

Borlanmı AISI L6 Çeli inde Metalografik ve Mekanik Özelliklerin ncelenmesi

Harun Can

**YÜKSEK L SANS TEZ**

Metalurji Mühendisli i Anabilim Dalı

Aralık 2009

Examining of Metallographic and Mechanical Properties in Borided AISI L6 Steel

Harun Can

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Metallurgical Engineering

December 2009

Borlanmı AISI L6 Çeli inde Metalografik ve Mekanik Özelliklerin ncelenmesi

Harun Can

Eski ehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeli i Uyarınca  
Metalurji Mühendisli i Anabilim Dalı  
YÜKSEK L SANS TEZ  
Olarak Hazırlanmı tır

Danı man: Prof. Dr. Orhan erif KOMAÇ

Aralık 2009

## ONAY

Metaller Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Harun CAN'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Borlanmış AISI L6 Çeliğinde Metalografik ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi" başlıklı bu çalışmada, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Orhan İrfan KOMAÇ

**İkinci Danışman** :

**Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Prof. Dr. Orhan İrfan KOMAÇ

**Üye** : Doç. Dr. Necmi GÖNEN

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÇELİK KYÜREK

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

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Sıcak i takım çelikleri 400 °C ila 650 °C arasında çalı abilen ve bu sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruyan çeliklerdir. Bu çalı mada sıcak i takım çeliklerinin sahip oldukları üstün mekanik özelliklerini ve kullanım ömürlerini borlama i lemi ile daha da artırmak amaçlanmı tır.

Borlama deneylerinde AISI L6, malzeme numarası 1.2713 olarak tanımlanan sıcak i takım çeli i kullanılmı tır. Çalı mada kullanılan malzemeler kullanılmı sıcak dövme kalıbı üzerinden alınmı ve 12,7 mm küp ekinde i lenmi tir.

Çalı mada borlama sonrası AISI L6 sıcak i takım çeli inin yüzeyinde olu an borür tabakalarının metalografik ve mekanik özellikleri incelenmi tir. Borlama i lemi, katı ortamda Ekabor-II tozu kullanılarak, 920, 980 ve 1040 °C’de 2-8 saat sürelerde yapılmı tır. Borlama i lemine tabi tutulan numunelerde borür tabakasının morfolojisini, sertli ini ve bu tabakada ki faz da ılımının tespit edilmesinde optik mikroskop, mikrosertlik ve X-ı nları difraksiyon analizleri (XRD) kullanılmı tır.

Çalı ma sonunda AISI L6 sıcak i takım çeli inin ba arılı bir ekinde borlanabilece i ve bu i lemle yüzey sertli inin arttırılabilece i gösterilmi tir.

Anahtar Kelimeler: Borlama, sıcak i takım çeli i, AISI L6

## SUMMARY

Hot work steels are tool materials that could work between 400 °C and 650 °C and keep their mechanical properties in these temperatures. The aim of present study is increasing of hot work tool steel's superior mechanical properties and their service life by boriding process.

In boriding experiments hot work tool steels that designated AISI L6 and material number 1.2713 are used. The substrate materials used for this study had been cut from used hot forging die. The test materials were cube shaped with a nominal dimensions of 12,7 mm.

In the present study mechanical and metallographic properties of boride layer formed on AISI L6 hot work tool steels have been investigated. Boriding was performed in a solid medium consisting of Ekabor-II powders at a temperature of 920, 980 and 1040 °C for periods of 2–8 h. The morphology and types of borides formed on the surface of AISI L6 hot work tool steel substrate were analyzed by means of optical microscopy, micro hardness and x-ray diffraction analysis (XRD).

At the end of the study, it is shown that AISI L6 hot work tool steel can be borided successfully and increased surface hardness by boriding process.

Keywords: Boriding, hot work tool steel, AISI L6

**TE EKKÜR**

Yüksek lisans e itimim boyunca bilgi ve tecrübeleriyle her konuda bana destek olan ve beni yönlendiren de erli danışmanım Prof. Dr Orhan erif KOMAÇ'a, çalı malarım süresince verdi i fikirler ve tanıdı ı imkânlardan dolayı Sayın Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇEL K' e, yüksek lisans e itimim boyunca her konuda deste ini ve bilgisini esirgemeyen Ara . Gör. Kerem AYBAR 'a, numunelerin hazırlanmasında büyük emekleri olan Cavit AH N'e te ekkür ederim.

Her zaman her ko ulda yanımda olan canım e ime sonsuz te ekkürler...

## Ç NDEK LER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	v
<b>SUMMARY</b> .....	vi
<b>TE EKKÜR</b> .....	vii
<b>Ç NDEK LER</b> .....	viii
<b>EK LLER D Z N</b> .....	xi
<b>Ç ZELGELER D Z N</b> .....	xiii
<b>1. G R</b> .....	1
<b>2. SICAK TAKIM ÇEL KLER</b> .....	3
2.1. Sıcak Takım Çelikleri Tanımı .....	3
2.2. Ala ım Elementlerinin Etkisi .....	4
2.3. Uygulama Alanları .....	5
2.4. AISI L6 Tanımı .....	6
<b>3. BORLAMA</b> .....	7
3.1. Bor Hakkında Genel Bilgi .....	7
3.1.1. Borun tabiatta bulunması .....	7



## Ç NDEK LER (devam)

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.1.2. Bor elementinin özellikleri .....	7
3.1.3. Demir-Bor denge diyagramı .....	8
3.1.4. Bor-Demir bileşikleri .....	10
3.2. Borlama yöntemi .....	12
3.3. Borlama Yöntemleri .....	14
3.3.1. Katı borlama yöntemi .....	15
3.3.1.1. Toz ortamda borlama .....	15
3.3.1.2. Pasta ( Macun ) borlama .....	17
3.3.2. Sıvı borlama yöntemi .....	18
3.3.3. Gaz borlama yöntemi .....	19
3.3.4. Plazma borlama yöntemi .....	20
3.4. Borlanabilen Malzemeler .....	21
3.5. Alaşım Elementlerinin Borlamaya Etkisi .....	22
3.6.. Borür Tabakası .....	24
3.6.1. Borür tabakasının gelişimi .....	24
3.6.2. Borür tabakasının yapısı .....	25
3.6.3. Geçiş bölgesi .....	26
3.7. Borür Tabakasının Özellikleri .....	27
3.7.1. Tabaka kalınlığı .....	27
3.7.2. Tabaka sertliği .....	29
3.7.3. Aşınma .....	30
3.7.4. İç gerilmeler .....	31
<b>4. LİTERATÜR ÖZET .....</b>	<b>33</b>
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>37</b>
5.1. Deneysel Kullanılan Malzemeler .....	37

## Ç NDEK LER (devam)

	<b><u>Sayfa</u></b>
5.1.1. Kullanılan çelik .....	37
5.1.2. Borlama ortamı malzemeleri .....	39
5.2. DeneYlerde Kullanılan Cihazlar .....	39
5.3. DeneYlerin Yapılı ı .....	40
5.3.1. Borlanacak numunelerin hazırlanması .....	40
5.3.2. Borlama ortamının hazırlanması .....	41
5.3.3. Borlama i lemi .....	41
5.3.4. Borlama sonrası metalografik incelemelerin yapılması .....	41
5.3.5. Borür tabakasının kalınlık ölçümlerinin yapılması .....	42
5.3.6. Borür tabakasının sertlik ölçümlerinin yapılması .....	42
<b>6. DENEY SONUÇLARI ve RDELENMES</b> .....	<b>43</b>
6.1. Tabaka Kalınlı ı .....	43
6.2. Tabaka Sertli i .....	45
6.2.1. Borlama süresinin mikrosertli e etkisi .....	47
6.3. Tabaka Yapısı .....	49
6.3.1. XRD analiz sonuçları .....	49
<b>7. GENEL SONUÇLAR</b> .....	<b>57</b>
<b>8. ÖNER LER</b> .....	<b>59</b>
<b>9. KAYNAKLAR D Z N</b> .....	<b>60</b>

## EK LLER D Z N

ekil	Sayfa
ekil 3.1. Demir- Bor denge diyagramı .....	9
ekil 3.2. a ) Fe <sub>2</sub> B kristalinin birim kafesi ve b) (001) düzlemindeki Projeksiyonu .....	10
ekil 3.3. Katı borlama tematik resmi .....	15
ekil 3.4. Sıvı borlama ünitesi .....	18
ekil 3.5. Gaz borlama ünitesi .....	19
ekil 3.6. Tek ve iki fazlı borür tabakalarının tematik görünümü .....	26
ekil 3.7. Ekabor-1 ile borlanmış Ck 45 çeliğinin tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklıkla değişimi .....	28
ekil 3.8. 42CrMo4 Çeliğinde farklı yüzey tabakalarının dinamik sıcaklık sertlikleri .....	29
ekil 3.9. Düşük karbonlu çelikte farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin ısınma davranışları .....	31
ekil 3.10 Tek fazlı ve çift fazlı borür tabakasındaki iç gerilme dağılımı .....	32
ekil 5.1. Borlama öncesi numunenin mikroyapı görüntüsü .....	38
ekil 5.2. Numunelerin borlanacağı kutunun teknik resmi .....	39
ekil 5.3. Borlanacak numunelerin teknik resmi .....	41
ekil 6.1. 920 °C’de 2 saat borlanmış numunenin tabaka kalınlık ölçümleri .....	43
ekil 6.2. Tabaka kalınlığının borlama süresine bağlı olarak değişimi .....	44
ekil 6.3. 1040 °C’de 8 saat borlanmış numune de mikrosertlik izleri .....	45
ekil 6.4. 920 °C’ de borlanmış AISI L6 çeliğinde yüzeyden itibaren elde edilen sertlik değerlerindeki değişim .....	46
ekil 6.5. 980 °C’ de borlanmış AISI L6 çeliğinde yüzeyden itibaren elde edilen sertlik değerlerindeki değişim .....	46
ekil 6.6. 1040 °C’ de borlanmış AISI L6 çeliğinde yüzeyden itibaren elde edilen sertlik değerlerindeki değişim .....	47

**EK LLER D Z N (devam)**

<u>ekil</u>	<u>Sayfa</u>
ekil 6.7. Borür tabakası sertli inin borlama süresine ba lı olarak de i imi .....	48
ekil 6.8. 980 °C’de 2 saat borlanmı numunenin XRD diyagramı .....	50
ekil 6.9. 980 °C’de 4 saat borlanmı numunenin XRD diyagramı .....	50
ekil 6.10. 980 °C’de 6 saat borlanmı numunenin XRD diyagramı .....	51
ekil 6.11. 980 °C’de 8 saat borlanmı numunenin XRD diyagramı .....	51
ekil 6.12. 920 °C’de 6 saat borlanmı numunenin XRD diyagramı .....	52
ekil 6.13. 980 °C’de 6 saat borlanmı numunenin XRD diyagramı .....	53
ekil 6.14. 1040 °C’de 6 saat borlanmı numunenin XRD diyagramı .....	53
ekil 6.15. 920 °C’de borlanmı numunelerin mikroyapı görüntüleri .....	54
ekil 6.16. 980 °C’de borlanmı numunelerin mikroyapı görüntüleri .....	55
ekil 6.17. a) 980 °C’de 8 saat borlanmı , b) 1040 °C’de 6 saat borlanmı numunelerin mikroyapı görüntüleri .....	55

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Sıcak iş takımı çelikleri kullanım alanları .....	6
Çizelge 3.1. Borun kristal yapıları ve kafes parametreleri .....	8
Çizelge 3.2. Borürlük tabakalarının karakteristik özellikleri .....	10
Çizelge 3.3. Borlama ile elde edilen borürlük ve mikrosertlikleri .....	11
Çizelge 3.4. Farklı malzemelerde çekim yüzey işlemleri ile elde edilebilecek sertlik değerleri .....	13
Çizelge 3.5. Katı borlama yönteminde kullanılan maddelerin bazı özellikleri .....	16
Çizelge 3.6. Bazı malzemelerin borlanma ve borlanmama durumdaki sürtünme katsayıları .....	30
Çizelge 3.7. Borürlük tabakası ve saf demire ait ısıl genişleme katsayıları .....	32
Çizelge 5.1. Deneylerde kullanılan AISI L6 çeliğinin kimyasal bileşimi .....	38
Çizelge 6.1. Tüm koşullarda ölçülen ortalama borürlük tabakası kalınlıkları .....	44
Çizelge 6.2. Yüzeyden 20-40 µm arası uzaklıktaki bölgede ölçülen mikrosertlikler .....	48

## 1. G R

Bor, yeryüzünde nadir bulunan elementlerdendir. 150'den fazla mineralin bile iminde bulunmasına rağmen tabiatta serbest olarak bulunmaz. Türkiye bor mineralleri açısından oldukça zengindir. Dünya rezervinin yaklaşık %72'si ülkemizde olmakla birlikte mineral çeşitliliği ve cevher tenörü açısından da doğal bir zenginliğe sahiptir. Bor bileşikleri çelikli makine parçaları, tekstil, kimya, seramik, plastik endüstrisi kollarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bor, demir esaslı malzemelerde ise alaım elementi veya yüzey sertleştirme amacı ile kullanılır. Ayrıca borlamanın alaımsız çeliklere uygulanabilmesi, ekonomik açıdan bir üstünlük oluşturmaktadır.

Termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemi olan borlama, esas olarak metal yüzeyine bor difüzyonu olarak tanımlanabilir (Allen ve Bindal, 1980). Borlamanın fiziksel durumu katı, sıvı, gaz yada plazma şeklinde olabilir. Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertlikleri ve yüksek aşınma dirençleri ile karakterize edilirler. Bu nedenle borlanmış malzemelerde oluşan borür tabakasına ait çalılar daha çok sertlik, aşınma ve korozyon üzerine yoğunlaşmaktadır.

Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucu borlama ürünlerine bağlı olarak malzeme yüzeyinde ferrobör fazlarından  $Fe_2B$ ,  $FeB$  veya  $Fe_2B + FeB$  meydana gelir. Borür tabakasının sertliği oluşan fazlara göre değişir.  $FeB$  fazı,  $Fe_2B$  fazından daha sert ve gevrekli (Özsoy, 1996).

Borür tabakasının önemli bir özelliği ise sahip olduğu yüksek sertlik değerini, 900-1000 °C'ye ulaşan sıcaklıklarda dahi koruyabilmesidir. Bu sayede sahip olduğu tribolojik özellikleri kaybetmeden aşınma ve oksidasyona karşı direnç gösterebilmektedir (Karaman vd., 1995).

Bu alı mada AISI L6 sıcak i takım eli inden hazırlanan 12,7 mm kenar lusüne sahip kp ekinde numunelere, yöntemin uygulanabilirli inin kolay ve güvenli olması, istenen tek fazlı yapının elde edilebilmesine olanak sa laması ve en önemlisi borlama sonrası temiz bir yüzey elde edilebilmesi nedenleriyle katı (paket) ortamda borlama seilmi tir. Bor verici kaynak olarak Ekabor-II tozu ve deoksidan olarak Ekrit tozu kullanılmı tır. Borlama i lemi 920°C , 980 °C ve 1040 °C ' lerde 2-4-6-8 saat olmak üzere yapılmı tır. Borlama sonrası numunelerde olu an borür tabakasının kalınlı ı, sertli i ve faz da ılımlı incelenmi tir.

Çalı manın ikinci bölümünde sıcak i takım çelikleri, 3'nc bölümde borlama konusu detaylı olarak ele alınmı tır. 4'nc bölümde katı borlama yöntemleri ile yapılmı bazı literatür çalı maları sunulmu tur. 5'inci bölümde deneysel çalı manın ayrıntıları verilmi tir. 6'ncı bölümde deneysel sonuçlar verilip de erlendirilmeleri yapılmı tır. 7'nci bölümde genel sonuçlar, 8'inci bölümde öneriler bulunmaktadır.

## 2. SICAK TAKIM ÇELİKLER

### 2.1. Sıcak Takım Çelikleri Tanımı

Çalışma ortamları 400 °C ila 650 °C arasında olan ve bu sıcaklık aralığında mekanik özellikleri koruyan, ayrıca alaşımında % C elementi hariç diğer alaşım elementlerinin toplamı % 5'den fazla olmayan çeliklere Sıcak Takım Çeliki denir (Topba, 1998).

Sıcak takım çelikleri, özellikle demir olmayan metallerin, yüksek polimerlerin ve seramik malzemelerin 200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çalıştırma için yararlanılan takımların imalinde kullanılırlar. Sıcaklık ilelenen malzemeye bağlı olarak ve teknolojik olarak uygulanan temas sürelerinde 300 °C ila 1000 °C'ye ulaşabildiğinden dolayı, bu çelikler çoğunlukla bir darbe tarzında olan ve ısı shock olarak da meydana gelen, çok yüksek mekanik ve termik zorlanma altında kalırlar. Bundan dolayı ilelenen malzemenin korozif etkisi ya da yüksek sıcaklık korozyonu da mümkündür. Çok pahalı sıcak takımalarında çoğu zaman plastik formde çalıştırması, sıcakta çatlak teşekkülü, kırılma, aşınma ve korozyon nedeniyle vaktinden önce bozulmalar meydana gelebilir, bunların dışında takım yüzeyine giren metal, kırılma ya da takımın çalışma yüzeyine metal yapışması olabilir. Bu durumlardan dolayı sıcak takım çeliklerinde olması gereken özellikler aşağıda belirtilmiştir:

- Çalışırken sertlik korunması
- Yüksek sıcaklıklarda aşınma mukavemetinin korunması
- Darbelere karşı dayanımı
- Sıcaklık değişimlerine dayanıklı olması istenir.

Bu özelliklerin tam olarak sağlanabilmesi için ısı işlem yapmak mutlak bir kuraldır. Amaca uygun yapılacak ısı işlem sayesinde darbeleri kaldırarak amacıyla hidrolik makinalardaki dövme çenelerinde, friksiyon preslerinde 600 darbe/dak



vurabilen manipölatörlerdeki dövme çenelerinde ve savunma sanayinde top namlusu olarak emniyetle kullanılmaktadır ( Topba , 1998).

## 2.2. Ala ım Elementlerinin Sıcak Takım Çeliklerine Etkisi

Ala ım elementi ilavesiyle, takım çeliklerinin özellikleri çok farklı olacak şekilde değiştirilebilir. Ya demir kafesinde çözülen ya da özel karbür tekkülü için katılan ala ım elemanları, sertleştirilebilirliği, menevî dayanımını, sertleştirilebilirliği, dayanımını, sünekliliği ve aşınma direncini farklı ölçüde iyileştirirler. Önemli ala ım elemanlarının her birinin takım çeliklerindeki özel etkisi, özet olarak şöyledir:

**Karbon:** Ani soğutma sertleştirilmesiyle, ala ımsız çeliklerde 1 ilâ 4 mm sertleştirilme derinliğine ulaşılması mümkündür. % 1 karbonun üzerinde, ulaşılacak en yüksek sertlik sabittir, fakat artan karbür miktarıyla aşınma direnci giderek yükselir.

**Mangan:** Dönüşüm hızını düşürmesinden dolayı, sertleştirilebilirliği artırır ve böylece daha büyük kesitlerde sertleştirilme sağlanır. Ancak, tane kabalaştırma da yapar ve menevî kırılma direncine sebep olur. Darbe ve basma zorlamalarında aşınma direncini arttıracak şekilde soğuk sertleştirilme eğilimi vardır.

**Silisyum;** Oksidasyona karşı dayanımı artırır, fakat aynı zamanda karbon azalması (dekarbürizasyon) eğilimini de artırır.

Elastiklik sınırını yükseltmesinden dolayı, silisyum ala ımlı çelikler iyi yayılma özellikli takımlar için kullanılır. Sıcak iş takım çeliklerinde, % 1 Si miktarıyla, yapılaşma eğilimi azaltılır.

**Krom:** Kritik soğutma hızını düşürür ve böylece sertleştirilebilirliği artırır. Özel karbürler tekkül ettirdiğinden, aşınma direncini, soğuk dayanıklılığı artırır. Takım çeliklerinde, en önemli ala ım elementlerinden biridir.

**Volfram:** Tane inceltici olarak etki eder, a ır ısınmaya kar ı hassasiyeti azaltır. A ınma direncini, sıcakta dayanımı ve menevi dayanımını iyile tiren özel sert karbürler meydana getirir. Olumsuz yönü, ısı iletme kabiliyetini azaltması ve bununla ba lantılı olarak ısı iletme de çatlak te ekkülü e ilimini arttırmasıdır.

**Molibden:** Menevi kırılmalı ına mani olur ve kuvvetli karbür yapıcı olarak sertli i, a ınma direncini ve menevi dayanımını arttırır.

**Vanadyum:** Zor çözülebilen karbürler te ekkül ettirmesi sonucu, yüksek ostenitle tirme sıcaklıklarında tane büyümesini engeller ve a ınma direncini arttırır. Bundan dolayı, yüksek vanadyum miktarlarında takımın parlatılabilirli i kötüle ir.

**Kobalt:** Karbür te kil edici elementlerin ostenitte çözülme kabiliyetlerini arttırır ve ayrıca sıcakta dayanımı, sıcakta sertli i, menevi dayanıklılı ını ve ısı iletme kabiliyetini yükseltir.

**Nikel:** Sertle me derinli ini iyile tirir ve taneyi inceltir. Nikel ilavesi, darbe ve çarpma zorlamalarıyla çalı an takımlarda süneklili i arttırması bakımından özel önem ta ır ( Topba , 1998).

### **2.3. Uygulama Alanları**

Sıcak i uygulamaları birkaç ana ba lık altında toplamak mümkündür; bunlar

- Enjeksiyon Döküm
- Ekstrüzyon
- Dövme

Sıcak i takım çelikleri, petrol rafineri kulelerin alevle temas eden kısımlarında, tünel tipi fırınların tabanlarındaki raylarda sıkça kullanılır. Sıcak i takım çelikleri sıcak ekillendirmenin yapıldı ı pres ve ahmerdanlardaki kalıplarda, plastik enjeksiyon

makinelerindeki kalıplarda, motor ve kompresör pistonları imalatındaki alüminyum dökümlerin yapıldığı kalıplarda ve savurma döküm kalıplarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çizelge 2.1’de sıcak iş takım çeliklerinin kullanım alanlarının genel bir özeti verilmiştir (Topba, 1998).

Çizelge 2.1 Sıcak İş Takım Çeliklerinin Kullanım Alanları (Topba, 1998).

Çelik Türü		Kullanım Yerleri
Malz.No	Sembol	
1.2343	X38Cr5Mo1V	Hafif metallerin işlenmesinde pres döküm kalıpları, soğuk kamaralı makinelerde piston ve silindir, metal ekstrüzyon pres kalıpları ve benzeri kalıplar
1.2344	X40Cr5Mo1V	Metal ekstrüzyon preslerinde yağ ve hava soğutmalı presleme ve delme mandrelleri, ayrıca hafif metal pres döküm kalıpları.
1.2365	X 32 Cr3Mo3V	Ağır metal alaşımları için pres döküm kalıpları ve karırlık içi burçları, presleme diskleri, tüm metaller için presleme ve delme mandrelleri
1.2713	55 NiCrMoV6	830...1370 MPa kullanım dayanımında her türlü kalıplar, cıvata ve somun üretiminde tarak, işirme ve delme takımları.
1.2714	56 NiCrMoV7	1270...1770 MPa kullanım dayanımında küçük takımlar, ekstrüzyon presleme için pres stampası ve stampa başlığı, form parça presleme takımları.

#### 2.4. AISI L6 Tanımı

Bu çalılı mada kullanılan AISI L6, malzeme numarası 1.2713 ile tanımlanan ve kullanılan ılı sıcak çelik dövme endüstrisinde 2713 olarak bilinen sıcak iş takım çelidir. AISI L6 sıcak çelik dövme sanayinde kalıp malzemesi olarak kullanılmaktadır. Çalılı ma sıcaklığı yaklaşık 400 °C’dir. İşkillendirilecek parça 900 °C –1200 °C aralığında kalıp içine konur ve yüksek darbe kuvvetleri ile işkillendirme yapılır. Hem sıcak hem de yüksek darbe kuvvetleri ile çalılı ldığından bu çelikte yüksek aşınma mukavemeti ve çalılı rken sertli in korunması gerekmektedir.

### 3. BORLAMA

#### 3.1. Bor Hakkında Genel Bilgi

Türkiye’de bol miktarda bulunan bor mineralleri çe itli makine parçaları, tekstil, kimya, seramik, plastik endüstrisi kollarında yaygın bir ekilde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra özellikle yüksek teknoloji uygulamalarında havacılık ve uzay sanayi ba ta olmak üzere yaygın olarak kullanılmaya ba lanmı tır.

##### 3.1.1. Borun tabiatta bulun u

Bor, yerkabu unun litosfer kayaçlarında boratlar halinde bulunur. Tabiatta 60 çe it bor minerali olmasına ra men, ekonomik olarak kullanım imkânı sa layan sadece bir kaç tane vardır. Ekonomik önemi olan Tinkal; kolemanit, kernit ve üleksit adı verilen minerallerden elde edilmektedir. Bu minerallerden Borikasit ( $H_3BO_4$ ), Anhidrik Borik Asit ( $BO_3$ ), Boraks Pentahidrat ( $Na_2O.2B_2O_3.5H_2O$ ), Boraks Dekahidrat ( $Na_2O.2B_2O_3.10H_2O$ ) ve Anhidrik Boraks ( $Na_2O.2B_2O_3$ ) gibi satılabilir ürün haline getirilir. Bu ürünler % 99,5 veya daha da üzerinde saflıklarda olabilmekte ve kristalin granüller veya toz halinde arz edilebilmektedir. Metalik bor % 90–99 arasında bor içerir. Ferrobor % 0,2–24 bor içeri i ile üretilir. Bu özellikle çelikte ala ım elamanı olarak kullanılmaktadır. Bornitrür (BN) ve Borkarbür ( $B_4C$ ) en sert malzemeler arasındadır (Yıldızlı, 2002).

##### 3.1.2. Bor elementinin özellikleri

Element olarak periyodik cetvelin 3’üncü grubunda bulunan borun, atom numarası 5, atom a ırlı ı 10.82, atom çapı  $1,78 \text{ \AA}$  ve ergime noktası  $2400 \text{ }^\circ\text{C}$ ’ dir. Bor:

2,31–2,35 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta amorf olarak iki şekilde bulunur. Kristalin borun kristal yapıları ve kafes parametreleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

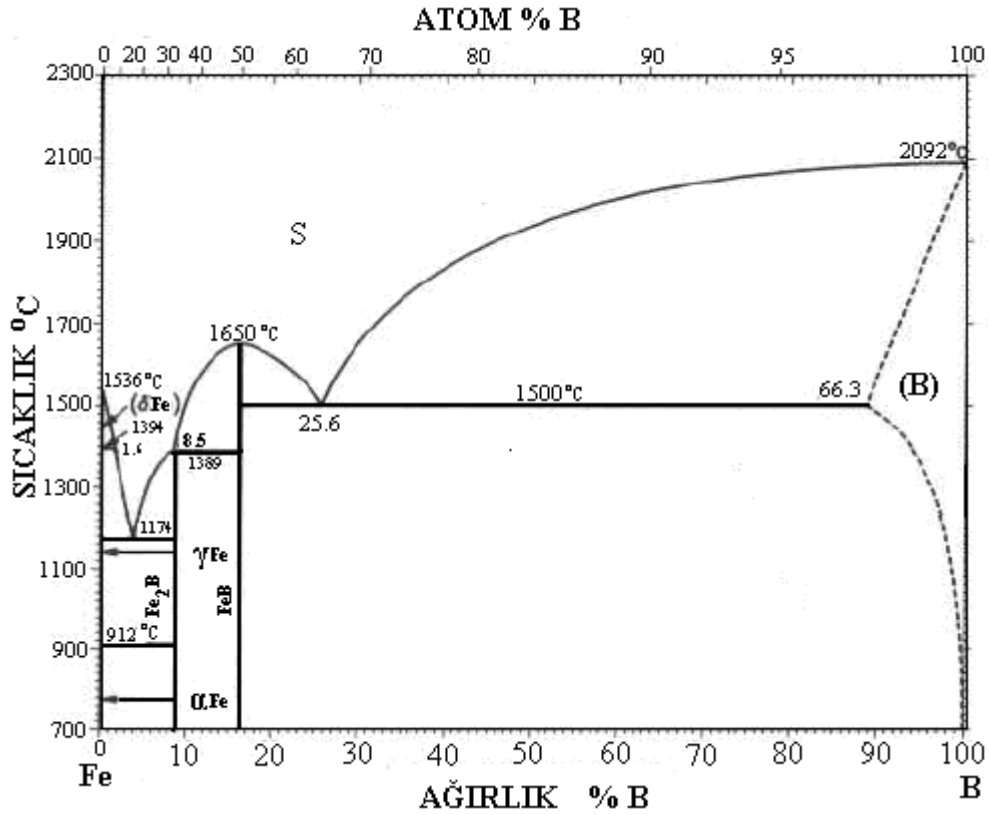
Çizelge 3.1 Borun kristal yapıları ve kafes parametreleri (Bindal, 1991).

Kristal yapı	Kafes Parametreleri ( Å )	
	b	c
Tetragonal	8,13	8,57
Hegzagonal	9,54	11,98

Demir ve bor arasındaki etki çok az açıklanabilmektedir. Bor atomunun çapı, demir için arayer atomu olarak biraz büyüktür. Diğer taraftan yer alan atomu olabilmesi için küçüktür. Bu nedenle borun demir içerisinde çözünübilirliği çok azdır. A<sub>3</sub> dönüşüm hattında çözünübilirliği demirinde, demirine oranla daha büyüktür. Buradan bor demir kafesinde de iken atom olarak bulunması gerektiği aksi halde çözünübilirlik oranının ters olması zorunluluğu görülür. O halde yüzey merkezli kafeste arayer atomu, hacim merkezli kafeste ise yer alan atomu halindedir. Bor daha çok yapısal hata olarak tane sınırlarında ve dislokasyonlarda bulunabilir (Yıldızlı, 2002).

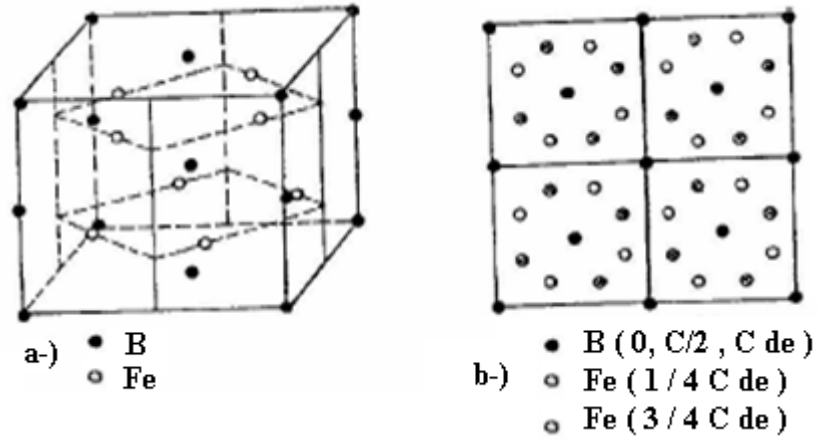
### 3.1.3. Demir-Bor denge diyagramı

Fe-B denge diyagramına göre; ağırlık olarak % 8,83 bor oranında Fe<sub>2</sub>B ve % 16,23 bor oranında FeB olmak üzere iki tür borür ve ergime noktası 1174 °C olan % 3,8 bor oranında bir ötektik oluşmaktadır. Fe-B sisteminde alaşımların elementleri, örneğin %1 C ötektik sıcaklığını 50 °C ağırlıkta düşürür. Çizelge 3.1’de Fe-B denge diyagramı gösterilmiştir.



ekil 3.1. Demir- Bor denge diyagramı ( Matuschka, 1980).

Demir borürlerin yapısı birçok ara tırmacı tarafından incelenmiş olup, FeB'un ortorombik yapıya sahip olduğu, birim kafesin 4Fe ve 4B atomundan meydana geldiği bilinmektedir. Bor atomları arasındaki mesafe (B-B) 1,77 Å'dur. Fe<sub>2</sub>B, 12 atomlu olup tetragonal yapıdadır. Fe<sub>2</sub>B kristalinin birim kafesi ve (001) düzlemindeki projeksiyonu ekil 3.2'de gösterilmiştir. FeB ve Fe<sub>2</sub>B'un bazı fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.



ekil 3.2. a ) Fe<sub>2</sub>B kristalinin birim kafesi ve b) (001) düzlemindeki projeksiyonu (Özsoy, 1996).

Çizelge 3.2. Borür tabakalarının karakteristik özellikleri (Matuschka, 1980)

ÖZELLİK	Fe <sub>2</sub> B	FeB
Bileşim (%B a .)	8.83	16.23
Kafes yapısı ve Parametreleri (°Å)	Tetragonal h.m a=5.078, c=4.249	Ortorombik a=4.053, b=5.495,c=2.946
Teorik yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Tem.43	Haz.75
Ergime Noktası (°C)	1390	1550
Isıl iletkenlik katsayısı (w/cm°C)	0.2-0.3	0.1-0.2
Isıl genleşme katsayısı (K-1)	7.85.10 <sup>6</sup>	23.10 <sup>6</sup>
Young modülü (kg/mm <sup>2</sup> )	30000	60000
Özdirenç (20°C) (μohmcm)	38	80
Curie Sıcaklığı (°C)	742	325

### 3.1.4 Bor-Demir bileşikleri

Borun atom çapı demirden %25 daha küçük olduğundan bu elementte katı eriyik

yapar. Demirde bor erirli i sıcaklı a ba lı olarak ferrit fazında 20-80 ppm, ostenit fazında ise 55-260 ppm kadardır. Bor östenitte ara yer katı eriyi i, demirde ise yer alan katı eriyik yapar.

Çeli in borlanması sonucunda en üst tabakada sırasıyla  $FeB_x$ , FeB ve  $Fe_2B$  olmak üzere çe itli borürler olu ur. Borür tabakasının altında bor atomlarının demir kristal kafesinde katı eriyik olarak çözünmü oldu u, difüzyon tabakası denilen çözündü ü ölçüde borca zenginle tirilmi bir kısım mevcuttur (Selçuk, 1994).

Yüksek karbonlu çelik ve dökme demirlerde  $Fe_3(B,C)$  ve  $Fe_{2-3}(B,C)_6$  formüllerindeki borkarbür fazları olu abilir. Bu fazlarda C ve B oranı de i ebilmektedir. Ala ımlı çeliklerde ise ala ım elementlerine ba lı olarak  $Cr_2B$ , CoB,  $CoB_2$ ,  $TiB_2$ ,  $NiB_2$  bile ikleri içerirler(Selçuk, 1994). Çizelge 3.3’de çe itli malzemelerde borlama ile elde edilen borürler ve mikrosertlik de erleri verilmi tir.

Çizelge 3.3. Borlama ile elde edilen borürler ve mikrosertlikleri (Sinha, 1991).

Borlanan alt yüzey	Borür tabakasındaki fazlar	Borür tabakasının sertli i (HV)
Fe	FeB Fe <sub>2</sub> B	1900-2100 1800-2000
Co	CoB Co <sub>2</sub> B Co <sub>3</sub> B	1850 1500-1600 700-800
Ni	Ni <sub>4</sub> B <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub> B Ni <sub>3</sub> B	1600 1500 900
Mo	Mo <sub>2</sub> B MoB <sub>2</sub> Mo <sub>2</sub> B <sub>5</sub>	1660 2330 2400-2700
Ti	TiB TiB <sub>2</sub>	2500 3370



### 3.2. Borlama İlemi

Çelik, dökme demir, nikel alaımları, titanyum alaımları ve sinterlenmi karbürlerin borlanması konusu üzerine birçok ara tırma yapılmı tır. Bu ara tırmalar sonucunda; borlanmı malzeme yüzeyinin çok yüksek sertli e, yüksek bir aınma direncine ve yüksek korozyon direncine sahip oldu u belirlenmi tir. Ancak borlamanın tek dezavantajı borlanmı tabakanın kırılmalı ıdır ( ahin, 1999).

Borlama termokimyasal bir yüzey sertle tirme i lemidir. Borlama, bor elementinin yüksek sıcaklıkta metal yüzeyine yayılması (difüzyonu) ile yüzeyde borür tabakası elde etme i lemidir. Borlama i lemi katı, sıvı, gaz, plazma ve iyon implantasyonu gibi yöntemlerle yapılmaktadır.

Yüksek sıcaklıkta (850–1100 °C) yapılan borlama i lemi ile demir yüzeyine bor yayılması gerçekleşir. Malzeme yüzeyinde FeB ve Fe<sub>2</sub>B ile bu bile iklerin karı mından olu an tek veya çift fazlı borür tabakaları elde edilir.

Tek faz Fe<sub>2</sub>B olu umu, iki faz Fe<sub>2</sub>B + FeB'nin olu umundan daha fazla istenir. Çünkü borca zengin FeB fazının kırılmalı ı yüksektir, bu yüzden FeB fazının olu ması istenmez. FeB'nin ısıl genleme katsayısı ( $23 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ), Fe<sub>2</sub>B'nin genleme katsayısından ( $7,85 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) büyüktür. İki fazlı sistemde olu an Fe<sub>2</sub>B ve FeB fazları arasındaki ısıl genleme farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlamlar olu ur. Bu çatlamları önlemek FeB fazını azaltmak veya FeB fazının olu masını önlemek ile mümkündür (Selçuk, 1994).

Geleneksel sertle tirme yöntemlerine kıyasla, borür tabakasının sahip oldu u özelliklerden kaynaklanan avantajları vardır. Borür tabakasının en büyük avantajı çok yüksek sertlik de erine sahip olması ve yüksek sıcaklıklarda sertli ini korumasıdır. Borlanmı çeliklerde olu an sertlik de erleri ile di er yüzey sertle tirme i lemlerinde elde edilen sertlik de erlerinin kar ıla tırılması Çizelge 3.4'de verilmi tir. Olu an borür tabakasının sertli i ile geleneksel sertle tirme yöntemlerinde elde edilen sertlik de erleri

arasındaki büyük fark açıkça görülmektedir. Borlama ile elde edilen de erler, sertleştirilmiş takım çeliğinden ve sert krom kaplamadan daha yüksek olup, volframkarbür ile elde edilir (Sinha, 1991).

Yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayısı kombinasyonu, bulaşma adhezyon ve abrazyon önlenmesi üzere korozyon ve yüksek sıcaklık oksidasyonu hasarına karşı önemli dayanıklılık sağlar. Az alaımlı çeliklerin asitlere karşı dayanımlarını (sülfürik, hidroklorik ve fosforik asit) arttırabilir. Ostenitik paslanmaz çeliklerin hidroklorik asitlere karşı dayanımını arttırır (Özbek vd., 2004).

Çizelge 3.4. Farklı malzemelerde çelikle yüzey sertleştirilmesi ile elde edilebilecek sertlik değerleri (Sinha, 1991).

MALZEME	MİKROSERTLİK (HV)
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 kalıp çeliği	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 kalıp çeliği	630-700
Yüksek hız çeliği	900-910
Nitrürlenmiş çelik	650-1700
Sementasyonlu düşük alaımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B <sub>4</sub> C	5000

Borlamanın avantajları özetlenir ise:

- Yüksek sıcaklıklarda borür tabakası sertli ini korur.
- Borlama, demir esaslı malzemelerin korozyon-erozyon dayanımını gerek alkali ortam gerekse seyreltik asit çözeltileri içerisinde korur ve bu özelli i sayesinde endüstride geni bir uygulama alanı bulur.
- Borlanımı yüzeyin oksidasyon direnci 850 °C'ye kadar etkili olur.
- Oksitleyici ve korozif ortamlarda çalı an parçaların yorulma dayanımlarını artırır ve servis ömrünü uzatır.

Borlamanın bazı dezavantajları şöyle sıralanabilir:

- Borür tabakası darbeli yüklere kar ı dayanıksızdır.
- Borlama i leminin, gaz sementasyon ve plazma nitrürasyon i lemlerine göre, i letme giderleri daha fazladır ve uygulanması daha zordur.
- Karbürlenmi veya nitrürlenmi çeliklere göre, borlanımı ala ımlı çeliklerde temas yorulma dayanımı (pullanma dayanımı) dü üktür.
- lem sonucunda parçanın ölçülerinde, borlama tabakasında %5-25'i kadar hacim geni lemesi oldu u için de i meler olur (Sinha, 1991).

### 3.3. Borlama Yöntemleri

Esas itibariyle bir yayınma i lemi olan borlama, karbürleme ve nitrürlemeye benzer. Borlama ortamı ise, bor kayna ı (bor veya bile ikleri), aktivatör, dolgu veya deoksidantlardan olu ur. Aktivatörler tabakanın düzenli büyümesine ve olu umuna etki ederler. Dolgu ve deoksidantlar ise borlama sıcaklı nda oksijeni tutarak redükleyici bir ortam olu tururlar ve ayrıca borlama maddelerinin ana malzemeye yapı malarını önlerler.

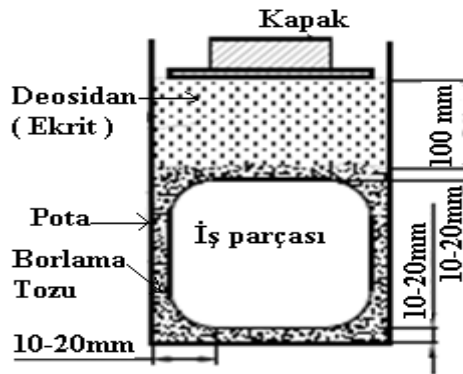
Borlama i lemi, borlanacak malzemelerin özelliklerine göre 700–1000 °C sıcaklık aralı nda, yakla ık 1-12 saat süre ile katı, pasta (macun), sıvı veya gaz fazındaki bor verici ortamlarda bekletilerek yapılır. Borlama yöntemleri bor verici kaynakların fiziksel durumlarına göre sınıflandırılırlar

### 3.3.1 Katı borlama yöntemi

Katı ortamda borlama iki farklı şekilde yapılmaktadır. Birincisi toz ortam, diğeri ise pasta (macun) yöntemidir. Bu iki yöntemde de kullanılan bor verici ortam aynıdır. Toz ortamda kullanılanlar en ince tanelerden oluşmaktadır. Macunlama da ise aynı maddeler macun haline getirilmiştir.

#### 3.3.1.1 Toz ortamda borlama

Yüzeyi borlanacak olan malzeme, toz halindeki bor verici ortam içerisinde 800–1100 °C sıcaklıklarda 2–10 saat bekletilerek borlama işlemi yapılır. Borlama tozu ısıya dayanıklı çelik saç kutu içine konular ve borlanacak malzeme bu tozun içine yerleştirilir. Kullanılan toz parçanın tüm yüzeylerinde en az 10 mm kalınlığında olmalıdır. Kutuların ağız kısmı bir kapak ile kapatılarak önceden belirli bir sıcaklığa ısıtılmış fırın içine konur. Fırın kapağı kapatılarak fırın sıcaklığı borlama sıcaklığına yükseltilir. Borlama süresi kadar bekletildikten sonra kutu fırından alınarak soğutulur ve parça içinden çıkartılır. Bu sırada çelik kutunun kapağı kutunun üzerinde kendi ağız kısmında bulunmalıdır. Eğer işlem normal atmosferde yapılacak ise kapak sıkıca kapatılmalıdır. Bu yöntem koruyucu gaz atmosferi içinde de yapılabilir.



Şekil 3.3. Katı borlama yöntemininematik resmi (Sinha, 1991).

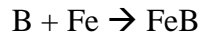
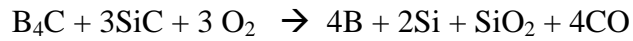
Borlama ortamının ana bileşenleri borkarbür, ferrobor ve amorf bordur fiziksel özellikleri Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Katı borlama yönteminde kullanılan maddelerin bazı özellikleri (Bozkurt, 1984).

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

Toz ortam borlamasında B<sub>4</sub>C en çok kullanılır. Aktivatör olarak sodyum bor florür, potasyum bor florür, baryum florür, sodyum karbonat, amonyum klorür ve redükleyici olarak silisyum karbür, grafit ve sodyum klorür gibi maddeler kullanılır.

Katı borlama prosesinde yer alan reaksiyonlar şunlardır:



Literatürde bulunan katı ortam borlama bileşimlerine ait bazı örnekler aşağıda verilmiştir (Sinha, 1991).

1. Ferrobor + %10-15NBF
2. %95 BC + %5 NaF
3. %33 Amorf bor + %2 NHCl + %65AlO
4. %80 BC + %20 NaCO
5. %98 BC + %2 KBF
6. %50 Amorf bor + %1 NHF.HF + % 49 AlO
7. % (7,5–40) BC + % (2,5–10) KBF + % (50–90) SiC
8. %84 BC+ % 16NaBO<sub>7</sub>

9. %95 Amorf bor + % 5KBF
10. %20 BC + %5 KBF + %75 Grafit
11. % (40–80) BC + % (20–60) FeO
12. %100 BC

Borlama işlemi sonucu oluşan FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazları arasındaki ısıl genleşme farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlaklar meydana gelmektedir. Bu durum bazı endüstriyel uygulamalar için borlamayı kabul edilemez kılar. Bu olumsuz etkiyi yok etmenin çaresi oluşan fazlardan birini azaltmak ya da ortadan kaldırmaktır. Bu faz FeB fazıdır. Katı ortam borlamasının kullanılması bu sonucu mümkün hale getirmiştir. H. P. Kehler tarafından bor kaynağı olarak BC, aktivatör olarak KBF, deoksidant ve dolgu malzemesi olarak SiC kullanılmıştır. Bu sayede tek fazlı (Fe<sub>2</sub>B) borür tabakalar ya da FeB oranının önemli ölçüde azaldığı tabakalar elde edilmiştir (Özsoy, 1996).

### **3.3.1.2 Pasta ( Macun ) borlama**

Kutu borlamanın zor ve pahalı olduğu veya fazla zaman kaybının olduğu durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Karmaşık şekilli parçaların tamamen veya kısmen seri bir şekilde borlanması, borlama pastası ile yapılabilir. Bu süreçte %45 B<sub>4</sub>C ve %55 kriyolit (Na<sub>3</sub> AlF<sub>6</sub> ilaveli) veya geleneksel borlama toz karışımını B<sub>4</sub>C+SiC+ KBF<sub>4</sub> iyi bir bağlayıcı ile (metil selülozun sulu çözeltisi gibi) uygulanmaktadır. Hazırlanan borlayıcı karışım yani pasta, malzemenin üzerine sürülerek veya püskürtülerek 1–2 mm civarında kalınlıkta tabaka oluşturulmakta ve kurutulmaktadır. İnce, demir esaslı malzemelere geleneksel fırınlarda 800–1000 °C arasında 5 saat süreyle uygulanmaktadır. Bu işlemde koruyucu atmosfer olarak Ar, NH<sub>3</sub> veya N<sub>2</sub> kullanılmaktadır. Büyük parçaların veya seçilmiş alanların borlanması için oldukça elverişlidir (Sinha,1991; Özbek,2000).

Katı borlamanın avantajları:

- Borlama sonrası temiz bir yüzey çıkmaktadır.

- Özel teknik gerektirmez.
- Kolay elde edilebilir.
- Toz terkihi de i tirilebilir.
- Minimum donanım ve güvenli olması sıralanabilir.

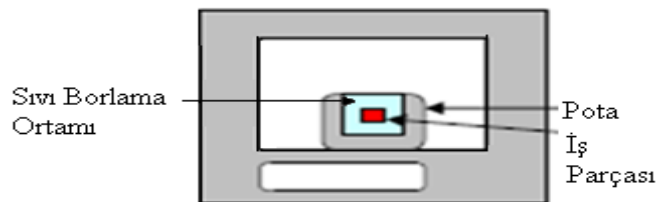
Dezavantajları:

- Yüzeyde bor bile imi homojen de ildir.

### 3.3.2 Sıvı borlama yöntemi

Bor bile ikleri, aktivatör ve redükleyici maddelerden olu an erimi tuza, i parçasının daldırılması ile uygulanan yöntemdir. Daldırma süresi borlama süresidir. Borlama i lemi 900 – 1100 °C sıcaklıkta ve 2 – 9 saat süre ile yapılır. Bu yöntemin dezavantajı sıcaklıktır. Sıcaklı ın 850 °C'nin altına dü mesi durumunda erimi boraksın akıcılı ı azalaca ından borlama imkânsız hale gelecektir (Bayça ve ahin, 2004).

lemde susuz boraks ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), susuz borik asit ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ), metaborik asit ( $\text{HBO}_2$ ), boraks, borkarbür gibi bor bile ikleri kullanılır. Silisyum karbür, ferrosilisyum, grafit, NaCl, Al gibi redükleyiciler kullanılır. Borlayıcı ortamın sıvı olması için bor bile iklerinin veya NaCl gibi eriticilerin miktarı yüksek olmalıdır. Böylece eritici olan bu maddeler di er maddeleri de eriterek sıvı eriyik olu turur.

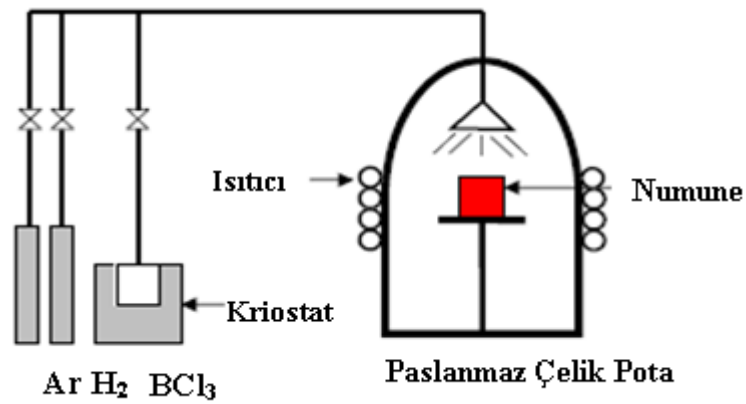


ekil 3.4. Sıvı borlama ünitesi (Bayça ve ahin, 2004).

Sıvı ortam borlaması sırasında borlanan metal ile redükleyici madde arasında galvanik pil oluşur. Aktif bor oluşumu sırasında metal yüzeyinde katodik bir reaksiyon olurken, redükleyici madde yüzeyinde anodik bir reaksiyon olmaktadır. Bu işlem için borlanacak metal ile redükleyici madde taneleri arasında elektrokimyasal farkın bulunması gerekir. Difüzyon reaksiyonu esnasında katot potansiyeli, yüzeyde oluşan fazın ( $FeB$ ,  $Fe_2B$ ) potansiyel de erini alır. Katı eriyik oluşum esnasında yüzeyde yayılan elementin konsantrasyonundaki değişimle birlikte sürekli değişir. (Bayça ve Şahin, 2004)

### 3.3.3. Gaz borlama yöntemi

Borlama ortamının gaz fazında olduğu borlama işlemidir. Borlama işlemi Ar ve  $H_2$  gazlarının ve evapotartörde gaz haline getirilmiş bir bor kaynağının belirli karışımının, dış ortama kapalı paslanmaz çelik bir odadaki numune üzerine püskürtülmesiyle yapılır. Şekil 3.5’de gaz borlama yöntemiematik olarak gösterilmiştir (Bayça ve Şahin, 2004).



Şekil 3.5. Gaz borlama ünitesi (Bayça ve Şahin, 2004)

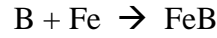
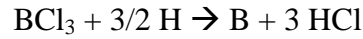


Gaz borlamada gazla tırılabilen  $\text{BCl}_3$  (bor halitler),  $\text{BF}_3$ ,  $\text{B}_2\text{H}_6$  (diboran) ve TEB (trietil boran) gibi bor bileşikleri ve redüktan olarak hidrojen gazı kullanılmaktadır. Gaz borlama işleminde genellikle bor halitler ve diboran kullanılmaktadır. Diboran ve bor halitlerin gazları zehirli ve patlayıcıdır. Çevreyi kirletici etki yaptığından ticari kullanımı sınırlıdır. Gaz borlamanın avantajları gaz sirkülasyonu sonucu daha uniform bir bor dağınıklığının sağlanması, sonradan temizleme gerektirmediği için kolay elde edilmesidir (Bayçacı ve Şahin, 2004).

Gaz borlama reaksiyonları şunlardır. Gaz borlamada bor triklorür ısı ile aktive edilir.



Burada hidrojen  $\text{BCl}_3$ 'ü redükler. Böylece bor, demire yayılır. Reaksiyon bileşenleri iki amaçta olur.



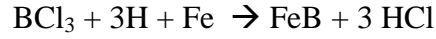
Gaz borlamada diboran ve bor klorür gazlarına alternatif olarak zehirsiz organik bor kaynakları trimetil borat, TMB,  $\text{B}(\text{OCH}_3)_3$  ve TEB (trietil boran),  $\text{B}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$  boran trietil amin gibi maddeler kullanılmaktadır (Bayçacı ve Şahin, 2004).

### 3.3.4. Plazma borlama yöntemi

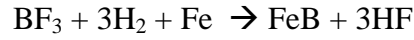
Katı haldeki bir maddeyi enerji vererek sıvı, sıvı haldeki maddeyi enerji vererek gaz ve gaz durumdaki maddeyi enerji vererek plazma haline getirmek mümkündür. Plazma, içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötral atom veya molekül içeren karışımdır. Uygulamada plazma, ısı enerjisi verilerek, ısıyla veya elektriksel bozulma ile elde edilir. En yaygın kullanılan plazma yöntemi elektriksel bozulmadır.

Bir elektrik gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa belirli aralıklarla gerçekleşen süreçte uygulanan gerilim plakalar arasındaki gazın delinme geriliminin üzerinde ise, bu iki plaka arasında bir elektrik akışı olur. Plazma borlama  $\text{BCl}_3$ ,  $\text{BF}_3$ ,  $\text{B}_2\text{H}_6$  ve TEB gibi bor bileşikleri ve redüktan olarak hidrojen gazı kullanılarak, 800–1100 °C sıcaklıkta, yaklaşık 2–10 Pa gibi düşük bir basınçta gerçekleştirilen bir plazma içerisinde yapılan borlamadır. Klasik borlama, toz borlama ve gaz borlama gibi yöntemlerin çevreye kirlenici etkisi nedeniyle son yıllarda plazma borlama yöntemi daha yaygın olarak çalışılmaktadır (Bayçacı ve Şahin, 2004).

Plazma borlama reaksiyonları şunlardır:



Bor florür ( $\text{BF}_3$ ) ile borlama reaksiyonu



Plazma borlamanın avantajları yüksek enerji etkinliği, minimum çarpılma, düşük işlem sıcaklığıdır. Plazma borlamanın dezavantajları  $\text{BCl}_3$  ve  $\text{B}_2\text{H}_6$  gazları kullanılmasıdır. Bu gazlar, pahalı, zehirli, patlayıcıdır ve korozyona neden olmaktadır (Bayçacı ve Şahin, 2004).

### 3.4. Borlanabilen Malzemeler

Bütün demir esaslı malzemeler, örneğin yapı çelikleri, sementasyon çelikleri, ıslah çelikleri, takım çelikleri, çelik döküm, gri dökme demir, sinterlenmiş demir ve çelikler borlama için uygundur. Demir esaslı malzemelere ek olarak bakır element ve bileşikleri de borlamak mümkündür (Matuschka, 1980). Refrakter malzemeler (W, Ta, Mo, Zr, Nb), karbürler (özellikle kobalt ile bakırlı WC) ve nikel esaslı alaşımlara bakır ile uygulanarak borlu tabakalar elde edilmektedir. Titanyum ve titanyum alaşımlarında

borlama sonucu a lımmaya dayanıklı  $TiB_2$  tabakası elde edilmektedir. Titanyum ve titanyum ala ımlarının borlanması tercihen 1000–1200 °C arasındaki sıcaklıklarda yapılmalıdır. Titanyum ve refrakter metaller üzerinde olu an borür tabakasının sertlik de eri nikel ve kobalt üzerinde olu an tabakaya göre çok yüksektir (Sinha, 1982). Borlama i lemi bakır ve ala ımlarına da tatbik edilebilmektedir, fakat dü ük ergime sıcaklı ına sahip çinko ve alüminyuma uygulanamamaktadır (Bozkurt, 1980). Bahsedilen malzemelerin borlama i lemleri demir esaslı malzemelerin borlanmasından farklı de ildir (Matuschka, 1980).

### 3.5. Ala ım Elementlerinin Borlamaya Etkisi

Ala ım elementleri borür tabakası ile matris ara yüzeyindeki kristallografik düzeni ve faz bile enlerini etkilemektedir. Aynı e kilde ala ım elementleri borür tabakasının kalınlı ını da etkilemektedir. Nitekim saf demirde tabaka kalınlı ı, ala ımlı çeliklerdekinden daha yüksektir. Ala ım elementleri, bor difüzyonunu dü ürmekte, matris ve kaplamanın özelliklerini de i tirmektedir (Sinha, 1991).

Nikel içeren ala ımlarda borür tabakası kalınlı ındaki azalma, krom içeren ala ımlardan daha azdır. Nikel demir borürler içerisinde çok dü ük bir çözünme e ilimi gösterirken, krom matriksten tercihli olarak borürlerin içerisine girmektedir. Karbon, borlama sırasında çekirde e do ru yayılmaktadır. Karbon konsantrasyonunun artması ile borür tabakasının kalınlı ının azaldı ı ve  $Fe_2B$  tipi faz ile matris ara yüzeyinin oldukça düzenli oldu u gözlemlenmi tir (Bindal, 1991). Karbon,  $FeB$  ve  $Fe_2B$  tipi fazlarda çözünmeyip  $Fe_3C$ ,  $Cr_3C$ ,  $Fe_6C_3$  gibi karbürler e klinde matris yakınındaki alanlarda birikti inden bunun borlama mekanizmasını etkiledi i ve söz konusu tabakayı daha sıkı ve sert yaptı ına inanılmaktadır (Bindal, 1991).

Silisyum ve alüminyum da karbon gibi davranarak, bor tabakası içerisinde çözünmezler. Bor atomları tarafından yüzeyden içeriye do ru itilirler. Yüksek miktarda Si ve Al içeren çelikler borlamaya uygun de ildirler. Çünkü bor tabakasının

altında yumu ak bir ferrit zonu olu tururlar. Bu da pullanma dayanımını azaltır (Sinha, 1991).

Krom çeliklerde borür tabakasının hem morfolojisine hem de derinli ine etki etmektedir. %4 Cr içeren çeliklerde kolonsal (asiküler) karakterde ve derinli i 65–95 µm kalınlıklı borür tabakaları elde edilirken, %12 krom içeren çeliklerde ise 65 µm kalınlı nda ve düz karakterde borür tabakası elde edilmektedir. %26 Cr içeren çeliklerde ise borür tabakasının kalınlı ı birkaç tanesi hariç 5 µm’yi a mamaktadır. Krom atom numarası demirden dü ük bir element oldu undan borca en zengin olan (Fe,Cr)B’ye öncelikle ve sistematik olarak matristen faza girerek yüzeye do ru yayınmaktadır. Kromlu ala ımların borür tabakalarının karakterleri kromsuz ala ımlar ile mukayese edildi inde, kromlu ala ımların karbon yüzdelerine ba lı olarak borür tabakalarının çok daha ince oldukları ve oldukça düzgün bir borür tabakası/matris ara yüzeyine sahip oldukları görülmü tür. Çeliklerin borlanmı tabakalarında mevcut (Fe, Cr)B ve (Fe,Cr)<sub>2</sub>B fazlarının sertli i krom miktarının artmasıyla sistematik olarak artar. Bu fazların sertliklerini ölçmek çok zordur. Ara yüzey bölgelerinde elde edilen sertlik ölçümleri kaplama tabakası sertli inden daha dü ük de erler vermektedir (Bindal, 1991).

Borlanmı numunelerde, borlu tabaka /matris ara yüzeyleri artan nikel miktarı ile daha da düzenli olmaktadır. Yüksek nikel oranı borür tabakasının kolonsal yapısını azaltmakta, yüksek poroziteyi ve kötü mekanik özellikleri beraberinde getirmektedir (Bindal, 1991).

Krom ve mangan atom numaraları demirden daha dü ük oldu undan borlanan malzemenin içinden yüzeyine do ru yayınır. Oysa nikel ve karbon, krom ve manganın tersi yönünde yayınmaktadır (Bindal, 1991). Ayrıca manganın kırılma toklu una olumlu, kromun ise olumsuz etki etti i dü ünülmektedir (Selçuk vd., 2003).

Vanadyum, kararlı bor bileşikleri yapar (VB ve  $V_2B_3$  gibi). Vanadyum borürleri Ti, Cr ve Zr borürleri gibi yüksek ergime sıcaklığı, yüksek sertlik ve yüksek aşınma dayanımı gösterir (En, 2004).

### 3.6. Borür Tabakası

Borlama sonrası yapıda borür tabakalarına ilaveten geçiş bölgesi ya da difüzyon bölgesi olarak tanımlanan bir tabakada oluşabilmektedir.

#### 3.6.1. Borür tabakasının gelişimi

Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucu oluşan tabaka, genellikle demir borürlerin çekirdeklenmesi ve gelişimi şeklinde meydana gelmektedir. Demir borürler termal ve elektrik iletkenliği gibi metal özelliklerinden başka yüksek sertlik gibi tipik seramik özellikleri de gösteren bileşiklerdir. Demir borürler, kullanılan malzemeler ve işlemlerine bağlı olarak tek fazlı ya da birden fazla fazlardan oluşabilirler. Borür tabakasının oluşumunda başlangıç noktaları, tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları gibi mikro hatalar ile yüzey pürüzlülükleri ve çizikler gibi yüzeyin daha reaktif olduğu yerlerdir. Bu noktalarda  $Fe_2B$  çekirdekleri oluşur ve gelişirler. Yüksek saflıktaki demirde olduğu gibi demir-bor reaktifliğinin düşük olduğu ortamlarda da, bu noktalardan sadece birkaçı reaksiyona girer ve gelişmiş çekirdekler meydana gelir. Ortamın bor potansiyelinin daha yüksek olduğu durumda, metal yüzeyindeki daha az reaktif noktalarda devreye girerek sürekli bir tabaka elde edilir.  $Fe_2B$  fazının dış yüzeylerinde FeB ve  $FeB_{1+x}$  bileşiklerinin meydana geldiği tespit edilmiştir (Özsoy, 1996). Demir borür tabakalarının büyümesi genelde difüzyon kontrollü bir süreçtir (Bindal, 1991). Oluşacak borlu tabakaların kalınlığı, yayınma kanunlarına uygun olarak borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak parabolik ( $x^2 = D.t$ ) bir artış göstermektedir.

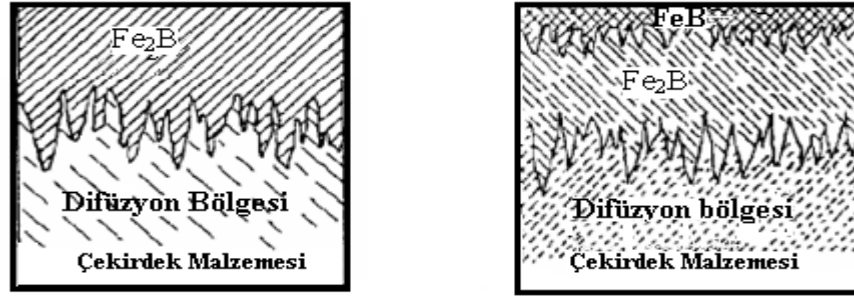
Borür tabakasının gelişimini anlatan başka bir mekanizma ise uçtan büyüme mekanizmasıdır. Bu mekanizmaya göre başlangıçta oluşan  $Fe_2B$  çekirdeği nispeten bir ekleme büyüme ve bor gradyanı boyunca yönelir. Bu durumda  $Fe_2B$  çekirdeğinin uç kısımlarında oluşan bölgesel yüksek gerilim alanları ve kafes distorsiyonları tabakanın kolonsal olarak büyümesini sağlar (Carbucicchio and Sambogna, 1985).

Çok fazlı borür tabakalarında  $Fe_2B$  üzerinde FeB'nin büyüme mekanizması demir üzerinde  $Fe_2B$ 'nin büyümesi ile aynıdır. Ancak aynı tabaka için FeB/  $Fe_2B$  ara yüzeyindeki kolonsallık,  $Fe_2B$  / matriks ara yüzeyine göre daha düşüktür.  $Fe_2B$  sünek bir matrikste büyürken,  $Fe_2B$  matriksinde büyüyen FeB çok sert bir fazdır. Bu farklılıklar, ara yüzeylerde çok farklı bölgesel gerilmelere ve kafes distorsiyonlarına sebep olur (Özsoy, 1996).

### 3.6.2. Borür tabakasının yapısı

Borlama esnasında uygulanan yöntem, kullanılan borlama kaynağı, borlanan malzemenin cinsi ve borlama esnasındaki işlem parametreleri oluşan borür tabakasının eğline ve özelliklerine etki eden faktörlerdir.

Alaümsüz çeliklerde borlama şartlarına bağlı olarak tek fazlı ( $Fe_2B$ ) ya da çok fazlı (FeB +  $Fe_2B$ ) borür tabakası oluşur. Borlama ortamındaki bor miktarı  $Fe_2B$  fazı oluşumu için gerekli olan miktardan fazla ise uygun sıcaklık ve zaman şartlarında borür tabakasında  $Fe_2B$  fazına ilaveten FeB fazıda oluşur. Alaümlü çeliklerde ise bunlara ilaveten alaüm elementine bağlı olarak  $Cr_2B$ ,  $TiB_2$ ,  $NiB_2$ ,  $CoB$  gibi bileşiklerden biri yada birkaçı oluşabilir (Selçuk, 1994). Şekil 3.6'da tek fazlı ve iki fazlı borür tabakaları görülmektedir. İki fazlı borür tabakalarında açık renkli olan faz  $Fe_2B$  koyu renkli olan da FeB'ten oluşur. FeB fazı birleşik tabakanın üst kısmını,  $Fe_2B$  ise alt kısmını oluşturur.



ekil 3.6. Tek ve iki fazlı borür tabakalarınınematik görünümü (Selçuk vd., 1995).

Borür tabakasının karakteristik özelliği di şeklinde bir yapıya sahip olmasıdır. Yayınma yönünün yüzeyden içeri do ru olmasından dolayı di e benzer bir yapı olur, özellikle saf demir veya ala ımsız dü ük karbonlu çeliklerde bu yapı açık bir ekinde ortaya çıkmaktadır. Karbon ve/veya ala ım elementlerinin miktarlarındaki artı la bor difüzyonu yava lamaktadır. Azalan bor difüzyonu ile olu an borür tabakasında hem kalınlık azalmakta, hem de borür tabakası ile ana malzeme ara yüzeyindeki di ekindeki yapı düzle mektedir (Bozkurt, 1984).

### 3.6.3. Geçi bölgesi

Geçi bölgesi, borlanmı metalde borür tabakası ile ana metal arasındaki ara bölgeyi tanımlar. Geçi bölgesi ile alakalı farklı görü ler olmakla birlikte yaygın olan görü , borlama sonucu olu an borür tabakasında karbon çözünemedi i için metalin yapısında bulunan karbon, bor difüzyonu sırasında yüzeyden iç kısımlara itilir. Bunun sonucu olarak karbonca zengin geçi bölgesi olu ur (Matuschka, 1980).

Geçi bölgesi, mikroyapı itibarı ile esas malzeme yapısından farklı bir görünüme sahiptir ve borür tabakasına göre daha kalındır (Bozkurt, 1984). Borür tabakası tarafından karbonun içeriye do ru itilmesi sonucunda geçi bölgesinde, esas malzemeye göre daha fazla perlit bulunaca ı, çe itli ara tırcılar tarafından ileri sürülmektedir. Bu bölgedeki bor da ılımını otoradyografi yöntemi ile inceleyen (Berzina vd., 1984), geçi

bölgesi kalınlığının, normal metalografik yöntemle belirlenene göre daha büyük olduğunu belirlemiştir. Aynı yöntemi kullanan (Bozkurt, 1984), geçi bölgesinin, borür tabakasından 10-15 kat kadar fazla bir kalınlığa sahip olduğunu ve bu bölgedeki tane boyutunun ana malzemeye göre daha büyük olduğunu tesbit etmiştir (Bozkurt, 1984).

Geçi bölgesi hakkında farklı bir yaklaşım ise; bu bölgedeki borun çeliklerde alaım elementi olarak gösterdiği etkiyi göstermesinden kaynaklanan farklı özelliklere sahip olmasıdır. Bu bölgenin ısıl işleme hassasiyeti, borun ostenit dönüşümünü yavaşlatmasındandır. Ayrıca bu bölgede gözlenen ostenit tane irilemesi de, borun alaım elementi olarak çeliklerde gösterdiği tipik özelliklerdendir (Bozkurt, 1984).

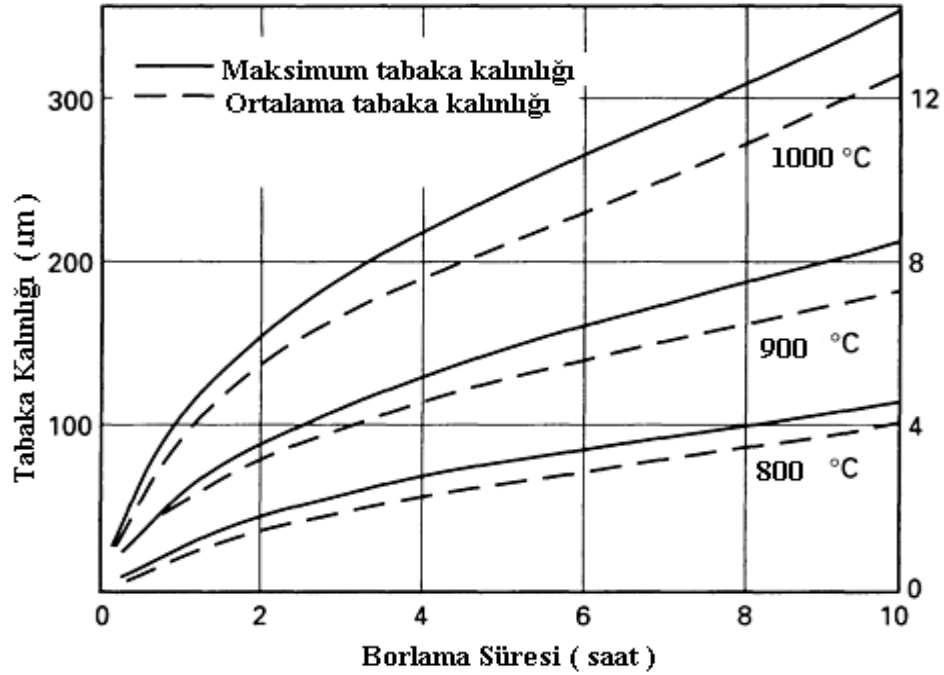
### **3.7. Borür Tabakasının Özellikleri**

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

#### **3.7.1. Tabaka kalınlığı**

Borlanan malzemenin cinsi, borlayıcı ortamın bileşimi, işleme ekli, sıcaklık ve süre borür tabakasının kalınlığına etki eden faktörlerdir. İşleme sıcaklığının Fe-B denge diyagramındaki ötektik sıcaklığın (1149 °C) altında olması gerekir. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda malzeme yüzeyi bozulabilir (Bozkurt, 1984). Zaman faktörü ise ekonomik açıdan belli bir derege geçmemesi gerekmektedir. Şekil 3.7'de Ck 45 çeliği ve Ekabor-I tozu kullanılarak yapılan çalımada tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir. Artan sıcaklık ve süre ile oluşan borür tabakasının kalınlığı da artmaktadır.





ekil 3.7. Ekabor-I ile borlanımı Ck 45 çeli inin tabaka kalınlı ının zaman ve sıcaklıkla de i imi (Matuschka, 1980).

Tabaka kalınlı ını sınırlayan bir di er faktörde kırılganlıktır. Tabaka kalınlı ı arttıkça kırılganlı ı da artaca ı için özellikle çift fazlı tabakalarda kalınlı ın fazla olmaması gerekmektedir (Fichtl, 1981).

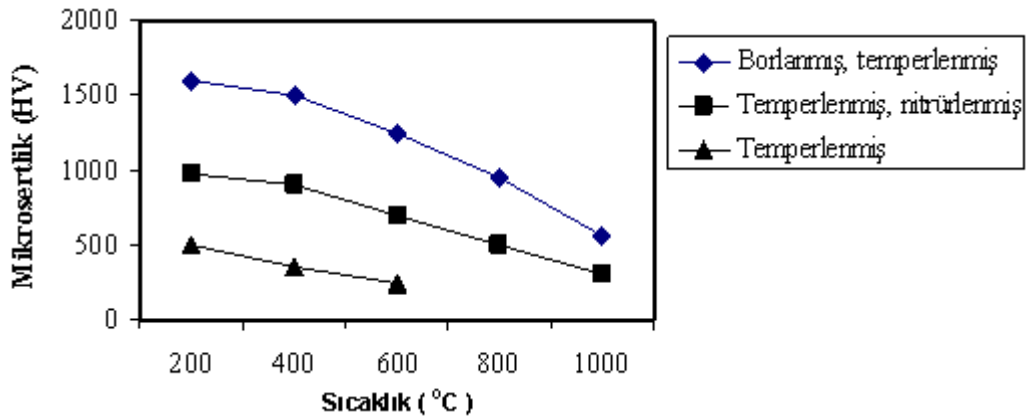
Çelik esaslı malzemeler için kullanım artlarına göre 20–200 µm tabaka kalınlı ı uygundur. Kırılganlık yönünden ala ımlı çeliklerde 100 µm, ala ımsız çeliklerde 200 µm kalınlı a, hatta darbesiz a ınmaya maruz parçalarda su vermemek kaydıyla 400 µm kalınlı a çıkılabilmektedir. Borlama sıcaklı ının artması tabaka kalınlı ını arttırmasına ilaveten poroziteyide arttırarak tabakanın gevrekli ine yol açar (Selçuk, 1994).

### 3.7.2. Tabaka sertli i

Borlamanın en büyük etkisi sertlik üzerine olup, ana malzeme cinsine ve yüzeyde olu acak borür fazlarına ba lıdır. FeB fazı Fe<sub>2</sub>B'den daha sert ve gevrektr.

Sertlik ölçümleri mikrosertlik yöntemi ile Vickers veya knoop uçları kullanılarak yapılır. Ölçümlerde büyük yüklerin kullanılması çatlama ve dökülme gibi nedenlerden dolayı hatalı sonuçlara sebep olur. Ayrıca büyük yükler tabakanın bozulmasına ve tabakanın altındaki bölgenin deformasyonuna sebep olabilir. Genel olarak 50–100 gr yüklerle ölçüm yapılır (Özsoy, 1996).

Borlama ile elde edilen yüksek sertlik de eri, 800–1000 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda kaybolmamaktadır (Geller, 1978). ekil 3.8'de 42CrMo4 çeli inde elde edilen farklı yüzey tabakalarının dinamik yüksek sıcaklık sertlik de i mleri gösterilmi tir.



ekil 3.8. 42CrMo4 çeli inde farklı yüzey tabakalarının dinamik sıcaklık sertlikleri (Ficht, 1987).

### 3.7.3 Aınma

Sürtünme katsayısı ve aınma dayanımı bir sistem özelliği olmakla birlikte, genellikle yüksek aınma direnci için malzemenin aındırıcıdan daha sert ve sürtünme katsayısının düşük olması istenir. Borlama ile bu özellikler büyük ölçüde sağlanır (Atik, 1997). Borlamanın diğer yüzey sertleştirme işlemlerine göre en önemli üstünlüğü yüzey tabakasının çok sert olması sürtünme katsayısının düşük olması ve borlamadan sonra ek bir ısıtılma işlemi gerek duyulmamasıdır. Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertlikleri ve yüksek aınma dirençleriyle karakterize edilirler. Bundan dolayı özellikle yüksek mertebede abrasiv ve adhesiv aınmaya ve erozyona maruz makine parçalarının ve sistem elemanlarının borlanması teknik ömrün uzatılmasında önemli katkılar sağlar.

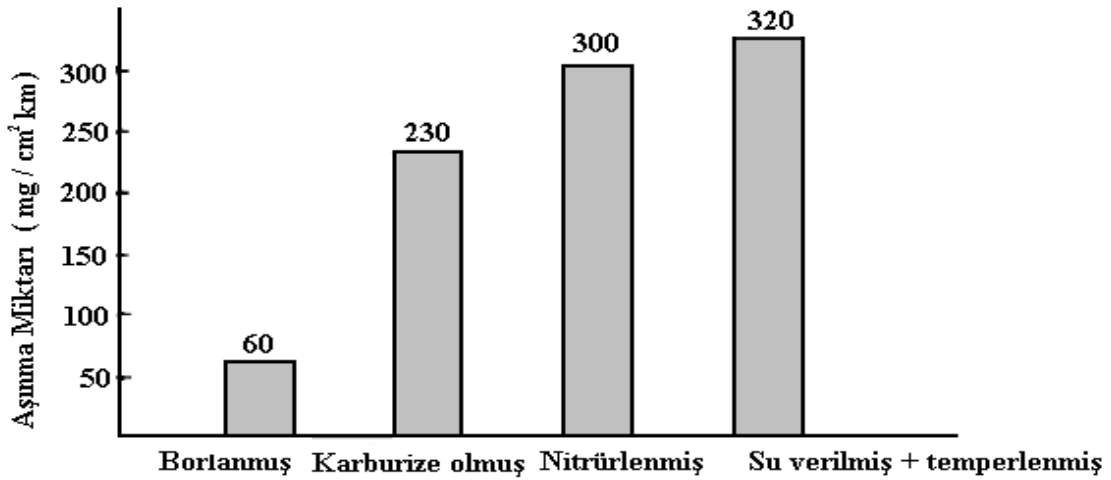
Borun oksijene karşı ilgisi fazla olduğundan yüzeyde koruyucu, ince bir oksit filmi oluşturmakta, bu oksit filmi yüzeyde yağlayıcı vazifesi görerek sürtünme katsayısını düşürerek yüzeylerin birbirine kaynamasını önlemektedir. Borlama ile WC'ün sertliğine eşdeğer sertlik, teflonun (PTFE) sürtünme katsayısına yakın sürtünme katsayısı elde edilir (Linial and Lavella, 1974). Çizelge 3.6'da bazı malzemelerin borlanmış ve borlanmamış durumdaki sürtünme katsayıları verilmiştir.

Çizelge 3.6. Bazı malzemelerin borlanmış ve borlanmamış durumdaki sürtünme katsayıları (Bozkurt, 1984).

Malzeme	Sürtünme Katsayısı	
	Borlanmış	Borlanmamış
Düşük karbonlu Çelik	0,17-0,19	0,585 - 0,595
Takım Çeliği	0,07 - 0,04	0,16 - 0,18
WC + Co Sinter Malzeme	0,1939 - 0,2335	0,2617 - 0,2773

Borlanmış çeliklerin aınma dirençleri sementasyon, nitrürasyon, sert krom kaplama ve su vererek sertleştirme ile elde edilen yüzeylere göre oldukça yüksektir. Çizelge 3.9 'da bu durum gösterilmiştir.

Darbesiz aınmanın söz konusu oldu u uygulamalarda, borlama ile yüzeyi sertleştirilmiş malzemeler başarı ile kullanılmaktadır. Kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı, sementasyonda sertleştirilmiş tabakanın yumuşamasına sebep olurken borlu tabakaya etki etmez.



ekil 3.9. Düşük karbonlu çelikte farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin aşınma davranışları (Ayter, 2005).

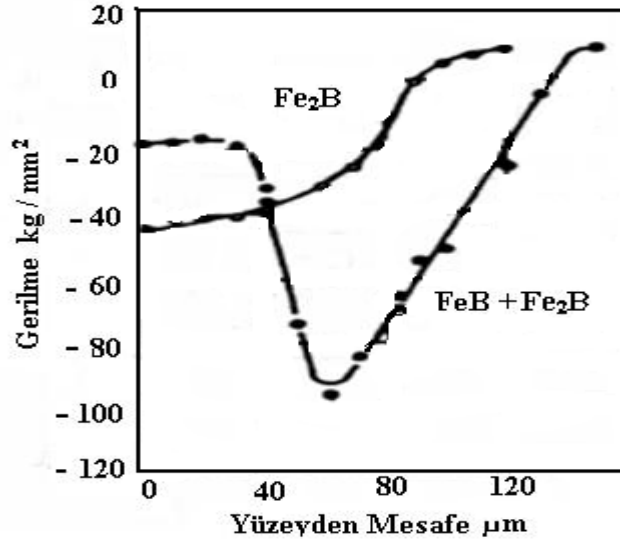
#### 3.7.4. İç gerilmeler

Metallerde borlama işlemi sonrası borür tabakasında ve borür tabakası–ana metal arasında iç gerilmeler oluşur. Malzemenin kimyasal bileşimi, borlama şartları ve uygulanan ısıl işlemler iç gerilmelere etki eden faktörlerdir. Tabakanın faz yapısı (tek fazlı veya çift fazlı) ve geometrisi de (düz veya girintili çıkıntılı) iç gerilmelerin oluşumuna etki eder (Bozkurt, 1984). İdeal bir tabaka için tek fazlı ve tabaka geometrinin girintili çıkıntılı olması istenir. İç gerilmeler, FeB, Fe<sub>2</sub>B ve ana malzemenin ısıl genleşme katsayılarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Çizelge 3.7’de borür tabakası ve saf demire ait ısıl genleşme katsayıları verilmiştir.

Çizelge 3.7. Borür tabakası ve saf demire ait ısıl genleşme katsayıları (Rile, 1974).

Malzeme	Isıl Genleşme Katsayısı
Saf Demir	$15,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
FeB	$23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Fe <sub>2</sub> B	$7,85 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Çift fazlı borür tabakalarında borlama sonrası Fe<sub>2</sub>B'de basma, FeB'de çekme gerilmeleri olur (Fichtl and Über, 1974). Bu gerilmeler, tabakanın çatlamasına ve FeB fazının pullanarak dökülmesine sebep olur. Tek fazlı ve çift fazlı tabakalardaki iç gerilme dağılımı Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Tek fazlı ve çift fazlı borür tabakalarındaki iç gerilme dağılımı (Babushkin and Polyakov, 1973).

Borlamadan sonraki uygulanan ısıl işlemler de iç gerilmelere etki etmektedir. Soğuma hızı arttıkça iç gerilmeler azalmakta ve en yüksek iç gerilmeler borlamadan sonra fırında soğutma artlarında gerçekleşmektedir (Babushkin and Polyakov, 1973).

#### 4. L TERATÜR ÖZET

Son yıllarda yapılan borlama çalı malarına bakılırsa, toz ortamda yada pasta (macun) ekinde tatbik edilebilme imkanı bulunan katı borlama yöntemleri kullanılarak yapılan borlama çalı larının pratik, güvenli ve borlama sonrası temiz bir yüzey elde edilebilmesi gibi ba lıca üstün özellikleri nedeniyle ve bir kısım yabancı firmaların patentli olarak üretti i katı borlama kaynaklarının kullanıldı ı çalı maların sayısı oldukça artmı tır.

Bu bölümde katı borlama konularında yapılmı deneysel çalı malardan bazıları derlenmi , yapılan çalı malardan borlama süresi ve sıcaklıkları, elde edilen sertlik de erleri ile tabaka kalınlıkları, tabakayı olu turan fazlar ve tabaka yapısı gibi de erleri alınmı tır.

Çelebi ve arkadaş ları 2004 yılındaki çalı malarında, AISI 8620 (21NiCrMo2) çeli ini Ekabor–II tozu ile açık atmosferli fırında, 950 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süreler ile borlamı lar ve i lem sonucunda numuneleri havada so umaya bırakmı lardır. Borlanmı yüzeylerin FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarından meydana geldi ini tespit etmi lerdir. Elde edilen borür tabakasının yakla ık kalınlıkları sırasıyla 80µm, 130 µm, 190 µm ve 220 µm ölçmü lerdir. Mikrosertlikleri ise yakla ık sırasıyla 1400 HV, 1500 HV, 1600 HV ve 1700 HV bulmu lardır.

Özbek 2000 yılındaki çalı masında, AISI M2 (%4,1C, %4,4Cr, %3Mo, %2,3 V, %1,9W), AISI M50 ve AISI W1 çeliklerini Ekabor II tozu kullanarak 850 °C, 950 °C ve 1050 °C’de 1–8 saat sürelerde atmosferik artlarda borlamı ve i lem sonucunda kutuları havada so utmu tur. Çalı mada borlanmı yüzeylerin 2 saatin altındaki borlama sürelerinde sadece Fe<sub>2</sub>B fazından, daha yüksek borlama sürelerinde ise FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarından meydana geldi i tespit edilmi tir. 850 °C’de 2 saat borlama sonucu elde edilmi mikrosertliklerini sırasıyla 1976 HV, 1655 HV ve 1766 HV; elde edilen borür tabakasının ortalama kalınlıklarını ise sırasıyla yakla ık olarak 3 µm, 6 µm ve 21

$\mu\text{m}$  bulmu tur.  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 2 saat borlama sonucu elde edilmi mikrosertlikler sırasıyla 2281 HV, 2440 HV ve 1690 HV; elde edilen borür tabakasının ortalama kalınlıklarını ise sırasıyla yakla ık olarak  $17\text{ }\mu\text{m}$ ,  $15\text{ }\mu\text{m}$  ve  $72\text{ }\mu\text{m}$  olarak bulmu tur.  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 4 saat borlama sonucu elde edilmi mikrosertlikler sırasıyla 2125 HV, 2121 HV ve 1708 HV; elde edilen borür tabakasının ortalama kalınlıklarını ise sırasıyla yakla ık olarak  $34\text{ }\mu\text{m}$ ,  $38\text{ }\mu\text{m}$  ve  $138\text{ }\mu\text{m}$  olarak bulmu tur.

Özbek ve arkadaşları 2004 yılındaki çalış malarında, AISI 440C (X105CrMo17) çeli ini Ekabor II tozu ile  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 2–8 saat sürelerde atmosferik artlarda borlamı ve i lem sonucunda havada so utma yapımlardır. Borlanmı yüzeylerin FeB, Fe<sub>2</sub>B, CrB, MnB ve Cr<sub>2</sub>B fazlarından meydana geldi ini tespit etmi lerdir. Elde edilen borür tabakalarının kalınlıklarını  $10\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$  arasında en büyük mikrosertlik de erini ise 2500 HV olarak bulmu lardır.

Nair 1996 yılındaki çalış masında, AISI 1020 (Ck20), AISI 1040 (C40) ve AISI 4140 (42CrMo4) çeliklerini Ekabor pasta ile argon gazı altında,  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 2 ve 5 saat süre ile borlamı tr.  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 2 saat borlama ile elde edilen borür tabakasının ortalama kalınlı nı sırasıyla  $45\text{ }\mu\text{m}$ ,  $43\text{ }\mu\text{m}$  ve  $35\text{ }\mu\text{m}$ , mikrosertliklerini ise sırasıyla 772 HV, 919 HV ve 919 HV olarak bulmu tur.  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 5 saat borlama ile elde edilen borür tabakasının ortalama kalınlı nı sırasıyla  $65\text{ }\mu\text{m}$ ,  $56\text{ }\mu\text{m}$  ve  $60\text{ }\mu\text{m}$ , mikrosertliklerini ise sırasıyla 1350 HV, 1400 HV ve 1770 HV olarak bulmu tur.

Bindal ve Özbek 2002 yılındaki çalış malarında, AISI W4 çeli ini Ekabor I tozu kullanarak  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' lerde 2, 4, 6, 8 saat sürelerle borlamı lardır. Borlama i lemi sonucunda kutular fırından çıkartıldıktan sonra havada so umaya bırakılmı tr. Borlama i lemi sonucunda yüzeylerde FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazları olu mu tur. Borlama süresi 4 saat civarında olan artlarda tek faz ( Fe<sub>2</sub>B ) 4 saat üstü artlarda çift faz olu mu tur. Proses zamanlarına ve sıcaklarına ba lı olarak tabaka kalınlıkları  $8\text{--}386\text{ }\mu\text{m}$ , mikrosertlik de erleri ise  $1407\text{--}2403\text{ HV}$  arasında de i im göstermi tir. Sıcaklık ve süreler arttıkça tabaka kalınlı ı ve sertlik arttı ı gözlemlenmi tir.  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  de 6–8 saatlerdeki borlama artlarında çatlaklar olu tu u gözlemlenmi tir. Tabaka kalınlı mın

300  $\mu\text{m}$ 'den fazla oldu u durumlarda borür tabakasında çelik yüzeyince devam eden FeB ve  $\text{Fe}_2\text{B}$  arasında çatlaklar olu mu tur.

Uslu ve arkadaşları, 2007 yılındaki çalı malarında, AISI 1040 ve AISI P20 çeliklerini Ekabor II tozu ile 800 °C, 875 °C ve 950 °C' lerde 2–4-6-8 saat sürelerde atmosferik artlarda borlama i lemüne tabi tutmu lardır. AISI 1040 çeli inde  $\text{Fe}_2\text{B}$ -FeB fazları olu mu tur. AISI P20 de ise bu fazlara ilave olarak ala ımlı çelik olmasından dolayı MnB ve CrB fazlarını gözlemlemi lerdir. AISI 1040 ve AISI P20'de olu an tabaka yapısı kolansal yapıda olu mu tur. Olu an tabaka kalınlıkları 10–180  $\mu\text{m}$  arası de i mektedir. Ölçülen mikrosertlik de erleri en yüksek 8 saat borlama süresinde elde edilmi olup AISI P20'de ölçülen de erler aynı artlardaki AISI 1040 'dan daha yüksektir, de erler yakla ık 1500–1650 HV arasındadır.

Culha 2008 yılındaki çalı masında, AISI 1020 ve AISI 1040 çeliklerini 900 °C 'de 2-4-6 saat sürelerde borlama i lemüne tabi tutmu tur. Borlama i lemi sonucunda borca zengin bölgelerde FeB, demirce zengin bölgelerde  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazı olu tu unu gözlemlemi tir. AISI 1020 çeli inde 2–4–6 saat sürelerde olu an FeB ve  $\text{Fe}_2\text{B}$  tabakalarının toplam kalınlıklarını sırası ile 50,9  $\mu\text{m}$ , 97,2  $\mu\text{m}$  ve 133,3  $\mu\text{m}$  ölçülmü tür. AISI 1040 çeli inde ise 86,6  $\mu\text{m}$ , 101  $\mu\text{m}$  ve 119,5  $\mu\text{m}$  ölçülmü tür. Mikrosertlik de erleri de sırasıyla AISI 1020'de 775 HV, 892 HV ve 1081 HV. AISI 1040' da ise 1015 HV, 1102 HV ve 1120 HV ölçülmü tür. Artan borlama zamanı ile mikrosertlik ve tabaka kalınlı ı arttı tır.

Genel, 2005 yılındaki çalı masında AISI H13 sıcak i takım çeli ini Ekabor I tozu kullanarak 800 °C, 900 °C ve 1000 °C' ler de 1-3-5 saat sürelerde borlamı tır. Borür tabaka kalınlı ı 7–65  $\mu\text{m}$  arasında de i im göstermekte olup en yüksek de eri 1000 °C'de 5 saatte 65  $\mu\text{m}$  olarak ölçmü tür. Mikrosertlik de erleri de 1650–2000 HV arasında de i im göstermektedir. Artan borlama sıcaklı ı ve süresi ile olu an borür tabakasının kalınlı ı ve sertli i de artı göstermi tir. Olu an borür tabakasının morfolojisi düzgün ve yo un olu mu tur. Bu olu um AISI H13 içerisindeki yüksek miktarda ki ala ım element miktarından ileri gelmektedir. FeB ve  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazları arasında



termal genleşme katsayı farklarından kaynaklanan iç gerilmelerden dolayı tabaka içerisinde çatlaklar meydana gelmiştir. Numuneler de geçi bölgesinde sertlik düğümleri gözlemlenmiştir ve bu düğümler borür tabakası önündeki Si miktarının fazla olmasına atfedilmiştir.

Ahın 2006 yılındaki çalışmasında AISI 1020, AISI 1040 ve DIN 1.2714 çeliklerini 900 °C’de 2–4 saat sürelerde Ekabor-I tozu kullanarak borlamıştır. Borlama sonrası oluşan tabaka kalınlıklarını 2 saatte 1.2714, AISI 1040 ve AISI 1020 çeliklerinde sırasıyla 25 µm, 62 µm ve 84 µm ölçmüştür. 4 saatte 50 µm, 95 µm ve 112 µm ölçmüştür. İçerdiği yüksek oranda alaşım elementlerinin Cr, Mo, Ni ve V etkisiyle 1.2714 çeliğinde oluşan tabaka daha ince olmuştur.

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışma iki amaçta gerçekleştirilmiştir. İlk amaçta hazırlanan numunelere 3 sıcaklık 4 farklı zaman gruplarında borlama işlemi uygulanmıştır. İkinci amaçta borlanan numunelere her koşul için metalografik, mekanik ve XRD incelemeleri yapılmıştır.

Borlama sonrası numunelerin yapısında meydana gelen değişiklikler optik mikroskop yardımıyla incelenmiştir. Sertlik dağınıkları mikrosertlik cihazı ile incelenmiştir. Bu bölümde deneylerde kullanılan malzemeler, kullanılan cihazlar deneylerin yapıları, elde edilen metalografik ve mekanik sonuçlara değinilmiştir. Tüm koşullarda elde edilen sonuçlar ve XRD analizleri hazırlanan grafikler ile değerlendirilmiştir.

### 5.1. Deneylerde Kullanılan malzemeler

Çalışma sürecinde kullanılan malzemeler, borlama işleminde kullanılan malzemeler ve borlama sonrası incelemelerde kullanılan cihazlar olarak sınıflandırılmıştır.

Deneylerde kullanılan malzemeler; borlanacak çelik ve borlama ortamı malzemelerinden oluşmaktadır. Borlama sonrası incelemelerde kullanılan laboratuvar malzemeleri numune hazırlama ve incelemelerini kapsamaktadır.

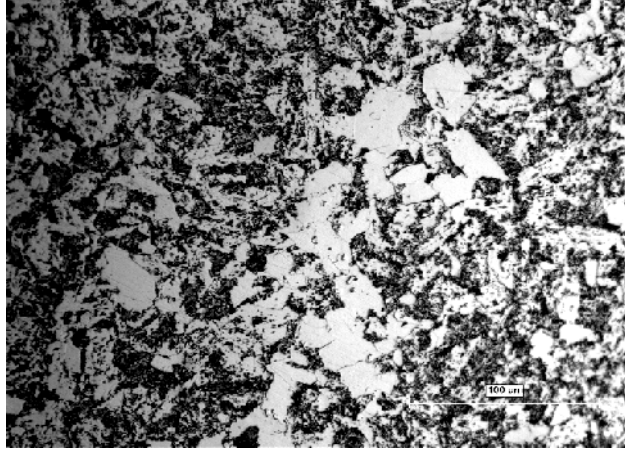
#### 5.1.1. Kullanılan çelik

Borlama deneylerinde kullanılan malzeme; AISI L6 ( 1.2713 ) tanımlanan ve kullanılan 11 sıcak çelik dövme endüstrisinde 2713 olarak bilinen sıcak iş takım çelidir.

AISI L6 sıcak çelik dövme sanayinde kalıp malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Deneylerde kullanılan AISI L6 çeli i kullanılmı bir kalıptan kesilmi tir. Malzemeye i lenebilirli ini kolayla tırmak için 880 °C'de 30 dakika yumu atma tavlaması yapılmı tir.

Borlama öncesinde hazırlanan numunelerin mikrosertlikleri 400HV ölçülmü tür. Borlama öncesi numunenin mikroyapı görüntüsü ekil 5.1'de gösterilmi tir. Spektral analiz sonuçları da Çizelge 5.1'de verilmi tir.



ekil 5.1 Borlama öncesi numunenin mikroyapı görüntüsü

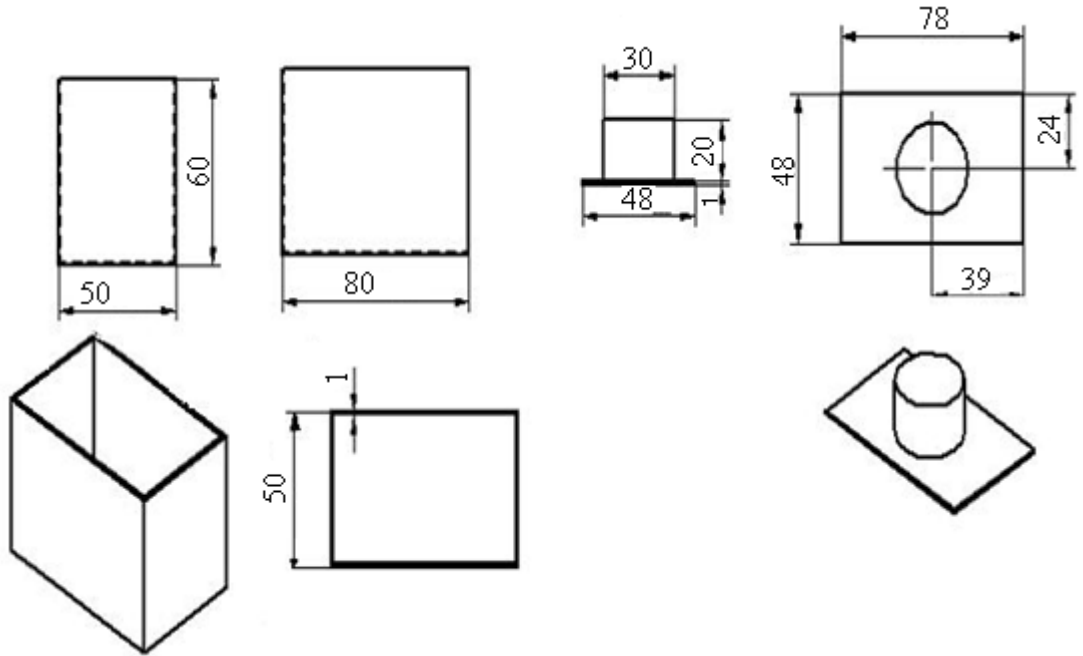
Çizelge 5.1 Deneylerde kullanılan AISI L6 çeli inin kimyasal bile imi.

<b>Kimyasal Bile im ( % A ırlık )</b>						
<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>V</b>
0,30	0,22	0,65	1,01	0,45	1,67	0,07

### 5.1.2. Borlama ortamı malzemeleri

Deneylerde borlama ortamı olarak Ekabor II ticari amaçlı tozu kullanılmı tır. Deoksidan olarak da Ekrit tozu kullanılmı tır.

Katı borlama i leminde kullanılmak üzere, numunelerin ve tozun içine konulaca ı ekil 5.2'deki ölçüleri mm olan teknik resme uygun AISI 304 paslanmaz çelikten kutular yapılmı tır.



ekil 5.2. Numunelerin borlanaca ı kutunun teknik resmi

### 5.2. Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Borlama i lemi Proterm marka 1500 °C kapasiteli ısıtma i lem fırınında yapılmı tır. Borlanan numunelerin metalografik incelemelere hazırlanmasında, kesme i lemi Struers

Discotom-5 ile yapıp kesilen parçaların kalıplanmasında Struers Citopress-1 cihazı kullanılmı tır.

Kalıba alınan numunelerin zımparalanması ve parlatılmasında Struers Tegra Force 5 kullanılmı tır. Parlatılan numuneler % 5 Nital ile da lanıp metalografik inceleme için hazır hale getirilmi lerdir.

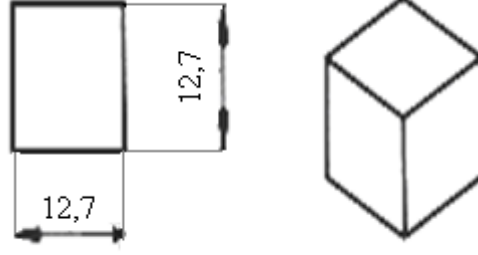
Metalografik incelemeler Nikon L-150 optik mikroskopta Clemex Pro Görüntü analiz yazılımı kullanılarak yapılmı tır. Sertlik ölçümlerinde Future Tech mikrosertlik cihazı kullanılmı tır. Borür tabakasının faz yapısını belirlemek için XRD analiz cihazı kullanılmı tır.

### **5.3. Deneylerin Yapılı ı**

Deneysel çalı manın planı; borlanacak numunelerin hazırlanması, borlama ortamının hazırlanması, borlama i leminin yapılması, borlama sonrası mekanik, metalografik ve XRD incelemelerinin yapılması a amalarından olu turulmu tur.

#### **5.3.1. Borlanacak numunelerin hazırlanması**

Deneylerde kullanılan 12,7 mm kenar ölçüsüne sahip numune ekil 5.3'de gösterilmi tir. Numunelerin yüzeyleri satıh ta lama tezgâhında ta lanarak borlama i lemne hazır hale getirilmi tir.



ekil 5.3. Borlanacak numunelerin teknik resmi.

### 5.3.2. Borlama ortamının hazırlanması

Hazır halde bulunan numuneler, paslanmaz kutuların içine etrafı bor verici kaynak olan Ekabor-II tozu ile sarılacak ekilde yerle tirilmi tir. Ekabor-II tozunun üstü Ekrit tozu ile kaplandıktan sonra kutuların kapakları kendi a ırlıkları ile kapatılmı tir. Her ko ul için gerekli sayıda kutu borlama i lemi için fırına girmeye hazır hale getirilmi tir.

### 5.3.3. Borlama i lemi

Borlama i lemi için hazır hale getirilmi kutular 920 °C, 980 °C ve 1040 °C ‘de her sıcaklık için 2–4–6–8 saat olmak üzere borlama i lemi için fırına sokulmu lardır. Kutular fırından çıkarıldıktan sonra havada so umaya bırakılmı tir.

### 5.3.4. Borlama sonrası metalografik incelemelerin yapılması

Borlama i lemi sonrasındaki mikroyapı ve borür tabakası incelemeleri optik mikroskopla yapılmı tir.

Metalografik incelemeler için seçilen numunelerin kesit yüzeylerin hazırlanmasında 120–240–320–400–1000-1200'lük zımparalar kullanılmı tır. Zımparalamadan sonra numuneler elmas pasta ile parlatılmı tır. Parlatılan yüzeyler iyice temizlenip sıcak havada kurutulmu tur. Parlatma i leminden sonra hazır haldeki kesitler % 5 nital ile da lanmı tır.

### **5.3.5. Borür tabakasının kalınlık ölçümlerinin yapılması**

Numunelerin yüzeylerinde olu an borür tabakalarının kalınlıklarının ölçümlerinde optik mikroskop kullanılmı tır. Tüm yüzey boyunca 30 adet ölçüm yapılmı tır. Ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak tabaka kalınlı ı bulunmu tur.

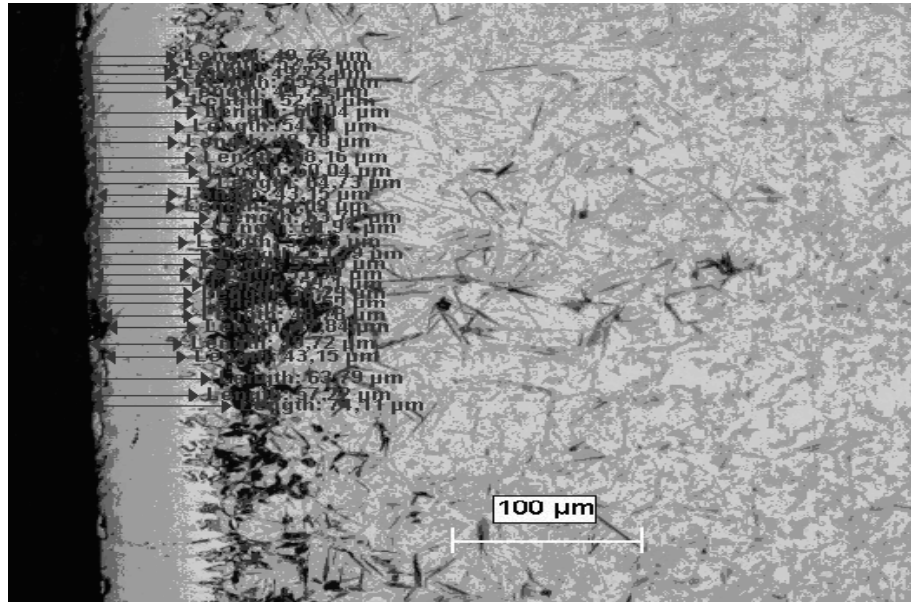
### **5.3.6. Borür tabakasının sertlik ölçümlerinin yapılması**

Sertlik ölçümleri vickers uç ile 10 sn boyunca 50 gr yük uygulanarak yapılmı tır. Yüzeyden ana metale do ru ölçümler yapılmı tır. Elde edilen de erler yüzeyden mesafeye, borlama sıcaklıklarına ve borlama sürelerine göre hazırlanan grafikler ile incelenmi tir.

## 6. DENEY SONUÇLARI ve RDELENMES

### 6.1. Tabaka Kalınlı ı

Borür tabakasının kalınlı ı yüzeyde yapılan 30 adetlik ölçümün aritmetik ortalaması alınarak belirlenmi tir. 920 °C'de 2 saat borlanmı numunede olu an borür tabakasının kalınlık ölçümlerini gösteren mikroyapı görüntüsü ekil 6.1'de gösterilmi tir. Ölçülen tabaka kalınlık de erleri Çizelge 6.1'de verilmi tir.

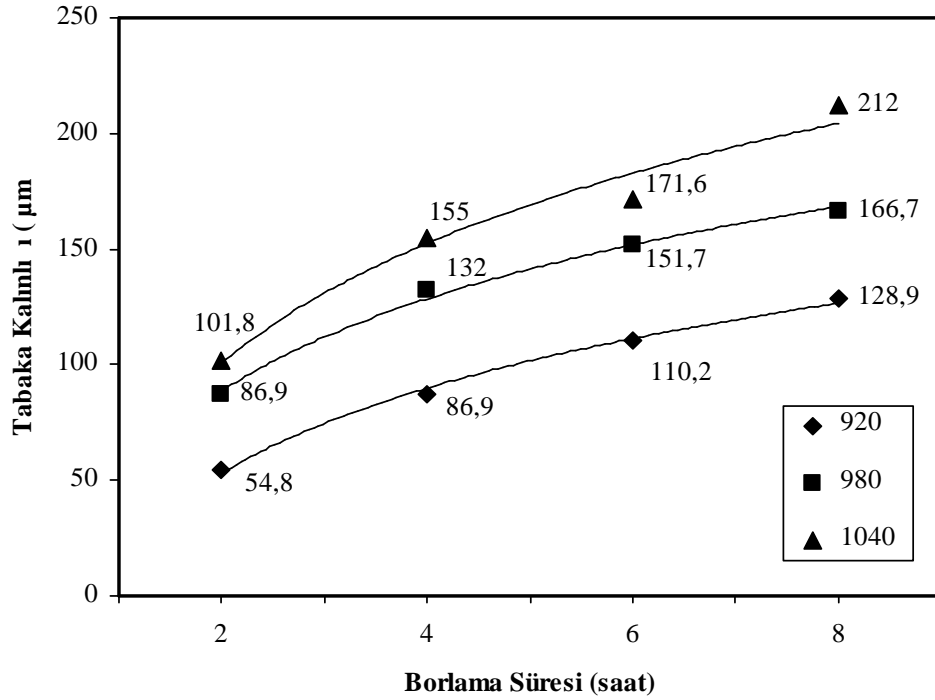


ekil 6.1. 920 °C'de 2 saat borlanmı numunenin tabaka kalınlık ölçümleri.



Çizelge 6.1. Tüm ko ullarda ölçülen ortalama borür tabakası kalınlıkları.

		SICAKLIK ( °C )		
		920	980	1040
SÜRE	TABAKA KALINLI I ( µm )			
	2	54,8	86,9	101,8
	4	86,9	132	155
	6	110,2	151,7	166,9
	8	128,9	166,7	212

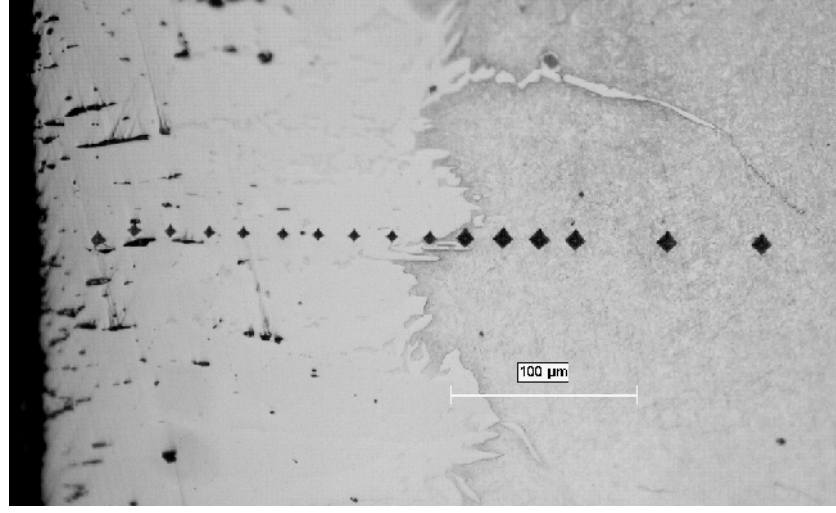


ekil 6.2. Tabaka kalınlı ının borlama süresine ba lı olarak de i imi.

Borlama sürelerine ve sıcaklıklarına göre olu an borür tabakasındaki kalınlık de i imi ekil 6.2'de gösterilmi tir. Artan borlama süresi ve sıcaklı ı ile olu an borür tabakasındaki artı difüzyon kanunlarına uygun parabolik ( $x^2=D.t$ ) olarak gerçekte mi tir.

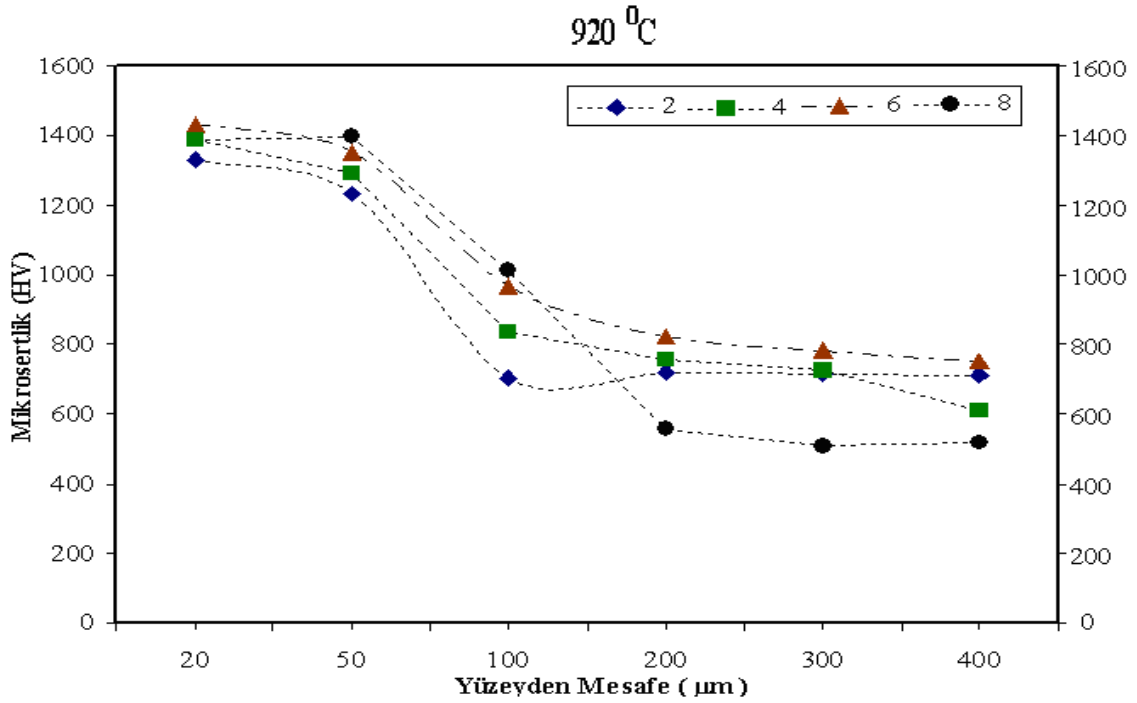
## 6.2. Tabaka Sertli i

Borlanmı numunelerin mikroyapısının yanında mikrosertlik de erleri de önemli bir göstergedir. Mikroyapıları incelenen numunelerin mikrosertlik incelemeleri de anametal ve borür tabakasını kapsayacak ekilde yapılmı tır. ekil 6.3'de 1040 °C'de 8 saat borlanmı numune de olu an mikrosertlik izleri gösterilmi tir.

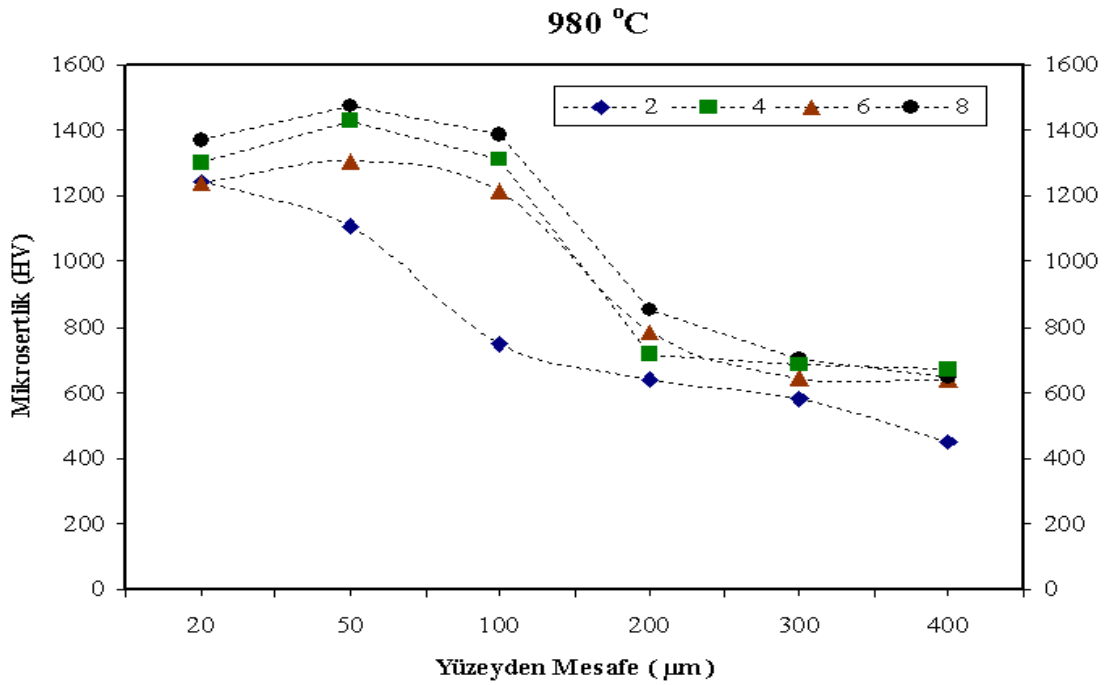


ekil 6.3. 1040 °C'de 8 saat borlanmı numune de mikrosertlik izleri

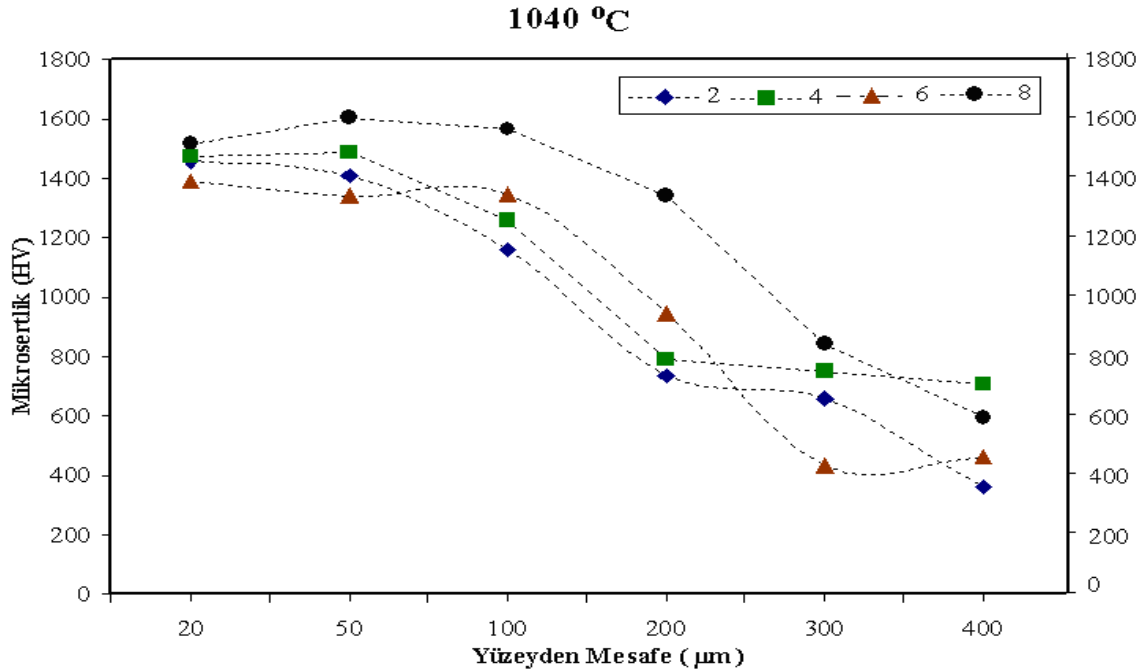
Her sıcaklık grubu için borlama sürelerine göre yüzeyden uzaklı a göre mikrosertliklerdeki de i im grafikleri hazırlanmı tır. Borlanmı numunelerde 920 °C, 980 °C ve 1040 °C'de olu an mikrosertlik da ılımları ekil 6.4 - 6.6 'da gösterilmi tir.



ekil 6.4. 920 °C' de borlanmı AISI L6 çeli inde yüzeyden itibaren elde edilen sertlik de erlerindeki de i im.



ekil 6.5. 980 °C' de borlanmı AISI L6 çeli inde yüzeyden itibaren elde edilen sertlik de erlerindeki de i im.



ekil 6.6. 920 °C' de borlanmı AISI L6 çeli inde yüzeyden itibaren elde edilen sertlik de erlerindeki de i im.

Yüzeyde olu an sert borür tabakaları nedeniyle yüzeyden ana metale do ru mikrosertlik de erleri beklenildi i gibi dü mektedir. Grafiklerde görülen ani sertlik dü ü lerine kar ı gelen yüzeyden uzaklık mesafesi ile ana metal sertli i ölçülen mesafe arası geçi bölgesi olarak tanımlanabilir. Grafikte görüldü ü gibi anametal sertlikleri borlama öncesinden yüksek ölçülmü tür. Bu durumun sebebi AISI L6 çeli inin havada sertle ebilmesi ve borlama i leminden ana metalinde etkilenmesidir. AISI L6 çeli i havada so uma sonrası 500-600 HV sertlik de erlerine ula abilmektedir.

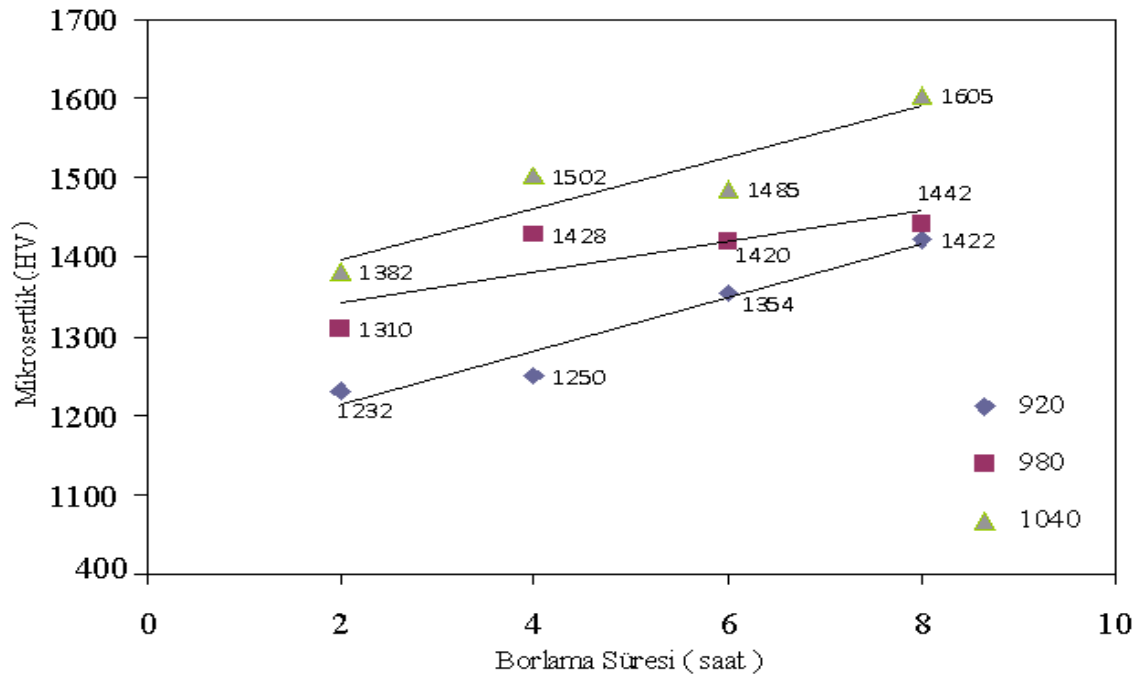
### 6.2.1. Borlama süresinin mikrosertli e etkisi

Borlama süresinin olu an borür tabakasının sertli i üzerine etkisini inceleyebilmek için tüm ko ullardaki numunelerde yüzeyden 20–40 µm uzaklıktaki Fe<sub>2</sub>B oldu u dü ünülen bölgelerde ölçülen mikrosertlik de erleri Çizelge 6.2'de

verilmi tir. Mikrosertlik ile borlama sürelerini içeren grafikler borlama sıcaklarına göre gruplandırılarak olu turulan grafik ekil 6.7’de gösterilmi tir.

Çizelge 6.2. Yüzeyden 20-40 µm arası uzaklıktaki bölgede ölçülen mikrosertlikler.

		SICAKLIK ( °C )		
		920	980	1040
SÜRE ( saat )	2	1232	1310	1382
	4	1250	1428	1502
	6	1354	1420	1485
	8	1422	1442	1605



ekil 6.7. Borür tabakası sertli inin borlama süresine ba lı olarak de i imi.

Genel olarak ölçülen sertlikler borlama süresindeki artışı ile yükselmektedir. Grafikteki eğilim çizgilerinden de görüldüğü gibi artan borlama sıcaklığı ile borür tabakasının sertliği de artmaktadır.

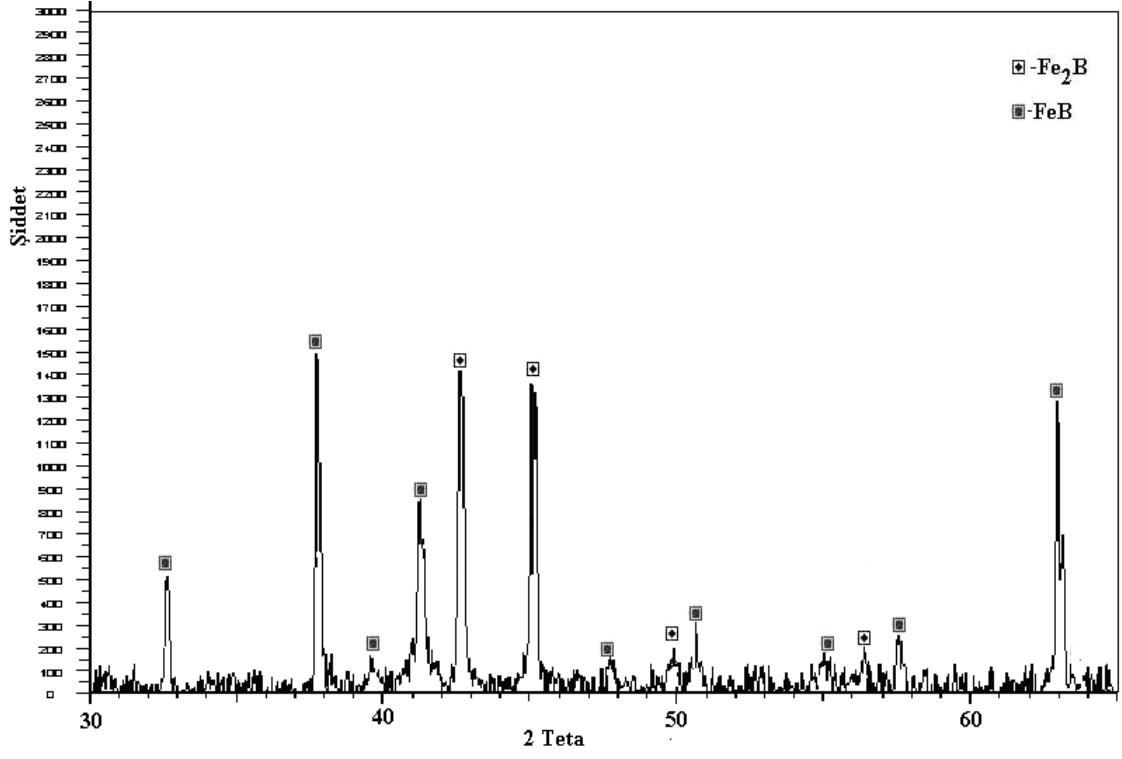
### 6.3. Tabaka Yapısı

Borür tabakaların yapısını ve oluşan fazlar hakkında bilgi sahibi olabilmek için mikroyapı görüntüleri incelenmiş ve XRD analizleri yapılmıştır.

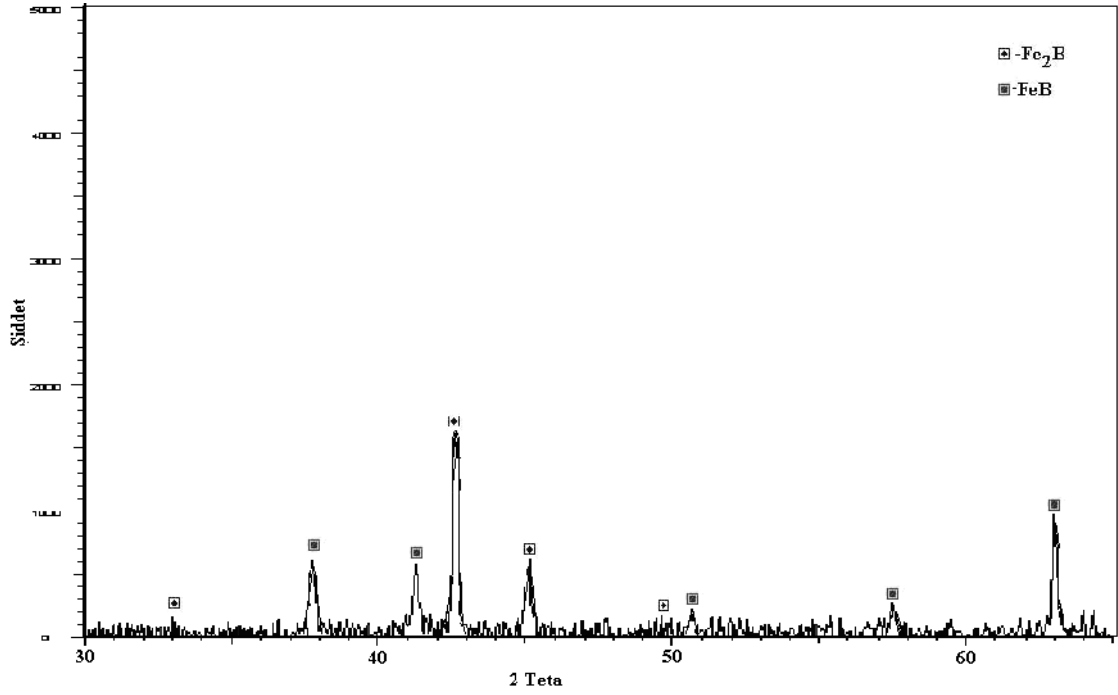
AISI L6 çeliğinde oluşan borür tabakasının morfolojisinde değişim göreceli olarak alaümsüz çeliklerde oluşan borür tabakalarına göre daha az olmuştur. Bunun sebebi ise çeliğin içerdiği alaümlü elementlerin oranının yüksek olmasıdır. Çift fazdan oluşan borür tabakalarının yapısına bakıldığında yüzeye paralel çatlaklar görülmektedir, bunların sebepleri ise oluşan FeB, Fe<sub>2</sub>B fazları ve anametal arasındaki termal genleşme katsayı farklılıklarından dolayı yavaş soğuma hızlarında oluşan Fe<sub>2</sub>B fazında basma, FeB fazındaki çekme gerilmeleridir.

#### 6.3.1. XRD Analiz sonuçları

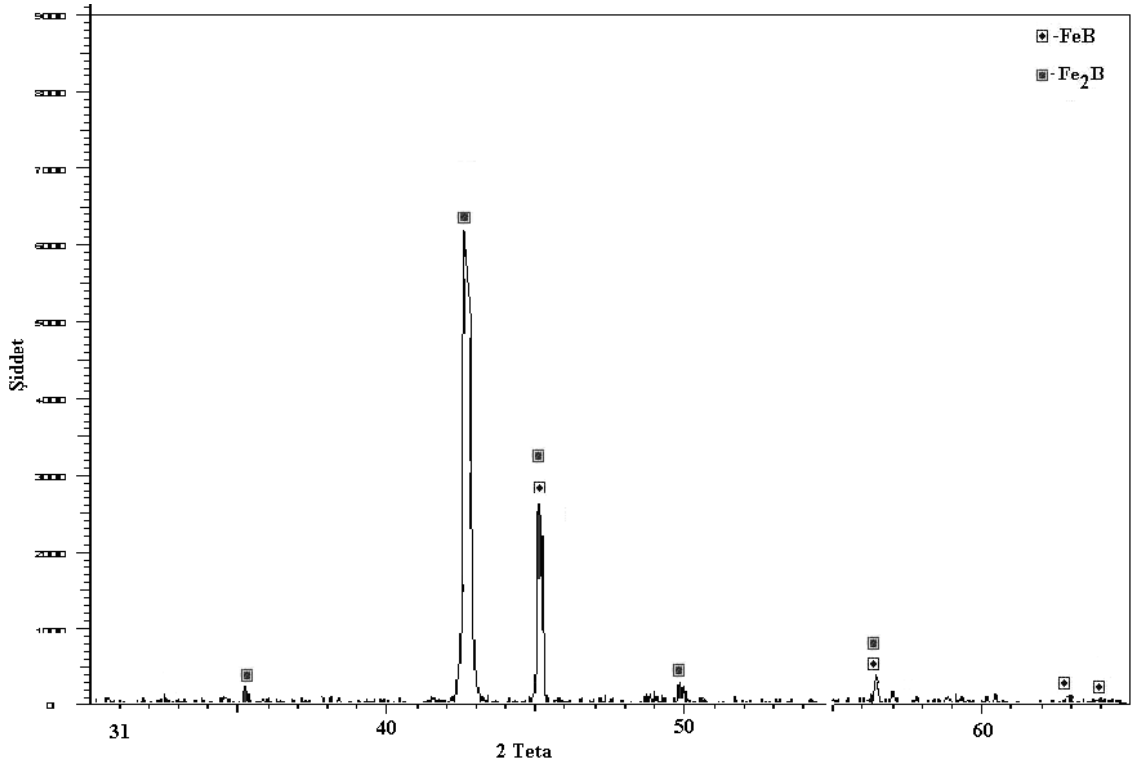
Borür tabakasında oluşan fazları belirlemek için XRD analizleri yapılmıştır. İncelemeler iki grupta yapılmıştır. Borlama süresinin etkilerini görebilmek amacıyla 980 °C sıcaklıkta 2 - 4 - 6 - 8 saatlik numuneler incelenmiştir. Sıcaklık etkilerini görebilmek amacıyla da 920 °C - 980 °C ve 1040 °C'lerde 6 saat borlanmış numuneler incelenmiştir. Tablo 6.8-9-10-11'de 980 °C'de 2-4-6-8 saat borlama sonrası borür tabakasında oluşan fazları belirlemek için çekilmiş XRD difraksiyon paterni verilmiştir.



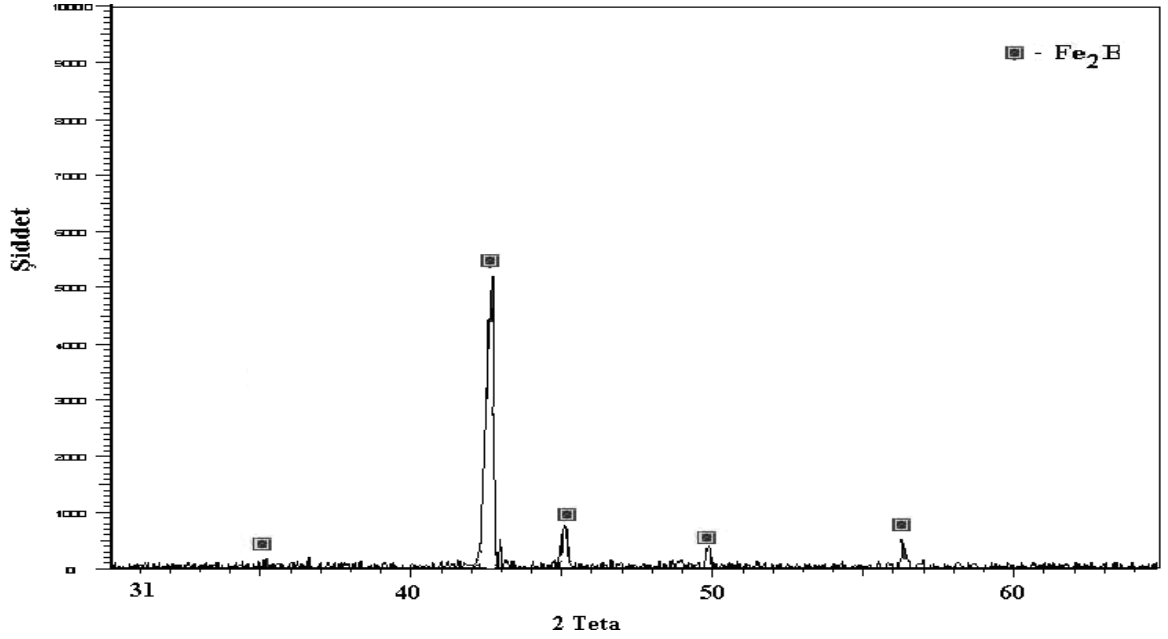
ekil 6.8. 980 °C’de 2 saat borlanmı numunenin XRD diyagramı.



ekil 6.9. 980 °C’de 4 saat borlanmı numunenin XRD diyagramı.



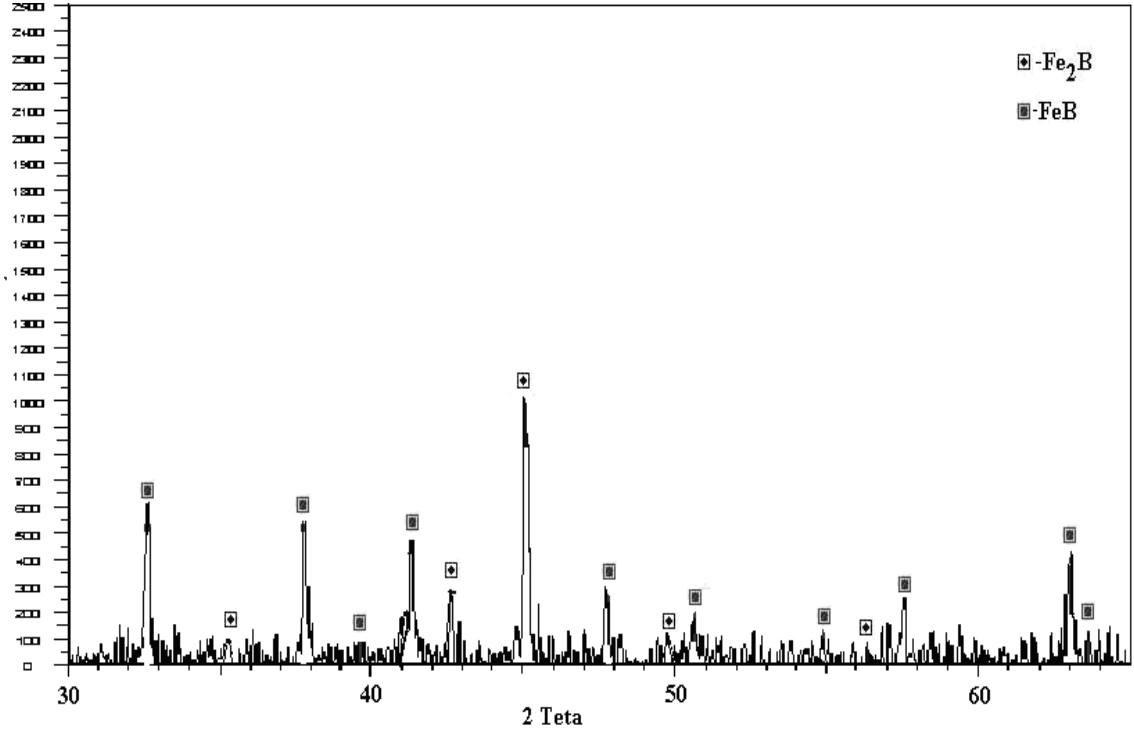
ekil 6.10. 980 °C'de 6 saat borlanmı numunenin XRD diyagramı.



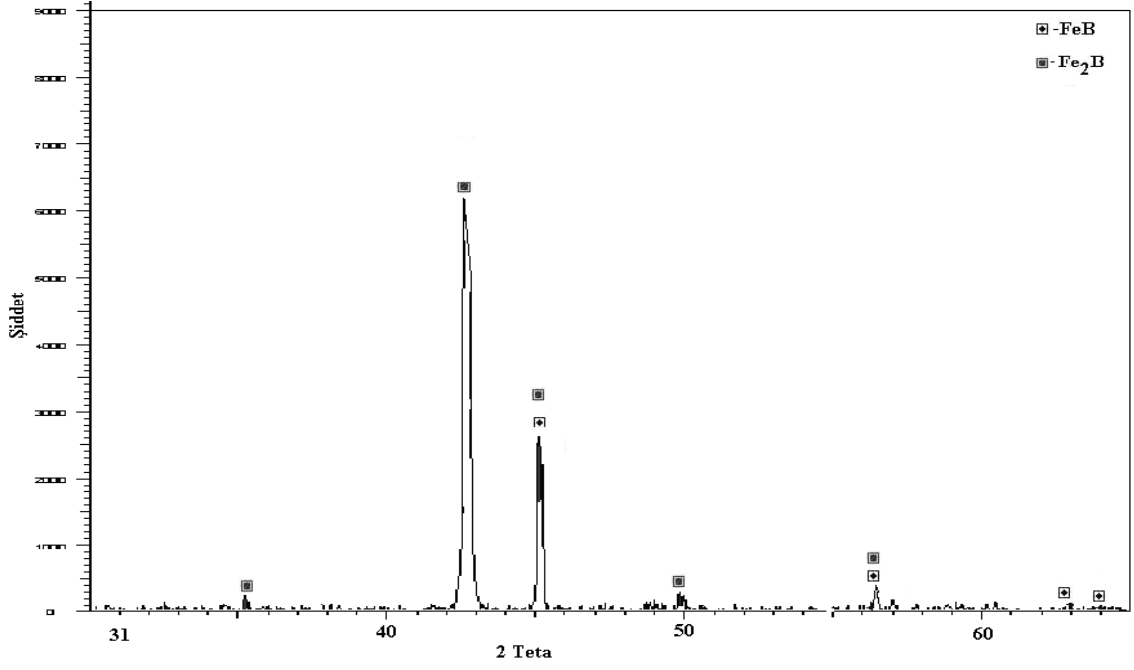
ekil 6.11. 980 °C'de 8 saat borlanmı numunenin XRD diyagramı.



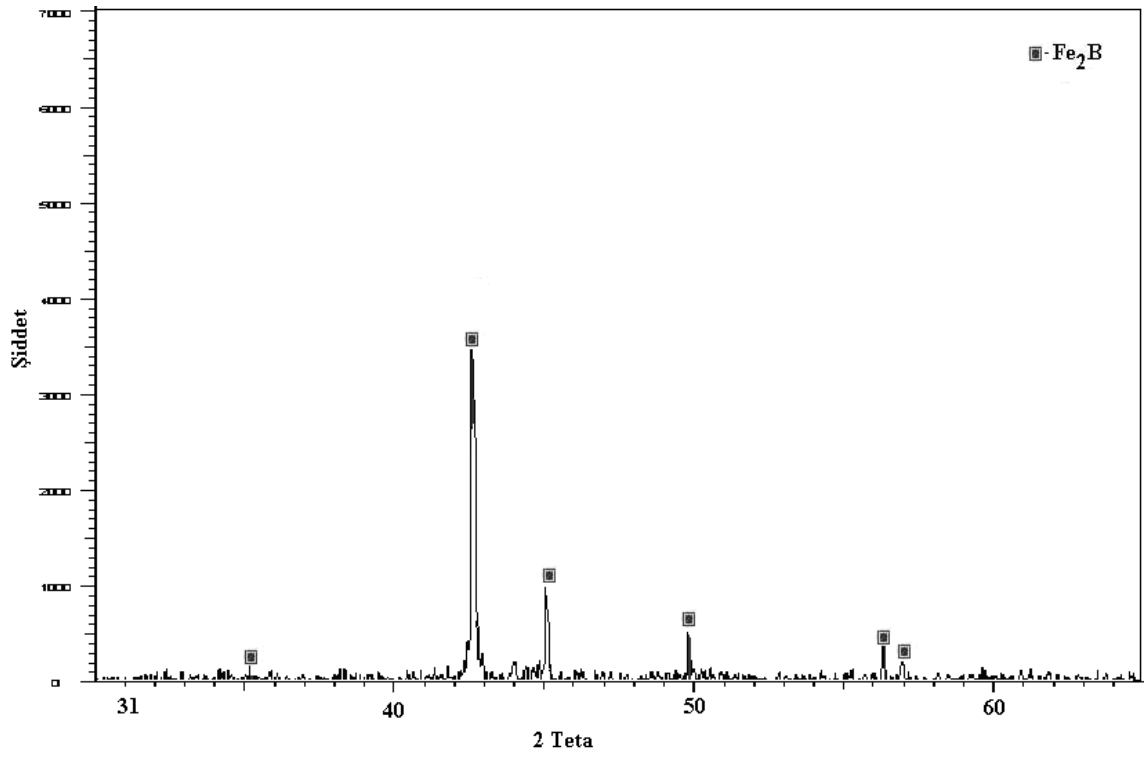
kinci grup XRD incelemeleri sabit borlama süresi ile sıcaklık etkilerini görebilmek için yapılmı tır. ekil 6.12-13-14'de 6 saat borlama süresinde 920 °C-980 °C-1040 °C'de borlama sonrası borür tabakasında olu an fazları belirlemek için çekilmi X-1 in difraksiyon paterni verilmi tir.



ekil 6.12. 920 °C'de 6 saat borlanmı numunenin XRD diyagramı.



ekil 6.13. 980 °C’de 6 saat borlanmı numunenin XRD diyagramı.

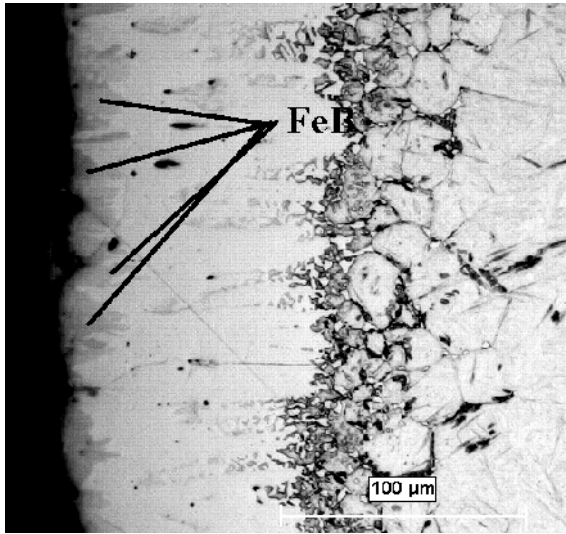


ekil 6.14. 1040 °C’de 6 saat borlanmı numunenin XRD diyagramı.

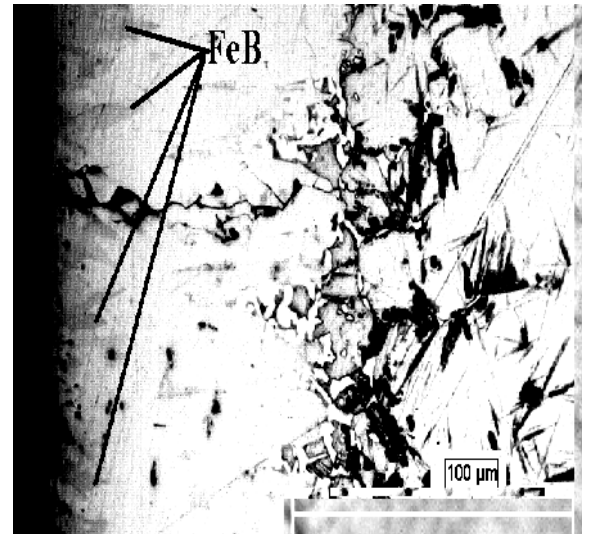
Birinci grup 980 °C'deki XRD analiz sonuçları incelendi inde 2 – 4 – 6 saat sürelerde olu an borür tabakasında çift faz (FeB+Fe<sub>2</sub>B) olu tu u gözlemlenmi tir. 8 saat borlanmı numune de ise tek fazlı ( Fe<sub>2</sub>B ) bir borür tabakası gözlemlenmi tir. Birinci grup XRD analiz sonuçlarına göre 980 °C'de uzun (6 saat üstü ) yapılan borlama i lemlerinde yapıda tek faz (Fe<sub>2</sub>B) olu mu tur.

Sabit sürede ( 6 saat ) artan sıcaklık ile yapılan ikinci grup analiz sonuçları incelendi inde artan sıcaklık ile 6 saat ve sonrası için yapıda tek faz (Fe<sub>2</sub>B) olu mu tur.

XRD analizleri yapılan numunelerin ve farklı ko ullardaki bazı numunelerin mikroyapı görüntüleri ekil 6.15-6.17 'da gösterilmi tir. Mikroyapı görüntüleri incelendi inde, mikroyapılar XRD analizlerindeki sonuçları desteklemektedir. ekil 6.15 ve ekil 6.16'de çift fazlı yapıların olu tu u ko ullardaki mikroyapılarda yüzeydeki koyu renkli bölgeler FeB fazı açık renkli bölgeler ise Fe<sub>2</sub>B fazıdır.

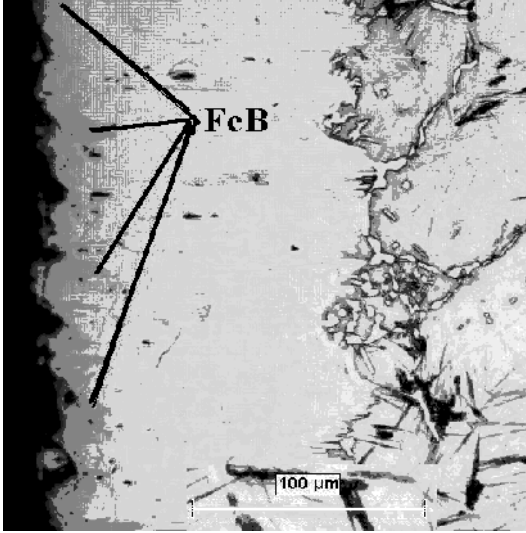


a-) 2 saat borlanmı

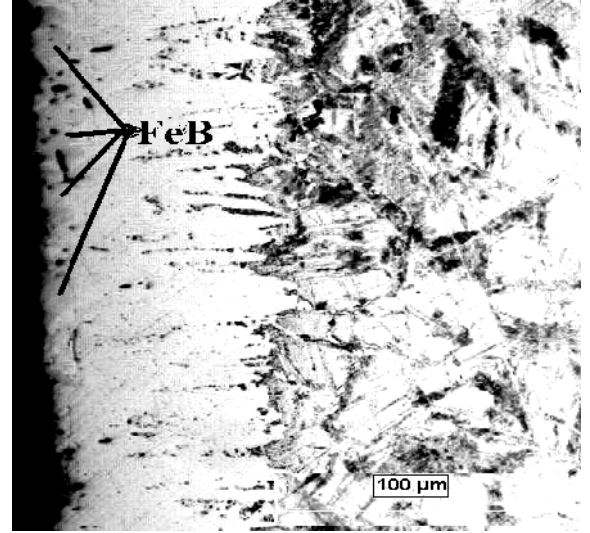


b-) 8 saat borlanmı

ekil 6.15. 920 °C'de borlanmı numunelerin mikroyapı görüntüleri.



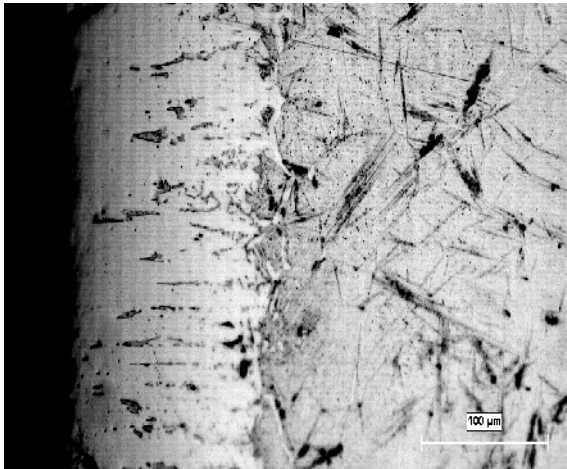
a-) 2 saat borlanmı



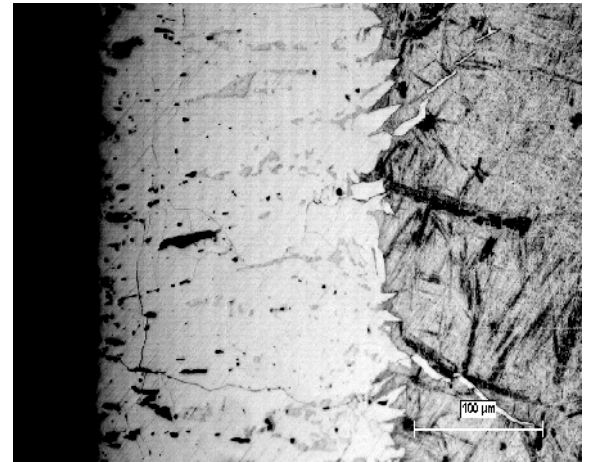
d-) 4 saat borlanmı

ekil 6.16. 980 °C'de borlanmı numunelerin mikroyapı görüntüleri.

Tek faz ( $Fe_2B$ ) olu tu u 980 °C'de 8 saat ve 1040 °C'de 6 saat borlanmı numunelerin mikroyapıları ekil 6.17'de gösterilmi tir. Tek faz olan açık renk  $Fe_2B$  görülmektedir.



a )



b )

ekil 6.17. a ) 980 °C'de 8 saat borlanmı , b ) 1040 °C'de 6 saat borlanmı numunelerin mikroyapı görüntüleri.

XRD sonuçlarından yola çıkarak; 920 °C sıcaklıkta 2-4-8 saat borlama sürelerinde oluşan borür tabakası çift faz ( $Fe_2B$  + FeB). 1040 °C sıcaklıkta 2-4-8 saat borlama sürelerinde oluşan borür tabakası tek faz  $Fe_2B$  fazından oluştuğu söylenebilir.

980 °C sıcaklık ve 6 saat üstü yüksek sıcaklık ve uzun borlama sürelerinde difüzyon kanunlarına göre yüzeye yayılacak bor atomlarının artacağı düşünüldüğü gibi borür tabakasında FeB fazı oluşumu beklenilmekteydi, yapılan XRD analizleri sonucu, bu artarlarda oluşması beklenen FeB fazının oluşmadığı görülmüştür. Bu duruma muhtemel üç etken neden olmuş olabilir;

- AISI L6 Sıcak iş takım çeliğinin içerdiği alaşımlı elementleri, bu artarlarda bor atomlarının demir kafesi içerisine girmelerini engellemesi nedeniyle FeB oluşuracak bor atomu konsantrasyonu sağlanamamış olabilir.
- Katı (paket) borlama yönteminde uzun süre ve sıcaklıklarda yüzeyde oluşan FeB fazı devam eden süre ile homojenleşmeye başlayarak  $Fe_2B$  fazına dönüşümüne geçebilir.
- Gevrek bir yapıda olan FeB fazının ince bir tabaka oluşması ve bu tabakasının yavaş soğuma hızlarında artan iç gerilmeler ve oluşan çatlaklar ile bu duruma ilaveten numune hazırlamada oluşan titreşimler nedeniyle dökülmüş olması.

Yukarıda bahsedilen üç muhtemel sebepten dolayı yüksek sıcaklık ve sürelerde oluşması beklenen FeB tabakası oluşmamış olabilir.

## 7. GENEL SONUÇLAR

Tüm ko ullarda ve tüm numunelerde borür tabakası olu mu tur.

920 °C - 980°C - 1040 °C 'lerde 2-4-6-8 saat sürelerde yapılan borlama i lemleri sonucunda elde edilen tabaka kalınlıkları 54,8 – 212 µm arasında de i mektedir. En dü ük tabaka kalınlı ı 920 °C'de 2 saat borlama süresinde, en yüksek tabaka kalınlı ı ise 1040 °C'de 8 saat borlama süresinde ölçülmü tür. Borür tabakası kalınlıkları artan borlama sıcaklı ı ve borlama süresi ile parabolik bir artı göstermi tir. Bu da borlama i leminin difüzyon kontrollü oldu unu göstermektedir.

Tüm ko ullardaki borlama i lemi sonucunda borür tabakası boyunca ölçülen mikrosertlik de erleri 1605 HV de erine kadar yükselmektedir. Borlama sonrası sertlikte 3-4 kat artı olmu tur. En dü ük de er 920 °C 2 saat borlamada, en yüksek de er ise 1040 °C 8 saat borlamada ölçülmü tür. Mikrosertlik de erleri artan borlama sıcaklı ı ve süresi ile artı göstermi tir.

Ala ım elementlerinin oranının yüksek olu u borür tabakasının morfolojisini düzle tirmektedir. Mikroyapı görüntüleri bakılınca morfolojiyi düz olarak kabul edebiliriz.

Borür tabakası 980 °C ve 6 saat borlama süresi civarlarında çift fazlı FeB + Fe<sub>2</sub>B yapıda olu mu tur. 980 °C ve 6 saat üstü artlarda olu an tabaka yapısı tek fazdan Fe<sub>2</sub>B olu mu tur.

Çift fazdan olu mu olan numunelerin mikroyapı görüntülerinde tabaka da çatlaklar görülmü tür. Bu çatlakların sebepleri olu an fazlar arasındaki termal genle me katsayı farklarından kaynaklanan iç gerilmelerdir. Fe<sub>2</sub>B fazında basma gerilmesi, FeB de ise çekme gerilmeleri olu masından dolayı borür tabakasına paralel çatlaklar meydana gelmi tir.

Elde edilen tüm veriler yorumlanarak grafik ve tablolar oluşturulmuştur. Borlama işleminden sonra yüzey sertliğinde önemli seviyelerde artış olmuştur. Oluşturulan borür tabakaları ve elde edilen mikrosertlik değerleri literatürde yapılan çalışmalar ile uyumludur.

## 8. ÖNER LER

AISI L6 çeli ine yapılacak olan borlama i lemi için 980 °C üstünde ve 6 saati geçen sürelerde tek faz ( $Fe_2B$ ) olu tu u için daha kararlı bir tabaka meydana gelmektedir. Endüstriyel uygulamalar için bu parametrelerde borlama i lemi yapılması önerilir.

Katı (Paket) borlama yöntemi olarak AISI L6 çeli inden yapılmı sıcak dövme kalıbını tamamıyla borlamak ekonomik olmayaca ndan sadece kalıp gravürünü borlama imkânı olan pasta borlama yöntemi seçilebilir. Nispeten ufak dövme kalıplarında katı (paket) ortamda borlama tercih edilebilir.



## 9. KAYNAKLAR D Z N

- Atik, E., Yunker, U. ve Meriç, C. 2003 , The Effects of Conventional Heat Treatment and Boronizing on Abrasive Wear and Corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 Steels, Tribology International, 36C, 155–161.
- Ayter,T., 2005, Borlama leminin Çeliklerin Yüzey Kalitesi ve A nma Davranı na Etkisinin ncelenmesi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa
- Bartsch, K. ve Leonhardt, A., 1999, Formation of Iron Boride Layers on Steel by d.c.-plasma Boriding and Deposition Processes, Surface and Coatings Technology, 116–119C, 386–390.
- Bayça, S , U, ahin, S., 2004, Borlama, Mühendis ve Makine Dergisi
- Bindal,C., 1991, Az Ala ımlı ve Karbon Çeliklerinde Borlama le Yüzeye Kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tespiti, Doktora Tezi, TÜ, stanbul.
- Bozkurt, N., 1984, Bor Yayınımıyla Çeliklerde Yüzey Sertle tirme, Doktora Tezi, .T.Ü., Fen Bil. Enst., stanbul.
- Culha, O, Topar , M, ahin, S, Aksoy, T., 2008, Characterization and Determination of Fe<sub>x</sub>B Layer's Mechanical Properties , Journal of Materials Processing Technology 2 0 6, 231–240
- Çelebi, G., pek, M., Yılmaz, S., Bindal, C., 2004, AISI 8620 Çeli i Üzerinde Olu an Borürlerin Bazı Mekanik Özellikleri, 10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi, s. 25–29.
- Fichtl, W., Trausner, N., Matuschka, A.G., 1987, Boronizing with Ekabor, Elektroschmelzwerk Kempten GmbH, 6 p.
- Geller, Y., Tool Steels, 1978, Mir Publishers, 666p., Moscow.
- Genel, K., 2006, Boriding Kinetics of H13 Steel, Vacuum 80 451–457
- Karamı , M.B, Nair, F, Selçuk,B., 1995, Borlanmı Malzemelerin Tribolojik Özellikleri, S:446-454, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiri Kitabı.

- Linial, A. V., Lavella J. P., 1974, New Proseses for Obtaining Increased Metal Hardness and Reduce Friction Properties by Boronizing-I, Industrial Heating.
- Matuschka, A.G., Boronizing, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1980
- Melendez, E., Campos, I., Rocha, E. ve Barron, M. A., 1997, Structural and Strenghth Characterization of Steels Subjected to Boriding Thermochemical Process, Materials Science and Engineering, A234-236C, 900–903.
- Nair, F, Karamı , M.B.,1997,Borlanımı Çeliklerde Malzeme Bile iminin Mikrosertli e Etkileri, S. 354-360, 7.Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiri Kitabı.
- Nair, F., 1996, Koruyucu Gaz Atmosferinde Macun borlama Teknigi ile Çelik Yüzeylerinin Sertle tirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Özbek, ., 2000 Borlama Yöntemiyle (AISI M50, AISI M2) Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeli inin Yüzey Performanslarının Geli tirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Özbek, ., en, S., pek, M., Bindal, C., Zeytin, S. ve Üçisık, A. H., 2004, A Mechanical Aspect of Borides Formed On The AISI 440C Stainless-steel, Vacuum,73C: 643–648.
- Özbek, , Bindal, C., 2002, Mechanical properties of boronized AISI W4 steel, Surface and Coatings Technology 154, 14–20
- Özmen, Y., 1990, The Effect of Surface Hardening with Boriding on Wear Resistance in X210Cr12, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, zmir.
- Özsoy, A., 1996, Çeli in Borlanmasında Borür Tabakası, Geçis Zonu ve Ana Matriksin Özelliklerinin yile tirilmesi, Doktora tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bil. Enst., Eskisehir.
- Palombarini, G., Carbucicchio, M., 1987, Grown of Boride Coatings on Iron, J. Material. Science. Letter 6, 415-416.
- Rile, M., 1974, Reasons for the Formation of Cracks in Boride Coatings on Steel, Met. Sci. Heat Treat., 16. 836-839

- Selçuk, B., 1994, Borlanımı AISI 1020 ve 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aınma Davranı larının ncelenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Selçuk, B., Ipek, R., Karamıs, M.B., 2003, A Study on Friction and Wear Behaviour of Carburized, Carbonitrided and Borided AISI 1020 and 5115 Steels, Journal of Materials Processing Technology, C:141, s. 189–196.
- Sinha ,A.K., 1991,Boronizing, Heat Treating, Bl.2., ASM Int, s. 437–447.
- ahin, S., 1999, Katı Borlama Yöntemi ile Ferrobör Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi,Manisa
- ahin,S., 2009, Effects of Boronizing Process On The Surface Roughness And Dimensions of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2714, Journal of Materials Processing Technology 20 9 ,1736–1741
- en, S., Sen, U. ve Bindal, C. (2004) An Approach to Kinetic Study of Borided Steels, Surface & Coatings Technology.
- Tezcan, R., 1996, Borlama lemi ve Endüstriyel Uygulamaları, Y.Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eski ehir.
- Topba , M.A., 1998, Çelik ve Isıl lem El Kitabı, Prestij Yayıncılık, s 377-394, stanbul
- Uluköy,A., 2005, 21NiCrMo2 (AISI 8620) Çeli inden Yapılmı Di li Çarklara Karbürleme ile Beraber Borlama leminin Uygulanması,Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Ünivesitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa
- Uslu,I., 2007, A Comparison of Borides Formed on AISI 1040 and AISI P20 Steels, Materials and Design 28 1819–1826
- Yıldızlı, K., 2002, Borlamanın Çeliklerde Eroziv Aınma Davranı na Olan Etkilerinin Deneysel Olarak ncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.