştir.

Şekil 4.1.'de sağdaki herhangi bir metal yüzeyi üzerinde, potansiyel serisinin herbir elemanı, katodik bir reaksiyon oluşturabilir. İlaveten, difüzyonla yüzey bileşiminin değişimi; şayet mümkünse, difüzyon uygulanan yüzeyin elektrod potansiyeli, anod potansiyeline eşitleninceye kadar devam edecektir. Bu; boraks banyosunda, daha öncelardan bilinen  $B$ ,  $B_4C$  ve  $SiC$ 'den başka olarak  $Al$ ,  $Ca-Si$ ,  $Mn$ ,  $Si$  ve  $Ti$ 'un bulunması durumunda, demirin borlanması sağlar.  $B$ ,  $Al$ ,  $Ca-Si$ ,  $Mn$ ,  $Si$ ,  $Ti$  ve  $B_4C$  ile demirin borlanması işleminde,

Literatürden derlenen bazı sıvı ortam banyo bileşimleri aşağıda verilmiştir:

1. % (70-73)  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + % (27-30)  $\text{B}_4\text{C}$  ... (Shadrichev and Surav . . . , 1985)
2. % (65-90)  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + % (10-35)  $\text{SiC}$  ... (Shadrichev and Ivanov, 1984)
3. % 66  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + % 14  $\text{B}_2\text{O}_3$  + % 20 Fe-Si ... (Bozkurt, 1984).
4. % 84  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + % 10  $\text{B}_2\text{O}_3$  + % 6 B ... (Belyaeva et al., 1979)
5. % 84  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + % 10 NaCl + % 6 B ... (Belyaeva et al., 1979).
6. % (57-81)  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + % (9-20)  $\text{B}_4\text{C}$  + % (10-23)  $\text{SiC}$ ... (Belyaeva et al., 1979).
7. % 94.5  $\text{BaCl}_2$  + % 2  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + % 3.5  $\text{Mg}_n\text{B}_m$  ... (Smol'nikov and Sormanova, 1982).
8. % 80  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + % 5 Krom oksit + % 15 Ca-Si ... (Ivashchanko and Nikiforchin, 1985).
9. % 15 KCL + % 50 NaCl + % 8  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + % 12  $\text{Mg}_n\text{B}_m$  + % 15 NaF ... (Smol'nikov and Sarmanova, 1982, 1984).

#### 4.2.2. Elektrolitik borlama

Elektrolitik borlama, boraks veya borik asit gibi bor içeren ve  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SiC}$ , NaCl, lityum veya potasyum gibi aktiviteörleri içeren bir sıvı banyodan bor atomlarının, katod görevi üstlenen parça yüzeyinde elektrolitik olarak biriktirilmesi işlemidir. Grafit bir elektrod da anod görevini üstlenir (Matuschka, 1980). İşlem sıcaklıkları genellikle  $800-900^\circ\text{C}$  ve işlem süreleri 1/4-5 saat civarındadır. Daha düşük sıcaklıklarda işlem yapmak için boraksa ilave olarak; ağır metallerin oksitleri ( $\text{PbO}$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ), fosfatlar ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ), sülfatlar ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), alkaliler (NaOH) ve klörürler (NaCl) katılır. Bu amaçla, daha çok NaCl, fosfat ve alkaliler kullanılır (Lyakhovich et al., 1974). Akım yoğunluğu  $0.5-2.5 \text{ A/dm}^2$  'dir. Genel olarak, düşük alaşımlı çeliklerde yüksek akım yoğunluğu ile ince difüzyon tabakaları elde edilirken, yüksek alaşımlı çeliklerde veya daha kalın tabakaların gerekli olduğu hallerde, daha düşük akım yoğunluğu ve daha uzun süreler

uygulanır. Keza, daha düşük akım yoğunluğu, daha büyük demir-bor kristalleri ve daha kaba (pürüzlü) bir yüzey verirken; daha yüksek akım yoğunluğu ile borlamada daha çok kristalin çekirdeklenmesi sonucu, daha düzgün bir yüzey elde edilebilir (Fiedler and Sieraski, 1971). Literatürden derlenen bazı elektrolitik borlama, banyo bileşenleri aşağıda verilmiştir:

1. % 100  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  ... (Rufanov et al., 1983; Dukarevich and Mozharov, 1973; Permyakov et al., 1972).
2. % (75-80)  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + % (20-25)  $\text{NaCl}$  ... (Lyakhovich et al., 1985).
3. % 91  $\text{B}_2\text{O}_3$  + % 9  $\text{Na}_2\text{O}$  ... (Katkhanov, 1986).
4. % 90  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + % 10  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ... (Han and Chun, 1980).
5. % 60  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + % 30  $\text{NaCl}$  + % 10  $\text{B}_4\text{C}$  ... (Han and Chun, 1980).
6. % 70  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + % 30  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  ... (Lyakhovich et al., 1974).
7. % 90  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + % 10  $\text{NaOH}$  ... (Lyakhovich et al., 1974).
8. % 85  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + % 15  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  ... (Lyakhovich et al., 1974).
9. % 10  $\text{KBF}_4$  + % 90 (KF + LiCl) ... (Bonomi et al., 1978).

#### 4.3. 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 (Matuschka, 1980). Prensip olarak gaz ortamda borlamada, bor potansiyelinin ayarlanabilmesinden dolayı, tek fazlı tabaka elde etmek mümkündür. Gaz borlama bileşikleriyle çalışmak için komplike cihazlar gereklidir. Buna ilaveten bazı sakıncalı tarafları daha vardır:

1. Diboran, kullanılan temel bileşiktir ve çok zehirlidir. 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 (Fichtl, 1981).

2. Diboran, hidrojen ile karıştırıldığında bile çok pahalıdır (Fichtl, 1981).

3. Trimetilbor  $[(CH_3)_3B]$  ve trietilbor  $[(C_2H_5)_3B]$  ile yapılan gaz ortam borlamasında, bu bileşiklerin yüksek oranda karbon içermeleri sebebiyle karbürizasyon sözkonusu olabilmektedir. Bu etki trietilborda, trimetilbordan daha kuvvetlidir (Matuschka, 1980).

4. Bor halojenürleri korozyona sebep olabilir (Matuschka, 1980). Çizelge 4.3.'de gaz ortamda borlamada kullanılan gazlar ve bazı özellikleri belirtilmiştir. Gaz ortamın bileşimi, basıncı ve gazın tanktan akış hızı borlamayı etkiler. Literatürde aşağıdaki bileşimler kullanılarak borlama çalışmaları yapılmıştır.

1. % 0.95 mol  $H_2$  + % 0.05 mol  $BCl_3$  ... (Takeuchi, 1979).
2. % 1 Diboran + % 99 Argon ... (Long and McGurie, 1979).
3.  $B_2H_6$  ... (Lakhtin, 1983).
4.  $(C_2H_5)_3B$ ... (Laktin, 1977; Bozkurt'tan, 1984).
5.  $B_2H_6$  +  $H_2$  (1:50 oranı) (Kunst and Schaubert, 1967; Bozkurt'tan, 1984).

Çizelge 4.3. Gaz ortamda borlamada kullanılan bor sağlayıcı gazlar (Dearnley et al., 1986).

Gaz Adı	Formülü	Teorik bor içeriği (%Ağ.)	Donma Noktası (°C)	Kaynama Noktası (°C)	Açıklama
Bortriflorür	$BF_3$	15.95	-128.8	-101.00	Stabilitesi yüksek
Bortriklorür	$BCl_3$	9.23	-107.3	13.00	Korozif
Bortribromür	$BBr_3$	4.32	-46.0	90.01	Suile patlayıcı olabilir
Diboran	$B_2H_6$	39.08	-165.5	-92.50	Zehirli, patlayıcı
Trimetilborür	$(CH_3)_3B$	19.35	-161.5	-20.00	Karbürizasyona eğilimli
Trietilborür	$(C_2H_5)_3B$	11.04	-95.0	95.00	Karbürizasyona eğilimli

#### 4.4. Borür Tabakasının Büyümesi

Demir borürler ısı ve elektrik iletkenliği gibi metal özellikleri yanında, çok yüksek sertlik gibi seramik malzemelerin bazı özelliklerini de gösteren ilginç bileşiklerdir. Malzeme ve işlem şartlarına bağlı olarak tek

fazlı ve çok fazlı tabakalar elde edilmesine ve esas malzeme ile tabaka arayüzeyinde farklı morfolojilerin olabilmesine rağmen (Palombarini and Carbucicchio, 1987), pratikte tek fazlı ( $Fe_2B$ ) ve parmaksı türde (Girintili-çıkıntılı) tabakalar, daha sonraki ısıl işlemlere uygunluğu ve  $FeB$ 'a göre daha az gevrek olması dolayısıyla tercih edilir. Bu yüzden, burada  $Fe_2B$  tabakasının büyümesi konusunda önerilen iki mekanizma açıklanmaya çalışılmıştır.

Borlama işleminin başlangıç safhasında tane sınırları, dislokasyonlar v.b. gibi mikrohatalarda olduğu kadar, yüzeydeki pürüzler ve çizikler gibi makro-hataların olduğu metal yüzeyindeki daha reaktif noktalarda  $Fe_2B$  çekirdeği oluşur ve büyür. Yüksek safiyetli demirde olduğu gibi, demir-bor reaktifliğinin çok düşük olduğu şartlarda, bu noktalardan sadece birkaçı reaksiyona girer ve gelişigüzel dağılmış reaksiyon ürünü adacıklar meydana gelir. Ortamın bor potansiyelinin daha yüksek olduğu durumlarda, metal yüzeyindeki daha az reaktif olan noktalar da devreye girerek sürekli bir tabaka elde edilir. Bu, daha düşük potansiyelli ortam ile daha reaktif metal şartlarında da mümkün olmaktadır (Palombarini and Carbucicchio, 1987).

#### a. Difüzyon kanalı büyüme mekanizması:

Şekil.3.2.'deki  $Fe_2B$  birim kafesinden de görüldüğü gibi bor atomları [001] yönünde, en yakın demir atomlarının oktagonal prizmasıyla eş ekseninde ve  $c/2$  uzaklıkta çok yoğun olarak dizilmişlerdir. Oktagonal prizma, bor atomlarının difüzyonunu kolaylaştıracak en büyük ara kesite sahiptir. Böylece oktagonal prizma,  $Fe_2B$  kristalinde ve [001] doğrultusunda, bor atomları için bir difüzyon kanalı oluşturur. Bunun sonucu olarak, borlama tabakası yüzeyi ile dik doğrultuda, [001] yönünde  $Fe_2B$  kristalleri oluşur ve kolonsal bir şekilde içeriye doğru büyür.

Yüksek sıcaklıkta, ortamdan sağlanan serbest bor atomları, işlemin başlangıcında, borlanan parça yüzeyinde çeşitli kristallografik yönlerde stabil  $Fe_2B$  çekirdeklerini oluştururlar.  $Fe_2B$  çekirdeğinin büyümesi,  $Fe_2B$  çekirdeği ile



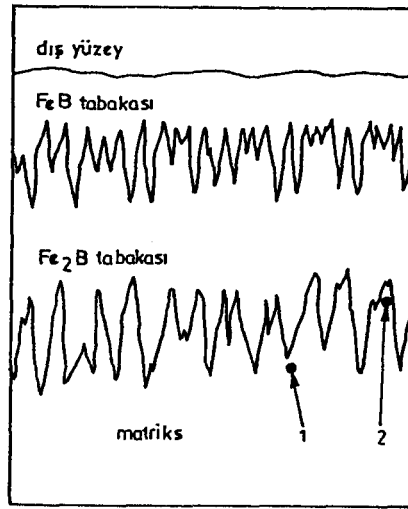
çelik arayüzeyinde bor atomlarının temin edilebilme hızına ve  $Fe_2B$  kristal kafesinde bor atomlarının difüzyon hızına bağlıdır.

$Fe_2B$  çekirdeğinin oluşması durumunda [001] doğrultuları metal yüzeyine dik veya hemen hemen diktir. Bu durumda, bor atomları difüzyon kanalında içeriye doğru kolayca yayınabilirler ve böylece, esas metal matriksinde bu çekirdeğin hızla büyümesi sağlanmış olur. Diğer taraftan, [100] yönü gibi diğer doğrultularda bor atomlarının içeriye doğru difüzyona güctür, büyüme çok yavaştır, dolayısıyla tercihli bir büyüme meydana gelir. Bor tabakasından borür ve esas metal ara yüzeyine sürekli olarak yayınan bor atomları,  $Fe_2B$  kristalinin büyümesi için gerekli şartları sağlar ve bu atomların pek çoğu [001] doğrultusunda  $Fe_2B$  kristallerinin oluşması için tüketilir. Bunun da kolonsal bir tabaka oluşumuna yol açacağı belirtilmiştir (Qing'en and Zaizhi, 1983; Bonomi et al., 1978; Fiedler and Sieraski, 1971).

#### b. Uçtan büyüme mekanizması:

Difüzyon kanalı büyüme mekanizması;  $Fe_2B$ 'un kuvvetli bir tercihli yönlenmeye sahip olmasına rağmen  $Fe_2B/Fe$  arayüzeyinde düşük veya ihmal edilebilir bir kolonlaşma göstererek büyümesini veya kristallografik bir tekstürün olmadığı durumda arayüzeydeki kolonlaşmayı açıklamakta yetersiz kalır (Palombarini and Carbucicchio, 1984, 1987). Bu konuda ileri sürülen uçtan büyüme mekanizmasına göre; esas malzeme bileşimine ve işlem şartlarına bağlı olarak başlangıçta oluşan  $Fe_2B$  çekirdeği iğnesel bir şekilde büyür ve bor gradyanı boyunca yönlenir. Bu durumda  $Fe_2B$  çekirdeğinin ucu civarında oluşan bölgesel yüksek gerilme alanları ve latis distorsiyonları tabakanın kolonsal olarak büyümesini sağlar (Carbucicchio and Sambogna, 1985). Şekil 4.2.'den görüleceği gibi, demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan tabaka ile matriks malzeme arayüzeyindeki kolonsallık (1) noktasında, (2) noktasına göre daha yüksektir.

Çok fazlı borür tabakalarında  $Fe_2B$  üzerinde  $FeB$ 'un büyüme mekanizması, demir üzerinde  $Fe_2B$ 'un büyümesiyle aynıdır, dolayısıyla  $FeB$  için de uçtan büyüme mekanizmasının geçerli olduğu ileri sürülmektedir (Palomborini and Carbucicchio, 1987). Ancak, aynı tabaka için  $FeB/Fe_2B$  arayüzeyindeki kolonsallık,  $Fe_2B$ /matriks arayüzeyine göre daha düşüktür. Bu farkın, söz konusu fazların mekanik özelliklerinin farklı olmasından kaynaklandığına inanılmaktadır.  $Fe_2B$  sünek bir matrikste büyürken,  $FeB$  sert bir matriksde ( $Fe_2B$ ) büyüyen, çok sert bir fazdır. Bu farklılıklar, arayüzeylerde çok farklı bölgesel gerilmelere ve/veya kafes distorsiyonlarına yol açar (Palombarini and Carbucicchio, 1987).

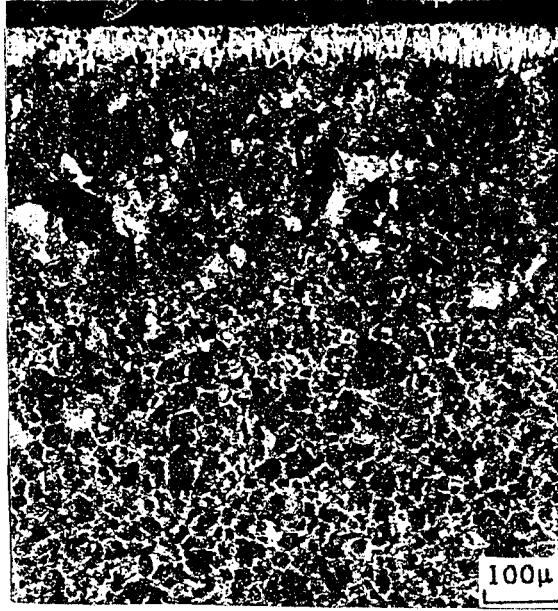


Şekil 4.2.  $FeB$  ve  $Fe_2B$  tabakalarında, demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan kolonsal büyümenin şematik gösterilişi (Palombarini and Carbucicchio, 1984).

#### 4.5. Borür Tabakasının Yapısı ve Çeşitleri

Borür tabakası ve tabakalarının özellikleri, borlanan malzemenin kimyasal bileşimi, borlama ortamının bileşimi, işlem sıcaklığı ve süresi ile borlama işlemi sonrası yapılan ilave ısıl işlemlere bağlıdır. Demir ve çelik malzemelerde

borlama işleminin sonrasında iki farklı bölge ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.3.'de, bu farklı bölgeler mikroyapı üzerinden görülebilir.



Şekil 4.3. Borlama işlemi sonrasında mikroyapıda görülen farklı bölgeler.

#### 4.5.1. Borür tabakası

Demir ve alaşımlarının borlanması, ya tek fazlı ( $Fe_2B$ ) veya çok fazlı ( $FeB+Fe_2B$ ) borür tabakaları elde edilir. Borlama ortamından sağlanan aktif bor,  $Fe_2B$  oluşumu için esas malzeme tarafından tüketilen miktardan daha fazla olduğu işlem şartlarında sadece  $Fe_2B$  oluşmaz, aynı zamanda  $Fe_2B$ 'a göre borca daha zengin reaksiyon ürünleri de meydana gelebilir. Esas malzeme bileşimi ve işlem şartlarına bağlı olarak  $Fe_2B$  tabakası üzerinde  $FeB_x$ , ( $x>1$ ) ve (B-Fe) katı eriyiğinden oluşan tabakalar da meydana gelebilir (Palombarini and Carbucicchio, 1985). Ancak, bu tabakaların kalınlıkları,  $Fe_2B$  ve  $FeB$ 'a göre çok incedir. Bu tabakalar, daha çok Mössbauer spektrometresiyle yapılan çalışmalarda, (Carbucicchio et al., 1980, a,b; 1985), belirlenebilmektedir. Alaşımlı çeliklerde, bunlara ilaveten alaşım elementlerine bağlı olarak  $Cr_2B$ ,  $CoB$  gibi bileşikler de oluşmaktadır.

#### 4.5.2. Geçiş zonu

Borür tabakası ile borlanan metal matriks arasındaki bölge geçiş zonu olarak isimlendirilir. Borlama işlemi esnasında çelik bileşiminde bulunan elementlerin yeniden dağıldıkları ve bu arada FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakalarının karbon çözündürme özelliğinin olmaması dolayısıyla bor difüzyonu esnasında C ve Si'inde borür tabakasından içeriye doğru itildikleri ve bunun sonucu olarak da geçiş zonunun meydana geldiği bilinmektedir. Geçiş zonu mikroyapı itibariyle, esas malzeme yapısından farklı bir görünüme sahiptir (Nadolskii and Ivinskii, 1972).

Geçiş zonu, borür tabakasına göre daha kalındır (Pokhmuskii and Kuchcrepa, 1977). Loysenko et al. (1978) geçiş zonunun, bor tabakasına göre 3-3.4 kat daha kalın olduğunu söylerken; bu bölgedeki bor dağılımını otoradyografi yöntemiyle inceleyen Barzina et al. (1984), geçiş zonu kalınlığının, normal metalografik yöntemle belirlenene göre daha büyük olduğunu belirlemişlerdir. Aynı yöntemi kullanan Bozkurt (1984) da, yaptığı çalışmada geçiş zonunun, borür tabakasının 10-15 katı kadar kalınlığa sahip olduğunu tesbit etmiştir.

Orijinal karbon bileşimi % 1 veya daha yüksek olan çeliklerin borlanmasında, geçiş zonunda sementit kümelerinin bulunduğu ve bunların genelde borür iğneleri arasındaki bölgelerde meydana geldiği bildirilmiştir (Pokhmuskii and Kucherepa, 1977). Permyakov and Loskutov (1974) ve Teneva and Japrkova (1986), bu bölgede borlu sementit, [Fe<sub>3</sub>(C, B)] yapısının gözlemlendiğini bildirmişlerdir. Borür tabakası tarafından karbonun içerilere doğru itilmesi sonucunda geçiş zonunda, esas malzemeye göre daha fazla perlit bulunacağı, çeşitli araştırmacılar tarafından ileri sürülmektedir (Goeriot et al., 1982; Loysenko et al., 1978; Akulinichev, 1979; Bel'skii et al., 1983).

Genel olarak, geçiş zonundaki tane boyutunun, matriks malzeme tane boyutuna göre daha büyük olduğu halde (Bozkurt,

1984), sinterlenmiş Fe-C alaşımlarında bu bölgede tane büyümesine rastlanmadığı ileri sürülmektedir (Loyshenko et al., 1978).

#### 4.5.3. Borür tabakasının kalınlığı

Borlanan malzemenin cinsi, borlayıcı ortamın bileşimi, işlem süresi ve sıcaklığına bağlı olarak istenilen kalınlıkta borür tabakaları elde edilebilir. Tabaka kalınlığı, borlanan parçanın kullanım şartlarına göre seçilmelidir:

- Eroziyon aşınma için kalın tabakalar (örneğin, seramik endüstrisi için pres takımlarında),

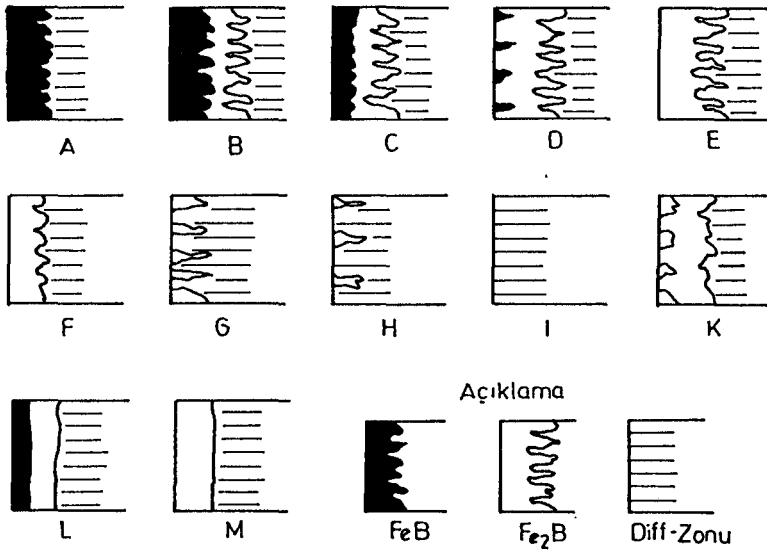
- Adhesif aşınma için ince tabakalar (örneğin zımba takımlarında).

Teorik olarak, adhesif aşınmayı önlemek için 5  $\mu$  m'lik kalınlık yeterlidir. Ancak, alaşımsız ve az alaşımlı çeliklerde olduğu gibi tabaka geometrisinin parmaksı olduğu durumlarda, bu kalınlıkta bir tabaka elde etmek mümkün değildir. Yüksek alaşımlı çeliklerde 15-20  $\mu$  m'lik kalınlık uygundur. Takım çeliklerinde, tabaka kalınlığının 75-100  $\mu$  m'yi geçmemesi önerilir (Permyakov and Loskutov, 1974). Tabaka kalınlığı arttıkça tabakanın gevrekliği de artacağı için, özellikle çift fazlı tabakalarda, tabakanın çok kalın olmamasına dikkat edilmelidir (Fichtl et al., 1987).

#### 4.5.4. Borür tabakasının çeşitleri

Çeşitli borlama yöntemleriyle 14 farklı yapıda borür tabakasının elde edilebileceği Shadrichov and Rumyantsev (1982) tarafından bildirilmiştir. Şekil 4.4.'de bu farklı yapılar şematik olarak gösterilmiştir.

Borür tabakalarının yapısı; borlama yöntemine, borlanan malzemenin bileşimine, borlama ortamına ve işlem şartlarına bağlı olmak üzere, ya düz bir şekilde (örneğin, yüksek alaşımlı çeliklerde) veya parmaksı türde (zikzak şekilli) olabilir. İşlem süresi arttıkça, parmaksı türdeki borür tabakalarında maksimum ve minimum kalınlıklar arasındaki fark da artar.



Şekil 4.4. Borür tabakası çeşitleri (Matuschka, 1980).

## 5. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN BORLAMAYA ETKİSİ

Hemen hemen bütün dövme ve dökme çelikler, gri dökme demirler, küresel grafitli dökme demirler, sinter demir ve çelikler borla yüzey sertleştirilebilirler (Matuschka, 1980). Demir esaslı malzemelere ilaveten Ti ve Ti alaşımları, Cr, Mn, Ni, Co, Mo, Ta v.b. demir dışı alaşımlar ile seramik malzemeler de borlanabilir. Co veya Ni esaslı WC ve TiC gibi karbürler çok sert ve yüksek ergime sıcaklığına sahip olmalarına karşılık, nemli atmosferik şartlarda, oksidasyon dirençleri düşmektedir. Bunu önlemek için borlama uygulanabilir. Ancak, Co veya Ni içeriğinin % 6'dan küçük olmasının gerektiği bildirilmektedir (Fichtl, 1981).

Al, Zn ve Mg-alaşımları borlanamaz. Cu ve Cu-alaşımları klasik yöntemlerle borlanamazken (Fichtl, 1981), yeni geliştirilen bir yöntemle borlanabileceği iddia edilmektedir (Linial and Lavella, 1973). Al-alaşımli çeliklerin borlanması tavsiye edilmezken (Fichtl, 1981; Linial and Lavella, 1973), bu konuda müsbet yönde bazı çalışmalara rastlanmıştır (Bonomi et al., 1978). % 1'den fazla silis içeren çeliklerde, kalın borür tabakaları uygun değildir, bu tür malzemelerde  $Fe_2B$  tabakası

altında bir ferrit bölgesi oluşur, bu çok yumuşak bir faz olduğu için tabakada çatlama ve dökülmelere neden olabilir (Fichtl et al., 1987; Fichtl, 1981).

Çelik malzemenin borlanması istenmeyen yüzeyleri veya bölgeleri SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, asbest, bakır veya benzeri ticari ürünlerle kaplanarak kısmi borlama yapılabilir (Matuschka, 1980, Fichtl, 1981). Permyakov and Loskutov (1974), iş parçasının borlanması istenmeyen yüzeylerinin, en azından 0.1 mm kalınlıkta bakır ile veya 4 g amorf bor tozu, 4 ml sentetik reçine ve 14 ml trikloroetilen karışımıyla kaplanmasını önermişlerdir.

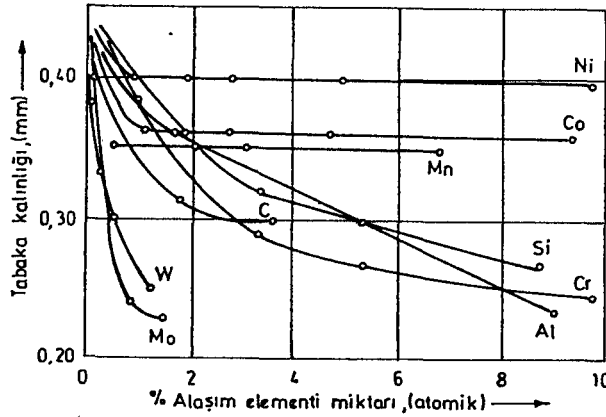
Demir ve alaşımlarının borlanmasında alaşım elementleri, borür tabakası ve geçiş zonunun yapısına, bileşimine, toplam kalınlığa ve mekanik özelliklere önemli derecede etki ederler (Palombarini et al., 1984). Alaşım elementleri :

a. Borür tabakasına girerek, özelliklerini iyileştirirler. FeB ve/veya Fe<sub>2</sub>B kafes noktalarındaki demir atomunun yerini alır veya bazı durumlarda borür tabakasında belirli partiküller oluştururlar (Tsipas and Rus, 1987; Carbucicchio et al., 1984),

b. Borür tabakalarının izafi miktarlarına ve dizpozisyonlarına etki ederler (Tsipas and Rus, 1987; Carbucicchio et al., 1984),

c. Belirgin bir şekilde farkedilebilen sürekli borür tabakası oluştururlar.

Bütün bu etkiler; alaşım elementlerinin, esas metalin bora karşı olan aktivitesine etki etmesine, alaşım elementlerinin demir borürlere tercihli olarak girme kabiliyetine ve alaşım elementlerinin bor ile etkileşme ve stabil bileşikler oluşturmaya bağlıdır (Tsipas and Rus, 1987). Çelik içerisindeki alaşım elementi miktarının, borür tabakası kalınlığına etkisi Şekil 5.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Çeliklerde, alaşım elementi miktarının tabaka kalınlığına etkisi (Matuschka, 1980).

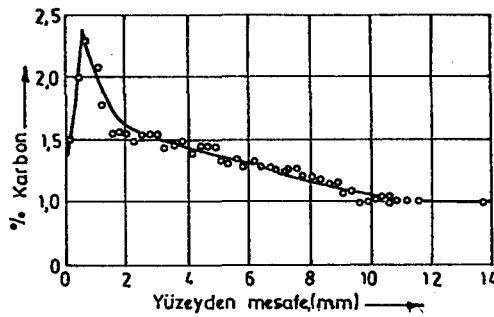
Karbon ve silisyum gibi alaşım elementleri, demir borürlerde çözünme kabiliyetlerinin olmamasından dolayı, matrikse doğru yayınırlar ve borür tabakası altında konsantre olurlar (Palombarini et al., 1984). Bunun sonucu olarak, yüzeydeki karbon miktarı şiddetle azalırken, yüzeyin altındaki mikrohacimler karbürize olurlar. Bu bölgede düzgün olmayan bir karbon dağılımı söz konusudur. Karbon konsantrasyonu, borür iğneleri arasında maksimum iken, borür iğne uçlarında daha düşüktür. Çeliğin karbon bileşimindeki artış, borür tabakasındaki konsantrasyon gradyanını artırırken, karbürize bölgenin genişliğine etki etmediği söylenilmektedir (Dukarevich and Mozharov, 1973). Bu tür bir karbon dağılımı, daha yumuşak bir su vermeyi ve bunun sonucu olarak da, çok sert borür tabakasından, daha yumuşak matrikse doğru daha homojen bir geçişi sağlar (Goeriot et al., 1982).

Karbon konsantrasyonu, borür tabakasının toplam kalınlığı ve sertliğinin azalmasına, demir borürlerin izafi dengelerinin (stabilitelerinin) değişmesine ve geçiş zonunda karbür ve bor-karbürlerin oluşmasına sebep olur (Palombarini et al., 1984).  $Fe_2B$ ,  $FeB$ 'a göre daha dengelidir ve öncelikle bu faz oluşur (Bonomi et al., 1978). Karbon konsantrasyonunun artışıyla birlikte  $FeB$ 'un stabilitesi azalırken,  $Fe_2B$ 'un stabilitesi artar. Balozen et al. (1975), yapılan deneysel çalışmaların karbon miktarının artışıyla, borür tabakası



kalınlığındaki azalmayı, FeB'un azalmasına bağlamaktadırlar. % 1.2-1.25 karbon bileşiminde, FeB'un tamamen ortadan kalkacağını keza, tabakada Fe<sub>2</sub>B fazının artması dolayısıyla sertliğinde azalacağını söylemektedirler.

Düşük ve orta karbonlu çeliklerde iğnesel (parmaksı) bir tabaka gözlenirken, % 1-2 C içeren çeliklerde daha düz (yassı) Fe<sub>2</sub>B tabakaları oluşur (Goeuriot et al., 1982). Şekil 5.2.'de amorf bor ortamında, 1000°C sıcaklık ve 25 saat süreli borlama şartları altında, % 1 C içeren bir çelikte yüzeyden mesafe ile karbon bileşimindeki değişim gösterilmiştir. Gri ve küresel grafitli dökme demirlerde olduğu gibi, serbest halde bulunan C için böyle bir yer değiştirme sözkonusu değildir. Grafitler tabaka içerisinde aynı şekilde kalırlar (Matuschka, 1980).



Şekil 5.2. % 1 C içeren çeliğin, borlama sonrası, yüzeyden mesafe ile karbon bileşimindeki değişim. 1000°C sıcaklık, 25 saat süre ve amorf bor ortamı (Matuschka, 1980).

Alaşımında Si konsantrasyonunun artışıyla, borür tabakası kalınlığı azalır ve Si'un % 1'e kadarki oranlarında maksimum etkiyi gösterir. Tabaka kalınlığındaki azalma, FeB miktarındaki azalma dolayısıyla da, Si'un Fe<sub>2</sub>B'a etkisi daha azdır (Permyakov and Yakovchuk, 1973). Bor yayını esnasında Si, FeB'den içeriye doğru yer değiştirir. Fe<sub>2</sub>B tabakasında Si konsantrasyonu düzgün olarak artar (Dukarevich and Mozharov, 1973), Si'un artışı ile ferrit oluşur. Bu olay, özellikle bora karşı affinitesi çok zayıf olan, kuvvetli ferrit yapıcı elementleri içeren çeliklerde gözlenir (Matuschka, 1980). Tabakanın altında Si ve B'un  $\alpha$ -demirindeki katı eriyiğinden oluşan  $\alpha$ -fazı bölgesinde Si içeriği, alaşımın orijinal Si içeriğinin 2-3 katına ulaşır. Si-çeliklerinde, bor iğneleri

civarındaki  $\alpha$ -fazı, geçiş zonuyla düz bir sınıra sahiptir. Karbürize olan mikrohacimler,  $\alpha$ -fazı bölgesinden daha derindir. Ayrıca Si'li çeliklerde karbürize bölge, karbon çeliklerindeki kadar küçüktür. Bunun sebebi olarak, Si'un karbon difüzyonunu engellemesi gösterilmiştir (Dukarevich and Mozharov, 1973).

Silisyum, borür tabakası sertliğini etkilemez. Ancak, geçiş zonu sertliği Si'un artışıyla artar (Permyakov and Yakovchuk, 1973). Si,  $\alpha$ -fazı bölgesinin fiziko-kimyasal özelliklerini değiştirirken, borür tabakasının gevrekliğini de artırır (Dukarevich and Mozharov, 1973). Bu yüzden, % 1'in üzerinde Si içeren çelikler borlamaya uygun değildir, ancak ince tabaka ve darbesiz çalışma için bu tür çelikler de borlanabilir (Matuschka, 1980; Fichtl, 1981).

Alaşım elementlerinin borlamaya etkisini araştıran makalelerin büyük çoğunluğu, Cr ve Ni'in borlamaya etkisini incelemektedir. Ancak bu konuda tam bir görüş birliği yoktur. Hemen hemen bütün çalışmalar, alaşımda krom içeriğinin artmasıyla tabaka kalınlığının azaldığını söylemektedir (Matuschka, 1980; Goeuriot et al., 1982; Carbucicchio and Palombarini, 1987). Bazı çalışmalarda (Carbucicchio and Sambogna, 1985; Carbucicchio et al., 1983), Cr'un artışıyla toplam tabaka kalınlığının değişmediğini, bununla birlikte tabakada FeB miktarının arttığını ve Fe<sub>2</sub>B miktarının azaldığını ifade etmektedirler. Cr'un borürlere girmesi konusunda araştırmacılar aynı fikirde olmalarına rağmen, bazıları, Cr'un FeB fazında lokalize olduğunu (Dukarevich and Mozharov, 1973) ileri sürerken, diğer bir grup da, Cr'un Fe<sub>2</sub>B fazına girdiğini (Permyakov and Loskutov, 1974; Goeuriot et al., 1982) (Fe, Cr)<sub>2</sub>B bileşiği oluşturduğunu ve FeB tarafından itildiğini ileri sürmektedir. Bazı çalışmalarda da, Cr'un ya demir borürlere girdiğini veya tabaka ile matriks arayüzeyinde konsantre olduğunu ve ayrıca çok yüksek Cr içeriklerinde CrB tabakasının oluştuğunu belirtmektedirler (Goeuriot et al., 1982). Krom miktarındaki artışla birlikte, tabaka-matriks arayüzeyindeki parmaklı türdeki geçiş de daha düz bir şekil

alır (Matuschka, 1980; Goeriot et al., 1982; Carbucicchio and Sambogna, 1985; Carbucicchio and Palombarini, 1987; Carbucicchio et al., 1983).

Krom tabakanın sertliğini artırırken, nikelin etkisi ihmal edilebilir seviyededir (Badini et al., 1986). Cr'un aksine Ni, tabakanın altında konsantre olur (Tsipas and Rus, 1987; Palombarini et al., 1984; Carbucicchio and Palombarini, 1987) ve düşük nikelli borürlerin oluşumuna yol açar (Carbucicchio et al., 1983). % 18 Ni içeren Fe;Ni alaşımlarında, (Fe, Ni)B ve (Fe, Ni)<sub>2</sub>B şeklinde borürler gözlenirken, tabaka kalınlığı Cr'a göre daha düşük oranda azalır. Tabakada (Fe, Ni)<sub>2</sub>B miktarı, (Fe, Ni)B'a göre daha fazladır (Badini et al., 1986). % 9'a kadar olan Ni oranları tabaka geometrisini etkilemez (Matuschka, 1980). Yüksek Ni içeren alaşımlarda daha düz bir geometriye sahip tabaka gözlenir. Ayrıca, nikelli alaşımlarda tabakada, mekanik özellikleri kötü yönde etkileyen porozitenin olabileceği belirtilmiştir. (Carbucicchio et al., 1982).

Nikelin aksine, Cr ve Mn tercihli olarak demir-borürlere girer ve borlama esnasında yüzeye doğru yayılır (Dukarevich and Mozharov, 1973). Dukarevich and Mozharov (1973), Mn'ın esas olarak FeB bölgesinde lokalize olduğunu iddia ederken; Tsipas and Rus (1987), borür tabakasında ve genellikle Fe<sub>2</sub>B'da konsantre olduğuna inanmaktadır.

Diğer alaşım elementlerinde olduğu gibi mangan, borür tabakası kalınlığını azaltır ve tabaka geometrisini düzleştirir (Tsipas and Rus, 1987). Tungsten, molibden, vanadyum (Matuschka, 1980) ve titanyum (Permyakov et al., 1973) miktarlarının çelikte artmasıyla tabaka kalınlığı azalırken, tabaka geometrisi de düz bir şekil alır. Ti, FeB'da çözünür ve FeB'un sertliğini artırır. Ayrıca, geçiş zonunda tane büyümesin engelleyici bir rol oynar (Permyakov et al., 1973). Borlanacak çeliklerde vanadyum miktarının % 0.15'i geçmemesi istenir (Matuschka, 1980).

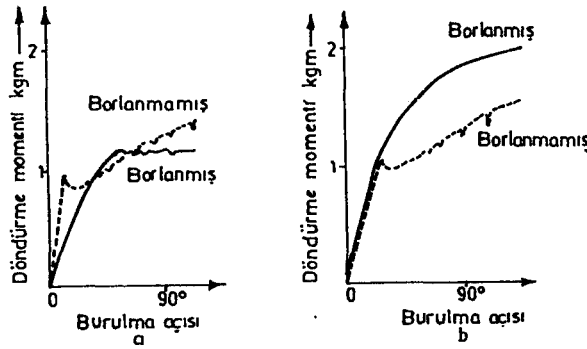
Yüksek alaşımlı çeliklerde, daha kalın borür tabakaları elde etmek için dolaylı borlama yapılabilir. Yöntemde; borlanacak olan çelik parçanın yüzeyinde, önce elektrolitik olarak demir biriktirilir (veya kaplanır), daha sonra istenilen tabaka kalınlığına göre, uygun sıcaklık ve sürede borlama yapılır. Ulaşılabilecek tabaka kalınlığı, çelik cinsinden daha çok, yüzeyde biriktirilen demir tabakasının kalınlığına bağlıdır (Matuschka, 1980).

## 6. BORÜR TABAKASININ ÖZELLİKLERİ

### 6.1. Fiziksel Özellikler

Borlanmış çeliklerin fiziksel özellikleri konusunda yapılan çalışmalar, daha çok aşınma direnci ve mikrosertlik ölçümleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Borlama, demir grubu malzemelerin akma ve kopma dayanımlarını % 10-20, yorulma dayanımını % 25 ve korozyonlu yorulma ömrünü % 200 artırmasına karşın, plastisite özelliklerini kötü yönde etkiler (Epik, 1970; Bozkurt'tan, 1984; Karpenko et al., 1972; Fedrochenko et al., 1977). Borlama sonucunda; karbon çeliklerindeki lüders bantlarının oluşumu engellenir (Goeuriot et al., 1983).

Mekanik deneyler, çeşitli çeliklerde farklı şartlarda elde edilen borür tabakalarının mekanik özelliklerini ve borür tabakası ile esas malzeme arasındaki bağlantıyı test etmek amacıyla yapılır. Deney esnasında maksimum gerilmelerin numune yüzeyinde oluşması ve gevrek malzemelerde bile kırılma öncesinde yüksek deformasyonlara izin vermesi dolayısıyla, borlama çalışmalarında zaman zaman burulma deneylerine başvurulur. Keza, yüzey tabakası ile esas malzeme arasındaki bağlantı, çekme deneyi esnasında borür tabakası ile matriks arayüzeyinde oluşan kayma gerilmelerine bağlıdır. Şekil 6.1.'de ve orta karbonlu çeliklerde, borlanmış ve borlanmamış şartlarda elde edilen burulma eğrileri görülmektedir.



Şekil 6.1. Çeliklerde borlamanın burulma eğrisine etkisi, a) % 0.1 C, b) % 0.35 C (Goeriot et al., 1983).

### 6.1.1. Sertlik

Borlama ile karbon çeliklerinde 1800-2000 HV (Lakhtin, 1983), alaşımlı çeliklerde 2500-2800 HV ve yüksek hız çeliklerinde 2800-3300 HV'lik yüzey sertlikleri elde edilir (Geller, 1978). Ticari çeliklerde elde edilen 1800-2000 HV'lik sertlik değerleri, yaklaşık olarak Korandumun ( $Al_2O_3$ ) sertliğine eşdeğerdir (Fichtl, 1981, 1987). Elde edilen tabakanın  $Fe_2B$  veya ( $FeB + Fe_2B$ ) fazlarından oluşmasına göre ulaşılabilecek sertlik değerleri değişir.  $FeB$ ,  $Fe_2B$ 'a göre daha sert ve gevreklerdir (Geller, 1978; Eyre, 1975).

Borür tabakasında sertlik ölçümleri; ya parlatılmış ve dağlanmış mikroyapılar üzerinde numune yüzeyine dik bir açıyla, veya borlama sonrası parlatılmış yüzeyler üzerinde, borür iğnelerinin büyümesi yönünde mikrosertlik yöntemiyle ölçülür (Fichtl, 1981, 1987; Goeriot et al., 1983). Vickers ve Knoop uçlarıyla yapılan ölçümlerde büyük yüklerin uygulanması tabakada çatlama, dökülme v.b. nedenlerden dolayı hatalı sonuçlara yol açabilir. Rockwell ve Brinell yöntemleri ise, tabakanın bozulmasına ve tabaka altındaki bölgenin deformasyonuna sebep olabileceği için uygun değildir (Fichtl, 1981, 1987). Genel olarak 50 ve 100 gr'lık yüklerle mikrosertlik ölçümleri uygun olarak yapılmasına rağmen, tabaka kalınlığına bağlı olarak 10 gr'dan 1 kg'a kadar değişen yüklerle sertlik ölçümleri yapılabilir.

Borür tabakasının fiziksel özellikleri sertliği etkiler. Yüzeğe yakın bölgelerde, teorik olarak beklenilenden daha düşük sertliklerin elde edilmesi, bu bölgelerde bulunan poroziteyle açıklanmıştır. Ayrıca, çok ince tabakalarda çatlamalar ve düşük yüklerle çalışma zorunluluğu dolayısıyla, oluşan izlerin hassasiyetle belirlenmesi güçleşmektedir (Badini et al., 1986).

Borlamayla, diğer bazı yüzey sertleştirme yöntemlerine göre çok daha sert tabakalar elde edilir. Çizelge 6.1.'de farklı yüzey sertleştirme işlemleri uygulanmış çeliklerin mikrosertlik değerleri verilmiştir.

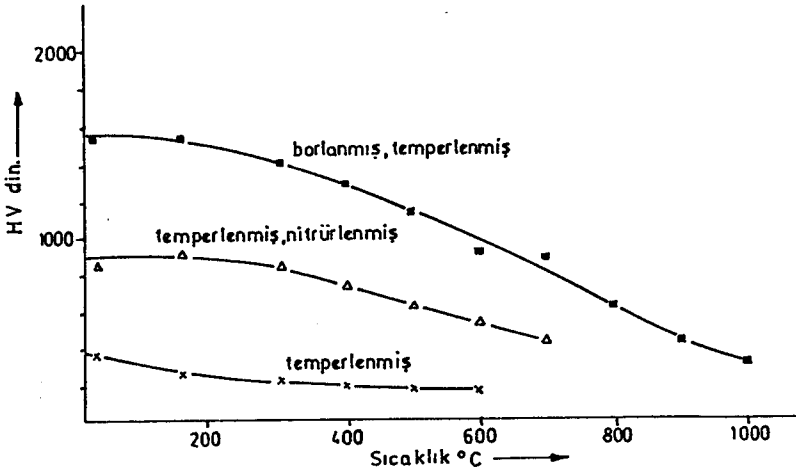
Çizelge 6.1. Farklı yüzey sertleştirme işlemleri uygulanan çeliklerin mikrosertlik değerleri (Singhal, 1977).

Yüzey durumu	Mikrosertlik, (HV)
Nitrülenmiş	610-740
Karbonitrülenmiş	700-820
Gaz sementasyonu ile yüzeyi sertleştirilmiş	700-820
Sert krom kaplanmış	950-1110
Borlanmış	1600-2000

Bor yayınımla ulaşılan 1400-2000 HV'lik yüksek sertlik değerleri, 900-1000°C'a kadar yüksek sıcaklıklarda kaybolmamaktadır (Geller, 1978; Eyre, 1975; Evtifeev and Sinkovskii, 1985). Çizelge 6.2.'de kontrollü atmosferde, 1000°C'a kadar sıcaklıklarda 30 dakika süreyle ısıtılan ve oda sıcaklığına soğutulduktan sonra ölçülen mikrosertlik değerleri, Şekil 6.2.'de de 42 CrMo4 çeliğinde çeşitli yöntemlerle elde edilen tabakaların dinamik yüksek sıcaklık sertlikleri gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. % 0.1 C'lu çelikte sementasyon ve borlamayla yüzey sertleştirmede, yüzey tabakasının sertliğine sıcaklığın etkisi, HV-30 gr yük (Eyre, 1975).

Tavlama sıcaklığı, °C	Sertlik, HV (30 gr yük)	
	Sementasyonla yüzey sertleştirme	Bor yayınımla yüzey sertleştirme
200	680	1680
400	380	1500
600	330	1600
800	220	1575
1000	200	1565



Şekil 6.2. 42 CrMo4 çeliğinde farklı yüzey tabakalarının, dinamik yüksek sıcaklık sertlikleri (Fichtl, 1987).

### 6.1.2. Aşınma direnci

Metallerin çalışma ömürlerini, uygun yüzey işlemleriyle arttırmak için dünyada geniş araştırmalar yapılmaktadır (Goeriot et al., 1983). Borun oksijene karşı ilgisi yüksektir ve bütün borürler yüzeyde ince bir oksit filmi oluştururlar. Bu, yüzeyde kaynak oluşumunu engelleyici ve bir yağlayıcı gibi görev görür. Ayrıca, borür yüzeyler örneğin, çinko gibi metallerle de ıslanmazlar (Biddulph, 1977).

Çelik parçaların aşınma dirençlerini artırmada en etkili yöntemlerden birisi de borlamadır (Shadrichov and Rumyontsev, 1982). Malzemelerin abrazif aşınma dirençlerinin, sertlikleriyle doğru orantılı olduğu iyi bilinmektedir (Singhal, 1977; Vasil'eva et al., 1985). Relatif aşınma

direnci, sadece sertliğe bağlı değildir, aynı zamanda; örneğin gevreklik gibi birtakım fiziksel ve mekanik özelliklere de bağlıdır (Shadrichev and Rumyantsev, 1982). Borlamayla wolfram karbürün sertliğine eşdeğer bir sertlik ve teflonunkine (PTFE) yakın sürtünme katsayıları elde edilir (Linial and Lavella, 1973). Çizelge 6.3.'de çeşitli malzemelere ait borlanmış ve borlanmamış şartlardaki sürtünme katsayıları verilmiştir.

Çizelge 6.3. Borlanmış ve borlanmamış şartlarda, çeşitli malzemelere ait statik sürtünme katsayıları (Linial and Lavella, 1973).

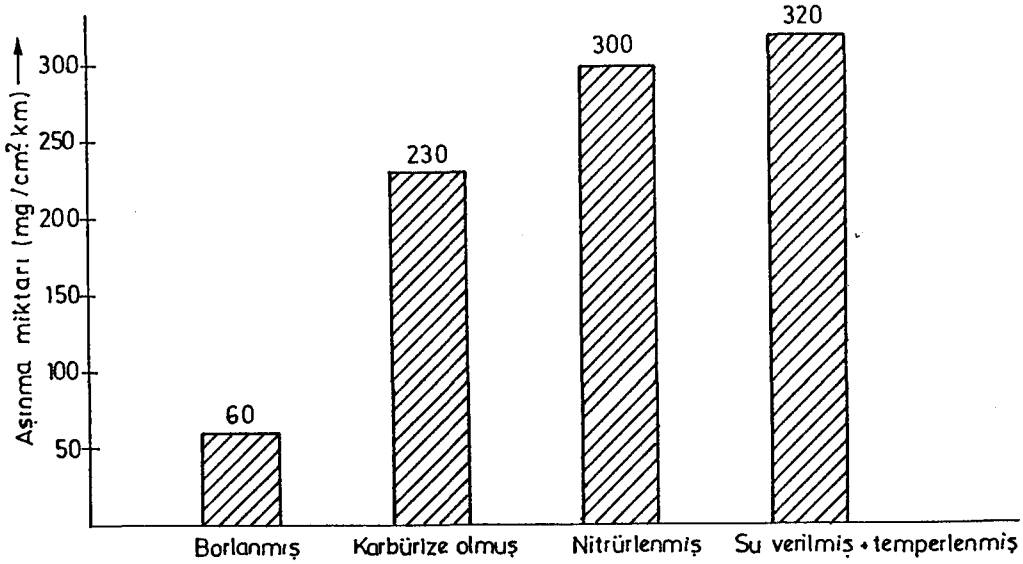
Malzeme	İşlem	Yüzey kalitesi ( $\mu\text{m}$ )	Sürtünme katsayısı
-01-01	Borlanmış	0.0762	0.07-0.09
Takım çeliği	Borlanmamış	0.0762	0.22-0.24
-1018-1018	Borlanmış	0.0762	0.14-0.15
Düşük karbonlu	Borlanmış	4.5720	0.17-0.19
çelik	Borlanmamış	0.0762	0.24
-302-302	Borlanmış	4.5720	0.16-0.18
Paslanmaz çelik	Borlanmamış	0.0762	0.19-0.22
-Tungsten-Tungsten	Borlanmış	0.0762	0.12-0.14
	Borlanmamış	0.0762	0.45
-Molibden-Molibden	Borlanmış	6.8580	0.16-0.17
	Borlanmamış	0.0762	0.38
-Nikel-Nikel	Borlanmış	0.0762	0.13-0.14
	Borlanmamış	0.0762	0.42

Borlanmış çeliklerin aşınma dirençleri sementasyon, nitrürasyon, sert krom kaplama ve su vererek sertleştirmeyle elde edilen yüzeylere göre en az 2-3 kat daha yüksektir (Permyakov and Loskutov, 1974). Loyshenko et al. (1978), sinter çeliklerin borlama sonrası aşınma dirençlerinin 4-5 kat arttığını bildirmişlerdir. Şekil 6.3'de düşük karbonlu bir çelikte çeşitli yüzey sertleştirme işlemlerinin uygulanması durumunda, bu numunelerin aşınma dirençleri karşılaştırılmıştır.

Fiedler et al. (1971), borlanmış numunelerin aşınma dirençlerinin, sert krom kaplanmış olanlara göre 10 kat daha fazla olduğunu bildirmiştir. Düşük karbonlu çelikte borlamayla, hem abrazif ve hem de adhezif aşınma (kayma



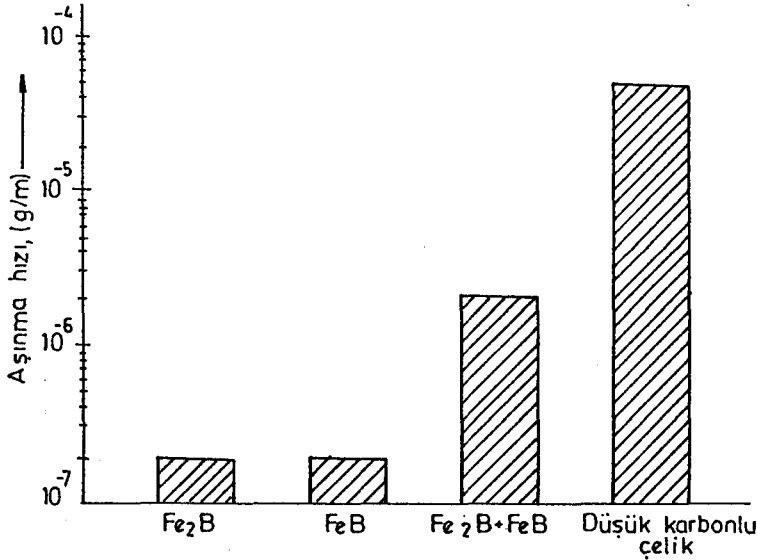
aşınması=yapışkan aşınma) üçte bir oranında azaltılabilir (Long and Mc Gurie, 1979; Biddulph, 1977). Borlamayla tel çekme kalıplarının ömürlerinin 10 kat arttığı (Biddulph, 1977), bor, silis ve sülfürün çelik malzeme yüzeyine birlikte yayındırılmasıyla aşınma ve sürtünmeye karşı direncin, yalnızca bor yayınımla elde edilene göre 1.6-2.1 kat daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Evtifeev and Sin'kovskii, 1985).



Şekil 6.3. Düşük karbonlu çelikte, farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin aşınma direncine etkisi (Bel'skii et al., 1980).

Borlama sonrası tek fazlı borür tabakası ( $Fe_2B$ ), aşınma direnci bakımından iki fazlı tabakaya ( $FeB+Fe_2B$ ) göre daha iyidir (Subrahmanyam and Gopinath, 1984; Biddulph, 1977). Shadrachev and Romyantsev (1982) ise, % 10-30 FeB inklüzyonları içeren  $Fe_2B$  matriksli yapının aşınma direncinin en iyi olduğunu iddia etmektedir. Borlanmış çelikten hazırlanan FeB ve  $Fe_2B$  statorların kayma aşınması deneylerinde, her iki statorda da benzer aşınma özellikleri elde edilmiştir. Aşınmanın maksimum olduğu şartlarda, hem metalik, hem de oksitlenme aşınması gözlenmiştir. Yumuşak aşınma veya yüksek kayma hızlarındaki aşınma şartlarında, aşınma kayıpları esas olarak oksitlenme aşınmasından kaynaklanmıştır (Takeuchi et al., 1979). Aşınan talaşların  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ ,  $\alpha$ -Fe ve  $Fe_2B$  içerdiği belirlenmiştir. Çift fazlı tabakalarda, transfer olan parçaların

oksitlenmesiyle abrazif bir aşınma mekanizması görülürken, FeB ve alt yüzeylerde oksitlenmeli aşınmanın yanında, abrazif aşınma da meydana gelmiştir. Fe<sub>2</sub>B tabakalarında ise, oksitlenmeli yorulma aşınması sözkonusudur (Subrahmanyam and Gopinath, 1984). Şekil 6.4.'de farklı yüzey tabakaları ve düşük karbonlu çelik için aşınma hızları gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Farklı borür tabakaları ve düşük karbonlu çelik için aşınma hızları (Subrahmanyam and Gopinath, 1984).

Sertleştirilmiş ve temperlenmiş çeliğe karşı, borlanmış tek fazlı numunelere borlama sonrası normalizasyon, normalizasyon+su verme ve farklı sıcaklıklarda temperleme sonrasında aşınma deneyleri yapılmıştır. 100 dakikalık deneyler sonucunda; en yüksek aşınma borlama sonrası ısıl işlem uygulanmayan numunede, en düşük aşınma ise borlama sonrası normalizasyon+sertleştirme ve 200°C'da temperlenen numunelerde görülmüştür (Liliental and Tackowski, 1980). Barzina et al.'un (1984) yaptığı çalışmada, çift fazlı numunelerin bir kısmı borlama sonrasında suda su verilip, farklı sıcaklıklarda temperlenirken, bazıları temperlenmemiş, bir kısmı da yağda su verildikten sonra aşınma deneyleri yapılmıştır. En iyi aşınma direncini suda su verilip 600°C'da temperlenen numunelerde elde etmişlerdir.

% 0.45 C içeren çelikten, tek fazlı ve çift fazlı yapıya sahip borür tabakalarıyla yağlı ve abrazif şartlarda, 1.05 m/s kayma hızı ve 2.45 MPa basınç altında aşınma deneyleri yapılmıştır. Borlama sonrasında bir grup numune suda su verilip 200°C'da temperlenirken, diğer bir grup ise 200°C sıcaklıktaki bir banyoda 1 saat süreyle izotermal sertleştirmeye tabi tutulmuşlardır. Yapılan deneyler sonucunda; borlama ile, tabakanın faz bileşimi ve uygulanan ısı işleminden bağımsız olarak aşınma dirençlerinin en az 2 kat daha yüksek olduğu görülmüştür. FeB ve Fe<sub>2</sub>B'un aşınma dirençlerinin birbirine yakın olmasına karşılık, borlama sonrası havada soğuma şartlarında; iki fazlı borür tabakasının aşınma direnci, tek fazlı olana göre 1.25 kat daha artmıştır. Borlama sonrası ısı işleminin, tek fazlı borür tabakasının aşınma direncini etkilemediği ancak, çift fazlı tabakayı önemli derecede etkilediği ifade edilmiştir. Tek fazlı ve çift fazlı borür tabakalarının aşınma direncinin ısı işleminden farklı şekilde etkilenmesi, bu tabakalardaki kalıntı gerilme dağılımıyla ilgilidir (Shadrichev and Ivanov, 1984).

### 6.1.3. Kalıntı gerilmeler

Çeliklerde, borlama sonucunda borür tabakası ve tabaka metal arayüzeyinde büyük kalıntı gerilmeler oluşur (Permyakov and Loskutov, 1974). Bunların dağılımı ve şiddeti çeliğin kimyasal bileşimine, borür tabakasının oluşum şartlarına (borlama ortamı bileşimi ve borlama şartları) ve borlama işlemi sonrası uygulanan ısı işlem şartlarına bağlıdır (Liliental and Tacikowski, 1980). Kalıntı gerilmeler FeB, Fe<sub>2</sub>B ve borlanan malzemenin ısı genleşme katsayılarının farklı olmasından (Rile, 1974) ve borür tabakası ile matriksin özgül hacimleri arasındaki farktan kaynaklanır (Liliental and Tasikowski, 1980). Çizelge 6.4.'de çeşitli çalışmalarda elde edilen ısı genleşme katsayıları verilmiştir.

Kalıntı gerilmeler, borlama sıcaklığında oluşmalıdır. Bununla birlikte, yüksek borlama sıcaklıklarında esas metal mukavemetinin düşük olması dolayısıyla, küçük gerilmeler

altında plastik deformasyona uğrar. Borlanan malzemeye göre daha büyük özgül hacme sahip olan borür tabakası matriksin deformasyonuna sebep olur. Yapılan çalışmalarda, borür tabakasındaki kalıntı gerilmelerin sadece düşük sıcaklıklarda oluştuğu görülmüştür (Rile, 1974).

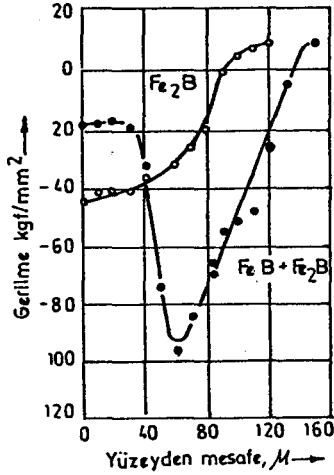
Çizelge 6.4. Börür tabakaları ve çelik malzemenin ısı genleşme katsayıları (Shadrachev and Ivanov, 1984; Rile, 1974).

Malzeme	Isıl genleşme katsayısı
FeB	$23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Fe <sub>2</sub> B	$7.85 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Çelik	$15.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

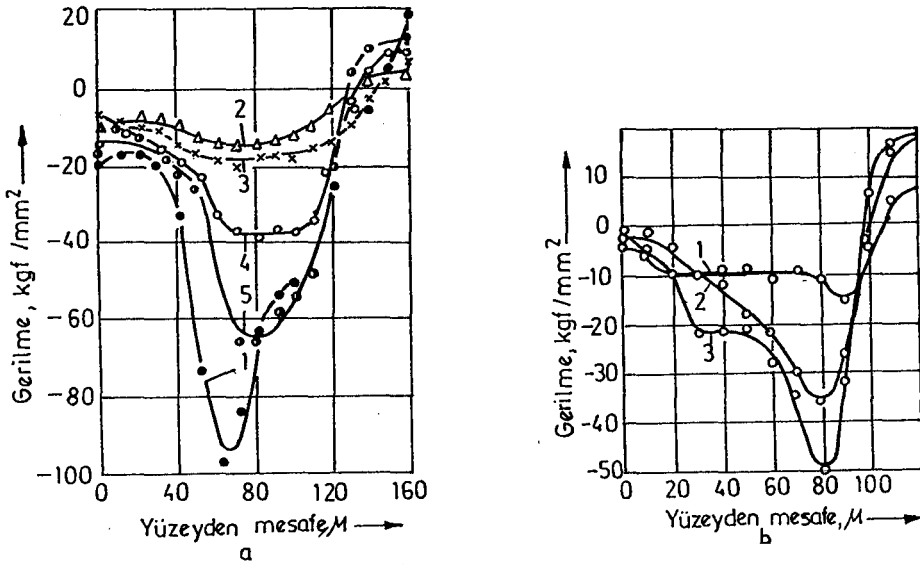
Genleşme katsayılarının farklı olması dolayısıyla, borlama sonrası soğuma FeB'da çekme, Fe<sub>2</sub>B'da basma gerilmelerine neden olur. Çift fazlı borlama işleminden sonra kalıntı gerilmeler, Fe<sub>2</sub>B bölgesinde en yüksek değere ulaşır, yüzeyde ise FeB'un bulunması nedeniyle basma gerilmeleri daha düşük değerdedir. Fe<sub>2</sub>B tabakasından merkeze doğru gittikçe basma gerilmeleri azalır ve borür iğne uçlarında çekme gerilmelerine dönüşür. Tek fazlı borlamada durum biraz farklıdır. Örneğin, % 0.45 C içeren çelikte, en yüksek basma gerilmeleri yüzeyde oluşur ve merkeze doğru gittikçe azalır. Borür tabakası kalınlığına karşılık gelen bir uzaklıkta çekme gerilmelerine dönüşür. Dolayısıyla, kalıntı gerilmeler açısından en uygun dağılım, sadece Fe<sub>2</sub>B'den oluşan borür tabakalarıyla elde edilir (Babuskhin and Polyakov, 1973). Şekil 6.5.'de tek ve çift fazlı borür tabakalarındaki kalıntı gerilme dağılımı görülmektedir.

Borür tabakasındaki en yüksek kalıntı gerilmeler, borlama sıcaklığından, fırında soğuma şartlarında meydana gelir. Artan soğuma hızıyla bu gerilmeler düşer. En düşük kalıntı gerilmeler, suda su verme sonucunda oluşur. Su verme sonrası temperleme işleminde de, temperleme sıcaklığının artışıyla borür tabakasındaki basma gerilmeleri artar (Babuskhin and

Polyakov, 1973). Şekil 6.6. borlama sonrası soğuma hızı ve temperleme sıcaklığının kalıntı gerilmelerin dağılımına etkisini göstermektedir.



Şekil 6.5. Tek fazlı ve çift fazlı borür tabakalarında kalıntı gerilme dağılımı (Babuskhin and Polyakov, 1973).



Şekil 6.6. % 0.45 karbonlu çelikte; a) Borlama sonrası soğuma hızının kalıntı gerilme dağılımına etkisi, 1-Borlama sıcaklığından fırında soğuma, 2-840°C'dan suda soğuma, 3-300°C'daki banyoda soğutma, 4-500°C'daki banyoda soğuma, 5-havada soğuma, b) Borlama sonrası temperleme sıcaklığının kalıntı gerilme dağılımına etkisi, 1-Suda soğuma, 2-200°C'da 2 saat temperleme, 3-400°C'da 2 saat temperleme (Babuskhin and Polyakov, 1973).

#### 6.1.4. Yüzey kalitesi

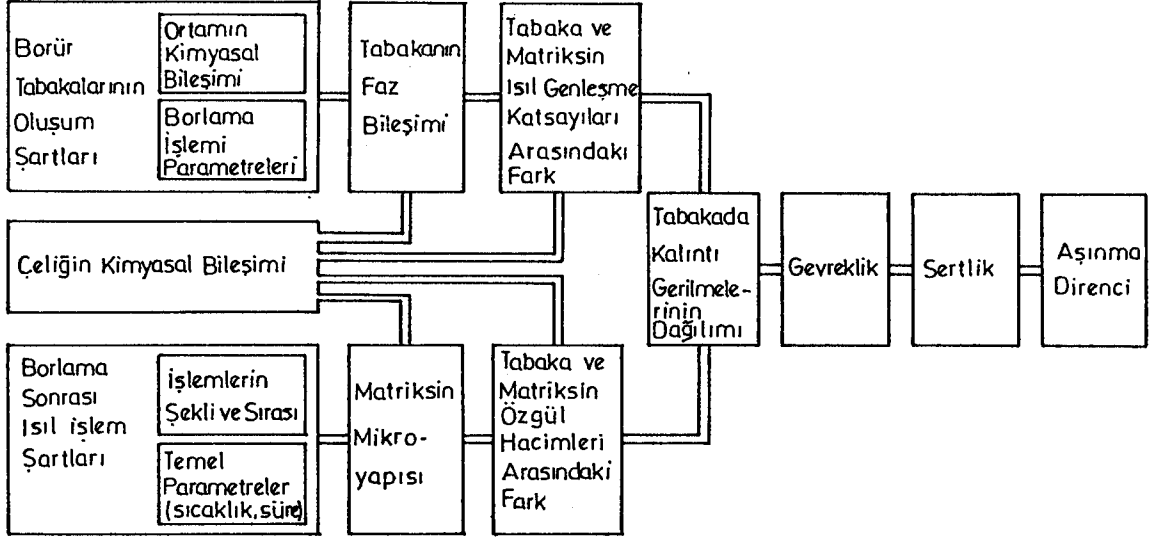
Borlama öncesi yüzey durumu, parça için gerekli olan yüzey kalitesine bağlıdır. Orijinal durumdaki yüzey pülüzlülüğü 3-6  $\mu m$ 'den daha büyük değilse, borlama sonrası yüzey kalitesi artar. Daha iyi kaliteli yüzeylerde ise borlama sonrasında kötüleşme olur (Akulinichev and Akulinicheva, 1974; Lyakhovich et al., 1976). Bu etki, orijinal yüzey kalitesindeki artışla orantılı olarak artar. Bu konuda yapılan deneyler, çoğu durumda borlama sonrası yüzey kalitesinin 0.8-1.6  $\mu m$ 'yi geçmediğini göstermiştir. Borlama sonrası daha iyi yüzeyler elde etmek için, borlanmış yüzeylere parlatma v.b. işlemler uygulanmalıdır.

Bor difüzyonu sonucunda parçaların boyutlarında bir artışın olduğu iyi bilinmektedir. Yüzey kalitesindeki iyileşme, boyutlardaki artış nedeniyle yüzeydeki mikro-çukurların, borlama esnasında dolmasından kaynaklanabilir. Yüksek kaliteli yüzeylerin borlanmasında; çukurlar gene dolar ancak, difüzyon işleminden kaynaklanan mikro-düzgünlüklerin etkisi daha fazladır. Bu yüzden, borlama sonrasında 0.8  $\mu m$ 'den daha iyi kalitede yüzeyler elde edilemez (Akalinichev and Akulinicheva, 1974).

#### 6.1.5. Gevreklik

Borür tabakasının gevrekliği, aşınmaya karşı direnç ve sertlik gibi, tabakanın servis özelliklerini de etkileyen birçok faktöre bağlıdır (Sekil 6.7.), (Liliental and Tacikowski, 1980). Bor, demire göre demir borürde daha hızlı yayındığından tabakada bir miktar porozite oluşur. Düşük sıcaklıkta borlama yapmakla porozite minimize edilir. Borlama sonrasında, çift fazlı yapıyı tek fazlı yapıya dönüştürmek için tavlama yapıldığında,  $Fe_2B$  tabakasının kalınlığı artarken, tabakada porozite miktarı da artar (Fiedler et al., 1971). Yüksek miktarlardaki porozite mekanik özellikleri kötü yönde etkiler (Goeriot et al., 1982), bu da gevrekliği artırır (Permyakov and Loskutov, 1974). Keza, iyi kaliteli borür

tabakaları; üniform ve mekanik olarak matriks malzeme ile bağlantısı kuvvetli (zik-zak şekilli) olan tabakalarda elde edilir (Goeriot et al., 1982).



Şekil 6.7. Borür tabakasının gevrekliğini ve servis özelliklerini etkileyen faktörler (Liliental and Tacikowski, 1980).

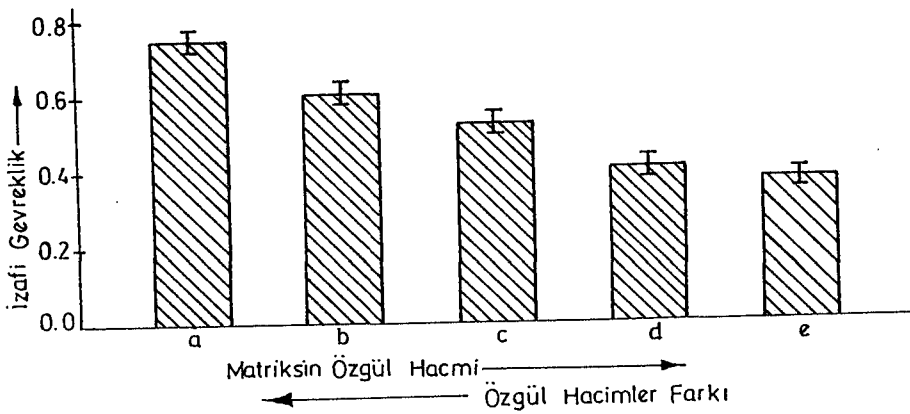
Borür tabakasının gevrekliği ve sonuç olarak servis özellikleri kalıntı gerilmelerin dağılımıyla doğrudan etkilenir. Gevreklik açısından, çift fazlı borür tabakalarına göre, daha az gevrek olan tek fazlı tabakalar tercih edilir (Goeriot et al., 1983; Liliental and Tacikowski, 1980). Bununla birlikte  $Fe_2B$  ve matriksin ısıl genleşme katsayıları arasındaki fark, tabaka oluşumunu etkilemediği için, tabaka gevrekliğinin azaltılması, matriks ve borür tabakasının özgül hacimleri arasındaki farkın azaltılmasına bağlı olmalıdır. Matriksin özgül hacmindeki değişimler, borlama sonrası uygulanan ısıl işlemlerin sebep olduğu yapısal dönüşümlerle ilgilidir (Liliental and Tacikowski, 1980).

Çeliğin kimyasal bileşimi, daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, borür tabakasının faz bileşimini ve matriksin mikroyapısını etkiler. Bununla birlikte, pratik olarak borür tabakasının gevrekliğini azaltacak hiçbir alaşım elementi yoktur. Diğer taraftan, çeliğe bor difüzyonunun engellenmesi, genellikle, yüzeyde istenmeyen formda bor

konsantrasyonunun artmasına ve gevrek FeB fazı oluşumuna sebep olur. Gevreklik noktasından olaya bakıldığında, alaşımsız orta karbonlu çelikler tavsiye edilir (Liliental and Tackowski, 1980). Ayrıca, alaşımsız çeliklerde oluşan kalıntı gerilmeler, alaşımlılara göre daha düşüktür. Sonuç olarak yüksek alaşımlı çeliklerde elde edilen borür tabakaları daha gevreklerdir (Rile, 1974).

Borür tabakalarında genel olarak üç çeşit çatlak görülür. Bunlar; "yüzeğe paralel", "yüzeğe dik ve FeB-Fe<sub>2</sub>B arayüzeyinden aşağıya" ve "yüzeyden esas metale doğru dikey" çatlaklardır. Tek fazlı tabaka elde etmek suretiyle birinci ve ikinci tip çatlak oluşumu engellenebilir (Rile, 1974).

Borlanmış malzemelerin mekanik özellikleri, özellikle gevrekliği ve tabakanın matriks malzeme ile olan bağlantısı sertlik, burulma, çekme, aşınma ve eğme (Goeriot et al., 1981, 1983) deneyleriyle belirlenir. Aşınma prensibine göre yapılan bir çalışmada (Liliental and Tacikowski, 1980), borlama sonrası ısıl işlem uygulanmayan numunelerde gevrekliğin yüksek olmasına karşın, en düşük gevreklik değeri borlama sonrasında normalize edilip sertleştirilen ve 200°C'da temperlenen numunelerde ölçülmüştür (Şekil 6.8.). Şekilden de görüleceği üzere; özgül hacimler arasındaki fark azaldıkça, borür tabakasının gevrekliği de azalır (Liliental and Tacikowski, 1980).



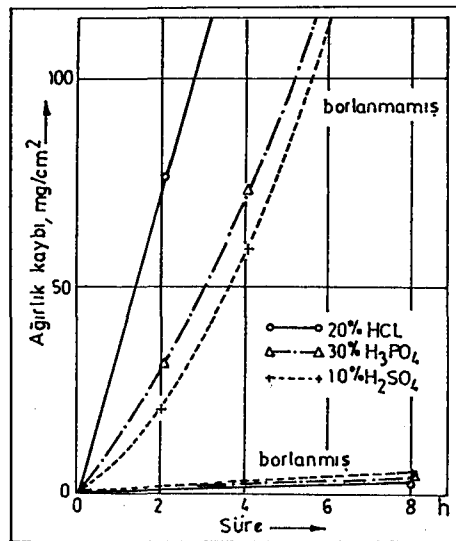
Şekil 6.8. Matriks malzeme ile borür tabakasının özgül hacimleri arasındaki farkın gevrekliğe etkisi. Borlama sonrası; a) ısıl işlemsiz, b) normalizasyon, c) normalizasyon, su verme ve 650°C'da temperleme, d) normalizasyon, su verme ve 450°C'da temperleme, e) normalizasyon, su verme ve 200°C'da temperleme (Liliental and Tacikowski, 1980).



## 6.2. Kimyasal Özellikler

Borlama, düşük alaşımlı çeliklerin asitlere (Fichtl, 1981, 1987) ve sıvı çinkonun korozyonuna (Singhal, 1977) karşı direncini artırır. Borlamayla, özellikle ostenitik çeliklerin hidroklorik asitlere karşı korozyon direncinde büyük bir artış gözlenir (Fichtl, 1987). Tuz ve sodanın sudaki çözeltilerinde, takım çeliklerinin korozyon direnci, borlama sonrasında artar, alkali çözeltilerinde ise azalır. Bunun nedeni olarak, borürlerin alkali çözeltilerle reaksiyona girmesi gösterilmiştir (Permyakov and Loskutov, 1974). Galvanizleme işleri için titanyum yerine, borlama işleminin uygulanması durumunda; hem ömrün artacağı ve hem de titanyuma göre daha ekonomik olacağı ileri sürülmüştür.

Borlanmış çeliklerin korozyon dirençleri, büyük oranda tabakadaki poroziteye ve mikro çatlaklara bağlıdır. 410 ve 304 paslanmaz çelikleri ile 1018 çeliğiyle yapılan korozyon deneylerinde 410 ve 304 çeliklerindeki korozyon hızının, 1018 çeliğine göre çok düşük olması, bu çeliklerde daha yoğun ve çatlaksız bir tabakanın bulunmasıyla açıklanmıştır (Singhal, 1977). Şekil 6.9.'da % 0.45C'lu bir çelikte borlamanın, 56°C sıcaklıkta korozyon direncine etkisi görülmektedir.



Şekil 6.9. % 0.45C'lu çelikte borlamanın 56°C sıcaklıkta korozyon direncine etkisi (Matuschka, 1980).

## 7. BORLAMA SONRASI ÖZELLİKLERİN GELİŞTİRİLMESİ

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, çeliklerde bor yayınımla çok sert, aşınma ve korozyona karşı dirençli yüzeyler elde edilir. Gevreklik ve borlama sonrası ısıl işlemlerin uygulanabilirliği yönünden, endüstride tek fazlı borür tabakaları tercih edilir. Borlama sonrası özellikler; borür tabakası, geçiş zonu ve matriks malzeme özelliklerinin birarada düşünülmesiyle geliştirilebilir. Bu bölümde;

a. Klasik borlama sonrası, uygun ısıl işlemlerle,

b. Termal çevrimli ısıl işlemlerin borlamada kullanılmasıyla malzeme özelliklerinin geliştirilmesi açıklanmaya çalışılmıştır.

### 7.1. Klasik Borlama Sonrası Uygulanan Isıl İşlemler

Borlama sonrasında, işlem şartları ve esas malzemeye bağlı olarak iş parçasında, borür tabakası kalınlığının %30'u mertebesinde bir boyut artışı olur. İşlem öncesi parça boyutlarının dizaynında bu artış göz önünde bulundurulmalıdır.

Yüksek yüzey basınçlarıyla karşılaşacak parçalarda, borlama sonrasında borür tabakasının kalitesini ve aşınma direncini bozmaksızın ilave ısıl işlemler uygulanabilir. Parçaların merkez sertliklerini artırmak için, borlanmış iş parçaları sertleştirilip temperlenirler. Uygun işlem yapıldığında 120-150  $\mu$  m'ye kadar kalınlıktaki borür tabakalarının temperlenmesi, tabakada çatlak oluşumuna yol açmaz. Ostenitleme sıcaklığı 1149°C'in üzerinde olmamalıdır. Borlanan parçaların ısıl işlemlerinde aşağıdaki noktalara dikkat edilmelidir.

a. İş parçaları nötr atmosferde, tercihen koruyucu gaz, vakum veya nötr tuz banyolarında ostenitlenmeli ve temperlenmelidir.

b. Su vermede, sıcak yağ yeterlidir. Bununla birlikte, malzemenin sertleşebilme kabiliyetine göre, havada su verme veya sıcak tuz banyolarında su verme, yüzey gerilmelerini minimize eder (Fichtl, 1981; Matuschka, 1980).

Borür tabakasının gevrekliği ve bunun sonucu olarak da servis özellikleri, borür tabakasındaki kalıntı gerilmelerin dağılımıyla doğrudan etkilenir. Bu dağılım bitişik fazların ısı genleşme katsayıları arasındaki farka bağlı olduğu kadar, tabaka ile matriks malzemenin özgül hacimleri arasındaki farka da bağlıdır. Dolayısıyla, borür tabakasının özellikleri, tabaka ile matriks malzemenin özgül hacimleri arasındaki farkın azaltılmasıyla geliştirilebilir. Bu fark, borlama sonrası uygun ısı işlemlerin yapılmasıyla azaltılır. Çizelge 7.1.'de borlama sonrası uygulanan ısı işlemlerle, matriks malzeme özgül hacimindeki değişim görülmektedir.

Çizelge 7.1. % 0.45 C'lu çelikte, borlama sonrası uygulanan ısı işlemlerle matriks malzeme özgül hacminin değişimi (Liliental and Tacikowski, 1980).

Borlama sonrası ısı işlemler	Özgül hacim (cm <sup>3</sup> /g)	
	Matriks	Fe <sub>2</sub> B
Yok	0.1276	
Normalizasyon, 900°C/1 h	0.1278	
Normalizasyon+Su verme+Temperleme, 200°C	0.1289	0.1367
Normalizasyon+Su verme+Temperleme, 450°C	0.1286	
Normalizasyon+Su verme+Temperleme, 650°C	0.1280	

Liliental and Tacikowski (1980), % 0.45 C'lu çelikte yaptıkları çalışmada, borlama sonrasında normalizasyon+su verme+200°C'da temperleme işleminin uygulandığı numunelerde kalıntı gerilmelerin ve matriks malzeme ile Fe<sub>2</sub>B tabakası özgül hacimleri arasındaki farkın en düşük seviyede olduğunu görmüşlerdir. Bunun sonucu olarak da; borür tabakasında gevrekliğin en düşük, aşınma direncinin de en yüksek değerde olduğunu tesbit etmişlerdir.

## 7.2. Termal Çevrimli Isıl İşlemlerle Borlama

Termal çevrimli ısıl işlem, birtakım özellikleri kazandırmak amacıyla iş parçasının belirli sıcaklıklar arasında ısıtılıp-soğutulması işleminin birçok kez tekrarlanmasıdır. Termal çevrim malzemeye, sıcaklık farkına, sıcaklığın değişim hızına ve çevrim sayısına bağlı olarak malzemenin mikroyapı ve özelliklerini etkiler (Shiryaev et al., 1987). Bu konuda yapılan çalışmalar bir kaç grupta toplanabilir:

a. Ötektoit altı ve üstü çeliklerde sementiti küreleştirmek, ince bir mikroyapıya ulaşmak ve malzemede süperplastik özellik elde etmek için yapılan termal çevrimli ısıl işlemler (Chen-Chio et al., 1986; Fel'dman et al., 1985; Kayalı et al., 1979; Gaponov et al., 1987).

b. Ostenit tane boyutunu küçültmek ve uniform bir yapı elde ederek fiziksel kimyasal ve mekanik özellikleri iyileştirmek için yapılan termal çevrimli ısıl işlemler (Krishtal et al., 1986; Konopleva et al., 1986, 1987; Manukyan and Manukyan, 1984; Anashkin et al., 1988).

c. Difüzyon işlemlerinde difüzyonu hızlandırmak, uniform bir tabaka elde etmek ve tane yapısını inceltmek amacıyla yapılan termal çevrimli ısıl işlemler (Prokhorov et al., 1984; Krishtal and Kenis, 1985; Bashnin et al., 1984).

Slyusarev et al., (1983), santrifüj döküm gri dökme demir numuneleri 900°C'a ısıtma ve bu sıcaklıkta 10 dakika bekletme sonrasında 600°C'a soğutmadan oluşan termal çevrimli bir ısıl işlemde, 21 çevrim sonunda grafitleri küreleştirdiklerini bildirmişlerdir. Kawamura et al. (1985) ötektoit altı çeliklerde, tane yapısını inceltmek ve sementit parçacıklarını küreleştirmek amacıyla, numuneleri 900°C'da 30 dakika ostenitledikten sonra yağda sertleştirmişlerdir. Daha sonra 675°C'a hızlı ısıtma ve oda sıcaklığına basınçlı suyla soğutmadan oluşan bir termal çevrimli ısıl işlem uygulamışlardır. İşlemde, 6 çevrim sonunda ferrit ve sementitler incelmış, malzeme 710°C'da süperplastik özellik

göstermiştir. Keza, Kayalı et al. (1979), % 1.6C içeren çelikte yaptıkları termal çevrimli ısıtma işlem sonunda, mikro yapının çok incelmesini ve 650°C'da kopma uzamasının %300 olduğunu tespit etmişlerdir. Parusov et al. (1985)'da karbon ve alaşımlı çeliklerde, (550-720)°C ve Ms+(20-30)°C'lık iki banyoda benzer bir termal çevrim uygulayarak granüler perlit yapısı elde etmişlerdir. Ostenitin granüler perlite dönüşümü için karbon çeliğinde 1 çevrim yeterli olurken, alaşımlı çelikte 6-8 çevrim gerekli olmaktadır. Dyachenko and Milaslavskaye'ye (1983) göre, yüksek karbonlu çeliklerde, standart ısıtma işlemleri karbürleri küreleştirmek için 6-11 saatlik bir süre gerekli olurken, termal çevrimin uygulanmasıyla 20-30 dakikalık süre yeterli olmaktadır. Ac<sub>1</sub>+(20)°C'a ısıtma ve bu sıcaklıkta 1.5 veya 10 dakika beklemenin ardından fırında veya havada Ar<sub>1</sub>-(20-30)°C'a soğutmadan oluşan termal çevrimli bir işlemde, 2-5 çevrimden sonra üniform ve küçük taneli bir yapı elde edilirken, süneklik de artmıştır.

Frantsuzova et al. (1984), % 0.2 C'lu çeliklerde yaptıkları çalışmalarında, termal çevrimli ısıtma işleminin bu çeliklerin mekanik özelliklerine ve yapısına etkisini araştırmışlardır. İşlemde üst sıcaklık 880°C olup, numunelere 3-4°C/dakikalık ısıtma ve soğutma hızıyla, 3 saat süreli termal çevrim uygulandıktan sonra suda veya yağda sertleştirilip, 180°C'da 2 saat süreyle temperlenmişlerdir. İşlem sonucunda, ostenit tane boyutunda belirgin bir azalma ve aynı zamanda üniform bir yapı elde edilmiştir. Çeliklerin darbe dirençleri 2 kat artmış, ostenit tane boyutu 40-80 µm'den 4-16 µm'ye azalmış, karışık tane boyutu yokolmuş ve ostenit ayrışmasına karşı direnç azalmıştır.

Bashin et al. (1985), %0.22C'lu çelikte yaptıkları termal çevrimli ısıtma işlem sonucunda, ostenit tane boyutunun 5-7 çevrimde ASTM 11-12'ye düştüğünü bildirmişlerdir. Ac<sub>3</sub>+(5-30)°C'a dakikada 100°C'lık ısıtma hızı ve buradan, havada Ar<sub>1</sub>-(50-100)°C'a soğutma ve Ac<sub>3</sub>+(5-30)°C'a 5°C/dakikalık ısıtma hızı ve Ar<sub>1</sub>-(5-10)°C'a 17°C/dak'lık soğutmadan oluşan bir termal çevrim uygulamışlardır.

Çizelge 7.2.'de bu çalışmada elde edilen mekanik özellikler gösterilmiştir. Termal çevrimin tamamlanmasından sonra numunelerin bir kısmı yağda bir kısmı da suda su verilmiştir. Sonuçlar Çizelge 7.3.'de gösterilmiştir. Sonuç olarak  $A_{c_3}$ 'ün  $5-10^\circ\text{C}$  üzerine  $5^\circ\text{C}/\text{dak}$ 'lık hızla ısıtma ve  $A_{r_1}$ 'in  $5-10^\circ\text{C}$  altına  $17^\circ\text{C}/\text{dak}$  soğutmayla, 3-5 çevrimde çeliğin tane boyutu ASTM 11'e incelmıştır. Son soğutmanın havada yapılması durumunda darbe tokluğu, normalizasyon sonucu ve hızlı ısıtmanın yapıldığı termal çevrimle elde edilenin 1.5-2.5 katı daha fazladır. Yavaş ısıtma ve soğutma ile yapılan termal çevrimli ısıtma işlemi elde edilen ince ostenit taneli yapıda, faz deformasyon sertleşmesi olmaz. Bu işlem sonucunda çevrimin üst sıcaklığından suda veya yağda soğutmada darbe tokluğu, hızlı ısıtmanın yapıldığı termal çevrimli ısıtma işlemine göre 3 kat daha yüksektir. Keza, mukavemet ve süneklik değerleri de, hızlı ısıtmaya göre daha yüksektir..

Çizelge 7.2. % 0.22C'lu çelikte normalizasyon ve termal çevrimli ısıtma işlemlerinde (5 çevrim) elde edilen mekanik özellikler (Bashnin et al., 1985).

Isıl İşlem	ASTM	$\sigma_u$	$\sigma_{0.2}$	$\epsilon$	$r$	Darbe direnci $\text{MJ}/\text{m}^2$
	Tane No	MPa		%		
Normalizasyon, $880^\circ\text{C}$	6	500	320	26	65	1.1
Termal Çevrim, $100^\circ\text{C}/\text{dak}$ hız, $A_{c_1}+(30-50)^\circ\text{C}$ ve $A_{r_1}-(50-100)^\circ\text{C}$ 'a havada soğuma	11	500	320	25	68	1.8
Termal Çevrim, $100^\circ\text{C}/\text{dak}$ hız, $A_{c_3}+(5-10)^\circ\text{C}$ ve $A_{r_1}-(50-100)^\circ\text{C}$ 'a havada soğuma	11	560	400	25	72	1.8
Termal Çevrim, $5^\circ\text{C}/\text{dak}$ hız, $A_{c_3}+(5-30)^\circ\text{C}$ ve $A_{r_1}-(5-10)^\circ\text{C}$ 'a $17^\circ\text{C}/\text{dak}$ hızla soğuma	11	560	400	35	80	2.7

Krishtal and Kenis (1985), termal çevrimli ısıtma işleminin difüzyonu hızlandırması konusunu tartışmalı olmasına rağmen, tane sınırı uzunluğunun boşluk konsantrasyonu ve taneler içindeki dislokasyon yoğunluğunun artması ve gerilim gradyanının oluşması şartıyla difüzyon hızının artması konusunda herkesin aynı fikre sahip olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Çizelge 7.3. %0.22C'lu çelikte su verme ve termal çevrim sonunda su verme sonucu elde edilen mekanik özellikler. Çizelgedeki ilk değerler suda su vermeyle ikinci değerler yağda su vermeyle elde edilmiştir (Bashnin et al., 1985).

Isıl İşlem	ASTM Tane No	$\sigma_u$	$\sigma_{0.2}$	$\epsilon$	$r$	Darbe direnci MJ/m <sup>2</sup>
		MPa		%		
Su verme, 880°C	6	1250/ 900	900/ 750	4.5/ 10	23/ 45	0.44/ 0.48
Termal Çevrim, 100°C/dak hız, Ac <sub>1</sub> +(30-50)°C ve Ar <sub>1</sub> -(50-100)°C' a havada soğuma	11	-/1080	-/920	-/12	-/41	-/0.28
Termal Çevrim, 100°C/dak hız, Ac <sub>3</sub> +(5-10)°C ve Ar <sub>1</sub> -(50-100)°C' a havada soğuma	11	1300/ 1200	1100/ 1050	10/ 10	41/ 46	0.49/ 0.48
Termal Çevrim, 5°C/dak hız, Ac <sub>3</sub> +(5-30)°C ve Ar <sub>1</sub> -(5-10)°C' a 17°C/dak hızla soğuma	11	1500/ 1400	1370/ 1250	12/ 14	56.5 /58	1.08/ 1.2

Pratikte termal çevrimle difüzyonun hızlandırılması; ya difüzyon işleminden önce bir ön işlem olarak veya işlem öncesinde ve işlem sırasında termal çevrimin uygulanmasıyla sağlanmaktadır. Çelik, genellikle Ac<sub>1</sub> sıcaklığının 30-50°C üzerine ısıtılır ve Ar<sub>1</sub> sıcaklığının 50-100°C altına soğutulur. Çevrim sayısı 50'den 100'e kadar değişir. Sonuçta, malzemede taneler küçülür ve difüzyon tabakası kalınlığı artar. Katı ortamda karbürizasyonda 15 saat süreli sabit sıcaklıktaki işleme göre, 880-750°C arasında 5 termal çevrimli bir işlemde, esas metalin tane boyutu ASTM 5-6, difüzyon tabakasında 8-10 olmuş ve difüzyon tabakası kalınlığı 1.5 kat artmıştır. Yorulma dayanımının da arttığı bildirilmiştir. Krishtal and Kenis'in (1985) belirttiğine göre bir başka çalışmada, ön işlem olarak A<sub>1</sub> sıcaklığının 30-50°C üstüne ve altına ısıtıp-soğutma şeklinde 3-4 çevrimde ince taneli bir yapı elde ettikten sonra, difüzyon sırasında Ac<sub>1</sub>'in 80-100°C üzerine ısıtıp, Ar<sub>1</sub>'in 30-50°C altına soğutma şeklinde farklı bir termal çevrim uygulanması durumunda, klasik yöntemlere göre, 60 dakikalık karbürizasyon sonunda difüzyon katsayısının 2.5-3 kat arttığını ve tabakanın sertlik, darbe tokluğu ve aşınma direnci gibi özelliklerinin geliştiğini iddia etmişlerdir.

Simochkin (1986) yaptığı çalışmada, nitrürleme işlemi öncesinde malzemeye termal çevrim uygulanmasının, normalizasyon sonrası nitrürlemeye göre daha kalın bir tabakanın elde edilmesine, süneklik ve darbe tokluğu özelliklerinin iyileşmesine sebep olduğu sonucuna varmıştır.

Bondar'a (1977) göre, borlamada termal çevrimin kullanılması durumunda; klasik borlamayla karşılaştırıldığında, karbon çeliğinin darbe direnci 1.5-2.3 kat artar (Frantsuzova et al., 1984). Rufanov et al. (1983), elektrolitik borlamada termal çevrimin borür tabakasının yapı ve özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, boraks banyosunda 2 kA/m<sup>2</sup> akım yoğunluğuyla 950°C'da 3 saat süreyle elektrolitik borlama işlemi yapmışlardır. Aynı banyoda akım olmaksızın numuneleri banyodan alıp ostenit stabilitesinin en düşük olduğu sıcaklığa kadar havada soğutup, dönüşümün tamamlanmasından sonra numuneleri tekrar banyoya daldırmışlardır. Bu şekilde 950°C'da 55 dak bekleme sonrası havada 650°C'a soğumadan oluşan toplam 3 saatlik 3 termal çevrim uygulanmıştır. Ayrıca, 3. çevrimde akımı kapatarak da termal çevrim uygulanmıştır. Termal çevrimli borlama işleminde tabaka kalınlığı %3-27 arasında artmıştır. Tabakanın kalitesi iyileşmiş ve kırılıp-dökülme eğilimi azalmıştır.

## 8. BORLAMANIN TEKNOLOJİK ÖNEMİ VE UYGULAMALARI

Malzemelerin çalışma ömürlerini artırmak için dünyada geniş araştırmalar yapılmaktadır. Federal Almanya'da yayınlanan bir rapora göre, bu ülkede 1975 yılında, sadece aşınma dolayısıyla meydana gelen kayıpların ekonomik değerinin 10 milyon Alman markından daha fazla olduğu bildirilmiştir (Fichtl, 1981).

Borlama ile iş parçalarının ömürleri önemli derecede artırılabilir. Daha kalın ve matriks malzemeyle 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 v.b.



yöntemlerle üretilen parçalar toz metal tekniğiyle üretilenlerle değiştirilebilir. Amerikan Takım Mühendisleri Derneği verilerine göre, yılda ekonomik değeri 10 milyar doları geçen, 15 milyon ton metal imalat esnasında talaş olarak atılmaktadır (Linial and Lavella, 1973).

İngiltere'de yapılan bir çalışmada, çelikten imal edilmiş mermi şeklindeki parçalara çeşitli yüzey işlemleri uygulanmıştır. Hazırlanan numunelerle, kumlu toprakta 50 m uzunlukta 4 yol boyunca aşınma deneyleri yapılmıştır. Sonuçta, ağırlık kaybına göre aşınma hızları belirlenmiş ve orta karbonlu, düşük alaşımlı bir çelik numune referans alınarak aşınma direnci ve maliyete göre, uygulanan yüzey işlemleri karşılaştırılmıştır. Düşük alaşımlı bir çelikte borlama işlemi, maliyet açısından en uygun seçenek olarak ortaya çıkmıştır (Bidulph, 1977).

Borlama işlemi gaz nitrürasyonu v.b. işlemlere göre daha ekonomiktir. Birçok faktöre bağlı olması nedeniyle borlama maliyetini tesbit etmek ve bunu genellemek güçtür. İş parçasının ağırlığı, yüzey alanı ve işlem görececek parça sayısı bu faktörlerin en önemlileridir. İşlemin yapıldığı fırının tipi, kullanım alanı boyutları ve gerekli enerji maliyetleri de önemli rol oynar.

Son yıllarda, birçok endüstriyel alanda borlanmış parçalarla iyi sonuçlar alınmıştır. Kunst and Schaaber'e (1967) göre borlama, ilk kez Rusya'da matkaplarda kullanılmıştır (Matuschka, 1980). Çamur pompalarının yatak burçları ve bazı parçaları borlandığında indüksiyonla yüzey sertleştirme, nitrürleme veya krom kaplamayla karşılaştırıldığında çalışma ömürleri 4 kat artar. Borlama, özellikle plastik endüstrisinde şiddetli abrazyon aşınmanın olduğu ekstruder ve enjeksiyon preslerinde ve seramik endüstrisinde pres kalıplarında başarıyla kullanılmaktadır.

Kahve öğütmede kullanılan aşındırıcı diskler borlamanın diğer bir uygulama alanıdır. Daha önceleri bu diskler, yüksek miktardaki aşınmayı engellemek için yüksek alaşımlı çeliklerden imal edilmekteydi. Bu diskler C 45 malzemedan imal

edilip borlandığında, hem maliyetleri azalmakta ve hem de çalışma ömrü 5 kat artmaktadır. Dövme kalıplarında, döküm endüstrisinde basınçlı döküm makinalarının basınç odalarında borlama uygulanmaktadır. Keza, St 37 malzemedan yapılmış döküm potaları borlandığında, orijinal durumlarına göre ömür 4-6 kat artar. Seramik pota yapımında kullanılan ve 90 MnCrV8 çeliğinden imal edilen pres kalıpları borlandığında ömürleri 3 kat artar. Tekstil makinaları parçalarında da borlama başarıyla kullanılmaktadır.

Batı Almanya'da büyük çapta borlamanın ilk uygulama alanı, içten yanmalı motor parçalarıdır. Dizel Volkswaen ve Audi otomobillerin yağ pompası dişlilerinde (Matuschka, 1980) ve Stirling motoru pistonlarında borlamanın başarıyla kullanıldığı belirtilmiştir (Lang, 1983).

Besleme suyu ayar valfleri erozyona karşı çalışan elemanlardır ve 200 saatten sonra değiştirilmeleri gerekir. Bu valflere, borla yüzey sertleştirme uygulandığında ömürleri 18000 saate çıkmaktadır (Fichtl and Mutuschka, 1987). Sinter karbür tel çekme kalıpları, korozyon ve adhezyonla aşınırlar. Kalıp ömrü malzeme cinsine bağlıdır. Borlamayla bu kalıpların ömrü 10 kat artar. Tarım makinalarında da aşınma büyük bir problemdir. Bu tür yerlerde borlama, ekonomik açıdan büyük üstünlüğe sahiptir.

Hemen hemen bütün kalıp çeşitlerinde (dövme, haddeme, basma, kesme tel ve boru çekme v.b.), kamlarda, çekme mandrellerinde, plastik kalıplarında, maden takımlarında, endüstriyel bıçaklarda, bazı kesme takımlarında, kızaklarda, yataklarda, alüminyum ekstrüzyon kalıplamada v.b. yerlerde borlama uygulanmaktadır (Linial and Lavella, 1973, 1974).

## 9. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR

Sıvı ortam borlamasında kullanılan banyoların temel bileşeni olan boraksın ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), ülkemiz şartlarında maliyetinin düşük olması ve temininin kolaylığı dolayısıyla, bu çalışmada sıvı ortamda borlama yöntemi seçilmiştir. Uygun banyo bileşimini belirlemek için, ilk çalışmalarda boraks (% 50-70), ferro-silis (% 10-25), sodyum klörür ( $\text{NaCl}$ ) ve sodyum sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) (% 10-25) oranlarında olacak şekilde sıvı ortamda borlama deneyleri yapılmıştır. Bu bileşim sınırları arasında kalan bütün deneylerde, metalografik inceleme sonuçlarına göre tek fazlı borür tabakası ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) gözlenmiştir. Boraks + ferro - silis sistemine aynı oranda  $\text{NaCl}$  veya  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  katılmasının banyo akışkanlığına ve aktivitesine önemli bir etki yapmadığı belirlenmiştir. Daha sonraki deneyler, boraks, ferro silis ve sodyum sülfattan oluşan banyolarda yapılmıştır. Banyo aktivitesi ve akışkanlığına göre, en uygun banyo bileşimi; % 65  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + % 20 Fe-Si + % 15  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  olarak belirlenmiştir (ağırlık olarak).

Daha sonraki bütün deneyler, bu bileşimdeki banyolarda yapılmıştır. Çeşitli özelliklere göre karşılaştırma yapmak amacıyla; hem sabit sıcaklıkta borlama (klasik yöntem), ve hem de termal çevrimli borlama işlemleri yapılmıştır. Elde edilen numunelerle, daha sonra metalografik, mikrosertlik ve aşınma deneyleri yapılarak; en iyi kalitede borür tabakası, geçiş zonu ve matriks özelliklerini sağlayan, termal çevrimli ısıl işlem şartları belirlenmiştir.

### 9.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Yapılan tüm borlama deneylerinde, Çizelge 9.1'de kimyasal bileşimi verilen Ç 1045 çeliğinden numuneler kullanılmıştır. Numunenin kimyasal bileşimi, T.Ş.F.A.Ş. Eskişehir Makina Fabrikasında spektral analiz cihazıyla belirlenmiştir.

Yapılan bütün deneylerde 10 mm çap ve 6 mm yükseklikte silindirik numuneler kullanılmıştır. İşlem öncesinde, Ç 1045 çeliğinden 20 mm çaplı çubuklar,  $860^\circ\text{C}$ 'da 40 dakika süreyle

normalize edildikten sonra, tornada istenilen boyutlara işlenmiştir. Borlama öncesinde numuneler 800 meshlik zımparayla zımparalanmıştır.

Çizelge 9.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan Ç 1045 numunelerin kimyasal bileşimi (% Ağırlık olarak).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Sn	Fe
0.445	0.263	0.946	0.021	0.034	0.105	0.018	0.115	0.0073	0.151	0.026	97.87

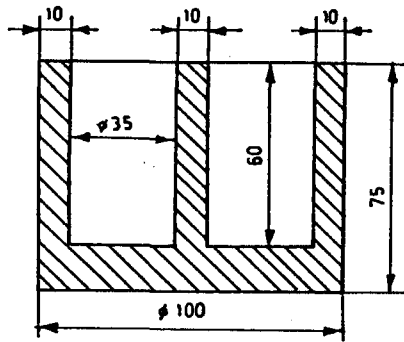
Borlama banyosunda kullanılan malzemeler boraks, ferro-silis ve sodyum sülfattır. Boraks, Eskişehir-Kırka boraks işletmesinden temin edilen ticari saflıktaki sulu boraksın ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ),  $300^\circ\text{C}$  sıcaklıkta bir saat bekletmeden sonra,  $600^\circ\text{C}$ 'da 3 saat süreyle tutularak kristal suyunun uçurulmasıyla elde edilmiştir. Ticari saflıkta olan ferro-silisin, silis oranı %60'dır. 100 mesh elek altı boyuta öğütülerek kullanılmıştır. Deneylerde banyonun akışkanlığını artırmak amacıyla Afyon-Daskırı yöresi Acıgöl'den çıkarılan sodyum sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) kullanılmıştır.

## 9.2. Deneylerin Yapılışı

### 9.2.1. Bor yayınımlı deneylerinin yapılışı

Bor yayınımlı deneyleri,  $1250^\circ\text{C}$  sıcaklık kapasiteli,  $2^\circ\text{C}$  hassasiyetli elektrik direnç tipi kül fırınında yapılmıştır. Termal çevrimli ısıtma işlemlerinde, sabit (lineer) ısıtma ve soğutma hızları elde etmek için, fırına bir mikro işlemci monte edilmiştir. İstenilen soğutma hızlarına ulaşabilmek için fırına ayrıca bir fan ilave edilmiştir. Herbir deney öncesinde, istenilen termal çevrim parametreleri mikro işlemcide programlanarak borlama deneyleri yapılmıştır.

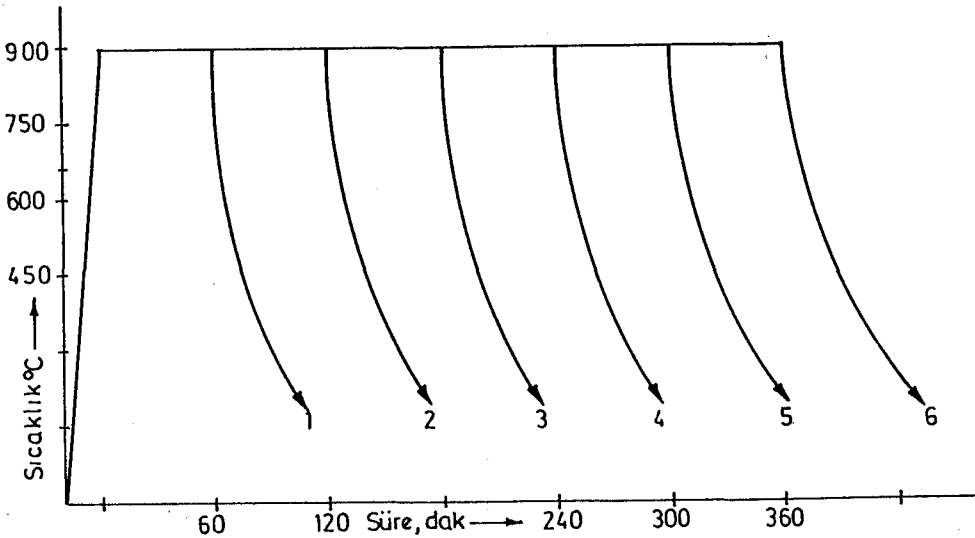
Deneylerde, ark ocağı elektrod artıklarından imal edilen çift gözlü grafit potalar kullanılmıştır. Kullanılan potaların şekil ve boyutları Şekil 9.1'de gösterilmiştir. Her deney yeni (kullanılmamış) banyo malzemesi ile yapılmıştır.



Sekil 9.1. Deneylerde kullanılan grafit potaların şekil ve boyutları.

Borlama banyosu bileşenlerinin toplam miktarı, numunelerin birim yüzeyleri başına,  $10 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$  olacak şekilde ayarlanmıştır. Banyo bileşenleri ayrı ayrı tartılıp karıştırıldıktan sonra, pota içerisine doldurulmuş ve önceden çalışma sıcaklığına ısıtılmış olan fırına potalar yerleştirilmiştir. Pota içindeki malzemenin fırın sıcaklığına ulaşması ve erimesi için 15 dakika bekletilip banyo tekrar karıştırılmış ve numuneler sıvı banyoya daldırılmıştır. İstenilen programa göre işlemin tamamlanmasından sonra, bütün numuneler havada soğumaya bırakılmıştır.

Borlama deneylerinde uygulanan ısıtılma programları, şekil 9.2-9.7'de ve ısıtılma işlem parametreleri de, Çizelge 9.2-9.6'da gösterilmiştir.



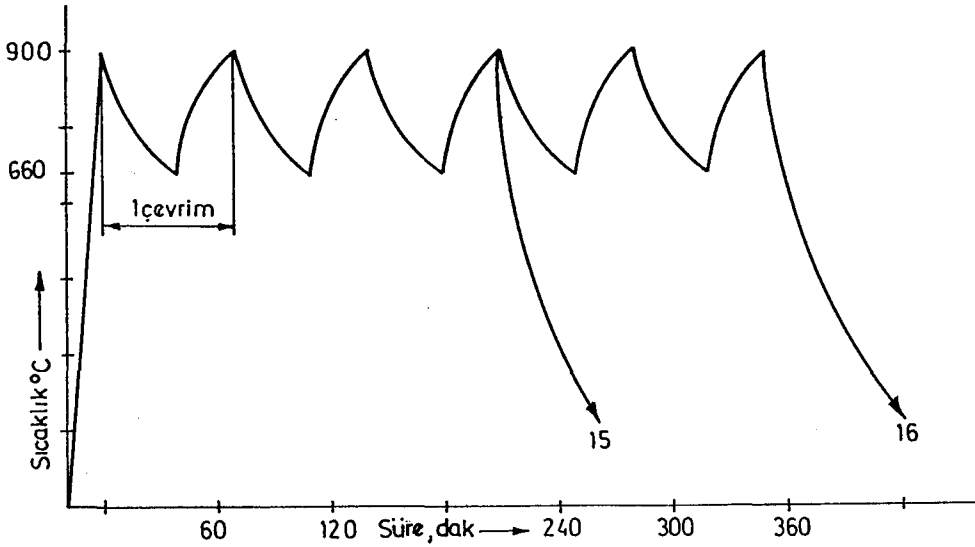
Şekil 9.2.  $900^\circ\text{C}$  sabit sıcaklıkta farklı sürelerle yapılan (klasik) borlama deneylerinin ısıtılma programı.

Çizelge 9.2. 900°C sabit sıcaklıkta yapılan (klasik) borlama deneyleri.

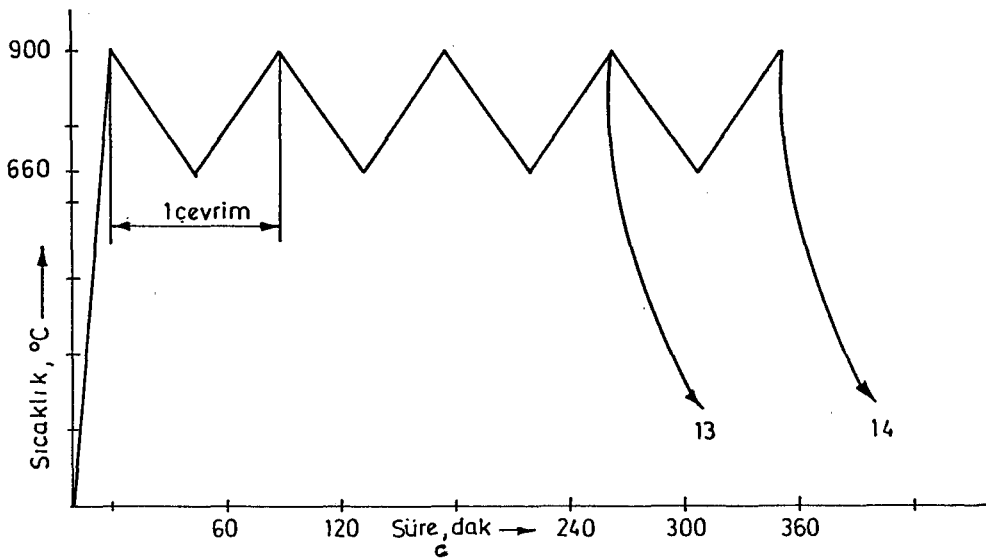
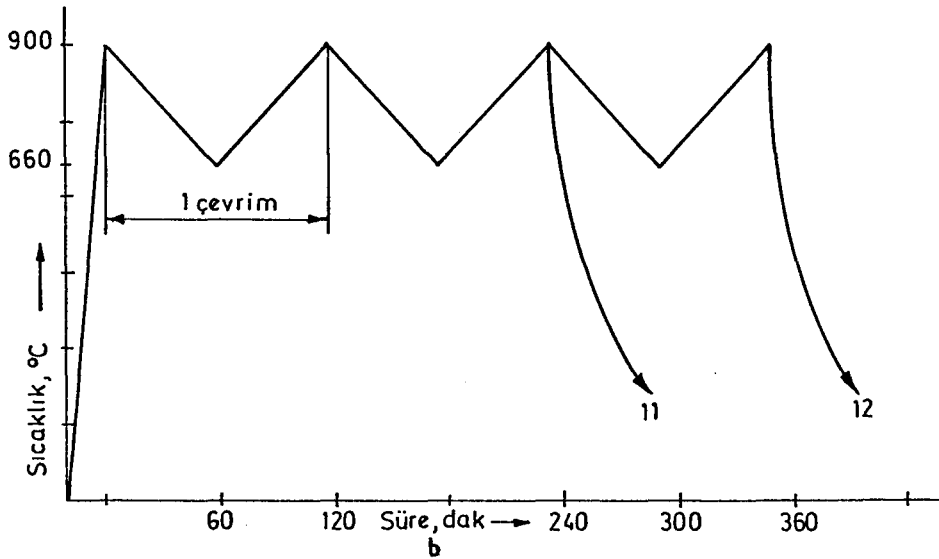
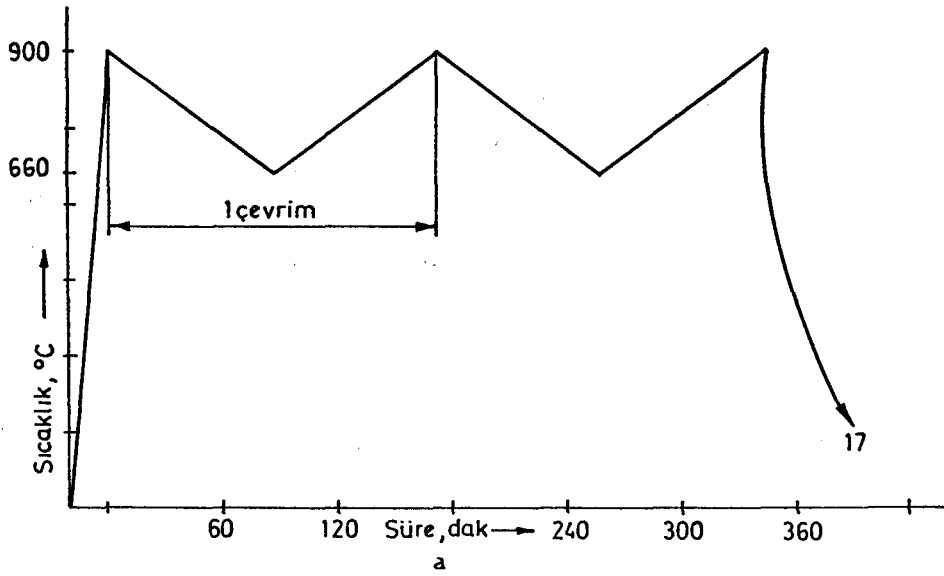
Numune No	İşlemsüresi, (dak)
1	60
2	120
3	180
4	240
5	300
6	360

Çizelge 9.3. 900-660°C sıcaklıklar arasında farklı soğutma/ısıtma hızlarıyla yapılan termal çevrimli borlama deneyleri işlem parametreleri.

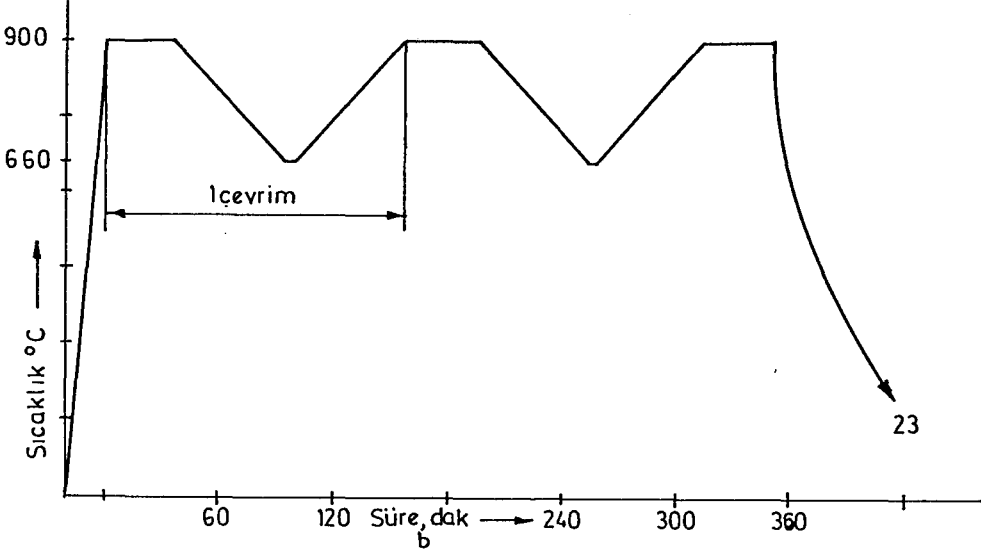
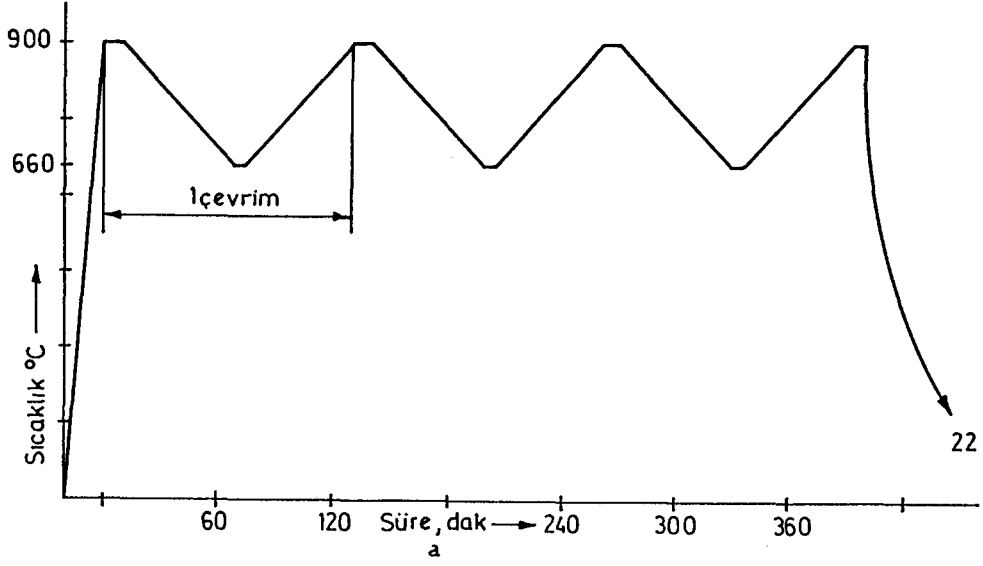
Numune No	İşlemsüresi, (dak)	Çevrim Sayısı	Isıtma/soğutma hızı (°C/dak)	Isıtma ve soğutma şekli
17	348	2	2.8	program kontrollu
11	232	2	4.1	program kontrollu
12	348	3	4.1	program kontrollu
13	265	3	5.6	program kontrollu
14	351	4	5.6	program kontrollu
15	216	3	8.2/6.0	program kontrolsüz
16	348	5	8.2/6.0	program kontrolsüz



Şekil 9.3. 900-660°C sıcaklıklar arasında program kontrolsüz, ortalama 8.6 °C/dak ısıtma ve 6.0°C/dak soğutma hızıyla yapılan termal çevrimli borlama deneyi ısıl işlem programı.



Şekil 9.4. 900-660°C sıcaklıklar arasında program kontrollü soğutma/ısıtma hızıyla yapılan termal çevrimli borlama deneyleri ısıl işlem programı, a) 2.8 °C/dak, b) 4.1 °C/dak, c) 5.6 °C/dak hız

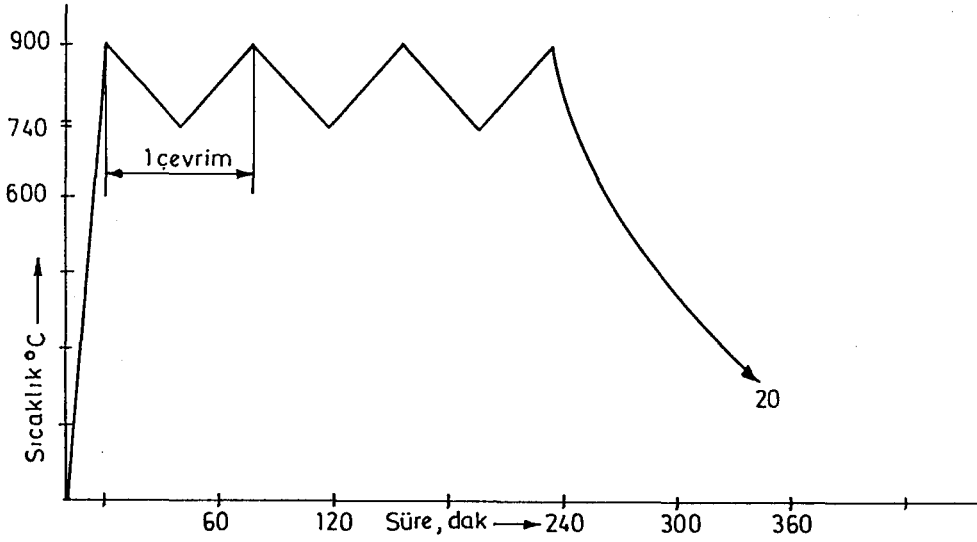


Şekil 9.5. 900-660°C sıcaklıklar arasında 4.1 °C/dak soğutma/ısıtma hızıyla ve 660°C'da 3 dak, 900°C'da; a) 10 dak., b) 37 dak. beklemeli termal çevrimli borlama deneyleri ısıl işlem programı.

Çizelge 9.4. 900-660°C sıcaklıklar arasında, 4.1°C/dak soğutma/ısıtma hızı ve alt ve üst sıcaklıklarda beklemeli termal çevrimli borlama deneyleri işlem parametreleri.

Numune No	İşlemsüresi, (dak)	Çevrim Sayısı	Bekleme süresi		Isıtma ve soğutma şekli
			660°C'da	900°C'da	
22	400	3	3	10	Program kontrollu
23	348	2	3	37	Program kontrollu





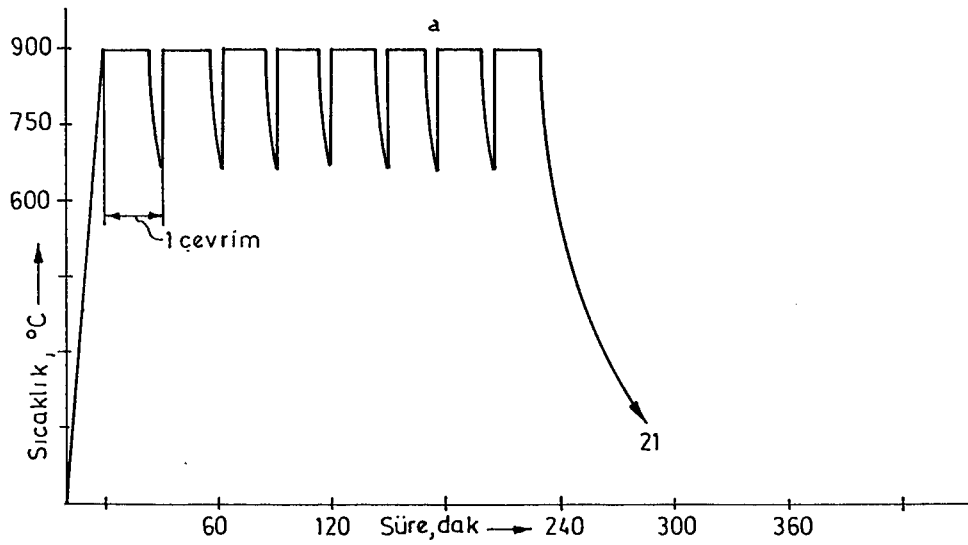
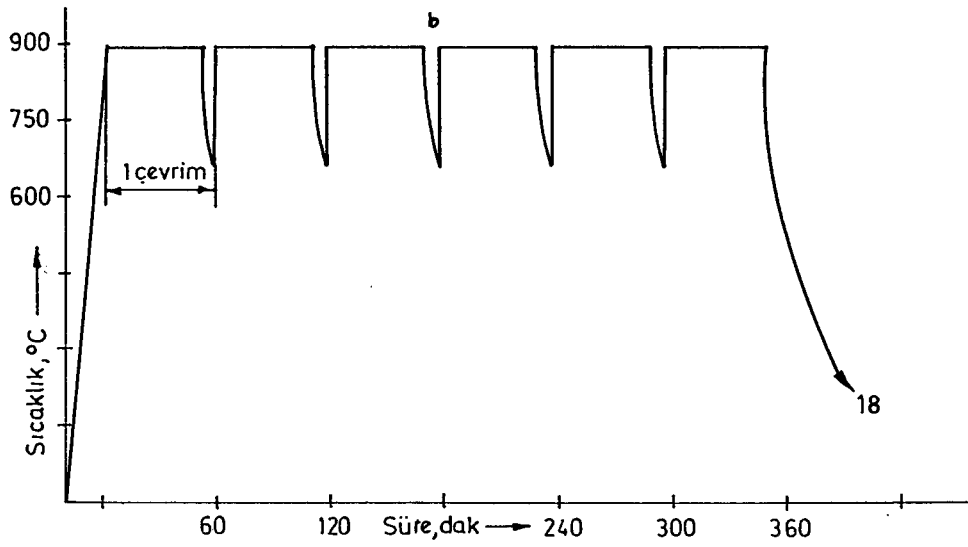
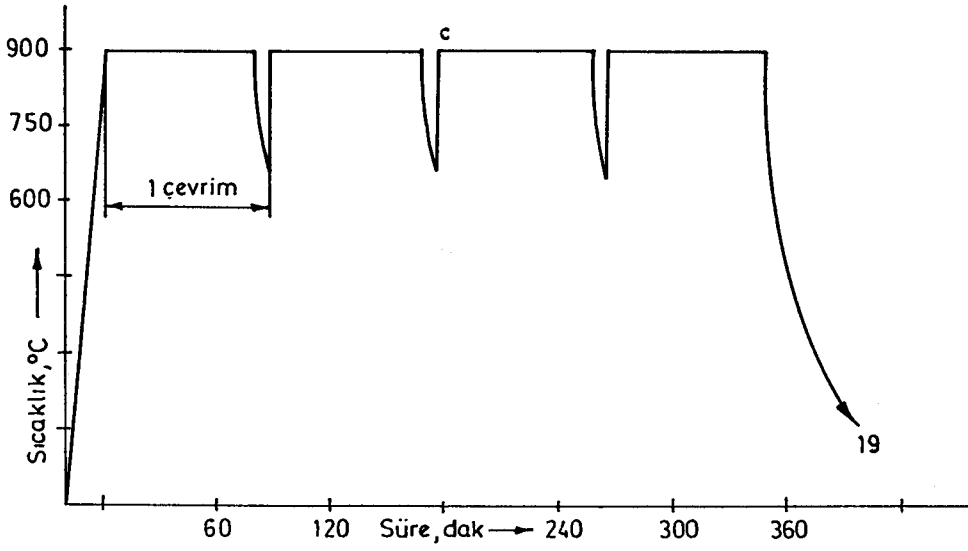
Şekil 9.6. 900-740°C sıcaklıklar arasında 4.1 °C/dak soğutma/ısıtma hızıyla yapılan, program kontrollü termal çevrimli borlama deneyi ısıl işlem programı.

Çizelge 9.5. 900-740°C sıcaklıklar arasında, 4.1°C/dak soğutma/ısıtma hızıyla yapılan termal çevrimli borlama deneyi işlem parametreleri.

Numune No	İşlem süresi, (dak)	Çevrim sayısı	Isıtma/soğutma hızı (°C/dak)	Isıtma ve soğutma şekli
20	234	3	4.1	program kontrollü

Çizelge 9.6. 900°C sıcaklıkta farklı sürelerle bekleme sonrası havada 5 dakika süreyle soğutmalı, termal çevrimli borlama deneylerinin işlem parametreleri.

Numune No	İşlem süresi, (dak)	Çevrim Sayısı	900°C'da bekleme süresi (dak)
21	235	8	25
18	348	6	54
19	348	4	83



Şekil 9.7. 900°C sıcaklıkta farklı sürelerle bekleme sonrası, havada 5 dakika süreyle soğutmaları, termal çevrimli borlama deneyleri ısıl işlem programı, a) 25 dak. bekleme, b) 54 dak. bekleme, c) 83 dak. bekleme.

### 9.2.2. Mikroyapı ve sertlik ile ilgili deneylerin yapılışı

Bor yayınımla yüzeyleri sertleştirilen numuneler, kesme cihazında dikey ekseni boyunca kesildikten sonra zımparalanıp, elmas pasta ile parlatılmıştır. Daha sonra, % 4'lük pikral ile dağlanarak Olympus PMG3 marka metalurjik araştırma mikroskobunda incelenen numunelerin mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. Fotoğraflar 100 ve 200 büyütme değerinde çekilmiştir. Borür tabakası ve geçiş zonu kalınlıkları, cihaza monte edilen optik mikrometre yardımıyla belirlenmiştir.

Borür tabakasının faz yapısı mikroskabi, mikrosertlik ve x-ışınları analizleriyle belirlenmiştir. x-ışınları deneyleri O.D.T.Ü. Metalurji Mühendisliği Bölümü x-ışınları laboratuvarında yapılmıştır.

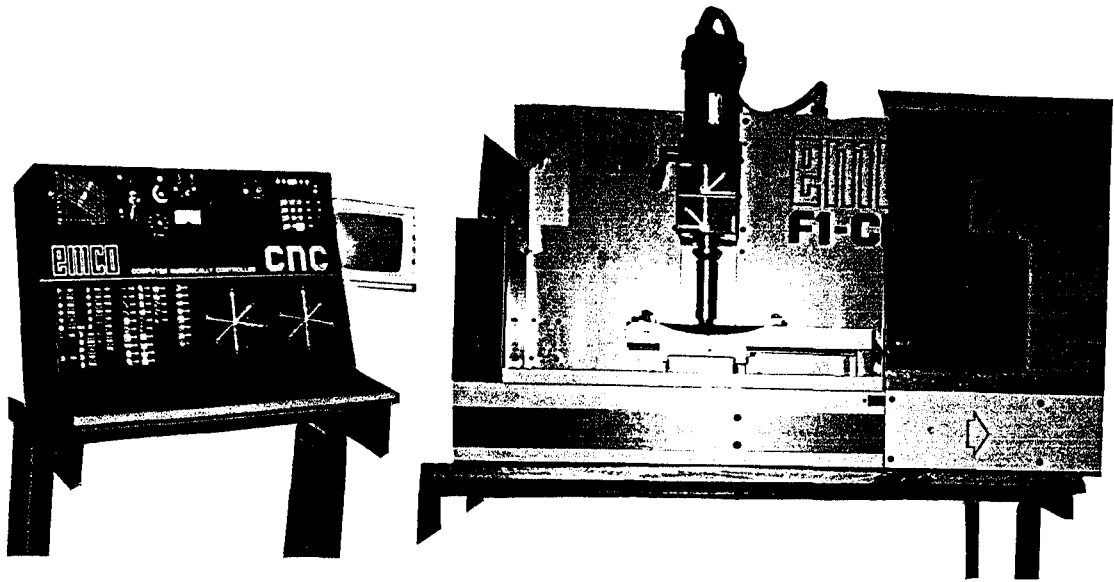
Sertlik ölçümleri, Shimadzu HVM 2000 marka mikrosertlik cihazında, Vickers ucuyla ve 50-1000 g'lık yükler 20 sn süreyle uygulanarak yapılmıştır. Tabaka sertlikleri 100 gr'lık yük ile, geçiş zonu ve matriks malzeme sertlikleri de 2000 g'lık yük ile ölçülmüştür. Sertlik değerleri borür iğnelere dik yönde ölçülüp, cihazdan istatistiksel sonuçlar olarak alınmıştır.

Tabakanın gevrekliğini ısıl işlem şartlarına göre karşılaştırmak için, numunelerin dış yüzeylerinde, borür iğnelere yönünde 50-1000 gr arasında artan yükler ile izler oluşturulmuştur. Daha sonra izlerin çevresinde mikro çatlakların oluşup, oluşmadığı gözlenmiştir. Oluşan mikro çatlak boyutları ölçülerek, numuneler gevrekliklerine göre karşılaştırılmıştır.

### 9.2.3. Aşınma deneylerinin yapılışı

Aşınma deneyleri, EMCO marka, bilgisayar nümerik kontrollü freze tezgahında (CNC), aşındırıcı olarak 800 mesh'lik SiC zımpara kağıtları kullanılarak, borlama işlemlerinde uygulanan ısıl işlem programlarına göre numunelerin aşınma özelliklerini karşılaştırmak amacıyla yapılmıştır. Deneyler, CNC cihazının mandreline adaptör bir parça monte edilerek yapılmıştır. Aşınma deneyi öncesinde bütün numuneler kalıba

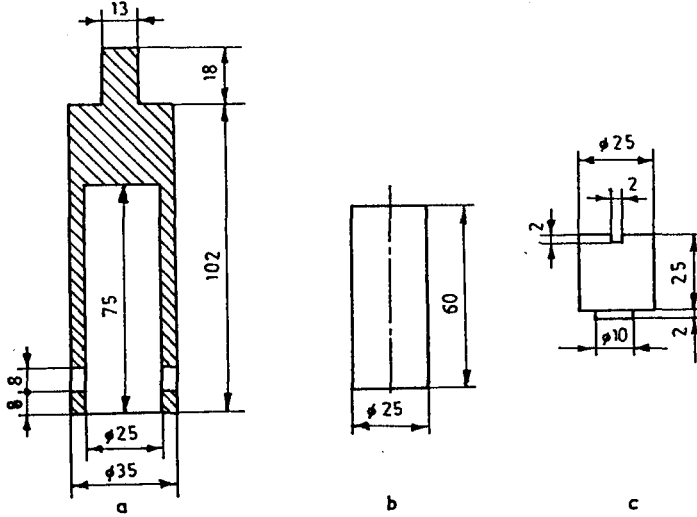
alınmış ve aşınma deneyleri esnasında kalıp malzemesinin (bakalit) aşınmasını önlemek için numunelerin aşınma yüzeyinden 2 mm derinlikte, bakalit malzeme kesilerek kaldırılmıştır. Deneylerde yapıldığı aşınma setinin fotoğrafı Şekil 9.8.'de gösterilmiştir. Tüm aşınma deneylerinde 220 gr'lık sabit bir ağırlık kullanılmıştır.



Şekil 9.8. Aşınma deneylerinin yapıldığı aşınma setinin fotoğrafı.

Deneylerde adaptör parçanın uç kısmına yerleştirilen numune 1000 d/d hızla dönerken, cihazın alt tablasına yerleştirilen zımpara kağıdı da 40 mm/dak hız ile doğrusal olarak hareket ettirilmiştir. Numunelerin de adaptör ve mandrel ile birlikte dönmesini sağlamak için numunelerin arka kısımlarına birer yuva açılmış ve adaptör parçaya bir pim yardımıyla sabitlenmiştir. 2.5 dakikalık periyotlarla numunelerdeki aşınma kayıpları, hem ağırlık kaybı olarak ve hem de numune boyundaki kısalma olarak belirlenmiştir. Ağırlık kaybı ölçümleri 0.1 mg hassasiyetle bir tartı cihazıyla, boydaki kısaltmalar da 0.01 mm hassasiyetli bir mikrometre ile ölçülmüştür. Her bir numune için yeni zımpara kağıdı kullanılmış ve zımpara kağıtları 2.5 dakikalık periyotlarla

yenileriyle değiştirilmiştir. Toplam aşınma süresi 45 dakikadır. Aşınma deneylerinde kullanılan adaptör parça, ağırlık parçası ve numuneler Şekil 9.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 9.9. Aşınma deneylerinde CNC cihaza monte edilen a) adaptör parça, b) ağırlık parçası, c) kalıplanmış ve aşınma deneyi için hazırlanmış numuneler.

### 9.3. Deney Sonuçları

#### 9.3.1. Termal çevrimli borlamanın, borür tabakası ve geçiş zonu kalınlığı ve mikroyapısına etkisi

Borür tabakası kalınlığı, genellikle metalografik yöntemlerle ölçüldüğü gibi, zaman zaman mikrosertlik veya eddy akımlarıyla da belirlenmektedir. Smol'nikov and Sarmanova (1987) da termoelektromotif kuvvet ölçümü yöntemiyle borür tabakası kalınlığının hassas bir şekilde belirlenebileceğini belirtmişlerdir. Borür tabakası kalınlığının süre ile ilişkisinin parabolik ve sıcaklık ile ilişkisinin ise üssel olduğu ifade edilmiştir (Grishin and Sentyurev, 1975; Smirnov et al., 1972).

Kaidash et al., 'a (1972) göre, borür tabakası kalınlığı ile süre arasındaki ilişki,

$$d^2 = Dt \quad (1)$$

şeklinde olup, difüzyon katsayısı aşağıdaki formülden hesaplanır.

$$D = D_0 \cdot e^{\frac{Q}{RT}} \quad (2)$$

$$D_0 = c \cdot \frac{q \cdot \delta^2}{Nh} \quad (3)$$

Burada;

d: borür tabakası kalınlığı, cm

D: difüzyon katsayısı, cm<sup>2</sup>/sn

t: süre, sn

D<sub>0</sub>: frekans faktörü, cm<sup>2</sup>/sn

Q: aktivasyon enerjisi, kal/mol.K<sup>-1</sup>

R: gaz sabiti, 1.987 kal/mol.K<sup>-1</sup>

T: sıcaklık, K

C: sabit,

δ: borlanan malzemenin kafes parametresi

N: Avogadro sayısı,

h: Planck sabiti,

Geçiş zonu kalınlığı, süre arasındaki ilişki;

$$d = kt^n \quad (4)$$

formülüyle hesaplanabilir. Burada;

d: geçiş zonu kalınlığı, cm

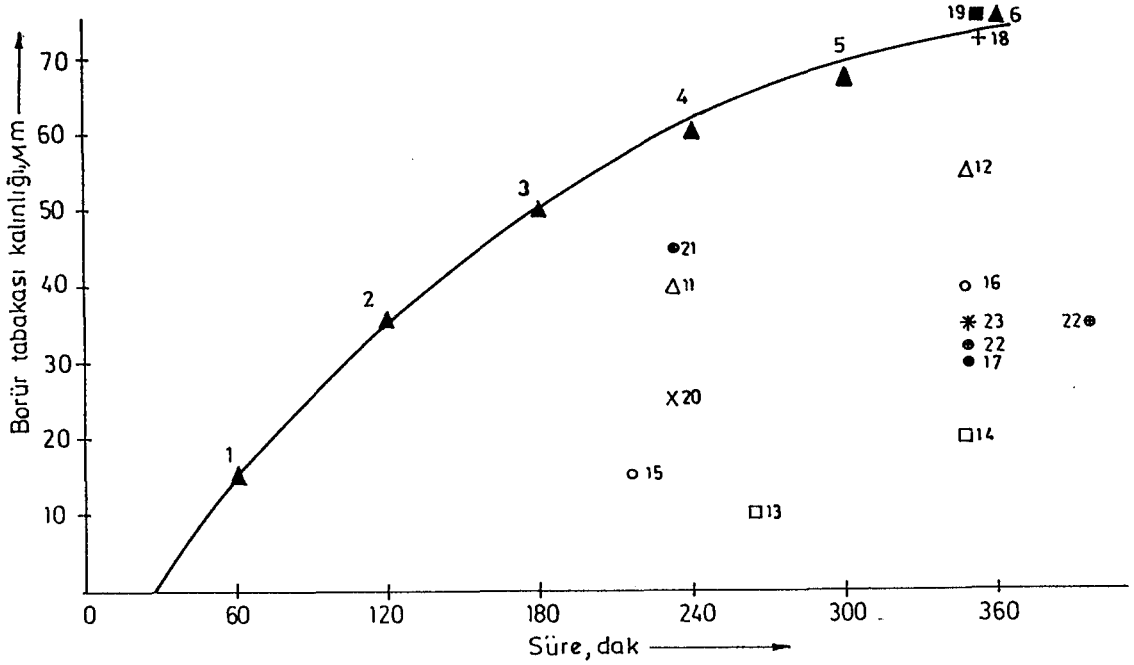
k, n: sabit

t: süre, sn

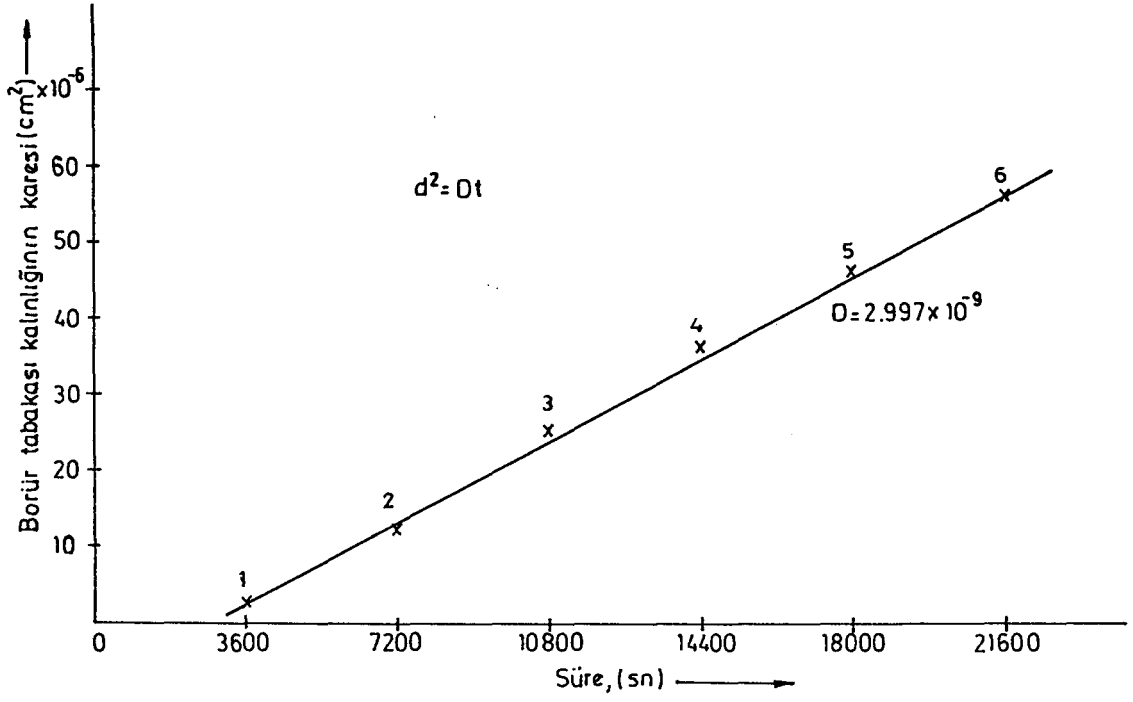
Borür tabakası kalınlığı ve geçiş zonu kalınlığı-süre ilişkileri aşağıda Şekil 9.10-9.13'de gösterilmiştir. Çizelge 9.7.'de sabit sıcaklıkta borlama ve termal çevrimli borlama şartlarında, elde edilen borür tabakası ve geçiş zonu kalınlıkları gösterilmiştir. Şekil 9.14'de sabit sıcaklıkta ve termal çevrimi borlama şartlarında; geçiş zonu kalınlığının borür tabakası kalınlığına oranının, borür tabakası kalınlığı ile değişimi çizilmiştir.

Çizelge 9.7. Ç 1045 çeliğinde, deneylerde elde edilen borür tabakası ve geçiş zonu kalınlıkları.

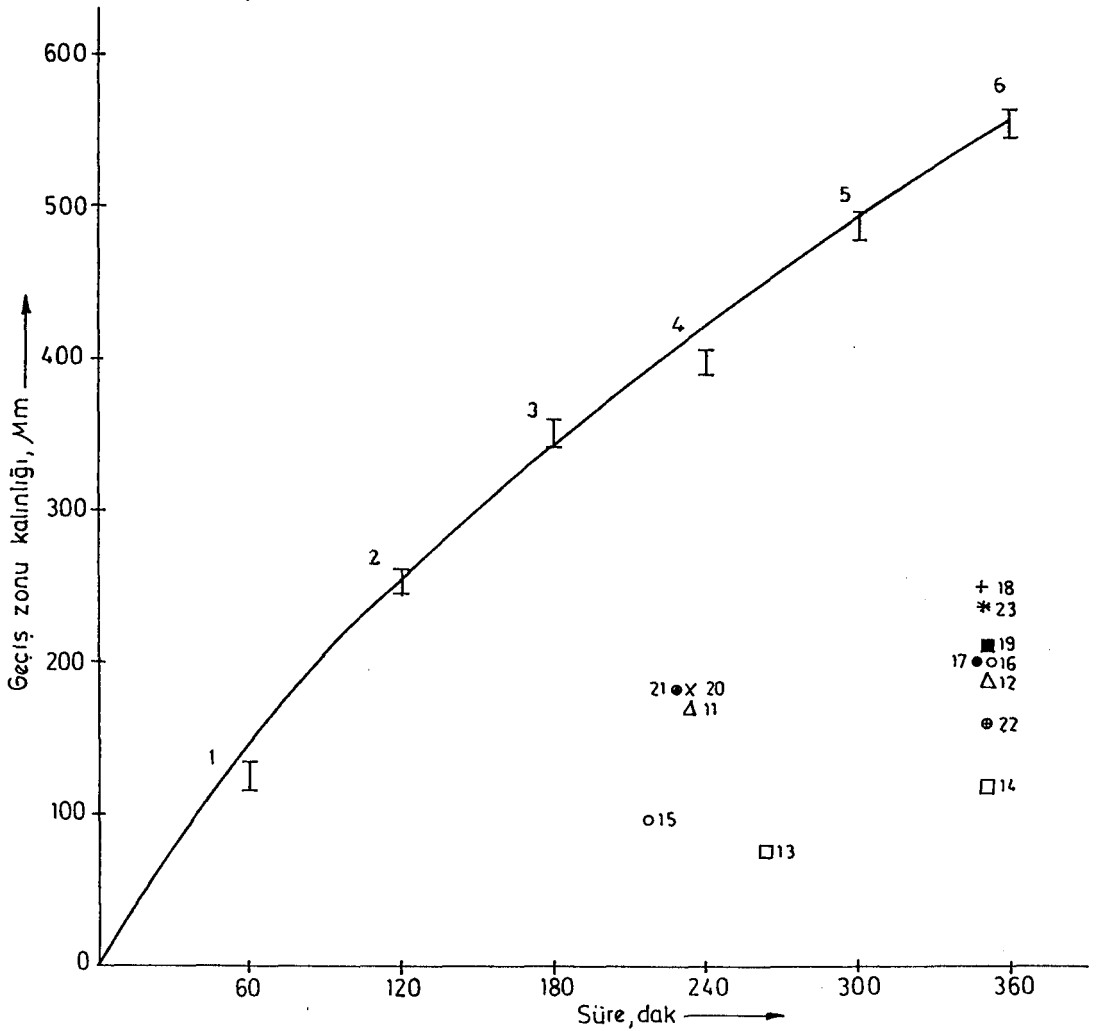
Numune No	Uygulanan ısıll işlem türü	Bürür tabakası kalınlığı, $\mu\text{m}$	Geçiş zonu kalınlığı, $\mu\text{m}$
1	klasik borlama	15	125
2		35	250
3		50	350
4		60	400
5		68	490
6		75	555
11	Termal çevrimli borlama	40	180
12		55	200
13		10	80
14		20	120
15		15	100
16		40	180
17		30	200
18		75	350
19		80	380
20		25	180
21		50	180
22		35	160
23	45	220	



Şekil 9.10. Ç 1045 çeliğinde deneylerde elde edilen borür tabakalarının süre ile ilişkisi.

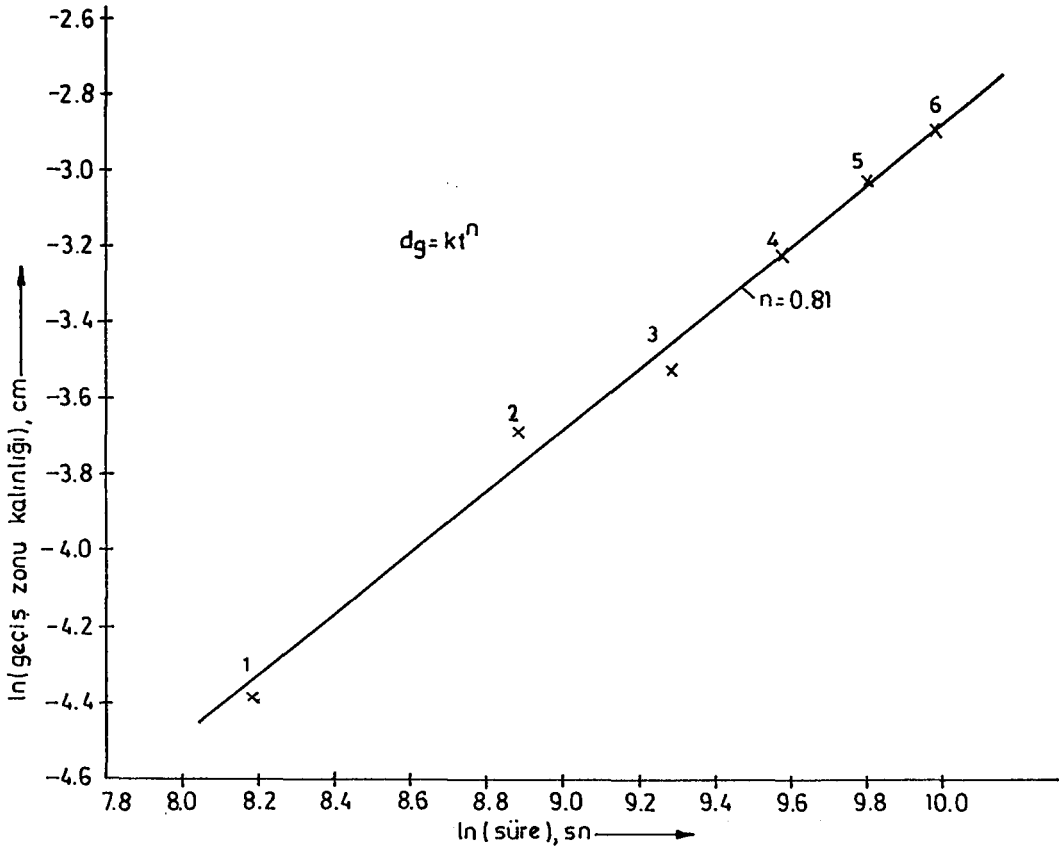


Şekil 9.11. Ç 1045 çeliğinde borür tabakası kalınlığı karesinin süre ile ilişkisi.

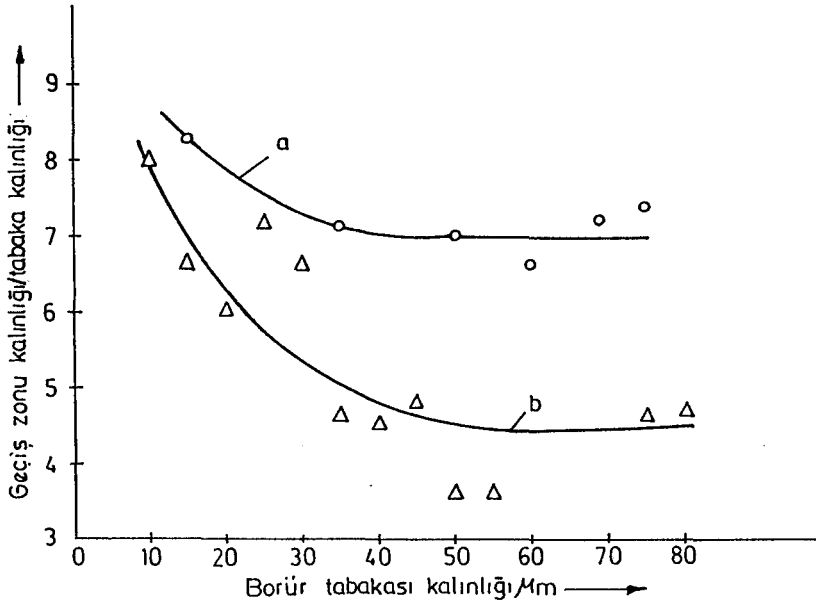


Şekil 9.12. Deneylerde elde edilen, geçiş zonu kalınlığı süre ilişkisi



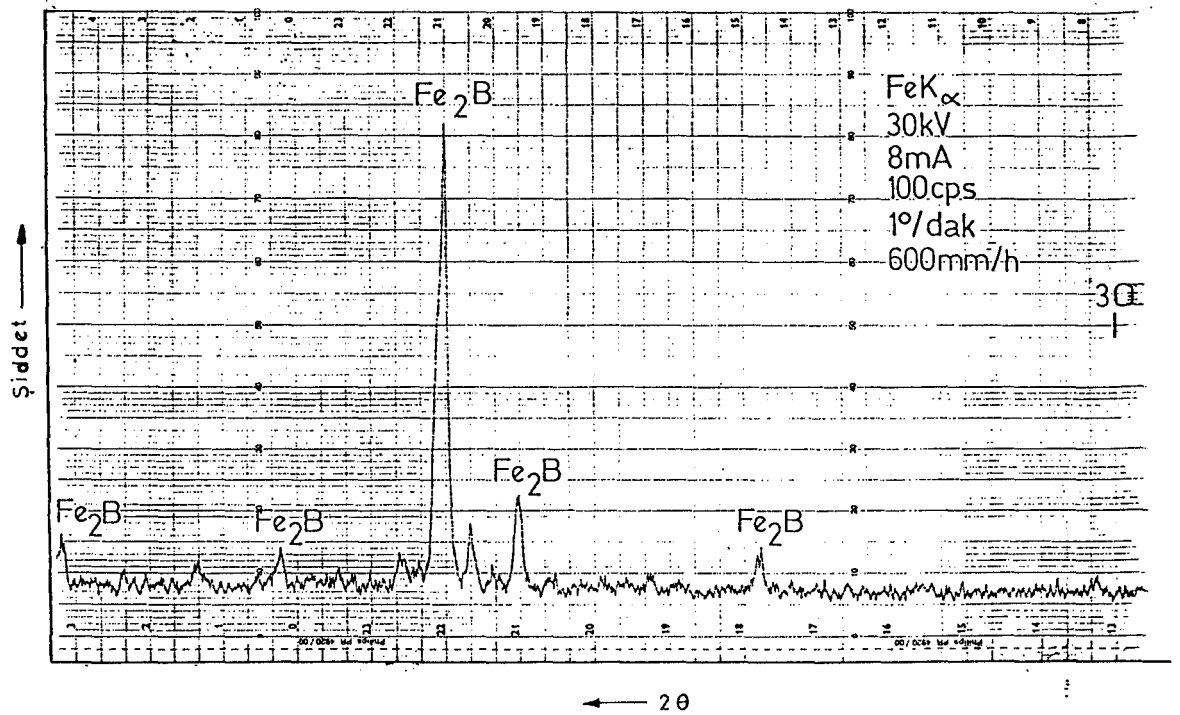


Şekil 9.13. Ç 1045 çeliğinde, logaritmik eksen takımında geçiş zonu kalınlığı - süre ilişkisi.

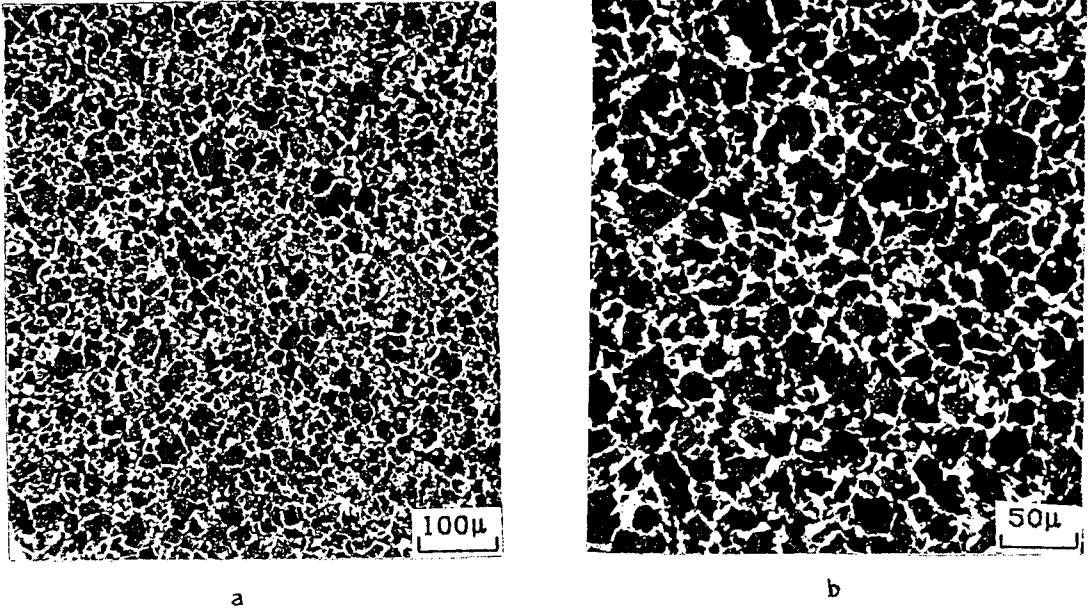


Şekil 9.14. 900°C sabit sıcaklıkta ve termal çevrimli borlama şartlarında; geçiş zonu kalınlığının borür tabakası kalınlığına oranının, borür tabakası kalınlığı ile değişimi, a) Sabit sıcaklıkta borlama, b) Termal çevrimli borlama.

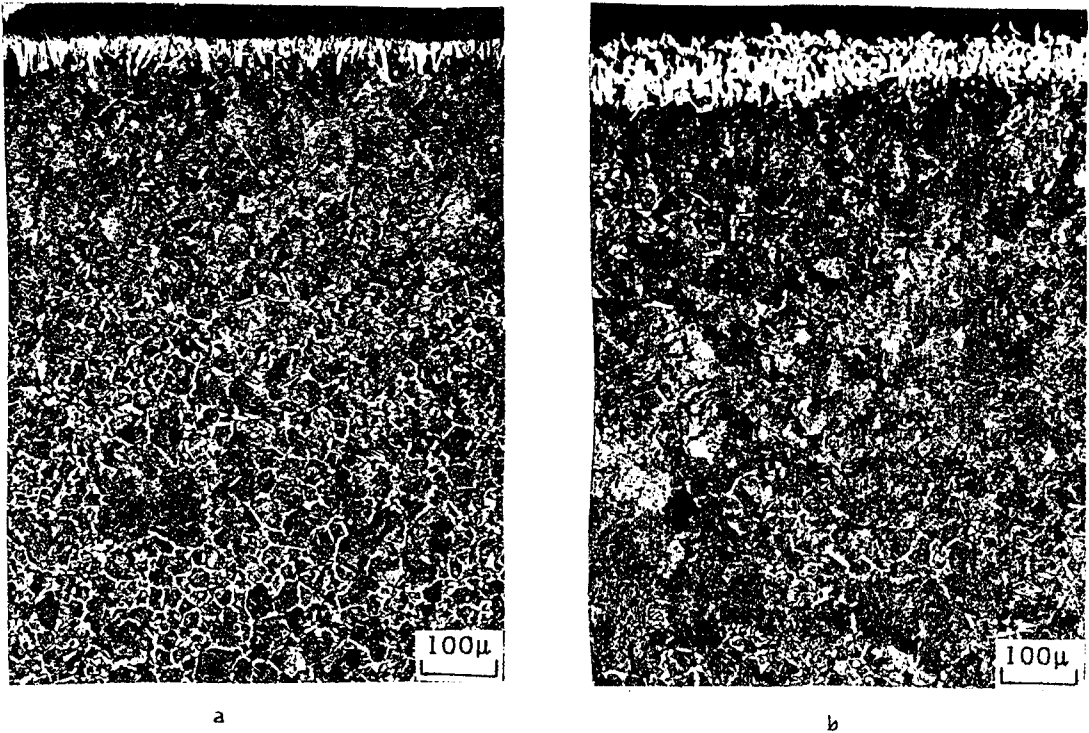
Borlama deneyleri, daha önce de belirtildiği gibi, hem sabit sıcaklıkta ve hem de termal çevrimli işlem şartlarında yapılmıştır. Termal çevrim şartlarında özellikle mikroyapıda taneler küçülürken, daha üniform bir tane yapısına da ulaşılmaktadır. Sekil 9.15'de x-ışınları analizi sonucu elde edilen grafik, Sekil 9.16'da deneylerde kullanılan numunelerin borlama öncesi mikro yapısı ve Sekil 9.17-9.20'de borlama yapılan numunelerin borür tabakası, geçiş zonu ve matriks mikroyapıları gösterilmiştir. Sekil 9.21-9.26'da ise klasik borlama ve termal çevrimli borlamada geçiş zonu ve matriks mikroyapısında tane büyüklükleri karşılaştırma amacıyla verilmiştir.



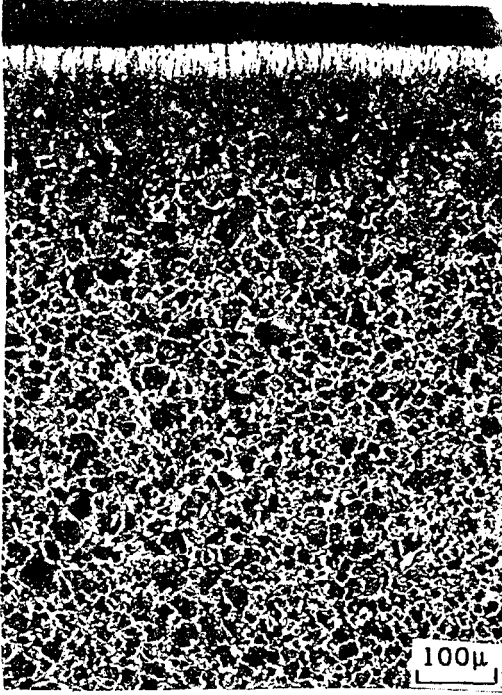
Şekil 9.15. 900-660°C sıcaklıklar arasında 5.6°C/dak soğutma/ısıtma hızı program kontrollü termal çevrim şartlarında 265 dak süreyle borlanmış numunenin x-ışınları grafiği.



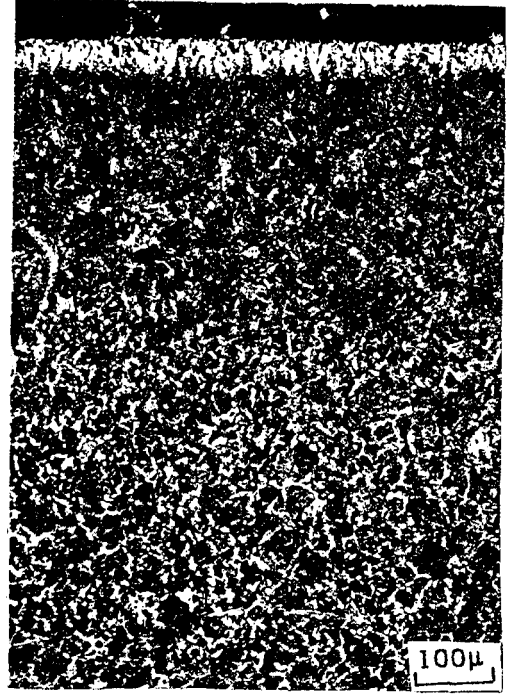
Şekil 9.16. Borlama deneylerinde kullanılan C1045 çeliğinin numunelerin normalizasyon sonrası orjinal mikro yapısı, a) 100 büyütme, b) 200 büyütme.



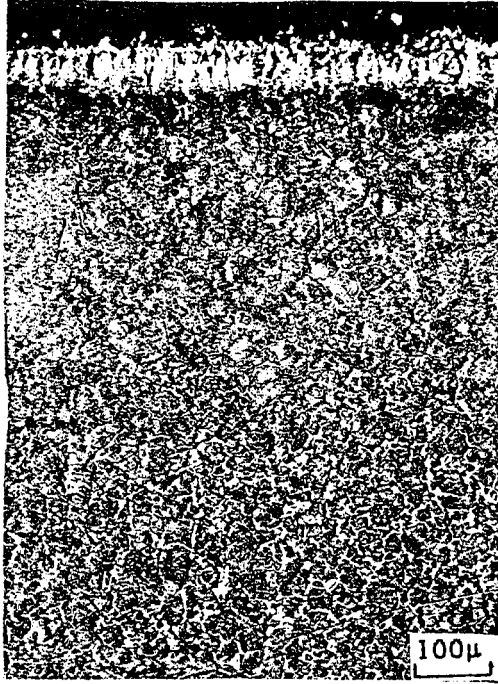
Şekil 9.17. 900°C sabit sıcaklıkta borlanan numunelerin mikro yapısı, a) 240 dak süreli, b) 360 dak süreli.



a

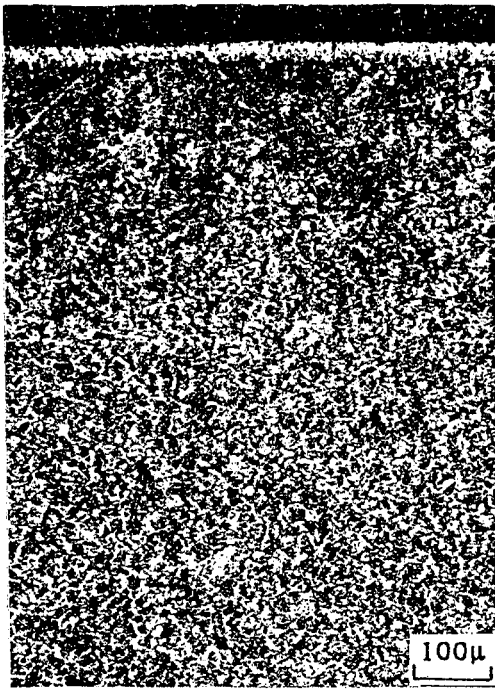


b

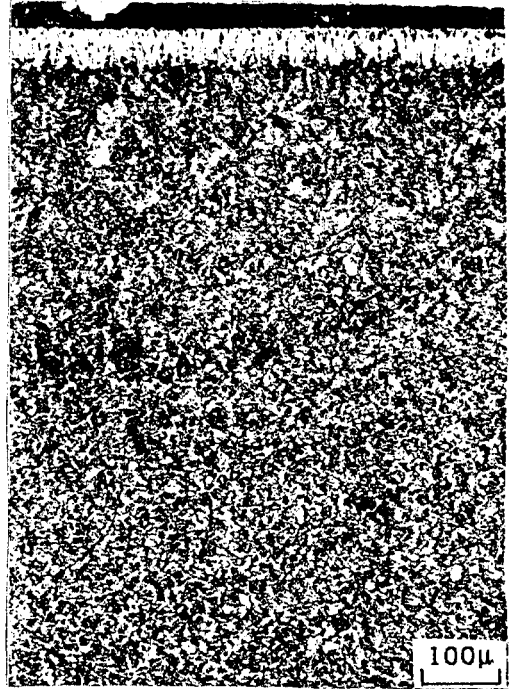


c

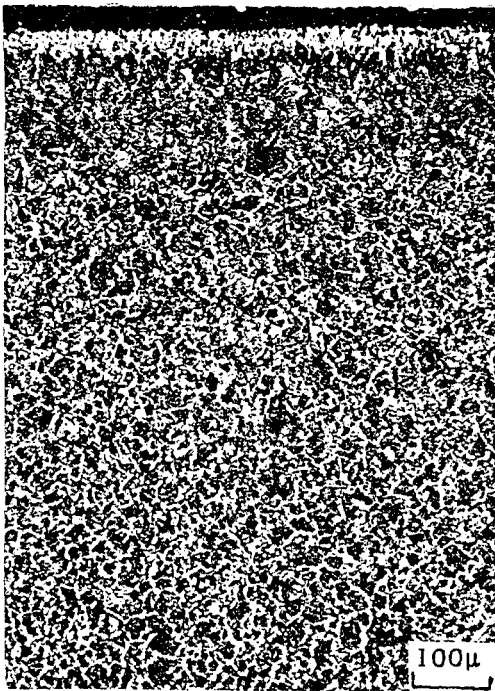
Şekil 9.18. 900°C sıcaklıkta farklı sürelerle bekleme sonrası, havada 5 dak süreyle soğutmalı, termal çevrimli borlama uygulanan numunelerin mikro yapıları, a) 25 dak bekleme, b) 54 dak bekleme, c) 83 dak bekleme.



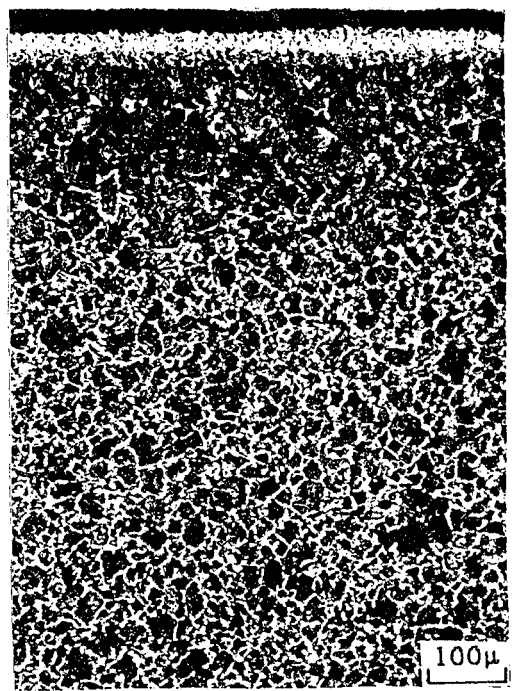
a



b

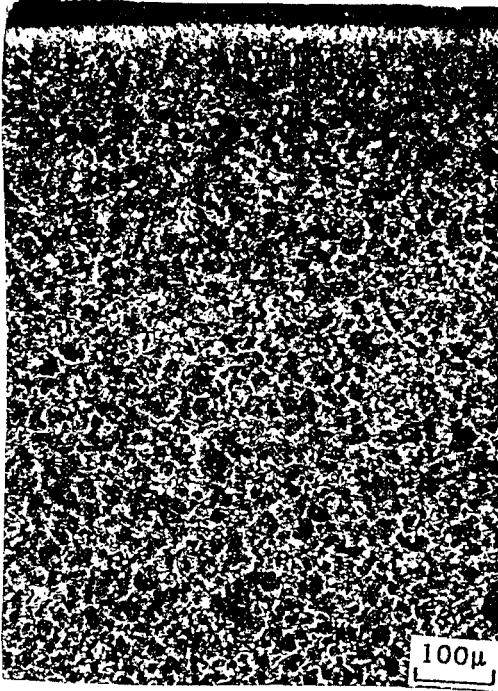


c

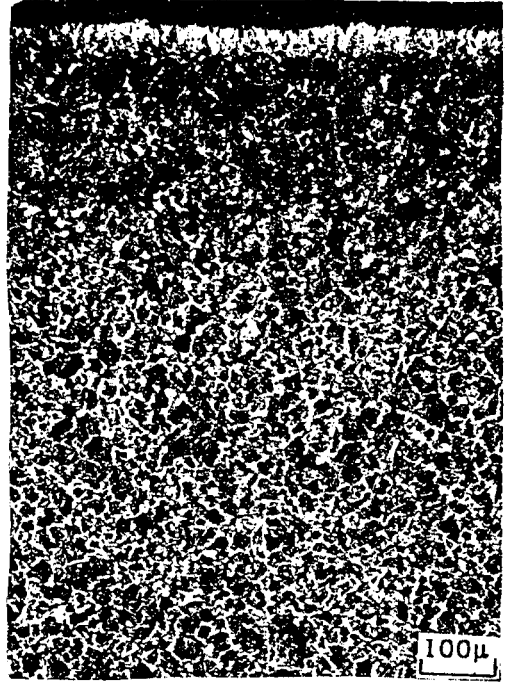


d

Şekil 9.19. 900-660°C sıcaklıklar arasında program kontrollü termal çevrimle borlanan numunelerin mikro yapıları, a) 2.8°C/dak hız, b) 4.1°C/dak, c) 5.6°C/dak hız, d) 6.0/8.2°C/dak soğutma/ısıtma hızı.

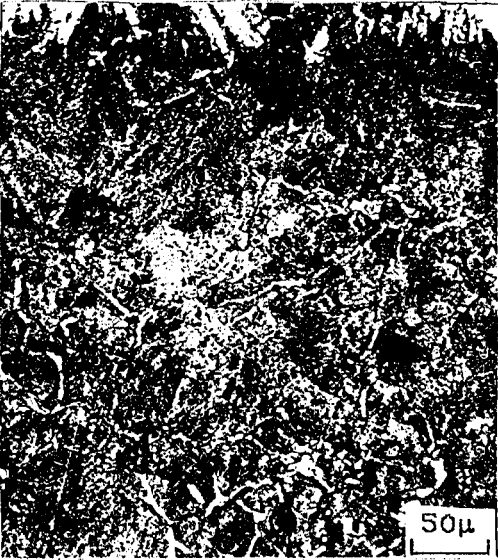


a

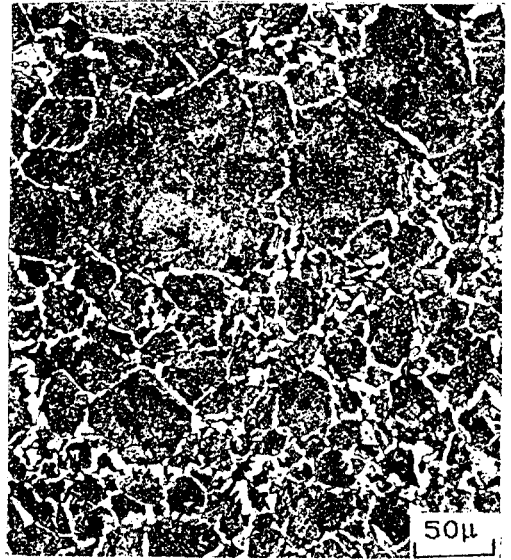


b

Şekil 9.20. 900-660°C sıcaklıklar arasında 4.1°C/dak hızla program kontrollü termal çevrimli borlanan numunelerin mikro yapıları, a) 900°C'da 10 dak bekleme, 660°C'da 3 dak bekleme, b) 900°C'da 37 dak bekleme, 660°C'da 3 dak bekleme.



a

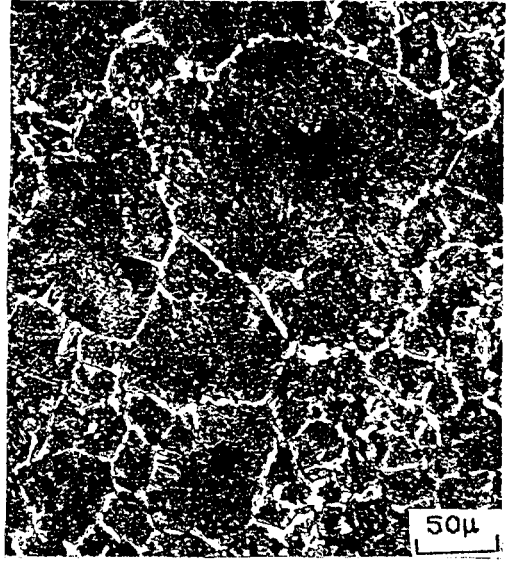


b

Şekil 9.21. 900°C sabit sıcaklıkta, 240 dak süreyle borlanmış numunenin mikro yapısı, a) geçiş zonu, b) matriks malzeme.

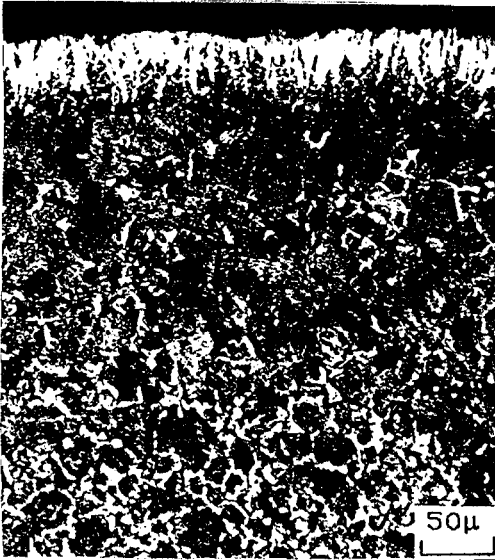


a

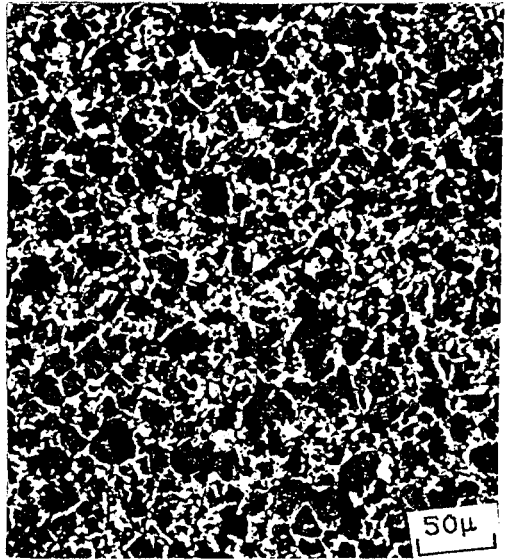


b

Şekil 9.22. 900°C sabit sıcaklıkta, 360 dak süreyle borlanmış numunenin mikro yapısı, a) geçiş zonu, b) matriks malzeme.



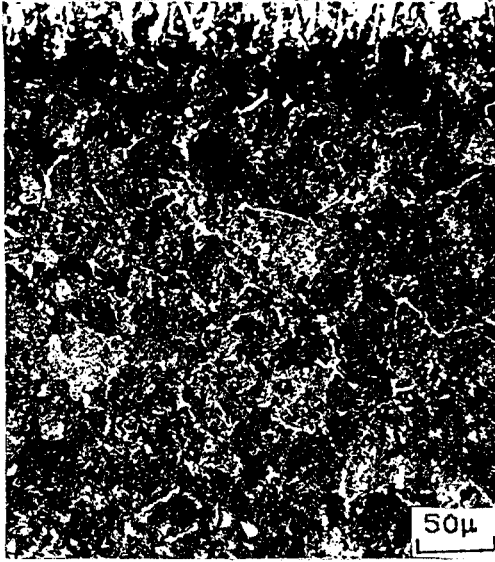
a



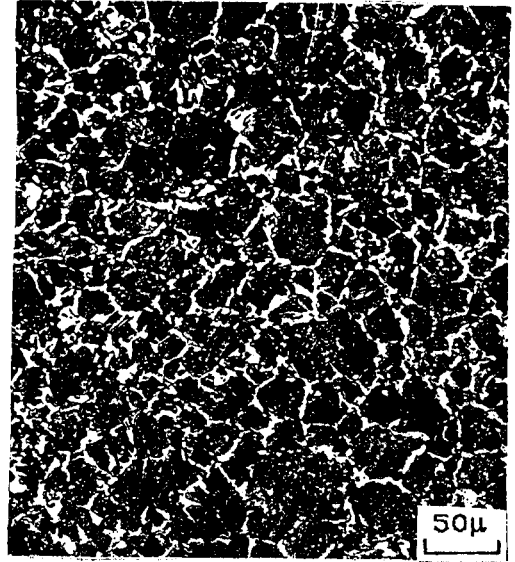
b

Şekil 9.23. 900°C sıcaklıkta, 25 dak bekleme ve havada 5 dak süreyle bekleme ile yapılan termal çevrimli borlama sonrası mikro yapılar, a) geçiş zonu, b) matriks malzeme.



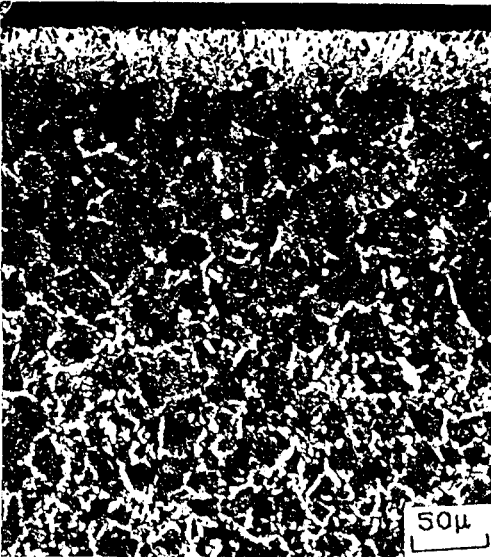


a

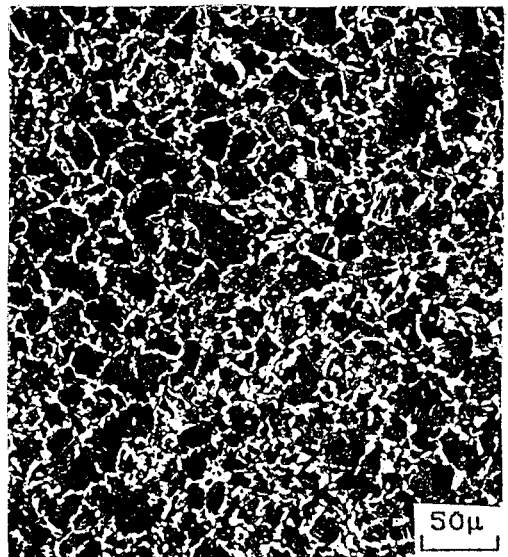


b

Şekil 9.24. 900°C sıcaklıkta, 54 dak bekleme ve havada 5 dak süreyle bekleme ile yapılan termal çevrimli borlama sonrası mikro yapılar, a) geçiş zonu, b) matriks malzeme.



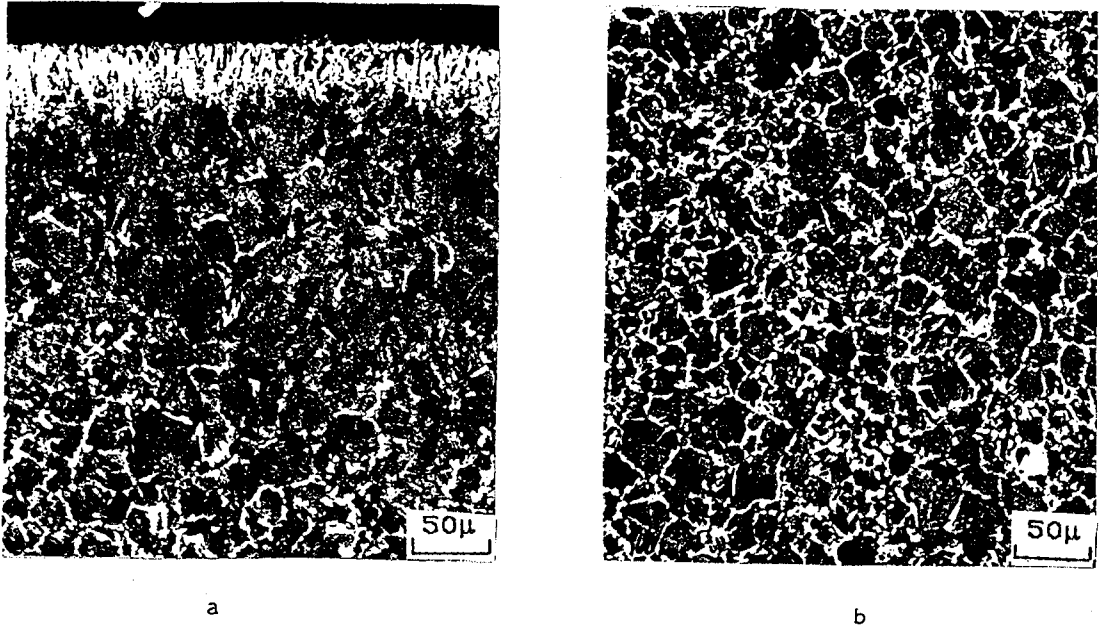
a



b

Şekil 9.25. 900-660°C sıcaklıklar arasında 4.1C/dak hızla program kontrollü termal çevrimle, 232 dak süreyle borlanan numunelerin mikro yapısı, a) geçiş zonu, b) matriks malzeme.





Şekil 9.26. 900-660°C sıcaklıklar arasında 4.1°C/dak hızla program kontrollü termal çevrimle, 348 dak süreyle borlanan numunelerin mikro yapısı, a) geçiş zonu, b) matriks malzeme.

### 9.3.2. Termal çevrimli borlamanın, borür tabakası ve geçiş zonuunun aşınma özelliklerine etkisi

Klasik borlama ve termal çevrimli borlama şartlarında elde edilen borür tabakalarının özelliklerini karşılaştırmak amacıyla aşınma deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki çizelge ve şekillerde gösterilmiştir.

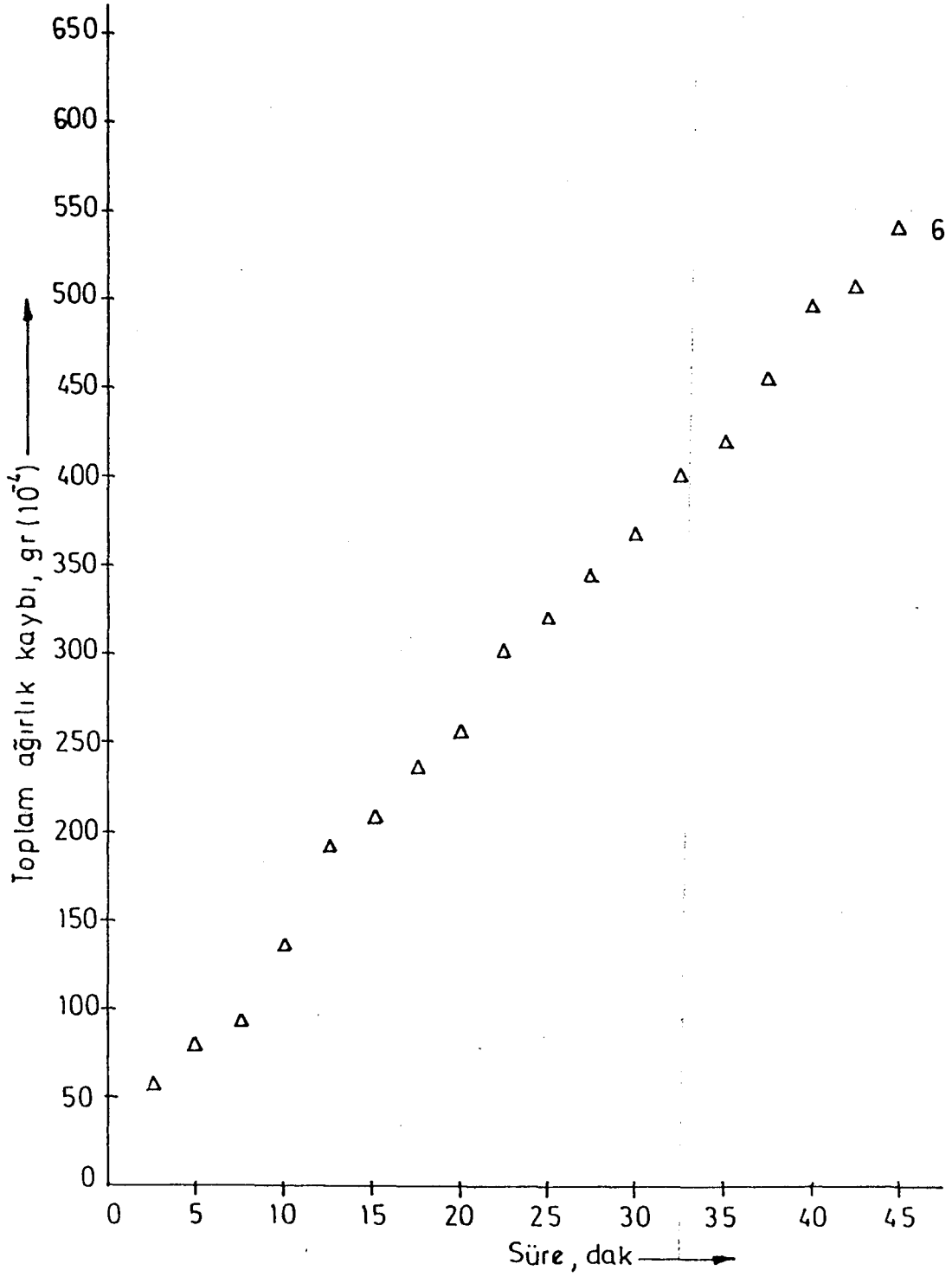
Borlama işlem şartlarına bağlı olarak, aşınma deneyi sonuçlarına göre elde edilen toplam ağırlık kaybı ile aşınma süresi arasındaki ilişki Şekil 9.27-9.30'da gösterilmiştir. Her bir grup deneyde aşınma kaybının en düşük olduğu numuneler alınarak Şekil 9.31 çizilmiştir. Ayrıca, Şekil 9.31'deki numunelerin aşınma kayıpları, boy kısalması göz önüne alınarak elde edilen sonuçlar Çizelge 9.9'da gösterilmiştir. Çizelge 9.9'daki numunelerin boy kısalması ile aşınma süresi arasındaki ilişki Şekil 9.32.'de gösterilmiştir.

Çizelge 9.8. CNC freze tezgahında 800 mesh SiC zımpara ile yapılan aşınma deneylerinde 2.5 dakikalık aralıklarla numunelerde ağırlık kaybı olarak ölçülen aşınma kayıpları.

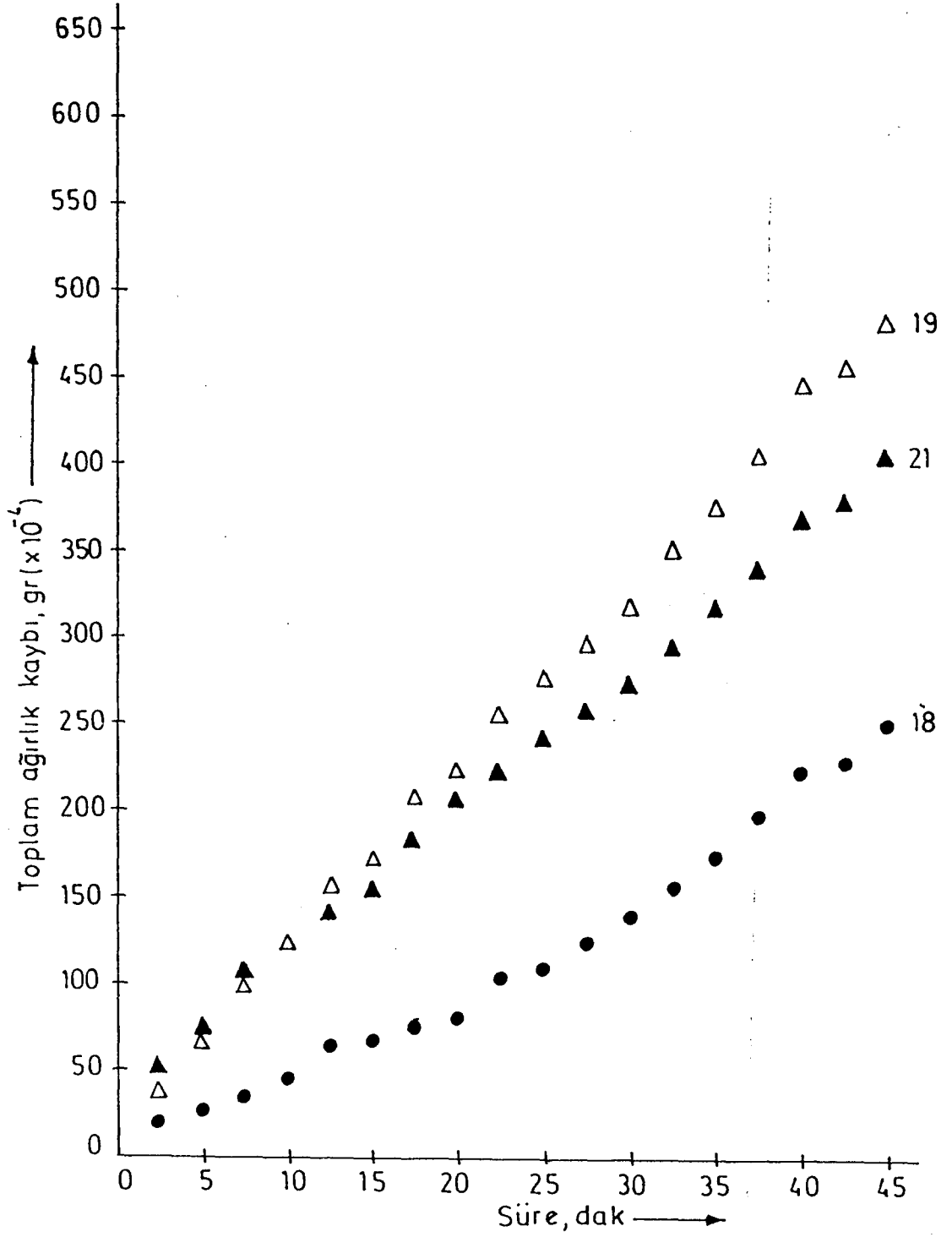
Numune No	Toplam Aşınma Kaybı (mg)								
	1.ölçüm	2.ölçüm	3.ölçüm	4.ölçüm	5.ölçüm	6.ölçüm	7.ölçüm	8.ölçüm	9.ölçüm
	2.5 dak	5 dak	7.5 dak	10 dak	12.5 dak	15 dak	17.5 dak	20 dak	22.5 dak
6	5.7	7.9	9.3	13.7	19.3	20.76	23.5	25.5	30.1
12	1.8	4.3	5.5	7.2	9.9	10.2	12.9	14.9	17.5
14	5.9	10.8	13.6	17.5	22.5	23.6	27.6	30.7	33.9
16	6.0	10.0	12.5	16.8	21.1	23.5	27.1	29.7	32.9
17	6.5	10.5	14.4	18.6	23.7	25.6	29.1	32.5	36.2
18	2.1	2.7	3.5	4.7	6.6	6.8	7.6	8.3	10.4
19	3.6	6.5	9.7	12.2	16.8	17.1	20.6	22.3	25.5
20	6.0	10.6	14.1	18.2	26.0	28.0	31.7	34.4	37.7
21	4.9	7.6	10.8	12.5	14.0	15.4	18.3	20.5	22.3
22	2.4	4.0	5.8	8.2	11.5	12.3	15.1	16.7	18.8
23	3.4	5.0	7.3	12.0	15.4	16.3	19.3	20.9	24.1

Çizelge 9.8. (devam ediyor)

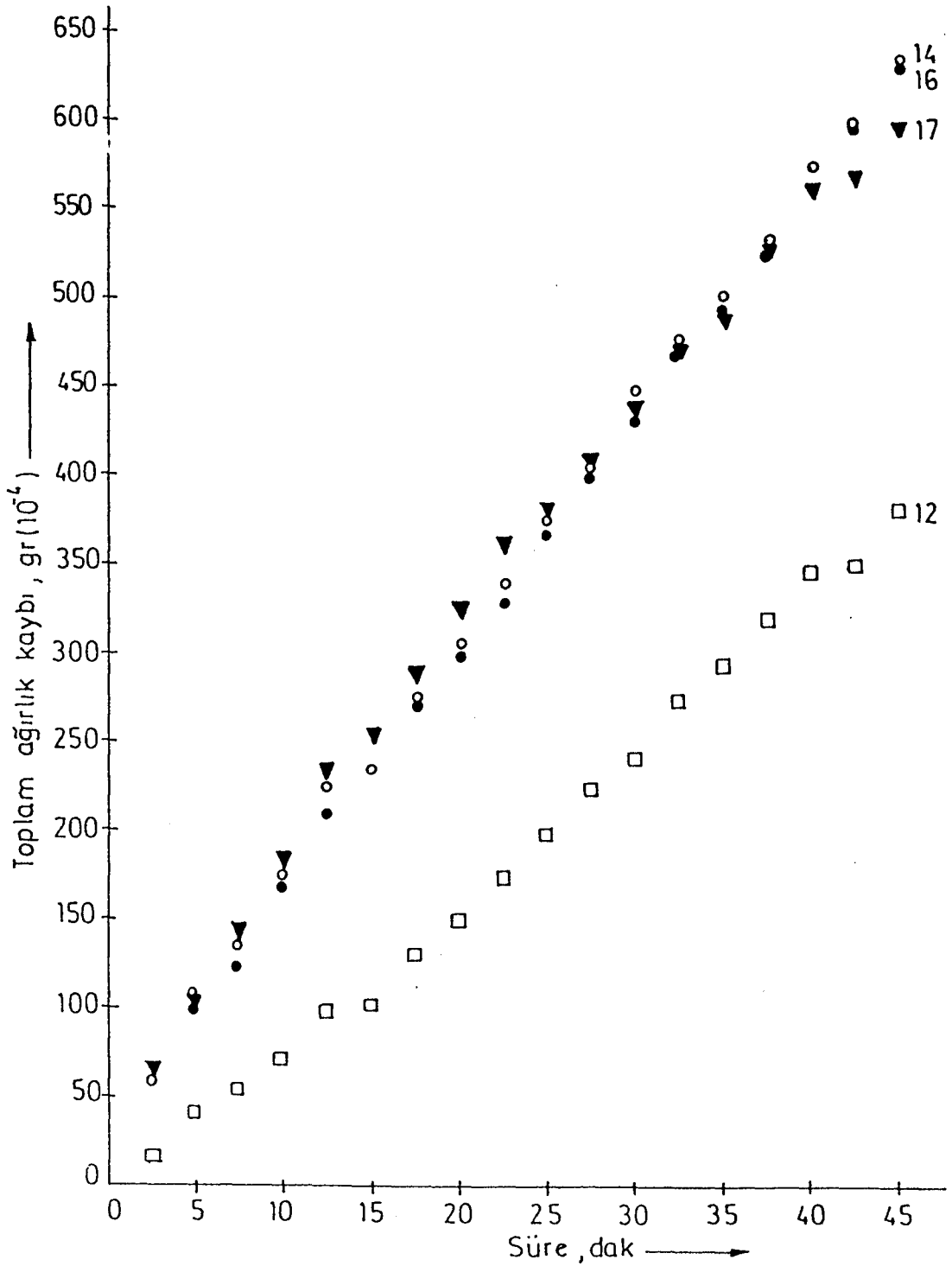
Numune No	Toplam Aşınma Kaybı (mg)								
	10.ölçüm	11.ölçüm	12.ölçüm	13.ölçüm	14.ölçüm	15.ölçüm	16.ölçüm	17.ölçüm	18.ölçüm
	25 dak	27.5 dak	30 dak	32.5 dak	35 dak	37.5 dak	40 dak	42.5 dak	45 dak
6	32.1	34.6	36.8	40.1	41.9	45.6	49.4	50.8	54.1
12	19.8	22.5	24.2	27.5	29.5	32.0	34.7	35.1	38.2
14	37.6	40.4	44.8	47.7	50.2	53.4	57.4	59.9	63.4
16	36.5	39.9	43.1	47.0	49.2	52.4	57.8	59.5	62.9
17	38.2	41.1	44.1	47.2	48.8	52.7	56.0	56.7	59.4
18	11.0	12.5	14.1	15.8	17.4	19.9	22.5	23.0	25.3
19	27.6	29.5	31.8	35.1	37.6	40.5	44.5	45.5	48.2
20	40.5	42.5	46.3	49.1	50.5	54.6	58.1	59.2	61.8
21	24.0	25.8	27.1	29.6	31.8	34.1	37.1	37.6	40.4
22	21.4	23.8	26.4	29.1	31.2	33.4	35.5	36.1	39.5
23	26.6	28.7	30.9	34.4	36.9	40.0	43.3	45.4	48.3



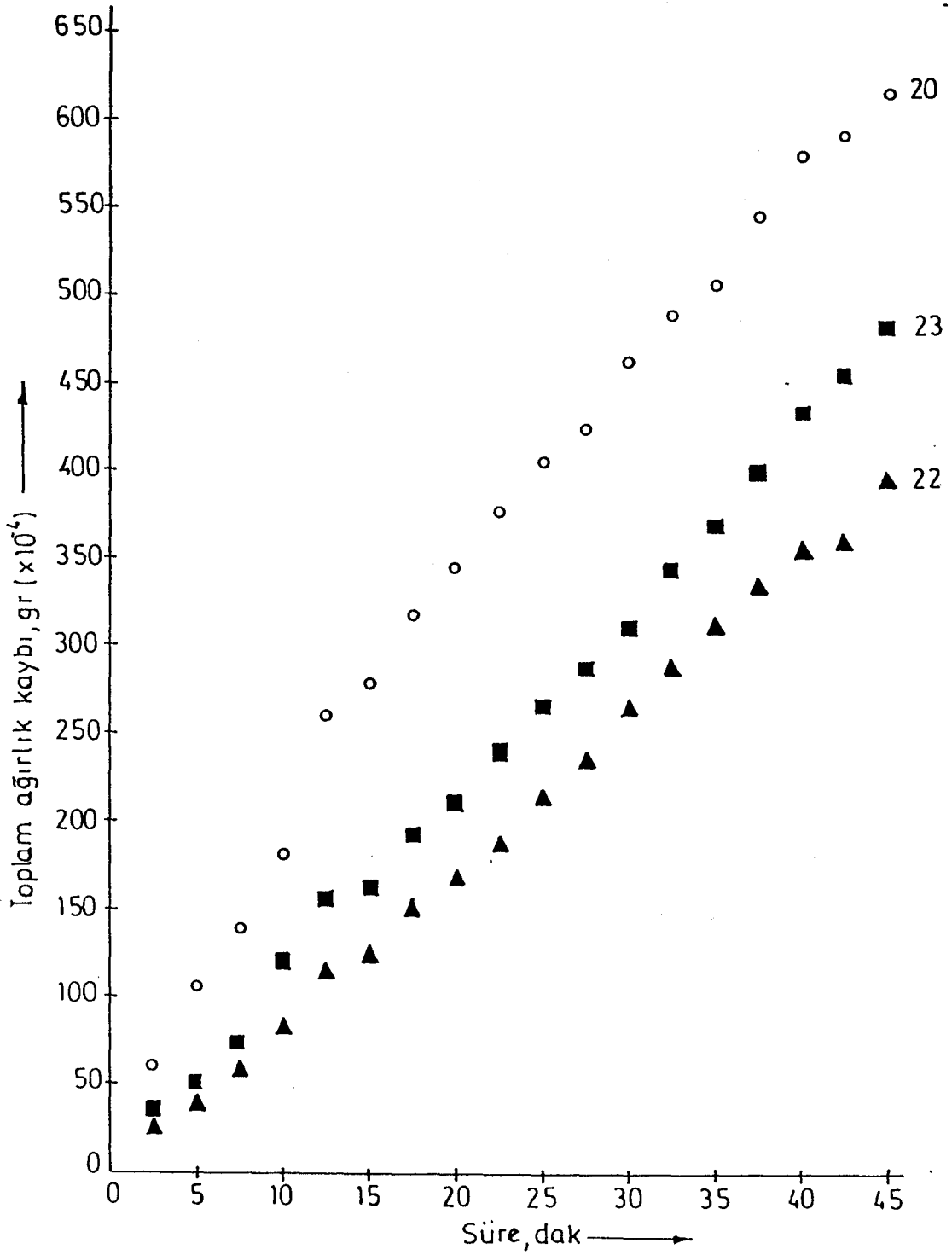
Şekil 9.27. 900°C sabit sıcaklıkta, 360 dak süreyle borlanan numunelerle yapılan aşınma deneyi sonuçları.



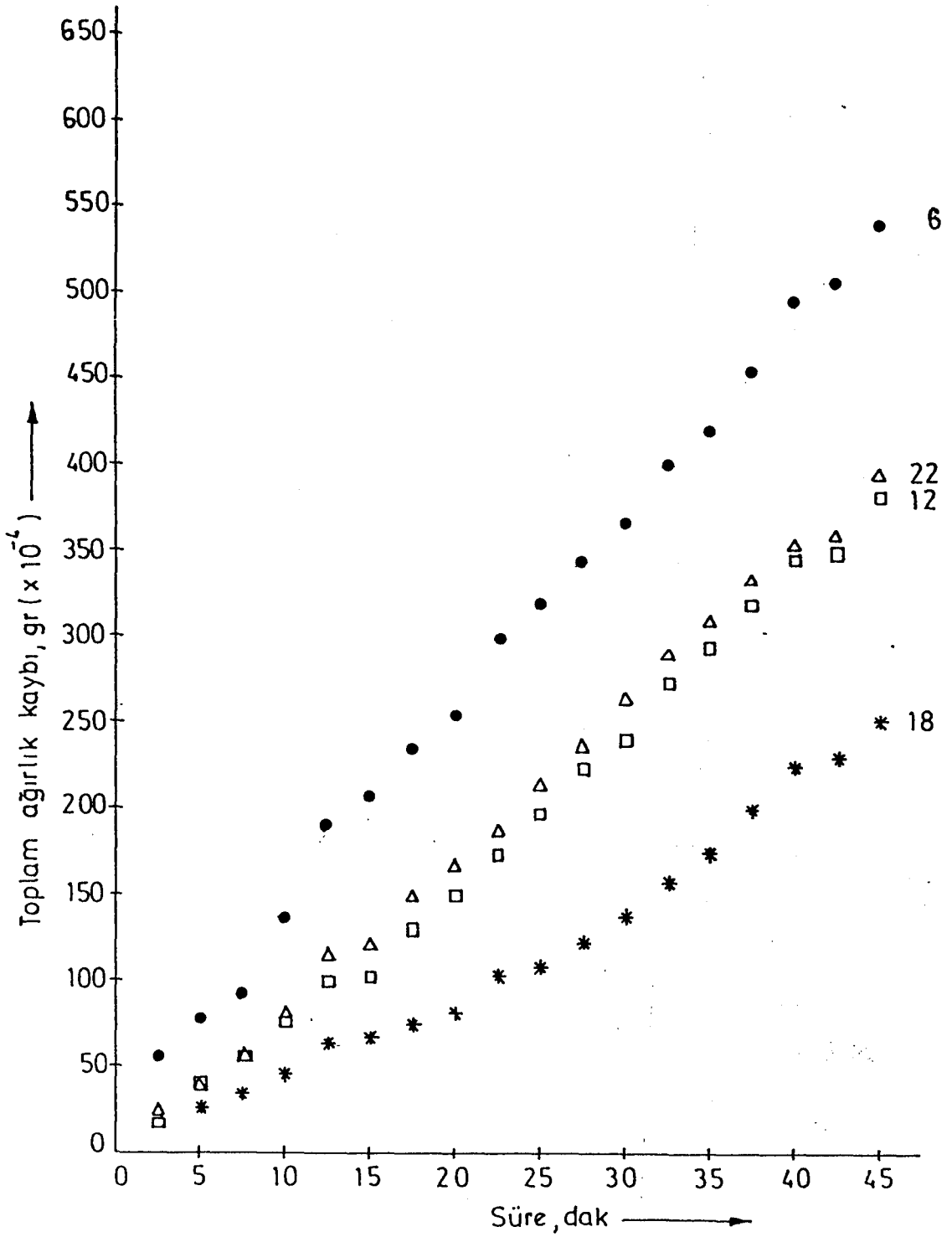
Şekil 9.28. 900°C sıcaklıkta, farklı sürelerle bekletme sonrası havada 5 dak süreyle soğutmalı termal çevrimle borlanan numunelerin aşınma deneyi sonuçları.



Sekil 9.29. 900-660°C sıcaklıklar arasında farklı hızlarla program kontrollü ve kontrolsüz termal çevrimle borlanan numunelerin aşınma deneyi sonuçları.



Şekil 9.30. 900-660°C ve 900-740°C sıcaklıklar arasında 4.1°C/dak hızla program kontrollü termal çevrimle borlanan numunelerin aşınma deneyi sonuçları.



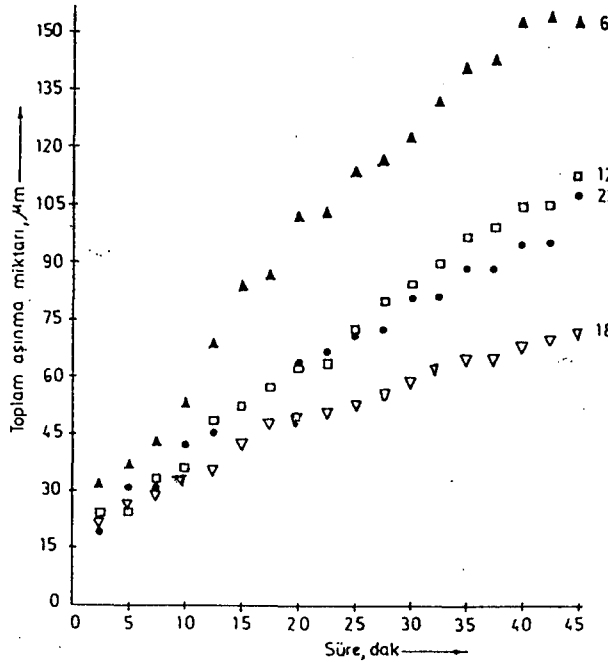
Şekil 9.31. Şekil 9.27-9.30'daki en düşük aşınma kayıplarının elde edildiği numunelerin karşılaştırılması.

Çizelge 9.9. CNC freze tezgahında 800 mesh SiC zımpara ile yapılan aşınma deneylerinde 2.5 dakikalık aralıklarla numunelerde boy kısalması olarak ölçülen aşınma kayıpları.

Numune No	Toplam Aşınma Kaybı ( $\mu\text{m}$ )								
	1.ölçüm	2.ölçüm	3.ölçüm	4.ölçüm	5.ölçüm	6.ölçüm	7.ölçüm	8.ölçüm	9.ölçüm
	2.5 dak	5 dak	7.5 dak	10 dak	12.5 dak	15 dak	17.5 dak	20 dak	22.5 dak
6	32	36	43	53	71	84	87	101	103
12	24	25	33	36	49	52	58	62	64
18	22	26	29	33	36	40	43	46	48
22	19	30	31	43	45	53	58	64	67

Çizelge 9.9. (devam ediyor)

Numune No	Toplam Aşınma Kaybı ( $\mu\text{m}$ )								
	10.ölçüm	11.ölçüm	12.ölçüm	13.ölçüm	14.ölçüm	15.ölçüm	16.ölçüm	17.ölçüm	18.ölçüm
	25 dak	27.5 dak	30 dak	32.5 dak	35 dak	37.5 dak	40 dak	42.5 dak	45 dak
6	114	116	123	133	141	143	147	150	152
12	73	80	85	90	97	100	105	106	113
18	49	53	59	63	65	66	68	70	72
22	71	73	81	82	86	89	91	95	108

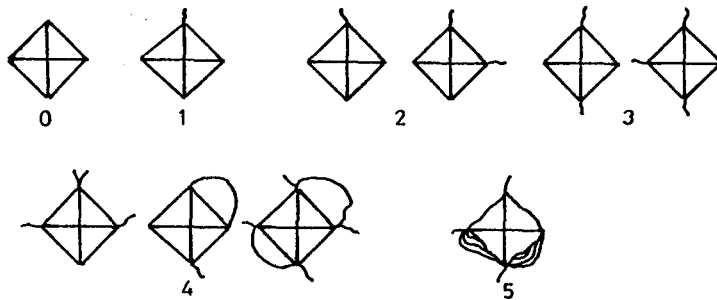


Şekil 9.32. Şekil 9.31'deki numunelerde boy kısalmasına göre aşınma kayıplarının karşılaştırılması.



### 9.3.3. Termal çevrimli borlamanın, sertlik ve gevrekliğe etkisi

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, sertlik ölçümleri ile malzemelerin diğer bazı özellikleri arasında ilişkiler kurulmaya çalışılmıştır. Örneğin, Cooper (1991), Co-Cr-W-C alaşımından borlanan numunelerde mikrosertlik ile aşınma özellikleri; Lopez et al. (1989) alümina kaplamalarda mikrosertlik ile tabakanın ana matrikse bağlantı mukavemeti; Duncan-Hewitt and Weatherly (1989), mikrosertlik ile kırılma tokluğu ve elastisite modülü; Atanassova (1982), Sertlik ile gevreklik arasındaki ilişkileri araştırmışlardır. Atanassova'nın (1982) çalışmasında 20-200 gr'lık yük uygulanmasıyla iz kenarlarında oluşan çatlaklara göre borür tabakalarının gevreklik açısından sınıflandırılabilceğini söylemiştir. Şekil 9.33'de bu sınıflandırma gösterilmiştir. Atanassova'ya (1982) göre, 0-1 derecesinde gevrekliğe sahip borür tabakaları, darbe ve şiddetli sürtünmenin olduğu yerlerde kullanılabilir. 2. ve daha büyük derecede gevrekliğe sahip tabakalar, eğme ve darbeleri yüklemelerin olmadığı, abrazif aşınma şartlarında kullanılabilir.



Şekil 9.33. Mikrosertlik ölçümleriyle gevrekliğin belirlenmesi (Atanassova, 1982; Glazov and Vigdorovich, 1971).

Bu çalışmada sabit sıcaklıkta ve termal çevrimli borlamayla numunelerde Vickers ucuyla yapılan mikrosertlik ölçümü sonuçları Çizelge 9.10'da gösterilmiştir. Ayrıca 100 gr'lık yük uygulanarak oluşturulan izler incelenerek, sabit sıcaklıkta ve termal çevrimle borlanan numuneler gevreklik açısından kontrol edilmiştir. 100 gr yükte termal çevrimli

numunelerde çatlak gözlenmezken, 6 numaralı numunede 2. ve 3. dereceden çatlaklar oluşmuştur. 200 gr yükte 4 numaralı numunede ve dereceden çatlaklar gözlenmiştir.

Çizelge 9.10. Sabit sıcaklıkta ve termal çevrimli şartlarda borlanan numunelerde borür tabakası, geçiş zonu ve matrikste ölçülen sertlik değerleri.

Numune No	Borür tabakası		Geçiş zonu	Matriks
	Borür iğneleri yönünde, HV (300gr)	Borür iğnelere dik yönde, HV (100gr)	HV, (1000gr)	HV, (1000gr)
Orjinal	-	-	-	230
4	2000	1418	262	220
6	2100	1462	273	240
12	2150	1500	235	220
18	-	1550	240	227
21	2050	1605	250	221

## 10. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

% 65  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + % 20 Fe-Si + % 15  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  bileşimli banyoda, Ç1045 çeliğinde, sıvı ortamda; 900°C sabit sıcaklıkta ve termal çevrimli borlama şartlarında yapılan deneylerde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Yapılan bütün deneylerde yüzeyde  $\text{Fe}_2\text{B}$ 'dan oluşan tek fazlı borür tabakası elde edilmiştir. Endüstriyel uygulamalarda, kalıntı gerilme dağılımının daha uygun olması ve ilave ısıl işlemlere izin vermesi dolayısıyla tek fazlı borür tabakaları tercih edilir (Liliental and Tackowski, 1980). Metalografik incelemelerde yapının  $\text{Fe}_2\text{B}$ 'dan oluştuğu gözlenmiştir. Ayrıca 5 ve 13 numaralı numunelere yapılan x-ışınları analizlerinde de borür tabakasının  $\text{Fe}_2\text{B}$ 'dan oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 9.15).

2. Termal çevrimli borlama şartlarında elde edilen tabaka kalınlıkları, sabit sıcaklıkta borlamayla elde edilene göre daha ince (örneğin 14, 16, 17) veya eşittir (18, 19, 21). RUFANOV et al.,'un (1983) % 0.45 C'lu çelikte yaptığı termal çevrimli elektrolitik borlama çalışmasında, tabaka kalınlığının, sabit sıcaklıkta borlamaya göre, yaklaşık olarak % 9 oranında arttığı hesaplanmıştır. Borür tabakasının morfolojisi göz önüne alındığında bunun önemli bir artış olmadığı söylenebilir. Örneğin bu çalışmadaki 19 numaralı deney şartlarında, sabit sıcaklıkta borlamaya göre % 7 oranında bir artışın olduğu görülmüş olup, bu da önemsiz bir farktır. Bu çalışmadaki diğer termal çevrim şartlarında borür tabakası kalınlığının, sabit sıcaklıkta yapılanlara göre daha düşük olması, borlama banyosu ve işlem şartlarına bağlanmıştır. Banyo katılaşma sıcaklığı 760°C civarında katılaşmaya başlamaktadır. Termal çevrim 900-660°C sıcaklıklar arasında yapıldığı için, gerek ısıtma ve gerekse soğutma şartlarında, yaklaşık olarak 760-660°C arasında difüzyon olayı engellenmektedir. Daha düşük ergime sıcaklığına sahip borlama banyolarında işlemin uygulanması durumunda, difüzyon hızının artacağına inanılmaktadır.

Termal çevrimin uygulandığı sementasyon ve nitrürasyon gibi diğer difüzyon çalışmalarında, difüzyon tabakası, sabit sıcaklıkta yapılanlara göre daha kalın olmaktadır. Krishtal and Kenis, (1985) ve Zabelin et al. (1982), karbürizasyon esnasında termal çevrim uygulanmasıyla difüzyon katsayısının artmasını; tane incilmesi, faz yeniden kristalleşmesi, iç gerilmelerin oluşması ve gevşemesi ile boşluk konsantrasyonundaki artışa bağlamışlardır.

3. Numunelerin mikroyapıları incelendiğinde; sabit sıcaklıkta borlamaya göre termal çevrimli borlama şartlarında borür tabakası kalınlığının bütün kenar kısımlarında daha üniform olduğu görülmüştür (Şekil 9.17-9.20). Ayrıca borür tabakasındaki porozite, termal çevrimli borlama şartlarında daha düşüktür. Fiedler and Sieraski (1971), demirborürde borun demire göre daha hızlı yayılımı dolayısıyla tabakada bir miktar porozitenin oluşabileceğini söylemiştir. Rufanov et al. (1983), borür tabakalarındaki çatlak ve dökülmelerin esas metalin mukavemetinin düşük olmasından kaynaklandığını, mukavemet ve sünekliğin termal çevrimli işlemlerle de artırılabilirliğini belirtmişlerdir. Çizelge 7.2 ve 7.3. incelendiğinde görüleceği gibi, termal çevrimli ısıtma işlemleri malzemenin mekanik özellikleri geliştirilebilir.

4. Sabit sıcaklıkta ve termal çevrimli şartlarda borlanan numunelerin mikro sertlikleri arasında belirgin bir fark yoktur. Elde edilen mikro sertlik değerleri, literatürde Fe<sub>2</sub>B için bildirilen sınırlar içerisindedir. Ancak, borür iğneleri yönünde ölçülen sertlik değerleri, bütün numunelerde daha yüksektir (Çizelge 9.10). Bozkurt'un (1984) Ç 1042 çeliğinde, boraks, borikasit ve ferro silis bileşimli banyoda 960 °C borlama sonucu elde ettiği sertlik değerleri ile bu çalışmada yüzeyde ve yüzeye dik yönde borür tabakasında ölçülen sertlik değerleri uyumludur.

5. Sabit sıcaklıkta ve termal çevrimli borlama uygulanan numunelerle yapılan aşınma deneylerinde, en düşük aşınma kaybı, termal çevrim uygulanan 18, 12, 21 ve 22 numaralı numunelerde elde edilmiştir. Ağırlık kaybı esasına göre

ölçülen aşınma kayıpları, 6 numaralı numune referans alındığında; 18 numaralı numunede %50, 12'de %30, 21 ve 22 numaralı numunelerde ise %26 oranında azalmıştır (Şekil 9.31 ve 9.32). Liliental and Tacikowski (1980) ve Shadrichev and Romyantsev'in (1982)'de belirttiği gibi, borür tabakası ve geçiş zonunda kalıntı gerilmelerin dağılımı malzemenin aşınma v.b. mekanik özelliklerini etkilemektedir. Çizelge 7.1. incelendiğinde, borlamadan sonra, ilave olarak normalizasyon işleminin uygulanması durumunda borür tabakası ile matriksin özgül hacimleri arasındaki fark ilave ısıl işlemin uygulanmadığı duruma göre azalmaktadır. Bu da, oluşan kalıntı gerilmeleri, dolayısıyla da tabakanın özelliklerinin iyi yönde etkilemektedir. Borlamada termal çevrimin uygulanması, durumunda, sabit sıcaklıkta yapılan borlamaya göre bu farkın azaldığı ve sonuç olarak borür tabakasının özelliklerinin iyileştiği tesbit edilmiştir. Ayrıca, uygun termal çevrimli borlama sonucu daha üniform ve daha az poroziteli borür tabakalarının elde edilmesi, tabakanın aşınma gibi servis özelliklerini de iyi yönde etkilemiştir.

6. Sabit sıcaklıkta ve termal çevrimli borlamayla elde edilen borür tabakaları gevreklik açısından karşılaştırıldığında; termal çevrimli borlamanın (örneğin 12, 18 ve 21 numaralı numuneler) gevrekliği azalttığı tesbit edilmiştir. Termal çevrimle borlanan numunelerde sertlik ölçümlerinde 100 gr yük uygulandığında, iz kenarlarında hiç çatlak oluşmazken, sabit sıcaklıkta borlanan numunelerde (örneğin 6 numaralı numune) Şekil 33.'de tanımlanan 2. ve 3. dereceden çatlakların olduğu gözlenmiştir.

7. Termal çevrimli borlama ile numunelerin tane boyutları küçülmüş ve üniform tane boyutlu bir yapı elde edilmiştir. Termal çevrimde tanelerin küçülmesi, çevrimler esnasında  $\gamma \rightarrow \gamma + \alpha \rightarrow P + \alpha$  dönüşümleriyle tanelerin parçalanmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 9.21-9.26 incelendiğinde bu özellik çok açık olarak görülebilir. Sabit sıcaklıkta işlem süresi arttıkça, tane boyutu da artmakta ve aynı zamanda anormal büyüyen taneler gözlenmektedir. Süre artışıyla birlikte bazı

taneler, çevresindeki diğer taneleri yokederek aşırı büyümüşlerdir. Şekil 9.21 ve 9.22'den de görüleceği gibi 4 ve 6 numaralı numunelerde gözlenen en büyük taneler, sırasıyla 125 ve 200  $\mu\text{m}$ 'dir. Termal çevrimin uygulandığı, örneğin 11, 12, 18 ve 21 numaralı numunelerde gözlenen en büyük taneler 30-40  $\mu\text{m}$ 'yi geçmemektedir.

Ayrıca, uygulanan termal çevrimler göz önüne alındığında; 11, 12 numaralı çevrimlerde, 18, 19 numaralı çevrimlere göre taneler daha küçüktür. Bu tür çevrimlerde (18, 19, 21), hızlı ısıtma ve soğutmanın olması dolayısıyla faz deformasyon sertleşmesi olur. Bushnin et al. (1986), çeliğin, ostenitik sıcaklığa yavaş ısıtıldığında, hızlı ısıtmada olduğu gibi faz deformasyon sertleşmesinin olmayacağını savunmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, Bushnin et al.'un (1986) sonuçlarıyla uyumludur. Termal çevrimli borlama şartlarında işlem süresinin artışı ile, sabit sıcaklıkta borlama işlemindeki aksine tanelerin küçüldüğü tesbit edilmiştir. Çizelge 7.2. ve 7.3.'den görüleceği gibi, yapıda tanelerin küçülmesi ve üniform tane boyutlu bir yapının elde edilmesi malzemenin mukavemet, süreklilik ve tokluk özelliklerini geliştirir, darbe geçiş sıcaklığını aşağılara düşürür. Frantsuzova et al. (1984), borlamada termal çevrimin uygulanması durumunda, sabit sıcaklıkta borlanan numunelere göre darbe direncinin 1.5-2.3 kat arttığını savunmaktadır.

8. Geçiş zonunda tane yapısı açısından 7. sonuçta belirtilen özellikler gözlenmiştir. Ancak metalografik olarak bu bölgedeki tanelerin ve tane sınırlarının ayırılabilmesi daha güçtür. Ne varki, Şekil 9.21-9.26 incelendiğinde, bu bölgede de termal çevrim şartlarında tanelerin küçüldüğünü söylemek zor olmayacaktır. Literatürde, özellikle karbürizasyon gibi difüzyon çalışmalarında termal çevrim uygulandığında, numunenin merkezinden yüzeye doğru tane boyutunun daha da küçüldüğü belirtilmiştir (Krishtal and Kenis, 1985). Bu çalışmada, borür tabakasının altında yer alan geçiş zonunun tane boyutunun, ana matriksinkisine göre daha büyük olduğu tesbit edilmiştir. Borlamada, bu bölgede tane boyutunun, diğer

difüzyon işlemlerin aksine, daha büyük olmasının nedeni, geçiş zonunda borun bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi bor; tane büyümesini teşvik eder ve alaşım elementi olarak ostenit dönüşümünü yavaşlatarak sertleşebilirliği artırır. Borlamada da geçiş zonunda borun bulunması dolayısıyla, tane incilmesi bir dereceye kadar engellenmektedir.

Geçiş zonundaki tane boyutunun termal çevrimli numunelerde, sabit sıcaklıktaki borlamaya göre daha küçük olduğu belirlenmiştir. Matriks malzeme tane boyutuna göre ise geçiş zonundaki tanelerin, termal çevrimli şartlardakilere göre daha büyük olduğu tesbit edilmiştir.

Permyakov et al. (1973), borlama esnasında yüksek sıcaklıklarda ve uzun sürelerde matriks ve geçiş zonunda şiddetli tane büyümesinin olacağını belirtmiştir. Geçiş zonunda borun bulunması büyümeyi daha da şiddetlendirmektedir. Geçiş zonu ve matriks yapıda tane büyümesinin makina parçalarının mekanik özelliklerini kötüleştireceğini savunan Parmyakov et al. (1973) çeliğe karbür yapıcı alaşım elementi olarak Ti ilave ederek, geçiş zonu ve matrikste tane büyümesini engellediklerini belirtmektedir. Geçiş zonu kalınlığı, düşük kalınlıktaki borür tabakaları göz önüne alınmadığı durumda; sabit sıcaklıkta borlamada borür tabakası kalınlığının, yaklaşık olarak 7 katı oranında ölçülürken, termal çevrimli borlamada bu oran 4-5'e düşmüştür (Şekil 9.14). Bu çalışmada alaşım elementi olmaksızın numunelerin geçiş zonu ve matriksin tane boyutu termal çevrimle küçültülmüş ve mekanik özellikler de geliştirilmiştir.

### KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akulinichev, E.V., Akulinicheva, A.N. and Mosin, N.I., 1974, Effect of liquid boriding on the surface quality of alloy KhN77TYuR, Met. Sci. Heat Treat. (USSR), 16, 1-2, 163-164.
- Akulinichev, E.V., 1979, Mechanism of the formation and the structural characteristics of boride coatings obtained during crystallization of steel castings, Met.Sci. Heat Treat. (USSR), 21, 1-2, 7-9.
- Anashkin, A.V., Belov, A.V., Sokolov, A.A., Bogatov, A.A. and Smirnov, S.V., 1988, Heat Cycling of carbon steel wire, Met.Sci.Heat Treat. (USSR), 30, 1-2, 98-97.
- Arai, T., 1979, Carbide coating process by use of molten borax bath in Japan, J. Heat Treating, 1, 2, 15-22.
- Atanassova, J.R., 1982, Erhöhung der lebensdauer von bauteilen und werkzeugen durch boraliteren, Harterei-Tech.Mitt., 37, 2, 73-82.
- Babushkin, B.V. and Polyakov, B.Z., 1973, Residual stresses in steel after boriding from melts, Met. Sci. Heat Treat. (USSR), 15, 7-8, 577-580.
- Badini, C., Gianoglio, C. and Paradelli, G., 1986, Preferential distribution of chromium and nickel in the borided layer obtained on synthetic Fe-Cr-Ni alloys, J.Material Science, 21, 5, 1721-1729.
- Bashnin, Yu.A., Semenova, L.M., Burenkova, O.S., Borodova, I.A. and Ban'kovskii, A.I., 1984, Thermocycling carbonitriding of gears, Met.Sci. Heat Treat. (USSR), 26, 3-4, 267-269.
- Bashnin, Yu.A., Lisitskaya, L.A., Semenova, L.M. and Pozharskii, A.V., 1985, Effect of thermal cycling on the mechanical properties of steel 20 Kh, Met.Sci. Heat Treat. (USSR), 27, 7-8, 589-591.
- Bel'skii, E.I., Stkevich, M.V., Rogov, V.A. and Kryukov, V.P., 1980, Chemicothermal treatment of dies, Met. Sci. Heat Treat. (USSR), 22, 5-6, 398-401.
- Bel'skii, E.I., Liventsev, V.E. and Sitkevich, M.V., 1983, Formation and properties of boride coatings obtained in the casting process, Met.Sci. Heat Treat (USSR), 25, 9-10, 773-776.
- Belyaeva, G.I., Plotnikova, A.F., Stotskaya, S.N. and Chernov, Ya.B., 1979, Effect of melt composition on the rate of boriding, Met. Sci.Heat Treat. (USSR), 21, 9-10, 785-787.



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Berzina, I.G., Gusev, E.B., Fedina, G.N. and Fedin, V.M., 1984, Investigation of boron diffusion during boronizing of engineering steel 45, *Phys. Met. Metall.*, 57, 5, 81-84.
- Biddulph, R.H., 1977, Boronizing for erosion resistance, *Thin Solid Films*, 45, 341-347.
- Blazon, M., Stanojevic, B. and Veljkovic, V., 1975, Effect of alloying elements on the formation of boride layer on steel, *Scripta Metallurgica*, 9, 1153-1156.
- Bonomi, A., Habersaat, R. and Bienvenu, G., 1978, Electrochemical boriding of nitriding steel in molten salts, *Surface Technology*, 6, 313-319.
- Bozkurt, N., 1984, Bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme, Doktora tezi, İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi, 116 s.
- Brown, A., Garnish, J.D. and Honeycombe, R.W.K., 1974, The distribution of boron in pure iron, *Metal Science*, 8, 317-324.
- Carbucicchio, M., Bardani, L. and Palombarini, G., 1980, Mössbauer and metallographic analysis of borided surface layers on armco iron, *J. Materials Science*, 15, 711-719.
- Carbucicchio, M., Bardani, L. and Sambogna, G., 1980, On the early stages of high purity iron boriding with crystalline boron powder, *J. Materials Science*, 15, 1483-1490.
- Carbucicchio, M., Meazza, G. and Palombarini, G., 1982, Surface structure of boride layers grown on Fe-C-Ni alloys, *J. Materials Science*, 17, 3223-3128.
- Carbucicchio, M., Zecchi, E., Palombarini, G. and Sambogna, G., 1983, Phase composition and structure of boride layers grown on laboratory cast low-chromium alloys, *J. Materials Science*, 18, 3355-3362.
- Carbucicchio, M., Meazza, G. and Sambogna, G., 1984, Some effects of thermochemical conditions on iron boriding, *Heat Treatment Shanghai 1983, 3rd International Congress on Heat Treatment of Materials (Proc. Conf.)*, Bell, T., (ed.), Shanghai, China, 3.50-3.53.
- Carbucicchio, M., Palombarini, G. and Cento, L., 1984, Redistribution of alloying elements in 1100C borided iron alloys, *Heat Treatment Shanghai 1983, 3rd International Congress on Heat Treatment of Materials (Proc. Conf.)*, Bell, T., (ed.), Shanghai, China, 3.44-3.49.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Carbucicchio, M., Palombarini, G. and Sambogna, G., 1984, Composition and structure of boride layers grown on low-manganese ternary iron alloys, *J. Materials Science*, 19, 4035-4039.
- Carbucicchio, M., and Palombarini, G., 1984, Iron-boron reaction products depending on the base alloy composition, *J. Materials Science Letters*, 3, 1046-1048.
- Carbucicchio, M., and Palombarini, G., 1985, Experimental evidence for a gaseous phase contribution to iron-boron reactivity, *J. Materials Science Letters*, 4, 483-486.
- Carbucicchio, M., and Palombarini, G., 1987, Effects of alloying elements on the growth of iron boride coatings, *J. Materials Science Letters*, 6, 1147-1149.
- Carbucicchio, M., and Sambogna, G., 1985, Influence of chromium on boride coatings produced on iron alloys, *Thin Solid Films*, 126, 299-305.
- Chou, C.C., Kao, P.W. and Cheng, G.H., 1986, Accelerated spheroidization of hypoeutectoid steel by the decomposition of supercooled austenite, *J. Materials Science*, 21, 3339-3344.
- Cooper, C.V., 1991, The indentation and wear properties of a thermal-diffusion boronized Co-Cr-W-C alloy, *Thin Solid Films*, 195, 89-98.
- Dearnley, P.A., Farrel, T. and Bell, T., 1986, Developments in plasma boronising, Ion plating and implantation applications to materials, Hochman, R.F. (ed.), *Conference Proceedings, American Society for Metals*, 151-155.
- Dukarevich, I.S., Mozharov, M.V. and Shigarev, A.S., 1973, Redistribution of elements in boride coatings, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 15, 1-2, 160-162.
- D'yachenko, S.S. and Miloslavskaya, E.L., 1983, The use of heat cycling for increasing the ductility of high-carbon steels, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 25, 11-12, 888-890.
- Etibank, 1983, *Bor*, 107, 24 s.
- Evtifeev, S.L. and Sin'kovskii, A.S., 1985, Method of improving the heat resistance of parts working under conditions of discontinuous lubrication, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 27, 7-8, 627-629.
- Eyre, T.S., 1975, Effect of boronising on friction and wear of ferrous metals, *Wear*, 34, 383-397.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Fel'dman, B.L., Golovashkina, N.V., Drobinskii, M.L. and Andreev, Yu. G., 1985, Influence of heat treatment on the spheroidization of the carbides in 40 Kh steel, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 27, 3-4, 178-184.
- Fichtl, W., 1981, Boronizing and its practical applications, *Materials In Engineering*, 2, 276-286.
- Fichtl, W., Trausner, N. and Matuschka, A.G., 1987, Boronizing with Ekabor, *Elektroschmelzwerk Kempten GmbH*, 6 p.
- Fiedler, H.C. and Sieraski, R.J., 1971, Boriding steels for wear resistance, *Metal Progress*, 101-107.
- Frantsuzova, L.P., Vladimirov, A.V., Chetchasova, T.E., Lisitskaya, L.A. and Fal'kin, A.I., 1984, Increasing the impact strength of constructional steels by thermocycling treatment, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 26, 3-4, 269-272.
- Gaponov, Yu.N., Marchenko, V.G., Shtein, Yu.A. and D'yachenko, S.S., 1987, Influence of thermal cycling treatment on the critical points of steels *Met.Sci. Heat Treat. (USSR)*, 29, 7-8, 493-495.
- Geller, Yu., 1978, Tool steels, (Trans. V.V. Afanasyev), *Mir Publishers, Moscow*, 666 p.
- Glazov, V.M. and Vigdorovich, V.N., 1971, Microhardness of metals and semiconductors, (Trans. G.D. Archard), *Consultants Bureau*.
- Goeuriot, P., Thevenot, F. and Driver, J.H., 1981, Surface treatment of steels: Boridif, a new boriding process, *Thin Solid Films*, 78, 67-76.
- Goeuriot, P., Fillet, R., Thevenot, F., Driver, J.H. and Bruyas, H., 1982, The influence of alloying element additions on the boriding of steels, *Materials Science and Engineering*, 55, 9-19.
- Goeuriot, P., Thevenot, F., Driver, J.H. and Magnin, T., 1983, Methods for examining brittle layers obtained by a boriding surface treatment (Borudif), *Wear*, 86, 1-10.
- Grishin, A.M. and Sentyurev, V.P., 1975, Vacuum boriding of austenitic steel and the structure of the boride layer, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 17, 11-12, 1049-1051.
- Han, S.H. and Chun, J.S., 1980, A study on the electroboronizing of steel by superimposed cyclic current, *J.Materials Science*, 15, 1379-1386.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Hansen, M., 1958, Constitution of binary alloys, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1306 p.
- Hewitt, W.C.D. and Weatherly, G.C., 1989, Evaluating the hardness, Young's modulus and fracture toughness of some pharmaceutical crystals using microindentation techniques, J. Materials Science Letters, 8, 1350-1352.
- Ivashchenko, V.T. and Nikiforchin, Yu. N., 1985, Increase in the working life of valves for pumps used by the oil industry, Chemical and Petroleum Engineering, 21, 12, 597-598.
- John, M.R.S. and Sammels, A.F., 1981, Characterization of an iron boride coating produced by pack boronization of low carbon steel, J. Materials Science, 16, Letters, 2327-2329.
- Kaidash, N.G., Kiva, I.S., Semenenko, I.A. and Chastokolenko, P.P., 1972, Approximate Calculation of the thickness of diffusion coatings, Protective coatings on metals, G.V. Samsonov (ed.), Consultants Bureou, 167-169.
- Karpenko, G.V., Pokhmurskii, V.I., Protsik, V.G. and Zamikhovskii, V.S., 1972, Effect of the chemical composition on the structure of diffusion layers and fatigue strength after diffusion boriding, Protective coatings on metals, G.V. Samsonov (ed.), Consultants Bureou, 41-43.
- Katkhanov, B.B., 1987, Selection of crucible material for electrolyte boriding, Met.Sci. Heat Treat. (USSR), 28, 11-12, 869-871.
- Kayalı, E.S., Sunada, H., Oyama, T., Wadsworth, J. and Sherby, O.D., 1979, J.Materials Science, 14, 2688-2692.
- Keown, S.R. and Pickering, F.B., 1977, Some aspects of the occurrence of boron in alloy steels, Metal Science, 26, 7, 225-234.
- Knotek, O., Lugscheider, E. and Leuschen, K., 1977, Surface layers on cobalt base alloys by boron diffusion, Thin Solid Films, 45, 331-339.
- Konopleva, Ye. V., Bayazitov, V.M., Entin, R.I. and Abramov, O.V., 1986, Transformation kinetics of the austenite of engineering steels during heat cycling treatment, Phys. Met. Metall., 61, 5, 104-110.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Konopleva, E.V., Entin, R.I., Bayazitov, V.M., Kogan, L.I. and Spasskii, M.N., 1987, Thermal Cycling treatment of low-carbon martensitic-bainitic steels, *Met.Sci. Heat Treat. (USSR)*, 29, 7-8, 489-492.
- Kowamura, K., Ueno, M., Hirotsu, Y. and Takashima, K., 1985, Development of a fine structure in a hypo-eutectoid steel by cyclic heat treatment and its superplastic behavior, *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, 25, 2, B 80.
- Krishtal, M.A. and Grinberg, E.M., 1974, Change in the structure of iron during diffusion of boron, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 16, 3-4, 283-287.
- Krishtal, M.A. and Kenis, M.S., 1985, Intensification of the thermocyclic carburization process, *Met.Sci. Heat Treat. (USSR)*, 27, 5-6, 386-390.
- Krishtal, M.A., Kenis, M.S. and Troshina, L.V., 1986, Structural heredity in heat cycling, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 28, 1-2, 91-95.
- Lakhtin, Yu. M., 1983, Engineering physical metallurgy and heat-treatment, (Trans. N.Weinstein), Mir Publishers, Moscow, 426 p.
- Lakhtin, Yu.M., Kogan, Ya.D. and Buryakin, A.V., 1985, Surface saturation of steel with boron by laser radiation, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 27, 11-12, 805-808.
- Lang, E., 1986, Coatings for high temperature applications, Elsevier Applied Science Publishers, 644 p.
- Liliental, W. and Tacikowski, J., 1980, Effect of heat treatment on the brittleness of boride layers on steel, *Industrial Heating*, 47, 4, 34-36.
- Linial, A.V. and Lavella, J.P., 1973, New processes for obtaining increased metal hardness and reduced friction properties by boronizing-I, December, 9-14.
- Linial, A.V. and Lavella, J.P., 1974, New processes for obtaining increased metal hardness and reduced friction properties by boronizing-II, January, 28-31.
- Linial, A.V. and Lavella, J.P., 1974, New processes for obtaining increased metal hardness and reduced printion properties by boronizing-III, March, 36-40.
- Long, S. and McGurie, G.E., 1979, The boriding of chromium photomasks for increased abrasion resistance, *Thin Solid Films*, 64, 433-438.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Lopez, E., Beltzung, F. and Zambelli, G., 1989, Measurement of cohesion and adhesion strengths in alumina coatings produced by plasma spraying, *J. Materials Science Letters*, 8, 346-348.
- Lovshenko, F.G., Vysotskii, V.T., Voroshnin, L.G. and Lovshenko, Z.M., 1978, Diffusional boronizing of sintered steels, *Sov. Powder Metall. Met. Ceram.*, 17, 2, 113-115.
- Lyakhovich, L.S., Kosachevskii, L.N., Dolmanov, F.V. and Krukovich, M.G., 1972, Liquid processes of chemical heat treatment without electrolysis, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 14, 1-2, 156-157.
- Lyakhovich, L.S., Kosachevskii, L.S., Voroshnin, L.G., Turov, Yu. V., Krukovich, M.G. And Vasil'ev, L.A., 1974, Low-temperature boriding, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 16, 1-2, 158-159.
- Lyakhovich, L.S., Protasevich, G.F., Voroshnin, L.G., Suprurovich, A.S. and Shabashova, N.D., 1976, Liquid boriding, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 18, 7-8, 647-648.
- Lyakhovich, L.S., Rozenberg, S. E., Terekhov, V.K. and Starchenko, I.N., 1985, Effect of impregnation conditions on the structure and chemical composition of the borided layer for steel 38 KhS, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 27, 1-2, 10-12.
- Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü, 1982, Dünyada ve Türkiye'de metal ve mineral kaynaklarının potansiyeli-10. Bor minerali, 187, 24 s.
- Mal, K.K. and Tarkan, S.E., 1973, Diffused boron ups hardness, wear resistance of metals, *Materials Engineering*, 77, 70-71.
- Manukyan, N.V. and Manukyan, G.B., 1984, Thermocycling treatment of sintered steels-report 1, *Sov. Powder Metall. Met. Ceram.*, 23, 4, 312-316.
- Matuschka, A.G., 1980, *Boronizing*, Carl Hanser Verlag, München Wien, 100 p.
- Nadol'skii, V.A. and Ivinskii, V.I., 1972, Boriding in powders with additions of potassium fluoroborate, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 14, 11-12, 1002-1003.
- Palombarini, G. and Carbucicchio, M., 1984, On the morphology of thermochemically produced Fe<sub>2</sub>B/Fe interfaces, *J. Materials Science Letters*, 3, 791-795.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Palombarini, G. and Carbucicchio, M., 1985, High boron phases on borided iron and iron alloys, *J. Materials Science Letters*, 4, 170-172.
- Palombarini, G. and Carbucicchio, M., 1987, Growth of boride coatings on iron, *J. Materials Science Letters*, 6, 415-416.
- Palombarini, G., Carbucicchio, M. and Cento, L., 1984, Electron probe microanalysis of nickel and chromium in Fe-C-Ni and Fe-C-Cr alloys borided at 850°C, *J. Materials Science*, 19, 3732-3738.
- Parusov, V.V., Dolzhenkov, I.I. and Sukhomlin, V.I., 1985, Transformation of austenite into granular pearlite in carbon and alloy steels, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 27, 5-6, 402-407.
- Permyakov, V.G., Trushch, I.Kh. and Darofeeva, A.N., 1972, Impregnation of commercial pure iron and steel with boron, carbon and nitrogen, *Protective Coatings on metals*, G.V. Somsonov (ed.), Consultants Bureou, 146-149.
- Permyakov, V.G., Trush, I. Kh., Loskutov, V.F., Pisarenko, V.N. and Yakovchuk, Yu. E., 1973, Effect of titanium on the growth of boride coatings, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 15, 11-12, 1005-1006.
- Permyakov, V.G., Yakovchuk, Yu.E., Cherepin, V.T., Amir Khanova, T.V. and Maifet, Yu.P., 1973, Effect of silicon on formation of boride coatings, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 15, 3-4, 251-253.
- Permyakov, V.G., Loskutov, V.F., Trush, I.Kh. and Pisarenko, V.N., 1974, Boriding of tool steels in commercial boron carbide, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 16, 1-2, 160-162.
- Pokhmurskii, V.I. and Kucherepa, L.M., 1977, Boriding of high-carbon steels, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 19, 11-12, 1048-1049.
- Prokhorov, N.A., Ermolov, L.S. and Udovitskii, V.I., 1984, Effect of heat cycling on the complex diffusion saturation of gray cast iron, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 26, 3-4, 326-328.
- Quing'en, M. and Zaizhi, C., 1984, Boronization process in steel: theory of diffusion channel' model of boron atoms, *Heat Treatment Shanghai 1983, 3rd International Congress on Heat Treatment of Materials (Proc. Conf.)*, Bell, T., (ed.), Shanghai, China, 3.8-3.12.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Rile, M., 1974, Reasons for the formation of cracks in boride coatings on steel, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 16, 9-10, 836-838.
- Rufanov, Yu. G., Biruk, N.G., Bordyug, G.K. and Fomichev, O.I., 1983, Effect of heat cycling on the structure and properties of the boride layer, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 25, 11-12, 886-888.
- Rus, J., Luis de Leal, C. and Tsipas, D.N., 1985, Boronizing of 304 steel, *J. Materials Science Letters*, 4, 558-560.
- Shadrichev, E.V. and Rumyantsev, S.I., 1982, Wear kinetics of a two-phase boride layer, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 24, 7-8, 495-498.
- Shadrichev, E.V. and Surov, E.A., 1985, Effect of boriding on the temp for carbon steels, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 27, 11-12, 829-833.
- Shiryaev, V.I., Piletskaya, I.B. and Kamenetskaya, D.S., 1987, The effect of heat cycling on the mechanical properties of iron, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 29, 1-2, 23-25.
- Simonenko, A.N., Shestakov, V.A. and Poboinya, V.N., 1982, Liquid boriding in induction salt baths, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 24, 5-6, 360-361.
- Simonenko, A.N., Poroshin, V.V. and Antia, P.K., 1985, Aging of salt baths with electrolysis-free liquid boriding, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 27, 1-2, 13-16.
- Singhal, S.C., 1977, A hard diffusion boride coating for ferrous materials, *Thin Solid Films*, 45, 321-329.
- Slyusarev, V.Yu., Baranova, V.A. and Gomilko, E.L., 1983, Sphereoidizing heat cycling of gray cast iron, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 25, 11-12, 890-893.
- Smirnov, V.P., Bespalov, A.G., Zolotukhin, B.N. and Pavlinov, L.V., 1972, Redistribution of components in Kh15N15 steel during boron impregnation, *Protective Coatings on Metals*, G.V. Samsonov (ed.), Consultants Bureau, 34-36.
- Smochkin, V.V., 1986, Effect of prior heat treatment on the properties of nitrated structural and tool steels, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 28, 3-4, 211-214.
- Smol'nikov, E.A. and Sarmanova, L.M., 1982, Study of the possibility of liquid boriding of high-speed steels, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 24, 11-12, 785-788.



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Smol'nikov, E.A. and Sarmanova, L.M., 1984, Boriding tools in electrode baths, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 26, 3-4, 190-193.
- Smol'nikov, E.A. and Sarmanova, L.M., 1987, Boriding steel in salt melts of economic composition, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 29, 1-2, 55-60.
- Subrahmanyam, J. and Gopinath, K., 1984, Wear studies on boronized mild steel, *Wear*, 95, 3, 287-292.
- Takeuchi, E., Fujii, K. and Katagiri, T., 1979, Sliding wear characteristics of gas boronized steel, *Wear*, 55, 121-130.
- Teneva, D. and Japrakova, M., 1986, Structure and residual stresses in the surface layer of borided tool steels, *J. Less-Common Metals*, 117, 369-373.
- Tsipas, D.N. and Rus, J., 1987, Boronizing of alloys steels, *J. Materials Science Letters*, 6, 118-120.
- Vasil'eva, E.V., Yurkov, I.I., Urlapov, A.M. and Mel'nichuk, G.A., 1985, Structure and properties of borided chromium stainless steels, *Met. Sci. Heat Treat. (USSR)*, 27, 5-6, 391-394.
- Yakhnina, V.D., Kozlov, A.M. and Luk'yanitsa, A.I., 1979, Physicochemical Characteristics of powder boronizing, *Sov. Powder Metall. Met. Ceram.*, 18, 4, 237-240.
- Zabelin, S.F., Tikhanov, A.S and Zemskii, S.V., 1982, Diffusion during the thermal cycling of steels, *Fiz. Khim, Obrab. Mater.*, 6, 115-120 (Metals Abstract, 01-1983, 13-0661'daki özetinden).
- Zabil'skiy, V.V. and Obukhov, V.A., 1985, Embrittlement of boron-containing steel in the austenite range, *Phys, Met. Metall.*, 59, 3, 117-123.