

68883

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN BORLANMASI  
VE ÖZELLİKLERİ

DOKTORA TEZİ

Y.Müh. Uğur ŞEN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Eylül 1997

Tezin Savunulduğu Tarih : 17 Aralık 1997

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Fevzi YILMAZ

 5/1/98

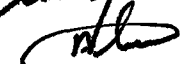
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. E.Sabri KAYALI

 06/01/98

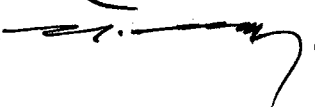
: Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN

 07/01/98

: Prof. Dr. Ahmet TOPUZ

 6/1/1998

: Prof. Dr. Mehmet KOZ

 6/1/98

ARALIK 1997

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada, akademik ve teknolojik açıdan önemli bir kaplama tekniği olan borlamanın, Küresel Grafitli Dökme Demirlere (KGDD) uygulanması ve kaplama özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmadaki borlama işlemleri, numune hazırlama ve metalografi çalışmaları, SA.Ü Metalurji Mühendisliği Bölümü'nde, X-ışınları, SEM ve aşınma deneyleri, TÜBİTAK-MAM ve İ.T.Ü Kimya-Metalurji Fakültesi'nde, kırılma tokluğu ve sertlik ölçümleri, AE GOETZE İstanbul Segman ve Gömlek San. A.Ş. 'de yapılmıştır.

Çalışmanın ele alınması ve sonuçlandırılmasında, değerli fikir ve tecrübeleriyle beni yönlendiren ve yürütücüsü olduğu TÜBİTAK-MİSAG 30 projesi çerçevesinde, her türlü laboratuvar olanaklarını kullandıran, saygıdeğer hocam Prof.Dr.Fevzi YILMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam sırasında çeşitli fikir, öneri ve tecrübelerinden yararlandığım Doç.Dr.Cuma BİNDAL'a harcadığı zaman ve emekten dolayı teşekkür ederim.

İ.T.Ü Kimya Metalurji Fakültesi ve TÜBİTAK-MAM 'da yaptığım bazı deneyler için sağladıkları imkan ve gösterdikleri ilgiden dolayı, Prof.Dr.A.Fuat ÇAKIR, Prof.Dr.E.Sabri KAYALI, Prof.Dr.Adnan TEKİN, Prof.Dr.Mustafa ÜRGEN, Doç.Dr.Tarık BAYKARA ve Yük.Müh.Havva (KAZDAL) ZEYTİN 'e teşekkürü bir borç bilirim.

Elde ettiğim sonuçların, endüstriye aktarılması konusunda yardımcı olan Dr.Savaş İZGİZ ve Y.Müh.Ahmet SELÇUK(AE GOETZE) 'a teşekkür ederim.

Son olarak çalışmalarım sırasında ve tezimin hazırlanmasında katkılarını esirgemeyen, eşim Arş.Gör. Şaduman ŞEN'e sonsuz teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                     | <u>Sayfa No</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| ÖNSÖZ.....                                                                          | ii              |
| SEMBOL LİSTESİ.....                                                                 | vi              |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                  | viii            |
| TABLO LİSTESİ.....                                                                  | xvii            |
| ÖZET.....                                                                           | xix             |
| SUMMARY.....                                                                        | xx              |
| BÖLÜM 1 GİRİŞ.....                                                                  | 1               |
| BÖLÜM 2 KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER.....                                        | 4               |
| 2.1 Dökme Demirlerin Tanımı ve Sınıflandırılması.....                               | 4               |
| 2.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması. ....                       | 8               |
| 2.3 Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey<br>Sertleştirme İşlemleri..... | 9               |
| 2.4 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları.....                        | 11              |
| BÖLÜM 3 KONUNUN TEORİK İNCELEMESİ.....                                              | 13              |
| 3.1 Borlamanın Tanımı.....                                                          | 13              |
| 3.1.1 Borlama işleminin avantajları.....                                            | 14              |
| 3.1.2 Borlama işleminin dezavantajları.....                                         | 15              |
| 3.2 Borlama Yöntemleri.....                                                         | 16              |
| 3.2.1 Kutu borlama.....                                                             | 17              |
| 3.2.2 Pasta borlama .....                                                           | 18              |
| 3.2.3 Sıvı borlama.....                                                             | 19              |
| 3.2.4 Gaz borlama.....                                                              | 22              |
| 3.3 Borlanabilen Malzemeler ve Borürlerin Özellikleri.....                          | 23              |
| 3.3.1 Demir dışı metallerin borlanması.....                                         | 23              |
| 3.3.2 Borürlerin özellikleri.....                                                   | 29              |
| 3.3.3 Demir esaslı malzemelerin borlanması.....                                     | 31              |
| 3.3.3.1 Demir-bor denge diyagramı.....                                              | 32              |
| 3.3.3.2 Fe <sub>2</sub> B ve FeB fazlarının özellikleri.....                        | 33              |
| 3.3.3.3 Demir borürlerin büyüme mekanizması.....                                    | 35              |

|                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.3.4 Borür tabakası ve arayüzey morfolojisine alaşım elementlerinin etkisi..... | 38        |
| 3.3.3.5 Borür tabakasının büyüme kinetiği.....                                     | 47        |
| 3.3.3.6 Borür tabaka yapılarının sınıflandırılması.....                            | 51        |
| 3.3.3.7 Borür tabakasının karakteristik özellikleri .....                          | 54        |
| 3.3.3.8 Borlama işleminin endüstriyel uygulama alanları.....                       | 56        |
| 3.3.4 Çok fazlı borlama .....                                                      | 59        |
| 3.3.5 Aşınma özellikleri.....                                                      | 61        |
| 3.3.6 Aşınma hasarları.....                                                        | 61        |
| 3.3.6.1 Adhesiv aşınma.....                                                        | 63        |
| 3.3.6.2 Abrasiv aşınma .....                                                       | 65        |
| 3.3.6.3 Yorulma aşınması .....                                                     | 66        |
| 3.3.6.4 Kimyasal aşınma.....                                                       | 67        |
| 3.4 Bor Kaplamaların Aşınma Özellikleri.....                                       | 68        |
| 3.5 Kırılma Tokluğu.....                                                           | 74        |
| <b>BÖLÜM 4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>                                            | <b>76</b> |
| 4.1 Giriş.....                                                                     | 76        |
| 4.2 Deneysel Çalışmalar.....                                                       | 78        |
| 4.2.1 Döküm işlemi .....                                                           | 78        |
| 4.2.2 Deneylerde kullanılan numuneler.....                                         | 81        |
| 4.3 Deneylerde Kullanılan Cihazlar.....                                            | 81        |
| 4.3.1 Borlama fırını.....                                                          | 81        |
| 4.3.2 Borlama potası.....                                                          | 81        |
| 4.3.3 Borlama banyosu.....                                                         | 82        |
| 4.4 Borlama İşlemi.....                                                            | 83        |
| 4.5 Metalografik İnceleme.....                                                     | 84        |
| 4.6 X-Işınları Difraksiyon Analizi.....                                            | 85        |
| 4.7 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elementer Analiz İncelemesi.....         | 85        |
| 4.8 Sertlik Deneyleri.....                                                         | 85        |
| 4.9 Kırılma Tokluğu Deneyleri.....                                                 | 86        |
| 4.10 Aşınma Deneyleri.....                                                         | 87        |
| <b>BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE İRDELEME.....</b>                                           | <b>89</b> |
| 5.1 Giriş.....                                                                     | 89        |
| 5.2 Metalografik İnceleme .....                                                    | 89        |
| 5.3 Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği.....                                         | 122       |
| 5.4 X-Işınları Difraksiyon Analizi.....                                            | 123       |
| 5.5 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elementel Analiz İncelemesi.....         | 128       |
| 5.6 Sertlik Ölçümleri.....                                                         | 133       |
| 5.7 Kırılma Tokluğu Ölçümleri.....                                                 | 144       |
| 5.8 Aşınma Özellikleri.....                                                        | 147       |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| BÖLÜM 6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 161 |
| 6.1 Sonuçlar.....                 | 161 |
| 6.2 Öneriler.....                 | 166 |
| KAYNAKLAR.....                    | 168 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                     | 178 |



## SEMBOL LİSTESİ

|                         |                                         |
|-------------------------|-----------------------------------------|
| $T$                     | : Sıcaklık                              |
| $t$                     | : Süre                                  |
| $C, C_0, C_s, C_a, C_b$ | : Konsantrasyon                         |
| $Q$                     | : Aktivasyon enerjisi                   |
| $D$                     | : Difüzyon katsayısı                    |
| $D_0$                   | : Frekans faktörü                       |
| $K$                     | : Ön eksponansiyel faktör               |
| $c/2$                   | : Atomik sıçrama mesafesi               |
| $d$                     | : Tabaka kalınlığı                      |
| $\tau$                  | : Kayma gerilmesi                       |
| $F$                     | : Kuvvet                                |
| $A_n, A_r$              | : Temas alanı                           |
| $I$                     | : Şiddet                                |
| $P_v$                   | : Yüzey tabakasına ait aşınma oranı     |
| $A$                     | : Çatlak oluşumu için gerekli kritik iş |
| $H_v$                   | : Sertlik                               |
| $P_k$                   | : Çatlak başlangıç yükü                 |
| $K_c$                   | : Kırılma tokluğu                       |
| $E$                     | : Kaplama tabakasının elastik modülü    |
| $H$                     | : Kaplama tabakasının sertliği          |
| $P$                     | : Uygulanan yük                         |

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| R | : Gaz sabiti                |
| L | : Hasar iz kalınlığı        |
| r | : Aşındırıcı bilye yarıçapı |
| S | : Hasar alanı               |
| V | : Hasar hacmi               |
| R | : Aşınma iz yarıçapı        |
| q | : Kesim açısı               |
| h | : Hasar derinliği           |
| W | : Aşınma hızı               |



## ŞEKİL LİSTESİ

|            |                                                                                                                                                                                                            | <u>Sayfa No</u> |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Şekil 2.1  | Dökme demirlerin mikroyapılarına göre sınıflandırılması                                                                                                                                                    | 5               |
| Şekil 3.1  | 950-960°C 'de iki saat borlanan, bakır kaplanmış çelik 50 malzemenin yüzeyindeki bakır tabakasının kalınlığına bağlı olarak borür tabaka kalınlığının değişimi                                             | 24              |
| Şekil 3.2  | 1400°C 'de 2, 4 ve 6 saat süre ile vakum altında, bor karbür tozu içerisinde gerçekleştirilen borlama işlemi sonucunda, Mo, W, Nb, Ta, Zr, ve Re'da oluşan borür tabaka kalınlığı ve mikrosertlik dağılımı | 27              |
| Şekil 3.3  | Fe-B ikili denge diyagramı                                                                                                                                                                                 | 32              |
| Şekil 3.4  | Borür tabakasında, FeB ve hemen altında yer alan Fe <sub>2</sub> B bölgesinin kolonsal olarak büyüme mekanizması                                                                                           | 37              |
| Şekil 3.5  | 850°C 'de BCl <sub>3</sub> gaz ortamında 4 saat borlama işlemine tabi tutulan malzeme yüzeyinde oluşan borür tabakası ve matris içerisindeki B ve Fe dağılımı                                              | 37              |
| Şekil 3.6  | Borür tabakasındaki FeB ve Fe <sub>2</sub> B fazlarının sertliğinin karbon miktarı ile değişimi                                                                                                            | 39              |
| Şekil 3.7  | (a) FeB ve (b) Fe <sub>2</sub> B fazlarının Cr miktarının artışına bağlı olarak sertliğindeki değişim                                                                                                      | 41              |
| Şekil 3.8  | Nikel miktarının artışına bağlı olarak, borür tabakasının sertliğindeki değişim                                                                                                                            | 43              |
| Şekil 3.9  | C15 çeliğinin yüzeyinde oluşturulan borür tabakasında B, Si, Fe, Mn ve C elementlerinin dağılımı                                                                                                           | 45              |
| Şekil 3.10 | 37 HS çeliğinin yüzeyinde oluşturulan borür tabakasında B, Si, Fe, Mn ve Cr elementlerinin dağılımı                                                                                                        | 46              |
| Şekil 3.11 | Çeliklerde borür tabakası boyunca elementlerin şematik olarak dağılımı                                                                                                                                     | 46              |
| Şekil 3.12 | Çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi                                                                                                                                           | 47              |

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.13 | Bor konsantrasyonunun yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak değişimi                                                                                                                                                                                                                                                                         | 49 |
| Şekil 3.14 | Borür tabakalarının türleri                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 52 |
| Şekil 3.15 | Borür tabaka kalınlığının belirlenmesi                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 54 |
| Şekil 3.16 | Tribolojik bir sistemin şematik olarak gösterilmesi                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 62 |
| Şekil 3.17 | Aşınmanın temel mekanizmaları, (a) adhesiv aşınma, (b) abrasiv aşınma, (c) yorulmalı aşınma ve (d) kimyasal aşınma                                                                                                                                                                                                                             | 63 |
| Şekil 3.18 | Adhesiv aşınmada yapışma mekanizmasının ideal bir modeli. (a) normal yük altında plastik olarak deforme olan temas alanları, $A_r$ ; (b) normal yükün artması ve sürtünme kuvvetlerinin devreye girmesi ile temas alanlarının büyümesi; (c) gerçek temas alanı $A_r$ 'nın normal temas alanı $A_n$ 'ya ulaşması ile yapışmanın meydana gelmesi | 64 |
| Şekil 3.19 | Normalize edilmiş ve borlanmış EN8 çeliğinin 8.5 kg. yük altındaki aşınma davranışı                                                                                                                                                                                                                                                            | 69 |
| Şekil 3.20 | Normalize edilmiş, sementasyona tabi tutulmuş ve bor kaplanmış EN1A çeliğinin aşınma davranışı                                                                                                                                                                                                                                                 | 70 |
| Şekil 3.21 | Termo-kimyasal yöntemlerle kaplanmış çeliklerin abrasiv aşınma davranışları                                                                                                                                                                                                                                                                    | 71 |
| Şekil 3.22 | 403 paslanmaz çeliğe uygulanan bor kaplamaların eroziv aşınma hızları                                                                                                                                                                                                                                                                          | 72 |
| Şekil 3.23 | Yumuşak çelik yüzeylerine ve farklı borür fazı içeren yüzey tabakalarına ait aşınma oranları ( $P_v=39$ MPa.m/sn.)                                                                                                                                                                                                                             | 73 |
| Şekil 3.24 | Çeşitli işlemlere tabi tutulan C 45 çeliğinin faville testi sonucunda elde edilen abrasiv aşınma davranışları                                                                                                                                                                                                                                  | 74 |
| Şekil 4.1  | Keel blok şeklindeki dökümlerin boyutları.                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 79 |
| Şekil 4.2  | A serisi KGDD malzemenin döküm haliyle mikroyapısı                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 79 |
| Şekil 4.3  | B serisi KGDD malzemenin döküm haliyle mikroyapısı                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 80 |
| Şekil 4.4  | C serisi KGDD malzemenin döküm haliyle mikroyapısı                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 80 |
| Şekil 4.5. | Deneyisel çalışmalarda kullanılan numunelerin şekil ve boyutları a)Metalografik inceleme, sertlik ve kırılma tokluğu numuneleri, b) Aşınma numuneleri                                                                                                                                                                                          | 81 |

|            |                                                                                                |    |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.6  | Borlama deneylerinde kullanılan AISI 316L paslanmaz çelik potanın geometrik şekli ve boyutları | 82 |
| Şekil 4.7  | Aşınma deneylerinde kullanılan cihazın şematik gösterilişi                                     | 87 |
| Şekil 5.1  | 850°C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD'in mikroyapısı                        | 91 |
| Şekil 5.2  | 850°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD'in mikroyapısı                        | 91 |
| Şekil 5.3  | 950°C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD'in mikroyapısı                        | 92 |
| Şekil 5.4  | 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD'in mikroyapısı                        | 92 |
| Şekil 5.5  | 850°C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD'in mikroyapısı                        | 93 |
| Şekil 5.6  | 850°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD'in mikroyapısı                        | 93 |
| Şekil 5.7  | 950°C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD'in mikroyapısı                        | 94 |
| Şekil 5.8  | 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD'in mikroyapısı                        | 94 |
| Şekil 5.9  | 850°C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in mikroyapısı                        | 95 |
| Şekil 5.10 | 850°C sıcaklıkta 4 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in mikroyapısı                        | 95 |
| Şekil 5.11 | 850°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in mikroyapısı                        | 96 |
| Şekil 5.12 | 850°C sıcaklıkta 8 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in mikroyapısı                        | 96 |
| Şekil 5.13 | 950°C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in mikroyapısı                        | 97 |
| Şekil 5.14 | 950°C sıcaklıkta 4 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in mikroyapısı                        | 97 |

|            |                                                                         |     |
|------------|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.15 | 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in mikroyapısı | 98  |
| Şekil 5.16 | 950°C sıcaklıkta 8 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in mikroyapısı | 98  |
| Şekil 5.17 | 850°C'de 2 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü   | 100 |
| Şekil 5.18 | 850°C'de 6 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü   | 100 |
| Şekil 5.19 | 950°C'de 2 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü   | 101 |
| Şekil 5.20 | 950°C'de 2 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü   | 101 |
| Şekil 5.21 | 850°C'de 2 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü   | 102 |
| Şekil 5.22 | 850°C'de 6 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü   | 102 |
| Şekil 5.23 | 950°C'de 2 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü   | 103 |
| Şekil 5.24 | 950°C'de 2 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü   | 103 |
| Şekil 5.25 | 850°C'de 2 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü   | 104 |
| Şekil 5.26 | 850°C'de 4 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü   | 104 |
| Şekil 5.27 | 850°C'de 6 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü   | 105 |
| Şekil 5.28 | 850°C'de 8 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü   | 105 |
| Şekil 5.29 | 950°C'de 2 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü   | 106 |
| Şekil 5.30 | 950°C'de 4 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü   | 106 |

|            |                                                                                                                                                                                                                             |     |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.31 | 950°C’de 6 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD’in SEM-<br>BEI görüntüsü                                                                                                                                                   | 107 |
| Şekil 5.32 | 950°C’de 8 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD’in SEM-<br>BEI görüntüsü                                                                                                                                                   | 107 |
| Şekil 5.33 | 850°C ’de borlanan A, B ve C serisi KGDD numunelerin<br>kaplama tabakasındaki kürelerin matriste bulunan kürelere<br>göre boyut farkının borlama süresi ile değişimi                                                        | 109 |
| Şekil 5.34 | 950°C ’de borlanan A, B ve C serisi KGDD numunelerin<br>kaplama tabakasındaki kürelerin matriste bulunan kürelere<br>göre boyut farkının borlama süresi ile değişimi                                                        | 109 |
| Şekil 5.35 | 850°C ve 950°C’de borlanan A, B ve C serisi KGDD<br>numunelerin kaplama tabakasındaki kürelerin matriste<br>bulunan kürelere göre boyut farklarının borlama süresi ile<br>değişimi                                          | 110 |
| Şekil 5.36 | 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD’in<br>mikroyapısı                                                                                                                                                  | 110 |
| Şekil 5.37 | 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD’in<br>mikroyapısı                                                                                                                                                  | 111 |
| Şekil 5.38 | 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD’in<br>mikroyapısı                                                                                                                                                  | 111 |
| Şekil 5.39 | 850°C ’de borlanan A serisi KGDD ’lerde borlama süresine<br>bağlı olarak tabaka kalınlığındaki değişim                                                                                                                      | 114 |
| Şekil 5.40 | 850°C ’de borlanan B serisi KGDD ’lerde borlama süresine<br>bağlı olarak tabaka kalınlığındaki değişim                                                                                                                      | 115 |
| Şekil 5.41 | 850°C ’de borlanan C serisi KGDD ’lerde borlama süresine<br>bağlı olarak tabaka kalınlığındaki değişim Şekil 5.42 950°C<br>’de borlanan A serisi KGDD ’lerde borlama süresine bağli<br>olarak tabaka kalınlığındaki değişim | 115 |
| Şekil 5.42 | 950°C ’de borlanan A serisi KGDD ’lerde borlama süresine<br>bağli olarak tabaka kalınlığındaki değişim                                                                                                                      | 116 |
| Şekil 5.43 | 950°C ’de borlanan B serisi KGDD ’lerde borlama süresine<br>bağli olarak tabaka kalınlığındaki değişim                                                                                                                      | 116 |
| Şekil 5.44 | 950°C ’de borlanan C serisi KGDD ’lerde borlama süresine<br>bağli olarak tabaka kalınlığındaki değişim                                                                                                                      | 117 |

|             |                                                                                                                                                                     |     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.45  | 850°C 'de borlanan A, B ve C serisi KGDD 'lerde borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlığındaki değişim                                                         | 117 |
| Şekil 5.46  | 950°C 'de borlanan A, B ve C serisi KGDD 'lerde borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlığındaki değişim                                                         | 118 |
| Şekil 5.47  | 850 ve 950°C sıcaklıklarda borlanan A serisi numunelerde borlama süresine bağlı olarak borür tabaka kalınlığının değişimi                                           | 118 |
| Şekil 5.48  | 850 ve 950°C sıcaklıklarda borlanan B serisi numunelerde borlama süresine bağlı olarak borür tabaka kalınlığının değişimi                                           | 119 |
| Şekil 5.49  | 850 ve 950°C sıcaklıklarda borlanan C serisi numunelerde borlama süresine bağlı olarak borür tabaka kalınlığının değişimi                                           | 119 |
| Şekil 5.50  | Bor kaplanmış KGDD 'lerde $Fe_2B$ fazından oluşan borür tabakasının elde edilmesi için bakır konsantrasyonunun, borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak değişimi | 121 |
| Şekil 5.51  | Bor kaplanmış KGDD 'lerde C-Si esaslı bant oluşumun engellemek için bakır konsantrasyonunun, borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak değişimi                    | 121 |
| Şekil 5. 52 | 850°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış A serisi numunenin x-ışınları difraksiyon paterni                                                                        | 125 |
| Şekil 5. 53 | 850°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış B serisi numunenin x-ışınları difraksiyon paterni                                                                        | 125 |
| Şekil 5. 54 | 850°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış C serisi numunenin x-ışınları difraksiyon paterni                                                                        | 126 |
| Şekil 5. 55 | 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış A serisi numunenin x-ışınları difraksiyon paterni                                                                        | 126 |
| Şekil 5. 56 | 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış B serisi numunenin x-ışınları difraksiyon paterni                                                                        | 127 |
| Şekil 5. 57 | 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış C serisi numunenin x-ışınları difraksiyon paterni                                                                        | 127 |

|             |                                                                                                                                                                       |     |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5. 58 | 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile bor kaplanmış A serisi numunenin kaplama tabakasının elementle analiz dağılımı. (a) Mikroyapı görüntüsü, (b) Lineer analiz diyagramı | 129 |
| Şekil 5. 59 | 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile bor kaplanmış B serisi numunenin kaplama tabakasının elementle analiz dağılımı. (a) Mikroyapı görüntüsü, (b) Lineer analiz diyagramı | 130 |
| Şekil 5. 60 | 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile bor kaplanmış C serisi numunenin kaplama tabakasının elementle analiz dağılımı. (a) Mikroyapı görüntüsü, (b) Lineer analiz diyagramı | 131 |
| Şekil 5. 61 | 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile bor kaplanmış C serisi numunede, kaplama tabakasının noktasal analiz diyagramı                                                       | 132 |
| Şekil 5. 62 | 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile bor kaplanmış A serisi numunede kaplama-matris arayüzeyinde bulunan siyah tabakanın noktasal analiz diyagramı                        | 132 |
| Şekil 5.63  | 850°C 'de bor kaplanmış A serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                                                                                    | 137 |
| Şekil 5.64  | 850°C 'de bor kaplanmış B serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                                                                                    | 138 |
| Şekil 5.65  | 850°C 'de bor kaplanmış C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                                                                                    | 138 |
| Şekil 5.66  | 950°C 'de bor kaplanmış A serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                                                                                    | 139 |
| Şekil 5.67  | 950°C 'de bor kaplanmış B serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                                                                                    | 139 |
| Şekil 5.68  | 950°C 'de bor kaplanmış C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                                                                                    | 140 |
| Şekil 5. 69 | 850°C 'de 2 saat süre ile bor kaplanmış A, B ve C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                                                            | 140 |
| Şekil 5. 70 | 850°C 'de 4 saat süre ile bor kaplanmış A, B ve C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                                                            | 141 |
| Şekil 5. 71 | 850°C 'de 6 saat süre ile bor kaplanmış A, B ve C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                                                            | 141 |

|             |                                                                                                                                    |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5. 72 | 850°C 'de 8 saat süre ile bor kaplanmış A, B ve C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                         | 142 |
| Şekil 5. 73 | 950°C 'de 2 saat süre ile bor kaplanmış A, B ve C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                         | 142 |
| Şekil 5. 74 | 950°C 'de 4 saat süre ile bor kaplanmış A, B ve C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                         | 143 |
| Şekil 5. 75 | 950°C 'de 6 saat süre ile bor kaplanmış A, B ve C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                         | 143 |
| Şekil 5. 76 | 950°C 'de 8 saat süre ile bor kaplanmış A, B ve C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                         | 144 |
| Şekil 5. 77 | 850°C 'de borlanan C serisi numunelerin borür tabakalarının kırılma tokluğu değerlerinin borlama süresi ile değişimi               | 145 |
| Şekil 5. 78 | 950°C 'de borlanan C serisi numunelerin borür tabakalarının kırılma tokluğu değerlerinin borlama süresi ile değişimi               | 146 |
| Şekil 5. 79 | 850°C ve 950°C 'de borlanan C serisi numunelerin borür tabakalarının kırılma tokluğu değerlerinin borlama süresi ile değişimi      | 146 |
| Şekil 5. 80 | 950°C 'de 2 saat süre ile borlanan numunenin aşınma deneyi uygulanmadan önce ölçülen yüzey pürüzlülüğü eğrisi                      | 149 |
| Şekil 5. 81 | Döküm haliyle 10N yük altında aşınma yoluna bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi                                            | 149 |
| Şekil 5. 82 | 850°C 'de 2 saat süre ile borlanmış C serisi numunelerin 2N yük altında aşınma yoluna bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi  | 149 |
| Şekil 5. 83 | 850°C 'de 2 saat süre ile borlanmış C serisi numunelerin 5N yük altında aşınma yoluna bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi  | 150 |
| Şekil 5. 84 | 850°C 'de 2 saat süre ile borlanmış C serisi numunelerin 10N yük altında aşınma yoluna bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi | 150 |
| Şekil 5. 85 | Döküm haliyle C serisi numunelerin 2N, 5N ve 10N yük altında aşınma hızlarının değişimi                                            | 150 |
| Şekil 5. 86 | 850°C ve 950°C 'de borlanmış C serisi numunenin, 2N yük altında aşınma hızının borlama süresi ile değişimi                         | 151 |

|             |                                                                                                                                               |     |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5. 87 | 850°C ve 950°C 'de borlanmış C serisi numunenin, 5N yük altında aşınma hızının borlama süresi ile değişimi                                    | 151 |
| Şekil 5. 88 | 850°C ve 950°C 'de borlanmış C serisi numunenin, 10N yük altında aşınma hızının borlama süresi ile değişimi                                   | 152 |
| Şekil 5. 89 | 850°C ve 950°C 'de borlanmış C serisi numunenin 2N, 5N ve 10N yük altında aşınma hızlarının borlama süresi ile değişimi                       | 152 |
| Şekil 5. 90 | İşlemsiz (döküm haliyle) malzeme yüzeyine uygulanan aşınma deneylerinde oluşan izlerin mikroyapı görüntüsü                                    | 154 |
| Şekil 5. 91 | Döküm haliyle KGDD numuneye 2N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü                                  | 154 |
| Şekil 5. 92 | Döküm haliyle KGDD numuneye 5N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü                                  | 155 |
| Şekil 5. 93 | Döküm haliyle KGDD numuneye 10N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü                                 | 155 |
| Şekil 5. 94 | 850°C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanan C serisi numuneye 10N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü | 156 |
| Şekil 5. 95 | 850°C sıcaklıkta 8 saat süre ile borlanan C serisi numuneye 5N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü  | 156 |
| Şekil 5. 96 | 950°C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanan C serisi numuneye 2N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü  | 157 |
| Şekil 5. 97 | 950°C sıcaklıkta 4 saat süre ile borlanan C serisi numuneye 10N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü | 157 |
| Şekil 5. 98 | 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanan C serisi numuneye 2N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü  | 158 |
| Şekil 5. 99 | 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanan C serisi numuneye 5N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü  | 158 |

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa No

|            |                                                                                                                               |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 2.1  | Mikroyapı ve kırılma özelliklerine göre dökme demirlerin sınıflandırılması                                                    | 6  |
| Tablo 2.2  | TSE standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması                                                      | 8  |
| Tablo 2.3  | DIN standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması                                                      | 9  |
| Tablo 3.1  | Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması                             | 14 |
| Tablo 3.2  | Kutu borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri                                                   | 18 |
| Tablo 3.3  | Sıvı borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin özellikleri                                                        | 21 |
| Tablo 3.4  | Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri                                                                | 23 |
| Tablo 3.5  | Çeşitli altlık malzemelerin borlanması sırasında oluşan farklı borür fazlarının ergime sıcaklıkları ve mikrosertlik değerleri | 25 |
| Tablo 3.6  | Borlanmış sementit karbür malzemelerde oluşan üç farklı bölgedeki fazlar                                                      | 26 |
| Tablo 3.7  | Çeşitli metal borürlerin bazı özellikleri                                                                                     | 30 |
| Tablo 3.8  | $\text{Fe}_2\text{B}$ ve $\text{FeB}$ fazlarının tipik özellikleri                                                            | 34 |
| Tablo 3.9  | $\text{FeB}$ ve $\text{Fe}_2\text{B}$ fazları içerisinde borun difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjileri              | 51 |
| Tablo 3.10 | Borlama işlemine tabi tutulmuş çeşitli demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları                                    | 58 |
| Tablo 4.1  | DeneySEL çalışmalarda kullanılan küresel grafitli dökme demir malzemelerin kimyasal bileşimleri                               | 79 |
| Tablo 4.2  | Aşınma hızı hesaplamalarında kullanılan değişken ve bağıntılar                                                                | 88 |

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 5.1  | 850°C ve 950°C’de borlanan A, B ve C serisi KGDD numunelerin kaplama tabakasındaki kürelerin, matriste bulunan kürelere göre boyutsal değişimi                                                                                                                   | 108 |
| Tablo 5.2  | A serisi numunelerde borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları                                                                                                                                                            | 113 |
| Tablo 5.3  | B serisi numunelerde borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları                                                                                                                                                            | 113 |
| Tablo 5.4  | C serisi numunelerde borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları                                                                                                                                                            | 114 |
| Tablo 5.5  | C serisi numunelerin difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi                                                                                                                                                                                                   | 122 |
| Tablo 5.6  | 850°C ve 950°C sıcaklıklarda 6 saat süre ile borlanan A, B ve C serisi numunelerde borür tabakasında tesbit edilen Fe <sub>2</sub> B ve FeB fazlarının difraksiyon açıları. (+) işareti verilen açıda fazın varlığını, (-) işareti faz olmadığını göstermektedir | 124 |
| Tablo 5.7  | A, B ve C serisi numunelerin işlem öncesi sertlikleri                                                                                                                                                                                                            | 133 |
| Tablo 5.8  | 850°C ‘de borlanmış A serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                                                                                                                                                                                   | 135 |
| Tablo 5.9  | 850°C ‘de borlanmış B serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                                                                                                                                                                                   | 136 |
| Tablo 5.10 | 850°C ‘de borlanmış C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                                                                                                                                                                                   | 136 |
| Tablo 5.11 | 950°C ‘de borlanmış A serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                                                                                                                                                                                   | 136 |
| Tablo 5.12 | 950°C ‘de borlanmış B serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                                                                                                                                                                                   | 137 |
| Tablo 5.13 | 950°C ‘de borlanmış C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları                                                                                                                                                                                   | 137 |
| Tablo 5.14 | Borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak borlanmış C serisi numunelerin kırılma tokluğu değerleri                                                                                                                                                              | 145 |
| Tablo 5.15 | Aşınma testine tabi tutulan numunelerin aşınma deneyi öncesi yüzey pürüzlülükleri, sürtünme katsayısı değerleri                                                                                                                                                  | 148 |
| Tablo 5.16 | Aşınma testine tabi tutulan C serisi numunelerin borlama süresi, sıcaklığı ve aşınma yüküne bağlı olarak, aşınma hızlarının değişimi                                                                                                                             | 148 |

## ÖZET

Borlama, yüksek sıcaklıkta ana metalin yüzeyinde borür tabakası oluşturulması işlemidir. Borlama günümüzde yalnızca metallere değil, sermet ve seramik malzemelerde uygulanmaktadır. Bor kaplama, yüzeyde bileşik oluşturacak şekilde bor atomlarının difüzyonu olarak da bilinmektedir. Borlama işlemi, yüzeyi iyi temizlenmiş malzemelere 700-1000°C sıcaklık aralığında, 1-10 saat sürelerde katı, pasta, sıvı veya gaz gibi çeşitli ortamlarda uygulanabilmektedir. Son teknolojik gelişmeler sonucu gaz ortamında termo-kimyasal borlama, plazma borlama ve akışkan yataкта borlama gibi yeni olan teknikler de kullanılmaktadır.

Demir esaslı malzemelerin termo-kimyasal olarak borlanması üzerine bir çok çalışma yapılmış ve son 30 yıl içerisinde bu çalışmalar oldukça hızlanmıştır. Araştırmalar neticesinde elde edilen sonuçlarla bir çok gelişmiş ülke, borlama işlemini sanayilerine aktarmıştır. Borlama işlemi endüstriyel olarak daha çok çelikler üzerine uygulanmaktadır ve bir çok çelik grubu üzerinde detaylı araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Ancak, dökme demirler üzerinde yapılan araştırmalar oldukça sınırlıdır ve az sayıda çalışma yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, termo-kimyasal olarak borlanan küresel grafitli dökme demirlerin(KGDD); mikroyapı ve kimyasal bileşim, oluşan borür tabakasının morfolojisi ve mekanik özellikleri üzerine etkisini araştırmaktır. Bu amaçla kullanılacak malzemeler için bileşimler, GGG-50 (%5 Perlit), GGG-60 (%70 perlit) ve GGG-80 (%100 perlitik) olacak şekilde seçilmiş ve benzer şartlarda borlamanın mukayeseli olarak bu KGDD'ler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. KGDD 'lerde matris yapısını belirleyici element olarak bakır kullanılmıştır. Çeliklerle kıyaslandığında, literatürde KGDD'lerin borlanması ile ilgili oldukça sınırlı sayıda araştırma mevcut olup, kapsamlı araştırmalar henüz yapılmamıştır.

Bu çalışmada DÖKTAŞ A.Ş. tarafından üretilen DIN 1693 normuna uygun GGG-50, GGG-60 ve GGG-80 türü küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve borür tabakalarının kalınlıkları, morfolojileri, sertlikleri, kırılma toklukları ve aşınma özellikleri; optik mikroskob, mikrosertlik cihazı, x-ışınları difraktometresi, taramalı elektron mikroskobu(SEM) ve CSEM tribometre aşınma cihazı kullanılarak incelenmiştir.

Yapılan incelemeler sonucunda KGDD'lerin yüzeyinde oluşan borür tabakalarının çeliklere göre farklılıklar içerdiği, oluşan borür tabakasının içerisinde dağılmış bulunan grafit kürelerinin varlığı ve ayrıca kaplama matris arayüzeyinde karbon ve silisyum esaslı bir birikimin olduğu görülmektedir. KGDD malzemelerin içerisinde bakır konsantrasyonunun artışına bağlı olarak, C ve Si esaslı birikimin oluşmadığı ve homojen olarak malzeme yüzeyinde oluşan  $Fe_2B$  fazından oluşan borür tabakası elde edilmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda bor kaplanmış KGDD malzemelerin sürtünme katsayısı değerlerinin çeliklere göre daha düşük, aşınma hızının ise yaklaşık olarak çeliklerle eşit olduğu görülmüştür.

## **THE BORIDING OF SOME DUCTILE IRONS AND THEIR PROPERTIES**

### **SUMMARY**

Definite limits are being approached, or have been reached in single materials development. A solution is to produce a composite material that combines the best properties of different metals or ceramics. This may be a coating of one material on another.

Coatings enable the attributes of two or more materials( the substrate and the coating(s)) to be combined to form a composite having characteristics not readily or economically available in a monolithic material. Examples are tribological properties and wear resistance coupled with corrosion resistance. In the high temperature fields economic and technical pressures to achieve extended lives and greater reliability plus a need to conserve certain relatively scarce (and hence expensive) or strategic alloying elements, have dictated increasing recourse to coatings. The need for surface stabilization led to the growing need for coatings and rapid developments in the field of surface engineering.

In general resistance to wear is directly proportional to hardness. However, if hardness of a material increase, its brittleness also increases, on the other hand its toughness decreases. For this reason, it is aimed to combine hardness and toughness properties by the surface treatment. Thus, a layer resistance to wear and hard is obtained on the surface of substrate material by the surface treatment, and also the cores of substrate resist to stress by its softer (tough) structure.

Various coating methods are developed provide surface properties required. Thermo-chemical (boriding, nitriding) and termoreactive diffusion processes (TRD), pack cementation techniques, plasma spray, physical vapour deposition (PVD), chemical vapour deposition (CVD), laser operations, electrochemical deposition etc. are some of them. While some of the layers obtained by these techniques form physical bond, some others form strong chemical bond with substrate by diffusion.

Boriding or boronizing is a thermo-diffusion surface hardening process in which boron atoms diffused into the surface of a work piece to form borides with the base material. The boriding process can be applied to a wide variety of ferrous, non-ferrous and cermet materials. The process involves heating of well-cleaned material in the range of 700 to 1000°C, preferably for 1 to 12h in contact with a boronaceous solid powder or boronizing compound, paste, liquid or gaseous medium. During boriding, the diffusion and subsequent absorption of boron atoms into the metallic lattice of the component surface form interstitial boron compounds. The resulting layer may consist of either a single-phase boride or a polyphase boride layer. The single-phase boride layer consists of  $\text{Fe}_2\text{B}$ , while the double-phase layer consists of

an outer dark-etching phase of FeB and inner bright-etching phase of Fe<sub>2</sub>B. The hardness of FeB is higher than that of Fe<sub>2</sub>B boride due to more boron atom content of FeB. The property of the borided layer depends strongly on the composition and structure of the boride layer and the composition of the base (substrate) material. When applied to the appropriate materials, boronizing provides wear and abrasion resistance, corrosion and oxidation resistance comparable to sintered carbides. Boronizing process a number of characteristics features and benefits as follows;

- Boride layers have extremely high hardness of 1800-2100HV. Hardness is retained up to subcritical temperatures.
- Heat treatable materials can be fully hardened after boronizing to optimize performance.
- Boronizing increases resistance to acids, HCl in particular.
- It can be uniformly applied to irregular shapes.
- Boride layers have good resistance to abrasive, sliding and adhesive wear, also low coefficient of friction.

Industrial boriding can be carried out on most ferrous materials such as structural steels and cast steels as: Armco iron, gray and ductile iron. In recent years a considerable attention about boriding of case-hardened, tempered, tool and stainless steel has been given. But, little work has been carried out about the boriding of ductile irons comparison with the boriding of steels. However, no sufficient experimental data was found in the literature on the boride coating characteristics of cast irons, especially ductile irons. For this purpose, the boride coatings of ductile irons were investigated.

In this study, boronizing practice was intended to use for surface modification of ductile irons. Boronizing is frequently used to increase surface hardness to obtain a layer resisting wear and chemical attacks. At the same time, boride coatings used for high temperature applications up to 700°C.

The aim of the present work is to investigate the effect of the boriding temperature, time and composition of ductile irons on the coating microstructure, mechanical properties and phase composition. The substrate materials chosen in present work were three groups of ductile iron. The chemical compositions of these materials are given in Table 1.

Table 1 The chemical composition of ductile irons

| Casting Code | Chemical Composition (weight, %) |      |      |       |       |       |        |        |       |
|--------------|----------------------------------|------|------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
|              | C                                | Si   | Mn   | P     | S     | Cr    | Cu     | Sn     | Mg    |
| A(GGG-50)    | 3.78                             | 2.46 | 0.32 | 0.038 | 0.065 | 0.031 | 0.0089 | 0.0042 | 0.050 |
| B(GGG-60)    | 3.70                             | 2.4  | 0.39 | 0.051 | 0.010 | 0.040 | 0.31   | 0.012  | 0.058 |
| C(GGG-80)    | 3.70                             | 2.60 | 0.40 | 0.045 | 0.008 | 0.065 | 0.98   | 0.038  | 0.052 |

The samples were produced from these materials in the form of keel blocks in DÖKTAŞ A.Ş. (Orhangazi) and experiment were carried out in The Department of Metallurgy of Sakarya University.

Experimental specimens (A, B and C series ductile irons) were cut and machined from the keel blocks to the dimensions of 10x10x15mm and 10x15x20mm and then, borided at 850°C and 950°C for 2, 4, 6 and 8 hours in the bath consisted of calcined borax 60%, calcined boric acid 15%, ferro-silicon (70% Si) 20% and aluminum 5%. Liquid bath boronizing can be used easily and controlled atmosphere is not necessary for this techniques. Salt bath can be used at higher temperatures for ferrous alloys, to developed the desired boride layer thickness. It is known that, this technique is cheaper than others. Since we have borax mineral reserves in TURKIYE, study on boronizing is very attractive. Borax bath materials can be supplied easily in Turkiye. All heat treatment companies can apply easily these techniques like cementation or nitriding.

After boronizing, properties of each group of materials were examined by using classical metallographic techniques. Optical metallography was carried out on the polished boride coating surfaces of all specimens and the thickness of boride layers on coating surfaces was measured. More detailed examination of boride layers were carried out by using scanning electron microscope back scattered image analysis (SEM-BEI), linear and electron microprobe analysis (EMA), x-ray diffraction analysis. Mechanical tests such as hardness, wear and fracture toughness were also carried out. Microhardness measurements were conducted under the load of 100g. Wear tests of C series ductile irons were carried out by using a ball-on disc machine under 2N, 5N and 10N normal loads with 200 cycle/min. rate of rotor. Wear rates, volumetric losses and coefficient of frictions were measured. Fracture toughness of C series specimens was measured via Vickers indenter under 300g. to 1000g. loads.

Metallographic studies showed that coating layer has columnar shape. Coatings of borided ductile irons consist of two layers; one of them is outer parts of coatings which have two phases of FeB and Fe<sub>2</sub>B. Other inner layer is based on carbon and silicon. In addition to these, we frequently observe ferrite phase on heat effected zone.

Boride layer thickness of coated ductile irons depends on boriding time, temperature and composition of base material. The boriding time and temperature increase the boride layer thickness as expected. Whereas, the increasing of copper concentration of ductile iron decreases the boride layer thickness. In addition of these, copper concentration of ductile iron affects the morphology of boride coatings.

If copper concentration of ductile iron increases, coatings do not have the second layer based on carbon and silicon under FeB and Fe<sub>2</sub>B phases. In addition to this boride phase consist of Fe<sub>2</sub>B only. However, if boriding temperature and time increases, FeB phases and the second layer on the surfaces of ductile irons, which is based on carbon and silicon, were observed.

The hardness levels of the boride layer also depend on composition of base material, boriding time and temperature. By hardness measurements from the surface until the original matrix, boriding time and temperature affect the hardness of boride layers and boride layer thickness. When the boriding time and temperature increase, the hardness and depth of boride layer increase. However, increasing of copper concentration in ductile iron decreases the hardness of boride layers. Since borided C series ductile irons have not gotten FeB phases. Therefore, C series coatings are softer than A and B series. When copper concentration of ductile iron decreases, the rate of boron diffusion and the boride layer thickness on ductile iron surfaces increase. One of the important fact is the stabilising effect of copper on the occurrence of Fe<sub>2</sub>B phase in the boride layer.

X-ray diffraction analysis showed that borided A and B series ductile irons have FeB and Fe<sub>2</sub>B phases. However, borided C series ductile irons have only Fe<sub>2</sub>B phase at the temperature and time ranges studied.

Scanning electron microscopy back scattered image (SEM-BEI) studies showed that, A and B series ductile irons have some cracks between FeB and Fe<sub>2</sub>B phases that is parallel to sample surfaces. However, borided C series ductile irons have not got any FeB phases and no cracks.

Microprobe micro analysis studies showed that, carbon and silicon enrich between boride layers and matrix. In this study, elemental distribution in boride layers and sublayers of coating were searched. If copper concentration of ductile irons increases, the layers of carbon and silicon between boride layers and matrix decreases. If copper concentration of ductile iron increase up to 1 % by weight, the layers of carbon and silicon between boride layers and matrix don't form for the low temperature and short times. All findings support observations made by microscope and fulfil phase composition relations.

The formation of a single Fe<sub>2</sub>B phase is more desirable than a double-phase layer with FeB. The boron-rich FeB phase is considered undesirable in part, because FeB is more brittle than Fe<sub>2</sub>B. Also, because FeB and Fe<sub>2</sub>B are formed under tensile and compressive residual stresses, respectively, crack formation is often observed at or in the neighbourhood of the FeB-Fe<sub>2</sub>B interface of a double-phase layer. Because borided C series ductile irons do not have FeB phases and carbon and silicon rich layers between boride phase and matrix, fracture toughness and wear test was applied only C series ductile irons.

Borided A and B series ductile irons have some cracks between FeB and Fe<sub>2</sub>B phases. These cracks generally can not be seen by optical metallographic techniques. However, SEM-BEI micrographes clearly shows FeB and Fe<sub>2</sub>B layers and cracks between them. The fracture toughness of borided ductile irons slowly goes down by increasing boriding time and temperature. Time changing is much more effective than temperature. The fracture toughness value is changing from 4.2 MPa.m<sup>1/2</sup> to 2.5 MPa.m<sup>1/2</sup>. These values are better than many of ceramics. For example, these values are approximately same as Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

It has been reported that, the tribological properties depend on the microstructure of the boride layer. Wear tests carried out using the ball-on disc techniques showed that coefficient of friction of borided C series ductile iron is measured about 0.15. Whereas, coefficient of friction of boride layers on the surfaces of steel substrate was not very low. It was vary nearly among 0.38 to 0.63. The boride layers of ductile irons have spheroidal graphites that cause the dry lubrication on wear test conditions. Because of this, coefficient of friction of borided ductile irons is very low.

The wear rate of boride layers on C series ductile iron was found very low like borided steel substrate. If the boriding temperatures, time and wear load increase, the rate of wear also increase. Metallographic examination of the wear surfaces showed that the wear was of an oxidative and abrasive type. Wear tracks colours which are red, grey and yellowish white indicate the presence of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  and  $\text{B}_2\text{O}_3$  on the surfaces, respectively.



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Genel olarak bir malzemenin performansı, kütleli ve yüzeysel özelliğine bağlıdır. Malzemenin yüzeysel özelliklerindeki herhangi bir değişim, malzeme fonksiyonlarını büyük ölçüde etkilemektedir.

Son yıllarda malzeme yüzeysel özelliklerinin rolü, birçok çalışmanın konusunu oluşturmuştur. Yüzeysel enerjisi, yüzeysel gerilmesi, yüzeysel aktivitesi ve yüzeysel ilgili problemler bilimsel alanda büyük önem kazanmıştır. Metal ve alaşımlarının, kütleli ve yüzeysel özellikleri arasındaki ilişki uzun yıllardan beri araştırılmaktadır[1].

Malzemeler bulundukları çevrede, çevre-yüzeysel etkileşimi sonucunda bozulmalara uğrayabilirler. Malzeme ile çevre arasında fiziksel ve kimyasal açıdan herhangi bir reaksiyonun oluşması, malzemenin hasarına neden olabilmektedir. Üstün özelliklere sahip malzeme elde etmek için, yüzeysel bilimi ve teknolojisi, gelişmiş ülkelerde büyük önem kazanmıştır [1]. Yüzeysel işlemleri, en yaygın kullanım alanını demir ve demir esaslı ürünler arasında bulmuştur. Yüzeysel işlemlerini, kaplama ve yüzeysel dönüşüm işlemleri olarak iki sınıfa ayırmak mümkündür. Kaplama, metal yüzeyine bir element veya bileşiğin biriktirilerek bir kabuk oluşturulması işlemini kapsar. Yüzeysel dönüşüm işlemlerinde ise, yüzeysel iç yapısı ve/veya kimyasının değiştirilmesi söz konusudur [2].

Yüzeysel işlemleri; malzemelerin sertlik, süneklik, yorulma, aşınma, korozyon, ısısal ve darbesel şok gibi mekanik ve tribolojik özelliklerinin bir veya birkaçını geliştirmek ve üretim maliyetini düşürmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu özellikler arasında, parçanın aşınma ve korozyona karşı direncinin artırılması önem açısından ilk sırada

yer almakta ve sanayide uygulanan işlemlerin büyük çoğunluğunun amacını teşkil etmektedir. Aşınma ve korozyon, dünyada her yıl önemli maddi kayıplara neden olmaktadır. Bu nedenle, son yıllarda yaygın olarak çalışılan başlıca konular arasında üretilen parçaların çevre şartlarında bozulmasını önleyecek kaplamaların gerçekleştirilmesi üzerine olmuştur [1]. Bu amaçla, oksit, karbür, borür ve nitrürlere dayanan sürekli kaplamalar büyük ilgi toplamaktadır [2,3].

Fiziksel buhar biriktirme(PVD), kimyasal buhar biriktirme(CVD), spreyleme ve difüzyon esaslı kaplama teknikleri, aşınma, korozyon ve oksidasyona karşı dirençli karbür, nitrür ve borür kaplamaların gerçekleştirilmesinde uygulanmaktadır. Malzeme yüzeyinde istenilen özelliklere ulaşıldığı takdirde, hem pratik hem de ekonomik olması sebebiyle, bir tuz banyosunda malzeme yüzeyinin seramik kaplanması büyük avantajlar sağlamaktadır [4].

Termo-kimyasal bir kaplama işlemi olan borlama, daldırma tekniği ile kaplamaya en uygun olan metodlardan bir tanesidir [4]. Türkiye 'nin dünyada en büyük bor rezervine sahip olan ülke olması sebebiyle [5] ve bor bileşiklerinin üstün özellikleri göz önüne alındığı takdirde, bor kaplamaların ülkemiz açısından önemi ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla, demir esaslı malzemelerin borlanması konusunda birçok araştırma yapılmıştır. Gelişmiş ülkelerin endüstrisinde bor kaplama yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çelikler üzerine borlama konusunda yüzlerce araştırma yapılmasına rağmen, dökme demirler konusundaki çalışmalar sınırlı kalmıştır. Küresel grafitli dökme demirler, çeliklerin ve dökme demirlerin özelliklerini birarada bulundurması sebebiyle kullanımı günümüzde artmıştır. Birçok sürtünmeli ortamda, küresel grafitli dökme demirlerin kullanım alanı bulması, bu malzemenin kütesel özelliklerinin yanında yüzey özelliklerinin de önemli olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Bunun yanında, küresel grafitli dökme demirlerin yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla bazı kaplama teknikleri uygulanmaktadır.

Bu çalışmada, üç adet farklı bileşim ve mikroyapıda küresel grafitli dökme demirin yüzeyi, boraks ve borik asit esaslı tuz banyosuna daldırma tekniği kullanılarak, borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlanan yüzeylerin, geniş bir spektrumda yüzey özellikleri araştırılmıştır. Küresel grafitli dökme demirlerin borlanabilirliği ve örneklerin kaplama tabaka yapıları metalografik olarak incelenmiştir. Ayrıca, kaplama tabakasının sertlik, kırılma tokluğu ve aşınma gibi mekanik özellikleri de araştırılmıştır. Gelişmiş araştırma tekniklerinden, x-ışınları difraksiyon analizi kullanılarak, kaplama tabakasını oluşturan fazların dağılımları, taramalı elektron mikroskobu(SEM) kullanılarak, fazların mikroyapıları ve elektron mikroprob analiziyle, elementlerin kaplama tabakası boyunca dağılımları belirlenmiştir.



## BÖLÜM 2

### KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

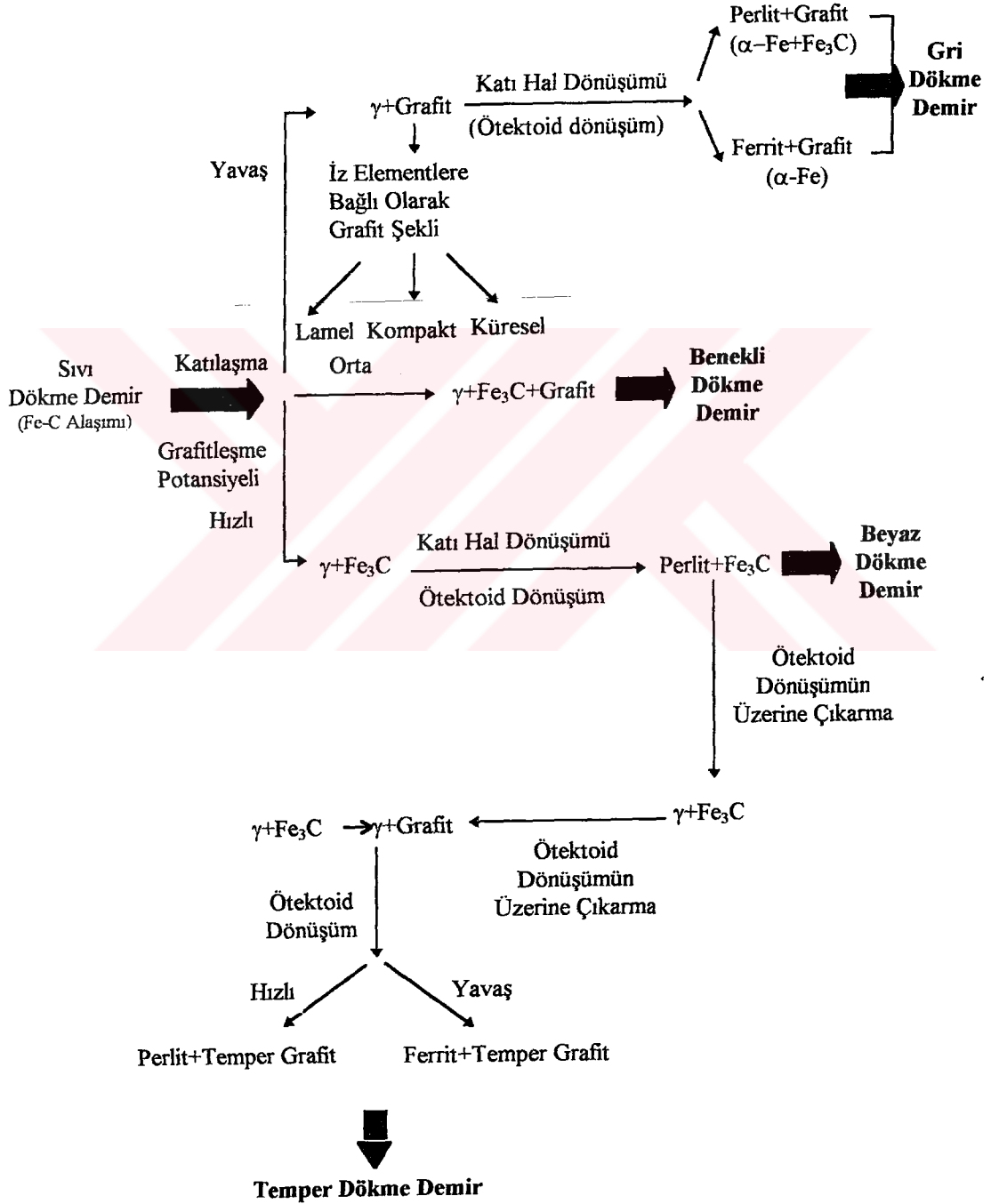
#### 2.1 Dökme Demirlerin Tanımı ve Sınıflandırılması

Dökme demirler, çeliğe benzer demirli alaşımların geniş bir sınıfıdır. Fe-C denge diyagramında ostenit fazının maksimum çözünürlüğü olan %2 değerinin üzerinde karbon içeren demir-karbon alaşımıdır. Yüksek karbon içeriğinin dökme demirlerin gevrekleşmesine sebep olması nedeniyle ticari olarak kullanımı açısından karbon miktarı genellikle %2.5-4 oranları arasında tutulmaktadır. Dökme demirlerin bileşiminde genellikle C ve Si oranı oldukça yüksektir. Bileşim ve soğutma hızı, dökme demirlerin termodinamik olarak yarı kararlı (Fe-Fe<sub>3</sub>C) veya kararlı (Fe-grafit) şekilde katılaşmasına bağlıdır. Yarı kararlı durum, ötektikte karbonca zengin Fe<sub>3</sub>C fazını içerirken kararlı durum ötektikte grafit fazını içermektedir [6].

Dökme demirlerin plastik şekil alma kabiliyetleri çok düşüktür. Bu sebeple şekil değiştirme işlemine tabi tutulmazlar. Bununla beraber, dökme demirler kolayca ergitilebilirler ve çok karmaşık şekilli parçaların üretilmesine imkan tanırırlar. Bilinen dökme demirler, çeliklerden daha düşük mukavemet özellikleri sergilerlerken, çeliklere nazaran çok daha ucuzdurlar [7].

Dökme demirlerin sınıflandırılması genellikle mikroyapıya göre yapılmaktadır. Dökme demirlerin mikroyapısını, bileşimindeki karbon miktarı, alaşım elementi veya empürite miktarı, katılaşma sırasında veya sonrasında soğuma hızı ve döküm sonrası ısıtma işlemi gibi dört faktör etkilemektedir [7]. Yaygın olarak kullanılan dökme demir türleri, yapıları ve üretimleri şematik olarak Şekil 2.1 'de verilmektedir. İki temel ötektik türü olan; kararlı ostenit+grafit veya yarı kararlı

ostenit+sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) 'in mukavemet, sertlik, süneklik ve tokluk gibi mekanik özellikleri arasında oldukça büyük farklılıklar bulunmaktadır. Bu yüzden, dökme demirlerin metalurji sektöründeki üretim alanı, miktarı, işlenmesi ve istenilen mekanik özellikleri için dikkat edilmesi gereken başlıca özellik ötektik morfolojisidir [6].



Şekil 2.1 Dökme demirlerin mikroyapılarına göre sınıflandırılması [6].

Dökme demirlerin sınıflandırılması ilk olarak kırılmalıklarına göre yapılmıştır. Bu sınıflandırmada dökme demirler; beyaz dökme demir ve gri dökme demir olarak ikiye ayrılmaktadır. Diğer bir sınıflandırma ise malzemenin mikroyapı ve kütleel özelliklerine göre yapılmaktadır. Dökme demirlerin mikroyapı ve kırılma özelliklerine göre sınıflandırılması Tablo 2.1 'de verilmektedir [6].

Tablo 2.1 Mikroyapı ve kırılma özelliklerine göre dökme demirlerin sınıflandırılması[6].

| Dökme Demir Sınıfları                        | Karbonca Zengin Faz                | Matris <sup>(a)</sup> | Kırılma Rengi | Nihai Yapı Sebebi                  |
|----------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|---------------|------------------------------------|
| Gri dökme demir                              | Lamel grafitli                     | P                     | Gri           | Katılma                            |
| Küresel grafitli dökme demir                 | Küresel grafitli                   | F,P,O                 | Gümüş gri     | Katılma + ısı işlem                |
| Kompakt grafitli dökme demir                 | Kompakt vermiküler grafitli        | F,P                   | Gri           | Katılma                            |
| Beyaz dökme demir                            | Fe <sub>3</sub> C                  | P,M                   | Beyaz         | Katılma + ısı işlem <sup>(b)</sup> |
| Vermiküler grafitli dökme demir              | Lamel grafitli + Fe <sub>3</sub> C | P                     | Benekli       | Katılma                            |
| Temper dökme demir                           | Temper grafitli                    | F,P                   | Gümüş gri     | Isıl işlem                         |
| Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir. | Küresel grafitli                   | B                     | Gümüş gri     | Isıl işlem                         |

a) F: ferrit, P: perlit, O: ostenit, M: martenzit, B: beyrit, b) Beyaz dökme demir genellikle ısı işlemsizdir, fakat kahntı gerilmeleri gidermek ve ostenitik dönüşümü sağlamak için ısı işlem yapılabilir.

Grafit şekline göre dökme demirler; lamel grafitli, küresel grafitli ve temper grafitli olarak, matris yapısına göre ise; ferritik, perlitik, ferrit+perlitik, ostenitik, martensitik ve beyritik dökme demirler olarak sınıflandırılmaktadır [6].

Ayrıca, dökme demirlerin farklı bir sınıflandırılması da; geleneksel dökme demirler ve özel dökme demirler şeklindedir. Geleneksel dökme demirler, genel uygulama amaçlı kullanılan alaşımsız veya düşük alaşımlı dökme demirlerdir. Özel dökme demirler ise, özel uygulamalar için kullanılan yüksek alaşımlı dökme demirlerdir [6]. Dökme demirler, döküm mikroyapılarına göre dört sınıfta toplanmaktadır [7].

**1)Gri dökme demirler(GDD);** En çok kullanılan dökme demir sınıfını oluşturmaktadır. Bileşimindeki karbonun büyük bir kısmı serbest grafit lamelleri halinde bulunan gri dökme demirler, bileşimlerinde %2.5-4 arasında karbon içerirler. Gri dökme demirlerin mekanik özellikleri doğrudan doğruya döküm yapısına ve grafit morfolojisine bağlıdır. En düşük mukavemetli gri dökme demir Grafit-ferrit

karışımı bir mikroyapıya sahiptir. Karbon miktarının artmasıyla birlikte malzemenin mukavemet ve sertlik değerlerinde artış gözlenmektedir. Gri dökme demirler, çok çeşitli özellikler göstermeleri sebebiyle geniş kullanım alanına sahiptirler. En önemli özellikleri, titreşim söndürme kabiliyeti, yüksek mukavemet ve ucuzluktur[7].

**2) Beyaz dökme demirler(BDD);** Bu tür dökme demirlerde karbonun tamamı sementit ile bileşik haldedir ve mikroyapı sementit+perlitten oluşmaktadır. Ötektik altı alaşımlar olan beyaz dökme demirler, hızlı soğuma şartlarında elde edilirler ve sert olduklarından aşınmaya karşı direnç gerektiren yerlerde kullanılırlar. Ancak, bileşimindeki sementitten dolayı, kırılgandır ve işlenmeleri zordur [7].

**3) Temper dökme demirler(TDD);** Beyaz dökme demirin uygun sıcaklıklara tavlansak, yapısında bulunan sementit ve perlitin parçalanması sonucunda elde edilen dökme demirlerdir. Karbon içeriğinin büyük bir kısmını oluşturan ve temper grafit olarak bilinen düzensiz rozetler, ısıtım işlem sırasında serbest kalan karbonun yavaş soğuması sonucunda oluşmaktadır. Temper dökme demir, ferritik ve perlitik olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Ticari uygulamalarda temper dökme demir denilince akla ferritik temper dökme demir gelmektedir. Ferritik temper dökme demirin de kendi içinde beyaz temper döküm ve siyah temper döküm olmak üzere iki grupta toplandığı görülmektedir. Beyaz temper döküm, oksitleyici bir ortamda elde edilir ve ferritik matris içerisinde temper grafitleri dağılmış haldedir. Siyah temper döküm, beyaz dökme demirin nötr bir ortamda tavlansak ile elde edilmekte ve üretim yöntemine bağılı olarak bünyesinde bir miktar bileşik karbon içermektedir. Perlitik temper dökme demirler de bileşik karbon içerdiklerinden ferritik temper dökümlerden daha yüksek mukavemet gösterirler [7,8].

**4) Küresel grafitli dökme demirler(KGDD);** Aynı zamanda nodüler, sfero ve düktıl demir gibi isimlerle de anılan bu tür dökme demirlerde karbon, grafit küreleri halindedir. Karbonun lamelden küre haline geçişini sağlamak için ergimiş demir, döküm öncesinde aşılama işlemine tabi tutulmaktadır. Küreler katılma sırasında oluşturulduğu için temper dökme demirden farklıdır. Ayrıca grafit şeklinin lamel

yerine küre oluşu da, dökme demire süneklik ve mukavemet kazandırmaktadır. Küresel grafitli dökme demirlerde grafitlerin küresel olması, lamel yapılı grafitlerin keskin köşelerinde gerilim yükselmesi ve çatlak oluşmasını engellemektedir.

## 2.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Küresel grafitli dökme demirlerin elde edilmesinde iki ana yöntem vardır:

- a) INCO (International Nickel Company) yöntemi,
- b) BCIRA (British Cast Iron Research Association) yöntemi [9].

Küresel grafitli dökme demirlerin yapısındaki grafitler çeliğe benzer bir matris içerisinde dağılmış küresel partiküller halindedir. Grafitlerin küreler halinde oluşmasını sağlamak için, BCIRA yönteminde sıvı demire seryum(Ce) ilave edilmektedir. Seryumun büyük bir kısmı dökme demir bileşimindeki kükürdü giderirken, geriye kalan yaklaşık %0.02 Ce, grafitlerin lamel yerine küre şeklini almasını sağlamaktadır. INCO yönteminde ise sıvı demire magnezyum(Mg) ilavesi yapılarak, grafitlerin küre şeklini alması sağlanmaktadır [9].

Küresel grafitli dökme demirler çeşitli normlara göre sınıflandırılmaktadır. TSE (Türk Standartları Enstitüsü) ve Alman (DIN) standardına göre dökme demirlerin sınıflandırılması Tablo 2.2 ve 2.3 'de verilmektedir. Burada, DDK sembolü dökme demir küresel grafitli anlamına gelmektedir [10].

Tablo 2.2 TSE standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması[10].

| Kısa Gösterilişi | Çekme Muk. (Kg/mm <sup>2</sup> ) | Akma Muk. (Kg/mm <sup>2</sup> ) | % Uzama | Sertlik HB | Mikroyapı         |
|------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------|------------|-------------------|
| DDK 40           | 42                               | 28                              | 12      | 140-201    | Daha çok ferritik |
| DDK 50           | 50                               | 35                              | 7       | 170-241    | Ferrit+Perlit     |
| DDK 60           | 60                               | 40                              | 3       | 192-269    | Perlit+Ferrit     |
| DDK 70           | 70                               | 45                              | 2       | 229-302    | Daha çok perlitik |
| DDK 80           | 80                               | 50                              | 2       | 248-352    | Perlitik          |
| DDK 35.3         | 35                               | 22                              | 22      | —          | Ferritik          |
| DDK 40.3         | 40                               | 25                              | 18      | —          | Ferritik          |

Tablo 2.3 DIN standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması[11].

| Kısa Gösterilişi | Çekme Muk. (Kg/mm <sup>2</sup> ) | Akma Muk. (Kg/mm <sup>2</sup> ) | % Uzama |
|------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------|
| GGG-40           | 40                               | 25                              | 15      |
| GGG-50           | 50                               | 32                              | 7       |
| GGG-60           | 60                               | 38                              | 3       |
| GGG-70           | 70                               | 44                              | 4       |
| GGG-80           | 80                               | 50                              | 2       |

Mühendislik malzemeleri içerisinde küresel grafitli dökme demirler, demir esaslı malzemeler içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. İyi dökülebilirlik ve yüksek mukavemetin yanında, küre şekilli grafitler, yapıda yağlayıcı görevi görmektedir. Küresel grafitli dökme demirden yapılmış krank milleri, merdaneler ve dişliler aşınmaya dirençli karbon çeliğine alternatif olmuşlardır [11].

### 2.3 Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey Sertleştirme İşlemleri

Küresel grafitli dökme demirlerin yüzey sertleştirme işlemleri, alev, indüksiyon veya lazerle tavlama ve sertleştirme, nitrüleme, alüminyumlama ve borlamadan meydana gelmektedir.

#### i) Alev, indüksiyon veya lazerle yüzey sertleştirme

Bu yöntemlerde çok kısa sürelerde ısıtma sağlanabilmesi sebebiyle, GGG-70 ve GGG-80 tipi perlitik küresel grafitli dökme demirler tercih edilmektedir. Ferrit içermeyen küresel grafitli dökme demirler, kolayca su alabilme kabiliyetine sahip olduklarından dolayı tamamıyla sertleşmemesi için ostenitleme sıcaklığında çok kısa süre tutulurlar. Döküm haliyle ferritik matrise sahip olan küresel grafitli dökme demirlerin yüzeyini homojen olarak ostenitik yapıya dönüştürmek için uzun süreler gerekmektedir. Bu sebeple, yüzey sertleştirme işleminde daha çok perlitik küresel grafitli dökme demirler tercih edilmektedir. Yüzeyde oluşturulan sert tabakanın derinliği çeliklerden farklı olarak, sertleşebilirlik kavramından çok, ısı geçişine

bağlıdır. Yüzeyi sertleştirilmiş alaşımlı küresel grafitli dökme demirler, artan sertleşebilirlik kabiliyetiyle birlikte artan kalıntı ostenit mevcudiyeti sebebiyle daha düşük sertlik değerine sahip yüzeyler sergilemektedir. Bu problemin çözülmesi için, 0°C 'nin altındaki soğutma işlemleri uygulanmaktadır. Pratik olarak elde edilebilecek maksimum sertlik 60HRC 'dir [6,12].

## ii) Nitrürleme

Nitrürleme işlemi, küresel grafitli dökme demirlerin, parçalanmış amonyak( $\text{NH}_3$ ) içerisinde 2-3 saat tutulması ile gerçekleştirilmektedir. Bu işlem sonucunda, 60 HRC sertlik elde edilebilmektedir. İşlem sonrasında, küresel grafitli dökme demirlerin  $10^8$  devirde yapılan yorulma deneyleri sonucunda göstermiş oldukları yorulma dirençleri,  $172\text{-}210 \text{ N/mm}^2$  'den,  $276\text{-}289 \text{ N/mm}^2$  'ye ulaşmaktadır [6].

Yapılan nitrürleme çalışmalarında, bazı arzu edilmeyen sonuçlarla karşılaşmaktadır. Bunlardan çoğu, kimyasal bileşimle ilgilidir. Silisyum, azotun difüzyon hızını yavaşlattığından, nitrürleme ile yüzeyi sertleştirilecek olan küresel grafitli dökme demirlerin içerdiği silisyum miktarının düşük tutulması önerilmektedir. Aynı şekilde titanyumun da düşük konsantrasyonda olması istenmektedir. Bunun sebebi, titanyumun azotla bileşik yaparak yüzey sertleştirmeyi engellemesidir. Krom, azotu birarada toplayıp biriktirdiğinden ve bu sebeple, dökümün sertlik ve sünekliğini düşürdüğünden dolayı alaşım elementi olarak tercih edilmemektedir. İşlem,  $550\text{-}600^\circ\text{C}$  'de gerçekleştirilmektedir. 0.1 mm sertlik derinliğinde, 1100 HV'lik sertlik değeri elde edilmektedir. Yüzey sertliğini artırmak için %0.5-1.0 arasında alüminyum, nikel ve molibdenin alaşım elementi olarak ilave edilmesinin faydalı sonuçlar verdiği görülmektedir [6,12].

## iii) Alüminyumlama

Alüminyumlama işlemi, küresel grafitli dökme demirlerin  $700^\circ\text{C}$  'de 20 dakika süre ile sıvı alüminyum banyosu içerisinde tutulmasıyla gerçekleştirilmektedir. Yüzeyi

aluminyumlanmış küresel grafitli dökme demirlerin oksidasyon dirençleri çok iyidir[6].

#### iv) Borlama

Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması, 750-1000°C arasında katı, sıvı veya gaz ortamında 1-10 saat süre ile gerçekleştirilmektedir. Bor kaplanmış dökme demirler, çeliklere göre daha düşük sürtünme katsayısı değerine sahiptirler. Yüzey sertlikleri ise, oluşan FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazları sebebiyle, 1300-2000 kg/mm<sup>2</sup> değerine ulaşabilmektedirler. Tekstil makinalarının dramlarında, hareketli makina parçalarında, kollarda ve birçok kalıpta, yüzeyi borlanmış küresel grafitli dökme demirler kullanılmaktadır [13].

### 2.4 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları

Küresel grafitli dökme demirlerin, diğer dökme demirler ve çeliklere göre sahip olduğu bazı üstün özellikleri sebebiyle, kullanım alanları ve üretim miktarları her geçen gün biraz daha artmaktadır. Küresel grafitli dökme demirlerin bazı avantajları aşağıda sıralanmaktadır [6,11];

- Küresel grafitli dökme demirler çeliklere göre %10 daha hafiftirler,
- Küresel grafitli dökme demirlerden yapılan dişliler, çeliklerden daha sessiz çalışmaktadır. Yapıdaki grafit, sönüm kapasitesinin %40 artmasını sağlamaktadır,
- Küresel grafitli dökme demirlerin çelikten daha az çentik duyarlılığı vardır bu yüzden yüzey işlemlerinin çeliklerde olduğu kadar hassas yapılmasına gerek yoktur,
- Hammadde olarak küresel grafitli dökme demirler, çeliklerden daha ucuzdur,
- Küresel grafitli dökme demirlerden yapılmış belirli dişliler, son şeklini verecek şekilde dökülebilir. Örneğin, döküm işlemi sırasında dişler oluşturulabilir.
- Küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirliği, tavlanmış çelikten oldukça iyidir. Bu nedenle pahalı işleme takımlarının sarfiyatı da az olmaktadır,

- Küresel grafitli dökme demir dişlilerin üretiminde kullanılan enerji, elik dişlilerin üretiminde kullanılan enerjiden daha az olmaktadır. Bu sayede %50 'ye ulaşan enerji tasarrufu sağlanabilmektedir.
- Küresel grafitli dökme demirler, bünyesinde bulunan serbest grafit sayesinde çeliklere göre düşük sürtünme katsayısı ve düşük aşınma hızı sergilemektedir.

Belirtilen bu üstün özellikleri sebebiyle, küresel grafitli dökme demirler birçok kullanım alanına sahiptir. Bu kullanım alanları içerisinde en çok payı otomotiv ve mimari uygulamalar almaktadır. Bunlardan bazıları; krank milleri, n teker destek kolları, direksiyon bağlantılarının kompleks şekilleri, fren diskleri, motor bağlantı rotları, serbest kollar, tekerlek poyraları, g iletim bağlantıları, turbo yuvaları ve manifoldları için yüksek sıcaklık uygulamaları ve bir çok uygulama için yüksek güvenlik valfleri sayılabilir. Ayrıca küresel grafitli dökme demir boru endüstrisi, diğer en büyük kullanım alanını teşkil etmektedir [6]. Bunun yanında, madencilik ve metalurji sektöründe, kırıcı gövdelerde, sıcak hadde merdanelerinde, kalıplarda, ergitme ve curuf potalarında da kullanılmaktadır [11].

## BÖLÜM 3

### KONUNUN TEORİK İNCELEMESİ

#### 3.1 Borlamanın Tanımı

Borlama, yüksek sıcaklıkta ana metalin yüzeyinde bor atomlarının difüzyonuyla borür tabakası oluşturulması işlemidir [14]. Borlama günümüzde yalnızca metallere değil, sermet [13] ve seramik malzemelere de uygulanmaktadır [15]. Bor kaplama, yüzeyde bileşik oluşturacak şekilde bor atomlarının difüzyonu olarak da bilinmektedir [16,17].

Borlama işlemi, yüzeyi iyi temizlenmiş malzemelere 700-1000°C sıcaklık aralığında, 1-10 saat sürelerde katı, pasta, sıvı veya gaz gibi çeşitli ortamlarda uygulanabilmektedir. Son teknolojik gelişmelerle birlikte gaz ortamında termo-kimyasal borlama metodlarının dışında, plazma borlama ve akışkan yatakta borlama gibi yeni olan teknikler de kullanılmaktadır. Ayrıca termo-kimyasal olmayan fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey ve iyon biriktirme yöntemleri de borlama amacıyla kullanılan yöntemlerdir [13,17,18].

Borlama, metal ve alaşımların yüzeylerinde sertlik, aşınma direnci ve korozyon direncini artırırken, aynı zamanda bu özellikleri yüksek sıcaklıklarda korumak ve erozyon direncini de artırmak amacıyla kullanılmaktadır [19]. Borlama işlemi, endüstriyel olarak daha çok demir esaslı alaşımlara uygulanmaktadır [20].

### 3.1.1 Borlama işleminin avantajları

Borlama işleminde karakteristik özelliklerin sayısı oldukça azdır. Bunlar arasında en önemlisi borür tabakasının çok yüksek sertlik (1450-5000HV) ve ergime sıcaklığına sahip olmasıdır [13]. Demir esaslı malzemelerde kaplama tabakasının sertliği alt kritik sıcaklığa kadar (650°C) kalıcıdır [14]. Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme yöntemleri olan sementasyon ve nitrasyona göre çok daha yüksektir. Borlama işlemi ile sertleştirilmiş takım çeliklerinin yüzey sertlikleri, elektrolitik sert krom kaplamaların ve tungsten karbürün sertlik değerlerine ulaşabilmektedir. Bor kaplanmış çeliklerin tipik yüzey sertlikleri ve diğer sert metallerle karşılaştırılması Tablo 3.1 'de verilmektedir [13,14].

Tablo 3.1 Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması [13].

| Malzeme                                                         | Mikrosertlik<br>(Kg/mm <sup>2</sup> veya HV) |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Borlanmış yumuşak çelik                                         | 1600                                         |
| Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği                                 | 1800                                         |
| Borlanmış AISI A2 çeliği                                        | 1900                                         |
| Su verilmiş çelik                                               | 900                                          |
| Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği                          | 540-600                                      |
| Su verilmiş ve temperlenmiş A2 kalıp çeliği                     | 630-700                                      |
| Yüksek hız takım çeliği BM42                                    | 900-910                                      |
| Nitrülenmiş çelik                                               | 650-1700                                     |
| Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik                              | 650-950                                      |
| Sert krom kaplama                                               | 1000-1200                                    |
| Sementit karbürler, WC+Co                                       | 1160-1820(30kg)                              |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +ZrO <sub>2</sub> seramikler     | 1483(30kg)                                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC+ZrO <sub>2</sub> seramikler | 1730(30kg)                                   |
| Sialon seramikler                                               | 1768(30kg)                                   |
| TiN                                                             | 2000                                         |
| TiC                                                             | 3500                                         |
| SiC                                                             | 4000                                         |
| B <sub>4</sub> C                                                | 5000                                         |
| Elmas                                                           | ~10000                                       |

Borür tabakasının yüksek sertlik değeri ve düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahip olması, aşınma direncinin oldukça yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu özellikler, kalıp imalatında ana malzemenin işlenmesi sırasında kolaylık,

maliyetinde ucuzluk ve orjinal yapıya göre mekanik özellikler açısından çok daha üstün özellikler sağlamaktadır [13,14]. Borür tabakasının bazı avantajları aşağıda verilmektedir;

- Borür tabakasının sertliği yüksek sıcaklıklarda (550°C-600°C) korunmaktadır [13].
- Borlama, özellikle sertleşebilir bir çok çelik grubuyla kıyaslanabilir yüzey özelliklerinin elde edilebildiği bir işlemdir [13].
- Borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin oksidan olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerin erozyon dirençlerini artırmaktadır. Bu özellikleri sebebiyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadırlar [13]. Borlama işlemi ile, düşük alaşımlı çeliklerin,  $H_2SO_4$ ,  $H_3PO_4$  ve HCl gibi asitlere karşı direncini artırmak mümkündür. Örneğin; borlanmış ostenitik paslanmaz çeliklerin HCl asit ortamlarına karşı dayanıklılığı çok iyidir [14].
- Borlanmış yüzeyler çok yüksek sıcaklıklarda (850°C) orta özellikte oksidasyon direncine ve oldukça yüksek ergimiş metal korozyon direncine sahiptir [13].
- Borlanan parça, oksidan ve korozif ortamlarda üstün bir yorulma ömrüne sahiptir [13].
- Borlama işlemi yağlayıcı kullanımını azaltmakta, soğuk birleşme eğilimini ve sürtünme katsayısını düşürmektedir [14].

### 3.1.2 Borlama işleminin dezavantajları

Borlama işlemi, bir çok avantajının yanında bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir [13]. Bunlar sıralanacak olursa;

- Borlama tekniği, esnek değildir ve gaz ortamında sementasyon ve plazma nitrasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre maliyeti daha yüksektir. Gaz karbürizasyonu ve plazma nitrasyonu daha esnek tekniklerdir. Bu teknikler, daha az işçilik ve daha düşük maliyet gerektirir. Ayrıca, bu işlemlerin kısa sürede ve daha kolay gerçekleşmesi borlamaya göre avantajlar sağlamaktadır. Bu sebeple, yüksek sertlik, dış ortamlara karşı yüksek

aşınma direnci ve yüksek korozyon direncinin arzu edildiği durumlarda borlama işlemi tercih edilmektedir.

- Borlamaya tabi tutulan malzemelerde bor tabaka kalınlığının %5-20'si oranında boyutsal olarak artış gözlenmektedir. Örneğin, 25 $\mu$ m'lik bir tabaka kalınlığı, 1.25-6.25 $\mu$ m'lik bir büyümeye neden olmaktadır. Bu kalınlık artışı borlanan malzemenin cinsine ve borlama şartlarına bağlıdır.
- Çok hassas toleranslarla çalışmak gerektiği zaman, elmas takımlarla kaplama işlenmesi mümkündür, fakat yüzeyin geleneksel tekniklerle işlenmesi kaplama tabakasında kırılmalara neden olmaktadır. Bu da kaplama kalitesinde bozulmalara ve çatlamalara yol açmaktadır.
- Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde(2000N) sementasyon ve nitrasyonla kıyaslandığı zaman, çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği sebebiyle, dişli üretiminde bir sınırlama söz konusudur.
- Takımlar borlandıktan sonra çoğu zaman bir sertleştirmeye ve temperlemeye tabi tutulmaktadır. Bu işlemlerde, bor tabakasının özelliklerinin korunması için inert atmosfer veya vakum gerekmektedir [13].

### 3.2 Borlama Yöntemleri

Borlama işlemi teknolojiye bir çok yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler, iki ana grupta toplanmaktadır.

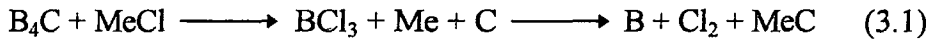
- a) Termokimyasal yöntemler (kutu borlama, pasta borlama, sıvı borlama ve gaz borlama) [13],
- b)Termokimyasal olmayan yöntemler (fiziksel buhar biriktirme(PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprej kaplama vb. yöntemler) [13,17].

Bu teknikler içerisinde en çok kullanılanları, termokimyasal yöntemlerdir. Termokimyasal bor kaplama işlemi sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak bor atomunun metale difüzyonuna dayanan bir kaplama yöntemidir [13-17]. Termokimyasal bor kaplama yöntemleri dört ana grup altında toplanmaktadır [13].

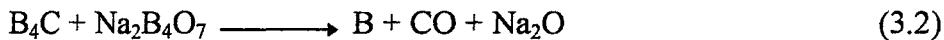
### 3.2.1 Kutu borlama

Kutu borlama işlemi, elle kolayca gerçekleştirilmesi, emniyetli olması, faz bileşimlerinin değişiminin çok az olması ve bu yöntemde çok az ekipmana gerek duyulması sebebiyle çok kullanılan bir tekniktir. Proses kutulamayı, ısıtmayı ve temizlemeyi içermektedir. Kaplanacak malzeme 3-5 mm kalınlıkta toz karışımı ile çevrelenerek borlama yapılmaktadır. Kaba yüzeylerde bu kalınlık 10-20 mm olabilmektedir. Kutu borlamada, çok farklı borlama bileşenleri kullanılabilmektedir. Bu bileşenler; katı bor sağlayıcılar, akışkanlık sağlayıcılar ve aktivatörlerdir [13].

Yaygın olarak kullanılan bor sağlayıcılar; bor karbür ( $B_4C$ ), ferrobor ( $Fe-B$ ) ve amorf bordür ( $B$ ). Ferrobor ve amorf bor çok iyi bor sağlayıcılardır ve kalın borür tabakası oluştururlar, ayrıca, bor karbürden çok daha pahalıdırlar. Katı ortamda bor sağlayıcıların bazı özellikleri Tablo 3.2 'de verilmektedir.  $SiC$  ve  $Al_2O_3$  reaksiyonda yer almaz ve akışkanlık sağlayarak, dolgu malzemesi olarak kullanılır. Ayrıca  $SiC$ , bor miktarını kontrol eder ve borlama ajanlarının kaybını önler.  $NaBF_4$ ,  $KBF_4$ ,  $(NH_4)_3BF_4$ ,  $NH_4Cl$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $BaF_2$  ve  $Na_2B_4O_7$  borlama aktivatörleri olarak kullanılmaktadır. Bunların haricinde bazı ticari bor sağlayıcılar da borlama amacıyla kullanılmaktadır (Örneğin Ekabor tozu gibi) [13]. Amorf bor ve  $Al_2O_3$  ile yapılan borlamalarda tabaka kalınlığı düşük fakat her tarafta homojen olmaktadır. Bor karbür kullanılması durumunda, bor karbürle birlikte kalsiyum klorür, baryum klorür, borik asit ilave edildiği zaman kaplama elde edilememekte, sodyum klorür,  $HCl$ , amonyum klorür ve özellikle boraks kullanıldığı zaman kaplama gerçekleştirilebilmektedir [19]. Klor içeren ilaveler miktarlarına bağlı olarak aktif bor atomlarını serbest hale geçirmektedirler (Eşitlik 3.1) [13].



Boraks içeren katı bor bileşenlerinde ise serbest bor Eşitlik 3.2 'deki gibi gerçekleşmektedir.



Araştırmalar sonucunda %16 boraksın optimum değerleri sağladığı görülmüştür [19].

Tablo 3.2 Kutu borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri[21].

| İsim       | Formül           | Molekül Ağırlığı(Gr.) | Teorik Bor Miktarı(%) | Ergime Sıcaklığı(°C) |
|------------|------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| Amorf Bor  | B                | 10.82                 | 95-97                 | 2050                 |
| Ferro-Bor  | -                | -                     | 17-19                 | -                    |
| Bor Karbür | B <sub>4</sub> C | 55.29                 | 77.28                 | 2450                 |

Tipik ticari borlama toz karışımlarının bileşimleri aşağıda verilmektedir [13,22].

- %5 B<sub>4</sub>C, %90 SiC, %5 KBF<sub>4</sub>
- %50 B<sub>4</sub>C,%45 SiC, %5 KBF<sub>4</sub>
- %85 B<sub>4</sub>C, %15 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>
- %95 B<sub>4</sub>C, %5 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>
- %84 B<sub>4</sub>C, %16 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>
- Amorf bor (%95-97)
- %95 Amorf bor, %5 KBF<sub>4</sub>
- %79 B<sub>4</sub>C, %16 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, %5 KBF<sub>4</sub>

Kutu borlamada kullanılan pota, borlama işlemi boyunca bor ajanlarının kaybını önlemek için kurşunla kaplanarak tüm malzemeler doldurulduktan sonra ağız kısmı demir curufu veya beton ile kapatılmaktadır. Pota veya kutu, yüksek iç gerilmeler, çatlaklar ve kalkmalara sebebiyet vermemesi ve yeniden toz ilavesiyle(%20-50) borlamaya devam edilebilmesi açısından fırın hacminin %60 'ını geçmemelidir [13].

### 3.2.2 Pasta borlama

Pasta borlama, kutu borlamanın zor ve daha pahalı olduğu veya fazla zaman kaybının olduğu durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, % 45 B<sub>4</sub>C (200-400 mesh tane boyutu) ve %55 kriyolit (Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>, flaks ilaveli) veya geleneksel borlama toz karışımı B<sub>4</sub>C + SiC + KBF<sub>4</sub> iyi bir bağlayıcı ajan ile (Bütil asetatta çözünmüş nitroselüloz, metil selülozun sulu çözeltisi veya hidrolize edilmiş etil silikat) gerçekleştirilmektedir. Hazırlanan borlayıcı karışım malzemenin yüzeyine

püskürtülerek veya spreylenecek 1-2 mm civarında tabaka oluşturulmakta ve kurutulmaktadır. İşlem, demir esaslı malzemelere geleneksel fırınlarda 800-1000°C sıcaklık aralığında 5 saat süreyle uygulanmaktadır. Bu işlemde koruyucu atmosfer olarak argon,  $\text{NH}_3$ , veya  $\text{N}_2$  kullanılmaktadır. 1000°C 'de 20 dakika süreyle yapılan pasta borlama işleminde 50µm kalınlığa ulaşılabilir. Bu yöntem, büyük parçaların veya seçilmiş alanların borlanması için oldukça elverişlidir [13].

### 3.2.3 Sıvı borlama

Bu yöntemde borlama banyosu sıvı haldedir. Borlama işlemi 670-1000°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir [13]. Sıvı ortamda borlama, iki ana grupta toplanır;

- a)Elektrolitik sıvı borlama ve
- b)Elektrolizle sıvı borlama yöntemleridir.

Bu yöntemlerin bir çok dezavantajı vardır [13,23]. Bunlar;

- Tuz kalıntılarının malzeme üzerinde kalması ve ortamda reaksiyona girmeyen borun varlığı zaman ve para kaybına yol açar.
- Borlama işleminin başarıyla yürütülebilmesi için banyo vizkozitesinin artırılmaması gereklidir ve bu sebeple tuz ilavesi yapılmaktadır. Bu da işlemin maliyetini artırmaktadır.
- İşlem için malzemeyi korozif ortamlardan koruyacak fırınlara ihtiyaç vardır.

#### ***Elektrolitik sıvı borlama***

Demir esaslı malzemelerin elektrolitik sıvı borlama işlemi, 900-950°C sıcaklık aralığında, boraks esaslı eriyiklere %30  $\text{B}_4\text{C}$  ilavesi yapılarak gerçekleştirilmektedir. Borlama işlemi aynı zamanda, %55 boraks, %40-50 ferrobor ve %4-5 ferro-aluminyum ilavesiyle de yapılmaktadır. Nikel alaşımlarının borlanması,  $\text{KBF}_4\text{:KF}$  tuz banyosu, 670°C nin altındaki uygulamalarda 75:25 oranında kullanılarak düşünülen kalınlıkta bor tabakası elde edilebilmektedir. Aynı zamanda

daha yüksek sıcaklıklarda demir esaslı malzemeler için de iyi sonuçlar sağlanmaktadır [13]. %55 boraks, %45 B<sub>4</sub>C karışımı ve 1:1 oranında NaCl ve BaCl<sub>2</sub> kullanılarak çok yüksek tabaka kalınlıkları elde edilmektedir [19]. Sıvı borlama ayrıca, boraks, ferro-silis, borik asit [4,24] ve sodyum sülfat(NaSO<sub>4</sub>) [25] esaslı tuz banyolarında da gerçekleştirilmektedir.

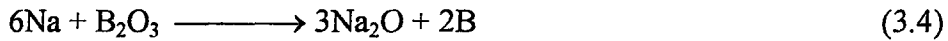
### *Elektrolizle sıvı borlama*

Elektrolizle tuz banyosunda borlama işleminde katod olarak, borlanacak demir esaslı malzeme, ve anod olarak grafit elektrot kullanılmaktadır. Elektrolit olarak ise boraks kullanılmaktadır. Borlama işlemi, 900-950°C sıcaklık aralığında 4-6 saat süre ile, 0.15-0.20 A/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğu altında gerçekleştirilmektedir [13,19,26]. Parçanın her tarafında homojen bir kaplama tabaka kalınlığı elde edebilmek için elektroliz sırasında parça döndürülmektedir. Düşük alaşımlı çeliklerde çok ince kaplamaların eldesinde, yüksek akım yoğunluğu kullanılarak çok kısa sürelerde borlama yeterli olmaktadır. Alaşımlı çeliklerde ise kalın kaplama tabakalarının elde edilebilmesi için düşük akım yoğunluğu ve uzun borlama süresi gerekmektedir[13].

Elektrolizle sıvı borlama işlemi sırasında, ergimiş halde tetraborat, borik asit ve elementel oksijene dönüşmektedir (Eşitlik 3.3).



Sodyum iyonları sayesinde katodun yanında normalize işlemi sonrası borik asit bor iyonlarını oluşturmaktadır (Eşitlik 3.4).



Böylece katoda yakın bölgede bol miktarda bor birikimi sağlanmaktadır. Benzer şekilde iyi sonuçlar veren elektrolit bileşimleri aşağıda verilmektedir [13].

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

Sıvı borlamada kullanılan çeşitli bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri Tablo 3.3 'de verilmektedir [21].

Tablo 3.3 Sıvı borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin özellikleri[21].

| Bor Sağlayıcılar    | Kimyasal Formül                                              | Molekül Ağırlığı(gr.) | Teorik Bor Miktarı(%) | Ergime Sıcaklığı( $^\circ\text{C}$ ) |
|---------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| 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                                  |
| Metabor Asidi       | $\text{HBO}_2$                                               | 43.83                 | 24.69                 | -                                    |
| Sodyum Bor Florür   | $\text{NaBF}_4$                                              | 109.81                | 9.85                  | -                                    |
| Bor Oksit           | $\text{B}_2\text{O}_3$                                       | 69.64                 | 31.07                 | 450                                  |
| Bor Karbür          | $\text{B}_4\text{C}$                                         | 55.29                 | 78.28                 | 2450                                 |
| Potasyum Bor Florür | $\text{KBF}_4$                                               | 69.67                 | 15.52                 | -                                    |

Yüksek frekanslı akımlarla yapılan borlama işlemi sırasında yüksek ısı, borlama süresini önemli ölçüde düşürmektedir ve çok derin difüzyon kaplamaları elde edilmektedir. U8 çelik parça üzerinde yapılan borlama çalışmasında, %50 kriyolit, %50 bor karbür (200-400 mesh)  $1200^\circ\text{C}$  'ye ısıtılarak borlama işlemi gerçekleştirilmektedir ve  $200^\circ\text{C}$  'de kaplama 1 saat kurutulmaktadır. Bu yöntemde, 1 dakika sonrasında  $35\mu\text{m}$ , 2 dakika sonrasında  $80\mu\text{m}$  ve 3 dakika sonunda  $125\mu\text{m}$  tabaka kalınlığı elde edilmektedir. Yani ısıtma süresi, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında 200-300 kez daha azalmaktadır. Benzer sonuçlar Ck 45 çeliğinin borlanması sırasında da görülmektedir. Yüzey tabakasının sertliği, 1000 HV değerine sahiptir ve x-ışınları çalışmalarında, demir borür ve bor karbür fazları elde edilmektedir [19].

Borlama için bor karbür ve kriyolit karışımının kullanılması, M.E. Blanter metodu olarak bilinmektedir ve bu işlemde kriyolit oksijeni ile bor karbür reaksiyona girerek sonuçta aktif bor oluşmaktadır [19].

### 3.2.4 Gaz borlama

Gaz borlama işleminde kullanılan bor taşıyabilen gazlar, bor halojenler veya bor hidrürlerdir. Gaz borlamada çoğunlukla kullanılan ortamlar aşağıda verilmektedir[13].

- Diborane ( $B_2H_6$ )- $H_2$  karışımı,
- Bor halid- $H_2$ /veya (75:25  $N_2$ - $H_2$ ) gaz karışımı,
- $(CH_3)_3B$  ve  $(C_2H_5)_3B$  gibi organik bor bileşikleri.

$(B_2H_6)$ - $H_2$  karışımı, zehirli ve patlayıcı olması sebebiyle ticari olarak kullanılmamaktadır[13]. Fakat  $B_2H_6:H_2$  oranı 1:75 ve gaz akış hızı 75-100 litre/saat olduğunda, aşınma direnci ve sertliği yüksek olan bor kaplamalar elde edilmektedir[19]. Organik malzemeler kullanıldığı takdirde borür ve karbür bileşikleri birlikte oluşmaktadır.  $BBr_3$ , çok pahalı ve suyla olan kuvvetli reaksiyonu sebebiyle ve de yüksek sıcaklıkta kararlılığının ayarlanması için  $BF_3$  'e ihtiyaç duyulması sebebiyle, kullanım açısından tercih görmemektedir.  $BCl_3$ , gaz borlama işlemi için en çok tercih edilen maddedir [13,27].

1:15  $BCl_3+H_2$  gaz karışımında, 700-950°C sıcaklık aralığında ve 67 KPa basınç altında (0.67 bar), örneğin 920°C 'de 2 saat sürede gaz borlama işlemine tabi tutulan bir parçada elde edilen bor tabaka kalınlığının 120-150µm olduğu rapor edilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar,  $H_2$  yerine 75:25 oranında  $N_2:H_2$  kullanımı ile FeB fazının azaltıldığını ve daha iyi kalitede kaplamaların elde edildiğini göstermektedir. Gaz borlama işlemi, titanyum ve alaşımlarına da uygulanabilmektedir. Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri Tablo 3.4 'de verilmektedir [21].

Tablo 3.4 Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri [21].

| Gazlar         | Kimyasal Formül                    | Molekül Ağırlığı(gr.) | Teorik Bor Miktarı(%) | Donma Noktası(°C) |
|----------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| Bor Tri Florid | $\text{BF}_3$                      | 67.82                 | 15.95                 | -128.8            |
| Bor Tri Klorid | $\text{BCl}_3$                     | 117.9                 | 9.23                  | -107.3            |
| Bor Tri Bromit | $\text{BBr}_3$                     | 250.57                | 4.32                  | - 46.0            |
| Di-Boran       | $\text{B}_2\text{O}_3$             | 26.69                 | 39.08                 | -165.5            |
| Bor Tri Metil  | $(\text{CH}_3)_3\text{B}$          | 55.92                 | 19.35                 | -161.5            |
| Bor Tri Etil   | $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{B}$ | 98.01                 | 11.04                 | - 94.0            |

### 3.3 Borlanabilen Malzemeler ve Borürlerin Özellikleri

Borlama işlemi, sade karbonlu çelikler, düşük alaşımlı çelikler, takım çelikleri ve paslanmaz çelikler gibi bir çok çelik grubuna ve dökme demirlere uygulanabilmektedir. Buna ilaveten, nikel, kobalt, molibden ve titanyum esaslı alaşımlara da uygulanmaktadır. Ayrıca, sinterlenmiş karbürlerin yüzeyleri borlanarak, aşınma dirençleri artırılabilir. Yumuşak kobalt ve nikel bağlayıcıların yüzeylerinde borür fazları oluşturmak mümkün olup [14], son yıllarda seramiklere de bor kaplamalar uygulanmaktadır [15].

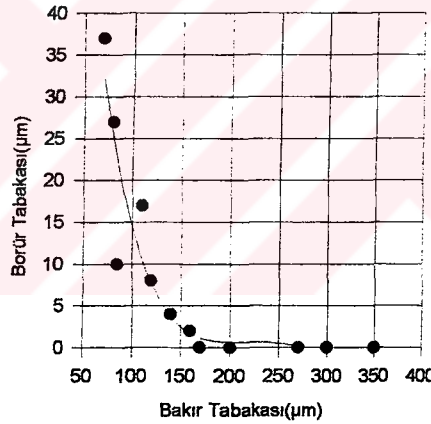
Kırılgan borür fazları oluşturmaları sebebiyle, alüminyum, silisyum ve azotlu yatak çelikleri, borlama için uygun malzemeler değildir. Aynı şekilde, içerdikleri kükürt ve kurşun gibi alaşım elementlerinin borür tabakasının kalkmasına ve çatlamasına sebep olması nedeniyle bu çeliklerin borlanması tavsiye edilmemektedir [13,14].

#### 3.3.1 Demir dışı metallerin borlanması

Sementit karbürler, nikel, kobalt gibi refrakter metaller ve alaşımları borlanabilen malzemelerdir. Özellikle nikel alaşımları, titanyum ve titanyum alaşımları borlama işlemi için elverişlidir. Nikel plakaların borlanması, gaz ortamında  $\text{BCl}_3\text{-H}_2\text{-Ar}$  karışımında 500-1000°C sıcaklıkları arasında gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, %85  $\text{B}_4\text{C}$  ve %15  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  karışımında veya %95  $\text{B}_4\text{C}$  ve %5  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  toz karışımında

1000°C sıcaklıkta  $H_2$  atmosferinde yapılan borlama başarıyla gerçekleşmektedir[13].

Bakır, bor atomlarının difüzyonuna engel olması sebebi ile kaplanamaz. Bor, bakır tabakasıyla herhangi bir reaksiyona giremez [13]. Eğer herhangi bir metal bakır kaplanmış ve kaplama yoğun çatlak ve porozite içermiyorsa, bor atomları bakır tabakasını aşarak ana metale ulaşamaz. Örneğin, 0.15mm kalınlığındaki bakır tabakası bor atomlarının difüzyonuna engel olmaktadır (Şekil 3.1). Borlama sırasında işlem görmesi istenmeyen yüzeylerde bölgesel koruma amacıyla, gerekli kalitede bakır kaplama uygulanmaktadır. Ayrıca, bronz ve pirinç kaplamalarda da bu özellik görülmektedir [19].



Şekil 3.1 950-960°C 'de iki saat borlanan, bakır kaplanmış çelik 50 malzemenin yüzeyindeki bakır tabakasının kalınlığına bağlı olarak borür tabaka kalınlığının değişimi [19].

Refrakter metallerin borlanması sonucunda, yüzeyinde değişik kompozisyonlarda çok farklı teknolojik özelliklere sahip kaplama sağlanabilmektedir [13,19]. Bu teknolojik özellikler içerisinde, yüksek sertlik, bir çok inorganik asitin etkisine karşı ve oldukça yüksek sıcaklıklarda havanın oksidasyonuna karşı direnç sağlamaları sayılabilmektedir[13,19]. Tablo 3.5 'de bazı demir esaslı ve demir dışı metallerin borlanması sırasında oluşan borür fazları, borür tabakasının sertlik değeri ve ergime sıcaklıkları verilmektedir [13].

Titanyum, neobyum, tantalyum, molibden ve tungsten, amorf bor ve %3  $\text{NH}_4\text{Cl}$  karışımı ile borlandığı zaman, tek bir faz yapısının oluştuğu gözlenmiştir ve bunlar sırasıyla,  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{NbB}_2$ ,  $\text{TaB}_2$ ,  $\text{Mo}_2\text{B}$ , ve  $\text{W}_2\text{B}$  şeklindedir. Bu araştırmanın sonuçlarına bağlı olarak, titanyum kaplandığı zaman poroz bir kaplama tabakası oluşmaktadır ve ana malzemeden pul pul ayrılmaktadır. Ayrıca Ti ile  $\text{TiB}_2$  arasında dikkate değer ölçülerde bir hacimsel farklılık ortaya çıkması da muhtemeldir. Aynı şekilde, neobyum borür tabakası, yoğun, uniform ve ana metale kuvvetlice bağlanmıştır. Tantalyum, molibden ve tungsten borür tabakaları, çok kesin yorumlarla ana metale uyumsuz bulunmuştur ve molibden borür tabakası da fazla porozite içermektedir[19].

Tablo 3.5 Çeşitli altlık malzemelerin borlanması sırasında oluşan farklı borür fazlarının ergime sıcaklıkları ve mikrosertlik değerleri [13].

| Matris Malzemesi | Borür Tabakasındaki Sürekli Faz | Borür Tabakasının Sertliği (HV veya $\text{g/mm}^2$ ) | Ergime Sıcaklığı |           |
|------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|-----------|
|                  |                                 |                                                       | °C               | °F        |
| Fe               | FeB                             | 1900-2100                                             | 1390             | 2535      |
|                  | $\text{Fe}_2\text{B}$           | 1800-2000                                             |                  |           |
| Co               | CoB                             | 1850                                                  |                  |           |
|                  | $\text{Co}_2\text{B}$           | 1500-1600                                             |                  |           |
|                  | $\text{Co}_4\text{B}$           | 700-800                                               |                  |           |
| Co-27.5Cr        | CoB                             | 2200(100gr)                                           |                  |           |
|                  | $\text{Co}_2\text{B}$           | ~1550(100gr)                                          |                  |           |
|                  | $\text{Co}_4\text{B}(?)$        | 700-800                                               |                  |           |
| Ni               | $\text{Ni}_4\text{B}_4$         | 1600                                                  |                  |           |
|                  | $\text{Ni}_2\text{B}$           | 1500                                                  |                  |           |
|                  | $\text{Ni}_3\text{B}$           | 900                                                   |                  |           |
| Inco 100         |                                 | 1700(200gr)                                           |                  |           |
| Mo               | $\text{Mo}_2\text{B}$           | 1660                                                  | 2000             | 3630      |
|                  | $\text{MoB}_2$                  | 2330                                                  | ~2100            | ~3810     |
|                  | $\text{Mo}_2\text{B}_5$         | 2400-2700                                             | 2100             | 3810      |
| W                | $\text{W}_2\text{B}_5$          | 2600                                                  | 2300             | 4170      |
| Ti               | TiB                             | 2500                                                  | ~1900            | ~3450     |
|                  | $\text{TiB}_2$                  | 3370                                                  | 2980             | 5395      |
| Ti-6Al-4V        | TiB                             |                                                       |                  |           |
|                  | $\text{TiB}_2$                  | 3000(100gr)                                           |                  |           |
| Nb               | $\text{NbB}_2$                  | 2200                                                  | 3050             | 5520      |
|                  | $\text{NbB}_4$                  |                                                       |                  |           |
| Ta               | $\text{Ta}_2\text{B}$           |                                                       | 3200-3500        | 5790-6330 |
|                  | $\text{TaB}_2$                  | 2500                                                  | 3200             | 5790      |
| Hf               | $\text{HfB}_2$                  | 2900                                                  | 3250             | 5880      |
| Zr               | $\text{ZrB}_2$                  | 2250                                                  | 3040             | 5500      |
| Re               | ReB                             | 2700-2900                                             | 2100             | 3810      |

Titanyum ve alaşımlarının borlanması, yüksek vakumda ( $0.0013\text{Pa}$  veya  $10^{-3}$  torr) ve oksijensiz ortamda, çok saf argon atmosferinde,  $1000-1200^{\circ}\text{C}$  sıcaklık aralığında amorf bor içerisinde kutu borlamayla ve  $\text{H}_2+\text{BCl}+\text{Ar}$  karışımında gaz borlamayla gerçekleştirilmektedir. Titanyum ve refrakter metallerin borürleri, kobalt ve nikel ile kıyaslandığı zaman, daha üstün özelliklere sahip oldukları görülmektedir (Tablo 3.5) [13]. Nikel ve kobalt gibi yumuşak metallerin borlanmasıyla, sinterlenmiş karbürlerin aşınma özelliklerine ulaşılabilir [13,14].

Tantalyum, neobyum, tungsten, molibden ve nikel esaslı malzemelerde oluşan borürler titanyuma benzer şekilde kolonsal bir borür tabaka yapısı sergilemezler. WC-Co tel çekme kalıpları gibi sementit karbürler, %40  $\text{B}_4\text{C}$ +%45  $\text{SiC}$  ve %5  $\text{KBF}_4$  içeren bir karışımla borlandığı zaman, 3 farklı kaplama bölgesi ortaya çıkar. Bu bölgelerin her biri farklı borür ve karbür faz dağılımları gösterirler. Bu faz dağılımları sırasıyla Tablo 3.6 'da görülmektedir [13].

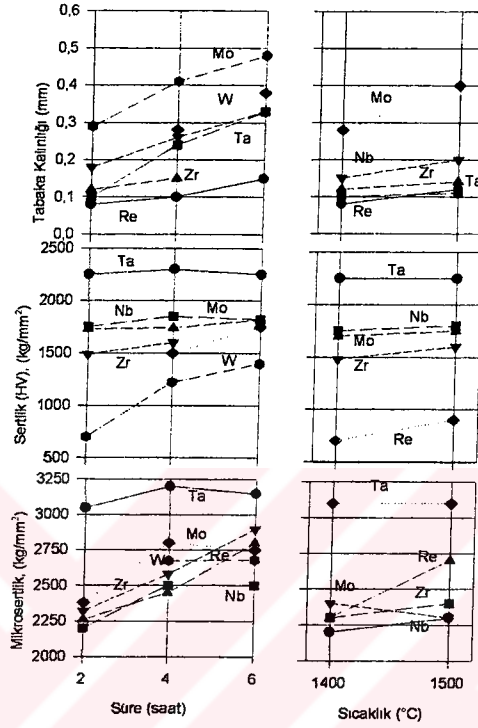
Tablo 3.6 Borlanmış sementit karbür malzemelerde oluşan üç farklı bölgedeki fazlar[13].

| Bölge         | Oluşan Borür ve Karbürler                                            |
|---------------|----------------------------------------------------------------------|
| I.Dış bölge   | $\text{CoB}$ , $\text{W}_2\text{B}_6$ , WC                           |
| II.Orta bölge | $\text{W}_2\text{CoB}_2$ , $\text{WCoB}$ , WC, $\text{Co}_2\text{B}$ |
| III.İç bölge  | $\text{W}_2\text{Co}_2\text{B}_6$ , WC, Co, $\text{Co}_4\text{B}$    |

Molibden, tungsten, neobyum, zirkonyum, tantalyum ve reniumun borlanması, yüksek sıcaklıklarda oluşan boşluklar ve kırılgenlik sebebiyle  $1100-1500^{\circ}\text{C}$  sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. Borür tabakalarının kalınlığı ve sertlik dağılımları Şekil 3.2 'de verilmektedir. Araştırmalar sonucunda eğrilerden çıkarılan sonuçlar sırasıyla;

- 1) Herhangi bir şart altında borür tabakasının kalınlığı molibden için maksimum iken tungsten, neobyum, zirkonyum, tantalyum ve renyum için daha düşüktür.
- 2) Tantalyumda borür tabakasının maksimum sertliği,  $2000-2200\text{ kg/mm}^2$  HV ve mikrosertlik değeri,  $3000-3200\text{ kg/mm}^2$  'dir.

3) Zaman ve sıcaklığın artışına bağlı olarak yüzey sertliği bir kural olarak artmaktadır.



Şekil 3.2 1400°C'de 2, 4, ve 6 saat süre ile vakum altında, bor karbür tozu içerisinde gerçekleştirilen borlama işlemi sonucunda, Mo, W, Nb, Ta, Zr, ve Re'da oluşan borür tabaka kalınlığı ve mikrosertlik dağılımı[19].

Borür tabakasının kalınlığının artması ile kaplamanın kırılabilirliği, porozitesi ve çatlak sayısının artış göstermesinin yanısıra, yapışma mukavemeti de zayıflamaktadır. Genellikle, 100µm'nin altında kalınlığa sahip olan kaplamalar, oldukça yoğundur ve matris metale iyi bir şekilde bağlanmaktadır. Borlama işlemi üzerinde yapılan kinetik çalışmalar, difüzyon tabakasının ve numunenin ağırlığının parabolik bir şekilde arttığını göstermektedir. Metal yüzeyinde yeni fazın oluşması, latis boyunca bor atomlarının difüzyonu ve difüzyon tabakasının yoğunluğu kinetik çalışmalarla karakterize edilmektedir [19].

Periyodik tablonun IV-VI grup geçiş elementlerinde ametal bir atomun difüzyon olması durumunda, metal atomunun dolmamış olan d-seviyesi, difüze olan elementin valans elektronları ile doldurulmaktadır. Aynı zamanda, bu işlem d-seviyesinin az

sayıda elektron içermesi(n) durumunda, düşük aktivasyon enerjisiyle daha kolay bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu da, d-seviyesindeki elektron sayısının ne kadar fazla miktarda eksik olursa, aktivasyon enerjisinin o derece düşük olacağını göstermektedir. Yani atomdaki elektron sayısı (n) ne kadar düşük olursa ve atomun ana kuantum sayısı(N) ne kadar düşük olursa, işlem o denli kolay gerçekleşmektedir. İşlem sayısal olarak  $1/N.n$  oranı şeklinde ifade edilebilmekte ve bu orana d- elektron seviyesinin kabullenme kapasitesi denilmektedir. N ve n değerlerinin küçük olması durumunda geçiş elementlerinde, metalik olmayan atomların difüzyonu sırasında elektron yörüngesini tamamen doldurarak kimyasal bir bileşik meydana getirmeleri kolay ve aktivasyon enerjileri düşük olacaktır [19].

Bu veriler doğrultusunda yapılan çalışmalarda, aktivasyon enerjisinin,  $1/Nn$  oranının artmasına bağlı olarak düştüğü görülmektedir. Titanyum için  $1/Nn$  oranı; 0.176, zirkonyum için; 0.125, tantalyum için; 0.67, neobyum için; 0.63, molibden ve tungsten için; 0.05'dir. Burada ilginç bir durum olarak, molibden içerisinde bor ve karbonun difüzyonunun,  $1/Nn$  oranının tungsten ile aynı değerde(0.05) olmasına rağmen, tungsten'den daha düşük aktivasyon enerjisine gerek duyacak şekilde gerçekleşmesidir. Tungsten, 5d-seviyesinde 4 elektron bulundururken, molibden 4d-seviyesi'nde 5 elektron bulundurmaktadır. Genellikle enerji seviyesi, N ve n değerlerine bağlı olarak gerçekleşmekte ve bu seviyedeki elektron eksiklikleri ile karakterize edilmektedir [19].

### **Alaşım elementlerinin etkisi**

Çeliklerde olduğu gibi, demir dışı alaşımlarda da, alaşım elementleri borür tabakasının sertliğini artırmaktadır. Bunun başlıca sebebi, katı çözelti borürlerinin oluşmasıdır[13]. Nikel, kobalt ve titanyum gibi alaşım elementlerinin ilavesi, borür tabakasının büyümesini yavaşlatmakta ve çok fazlı yapıların oluşmasıyla yüksek bor konsantrasyonuna sahip borür tabakası oluşturarak, kaplama özelliklerini iyileştirmektedir (Örneğin titanyumda  $TiB_2$  fazı oluşumu gibi). Kobalt ve titanyum borür kaplama tabakasının kolonsal yapısı alaşım elementleri ile engellenebilmekte ve tabaka çok uniform bir hale getirilebilmektedir [13,28].

### 3.3.2 Borürlerin özellikleri

Bor, periyodik tabloda birçok elementle bileşik oluşturmaktadır. Borürlerin çoğu, kuvvetli kovalent bağ yapısına sahiptir ve oldukça yüksek ergime sıcaklığı, elastisite modülü ve sertlik değerleri sergilemektedir [29].

Seramikler içerisinde borürlerin termal genleşme katsayıları orta seviyelerdedir. Genelde borürlerin ısı iletkenlik katsayıları ve termal şok dirençleri oldukça yüksektir. Borürler diğer seramiklerle kıyaslandıkları zaman, son yıllarda yapılan çalışmalarda, yüksek sertlik ve mukavemet değerleri sergilemelerine rağmen gerçekte orta derecede mukavemet ve tokluk değerlerine sahiptirler. Birçok borür, 5-80  $\mu\Omega\text{-cm}$  aralığında elektriksel dirence sahiptir ve seramikler arasında iyi elektriksel iletkenlik gösterir. Borürlerin manyetik özellikleri incelendiğinde, diamanyetik özellikten kuvvetli ferromanyetik özelliğe değiştiği fakat, birçok borürün oda sıcaklığında zayıf paramanyetik özellik gösterdiği görülmektedir. Borürlerin kimyasal dirençleri, birçok seramiğe nazaran oldukça yüksektir [29].

Borürlerin oluşumu, büyük ölçüde bileşik yaptığı atomla arasındaki atomik boyut faktörüne ve elektrokimyasal etkiye bağlıdır. Bir borürün oluşması sırasında, dış yörünge elektronları, dağınık  $sp^2$  ve  $sp^3$  elektron konfigürasyonlarında yerleşebilmektedir. Bu durum, kuvvetli kovalent bağ yapısının oluşumunda önemli bir karakteristiktir.  $sp^2$  ve  $sp^3$  yapılarındaki değişimin rolü, bor ile reaksiyona giren atomların elektron verme kabiliyetlerine bağlıdır. Çeşitli borür yapılarının oluşumu,  $s^2p$ ,  $sp$ ,  $sp^2$  ve  $sp^3$  elektron konfigürasyonlarının kombinasyonlarındaki değişimle açıklanmaktadır [29].

Samsonov ve Serebryakova [29,30], bütün borürleri üç ana grupta toplamıştır. (1) dış yörüngede bulunan s seviyesindeki elektronlara sahip olan elementlerin yapmış oldukları borürler. Bu grupta yer alan elementler, alkali (I-A) ve toprak alkali (II-A) elementleridir. (2) d iç yörüngelerine sahip olan elementlerin oluşturduğu borürler. Bu elementler, geçiş metalleri (III-B ile VIII-B arasındaki

gruplar), lantanitler (nadir toprak elementleri) ve aktinitlerdir. (3) s, p valans elektronlarına sahip elementler tarafından oluşturulan borürler (BN ve BP) [29].

Bağlardaki kovalentlik derecesi arttığı zaman, borürlerin ergime sıcaklığı, elastik modülü ve sertliği artmaktadır. Çoğu metal borürler Tablo 3.7 'de görüldüğü gibi yüksek ergime sıcaklıklarına sahiptir. Monoborürler ve diborürlerde stokiometrik olmama, bor zincirleriyle veya latis boşluklarıyla artmakta, ancak metal boşluklarından etkilenmemektedir [29]. Benzer kristal yapıları ve latis parametrelerinde olan borürler katı çözelti oluşturmaktadır. Tablo 3.7 'de çeşitli metal borürlerin bazı özellikleri verilmektedir [20].

Tablo 3.7 Çeşitli metal borürlerin bazı özellikleri [20].

| Borür                          | Kristal Yapı | Teorik Yoğun. (gr/cm <sup>3</sup> ) | Erg. Sctl. (°C) | Termal Genleşme (10 <sup>-6</sup> /°K) | Termal İletkenlik (W/m.°K) | Sertlik (GPa) | Elas. Mod (GPa) | Elk. Direnç (10 <sup>6</sup> Ωcm) |
|--------------------------------|--------------|-------------------------------------|-----------------|----------------------------------------|----------------------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|
| Co <sub>3</sub> B              | Ortog.       | 8013                                | 1110            | ...                                    | 17                         | 11.3          | ...             | 28                                |
| Co <sub>2</sub> B              | Tetra.       | 8.05                                | 1260            | ...                                    | 14                         | 11.3          | ...             | 33                                |
| CoB                            | Ortog.       | 7.32                                | ...             | ...                                    | 17                         | 11.3          | ...             | 76                                |
| Cr <sub>2</sub> B              | Ortog.       | 6.58                                | 1870            | 14.2 (27-1027°C)                       | 10.9(20°C)                 | 13.2          | ...             | 107                               |
| CrB                            | Tetra.       | 6.14                                | ...             | 12.3(27-1027°C)                        | 20.1(20°C)                 | 11.8          | ...             | 46                                |
| Fe <sub>2</sub> B              | Tetra.       | 7.34                                | 1410            | ...                                    | 17.4                       | 13.1-17.7     | 284             | 38                                |
| FeB                            | Ortor.       | 6.73                                | 1650            | ~12(400-1000°C)                        | 12(20°C)                   | 16.2-18.6     | 343             | 80                                |
| Mn <sub>2</sub> B              | Tetra.       | 7.18                                | 1580            | ...                                    | 6.6                        | 17.7          | ...             | 40                                |
| MnB                            | Ortog.       | 6.36                                | 1890            | ...                                    | 7.7                        | 20.1          | ...             | 57                                |
| Mo <sub>2</sub> B              | Tetra.       | 9.23                                | 2280            | 5(25-500°C)                            | ...                        | 24.5          | ...             | 40                                |
| MoB <sub>2</sub>               | Hegz.        | 7.99                                | 2375            | 7.7(300-900°C)                         | ...                        | 11.8          | ...             | 45                                |
| Mo <sub>2</sub> B <sub>5</sub> | Ortog.       | 7.45                                | 2140            | 8.6(27-1027°C)                         | ~50(20°C)                  | 23            | 672             | 26                                |
| NbB                            | Ortog.       | 7.57                                | 2917            | 12.9(27-1027°C)                        | 15.6(27°C)                 | 21.5          | ...             | 40                                |
| NbB <sub>2</sub>               | Hegz.        | 7.00                                | 3036            | 8(27-1027°C)                           | 23.5(1027°C)               | 25.5          | 637             | 26                                |
| Nb <sub>3</sub> B <sub>4</sub> | Otog.        | 7.28                                | 2935            | 9.9(27-1027°C)                         | 20.5(27°C)                 | 22.5          | ...             | 34                                |
| NiB                            | Ortog.       | 7.17                                | 1590            | ...                                    | 21.9                       | 15.2          | ...             | 50                                |
| Ni <sub>2</sub> B              | Tetrag.      | 8.05                                | 1225            | ...                                    | 54.8                       | 14            | ...             | 14                                |
| TiB                            | Ortog.       | 4.56                                | 2190            | ...                                    | ...                        | 22.7          | ...             | 40                                |
| TiB <sub>2</sub>               | Hegz.        | 4.52                                | 3225            | ...                                    | 64.4(27°C)                 | 33-25.5       | 551             | 9                                 |
| W <sub>2</sub> B               | Tetrag.      | 17.09                               | 2670            | 6.7                                    | ...                        | 23.7          | ...             | ...                               |
| WB                             | Ortog.       | ...                                 | 2665            | ~6.9(20-2205°C)                        | ...                        | 36.3          | ...             | ...                               |
| W <sub>2</sub> B <sub>5</sub>  | Ortog.       | 13.17                               | 2365            | 7.8(27-1027°C)                         | ~52(20°C)                  | 26.1-24.5     | 775             | 22                                |
| ZrB <sub>2</sub>               | Hegz.        | 6.10                                | 3245            | 55.9(27-1027°C)                        | 57.9(27°C)                 | 22.1-17.9     | 343-500         | 10                                |

Alternatif olarak borürler, kristallo-kimyasal olarak iki grupta sınıflandırılmaktadır; (1) düşük bor konsantrasyonuna sahip borürler ( $M_4B$ ,  $M_3B$ ,  $M_2B$ ,  $M_3B_2$ ,  $MB$  ve  $M_3B_4$  gibi.  $M$  = metal), (2) yüksek bor konsantrasyonuna sahip borürler ( $MB_2$ ,  $MB_4$ ,  $MB_6$ ,  $MB_{12}$ ,  $MB_{49}$ ,  $MB_{66-100}$  gibi). Düşük bor konsantrasyonuna sahip borürlerin yapıları latis parametreleriyle belirlenirken, yüksek bor konsantrasyonuna sahip borürlerin yapıları ihtiva ettikleri B-B bağ yapısındaki bor elementlerine bağlıdır [29].

### 3.3.3 Demir esaslı malzemelerin borlanması

Borlama işlemiyle demir esaslı malzemelerin yüzeylerinin sertleştirilmesi konusunda ilk çalışmalar, Moissan tarafından 1895 yılında yapılmış ve daha sonra devam etmiştir. Hızla gelişme gösteren borlama işlemi günümüzde aşınmaya dirençli yüzey oluşturmak için oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [21].

Endüstriyel olarak borlama işlemi, alüminyum ve silisyum içeren yatak çelikleri haricinde yüzeyi sertleştirilmiş, temperlenmiş, takım ve paslanmaz çelikler gibi yapısal çeliklere, döküm çeliklerine, Armco(ticari saflıkta) demire, gri ve küresel grafitli dökme demirlere, sinterlenmiş demir ve çeliklere uygulanabilmektedir.

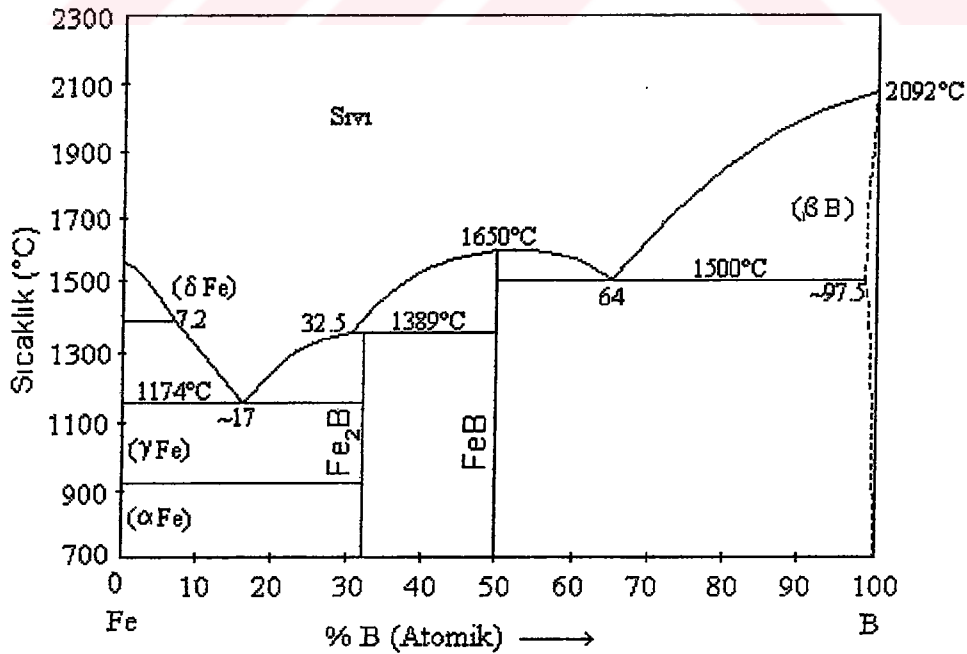
Borlama işleminin ostenit fazında gerçekleşmesi sebebiyle havada sertleşen çelikler, borlama sonrasında anında sertlik kazanırlar. Suda sertleşen parçalar borür tabakasının termal şoka maruz kalması sebebiyle su verilmesi gerekli olduğu durumlarda borlanmazlar. Benzer şekilde sülfürlenmiş ve kurşunlanmış çelikler yüzeylerde çatlak oluşturma eğilimleri, nitrürlenmiş çelikler ise çatlak hassasiyetleri sebebiyle borlama işlemine tabi tutulmamaktadır [13].

Borlama işleminde hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın, karbon çeliklerinde yüzeyde iki çeşit borür fazı oluşabilmektedir. Bunlar en dış yüzeyde  $FeB$  fazı ve  $FeB$  fazı ile matris arasında oluşan  $Fe_2B$  fazı şeklindedir [31]. Borlama sırasında oluşabilecek fazları Fe-B denge diyagramları incelenerek görmek mümkündür.

### 3.3.3.1 Demir-bor denge diyagramı

Bor, periyodik tablonun IIIA grubunda yer almaktadır. Bor elementinin atom numarası 5 ve atom ağırlığı 10.81 gram 'dır. Bor atomunun yarıçapı,  $0.46 \text{ \AA}$  ve ergime sıcaklığı  $2092^\circ\text{C}$  'dir. Bor elementinin valansı +3 'dür ve iyon yarıçapı  $0.23 \text{ \AA}$  'dur. Bor, rombohedral kristal yapısına sahiptir ve latis parametreleri sırasıyla  $a=1.093 \text{ nm}$  ve  $c=2.381 \text{ nm}$  'dir [32]. Ayrıca bor amorf yapıda da olabilmektedir [33].

Alaşımlarda, alaşım elementlerinin yer alan katı eriyiği veya ara yer katı eriyiği olarak davranacakları Hume-Rothery kuralları çerçevesinde belirlenebilmektedir. Bu kurallar içerisinde en önemli olanı, atomik boyut faktörüdür [34]. Fe-B sisteminde borun atom çapı, demire kıyasla %27 daha küçük olması sebebiyle, bu elementle katı eriyik yapabilmektedir (Şekil 3.3). Demir alaşımlarında bor elementinin yer alan veya ara yer katı çözeltileri yapabilecekleri iç sürtünme deneyleri ile belirlenmektedir [35].



Şekil 3.3 Fe-B ikili denge diyagramı [36-39].

Bor elementinin demirde çözünürlüğü,  $\alpha$ -Fe ve  $\gamma$ -Fe 'de %0.5B (a/o) oranındadır. Fe-B ikili denge diyagramının  $\alpha$ -Fe fazına yakın bölgesi, son 50 yıl içerisinde birçok kez değişikliğe uğramış [36-38], fakat yapılan son çalışmalarda, borun  $\alpha$ -Fe ve  $\gamma$ -Fe fazları içerisinde %0.5B (a/o) kadar çözündüğü saptanmıştır. Ancak,  $\delta$ -Fe fazı içerisindeki çözünürlüğü tam olarak tesbit edilememiştir [36]. Ayrıca ilk çalışmalarda  $\alpha$ -Fe ile  $\text{Fe}_2\text{B}$  arasında bir peritektik reaksiyonun varlığından bahsedilirken son çalışmalarda bu reaksiyonun olmadığı görülmüştür [36,38]. Fe-B ikili denge diyagramında, %7,2 B (a/o) konsantrasyonuna kadar  $1394^\circ\text{C}$  'de  $\delta$ -Fe 'den  $\gamma$ +sıvıya dönüşen bir metatektik reaksiyon yer alırken,  $911^\circ\text{C}$  'de  $\gamma$ -Fe+  $\text{Fe}_2\text{B}$  'den  $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{B}$  'e dönüşen bir reaksiyon yer almaktadır. Fe-B denge diyagramı incelenecek olursa (Şekil 3.3), yaklaşık olarak %17B (a/o) bileşiminde  $\alpha$ -Fe ile  $\text{Fe}_2\text{B}$  arasında  $1174^\circ\text{C}$  'de bir ötektik reaksiyon,  $1389^\circ\text{C}$  'de sıvı+FeB arasında bir peritektik reaksiyon ve %33,3B (a/o) bileşiminde  $\text{Fe}_2\text{B}$  intermetalik bileşiğinin oluştuğu görülmektedir. %50B (a/o) bileşiminde ise FeB intermetalik bileşiğinin yer aldığı görülmektedir. Ayrıca, diyagramda görülmeyen dengesiz  $\text{Fe}_3\text{B}$  ve  $\text{FeB}_2$  gibi intermetalik bileşiklerin de oluşabildiğine bir çok makalede rastlanmaktadır. İncelenen birçok makalede,  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazının ergime sıcaklığının  $1389$ - $1410^\circ\text{C}$  arasında ve FeB fazının ise  $1540$ - $1657^\circ\text{C}$  arasında yer aldığı görülmektedir [36].

### 3.3.3.2 $\text{Fe}_2\text{B}$ ve FeB fazlarının özellikleri

Difüzyon yönüne bağlı olarak, kolonsal yapı sergileyen tek fazlı  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazı, çift fazlı  $\text{Fe}_2\text{B}$ +FeB fazlarına göre daha çok tercih edilmektedir. Gerçekte FeB ve  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazları birbirlerine basma ve çekme gerilmeleri uygulamakta ve çoğu zaman bu gerilmeler sebebiyle, iki faz arasında çatlaklar oluşmaktadır. Bu etki mekanik zorlamalar altında borür tabakasının tabaka tabaka kalkmasına neden olmaktadır. Termal şok veya mekanik etkiler altında ayrılmalar ve tabaka halinde kalkmalar meydana gelmektedir. Bu sebeple, minimum FeB içeriğine sahip kaplama tabakaları elde edilmeye çalışılmaktadır [13].

Genellikle, borür tabakalarının tribolojik özelliklerinin belirlenmesinde mikroyapıya bağlı olarak açıklamalar yapılmaktadır. Çift fazlı FeB+Fe<sub>2</sub>B tabakası, tek fazlı Fe<sub>2</sub>B tabakasına göre iyi özelliklere sahip değildir. Çift fazlı tabakalarda yüzeyin hemen altında porozite oluşumu mümkün olmaktadır. Bor kaplamalarda, borür tabakasının ince olması durumunda, porozite oluşumu ve tabakanın kalkma riskinin az olduğu düşünülmektedir [13].

Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucunda, Fe<sub>2</sub>B fazının hakim olduğu dış yapısına benzer kolonsal bir yapının oluşması da tercih edilmektedir. Çift fazlı Fe<sub>2</sub>B +FeB tabakası, vakum veya tuz banyosunda 800°C sıcaklık civarında uzun süre ısıtılma işlemine tabi tutulduğu takdirde, tek fazlı Fe<sub>2</sub>B fazı elde edilebilmektedir [13]. Fe<sub>2</sub>B ve FeB fazlarının tipik özellikleri Tablo 3.8 'de verilmektedir [13,29,36].

Tablo 3.8 Fe<sub>2</sub>B ve FeB fazlarının tipik özellikleri [13,29,36].

| Özellik                                    | Fe <sub>2</sub> B                    | FeB                       |
|--------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Kristal Yapı                               | Hacim Merkezli Tetragonal            | Ortorombik                |
| Latis Parametresi (Å)                      | a=5.078, c=4.28                      | a=4.053, b=5.495, c=2.946 |
| Mikrosertlik (GPa)                         | 18-20                                | 19-21                     |
| Elastisite Modülü (GPa)                    | 280-295                              | 590                       |
| Bor içeriği (%Ağırlıkça)                   | 8.83                                 | 16.23                     |
| Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )             | 7.43                                 | 6.75                      |
| Termal Genleşme Katsayısı (ppm/°C)         | 7.65 (200-600°C)<br>4.25 (100-800°C) | 23 (200-600°C)            |
| Ergime Sıcaklığı (°C)                      | 1389-1410                            | 1540-1657                 |
| Termal İletkenlik (W/m.°K)                 | 30.1 (20°C)                          | 12.0 (20°C)               |
| Elektriksel Direnç (10 <sup>-6</sup> Ω.cm) | 38                                   | 80                        |
| Renk                                       | Gri                                  | Gri                       |

Fe<sub>2</sub>B ve FeB fazlarının Tablo 3.8 'de verilen özellikleri bir çok makalede farklı değerler almaktadır. Bu tabloda, daha çok belirli makalelerden değerler alınmış olup, yayınlanan diğer makalelerden bazıları referans olarak verilmiştir [30,38-41].

### 3.3.3.3 Demir borürlerin büyüme mekanizması

Demir borürler, seramiklerin(yüksek sertlik) ve metallerin termal ve elektriksel iletkenlik gibi genel özelliklerini birarada bulunduran çok ilginç bileşiklerdir [42].

Genellikle sade karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin termo-kimyasal yöntemlerle borlanması sırasında oluşan borürlerin, kolonsal kümecikler halinde büyüdüğü görülmektedir. Oluşan borür tabakasında en dış yüzeyde FeB fazı, matrise doğru  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazı ve iç kısımda geçiş bölgesi yer almaktadır. FeB fazı ile  $\text{Fe}_2\text{B}$  ve  $\text{Fe}_2\text{B}$  ile matris arayüzeyindeki yapının kolonsal olduğu bilinmektedir. Ancak, yüksek alaşımlı çeliklerde arayüzey yapısının kolonsal yerine düz bir çizgi halinde olduğu belirtilmektedir [25,43].

Borlama işlemi sonucunda oluşan borür fazları, borlama ortamının aktif bor konsantrasyonuna bağlı olarak, yüzey çizikleri ve pürüzlülükleri gibi makro hataların, tane sınırları [43] ve dislokasyonlar [44] gibi mikro hataların bulunduğu bölgelerde başlamaktadır. Özellikle düşük aktif bor konsantrasyonunun bulunduğu ortamlarda, bu bölgeler borür fazının oluşabildiği yegane yerlerdir [43]. Yapılan araştırmalarda, ilk oluşan borür fazının  $\text{Fe}_2\text{B}$  olduğu, fakat Mössbauer elektron spektroskopu ile yapılan ölçümlerde  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazı üzerinde FeB fazının bulunduğu ve en dış yüzeyde ise  $\text{FeB}_{1+x}$  fazının yer aldığı görülmektedir. Araştırmacı ilk çalışmalarında, en dış yüzeyde bulunan fazın  $\text{FeB}_x$  olduğunu [45,46] ancak daha sonra yapmış olduğu çalışmalarda, bu fazın  $\text{FeB}_{1+x}$  şeklinde ve buradaki x katsayısının 1'den büyük olduğunu (muhtemelen  $x=2$ ) belirtmektedir. Bu durumda, bor difüzyonunun  $\text{Fe}_2\text{B}$  ile matris ve FeB ile  $\text{Fe}_2\text{B}$  arasında gerçekleştiği görülmektedir. Kaplama yüzeyinden iç kısımlara doğru gidildikçe  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazının ağırlık kazandığı düşünülmektedir. Bu konuyla ilgili olarak yapılan çalışmada, yüzeyden belirli oranlarda tabakalar kaldırılarak yapılan x-ışınları analizlerinde bu durum kanıtlanmaktadır [42].

Yapılan araştırmalarda, borür tabakasının oluşumu konusunda genel olarak savunulan ortak nokta, işlemin difüzyon kontrollü olmasıdır [13-16,35,47-55]. Bu

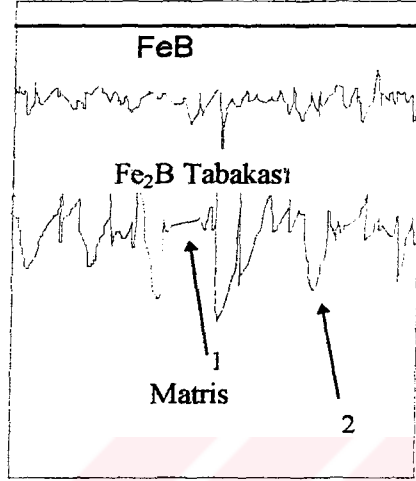
sebeple, bazen termokimyasal terimi yerine termodifüzyon kelimesi de kullanılmaktadır [14]. Bir çok araştırmada, hacim merkezli tetragonal yapıya sahip  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazının çoğu zaman yüzeye dik olan [001] yönünde, borun en kolay difüzyonlanabildiğini açıklamaktadır [56,57]. Borun [001] yönünde kolonsal olarak büyümesi konusunda bir fikir ileri sürülmüşse, 42 ve 43 numaralı referansta bu durumun kuvvetli kolonsallık olmaması durumunda (002) oryantasyonunun daha etkin olarak ortaya çıktığı ve bu görüşün ağırlık kazandığı görülmektedir.

Bor kaynağından borür ve ana metal arayüzeyine sürekli olarak yayılan bor atomları, bor tabakasına dik doğrultuda  $\text{Fe}_2\text{B}$  kristalleri oluşturmakta ve bu kristaller kolonsal bir şekilde içeriye doğru ilerlemektedir. Difüzyon esaslı büyüme mekanizması,  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazının kuvvetli bir şekilde tercihli yönelmeye sahip olmasına rağmen,  $\text{Fe}_2\text{B}/\text{Fe}$  arayüzeyinde düşük veya ihmal edilebilir bir kolonsallaşma göstererek, büyümesini veya kristallografik bir tekstürün olmadığı durumda ara yüzeydeki kolonsallaşmayı açıklamada yetersiz kalmaktadır. Bu konuda kolonların ucundan büyüme mekanizmasının daha geçerli olduğu ileri sürülmektedir.

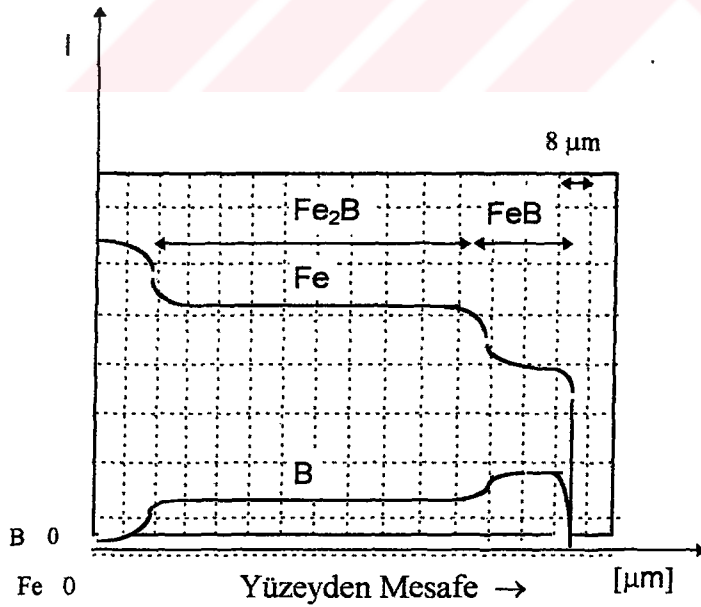
Uçtan büyüme mekanizmasına göre, ana malzemenin bileşimine ve işlem şartlarına bağlı olarak, başlangıçta oluşan  $\text{Fe}_2\text{B}$  çekirdeği iğnesel bir şekilde büyümekte ve bor gradyanı boyunca ilerlemektedir. Bu durumda  $\text{Fe}_2\text{B}$  çekirdeğinin ucu etrafında oluşan bölgesel yüksek gerilim alanları ve distorsiyonları, tabakanın kolonsal olarak büyümesini sağlamaktadır. Uçtan büyüme mekanizmasında Şekil 3.4 'de görüldüğü gibi, demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan tabaka ile matris arayüzeyindeki kolonsallık 2 noktasında 1 noktaya kıyasla daha yüksektir [43].

Demir esaslı malzemelerin borlama işlemi sonrasında çok fazlı borür tabakasında,  $\text{FeB}$  fazının büyüme mekanizması, matrisin hemen üzerinde oluşan  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazı ile benzerlik gösterebilmektedir. Aynı tabaka için  $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$  arayüzeyindeki kolonsallığın  $\text{Fe}_2\text{B}/\text{matris}$  ara yüzeyine nazaran daha az olması dikkate değerdir.  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazı nispeten sünek olan bir malzeme üzerinde büyüyen bir faz iken,  $\text{FeB}$  fazı daha sert bir tabaka üzerinde büyümektedir.  $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$  arayüzeyindeki kolonsallığın az olmasının nedeni buna bağlanabilir ve daha sert bir  $\text{FeB}$  fazı elde

edilmektedir [47]. Matris ve borür tabakası içerisinde bor dağılımı Şekil 3.5 'de gösterilmektedir [56].



Şekil 3.4 Borür tabakasında, FeB ve hemen altında yer alan Fe<sub>2</sub>B bölgesinin kolonsal olarak büyüme mekanizması [43].



Şekil 3.5 850°C'de BCl<sub>3</sub> gaz ortamında 4 saat borlama işlemine tabi tutulan malzeme yüzeyinde oluşan borür tabakası ve matris içerisindeki B ve Fe dağılımı[58].

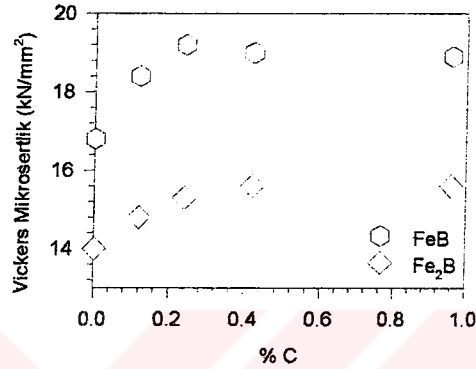
### 3.3.3.4 Borür tabakası ve arayüzey morfolojisine alaşım elementlerinin etkisi

Saf demir ve düşük karbonlu çeliklerde borür tabakası kolonsal bir yapı teşkil etmektedir [59]. Borür tabakasının kolonsallığı matris içerisindeki alaşım elementlerinin miktarına bağlıdır. Örneğin, bu alaşım elementlerinden kromun artışına bağlı olarak borür tabakası, (002) oryantasyonuna sahip olarak büyüme yönünde bir eğilim göstermektedir. Krom ve nikel elementleri, kaplama matris arayüzeyinin düzgün bir hat halinde olmasına da neden olmaktadır [57].

### Karbon

Karbon elementinin, kaplama tabaka yapısı ve kaplama/matris arayüzey morfolojisi üzerine etkisi bir çok araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Karbon çeliklerinde, bilinen borlama yöntemleri ile hemen her zaman tek fazlı  $Fe_2B$  borür yapısı elde edilebilmektedir [60]. Araştırmalar sonucunda düşük ve orta karbonlu çeliklerde kolonsal yapılı borür tabakaları elde edilirken, yüksek karbonlu çeliklerde kaplama/matris arayüzeyinin düzgün ve (002) düzleminde büyüme oryantasyonuna sahip olduğu görülmektedir. Düşük ve orta karbonlu çelikler üzerinde yapılan çalışmalarda, 10  $\mu m$  civarında siyah renkte kaplamalar sağlanarak, bu tabakalarda ince rastgele yönlenmiş iki tabakalı yapılar görülmektedir. %1 ve %2 C içeren çeliklerde kaplama tabakası nispeten düzdür ve %2 C içeren çeliklerde (002)  $Fe_2B$  oryantasyonuna sahip olan borür fazı oluşmaktadır. Bu noktadan hareketle çeliklerde karbon miktarının artışına bağlı olarak, borür tabakasındaki  $Fe_2B$  fazının kararlılığının arttığı sonucuna varılmaktadır [57,61]. Ayrıca kaplama tabakasının hemen altında, tamamen perlitik bir faz oluşmaktadır [57]. Karbon elementinin kaplama tabakası içerisinde çözünmeyip, matrise doğru difüze olduğu [40,62] ve kaplama tabakasının hemen altında  $Fe_3C$ ,  $Cr_{23}C_6$ ,  $Fe_6C_3$  gibi karbürlerin biriktiği belirtilmektedir [63-65]. Bu durum, borür tabaka yapısına önemli ölçüde etki etmektedir [40,62,66]. Ayrıca, karbon miktarındaki artışın,  $Fe_2B$  fazının kararlılığını  $FeB$  fazına göre artırdığı da belirtilmektedir. Karbon miktarının artışına bağlı olarak, tabaka kalınlığında bir azalmanın olduğu ve bu azalmaya  $FeB$  fazının kararlılığının azalmasının neden olduğu belirtilmektedir [67,68].

Çeliklerde, karbon yüzdesinin artışına bağlı olarak borür tabakasında oluşan FeB, Fe<sub>2</sub>B fazlarının sertlikleri Şekil 3.6 'da görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi karbon konsantrasyonunun artışına bağlı olarak, kaplama tabakasının sertliğinde bir artış gözlenmektedir [40].



Şekil 3.6 Borür tabakasındaki FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının sertliğinin karbon miktarı ile değişimi [40].

Şekil 3.6'da %0,4 karbon miktarına kadar sertlik değeri artış göstermekte ve bu değer üzerinde, sırasıyla FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazları için sabit kalmaktadır. FeB, Fe<sub>2</sub>B, (Fe,Cr,Ni)B, (Fe,Cr,Ni)<sub>2</sub>B bileşiklerinde daha fazla karbon çözünürlüğünün zor olması, yukarıda bahsedilen karbürlerin matris yakınındaki alanlarda birikmesinden dolayı, borlama mekanizmasının etkilendiği ve söz konusu borür tabakasının daha sıkı ve sert yapıldığı düşünülmektedir [40].

## Krom

Krom, çeliklerde borür tabakasının hem morfolojisine hem de derinliğine etki etmektedir. %4 Cr içeren çeliklerde 65-95µm kalınlıkta kolonsal yapıli borür tabakaları elde edilirken, %12 Cr içeren çeliklerde borür tabakası/matris arayüzeyi düz olan ve 65µm kalınlıkta kaplamalar elde edilebilmektedir. %26 Cr ihtiva eden çeliklerde ise borür tabaka kalınlığı 5µm civarındadır. Bu çelikler içerisinde, CrB fazına yalnızca %26 Cr içeren çeliklerde rastlanmaktadır. Yapılan çalışmalarda, %12 Cr içeren çeliklerde yüzeyde 5-10µm civarında FeB tabakası, iç kısımda ise

50-55µm civarında  $\text{Fe}_2\text{B}$  tabakası görülmektedir. %4 Cr içeren çeliklerde birkaç mikron mertebesinde  $\text{FeB}$  tabakası görülmektedir [59,68]. Bindal [69], düşük krom yüzdellerinde dahi krom borür fazlarının bulunduğunu belirtmektedir.

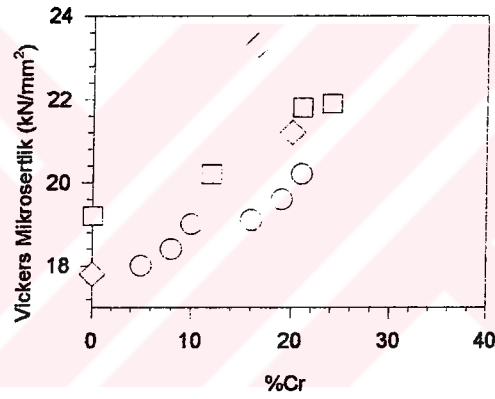
Cr elementi borlama işlemi sırasında, borür tabakasında bulunmakta ve  $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$  bileşiklerini oluşturmaktadır.  $\text{FeB}$  fazı kromu kabul etmemektedir. Bu durum,  $\text{Cr}_2\text{B}$  ve  $\text{Fe}_2\text{B}$  bir birinin izomorfı iken,  $\text{FeB}$  ile  $\text{CrB}$  fazının birbirinin izomorfı olmamasından ileri gelmektedir [59]. Bindal [69], düşük alaşımlı çeliklerde,  $\text{CrB}$  ve  $\text{Cr}_2\text{B}$  fazlarının mevcut olduğunu tespit etmiştir.

Aynı şekilde krom, çeliklerde borür tabakasının düzleşmesine neden olmaktadır. Bunun sebebi olarak, alaşım elementinin borür tabakası içerisinde demir atomlarının yerini alması ile açıklanabilir [57]. Yapılan araştırmalarda, ağırlıkça %5,65 Cr ihtiva eden bir çelik borlama işlemine tabi tutulduktan sonra  $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$  ve  $\text{Fe}_2\text{B}/\text{matris}$  arayüzeyinde (002) kristallografik oryantasyonları tercih görmektedir [49,57]. Araştırmalar sırasında, kaplamanın alt kısımlarında  $\text{Fe}_2\text{B}$ , bunun üzerinde  $\text{FeB}$  ve en üst kısımda  $\text{FeB}_x$  ( $x>1$ ) fazlarının varlığı bulunmuştur. Krom miktarının artışına bağlı olarak,  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazına nazaran borca zengin reaksiyon ürünü olan tabakaların kalınlığı ( $\text{FeB}$ ) artış göstermektedir. Bunun yanında  $\text{FeB}/\text{FeB}_x$  oranı da artmaktadır. En dış yüzeyde krom ihtiva eden  $(\text{B,Fe})_{ss}$  katı eriyiği görülmektedir. Yapılan incelemelerde, krom miktarının artışı  $\text{FeB}$  fazının kararlılığını artırmakta ve kaplama tabakasının dış kısmı iç kısmına göre daha az yoğun olmaktadır. Buna karşılık,  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazının miktarını da azaltmaktadır [13,49].

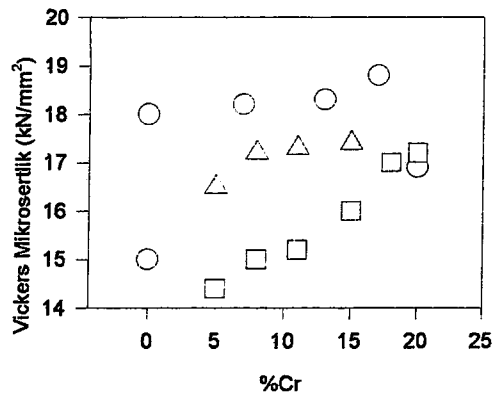
Kromlu alaşımların borlanması borür tabakasının sertlik ve kırılganlığının arttığı (Şekil.3.7) [40], buna karşılık, borür tabaka kalınlığının alaşımsız çeliklere göre belirgin bir değişme göstermediği [49], ancak krom miktarının artışına bağlı olarak azaldığı [13,59] belirtilmektedir. Borür tabakası boyunca krom yüzdesi, tabaka yüzeyinden matrise doğru artış göstermektedir. Yani krom konsantrasyonu,  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazına nazaran,  $\text{FeB}$  fazında daha düşüktür [40,48].

FeB fazında krom 1000°C 'de atomik olarak %40 oranında demirin yerini alabilmektedir ve tabaka içerisinde  $\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4}\text{B}$  ve  $\text{Cr}_{0.75}\text{Fe}_{0.75}\text{B}$  bileşikleri bulunmaktadır [40,70]. Oluşan  $\varepsilon\text{-(Cr-Fe)B}$  faz dağılımı borür tabaka sertliğinin artmasına neden olmaktadır.

1000°C sıcaklıkta yapılan borlama işleminde  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazında atomik olarak %17 oranında Cr çözünebilmektedir. Cr elementi, borür tabakasında  $(\text{Cr-Fe})_2\text{B}$  ve  $\gamma\text{-(Cr-Fe)}_2\text{B}$  fazları şeklinde yer almaktadır [40,70].  $\gamma\text{-(Cr-Fe)}_2\text{B}$  fazı Cr-B sistemindeki  $\gamma\text{-Cr}_2\text{B}$  (ortorombik) fazının dönüşmesi sonucu elde edilmektedir [40].



(a)

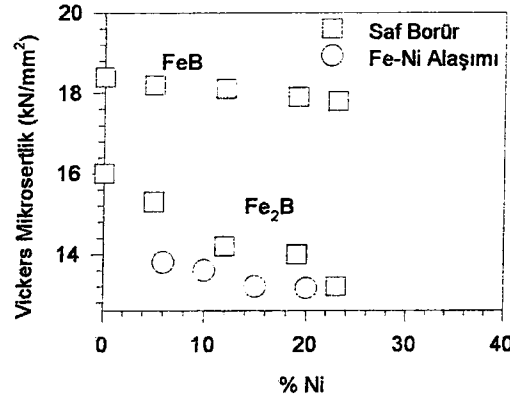


(b)

Şekil 3.7 (a) FeB ve (b)  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazlarının Cr miktarının artışına bağlı olarak sertliğindeki değişim. (O) Saf borür, (□) Çelik, (Δ)  $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$  [40].

## Nikel

Nikel elementinin borür tabakasına etkisi yüksek konsantrasyon değerlerinde ortaya çıkmaktadır. %4 Ni içeren çeliklerde 90µm borür tabaka kalınlığı elde edilirken, %14 Ni içeren çeliklerde bu değer 60µm olmaktadır. Çok yüksek Ni konsantrasyonlarında borür tabakasının kolonsal yapıda oluşma ihtimali düşmektedir ve meydana gelen borür fazının yüksek derecede porozite içerdiği görülmektedir[59]. Fe-Ni alaşımlarında borür tabakaları FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarında görülmektedir. Nikel, Fe<sub>2</sub>B tabakasına karşılık gelen alt tabakadan yüzeye doğru segrege olmaktadır ve yüksek nikel konsantrasyonlarında bu etki, Fe<sub>2</sub>B fazında nikel konsantrasyonunun düşmesi ile açık bir şekilde görülmektedir. Ostenitik paslanmaz çeliklerin yüzeyinde oluşturulan borür tabakasında yüzeyde FeB ile birlikte muhtemelen çözünmesi zor olan Ni<sub>3</sub>B fazı bulunmaktadır [59,71]. Yüzeyin altındaki tabakada ise büyüme yönüne paralel olacak şekilde (002) tekstürüne sahip Fe<sub>2</sub>B fazı gözlenmektedir. Sonuçta krom ve nikel birbirlerine göre zıt bir davranış gösterirken, nikel, borür tabakasının yüzeyinde, krom ise iç kısımlarında yoğunlaşmaktadır. Araştırmalar borlama ortamında bor aktiviteleri ile oynanarak tek fazlı Fe<sub>2</sub>B fazı elde edilebildiğini ve borür tabakası boyunca krom ve nikelin homojen olarak dağıldığını göstermektedir [59]. Nikel ve krom, kaplama/matris ara yüzeyinde düzleşmeye neden olmaktadır ancak, kromun etkisi nikel göre çok daha fazladır. Krom, demirden daha düşük atom numarasına sahip bir element olması sebebiyle, borca zengin (Fe,Cr)B bileşiği öncelikli olarak matristen yüzeye doğru yayılmaktadır. Ayrıca kromun matrise nazaran kaplama tabakasında yer alan (Fe,Cr)B ve (Fe,Cr)<sub>2</sub>B fazlarında daha fazla çözündüğü ileri sürülmektedir. Nikel miktarının artmasına bağlı olarak (Fe,M)B en dış tabakasında nisbeten yüksek oranda düşme meydana gelmektedir [30]. Bunun sonucunda, atom numarası demirden yüksek olan nikelin iki fazlı borür tabakasında, borca zengin fazdan fakir faza doğru yayındığı düşüncesi ortaya çıkmaktadır. Borür tabakasında nikel miktarının artması, kolonsal yapının azalmasına ve porozitenin artmasına neden olurken, kaplamanın mekanik özelliklerini de kötüleştirmektedir [67,68].



Şekil 3.8 Nikel miktarının artışına bağlı olarak, borür tabakasının sertliğindeki değişim[40].

Çeliklerde nikel konsantrasyonunun artması,  $(\text{FeNi})_2\text{B}$  fazının sertliğini azaltırken  $\text{FeNiB}$  fazında herhangi bir azalmaya sebep olmamaktadır. Artan nikel miktarına bağlı olarak borür tabakasının sertliğindeki değişim Şekil.3.8 'de görülmektedir [40,68].

### Manganez

Manganez, kroma benzer şekilde tercihli olarak borür tabakasına girerek, yüzeye doğru yayılmaktadır. Dukarevich ve Mozharov manganezin kaplamanın yüzeye yakın kısmında yer alan  $\text{FeB}$  fazında yoğun olduğunu söylerken, Tsipas ve Rus çözünmenin genellikle iç kısımdaki  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazında olduğunu iddia etmektedirler. Manganez, borür tabakasının kalınlığını düşürmektedir [72]. Özsoy [63] artan mangan oranı ile kaplama/matris arayüzeyinin düzleştiğini söylerken Carbucicchio ve arkadaşları[50] kolonsallığın daha da arttığını ileri sürmektedir. Vilsmeier ve arkadaşları [48], manganez elementinin  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazı içerisinde matristen daha fazla çözündüğünü ancak, bu oranın yaklaşık matrisle aynı olduğunu ifade etmiştir.

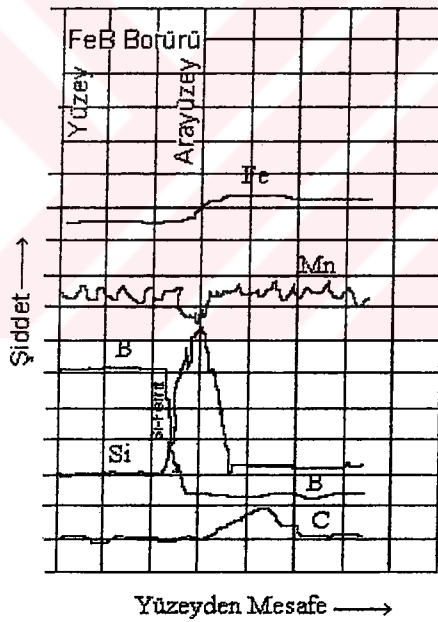
## Silisyum ve Alüminyum

Silisyum, genellikle difüzyon bölgesinde bulunarak ferrit fazı meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bu yüzden, borür tabakasının mekanik özelliklerine olumsuz yönde etki yapmaktadır [48,73]. Alüminyum ve silisyum, karbona benzer şekilde borür tabakası içerisinde çözünmemektedir ve borlama işlemi sırasında çeliğin iç kısımlarına doğru itilerek, borür tabakası ile metal arayüzeyinde  $\text{FeSi}_{0.4}\text{B}_{0.6}$  ve  $\text{Fe}_4\text{SiB}_2$  bileşiklerinin oluşmasına neden olmaktadır. Borür tabakasının aşınma direncini azaltması sebebiyle ferrit oluşturu bu elementleri fazla miktarda içeren çelikler, pek kullanılmamaktadır [13,64,65]. Galibois ve arkadaşları [51], yapmış oldukları çalışmada, silisyum ve alüminyumun farklı ortamlarda borlama işlemi yapılmasına rağmen, benzer davranışlar göstererek kaplama tabakasının alt kısımlarında belirli oranlarda yoğunlaştıklarını belirtmektedir.

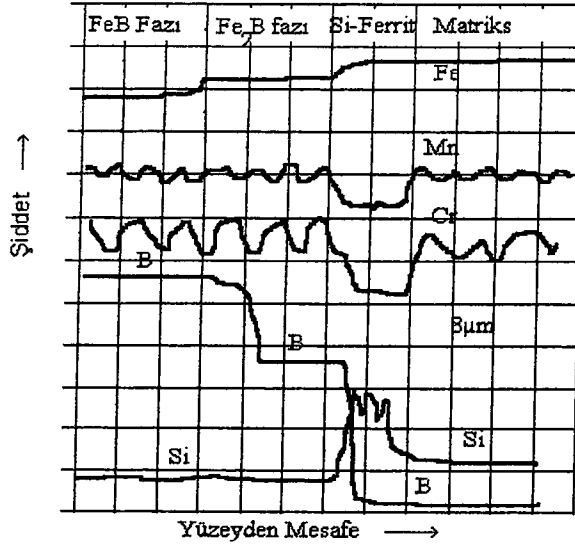
Kastner ve arkadaşlarının [74] yapmış olduğu çalışmalarda, %0,28 oranında silisyum ihtiva eden C15 çeliğinin borlanması sonucunda, alaşım elementlerinin borür tabakası içerisinde dağılımları Şekil 3.9 'da ve 37HS çeliğinin ise Şekil 3.10 'da verilmektedir. Şekil 3.9 'dan görüldüğü gibi C15 çeliğinde oluşan borür tabakasının  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazından meydana geldiği ve bor konsantrasyonunun kaplama tabakası boyunca belirli bir oranda bulunduğu, ayrıca kaplama boyunca Fe, Mn, Si ve C elementlerinin homojen konsantrasyon değerine sahip olduğu görülmektedir. Aynı şekilde, kaplama/matris arayüzeyinde Si elementinin belirgin olarak yoğunlaştığı ve Mn elementinin konsantrasyonunun düştüğü görülmektedir. Daha iç kısımlarda ise C konsantrasyonunun arttığı ve elementlerin matris içerisinde yaklaşık olarak kaplamadaki konsantrasyon değerlerine ulaştığı görülmektedir. 37HS çeliğinde ise borür tabakasında  $\text{FeB}$  ve  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazının birlikte bulunduğu, Mn ve Cr 'un belirli artış ve azalışlarla birlikte yaklaşık olarak sabit konsantrasyon değerine sahip olduğu görülmektedir. Aynı şekilde, silisyumun kaplama tabakası boyunca çok düşük miktarlarda ve sabit konsantrasyona sahip olduğu, ancak tabakanın altında yoğunlaşarak Si-ferrit fazını oluşturduğu görülmektedir. Burada Si-ferrit bölgesinde Si konsantrasyonu belirgin bir şekilde artış göstermektedir. Şekil 3.11 'de çeliklerin

borlanması sonucunda, borür tabakası boyunca alaşım elementlerinin dağılımları şematik olarak verilmektedir.

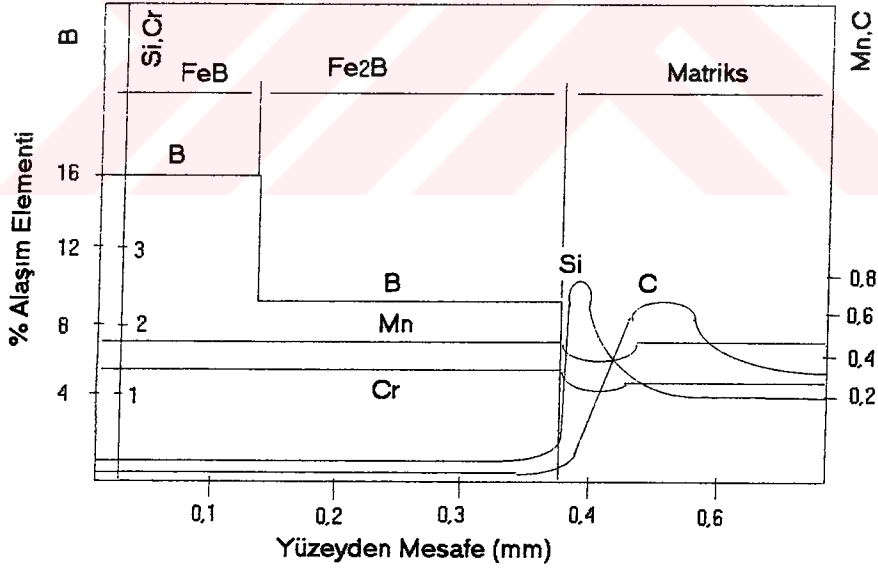
Vetters [75]'in 61CrSiV5 ve X5CrNi189 çeliklerinin borlanması üzerine yapmış olduğu çalışmada, alaşım elementlerinin benzer davranış sergiledikleri görülmektedir. Burada alaşım elementlerinin yüksek konsantrasyonları sebebiyle kaplama/matris arayüzeyinde silisyumun yanı sıra krom ve nikelin konsantrasyon değerlerinin de kısmen artış gösterdiği belirtilmektedir. Si içeren çeliklerin borlanmasında tabaka/matris arayüzeyinde oluşan Si-ferrit fazının sertliğinin, genellikle matristen daha düşük olduğu görülmektedir [76].



Şekil 3.9 C15 çeliğinin yüzeyinde oluşturulan borür tabakasında B, Si, Fe, Mn ve C elementlerinin dağılımı [74].



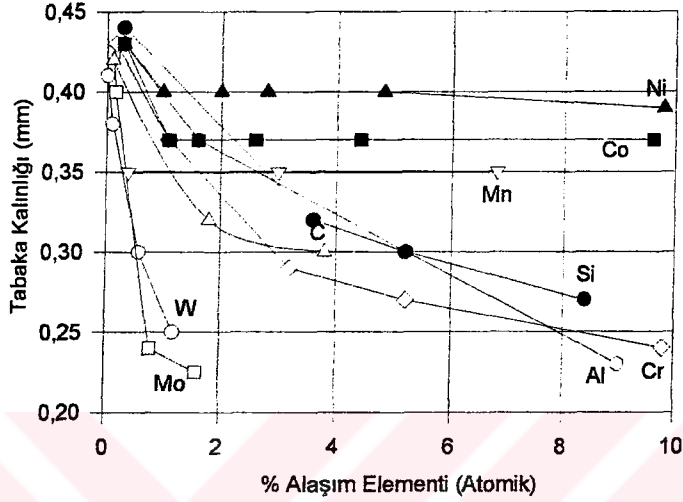
Şekil 3.10 37 HS çeliğinin yüzeyinde oluşturulan borür tabakasında B, Si, Fe, Mn ve Cr elementlerinin dağılımı [74].



Şekil 3.11 Çeliklerde borür tabakası boyunca elementlerin şematik olarak dağılımı[74].

Belirtilen bu alaşım elementlerinin dışında, W, Mo ve V borür tabakasının kalınlığını azaltmaktadır. Ti, Co, S ve P elementlerinin etkisi ise henüz araştırılmamıştır. Ancak Co/Fe<sub>2</sub>B çiftinde sistemin çok karışık olduğu belirtilmektedir. (Co,Fe)<sub>2</sub>B ve (Co,Fe)<sub>3</sub>B şeklinde borür bileşikleri oluştuğu

görülmektedir [71]. Şekil 3.12, alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisini göstermektedir [13].



Şekil 3.12 Çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi [13].

### 3.3.3.5 Borür tabakasının büyüme kinetiği

Metallere uygulanan yüzey işlemlerinin çoğu, alaşım elementinin malzemenin yüzeyine yayınması esasına dayanmaktadır [77]. Genel olarak difüzyon işleminin gerçekleşebilmesi için iki temel kavram önem kazanmaktadır. Bunlar; difüzyonlanabilme ve difüzyon için gerekli olan itici güçtür. Kaplama işlemlerinde bu özellik, sadece ana metalin yapısına bağlı değil, aynı zamanda kaplama tabakasının yapısına da bağlı olmaktadır. Bu temel karakteristikler difüzyonla metal kaplama işlemlerinde, kaplama kinetiğinin temelini teşkil etmektedir. Dislokasyonlar, tane sınırları, yüzeyler ve arayüzeyler malzemelerin başlıca yapı hatalarıdır. Potansiyel gradyant ve bu yapı hatalarının kombinasyonları çeşitlilik arzeder ve difüzyon olayını karmaşılaştırır. Matris malzemedde, tane sınırları ve dislokasyonlar boyunca kütle taşınımının hızlı olduğu literatürde geniş bir şekilde yer almaktadır [78,79].

Kaplama işleminde, difüzyon hacimsel yayınma ile kontrol edilmektedir. Çeliğin iki klasik yüzey sertleştirme işlemi olan sementasyon ve nitrasyon, matris malzeme içerisinde C ve N'un yayınması esasına dayanmaktadır [80]. Benzer şekilde bor difüzyonu da kütleli taşınım ile gerçekleşmektedir [24]. Bunun yanında matris metalin içerdiği alaşım elementlerinin bor difüzyonuna tek tek yada birlikte etkileri de mevcuttur [55].

Demir ve demir esaslı malzemeler borlama işlemine tabi tutuldukları zaman, malzeme yüzeyi üzerinde borür fazı başlangıçta çekirdek halinde büyümektedir. Kaplama, en dış yüzeyde (Fe,M)B ve daha iç kısımda yani matrisin hemen üzerinde (Fe,M)<sub>2</sub>B fazlarını içeren iki farklı borür tabakasından meydana gelmektedir. Borür fazları içerisinde hakim faz olarak Fe<sub>2</sub>B ve FeB fazları yer almaktadır. Difüzyon işlemi, bor atomlarının FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının içerisinde difüzyonu ile kontrollü olarak gerçekleşmektedir [55].

Brakman ve arkadaşları [55], borlama işlemi sırasında bor konsantrasyonlarının yüzey ve arayüzey boyunca değişiklik göstermediklerini kabul ederek aşağıdaki bağıntıları geliştirmişlerdir.

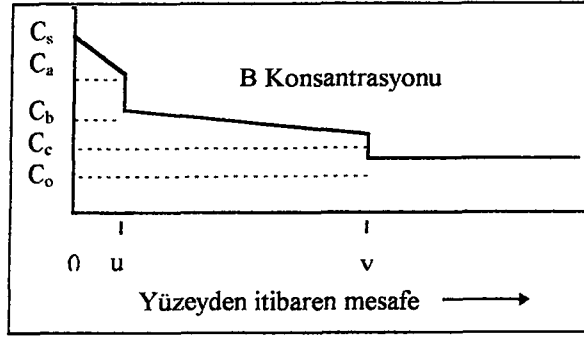
$$C_0 = 0 \quad C_b - C_c = 0 \quad \text{kabul edilirse,}$$

$$C_{\text{FeB}} = D_{\text{FeB}} (C_s - C_a) \quad (3.5)$$

$$C_{\text{Fe2B}} = D_{\text{Fe2B}} (C_b - C_c) \quad (3.6)$$

Konsantrasyonun yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak değişimi Şekil 3.13 'de verilmektedir [55].

$C_s - C_a$  ve  $C_b - C_c$  sıcaklığa önemli ölçüde bağlı değildir.  $C_{\text{FeB}}$  ve  $C_{\text{Fe2B}}$ 'nin sıcaklığa bağımlılığı  $D_{\text{FeB}}$  ve  $D_{\text{Fe2B}}$  difüzyon katsayılarından kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı,



Şekil 3.13 Bor konsantrasyonunun yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak değişimi[55].

$$C_{FeB} = K_{FeB} \exp(-Q_{FeB}/RT) \quad (3.7)$$

$$C_{Fe_2B} = K_{Fe_2B} \exp(-Q_{Fe_2B}/RT) \quad (3.8)$$

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

Netice olarak, FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarında bor difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi  $Q$  ve ön eksponansiyel  $K$  faktörü değerleri, sıcaklığın ( $1/T$ ) fonksiyonu olarak  $\ln C_{FeB}$  ve  $\ln C_{Fe_2B}$  ile arasında çizilen eğriler yardımıyla ordinatı kesim noktasından ve eğiminden bulunabilmektedir. Her iki tabaka birbirine bağlı olarak büyümektedir. Bu yüzden, Fe<sub>2</sub>B ve FeB fazlarının büyümesi ile ilgili kinetik parametrelerin belirlenmesinde her iki tabaka için verilerin bulunması gerekmektedir. Bu, yukarıda aktivasyon enerjisinin belirlenmesinde örneklenmiştir[55].

Borun Fe<sub>2</sub>B fazı içerisinde difüzyonu, (001) düzlemine dik ve [001] yönünde zincir oluşturarak, FeB fazında ise [001] yönünde bir zikzag çizerek mümkün olmaktadır. Kristallografik veriler doğrultusunda, B atomunun Fe<sub>2</sub>B fazı içerisinde (001) düzlemine dik bir yol boyunca difüzyonu sırasında, demir ve bor atomları arasında katedilen en kısa mesafe yaklaşık olarak  $\approx 0.191\text{nm}$  olarak tesbit edilmiştir. Bu durumda, B atomu 4 adet demir atomu ile çevrili durumdadır [68].

FeB içerisinde borun zikzag şeklindeki difüzyonu için her bir atomun sıçrama yolu şöyle verilmektedir[hkl] ;

$$h=(1-4u)/a^2 \quad (3.9)$$

$$k=1/b^2 \quad (3.10)$$

$$l=(-16uv+4u+4v-2)/c^2 \text{ 'dir} \quad (3.11)$$

Burada  $u=0.125$ ,  $v=0.18$  değerine sahiptir. Borun atomik sıçraması,  $2^\circ$ 'lik bir sapma ile düzleme dik olarak meydana gelmektedir. Burada (hkl) düzlemi,

$$h=2/(4v-1) \quad (3.12)$$

$$k=h/(1-4u) \quad (3.13)$$

$$k+l=2 \quad (3.14)$$

şeklinde. Borun FeB fazı içerisindeki difüzyon sırasında, demir ve bor atomları arasındaki en kısa mesafe belirtilen sıçramada meydana gelmektedir ve  $\approx 0.197\text{nm}$ 'ye eşittir. Bu sırada, belirtilen düzlemde 4 demir atomu ile çevrili durumdadır. Fe ve B atomları arasında sınırlanmayan en kısa mesafe  $\approx 0.125\text{nm}$ 'dir [55].

Araştırmacılar tarafından FeB ve  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazı içerisinde bor difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjisinin aynı değere sahip olacağı ileri sürülmektedir. FeB ve  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazı içerisinde bor difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjileri arasında çok az bir fark vardır (Tablo 3.9). Bu fark, B ile Fe atomları arasındaki bağlanma farklılığından kaynaklanmaktadır. Fe-B arasındaki en kısa mesafe  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazına nazaran FeB fazında biraz daha küçük olduğundan ( $0.215\text{nm}$  'ye karşılık  $0.218\text{nm}$ ), Fe-B bağının kovalent karakteri ve dolayısıyla mukavemeti FeB fazı için daha büyük olabilir. Ayrıca FeB fazı içerisinde en kısa B-B mesafesi B atomunun kovalent yarıçapının yaklaşık iki katıdır. Buna karşılık aynı değer  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazı içerisinde belirgin olarak daha büyüktür ( $0.180\text{nm}$  'ye karşılık  $0.212\text{nm}$ ). Ayrıca, bor atomlarının en yakın komşu bor atomları ile arasındaki bağı kırmanın FeB fazı içerisinde  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazına nazaran daha zor olduğu söylenmektedir [55].

Tablo 3.9 FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazları içerisinde borun difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjileri [55].

|          | Q <sub>FeB</sub><br>kJ/mol | Q <sub>Fe<sub>2</sub>B</sub><br>kJ/mol | Q <sub>FeB</sub> /Q <sub>Fe<sub>2</sub>B</sub> |
|----------|----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|
| Fe       | 175                        | 157                                    | 1.11                                           |
| Fe-0.8C  | 176                        | 154                                    | 1.14                                           |
| Fe-0.5Cr | 177                        | 155                                    | 1.14                                           |
| Fe-4Cr   | 289                        | 210                                    | 1.38                                           |
| Fe-4Ni   | 311                        | 178                                    | 1.75                                           |
| Fe-10Ni  | 286                        | 157                                    | 1.82                                           |

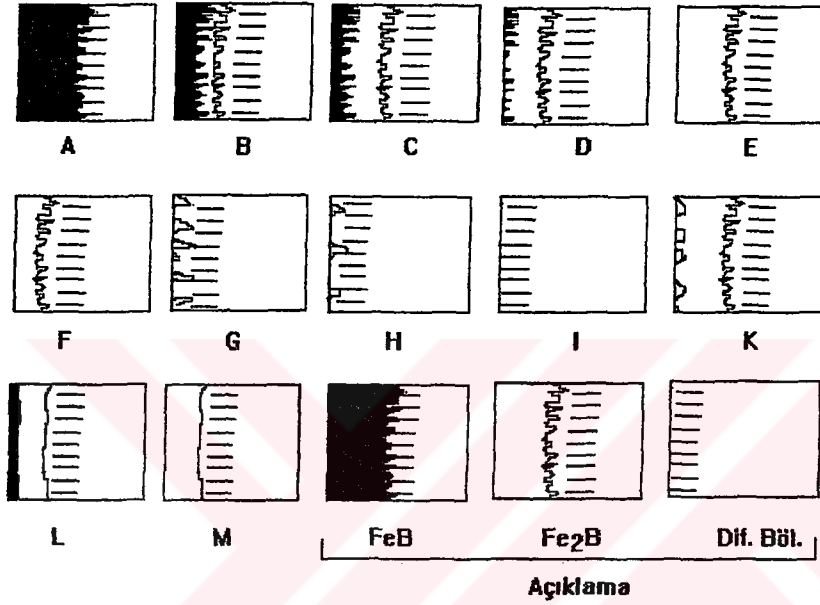
Difüzyon katsayısı atomik sıçrama mesafesinin karesi ve sıçrama frekansı ile orantılıdır. Burada, sıçrama frekansı olarak belirtilen faktör, aktivasyon enerjisi ile exponansiyel sıcaklık bağımlılığını da ihtiva etmektedir [55].

Borun Fe<sub>2</sub>B fazı içerisinde [001] boyunca bir atomik sıçrama mesafesi,  $c/2=0.212$  nm iken FeB fazı içerisinde zikzag yol boyunca  $c/2=0.148$ nm 'dir. Bu yüzden sadece zincir boyunca oluşan atomik sıçramalar göz önüne alındığında (zikzag veya düz) Fe<sub>2</sub>B ve FeB fazları içerisinde [001] boyunca difüzyon için geçerli olan bor difüzyon katsayılarının exponansiyel öncesi faktörlerinin oranı  $(0.148)^2/(0.212)^2 \approx 0.5$  olarak tahmin edilmektedir. Ancak, bu tahmini kesinleştirecek deneysel bir veri mevcut değildir [55].

### 3.3.3.6 Borür tabaka yapılarının sınıflandırılması

Borlama ortamlarının, borlama işlemi için uygun olup olmadıklarını anlamak için, işleme tabi tutulacak parçaların metalografik olarak incelenmeleri gerekmektedir. Metalografik olarak iyice parlatılmış olan bir yüzeyde borlama işleminin olup olmadığı, kaplama tabakasının FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının yanısıra porozite içerip içermedikleri kolaylıkla tesbit edilebilmektedir. Bununla birlikte, borür tabakasının kalınlığı, yapısı (kolonsal veya düz) ve kalitesi belirlenebilmektedir [21,81].

Kunst ve Schaber [82] Şekil 3.14 'de görüldüğü gibi geçerli olabilecek bir sınıflandırma sistemi geliştirmişlerdir. Bu sınıflandırmayı kaplama tabakalarının bileşim ve belirleyici görünüşlerine bağlı olarak yapmışlardır.



Şekil 3.14 Borür tabakalarının türleri [82].

- Tabaka A : Çoğunlukla FeB fazından oluşan tek fazlı tabaka
- B : Fe<sub>2</sub>B ve FeB fazından oluşan iki fazlı tabaka
- C : FeB tabakasının B 'ye göre daha ince olduğu iki fazlı tabaka
- D : FeB fazı birbirinden ayrı ve kolonsal yapılı olduğu, iki fazlı tabaka.
- E : Çoğunlukla Fe<sub>2</sub>B fazından oluşan, belirgin kolonsal yapılı tek fazlı tabaka.
- F : Çoğunlukla Fe<sub>2</sub>B fazından oluşan ve daha az belirgin kolonsal yapılı tek fazlı tabaka,
- G : Birbirinden bağımsız bireysel Fe<sub>2</sub>B kolonları
- H : Birbirinden uzak ve bağımsız bireysel Fe<sub>2</sub>B kolonları

Tabaka I : Difüzyon zonu

K : Dejenere tabaka

L : FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazından oluşan, kolonsal yapıda olmayan düzgün karakterli iki fazlı tabaka,

M : Fe<sub>2</sub>B fazından oluşan ve kolonsal yapıda olmayan düzgün karakterli tek fazlı tabaka,

Bu tabaka türlerinin görünüşlerinden, kaplama yapısının özelliklerini belirlemek mümkün değildir. Malzemenin yüzeyinde oluşan borür tabakasının kolonsal yapılı oluşu tamamen tabakanın görünüşü hakkında bilgi vermektedir. Oluşturulan bu sınıflandırma sistemi borür tabakasının görünüşünü karakterize etmek ve borlama işleminin uygun olup olmadığına karar vermek için olanak sağlamaktadır [81]. Her bir tabaka türü aşağıda verildiği gibi karakterize edilmektedir:

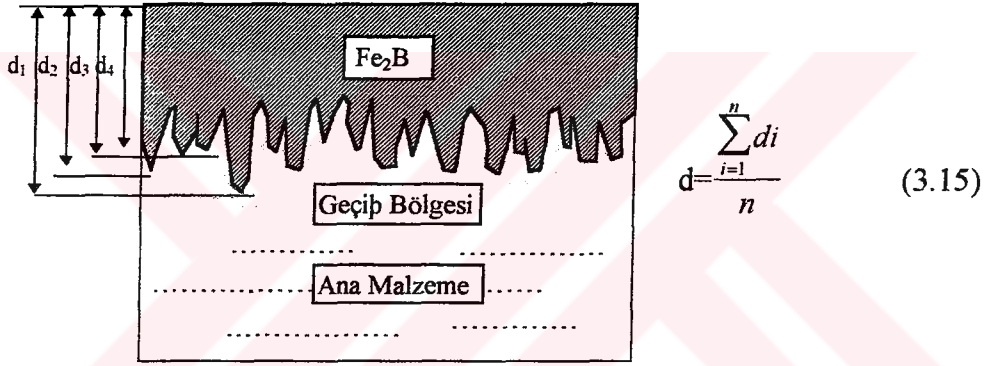
Endüstride E ve F grubu borürler ve bu borürleri sağlayan borlama ortamları tercih edilmektedir. Mineraller tarafından aşınmaya maruz kalınması durumunda D tipi borür tabakası istenmektedir. Tek fazlı borür tabakası (Fe<sub>2</sub>B) bir çok avantaja sahiptir. Bunlardan bir kaçı arasında, kırılğan olmaması, borlama sonrası ısıt işleminde kaplama tabakasının matrinden ayrılmayacak kadar yapışma mukavemetine sahip olması ve kaplamanın özellikleri yer almaktadır [81].

Borür tabakasının kalınlığı borlanan malzemenin cinsine, borlama ortamının bileşimine, işlem süresine ve borlama sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Genellikle erozif aşınmaya maruz kalan tabakaların kalın, adhesiv aşınmaya maruz kalan parçaların ince kaplanmış olması istenmektedir [13]

Teorik olarak adhesiv aşınmayı önlemek için 5 µm'lik tabaka kalınlığı yeterli olabilmektedir. Ancak alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerde kolonsal karakterli tabaka yapısı oluşması sebebiyle 5µm'lik bir tabakanın elde edilmesi mümkün olmamaktadır. Alaşımlı çeliklerde ise (örneğin takım çeliklerinde) tabaka

kalınlığının 75-100  $\mu\text{m}$  'yi geçmemesi önerilmektedir. Alaşım elementlerinin varlığı bor yayınımlarını zorlaştırarak tabaka kalınlığını olumsuz yönde etkilemektedir [21,81].

Borür tabakalarının kolonsal ve değişken karakterli bir yapıda olmaları sebebiyle tabaka kalınlıklarının belirlenmesinde güçlükler çıkmakta ve bu nedenle farklı tanımlamalar yapılmaktadır. Literatürde tabaka kalınlığı, genellikle kolonsal yapının dış yüzeyle karşılaştırılması ve kolonların yüzeye bağlı olarak ortalama mesafelerinin alınması ile hesaplanmaktadır (Şekil 3.15) [21,81].



Şekil 3.15 Borür tabaka kalınlığının belirlenmesi [21,81].

### 3.3.3.7 Borür tabakasının karakteristik özellikleri

Borür tabakalarının çatlaması konusunda yapılan araştırmalar sonucunda, FeB ve  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazlarının farklı ısı genleşme katsayılarına sahip olması sebebiyle çatlak oluşumuna neden oldukları görülmektedir. Bu iki faz arasında yüzeye paralel çatlakların yanında yüzeye dik olarak ilerleyen çatlaklar da yer almaktadır.

Bunun haricinde takım çeliklerine uygulanan borlama işlemi sonrasında çok kalın tek fazlı kaplamalarda da darbeli gerilmeler altında çalışması durumunda çatlaklar oluşmaktadır. Çalışmalar sonucunda FeB ve  $\text{Fe}_2\text{B}$  arayüzeyinde, FeB fazının çekme gerilmelerine  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazının ise basma gerilmelerine maruz kaldığı görülmektedir[21,81].

Borlama işleminin en önemli amaçlarından biri de malzemeye yüksek aşınma direnci ve yüzey sertliği kazandırmaktır [13]. Genel olarak bor kaplamaların sertliğinin belirlenmesinde vickers mikrosertlik ve knob sertlik testleri uygulanmaktadır [21,81]. Sertlik ölçümleri, tabaka kalınlığı ve faz yapısına bağlı olarak 25-200gr yüklerle gerçekleştirilmektedir. Borlama işleminde elde edilen kaplama tabakalarında genellikle FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazları mevcut olup, FeB fazı Fe<sub>2</sub>B fazına nazaran daha sert ve gevrek, bu yüzden FeB fazı için düşük yükler tercih edilmektedir [84]. Geouriot ve arkadaşları [85], borür tabakasının sertliğini belirlemek için iki ayrı yöntem önermektedir. Bunlar sırasıyla, sertlik deneylerinin malzeme yüzeyine dik yada büyüme yönünde artan yükler kullanılarak gerçekleştirilmesi ve sabit yük kullanılarak gerçekleştirilmesidir. Ölçümlerde, sabit yük olarak, 100gr kullanıldığı belirtilmektedir. Çeliklerde borür tabakasının sertliğinin 2000 kg/mm<sup>2</sup> vickers değerine ulaştığı hatta bunun üzerine çıktığı bilinmektedir. Ancak sertlik ölçümlerinin metalografik olarak çok iyi hazırlanmış numuneler üzerinde yapılması gerektiği önem arz etmektedir [21,81,86]. Borür tabakasının bir özelliği de, borlama sonrasında ısıtıl işlem görmesi durumunda sertliğini 900°C sıcaklığa kadar muhafaza edebilmesidir [84].

Klasik kırılma tokluğu deneyleri, boyut bakımından uygun malzemelere uygulanabilmektedir. Özellikle, numunenin kalınlığı ve plastik bölgenin boyutu kırılma tokluğu deneylerinde oldukça önemli parametrelerdir. Ayrıca bu deneye tabi tutulan malzemelerin gevrek olmamaları gerekmektedir. Bu durumda, gevrek ve kütleli olarak küçük malzemelere klasik kırılma tokluğu deneylerinin uygulanması mümkün olmadığından, “indentasyon” esaslı bir metot geliştirilmiştir. Bir malzemenin kırılma tokluğu, uygulanan yüke, çatlak boyuna ve numunenin geometrisine büyük ölçüde bağlıdır [4,69].

Borür tabakaları yüksek sertlik ve gevrek karaktere sahiptir. Özellikle FeB tabakasının sertliği Fe<sub>2</sub>B'ye nazaran daha sert ve daha gevrek, Ayrıca borür tabakasında iki fazlı yapının oluşması durumunda ortaya çıkan basma ve çekme gerilmeleri sonucunda oluşan çatlak hassastır. Bu yüzden, genellikle tek fazlı borür tabakası tercih edilmektedir. Ancak, tek fazlı tabaka elde etmek için uygulanan ısıtıl

işlem porozite oluşturarak, tabakanın kırılma tokluğu değerlerini etkilemektedir [81]. Bunun yanında kırılma tokluğu, alaşım elementlerine bağlı olarak kaplama tabakası içerisinde  $(Fe,M)_2B$  ve  $(Fe,M)B$  dağılımları ile değişmektedir. Çeliklere Mn ilavesi kırılma tokluğunda bir miktar artışa neden olurken, Cr ilavesi bir miktar düşüşe neden olmaktadır. Aynı zamanda borlama süresi de kırılma tokluğu üzerinde etkilidir [4,87]. Bindal [69], borlama sonucunda elde edilen kaplamaların, bir çok gelişmiş seramikle rekabet edebilecek seviyede olduğunu belirtmektedir.

Borun oksijene karşı afinitesi fazla olduğundan yüzeyde koruyucu ince bir oksit filmi oluşturmakta ve bu oksit filmi yüzeyde yağlayıcı vazifesi görerek sürtünmeli aşınma esnasında sürtünme katsayısını düşürürken yüzeylerin birbirine kaynamasını önlemektedir. Kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı sementede edilmiş tabakanın yumuşamasına neden olurken borlu tabakaya etki etmemektedir [88].

### 3.3.3.8 Borlama işleminin endüstriyel uygulama alanları

Bor kaplanmış malzemeler, göstermiş oldukları üstün özellikler sebebiyle çok geniş bir endüstriyel kullanım alanına sahiptir [13,14]. Özellikle adhesiv ve abrasiv aşınma şartlarında bir çok kullanım alanı mevcut olup, bunlar;

- DIN St 37 çeliğinden üretilen tel çekme aletleri, ringleri ve kovanlarında,
- Tekstil makinalarında kullanılan dökme demir dramlarda
- Su ayar vanalarının dörtlü kavrama besleyicilerinde (AISI 316 Ti çeliğinden),
- Ateşleme nozülleri, girdaplı dönme elemanları ve kimya endüstrisinde petrol yakıtlı makinalarda enjektör başlarında,
- Çeşitli yüksek performanslı tekerlekler ve önemli motorlarda sürme, sonsuz vida ve helesel dişlilerde.

Abrasiv aşınmaya dirençli malzemeler olarak, vidalı sürücüler ve kovanlar, delinmiş veya dar ve küçük açılmış faturalar, makaralar, valf elemanları, şaftlar, tamamlayıcılar, paslanmaz çelik malzemelerden üretilmekte ve ayrıca helikopter

turbin kanatçıkları borlanmış Ti-6Al-4V malzemeden üretilmektedir [13,14]. Bu kategori ile ilgili diğer uygulama alanları şu şekilde sıralanmaktadır;

- Doldurma elemanlarının nozülleri,
- Ekstrüzyon sürücüler, kovanları, nozülleri, plastik üretim makinalarının dönüşümlü akım blokları (ekstrüzyon veya enjeksiyon kalıplı makinalar),
- Plastik endüstrisinde, mineral takviyeli plastik granüllerin yükleme elemanları için kontrol plakaları ve bentleri, dövme kalıpları (arabalar için aksesuar parçaların performanslı olarak üretilmeleri için), basma ve sürme matrisleri, kavrama halkaları (takım çelikleri),
- Pres kalıpları, kesme şablonları, döverek kesme plaka muhafazaları (DIN St37 çeliği)
- Vida ve silindirik dişliler, konik dişliler (AISI 4317 çeliği),
- Seramik tuğla ve kapların kalıplanmasında kullanılan kalıplar, ekstrüzyon kovanları, iticileri ve ringleri (AISI 4140 çeliği)
- Ekstrüzyon tip'leri, geri dönüşümsüz valfler ve silindirler (abrasiv minerallerin ekstrüzyonu veya fiber glas takviyeli plastiklerin ekstrüzyonu için) (AISI 4150 çeliği),
- Demir dışı metallerin döküm besleyicileri (AISI H11 çeliği),
- Linyit kömür briketlerin taşıma levhaları.

Borlanan parçalar, basınçlı döküm kalıpları, blok bükücüler, blok sürücüler, boru klipsleri, presleme şekillendirme sürücüler, çeşitli tipte basınçlı soğuk şekillendirme kafaları, bükme, ekstrüzyon, damgalama, presleme, dövme, çekme, ve germe kafalarında kullanılmaktadır (A2, A6, D2, D6, H10, H11, O2 ve diğer takım çelikleri).

Aynı şekilde bu parçalar, Al, Zn ve Sn alaşımları gibi metallerin sıvı eriyiklerinin taşınmasında da kullanılmaktadır (DIN St 37). Korozyon dirençli taşıma boru sistemleri, örneğin vinil klorür monomerleri, öğütme diskleri (Ck 45) ve basıçlı döküm sistemleri, hava akımlı erozif aşınma gömlekleri, veri yazıcı elemanları (manyetik başlar, tel yazıcılar) bunlara örnek olarak verilebilir.

Borlanmış permalaşım lar manyetik kafalarda kullanılmaktadır. Borlanmış sementit karbürler, tel çekme kalıplarında, yardımcı parçalarda, ve boyutsal ölçüm parçalarında kullanılmaktadır. Çok bileşenli borlamaların kullanım alanlarına örnek olarak, bor-kromlama işleminin ostenitik paslanmaz çeliklerin, bor-krom-titanyumlama ise plastik makinalarının parçalarında aşınma direncini artırması söylenebilir. Borlama işlemine tabi tutulmuş çeşitli demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları Tablo 3.10 'da verilmektedir [13,14].

Tablo 3.10 Borlanma işlemine tabi tutulmuş çeşitli demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları [13,14].

| AISI | Altlık Malzeme |              | Uygulama Alanları                                                                                           |
|------|----------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      | BSI            | DIN          |                                                                                                             |
|      |                | St 37        | Kovanlar, sürgüler, nozüller, taşıma tüpleri, taban plakaları, besleyiciler, bıçaklar ve yardımcı elemanlar |
| 1020 |                | C15, Ck 15   | Dişli sürücüler, pompa şaftları                                                                             |
| 1043 |                | C45          | Pinler, yardımcı kavrayıcılar, aşındırıcı diskler ve sürgüler.                                              |
|      |                | St 50-1      | Döküm akıtcılar, nozüller ve kollar.                                                                        |
| 1138 |                | 45S20        | Şaft koruma parçaları, mandireller.                                                                         |
| 1042 |                | Ck45         | Girdaplı akış elemanları, nozüller (petro yakıtlar için) merdaneler, sürgüler ve kovanlar.                  |
|      |                | C45W3        | Giriş plakaları                                                                                             |
| W1   |                | C60W1        | Kavrama aynası, yardımcı baralar                                                                            |
| D3   |                | X210Cr12     | Kovanlar, basma aletleri, plakalar, mandreller, çekiçler, kalıplar.                                         |
| C2   |                | 115CrV3      | Çekme kalıpları, enjektörler, yataklar, giriş pinleri                                                       |
|      |                | 40CrMnMo7    | Giriş plakaları, bükme kalıpları                                                                            |
| H11  | BH11           | X38CrMoV51   | Vanalar, enjeksiyon silindirleri, çıkıcılar                                                                 |
| H13  |                | X40CrMoV51   | Ağzlar, ingot kalıpları, sıcak dövme için alt ve üst kalıplar, matrisler ve diskler                         |
| H10  |                | X32CrMoV33   | Enjeksiyon kalıplama kalıpları, besleyiciler, sıcak şekillendirme için alt ve üst kalıplar.                 |
| D2   |                | X155CrVMo121 | çekme kalıpları, soğuk haddeleme için merdaneler.                                                           |
|      |                | 105WCr6      | Kalibreli merdaneler                                                                                        |
| D6   |                | X210CrW12    | Sıkıştırma merdaneleri                                                                                      |
| S1   | -BS1           | 60WCrV7      | basma ve çekme matrisleri, mandrelleri, doğrultucuları, kalıpları ve kavrama ringleri.                      |
| D2   |                | X165CrVMo121 | Çekme kalıpları, soğuk hadde için merdaneler.                                                               |
| L6   | BS224          | 56NiCrMo4    | Ekstrüzyon kalıpları, kovanları, döküm ileticiler, dövme kalıpları ve serbest dövme elemanları.             |
|      |                | X45NiCrMo4   | Kalibreli kalıplar, basınç pedleri ve kalıpları.                                                            |

| Altlık Malzeme |                     |               | Uygulama Alanları                                                                                                                             |
|----------------|---------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AISI           | BSI                 | DIN           |                                                                                                                                               |
| O2             | -BO2                | 90MnCrV8      | Kalıplar, bükme kalıpları, basınç takımları, kalibreli merdaneler, kovanlar, çekme kalıpları, yardımcı baralar, diskler, delik açan çekiçler. |
| E52100         |                     | 100Cr6        | Toplar, merdaneler, yardımcı baralar ve yardımcı elemanlar.                                                                                   |
|                |                     | Ni36          | Demir dışı metallerin döküldüğü döküm parçaları.                                                                                              |
|                |                     | X50CrMnNiV229 | Magnetize edilemeyen takımların parçaları(ısıl işlem yapılabilir.).                                                                           |
| 4140           | 708A42<br>(En19C)   | 42CrMo4       | Basma takım ve kalıpları, ekstrüzyon amaçlı vidalı sürücüler, merdaneler, ekstrüzyon baraları, ve geri dönüşsüz valfler.                      |
| 4150           | -708A42<br>(CDS-15) | 50CrMo4       | Taban plakalarının nozülleri.                                                                                                                 |
| 4317           |                     | 17CrNiMo4     | Konik dişliler, vida ve silindir dişliler, şaftlar, zincir bileşenleri                                                                        |
| 5115           |                     | 16MnCr5       | Helesel yatak tekerlekleri, yardımcı baralar, yatak kolonları.                                                                                |
| 6152           |                     | 50CrV4        | Güvenlik plakaları, sürücü parçalar, valf yayları, yay yuvaları.                                                                              |
| 302            | 302S25<br>(En58A)   | X12CrNi188    | Vida yuvaları ve kovanlar.                                                                                                                    |
| 316            | -316S16<br>(EN583)  | X5CrNiMo1810  | Plastik ve kauçuk endüstrisinde kullanılan delinmiş veya fatura açılmış yuvalar.                                                              |
|                |                     | G-10CrNiMo188 | Valf açıcıları, tekstil ve kimya endüstrisi için parçalar.                                                                                    |
| 410            | 410S21<br>(EN56A)   | X10Cr13       | Valf bileşenleri ve besleyiciler.                                                                                                             |
| 420            | 420S45<br>(En56D)   | X40Cr13       | Valf besleyicileri, dalıcı rotlar, besleyiciler, yardımcı ekipmanlar, kimyasal işlemlerde kullanılan parçalar.                                |
|                |                     | X35CrMo17     | Saftlar, valfler, dingiller.                                                                                                                  |
| KGDD           |                     |               | Tekstil makinaları için parçalar, mandreller, kalıplar, kollar.                                                                               |

### 3.3.4 Çok fazlı borlama

Çok fazlı borlama; alüminyum, krom, silisyum, vanadyum ve titanyum gibi elementleri borür tabakası bünyesinde bulunduran termo-kimyasal bir işlemdir. Borlama iki kademeli bir işlem olup, 850-1050°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. 1.kademede, geleneksel yöntemlerden biriyle borlama işlemi yapılmaktadır ve daha çok kutu borlama tercih edilmektedir. FeB fazının oluşumu iyi sonuçlar vermekte ve 30 µm civarındaki kaplamalar yeterli olmaktadır. 2. kademedede, elementin difüzyonu gerçekleştirilmektedir. Boraks esaslı eriyik veya toz

karışımı yardımıyla metalik elementin borlanmış yüzeye difüzyonu sağlanmaktadır. Eğer kutu borlama yöntemi kullanılırsa, ortamdan Ar veya H<sub>2</sub> gazı geçirilerek reaksiyon sırasında sinterleme oluşumuna engel olunabilmektedir. Altı çeşit çok bileşenli borlama türü mevcut olup bunlar, bor-aluminyumlama, bor-silisyumlama, bor-kromlama, bor-krom-titanyumlama, bor-krom-vanadyumlama ve bor-vanadyumlama şeklinde sıralanabilir [13,89,90].

**Bor-Alüminyumlama:** Bor-aluminyumlama, borlama işlemini takiben alüminyumun yüzeye difüzyonuna dayanmaktadır. Bu yöntemle, çelik yüzeyinde kompakt bir tabaka oluşmaktadır ve rutubetli ortamlarda iyi korozyon ve aşınma direncine sahiptir.

**Bor-Silisyumlama:** Bu işlem, kaplama yüzeyinde Fe-Si oluşturulması esasına dayanmaktadır. İşlem gören parçaların yorulmalı korozyon dirençleri artmaktadır.

**Bor-Kromlama:** Borlamayı takiben kromlama işleminin yapıldığı yöntemdir. Bor-kromlama işlemine tabi tutulan malzemeler, bor-aluminyumlamadan daha iyi oksidasyon direnci, krom ve demir borürleri içeren çok homojen kaplama tabakası, geleneksel borlama yöntemlerinden çok daha iyi korozyon ve yorulmalı korozyon direncine sahiptirler. Bu yüzden, çeşitli ısı işlemler, atmosfer kontrolü gerektirmeksizin emniyetle uygulanabilmektedir.

**Bor-Krom-Titanyumlama:** Yapısal alaşımlı çeliklere uygulandığı zaman 5000kg/mm<sup>2</sup> (15gr yük) sertlik değerine ulaşılarak, çok yüksek abrasiv aşınma ve korozyon direnci sağlamaktadır. Oluşan tabakanın en dış kısmında 5000kg/mm<sup>2</sup> sertlik değerine sahip titanyum borür tabakası bulunmakta, daha iç kısımda ise demir-krom borür tabakası yer almaktadır.

**Bor-Vanadyumlama ve Bor-Krom-Vanadyumlama:** Bu işlemlerde 3000kg/mm<sup>2</sup> sertlik değerine ulaşılmasına rağmen, oldukça sünek bir yapı elde edilmektedir. Darbeli yüklemeler karşısında tabakanın kalkması söz konusu olmadığından, bu tür kaplamalar darbeli yükler altındaki uygulamalar için kullanılabilir.

### 3.3.5 Aşınma özellikleri

Aşınma denildiğinde ilk akla gelen, katı cisimlerin yüzeylerinden çeşitli etkenler altında sürekli malzeme kayıplarının ortaya çıkmasıdır. DIN 50320 ve ASTM G40-93 standartlarına göre aşınma; ” kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması neticesinde, mekanik etkenler ile yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu istenmeyen yüzey bozulmasının meydana gelmesi” şeklinde tanımlanmaktadır. Katı cisimlerin yüzeylerinin oksitlerle yada yağlayıcılarla kaplanması durumunda dahi, oksit filminin mekanik yük altında parçalandığı ve yağlayıcının absorpsiyonunun zayıf olduğu yerlerde, yer yer katı-katı teması olmaktadır. Bu temaslar aşınmaya neden olmaktadır [91,92-97].

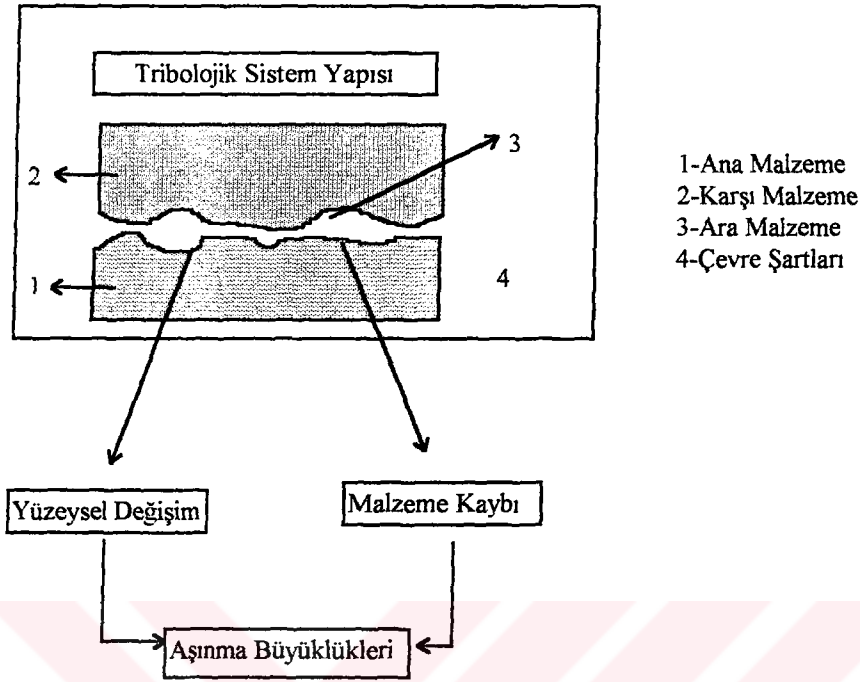
Bir aşınma sisteminde temel unsurlar olarak,

- 1- ana malzeme (aşınan),
- 2- karşı malzeme(aşındıran),
- 3- ara malzeme,
- 4- yük ve
- 5- hareketi

saymak mümkündür. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte tribolojik sistem olarak adlandırılmaktadır ve Şekil 3.16 ‘da böyle bir sistemin şematik olarak gösterilişi verilmektedir [98,99].

### 3.3. 6 Aşınma hasarları

Çeşitli makina ve teçhizatın kullanımı esnasında kırılma kadar tehlikeli bir problem olmasa bile, aşınma çok büyük ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Sanayileşmiş ülkelerde, aşınma nedeniyle Gayri Safi Milli Hasılanın(GSMH) %7’sine eş değer bir harcamanın yapıldığı tahmin edilmektedir [100].

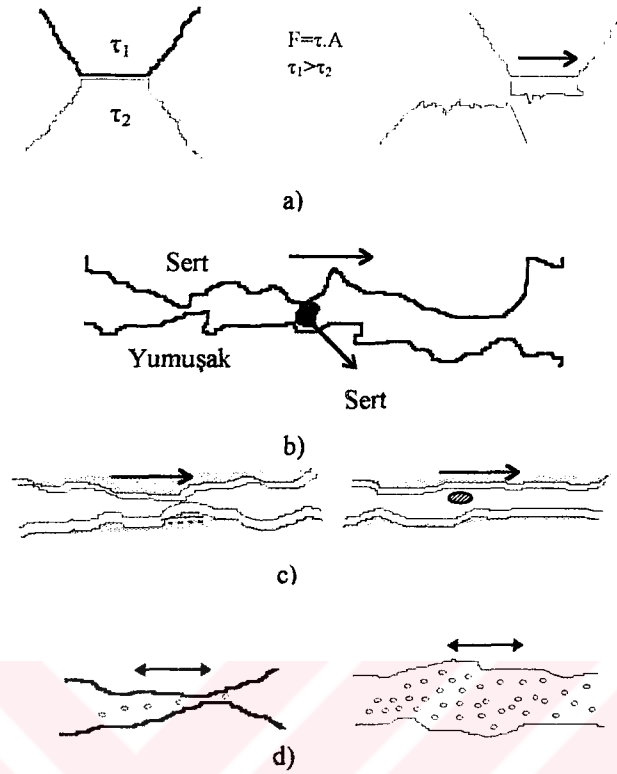


Şekil 3.16 Tribolojik bir sistemin şematik olarak gösterilmesi [98].

Aşınma olayının ilk çağlarda dahi bilinen bir mühendislik olayı olduğu ve ilk çağ insanların yarış arabaları dingillerini domuz yağı ile yağlayıp sürtünmeyi ve dolayısıyla aşınmayı azaltmaya çalıştıkları ifade edilmektedir. Kullanılan alaşım, aşınmanın meydana geldiği ortam şartları ve aşındırıcı ortamın cinsine göre, metaller ve alaşımlarının aşınmasının çok değişik mekanizmalar sonucunda olduğu belirtilmektedir [101]. Holmberg [101] tipik aşınma mekanizmalarını dört ana grupta toplamış ve bunların;

- 1) adhesiv aşınma,
- 2) abrasiv aşınma,
- 3) yorulma aşınması ve
- 4) kimyasal aşınma

şeklinde olduğunu ifade etmiştir. Şematik olarak aşınma mekanizmaları Şekil 3.17 'de gösterilmektedir. Gerçekte temas eden yüzeylerde birden çok aşınma mekanizmasının etkili olduğu da belirtilmektedir [101].



Şekil 3.17 Aşınmanın temel mekanizmaları, (a) adhesiv aşınma, (b) abrasiv aşınma, (c) yorulmalı aşınma ve (d) kimyasal aşınma [101].

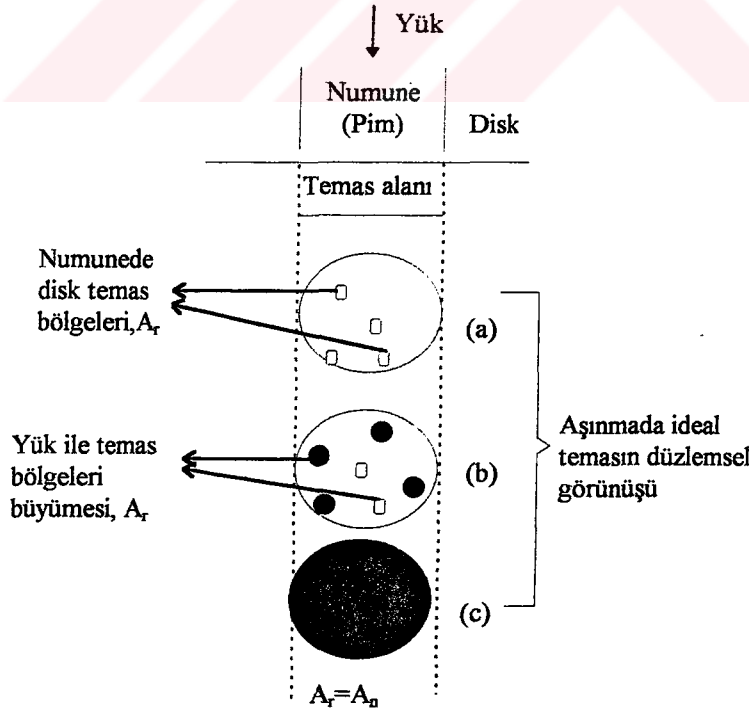
### 3.3.6.1 Adhesiv aşınma

Temas halinde olan iki yüzeyin üzerinde bulunan pürüzlülüklerin bir araya gelmesi durumunda bu pürüzlülükler birbirlerine kuvvetlice bağlanmakta ve kaynamaktadır (Şekil 3.17a). Yüzeylerin birbirleri üzerinde yatay hareketleri, daha yumuşak olan malzemenin yüzey pürüzlülüklerinde dağılmalara ve malzemenin kalkmasına sebep olmaktadır. Adhesiv aşınmada, koruyucu yüzey filmleri veya yüzeyde bulunan yabancı maddeler, malzeme yüzeyinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Adhesiv aşınma teorisi Jahanmir tarafından şu şekilde kritize edilmektedir;

- empüriteler ve boşluklar sebebiyle arayüzey ana malzemedan muhtemelen farklıdır ve daha mukavemetlidir,
- sık sık görülen sert yüzeyin aşınması,
- yüzey pürüzlülüğünün görünür etkisi ve
- kaybolan aşınma parçacıklarının oluşumu şeklinde açıklanamamaktadır,

- aşınma parçacıklarının oluşması için gerekli olan enerji, gerçekte bu parçacıkların oluşturulması için gerekli olan enerjinin yaklaşık olarak 2/3 'ü kadardır,
- sürtünme ile aşınma arasındaki ilişki açıklanamamaktadır,
- mikroyapı ve metalurjik parametreler hesaba katılmamaktadır.

Şekil 3.18 'de disk üzerinde pim yöntemi ile yapılan aşınma deneyinde, numunenin ideal bir aşınma davranışı gösterdiği özetlenmektedir. Şekilde gösterildiği gibi, metal yüzeyleri birbirine temas ettirildiğinde gerçek temas alanı  $A_r$ , genelde çok küçüktür. Gerçek temas alanlarındaki yüksek bölgesel basınç, hareketsiz durumda bile yüzeyler arasındaki metalik temas alanlarını bir anlamda dövme ile birleştirmektedir. Temas yüzeyleri arasında hareket meydana geldiği anda gerçek temas alanı  $A_r$ , nominal temas alanı  $A_n$ 'ye eşit oluncaya kadar büyümeye devam etmektedir. Plastik olarak bölgesel hasarın, büyük miktardaki kütleli akışın ve metalik transfer gibi etkilerin, adhesiv aşınmanın temelini oluşturduğu belirtilmektedir [102].



Şekil 3.18 Adhesiv aşınmada yapışma mekanizmasının ideal bir modeli. (a) normal yük altında plastik olarak deforme olan temas alanları,  $A_r$ ; (b) normal yükün artması ve sürtünme kuvvetlerinin devreye girmesi ile temas alanlarının büyümesi; (c) gerçek temas alanı  $A_r$  'nin nominal temas alanı  $A_n$  'ya ulaşması ile yapışmanın meydana gelmesi [102].

### 3.3.6.2 Abrasiv aşınma

Şekil 3.17b 'de görüldüğü, abrasiv aşınma plastik deformasyonla gerçekleşmektedir. Abrasiv aşınma birbirlerine göre sertlik değerleri farklı olan malzemeler arasında yumuşak bir yüzeye çok sert partiküllerin teması ile gerçekleşmektedir. Pürüzlü sert yüzey, yumuşak malzemenin yüzeyine temas ettiği zaman, yumuşak malzemenin yüzeyinde sert malzemenin temas ettiği bölgelerin etrafında plastik akış meydana gelmektedir. Sert yüzey yatay olarak hareket ettiği zaman yumuşak malzemenin yüzeyinin kazınması sonucu derin çizikler oluşmaktadır [101].

Abrasiv aşınma, çok hızlı bir şekilde gelişerek çok yüksek aşınma hızına sahip olan ve sistemin hasarına sebep olacak şekilde etkisini anında gösteren bir aşınma türüdür. Abrasiv aşınmanın etkisi, sert partikülün, yumuşak malzemenin yüzeyinden parça kopartarak uzaklaştırmasıyla olur ve bu kopma sırasında yapışma olmaz. Yüzeyden malzeme kaybının çok hızlı geliştiği ve yumuşak malzemenin üzerinde belirgin çizikler şeklinde ortaya çıktığı bir aşınma mekanizmasıdır.

Genel olarak abrasiv aşınma türleri üç ana grupta toplanmaktadır. Bunlar; oymalı sürtünme aşınması, öğütmeli sürtünme aşınması ve erozyondur. Karakteristik açıdan bu aşınma türleri birbirlerine benzemelerine rağmen, tek tek incelendikleri zaman önemli farklılıkların mevcut olduğu görülmektedir.

Oymalı sürtünme aşınması, kütleli bir şekilde yüzeyin deformasyonu sonucunda oluşan bir aşınma türü olup aşırı yüklemeler etkisi ile meydana gelmektedir. Bu tür aşınmaya örnek olarak, ağır koşullar altında çalışan kazıcı, kırıcı gibi maden araçlarında görülen aşınmalar verilebilir.

Öğütmeli sürtünme aşınması, iki yüzeyin birbiri üzerinde hareket etmesi sonucunda ortaya çıkmakta ve arayüzeyde aşınmadan kaynaklanan parçacıklar bulunmaktadır. Bu arayüzeyde yer alan taneler ya bir yüzeyden aşınarak gelir, yada her iki yüzeyin birlikte aşınması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu aşınmada, keskin köşelere sahip taneler yük uygulanması durumunda malzeme yüzeyini kazıma veya kaldırmak

suretiyle, kopararak hasara neden olmaktadır. Örnek olarak bilyalı değirmenler gösterilebilir.

Erozif aşınma ise, sıvı veya hava gibi akışkan bir ortam vasıtasıyla aşındırıcı tozların malzeme yüzeyine etki etmesiyle gerçekleşmektedir. Her bir temas, malzeme yüzeyinden küçük bir parçanın kaybına neden olmaktadır. Normal şartlar altında aşınma hızı düşüktür. Ancak yüksek sıcaklıklarda malzemenin akma dayanımının düşmesi sebebiyle erozif aşınma hız kazanmaktadır. Hatta bazı şartlarda, malzemenin yüzeyinin her tarafını korozyon ürünleri kaplayabilmektedir. Buna erozyonun korozyon etkisi de denilmektedir. Örnek olarak gemi pervaneleri verilebilir [94,97].

Bir malzemenin diğer bir malzeme tarafından önemli ölçüde abrasiv aşınmaya uğratılabilmesi için, ikinci malzemeden çok daha yumuşak olması gerekmektedir. Bu sebeple, abrasiv aşınmayı minimuma indirmek için, aşınmaya uğrayan malzemenin diğer malzemeye göre çok daha sert olması istenmektedir. Bu özellik, değişik metodlarla sağlanabilmektedir. Bunlar; a) alaşımlama, b) ısıtma işlemi ve c) malzemelerin yüzeylerine dışarıdan müdahale ederek sert yüzey tabakası oluşturmak suretiyle malzemelerin yüzey sertliği artırılabilir. Sert yüzey oluşturmak için, anodizasyon, elektro-kaplama, alev püskürtme, nitrasyon, plazma sprej, borlama ve bunun gibi bir çok yöntem kullanılmaktadır. Malzemelere uygulanan çoğu yüzey işlemi, aşınmayı azaltmak veya sınırlandırmak amacıyla yapılmaktadır [97].

### 3.3.6.3 Yorulma aşınması

Yorulma aşınması, metal yüzeyinin yorulması sonucu ortaya çıkan bir hasardır. Oldukça düşük gerilmeler ve yüksek hız altında yapılan uygulamalarda metal yüzeyinde oyuklara benzer bir çok boşluk meydana gelmektedir. Yüzeyin yorulma aşınması normal yorulmaya nazaran bazı farklılıklar içermektedir. Birinci farklılık olarak, yüzey yorulmasının, kütleli yorulmaya göre yorulma dayanım sınırını göstermemesi söylenebilir. Yapılan çalışmalarda geleneksel yorulma testlerinden belirlenen sonuçlardan oldukça farklı özellikler ortaya çıktığını göstermektedir.

Oldukça yüksek gerilmelere sahip olan yatakların dizayn edilmesi sırasında, yüzeysel yorulma yokmuş gibi düşünülerek işlem yapmak zordur [97].

Klasik yüzey yorulma aşınması, makaralı, bilyeli yataklar ve birbirine temas eden dişlilerde kullanım ömrünü azaltmaktadır. Yüzeyin hemen altında, maksimum Hertz gerilmesine ulaşıldığı zaman, boşluk veya dislokasyonların yoğunlaştığı bölgelerde çatlaklar inklüzyon köşeleriyle birleşerek hızla ilerlemektedir [101]. Yorulma aşınması, malzeme yüzeyinde 0.5 mm boyutuna varan büyüklüklerde oyuklanmaların oluşmasına ve yüzeyin hızla hasara uğramasına neden olmaktadır [97].

Kazıma, birbiri üzerinde hızla hareket eden iki pürüzlü yüzeyin temas ettiği noktalarda, çok küçük boyutlarda meydana gelen bir tür yorulma aşınmasıdır. Temas bölgesinin hemen altında üç boyutlu basma gerilmeleri sonucunda yüzeye çok yakın bir bölgede oluşmaktadır. Aşınma sırasında uygulanan yük ve deformasyon sayesinde çatlaklar yüzeye paralel olarak büyüyerek ve belirli bir mesafeyi kat ederek gelişmektedir. Genel olarak, bu tür aşınmalar geniş bir alanı kapsamaktadır[97].

#### **3.3.6.4 Kimyasal aşınma**

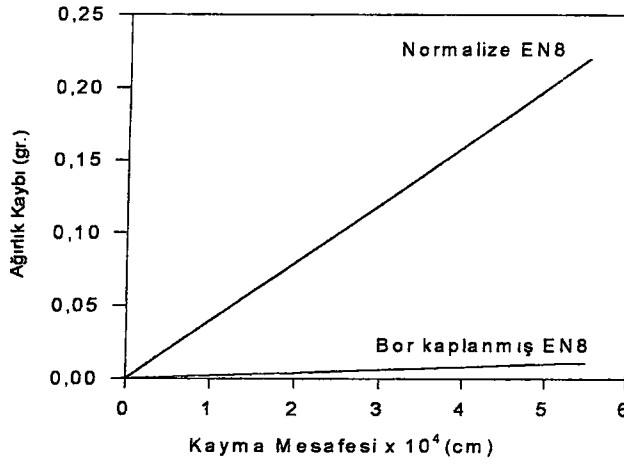
Kimyasal aşınmada, birbirine temas eden yüzeyler hava ile reaksiyona girerek, aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları meydana getirmektedirler. Bununla beraber, kimyasal maddelerin mevcut olduğu ortamlarda kullanılan makina parçalarının yüzeyleri, bu maddelerle reaksiyona girerek ince fakat sert tabakalar oluşturmaktadır. Değişken yük altında bu sert tabakalar kırılmakta ve oluşan sert parçacıklar aşınmaya neden olmaktadır (Şekil 3.17d). Temiz kalan temas yüzeylerinde ise reaksiyon sonucu sürekli sert tabakalar oluşur ve yeniden kırılır. Olay bu şekilde devam eder [101].

### 3.4 Bor Kaplamaların Aşınma Özellikleri

Bor kaplamalar, oldukça sert kaplamalardır ve yüksek aşınma direncine ihtiyaç duyulan yerlerde, yani tribolojik uygulamalarda kullanılmaktadır. Bor kaplamaların temas halinde sürtünme katsayıları genel olarak oldukça yüksektir. Tribolojik uygulamalarda en çok kullanılan bor kaplamalar, demir borür ve titanyum diborür kaplamalardır. Demir borür kaplamalar, çok düşük aşınma ve yüksek sürtünme direncini bir arada bulunduran ilginç tribolojik özelliğe sahip malzemeler olmaları sebebiyle fren sistemlerinde kullanılabilmektedirler [101].

CVD yöntemiyle demir borür kaplanmış çeliklerin birbiri üzerinde hareket etmeleri sonucunda son derece iyi kayma aşınma davranışı gösterdikleri görülmektedir. 1980 yılında Habig ve arkadaşları [103] tarafından CVD kaplanmış FeB, TiN, TiC ve krom karbürlerin birbirleri üzerinde kaymaları neticesinde tribolojik özellikleri kıyaslanmış ve demir borür kaplamaların çok çok düşük aşınma hızı gösterdikleri tesbit edilmiştir. Ayrıca demir borürlerin TiN ve TiC 'e göre bir kat, CrC 'e göre iki kat daha düşük aşınma hızına sahip oldukları görülmüştür. Ancak demir borürün sürtünme katsayısı çok düşük değildir (0.38-0.63). TiN için sürtünme katsayısı 0.19 iken TiC için 0.13 değerine sahiptir.

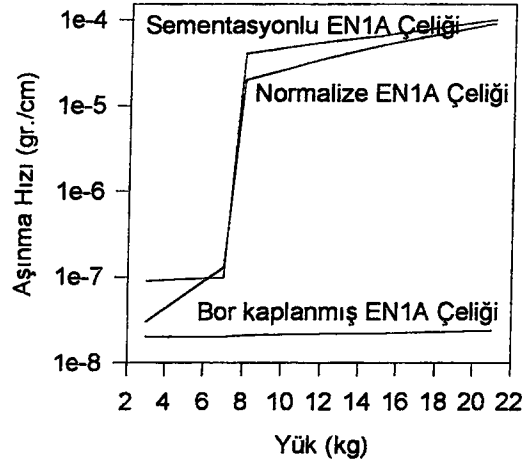
Literatürde, borlanmış çelikler üzerinde bir çok aşınma deneyinin yapıldığı belirtilirken, dökme demirlerin borlanması ve aşınma karakteristikleri hakkında yapılan çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Eyre [104], bazı çelikleri karbürleme ve borlama, gri dökme demiri ise borlama işlemine tabi tutarak, bu malzemelerin aşınma davranışlarını incelemiştir. Normalize edilmiş EN8 malzemesinin 8.5 kg yük altında 1800m 'lik mesafede yapılan aşınma deneyinde, metalik aşınmanın meydana geldiğini ve borlanmış EN8 malzemenin aşınma miktarı ihmal edilebilir seviyede olduğunu tesbit etmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 Normalize edilmiş ve borlanmış EN8 çeliğinin 8.5 kg. yük altındaki aşınma davranışı [104].

Aynı zamanda sementle edilmiş, normalize edilmiş ve bor kaplanmış EN1A çeliğinin aşınma özellikleri Şekil 3.20 'de verilmektedir. Şekilde, normalize ve sementle edilmiş EN1A çelikleri, yüke bağlı olarak düşük yüklerde hızlı metalik aşınma sergilemesine rağmen, bor kaplanmış çelik hızlı bir aşınma davranışı göstermemektedir. Eyre yapmış olduğu bu çalışmada, EN1A ve EN8 çeliklerinin bor kaplanması sonucunda aşınma davranışlarının birbirine çok benzediğini (Şekil 3.19 ve 3.20) ve bor kaplanmış gri dökme demirin aşınma davranışının yanında daha dağınık davranışlı ve kısa ömürlü olduğunu belirtmektedir. Fakat borlanmış dökme demirlerin ömürleri borlanmış çeliklere oldukça yakındır [104].

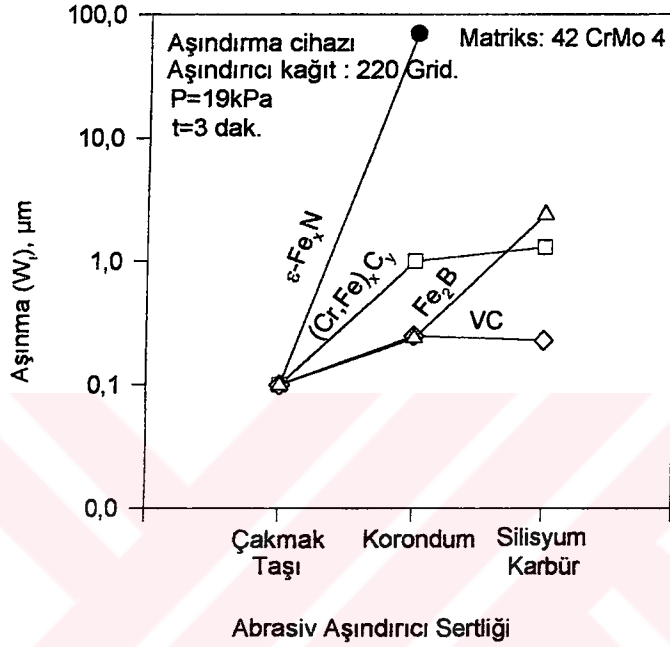
Eyre yapmış olduğu çalışmalarda, yüksek sıcaklıklarda dahi, borlanmış malzemenin sementasyon ve normalizasyon işlemine tabi tutulmuş malzemeye göre özelliklerini koruduğunu, ayrıca bütün şartlarda adhesiv aşınmaya karşı mükemmel sonuçlar verdiğini belirtmektedir. Aynı şekilde, bor kaplanmış gri dökme demir malzemelerin, sürtünme katsayılarının çeliklere göre daha düşük olarak tesbit edildiğini de söylemektedir [104].



Şekil 3.20 Normalize edilmiş, sementasyona tabi tutulmuş ve bor kaplanmış EN1A çeliğinin aşınma davranışı [104].

Habig [103], farklı yöntemler kullanılarak elde edilen birçok kaplamanın adhesiv ve abrasiv aşınma davranışlarını kıyaslamaktadır. Bu araştırmalar neticesinde, yüzey pürüzlülüğünün ve kaplama sertliğinin adhesiv aşınma için çok önemli olduğunu belirtmektedir. CVD yöntemiyle kaplanmış  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{TiC}$  ve  $\text{W}_2\text{C-Ni}$  ile termo-kimyasal olarak kaplanmış malzemelerde üretilen sert borürlerle, daha yumuşak olan nitrokarbürlerin pürüzlülüğünden daha az etkilendikleri ve aşınma hızlarının çok daha düşük olduğu görülmektedir. Habig, AISI 4140, AISI D21 ve AISI M2 çelikleri üzerinde yapmış olduğu çalışmalarda termo-kimyasal yöntem kullanılarak maksimum 20-30  $\mu\text{m}$ , ancak demir esaslı malzemelerin bor kaplanmasında oldukça yüksek tabaka kalınlığı elde edilebildiğini belirtmektedir. Habig, abrasiv aşınma deneylerinde, kaplamaların sertliğine bağlı olarak aşındırıcı malzemenin sertliğinin yüksek olması durumunda aşınmanın da o derece yüksek olacağını söylemektedir. Termo-kimyasal olarak yapılan  $\epsilon\text{-Fe}_x\text{N}$ ,  $(\text{Cr,Fe})_x\text{C}_y$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$  ve VC kaplamaların aşınma davranışları Şekil 3.21 'de verilmektedir. Şekilde bor kaplamalar ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ),  $\epsilon\text{-Fe}_x\text{N}$ ,  $(\text{Cr,Fe})_x\text{C}_y$  kaplamalara göre flint ve korundum karşısında çok daha yüksek aşınma direncine sahip iken, silisyum karbürü karşı yapılan deneylerde belirgin bir şekilde aşınmaktadır. Bu kaplamalar arasında en iyi sonucu VC sergilemektedir. Habig,

CVD, PVD ve termo-kimyasal yöntemlerle oluşturulan VC ve  $\text{Fe}_2\text{B}$  kaplamaların çok iyi abrasiv aşınma direncine sahip olduğunu da belirtmektedir [103].



Şekil 3.21 Termo-kimyasal yöntemlerle kaplanmış çeliklerin abrasiv aşınma davranışları [103].

Biddulph [105], bor kaplanmış orta karbonlu çeliğin, işlem görmeyen orta karbonlu çeliğe nazaran tarım aletlerinde erozif şartlarda kullanımı sonucunda çok büyük avantajlar sergilediğini belirtmektedir.

Singhal [106], bor kaplamaların çok sert, aynı zamanda erozif ve abrasiv şartlarda çok yüksek aşınma direncine sahip olduğunu belirtmektedir. Formanek [107], plazma sprej yöntemiyle oluşturulan borür tabakalarının, mikroyapı, aşınma ve erozyon testleri sonucunda,  $\text{Fe}_2\text{B}$  tabakasının oldukça yüksek erozyon direncine sahip olduğunu söylemektedir.

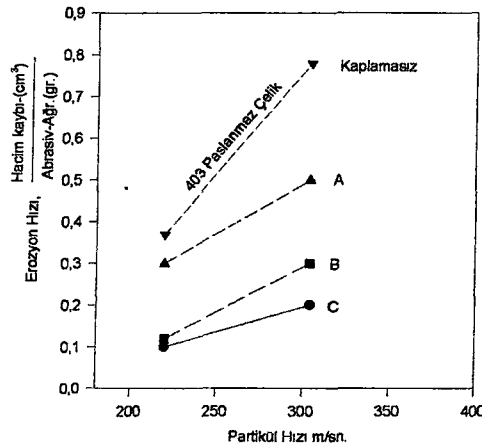
Freske ve arkadaşları [108] ile Erdemir [109] iyon biriktirme tekniğiyle M50 çeliği üzerinde demir borür fazlarını oluşturarak aynı çeliğe karşı aşınma özelliklerini

incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, tavlama işlemi sonrasında ve nisbeten nemli ortamlarda sürtünme katsayısının önemli ölçüde düştüğü belirtilmektedir.

Erdemir ve arkadaşları, bor kaplanmış malzemeler üzerinde yapmış oldukları çalışmalarda, kaplama yüzeyinde  $B_2O_3$  oluşturarak ortamın rutubeti ile bu fazın  $H_3BO_3$  şeklinde dönüşüm gösterdiğini [110] ve bu sayede sürtünme katsayısının yaklaşık olarak 0.07 değerlerine düşürüldüğünü belirtmektedir [111].

Qureshi ve Tabakoff [112], bor kaplama işlem parametrelerinin kaplama sertliğini ve erozyon direncini etkilediğini belirtmektedirler. İşlem parametrelerine bağlı olarak iki ayrı bor kaplama arasında erozyon direncinde üç kat artış olduğunu gözlemiştir. Qureshi ve Tabakoff'un AISI 403 paslanmaz çelik üzerinde yaptıkları çalışmada, işlem parametrelerine bağlı olarak bor kaplamaların erozif aşınma davranışları Şekil 3.22 'de verilmektedir.

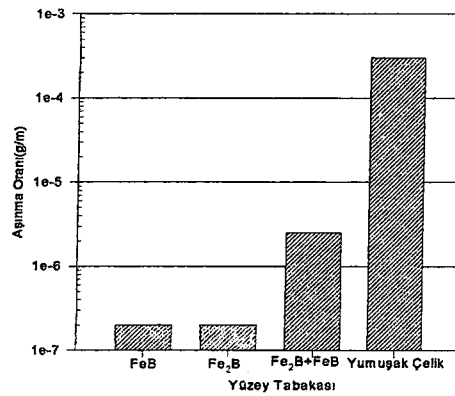
Howard ve arkadaşları [113], orta karbonlu çelikler üzerinde yapılan borlama işlemi sonrasında yapmış oldukları aşınma deneylerinde orta karbonlu çeliklerin işleme sokulmayan malzemelere göre oldukça yüksek aşınma direnci sergilediklerini belirtmektedirler. Ayrıca belirli takım çeliklerinin servis şartlarındaki ömürlerini de önemli ölçüde artırdıklarını açıklamaktadırlar.



Şekil 3.22 403 paslanmaz çeliğe uygulanan bor kaplamaların erozif aşınma hızları[112].

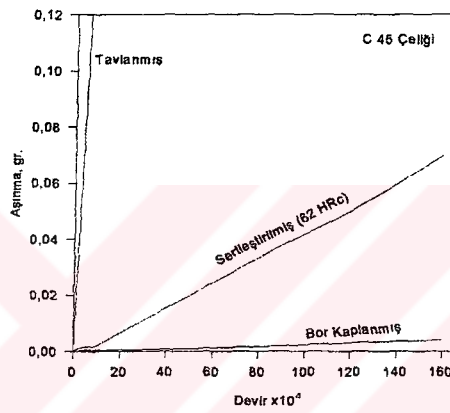
Venkataraman ve Sundararajan [114], 1.15 ve 2.10MPa gerilme altında yapmış oldukları aşınma deneylerinde borlanmış ve borlanmamış çeliklerin düşük aşınma hızlarında, sürtünme katsayılarının birbirine yakın olduğunu belirtmektedirler. Ancak artan sürtünme hızlarına bağlı olarak sürtünme katsayısı değerlerinde önemli ölçüde azalma görülmektedir. Aşınma hızları açısından ise borlanmış çeliklerin, borlanmamış çeliklere nazaran önemli ölçüde düşük aşınma hızlarına sahip oldukları belirtilmektedir. Ancak, aşınma hızlarının uygulanan yüke önemli ölçüde bağlı olduğu da söylenmektedir.

Subrahmanyam [115] ve Takeuchi [116], homojen olmayan mikroyapılarından dolayı iki fazlı tabakaların aşınma dayanımlarının daha kötü olduklarını ve yine yüzey tabakalarına bağlı olarak aşınma mekanizmalarının farklılıklar gösterdiğini söylemektedir. iki fazlı tabakalarda, transfer partiküllerinin oksitlenmesi ile birlikte adhesiv aşınma, tek fazlı FeB borür tabakasında ve alt tabakalarda, hem oksidasyonlu aşınma hemde abrasiv aşınmanın olduğunu, tek fazlı Fe<sub>2</sub>B tabakasında ise yalnızca oksidasyonlu yorulma aşınmasının gözlemlendiğini belirtmektedir. Şekil 3.23 'de borür tabakasının içerdiği faz dağılımlarına göre aşınma davranışı gösterilmektedir.



Şekil 3.23 Yumuşak çelik yüzeylerine ve farklı borür fazı içeren yüzey tabakalarına ait aşınma oranları (Pv=39 MPa.m/sn.) [115].

Çeşitli işlemlere tabi tutulan Ck 45 çeliği üzerinde yapılan abrasiv aşınma sonucunda elde edilen sonuçlar, Şekil 3.24 'de gösterilmektedir. Borür tabakasının yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısının bir kombinasyonu olarak adhesiv, tribo oksidasyon, abrasiv ve yüzeysel yorulma gibi aşınma özelliklerinin üzerine başarılı etkileri vardır [13].



Şekil 3.24 Çeşitli işlemlere tabi tutulan C 45 çeliğinin aşınma testi sonucunda elde edilen abrasiv aşınma davranışları [13].

### 3.5. Kırılma Tokluğu

Özellikle cam seramik ve gevrek malzemeler için uygulanan “Vickers Indentasyon Kırılma Tokluğu” deneyi çok yaygın olarak kullanılmaktadır ve birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlar şu şekilde sıralanabilir;

- Diğer kırılma tokluğu testlerine müsait olmayan çok küçük numuneler kullanılabilir.
- Numune hazırlama nisbeten basittir ve sadece bir parlak yüzey yeterlidir.
- Kolay bir şekilde oluşan çatlağın boyu optik olarak ölçülebilmektedir.
- İşlem hem hızlı, hem de ekonomiktir.

Bu tekniğin sağlamış olduğu avantajların yanında bazı komplikasyonları da mevcuttur. Bunlar;

- a) Ölçülen çatlak uzunluğunun hassasiyet derecesine bağlı olarak tokluk değerlerinde değişimler olmaktadır,
- b) Literatürde bulunan indentasyonla kırılma tokluğu değerleri farklılıklar göstermektedir,
- c) Literatürde verilen tüm indentasyon modellerinin numunenin gerçek özelliklerini yansıtmada şüpheler mevcuttur [117],
- d) Oluşan çatlak boyutlarının ideal olduğu kabul edilmektedir,
- e) Tek kenar çentikli numune deneyi gibi geleneksel metodlarla ölçülen kırılma tokluğu ile bir malzemede indentasyon kırılma toklukları arasında zıtlıklar şeklinde sıralanabilir.

İndentasyon deneyi ile kırılma tokluğunun ölçümü ilk defa 1957 yılında Palmuquist tarafından WC+Co gibi sermet malzemelere uygulanmıştır. 1977 yılında Lawn ve arkadaşları tarafından bu deney daha da geliştirilmiştir[120].

Palmuquistun kullanmış olduğu kırılma tokluğu formülü Eşitlik 3.16 'da verilmiştir.

$$A = 0.0649.(P_k) \left( \frac{P_k}{H_v} \right)^{1/2} \quad (3.16)$$

Burada,

A: Çatlak oluşturmak için gerekli kritik iş,

$H_v$ : Sertlik (HV,  $\text{kg/mm}^2$ )

$P_k$  : Çatlak başlangıç yükü'nü

göstermektedir.

Daha sonraki araştırmalarda indentasyon tekniği ile kırılma tokluğu ölçmek için çok sayıda bağıntı geliştirilmiştir [69].

## **BÖLÜM 4**

### **DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

#### **4.1 Giriş**

Demir esaslı malzemelerin termo-kimyasal olarak borlanması üzerine bir çok çalışma yapılmış ve son 30 yıl içerisinde bu çalışmalar oldukça hızlanmıştır. Araştırmalar neticesinde elde edilen sonuçları kullanarak birçok gelişmiş ülke, borlama işlemini sanayilerine aktarmıştır. Borlama işlemi endüstriyel olarak daha çok çelikler üzerine uygulanmaktadır. Birçok çelik grubu üzerinde de detaylı araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Ancak, dökme demirler üzerinde yapılan araştırmalar oldukça sınırlıdır ve az sayıda çalışma yapılmıştır.

Ülkemiz bor rezervi açısından dünyada birinci sırayı almaktadır [5]. Ancak bor ürünlerinin üretimi çok az olup, çoğunluğu yurt dışından gelmektedir. Ülkemizde üretilen bor bileşiklerinden yararlanarak, çeliklerin ve dökme demirlerin ortak özelliklerini bir arada bulunduran, küresel grafitli dökme demirlerin yüzeylerinin termo-kimyasal olarak bor kaplanabilirliği, hem dökme demirlerin bor kaplama özelliklerinin araştırılması ve hem de ülkemizde üretilen bor bileşiklerinin değerlendirilmesi açısından önem arz etmektedir. Ayrıca, uygulamaya henüz girmemiş olan borlama işleminin, ülkemiz sanayinde uygulanabilirliği konusuna da bir ışık tutacaktır. Literatür taramalarında, sınırlı da olsa küresel grafitli dökme demirlerin borlanabildiği ve bu malzemelerin kullanım alanlarının bulunduğu görülmektedir [13].

Bölüm 3 'de geniş olarak sunulduğu gibi, borlama işleminin malzemelerin aşınma dirençlerini artırmasının yanı sıra korozyon dirençlerini de artırdığı görülmektedir.

Ayrıca, malzemenin yüzey sertlikleri ve yorulma dayanımı gibi mekanik özelliklerinin artmasında da rol oynadığı bilinmektedir.

Metalik malzemelerin termo-kimyasal olarak borlanması, malzemenin cinsine ve kimyasal bileşimine bağlı olarak oluşan borür tabakasının morfolojisi, kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri değişebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, termo-kimyasal olarak borlanan küresel grafitli dökme demirlerin; mikroyapı ve kimyasal bileşim, oluşan borür tabakasının morfolojisi ve mekanik özellikleri üzerine etkisini araştırmaktır. Bu amaçla kullanılacak malzemeler için bileşimler, GGG-50 (çoğunlukla ferritik), GGG-60 (ağırlıklı olarak perlitik yapılı, ferrit+perlit) ve GGG-80 (perlitik) olacak şekilde seçilmiş ve benzer şartlarda borlamanın mukayeseli olarak bu küresel grafitli dökme demirler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Küresel grafitli dökme demirlerde matris yapısını belirleyici element olarak bakır kullanılmıştır. Çeliklerle kıyaslandığında, literatürde küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ile ilgili oldukça sınırlı sayıda araştırma mevcut olup, kapsamlı araştırmalar henüz yapılmamıştır.

Bu çalışmada DÖKTAŞ A.Ş. tarafından üretilen DIN 1693 normuna uygun GGG-50, GGG-60 ve GGG-80 türü küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve borür tabakalarının kalınlıkları, morfolojileri, sertlikleri, kırılma toklukları ve aşınma özellikleri; optik mikroskop, mikrosertlik cihazı, x-ışınları difraktometresi, taramalı elektron mikroskopu(SEM) ve disk üzerinde bilya aşınma cihazı kullanılarak incelenmiştir.

Çalışmada öncelikle bahsi geçen küresel grafitli dökme demirlerin keel blok şeklinde dökümü gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu bloklardan numuneler çıkartılarak yüzeyler metalografik olarak parlatılmıştır. Borlama banyosu olarak boraks, borik asit, ferro-silis ve alüminyumdan oluşan bileşim kullanılmıştır. Borlama işlemi, 850 ve 950°C sıcaklıklarda, 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerde gerçekleştirilmiştir. Borlanan malzemeler metalografik olarak hazırlanarak mikroyapı, mikrosertlik ve kırılma tokluğu incelemeleri yapılmıştır. Aynı şekilde,

hazırlanan malzemelerden taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile geri saçılan elektronlara dayalı incelemeler (SEM-BEI), çizgisel ve elementel analizler gerçekleştirilmiştir. Borür tabakasının içermiş olduğu fazları belirlemek için numunenin borlanmış olan yüzeyinden x-ışınları difraksiyonları alınarak faz analizleri yapılmıştır. Ayrıca borlanmış ve döküm haliyle GGG-80 numuneler üzerinde 2, 5 ve 10 N yükler altında 200 devir/dak. hızda 5000 devir mesafede aşınma deneyleri gerçekleştirilmiş ve hacimsel olarak aşınma değerleri ile sürtünme katsayıları belirlenmiştir.

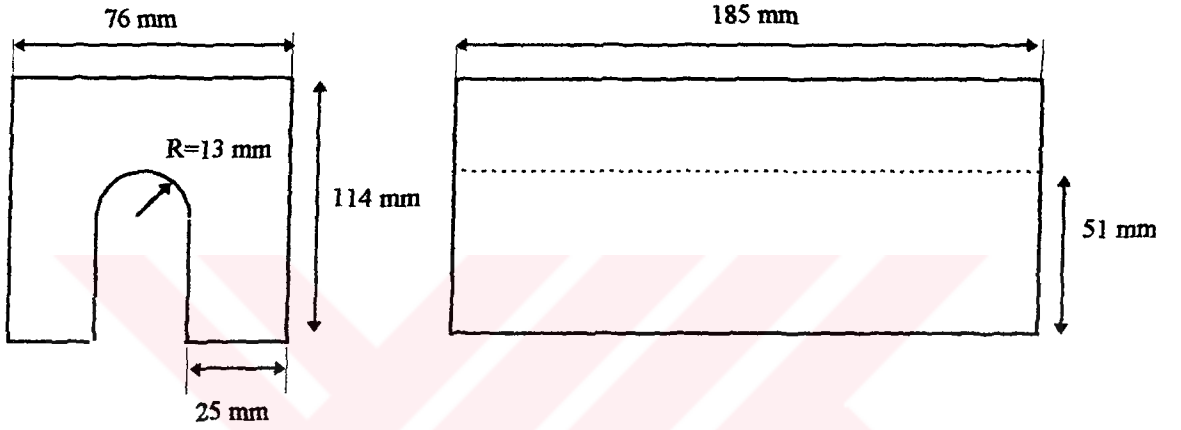
## 4.2 Deneysel Çalışmalar

### 4.2.1 Döküm İşlemi

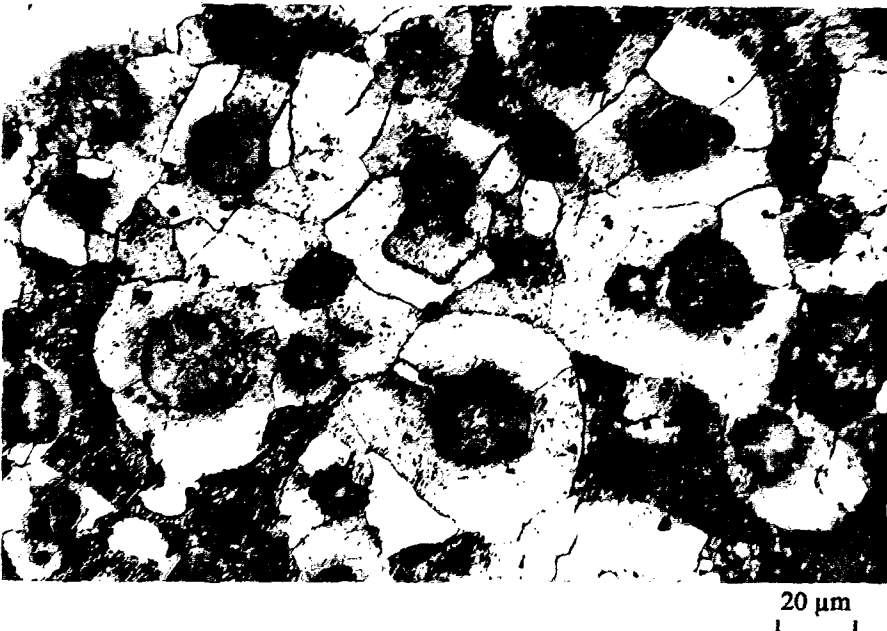
Deneylerde kullanılan küresel grafitli dökme demir malzemeler, DÖKTAŞ A.Ş. tarafından DIN 1693 normlarına uygun olarak GGG-50, GGG-60 ve GGG-80 sınıflarında, keel bloklar şeklinde üretilmiştir. Döküm için ark ocağında hazırlanan ergimiş haldeki dökme demir, transfer potasına alınarak, daha önceden hazırlanan ve içerisinde 11 kg FeSiMg ve 2 kg FeSi bulunan Mg işlem potasına boşaltılmıştır. Daha sonra döküm potasına boşaltılan malzemeye 5 kg FeSi ilave edilmiştir. Kuru maça kalıplar içerisine 20 gr inokülant-90 ilave edilerek standart keel blok malzemeler dökülmüştür (Şekil 4.1). Döküm işlemi, her bir keel blok için ortalama 1 dakika sürmüştür. Blokların döküm sıcaklıkları 1370°C ve dökümün tamamlanması sırasındaki sıcaklık ise 1270 °C olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada, dökümler sırasıyla A, B ve C serisi olarak kodlanmıştır. Dökümlerin kimyasal analizleri, Thermo Jarrell ASH-BAIRD Corp. DV-6S 3063A marka spektral analiz cihazında gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan dökümlerin kimyasal bileşimleri Tablo 4.1 'de verilmektedir. Ayrıca Şekil 4.2-4.4 'de hazırlanan dökümlerin mikroyapıları görülmektedir.

Tablo 4.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan küresel grafitli dökme demir malzemelerin kimyasal bileşimleri

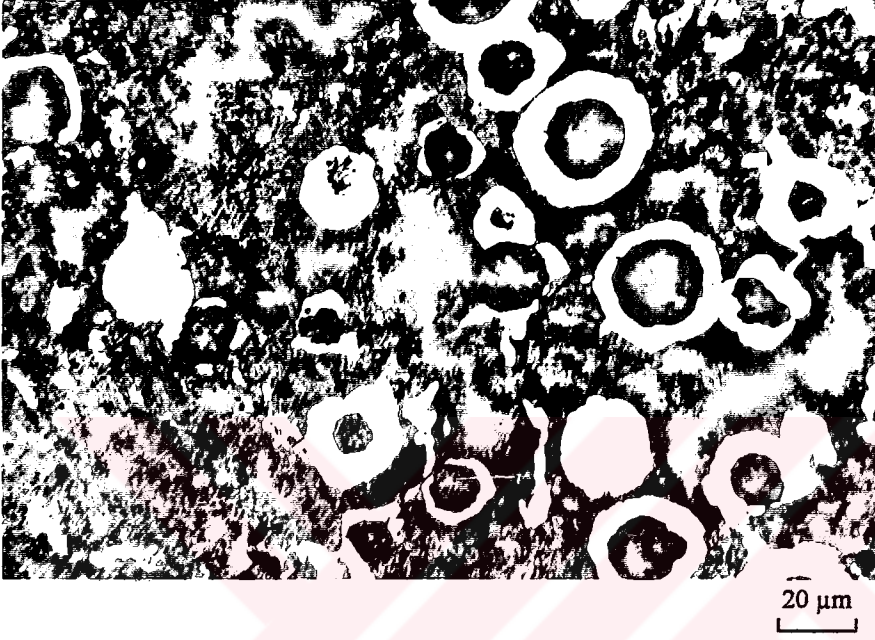
| Döküm Kodu | Kimyasal Bileşim (% Ağırlıkça) |      |      |       |       |       |        |        |       |
|------------|--------------------------------|------|------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
|            | C                              | Si   | Mn   | P     | S     | Cr    | Cu     | Sn     | Mg    |
| A(GGG-50)  | 3.78                           | 2.46 | 0.32 | 0.038 | 0.065 | 0.031 | 0.0089 | 0.0042 | 0.050 |
| B(GGG-60)  | 3.70                           | 2.4  | 0.39 | 0.051 | 0.010 | 0.040 | 0.31   | 0.012  | 0.058 |
| C(GGG-80)  | 3.70                           | 2.60 | 0.40 | 0.045 | 0.008 | 0.065 | 0.98   | 0.038  | 0.052 |



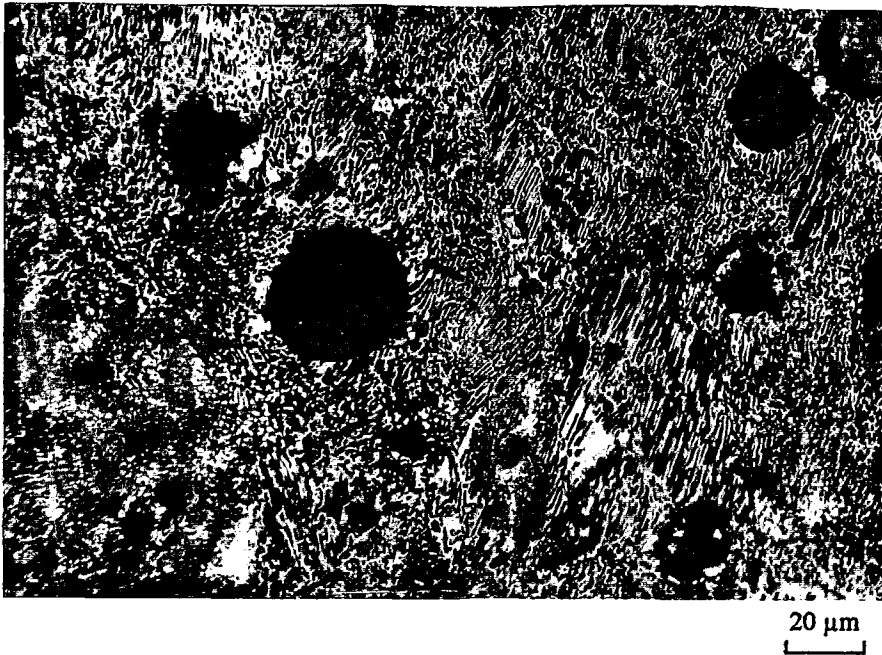
Şekil 4.1 Keel blok şeklindeki dökümlerin boyutları.



Şekil 4.2 A serisi KGDD malzemenin döküm haliyle mikroyapısı



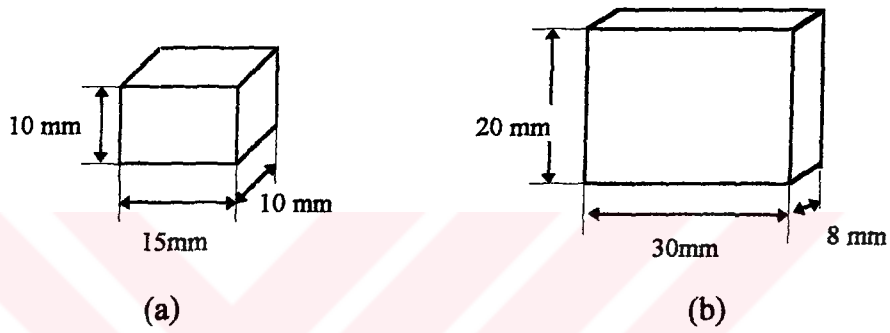
Şekil 4.3 B serisi KGDD malzemenin döküm haliyle mikroyapısı



Şekil 4.4 C serisi KGDD malzemenin döküm haliyle mikroyapısı

#### 4.2.2 Deneylerde kullanılan numuneler

Metalografik inceleme ile kırılma tokluğu ve sertlik deneyleri için 10x10x15mm boyutlarında (Şekil 4.5 a), aşınma deneyleri için 8x20x30mm boyutlarında numuneler keel bloklarından kesilerek hazırlanmıştır. Yüzeyleri metalografik numune hazırlama teknikleriyle 600 gridlik zımparalama kademesine kadar zımparalanmış, daha sonra yüzeyleri alkolle temizlenmiştir.



Şekil 4.5. Deneyel çalışmalarda kullanılan numunelerin şekil ve boyutları  
a)Metalografik, sertlik ve kırılma tokluğunu incelemek için deney numuneleri, b) Aşınma deneyi numuneleri

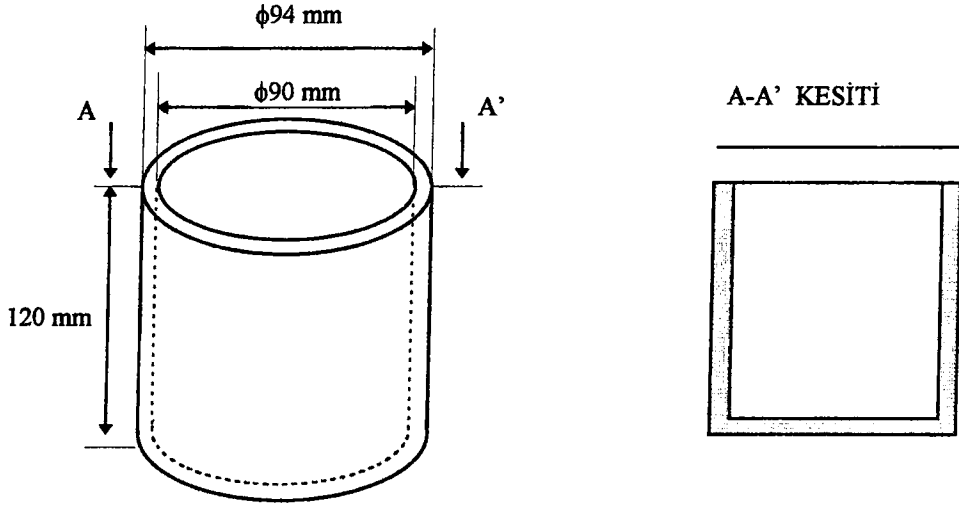
#### 4.3 Deneylerde Kullanılan Cihazlar

##### 4.3.1 Borlama fırını

Borlama işleminde NÜVE MF 120 tipi elektririk direnç fırını kullanılmıştır. Fırın atmosferik şartlara açık olup, fırının sıcaklık hassasiyeti  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  'dir.

##### 4.3.2 Borlama potası

Borlama işleminde,  $950^{\circ}\text{C}$  'de 50 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulmuş AISI 316L paslanmaz çelik potalar kullanılmıştır. Potanın boyutları Şekil 4.6 'da verilmektedir.

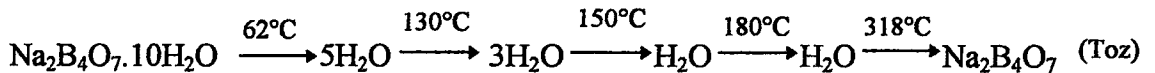


Şekil 4.6 Borlama deneylerinde kullanılan AISI 316L paslanmaz çelik potanın geometrik şekli ve boyutları

#### 4.3.3 Borlama banyosu

Kullanılan borlama banyosu, ağırlık itibarıyla %60 boraks, %15 kalsine borik asit, %20 Ferro-silisyum(%70'lik) ve %5 Alüminyum ihtiva etmektedir. Borlama banyosunun bileşimi belirlenirken Bozkurt[24] 'un doktora tez çalışmalarından yararlanılmıştır.

BORAKS ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ): Etibank'ın Bandırma Boraks Fabrikalarından 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 bekletilmesinden sonra,  $600^\circ\text{C}$  'de üç saat tutularak kristal suyu uçurulmuştur ve bu işlemi takiben,  $850^\circ\text{C}$  'de bir saat bekletilerek sıvı hale getirilmiştir. Daha sonra atmosferik şartlarda aşırı soğumaya tabi tutularak camsı hale getirilmiştir. Boraksın ısıtılması sonucunda su kaybı aşağıdaki gibi olmaktadır [117].



Boraksın ergime noktası 741°C 'dir [117]. Kimyasal formülü  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  olan boraks, teorik olarak %36.52  $\text{B}_2\text{O}_3$ , %16.25  $\text{Na}_2\text{O}$  ve %47.23  $\text{H}_2\text{O}$  içermektedir. Yoğunluğu, 1.73gr/cm<sup>3</sup> 'tür.

KALSİNE BORİK ASİT ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ): Borik asit teorik olarak %56.3  $\text{B}_2\text{O}_3$  içermektedir. Yoğunluğu, 1.51gr/cm<sup>3</sup> 'tür. Deneysel çalışmalarda kullanılan kalsine borik asit, 110°C 'de 3 saat, sonra 400°C 'de 1 saat tutulmuştur. Daha sonra 600°C civarında ergitilerek havada termal şoka tabi tutulan borik asit, camsı hale getirilmiştir.

FERRO-SİLİSYUM: Ticari saflıkta olan ferro-silisyumun kimyasal bileşimi %70 Si, %0.1 C, %1 Al, < %0.05 P, < %0.05 S ve geri kalanı demirdir.

ALÜMİNYUM: Ticari saflıkta alüminyum kullanılmıştır.

Kalsine boraks, kalsine borik asit ve ferro-silis öğütülerek 100 mesh elek altı tane boyutuna getirilmiştir. Daha sonra ağırlıkça %60 kalsine boraks, %15 kalsine borik asit, %20 kadar %70 'lik ferro-silis ve %5 alüminyum olacak şekilde karıştırılmış ve toz karışımı homojen hale gelinceye kadar harmanlanmıştır. Böylece homojen bir karışım için ergitme işlemi sırasında yapılması gereken karıştırma işlemi ve homojensizlikler bertaraf edilmiştir..

#### 4.4 Borlama İşlemi

Şekil 4.5 'de verilen boyutlarda hazırlanan numuneler, 600 gridlik zımpara ile parlatılarak borlamaya hazır hale getirilmiştir. Borlama banyosu ağırlık olarak %60 kalsine boraks, %20 ferrosilis, %15 kalsine borik asit ve %5 alüminyum 1/10.000 hassasiyette tartılarak hazırlanan tozların içerisine numuneler yerleştirilerek oluşturulmuştur. İşlem sıcaklığına çıkarılan fırına daha önce hazırlanmış olan potalar yerleştirilmiştir. Deney süresince banyo yarım saat aralıklarla karıştırılmıştır. Her deney için yeni bir banyo hazırlanarak kullanılmıştır. Bütün seriler için iki borlama sıcaklığı (850 ve 950°C) ve 4 borlama süresi (2, 4, 6 ve 8 saat) kullanılmıştır.

Borlama işlemi sonrasında numuneler oda sıcaklığına kadar havada soğutulmuştur. Borlanan numunelerden banyo kalıntılarını temizlemek için kaynayan suda iki saat süre ile bekletilmişlerdir ve daha sonra 600 gridlik zımpara ile yüzeyde kalmış olan banyo kalıntıları temizlenmiştir. Numuneler alkol içerisinde 15 dakika süre ile ultrasonik olarak temizleme işlemine tabi tutulmuşlardır.

#### 4.5 Metalografik İnceleme

Borlama işlemine tabi tutulan numunelerden metalografik inceleme için hazırlanmış olan 10x10x15mm boyutlarındaki numuneler kare kesite sahip olan yüzey kısımları görünecek şekilde bakalite alınmışlardır. Öncelikle bu numuneler SiC aşındırıcı taşla aşındırılarak, 80, 120, 220, 500 ve 1000 grid'lik zımparalama işleminden sonra, önce 6µm ve daha sonra 1µm elmas pasta ile parlatma işlemine tabi tutulmuşlardır. Metalografik olarak parlatılmış olan yüzeyler %3 'lük nitelle dağlanarak mikroyapılar ortaya çıkarılmıştır.

Metalografik olarak hazırlanan numuneler, Olympus B 071 marka optik mikroskop ile incelenmiştir. Yüzeye yakın olan FeB fazı ile bunun altında yer alan Fe<sub>2</sub>B fazı, dağlama ile elde edilen renk farkından dolayı kalitatif olarak ayırt edilmiştir (FeB fazı Fe<sub>2</sub>B 'ye göre daha koyu gri). Bununla birlikte, kaplama tabakasında bulunan bütün fazları bulmak için x-ışınları difraksiyonu kullanılmıştır.

Tabaka kalınlıklarının tayininde Olympus B 071 marka optik metalografi cihazının bünyesinde bulunan aparatlardan yararlanılmıştır. Borür tabaka kalınlığı, difüzyon yüzeyinden (dış yüzeyde) Fe<sub>2</sub>B tabakasının matrisle oluşturduğu sınıra kadar olan mesafe alınmıştır. Tabaka kalınlığı, metalografi numunelerinin dört kenarından en az beş ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiştir.

#### 4.6 X-Işınları Difraksiyon Analizi

Kaplama tabakasında mevcut fazların tanınmasında ve özelliklerinin saptanmasında kullanılan yöntemlerden biri de x-ışınları difraksiyon analizidir. X-ışınları difraksiyon analiz yönteminde, genellikle Cu veya Co gibi hedef bir elementten elde edilen  $K_{\alpha}$  karakteristik x-ışını demeti, analiz edilecek numune üzerine gönderilmektedir. Işın demeti numunenin üç boyutlu kristal kafeslerinden difraksiyona uğrayarak, numuneye has difraksiyon paterni elde edilmektedir. Bu paternlerin incelenmesi, bileşimi belirli standart malzemelerden elde edilen paternler ile karşılaştırılarak yapılmaktadır. Karşılaştırma sırasında standart ASTM kartlarından yararlanılmaktadır.

Numunelerin x-ışınları difraksiyon analizi yönteminde PHILIPS marka X-Işınları Difraktometresi kullanılmıştır. Analiz sırasında Co  $K_{\alpha}$  ( $\lambda=1.7902 \text{ \AA}$ ) ışın demeti kullanılmış ve oluşan fazların saptanmasında Hanawalt el kitaplarından ve ASTM kartlarından yararlanılmıştır.

#### 4.7 Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM) ve Elementer Analiz İncelemesi

Kaplama tabakalarının mikroyapı görüntülerinin çıkartılmasında, JEOL JSM-5410 marka taramalı elektron mikroskobu(SEM) kullanılmıştır. Ayrıca kaplama tabakasının belirli bölgelerinden ve kaplama tabakasının yüzeyinden itibaren matrise kadar çizgisel olarak elementer analiz değerlerinin belirlenmesinde JOEL JSM-5410 marka taramalı elektron mikroskobu 'na bağlanmış olan NORAN SiLi kristalli, ayırım gücü 143 eV olan Freedom Norvar Detector kullanılmıştır.

#### 4.8 Sertlik Deneyleri

Kaplama tabakalarının ve matrisin sertlik dağılımları mikrosertlik cihazında LEITZ marka vickers sertlik ucu kullanılarak 100gr. yük altında gerçekleştirilmiştir. Ölçme işlemleri yüzeyden itibaren matrise kadar, belirli mesafelerde belirli bir aralıkta yapılmıştır. Bu şekilde yüzeyden itibaren matrise kadar, sertlikteki değişim; küresel

grafitli dökme demirlerin bileşimlerine, borlama sıcaklıklarına ve sürelerine bağlı olarak tespit edilmiştir.

#### 4.9 Kırılma Tokluğu Deneyleri

LEITZ marka vickers mikrosertlik cihazında 300-1000gr yük kullanılarak malzemelerin bileşimlerine, borlama sıcaklık ve sürelerine bağlı olarak kırılma toklukları ölçülmüştür.

Klasik kırılma tokluğu deneyleri, oldukça büyük olan ve plastik davranış gösteren (gevrek karakterli olmayan) malzemelere uygulanmaktadır. Bu durumda gevrek karakterli ve boyutsal olarak küçük olan malzemelerin kırılma tokluklarının belirlenmesinde bu tekniğin dışında bir başka teknik olmayabilir. Bu amaçla, kırılma tokluğunun belirlenmesinde geliştirilmiş olan indentasyon kırılma tokluğu deneyleri kullanılmaktadır. Bir malzemenin kırılma tokluğu; uygulanan yüke, çatlak boyuna ve numunenin geometrisine bağlıdır.

Bu çalışmada Eşitlik 4.1 'deki ampirik formül kullanılarak indentasyon tekniği ile kırılma tokluğunu tayin etmenin prensibi, belirli yükler altında oluşturulan izlerle, bu izlerin köşegenleri boyunca oluşturulan radyal çatlakların boylarının ölçülmesi esasına dayanmaktadır [38,69,118-120].

$$K_c = 0.028 \left( \frac{E}{H_v} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{P}{c^{3/2}} \right) \quad (4.1)$$

olup burada;

$E$  =Kaplama tabakasının elastik modülü ( kg/mm<sup>2</sup>),

$H_v$  =Kaplama tabakasının sertliği ( kg/mm<sup>2</sup>),

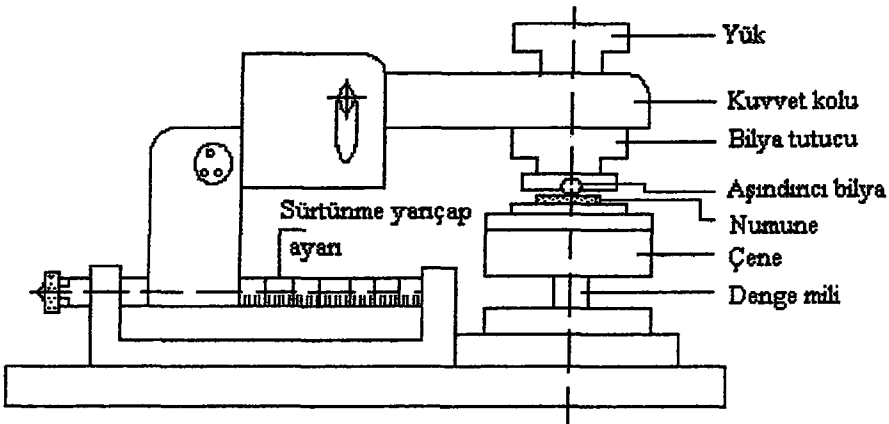
$P$  =Uygulanan yük (kg),

$c$  =Çatlak yarı boyu (m)'nu göstermektedir [121].

#### 4.10 Aşınma Deneyleri

Abrasif aşınma deneyleri, Şekil 4.7 'de şematik olarak gösterilen, disk üzerinde bilya ve disk üzerinde pim şeklinde iki işlevi olan CSEM marka tribometre cihazında disk üzerinde bilya metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde bilya olarak 6 mm çapında WC-Co aşındırıcı bilya kullanılmıştır. Bu amaçla, borlanmış C serisi (GGG-80) küresel grafitli dökme demir (KGDD) numuneler standart metalografik işlemlere tabi tutularak epoksi reçine veya bakalite alınmış, daha sonra çeşitli kademe zımparalarda ve ilaveten kadife çuhada  $Al_2O_3$  solüsyonu ile parlatılmışlardır.

Aşınma deneylerine başlamadan önce aşındırıcı bilya ve numuneler birlikte metil alkol içerisinde 15 dakika süre ile ultrasonik titreşim cihazında temizlenmişlerdir. Deneyler numune üzerine bilya temas yarıçapı 2 mm olacak şekilde 200 dev/dak dönme hızında ve kuru ortamda uygulanmıştır. Her bir numune 2, 5 ve 10 N yük altında 5000 devir sayısında aşındırılmıştır. Aşınma deneyleri her bir numune için en az üç defa tekrarlanmış ve bunların ortalamaları alınmıştır. Tüm deneyler boyunca aşındırıcı bilyada kayda değer bir ağırlık kaybı olmadığından aşınma miktar ve hızlarının hesaplanmasında ASTM G99-90 standardı kullanılmıştır [122]. Hasar derinlikleri ve kalınlıkları optik mikroskop (OLYMPUS B 071) yardımıyla geometrik hesaplama yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Bu yöntemle ilgili değişken ve formülasyonlar Tablo 4.2 'de verilmiştir.



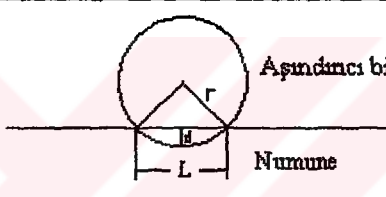
Şekil 4.7 Aşınma deneylerinde kullanılan cihazın şematik gösterilişi [123].

Şekil 4.7 'de verilen aşınma cihazı, aşınma deneyleri yapılırken aynı zamanda sürtünme nedeniyle oluşan ikincil kuvvetlerin ve de dolayısıyla sürtünme katsayılarının ölçülmesine imkan sağlayan teknik bir donanıma da sahiptir.

Tablo 4.2 Aşınma hızı hesaplamalarında kullanılan değişken ve bağıntılar [122,124].

| Aşınma Değişkeni | Birimi               | Tanımı                    |
|------------------|----------------------|---------------------------|
| L                | (mm)                 | Hasar iz kalınlığı        |
| $r = 3$          | (mm)                 | Aşındırıcı bilya yarıçapı |
| S                | (mm <sup>2</sup> )   | Hasar alanı               |
| V                | (mm <sup>3</sup> )   | Hasar hacmi               |
| $R = 1$          | (mm)                 | Aşınma iz yarıçapı        |
| $\theta$         | (rad)                | Kesim açısı               |
| d                | ( $\mu$ m)           | Hasar derinliği           |
| W                | (mm <sup>3</sup> /m) | Aşınma hızı               |



$$\theta = 2 \arcsin (L/2r) \quad , \quad S = (1/2) r^2 (\theta - \sin \theta)$$

$$V = 2\pi (R + L/2) S \quad , \quad d = (1/2) [2r - (4r^2 L^2)^{1/2}]$$

$$W = V / \text{Toplam iz uzunluğu}$$

$$W = 2\pi (R + L/2) S / 2\pi r \times \text{devir sayısı}$$

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE İRDELEME

#### 5.1 Giriş

Bu çalışmada Tablo 4.1 'de bileşimleri verilen, DIN GGG-50 (A serisi), GGG-60 (B serisi) ve GGG-80 (C serisi) grubu üç adet küresel grafitli dökme demir (KGDD) malzemenin; boraks, borik asit, ferro-silisyum ve alüminyum esaslı tuz banyosunda, farklı sıcaklık ve sürelerde, termo-kimyasal olarak borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan küresel grafitli dökme demir numunelerin içerisinde alaşım elementi olarak bulunan bakır miktarına bağlı olarak, mikroyapının değiştiği ve bu özelliğin borlama işleminin neticesini etkilediği görülmüştür.

Termo-kimyasal olarak borlanan numunelerin yüzeyleri, kaplama tabakaları, kaplama- matris arayüzeyleri; klasik metalografi teknikleri, x-ışınları difraksiyon analizi, taramalı elektron mikroskopu (SEM) incelemesi, noktasal-çizgisel analizler ve mekanik testler yardımıyla incelenmiştir.

#### 5.2 Metalografik İnceleme

Klasik metalografi teknikleri ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan optik mikroskop incelemeleri neticesinde, borlama işlemine tabi tutulan bütün numunelerde borür tabakası, kaplama-matris arayüzeyi ve matris açık bir şekilde ortaya çıkmıştır. Borür tabakasının çeliklere benzer şekilde kolonsal bir yapı sergilediği ve kaplama tabakası içinde dağılmış olan grafit küreleri ile adeta kompozit formda bir kaplama tabakası oluşturduğu görülmüştür. Şekil 5.1-5.16 'da 850 ve 950 °C sıcaklarda 2, 4 ,6 ve 8 saat sürelerde borlama işlemine tabi tutulan A, B ve C serisi numunelerin bazı mikroyapı görüntüleri verilmektedir.

Gerçekleştirilen borlama işlemi sonrasında, borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak seramik esaslı bir kaplama tabakası ve matris fazından oluşan iki farklı bölge ortaya çıkmıştır. Ayrıca oluşan her iki bölgenin küresel formda grafitler içerdiği gözlenmiştir. Orjinal numunelerle, borlama işlemine tabi tutulmuş numuneler mukayese edildiği takdirde, borlanan numunelerde ;

- i) Demir borür bileşimine sahip ve kolonsal bir yapı sergileyen seramik esaslı birinci bölge ve hemen altında yer alan kaplama-matris arayüzeyinde bant halinde teşekkül eden karbon ve silisyum esaslı ara bölge,
- ii) Karbon-silisyum esaslı bant bölgesinin hemen altında yapılanan ferrit fazı ve ana matristen oluşan ikinci bölge görülmüştür.

Kaplama tabakası homojen olarak malzeme yüzeyinde süreklilik arzederken, kaplama- matris arayüzeyinde oluşan karbon esaslı, muhtemelen grafit formunda bant şeklinde bulunan yapıda süreklilik yoktur ve alaşım bileşimine bağlı olarak bu yapı, morfolojik olarak değişiklik göstermektedir.

Bor kaplanmış A, B ve C serisi numunelerde yapılan metalografik incelemeler sonucunda, özellikle A ve B serisi numunelerde kaplama-matris arayüzeyinde karbon birikimi oluşurken, C serisi numunelerde böyle bir yapı ya oluşmamış, yada çok sınırlı olarak yüksek sıcaklık ve sürelerde görülmüştür. Şekil 5.1-5.4'de A serisi numunelerin mikroyapılarında bu bantlaşmalar açık olarak görülmektedir. Karbon birikimi zaman ve sıcaklığın artışıyla birlikte kaplama tabakasıyla birlikte artış göstermekte ve kısmi ayrılımlara yol açmaktadır. Aynı zamanda kaplama tabakasının kalınlığında da zaman ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak artış gözlenmektedir. Mikroyapı incelemelerinde görülen bu siyah bölgenin karbon esaslı olduğu noktasal ve çizgisel analizlerle de desteklenmiştir (Şekil 5.74-5.78). B serisi numunelerde de A serisine benzer mikroyapılar açıkça görülmektedir. Kaplama-matris arayüzeyinde grafit birikmesi, A serisi numunelerdeki kadar olmasa bile, mikroyapıda açıkça görülmektedir. (Şekil 5.5-5.8) C serisi numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda, kaplama-matris arayüzeyinde karbon birikmesi oluşmamış veya yüksek sıcaklık ve sürelerde çok sınırlı olarak görülmüştür (Şekil 5.9-5.16).



Şekil 5.1 850°C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD'in mikroyapısı



Şekil 5.2 850°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD'in mikroyapısı



Şekil 5.3 950°C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD'in mikroyapısı



Şekil 5.4 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD'in mikroyapısı



Şekil 5.5 850°C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD'in mikroyapısı



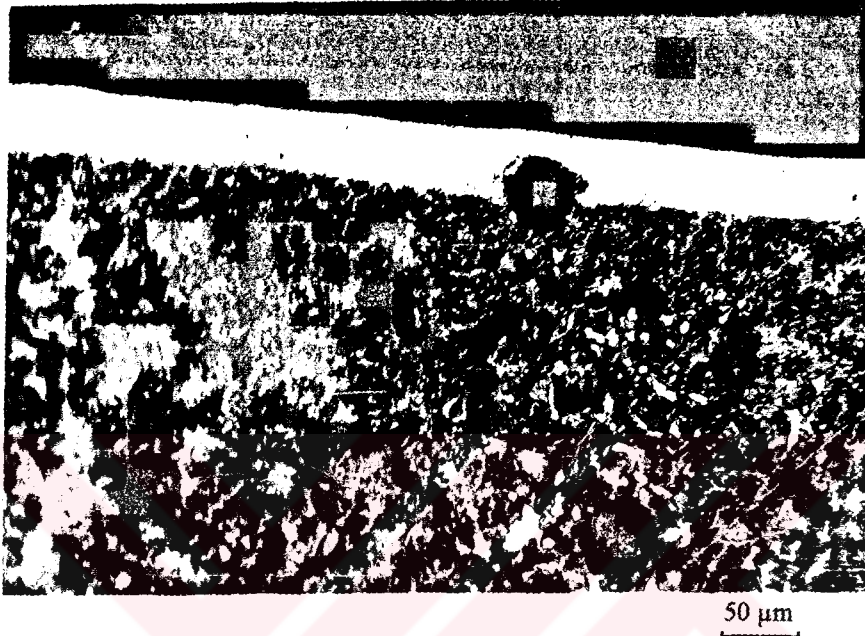
Şekil 5.6 850°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD'in mikroyapısı



Şekil 5.7 950°C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD'in mikroyapısı



Şekil 5.8 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD'in mikroyapısı



Şekil 5.9 850°C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in mikroyapısı



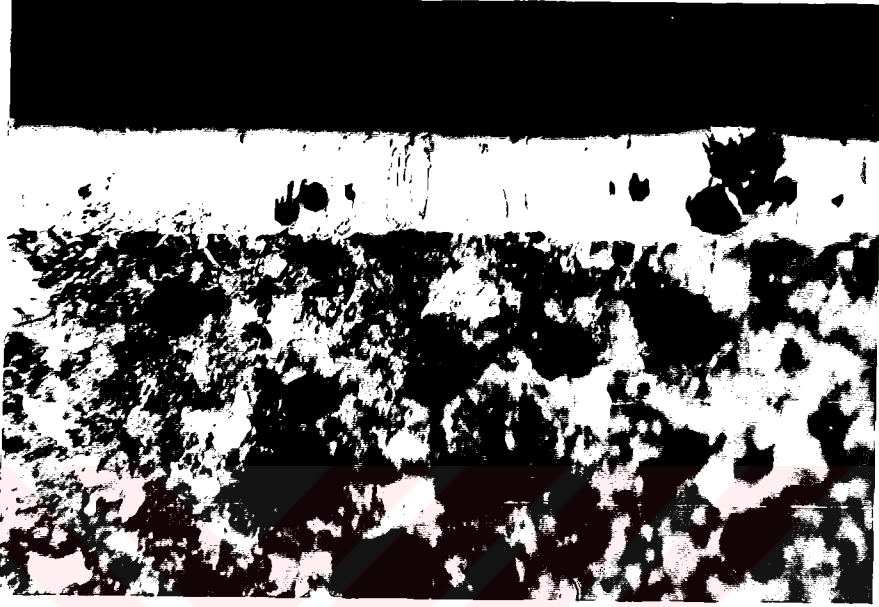
Şekil 5.10 850°C sıcaklıkta 4 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in mikroyapısı



Şekil 5.11 850°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in mikroyapısı



Şekil 5.12 850°C sıcaklıkta 8 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in mikroyapısı



Şekil 5.13 950°C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in mikroyapısı



Şekil 5.14 950°C sıcaklıkta 4 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in mikroyapısı



50  $\mu\text{m}$

Şekil 5.15 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in mikroyapısı



50  $\mu\text{m}$

Şekil 5.16 950°C sıcaklıkta 8 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in mikroyapısı

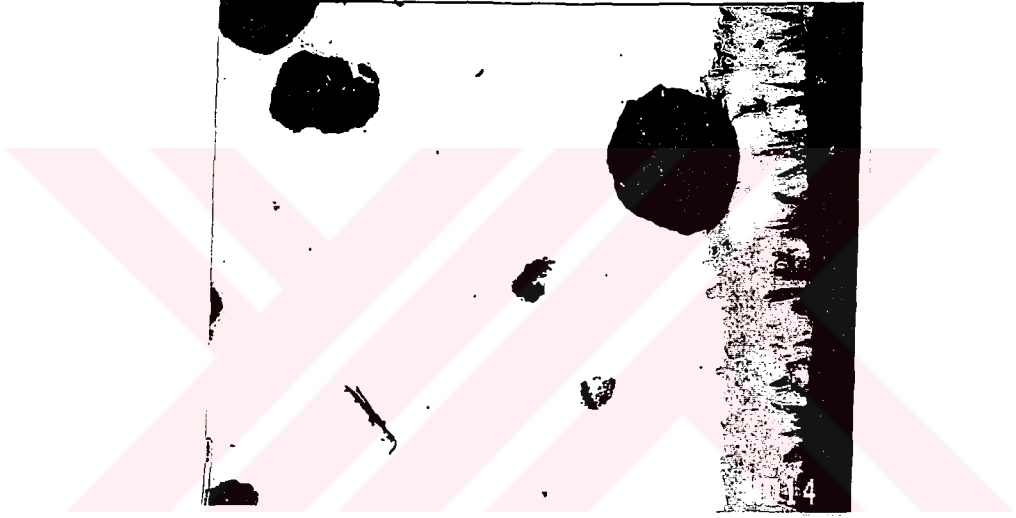
Doğal olarak metalografik incelemeler, borür tabakası dışında kantitatif bir bilgi vermekle birlikte, kolonların şekli ve renk farklılığından faydalanılarak, elde edilen borür tabakasının türü ve kalınlığı hakkında faydalı olmuştur (Şekil 5.1-5.16). Bütün borlama sıcaklığı ve sürelerinde, borlama işlemine tabi tutulan malzemelerin tümünde, iyi bir dağlama tekniği ile borür fazlarının yer aldığı kaplama tabakasını, iki ayrı bölgeye ayırmak mümkündür.

- i) Bor difüzyonunun fazla olduğu yüzey kısmı,
- ii) Bor difüzyonunun azaldığı, karbon ve silisyumun artış gösterdiği arayüzey ve hemen altında yer alan silisyum-ferrit bölgesi.

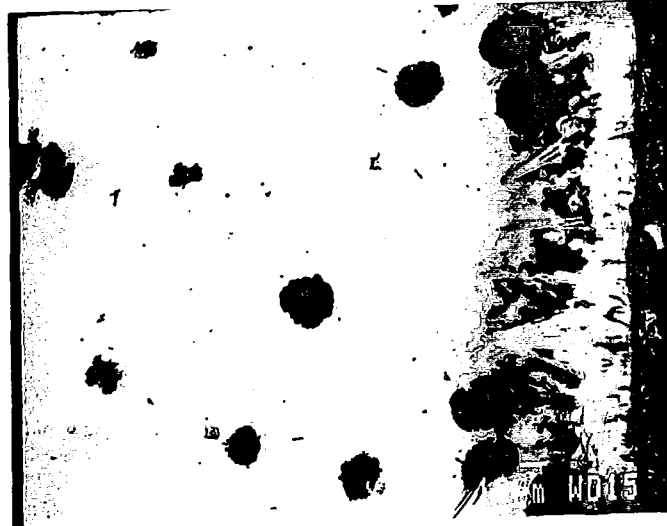
Demir esaslı malzemeler üzerinde yapılan araştırmaların bir çoğunda, borür tabakasının FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarından meydana geldiği görülmektedir [31]. Kunst ve Schaber'in yapmış olduğu sınıflandırmada, FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının metalografik olarak belirgin bir şekilde ayrılabilirdiği belirtilmektedir [82]. Çoğunlukla borür tabakasının dış yüzeyinde FeB, iç kısmında ise Fe<sub>2</sub>B fazının yer almasına rağmen, Fe<sub>2</sub>B fazı içeren tek fazlı bir kaplama tabakası elde etmek mümkündür ve tercih edilmektedir. FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının her ikisini de bir arada bulunduran çift fazlı kaplamalarda, bu iki fazın termal genleşme katsayıları ve fiziksel özelliklerinin birbirinden çok farklı olması, fazların arayüzeyinde çatlak teşekkülüne neden olmakta ve kaplama özelliklerini bozmaktadır [13]. Mevcut çalışmada bu durum görülmüş ve literatürde verilen bulgular kanıtlanmıştır (Şekil 5.23). Carbucchio ve arkadaşları [45] ticari saflıktaki armco demir üzerinde yapmış oldukları çalışmada, borür tabakasının FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarından meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Mössbauer ve x-ışınları çalışmalarında, düşük miktarlarda alaşım elementi içeren çeliklerde FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazının dışında metal borürleri (MB, M<sub>2</sub>B) elde edememişlerdir. Ancak Bindal [69], düşük alaşımlı çeliklerde de FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazının dışında metal borür fazlarını tespit etmiştir.

Bütün numuneler üzerinde yapılan mikroyapı çalışmalarında, A ve B serisi numunelerde FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının mevcut olduğu ve FeB fazının çoğu zaman çok geniş bir alanı kapladığı mikroyapılarda görülmektedir. Ancak, bu iki fazın optik

metalografi yöntemiyle tam olarak gösterilmesi pek mümkün olamamaktadır. Bu iki fazın çok belirgin olarak ayırt edilebilmesi SEM geri saçılan elektron görüntülerindeki (SEM-BEI) renk ayrımı yardımıyla belirlenebilmektedir (Şekil 5.17-5.32). C serisi numunelerde FeB fazının görülmediği, ancak yüksek sıcaklık ve sürelerde sınırlı ölçülerde olduğu metalografik olarak saptanmıştır (Şekil 5.9-5.16). Bu sonuç, SEM geri saçılan elektron görüntüleriyle (SEM-BEI) desteklenmiştir (Şekil 5.25-5.32).



Şekil 5.17 850°C’de 2 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD’in SEM-BEI görüntüsü



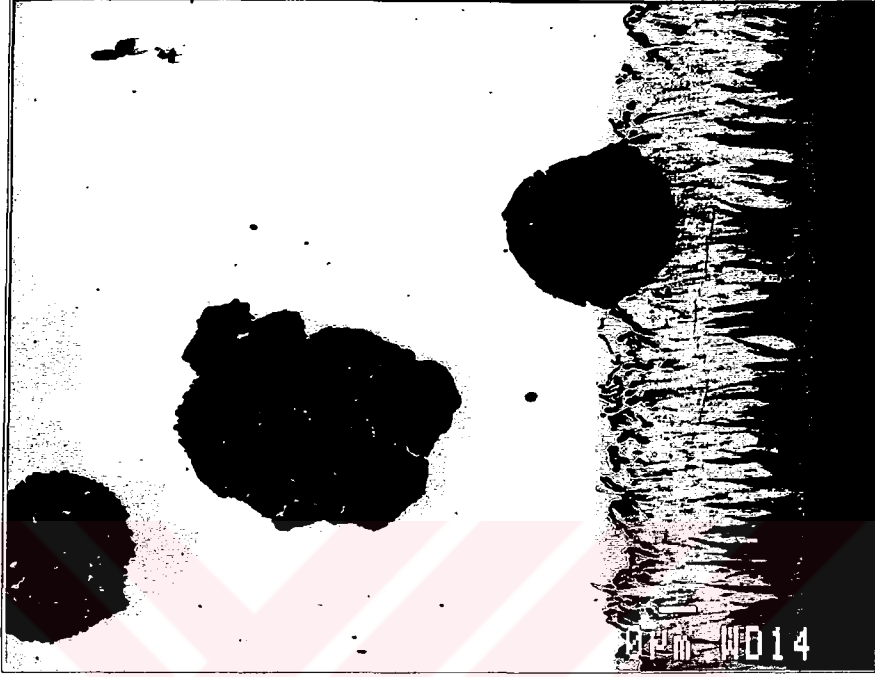
Şekil 5.18 850°C’de 6 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD’in SEM-BEI görüntüsü



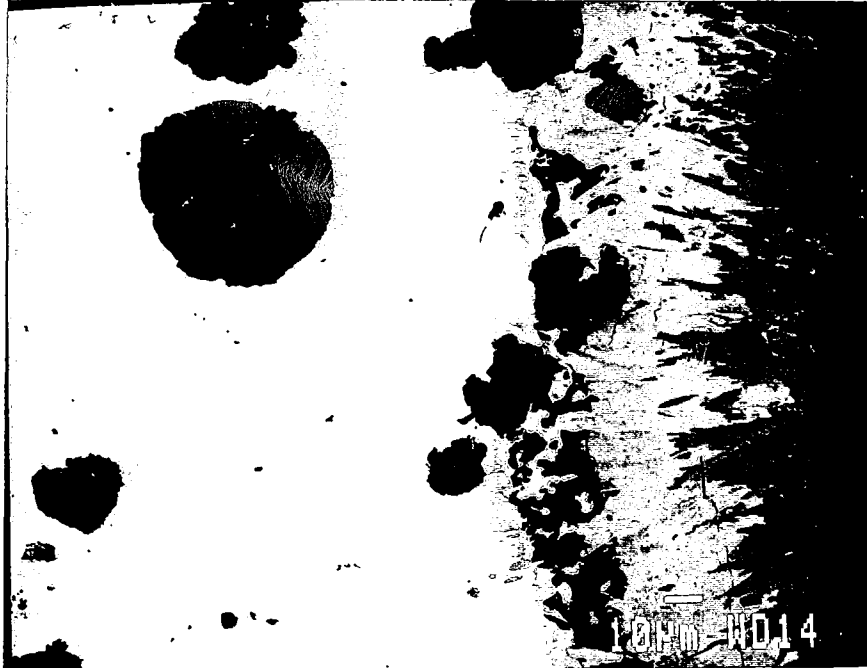
Şekil 5.19 950°C’de 2 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD’in SEM-BEI görüntüsü



Şekil 5.20 950°C’de 6 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD’in SEM-BEI görüntüsü



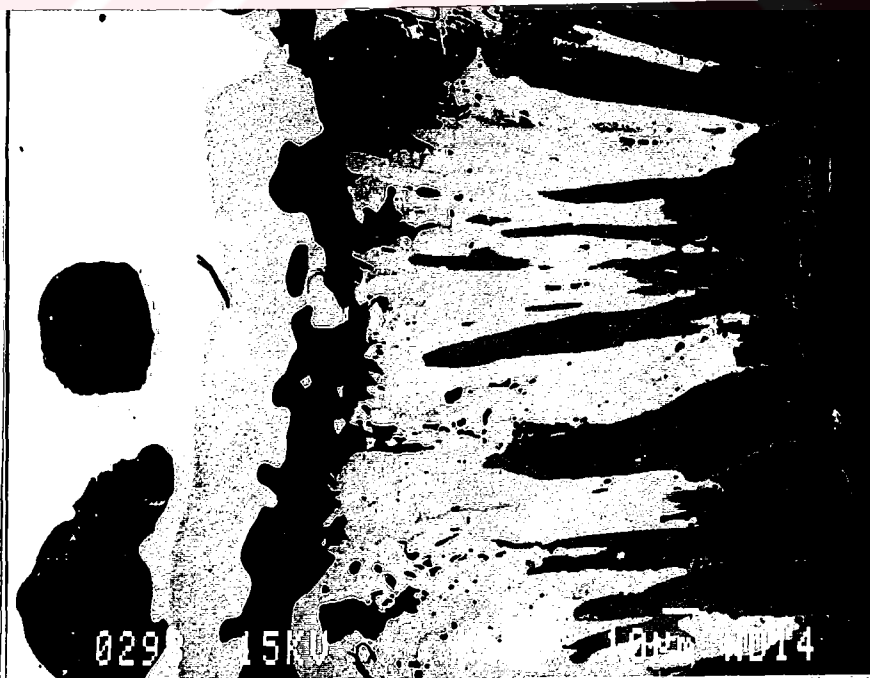
Şekil 5.21 850°C'de 2 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü



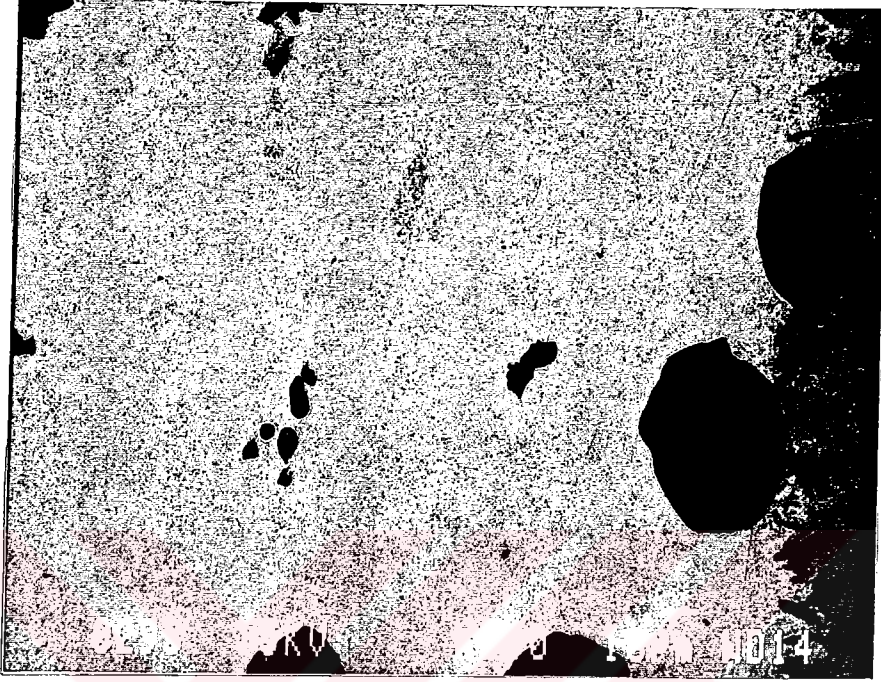
Şekil 5.22 850°C'de 6 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü



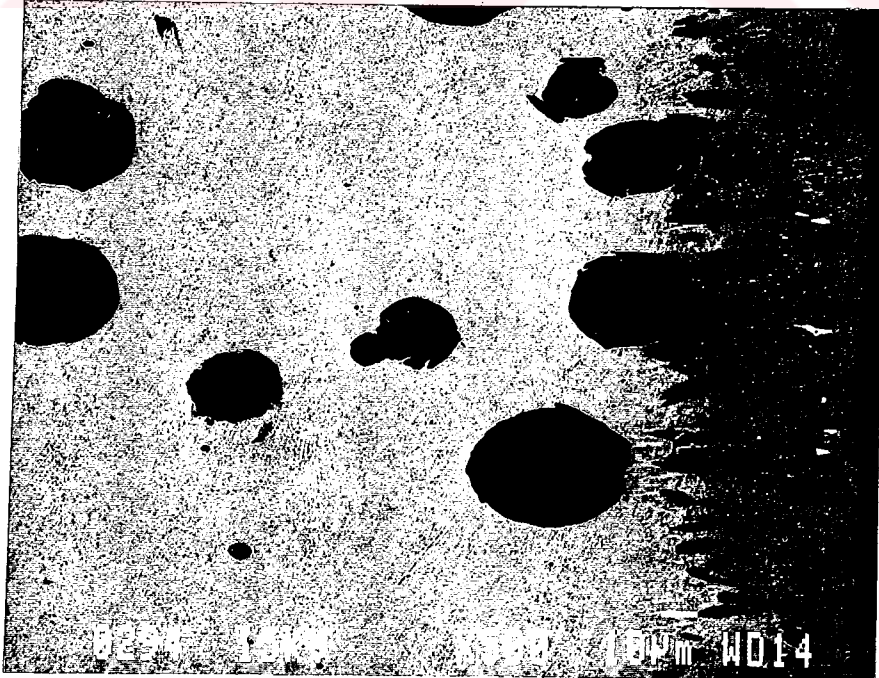
Şekil 5.23 950°C’de 2 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD’in SEM-BEI görüntüsü



Şekil 5.24 950°C’de 6 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD’in SEM-BEI görüntüsü



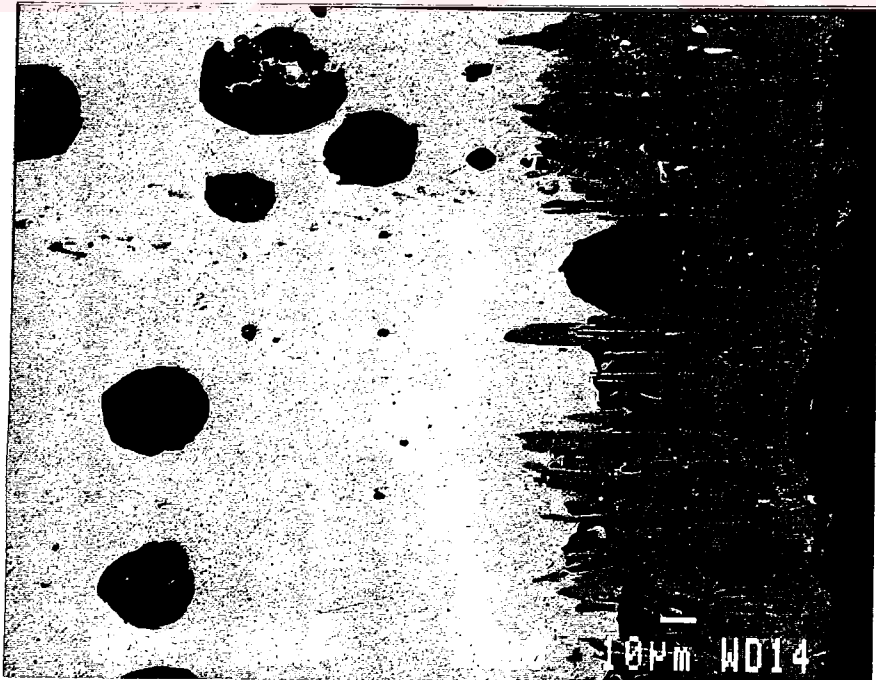
Şekil 5.25 850°C’de 2 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD’in SEM-BEI görüntüsü



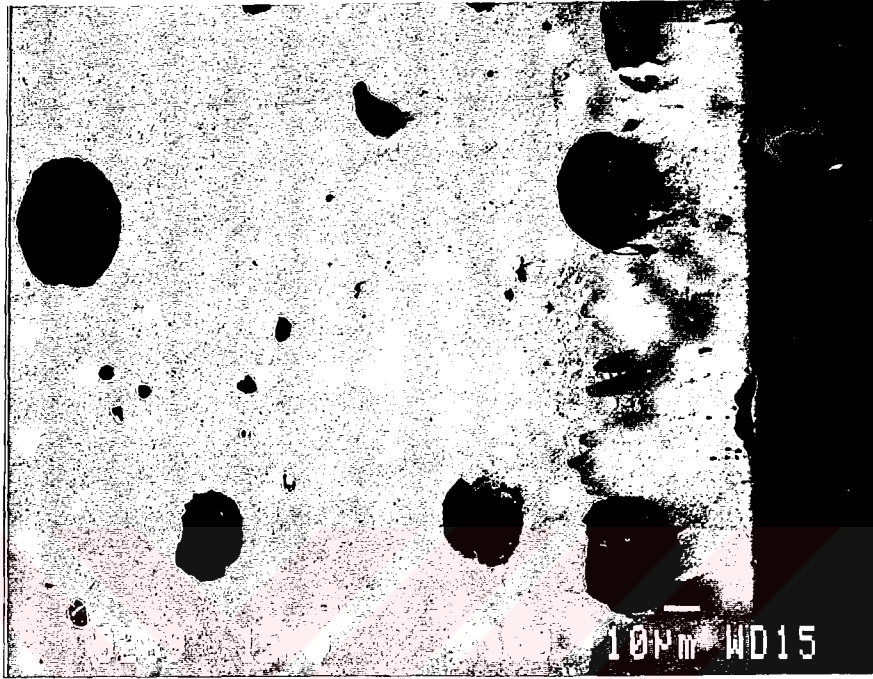
Şekil 5.26 850°C’de 4 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD’in SEM-BEI görüntüsü



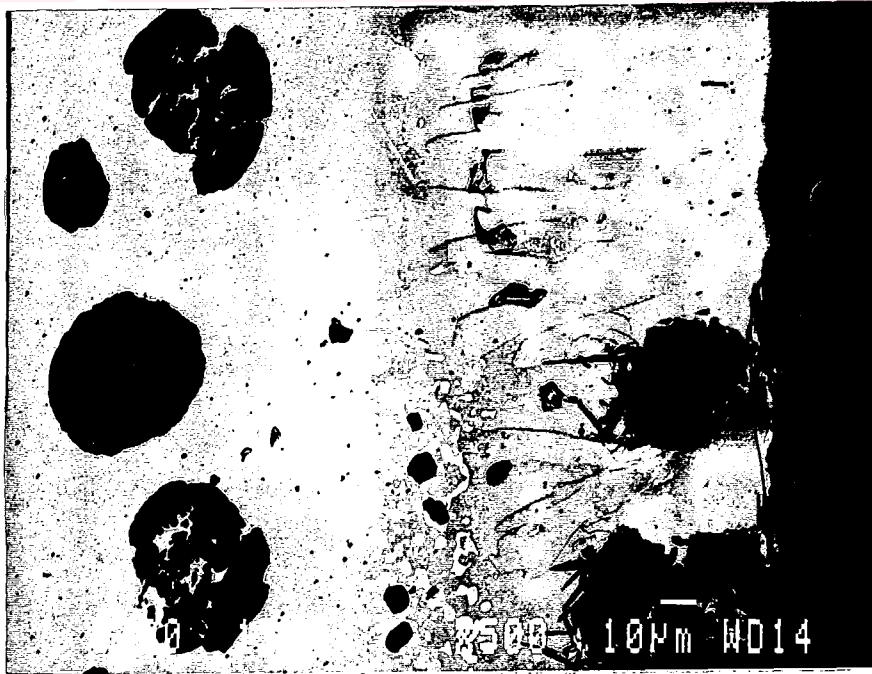
Şekil 5.27 850°C'de 6 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü



Şekil 5.28 850°C'de 8 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in SEM-BEI görüntüsü



Şekil 5.29 950°C’de 2 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD’in SEM-BEI görüntüsü



Şekil 5.30 950°C’de 4 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD’in SEM-BEI görüntüsü



Şekil 5.31 950°C’de 6 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD’in SEM-BEI görüntüsü



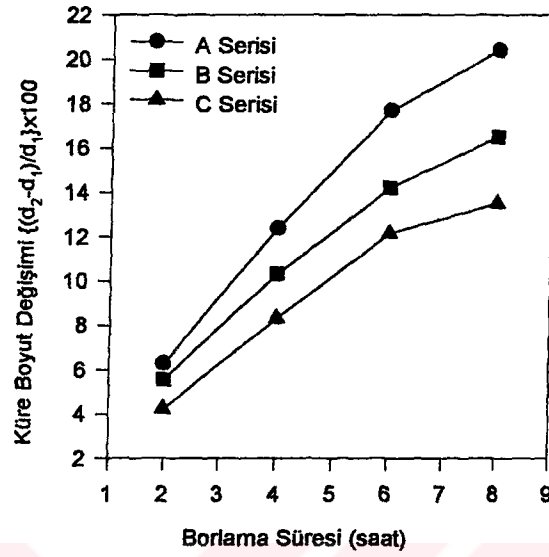
Şekil 5.32 950°C’de 8 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD’in SEM-BEI görüntüsü

Bütün numuneler üzerinde yapılan metalografik incelemeler sonucunda, küresel grafitli dökme demirlerde çeliklere benzer şekilde belirgin bir geçiş zonuna rastlanmamıştır. Bunun yerine, silisyum içeren çeliklerin borlanması sonucunda elde edilen mikroyapılara benzer şekilde [75], silisyum içeren beyaz renkli bir ferritik bölgenin olduğu saptanmıştır (Şekil 5.8, 5.24).

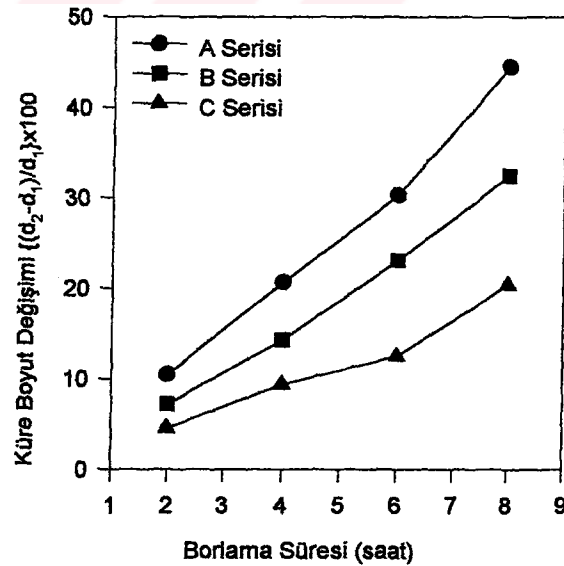
Borlama işlemi sonucu karbon ve silisyum, kaplama-matris arayüzeyine doğru itilirken kaplama içerisinde yer alan küresel grafitlerin boyutlarında değişikliklerin meydana geldiği görülmektedir. Yapılan ölçümlerde, borlanma sonrasında matris ve kaplama tabakasındaki grafit kürelerin boyutları arasındaki farkın, borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, bileşimdeki bakır konsantrasyonunun artmasına bağlı olarak, küre boyutlarındaki artış düşmektedir. Borlama ile küre boyutlarının değişimi ilk kez incelenmiştir. Mevcut çalışma ile varılan küre irileşmesi sonuçları, küresel grafitli dökme demirlerin ostenitlenmesi çalışmalarında da not edilmiştir[125]. Küre boyutlarındaki artış A serisi numunelerde maksimuma ulaşırken, C serisi numunelerde minimum değerlere inmektedir. Borür tabakası ve matris içerisindeki küre boyut dağılımları, Tablo 5.1 ve Şekil 5.33-5.35 'de verilmektedir. Karbon elementi, borlama işlemi sırasında hem kürelerin etrafında hem de kaplama matris arayüzeyinde yoğunlaşmaktadır. Ancak, C serisi numunelerde bu durum minimum seviyededir. Şekil 5.36-5.38 'de kaplama içerisinde yer alan grafit kürelerinin dağılım gösterdiği mikroyapılar görülmektedir.

Tablo 5.1 850 ve 950°C'de borlanan A, B ve C serisi KGDD numunelerin borlama süresine bağlı olarak kaplama tabakasındaki kürelerin, matriste bulunan kürelere göre boyutsal değişimi (Döküm haliyle A, B ve C serisi numunelerin küre çapları sırasıyla, 29.9µm, 20.8µm ve 23.4µm 'dir.)

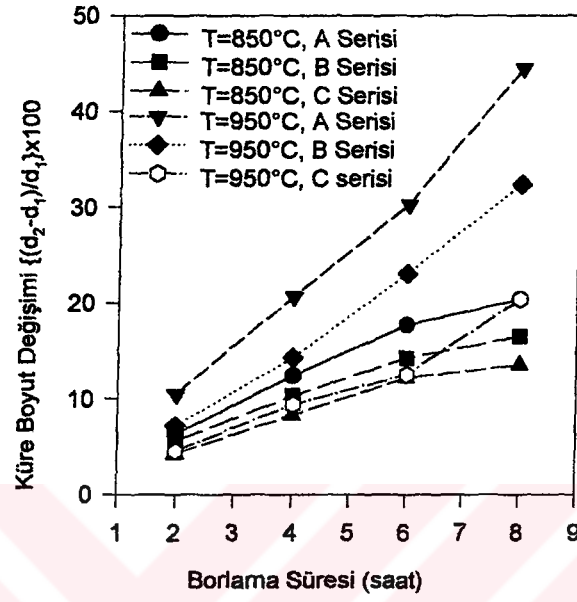
| Borlama<br>Süresi(saat) | Küre Boyut Değişimi, $\{(d_2-d_1)/d_1\} \times 100$ |       |          |       |          |       |
|-------------------------|-----------------------------------------------------|-------|----------|-------|----------|-------|
|                         | A Serisi                                            |       | B Serisi |       | C Serisi |       |
|                         | 850°C                                               | 950°C | 850°C    | 950°C | 850°C    | 950°C |
| 2                       | 6.3                                                 | 10.5  | 5.6      | 7.2   | 4.2      | 4.5   |
| 4                       | 12.4                                                | 20.7  | 10.3     | 14.3  | 8.3      | 9.4   |
| 6                       | 17.7                                                | 30.3  | 14.2     | 23.1  | 12.2     | 12.5  |
| 8                       | 20.4                                                | 44.5  | 16.5     | 32.4  | 13.5     | 20.4  |



Şekil 5.33 850°C 'de borlanan A, B ve C serisi KGDD numunelerin kaplama tabakasındaki kürelerin, matriste bulunan kürelere göre boyut farkının borlama süresi ile değişimi



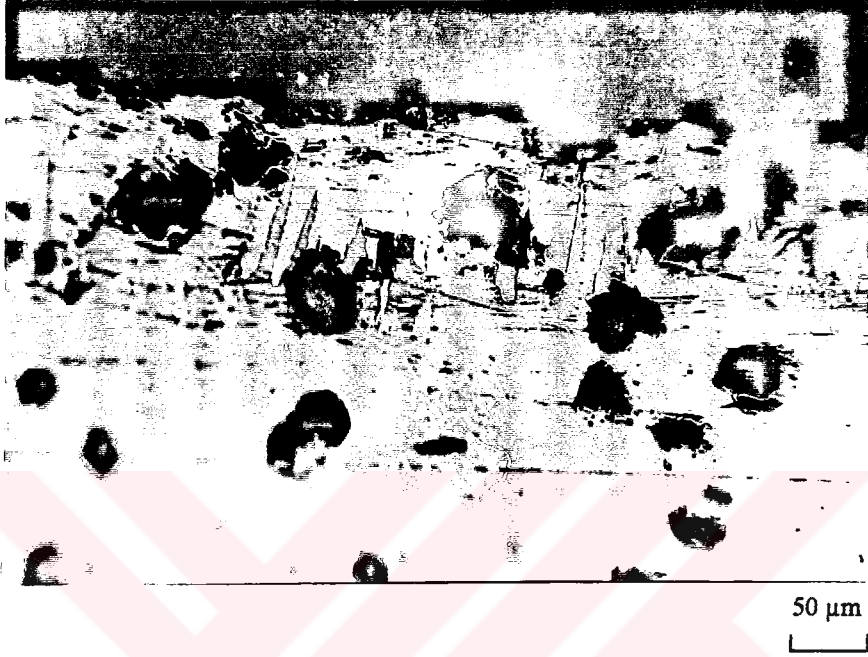
Şekil 5.34 950°C 'de borlanan A, B ve C serisi KGDD numunelerin kaplama tabakasındaki kürelerin, matriste bulunan kürelere göre boyut farkının borlama süresi ile değişimi



Şekil 5.35 850 ve 950°C’de borlanan A, B ve C serisi KGDD numunelerin kaplama tabakasındaki kürelerin, matriste bulunan kürelere göre boyut farklarının borlama süresi ile değişimi



Şekil 5.36 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış A serisi KGDD’in mikroyapısı



Şekil 5.37 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış B serisi KGDD'in mikroyapısı



Şekil 5.38 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış C serisi KGDD'in mikroyapısı

Sırasıyla A, B ve C serisi numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakasının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde rol oynayan ana faktör, bakır konsantrasyonudur. B ve C serisi numunelerin bileşimindeki bakır miktarı sırasıyla, %0.3 ve %1 iken, A serisi numunelerde bakır hiç bulunmamaktadır (Tablo 4.1). A, B ve C serisi numunelerde hakim olan fazlar sırasıyla, daha çok ferritik (%5 Perlit), ferrit+perlitik (%71 perlit) ve tamamıyla perlitik şeklindedir. A, B ve C serisi numunelerde bakır miktarının artışına bağlı olarak, kaplama-matris arayüzeyinde yer alan koyu renkli karbon tabakasının azaldığı ve %1 Cu içeren C serisi numunelerde bu tabakanın yok denecek kadar az olduğu görülmektedir. Ayrıca, kaplama tabakalarının altında ferrit fazının çok sınırlı olduğu ve Cu miktarının artışına bağlı olarak azaldığı görülmüştür.

Vetters [75]'in yapmış olduğu çalışmalarda alaşım elementlerinden karbon ve silisyumun borür tabakası boyunca çözünmediği ve kaplama-matris arayüzeyine doğru hareket ettiği belirtilmektedir. Yine bu araştırmalarda, kaplama-matris arayüzeyinde biriken silisyumun ferrit fazını oluşturduğu vurgulanmaktadır. KGDD malzemelerin borlanması kaplama-matris arayüzeyinde bu elementlerin birikmesi literatür ile uyum sağlamaktadır. Ancak, bu çalışmalar daha çok silisyum içeren çelikler üzerinde yapılmıştır. KGDD'ler üzerinde yapmış olduğumuz çalışmalarda, çeliklerin kaplama morfolojilerinden farklı olarak kaplama-matris arayüzeyinde bant şeklinde bir karbon birikmesinin olduğu görülmektedir. Silisyum ve karbon konsantrasyonunun yüksek değerlerde olması ve muhtemelen silisyumun grafitleştirici etkisi sayesinde bu bölgede biriken karbon grafit fazı şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Ancak, C serisi numunelerde karbon ve silisyum esaslı bant teşekkülüne rastlanmamıştır. C serisi KGDD malzemeler % 1 oranında Cu içermektedir. Samsanov ve Epik [19] Cu 'ın bor kaplamalarda bor difüzyonunu engelleyici bir role sahip olduğunu belirtmektedir. Hatta borlama yapılacak numuneler üzerinde, bor kaplanması istenmeyen bölgelerin Cu ile kaplanmasını önerilmektedir. C serisi malzemelerde FeB fazının bulunmaması, karbon birikiminin oluşmaması ve Si-ferrit fazının çok sınırlı olması muhtemelen Cu'ın bor difüzyonunda engelleyici rol oynaması sebebiyle gerçekleşmektedir.

850°C ve 950 °C sıcaklıklarda 2 ile 8 saat arasında borlanma işlemine tabi tutulan A, B ve C serisi numunelerin borür tabaka kalınlıkları sırasıyla, Tablo 5.2-5.4 'de ve Şekil 5.39-5.44 'de verilmektedir. Şekil 5.45-5.46 'da A, B ve C serisi numunelerin tabaka kalınlıkları birarada verilmektedir. Her bir serinin tabaka kalınlıklarındaki değişim, borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak Şekil 5.47-5.49 'da verilmektedir. Tabaka kalınlıklarının tayininde numunelerin bir çok yerinden tespit edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Ölçümler sırasında çok sayıda farklı uzunluklarda borür iğnelerinin olduğu görülmüştür.

Tablo 5.2 A serisi numunelerde borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları

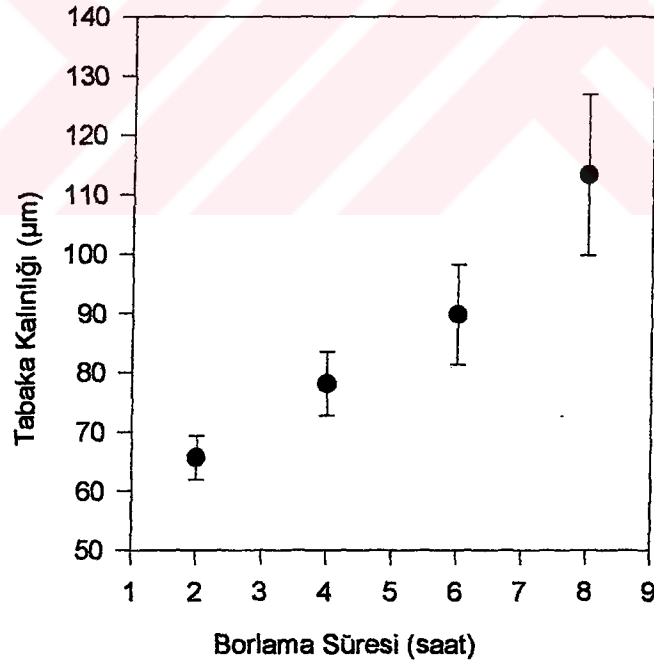
| Borlama Sıcaklığı<br>(°C) | Borlama Süresi<br>(saat) | Tabaka kalınlığı<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|---------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| 850                       | 2                        | 65.64 $\pm$ 3.73                      |
|                           | 4                        | 78.14 $\pm$ 5.33                      |
|                           | 6                        | 93.16 $\pm$ 8.44                      |
|                           | 8                        | 113.26 $\pm$ 13.54                    |
| 950                       | 2                        | 160.58 $\pm$ 11.79                    |
|                           | 4                        | 171.28 $\pm$ 21.70                    |
|                           | 6                        | 225.80 $\pm$ 41.27                    |
|                           | 8                        | 305.40 $\pm$ 24.76                    |

Tablo 5.3 B serisi numunelerde borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları

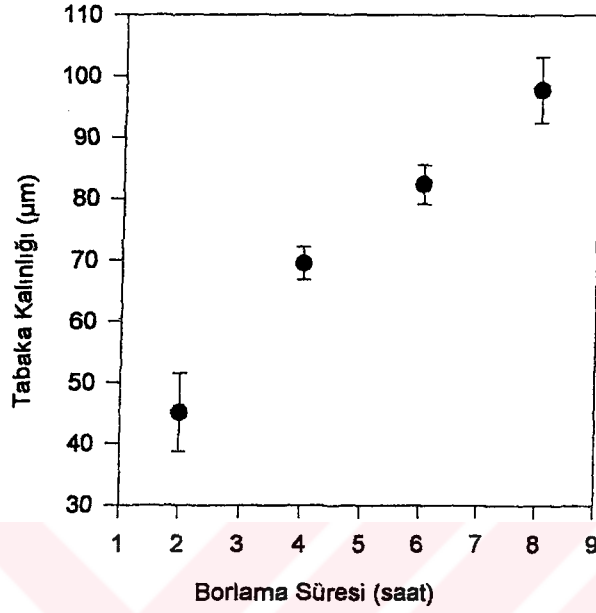
| Borlama Sıcaklığı<br>(°C) | Borlama Süresi<br>(saat) | Tabaka kalınlığı<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|---------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| 850                       | 2                        | 45.12 $\pm$ 6.40                      |
|                           | 4                        | 69.48 $\pm$ 2.67                      |
|                           | 6                        | 82.30 $\pm$ 3.20                      |
|                           | 8                        | 97.72 $\pm$ 5.33                      |
| 950                       | 2                        | 142.50 $\pm$ 11.43                    |
|                           | 4                        | 158.82 $\pm$ 8.00                     |
|                           | 6                        | 193.18 $\pm$ 12.00                    |
|                           | 8                        | 242.88 $\pm$ 24.57                    |

Tablo 5.4 C serisi numunelerde borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları

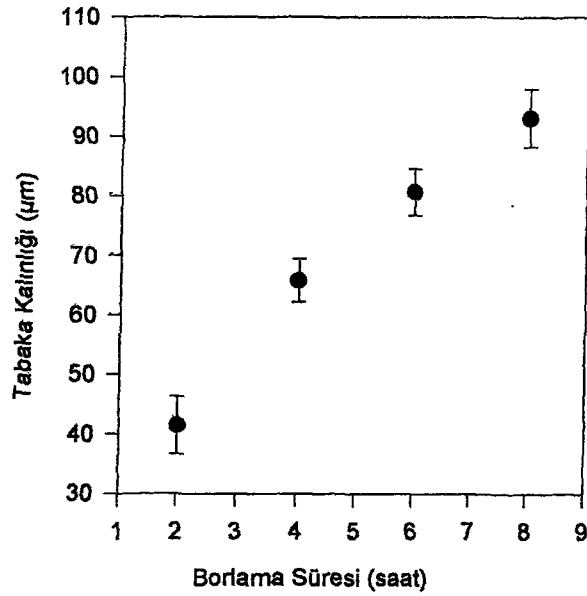
| Borlama Sıcaklığı (°C) | Borlama Süresi (saat) | Tabaka kalınlığı (μm) |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 850                    | 2                     | 41.50±4.86            |
|                        | 4                     | 65.84±3.65            |
|                        | 6                     | 80.70±3.89            |
|                        | 8                     | 93.10±4.86            |
| 950                    | 2                     | 114.76±7.38           |
|                        | 4                     | 139.68±7.20           |
|                        | 6                     | 162.46±9.41           |
|                        | 8                     | 185.46±11.54          |



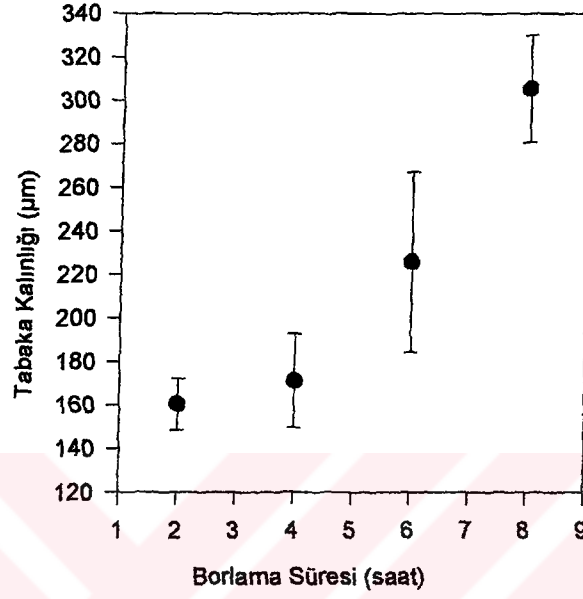
Şekil 5.39 850°C 'de borlanan A serisi KGDD 'lerde borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlığındaki değişim



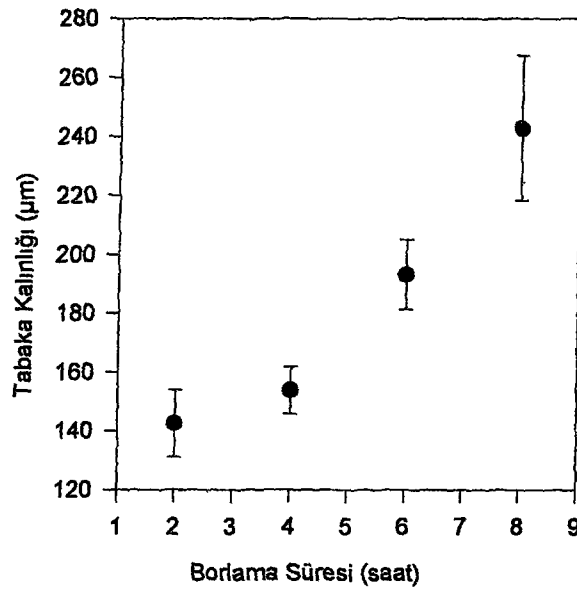
Şekil 5.40 850°C 'de borlanan B serisi KGDD 'lerde borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlığındaki değişim



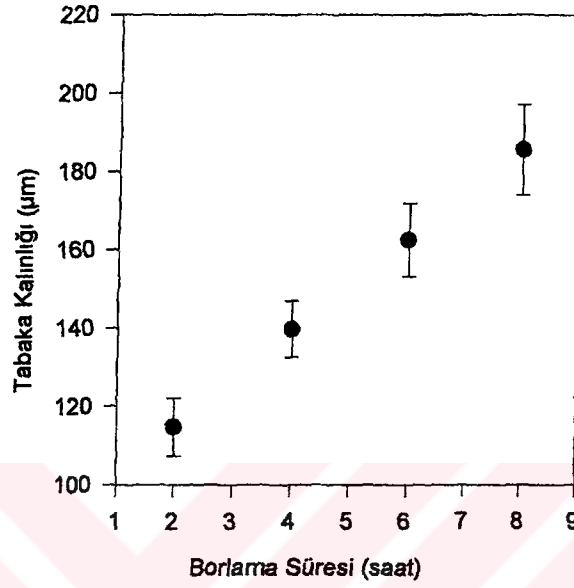
Şekil 5.41 850°C 'de borlanan C serisi KGDD 'lerde borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlığındaki değişim



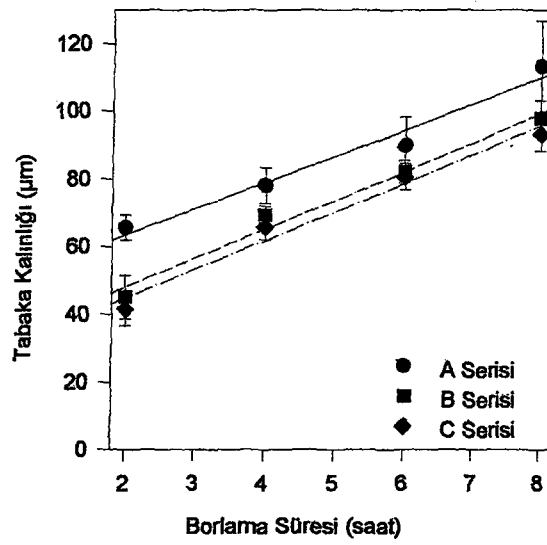
Şekil 5.42 950°C 'de borlanan A serisi KGDD 'lerde borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlığındaki değişim



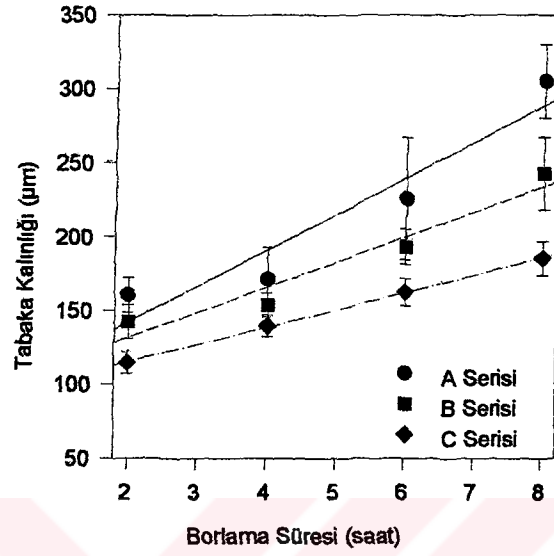
Şekil 5.43 950°C 'de borlanan B serisi KGDD 'lerde borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlığındaki değişim



Şekil 5.44 950°C 'de borlanan C serisi KGDD 'lerde borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlığındaki değişim

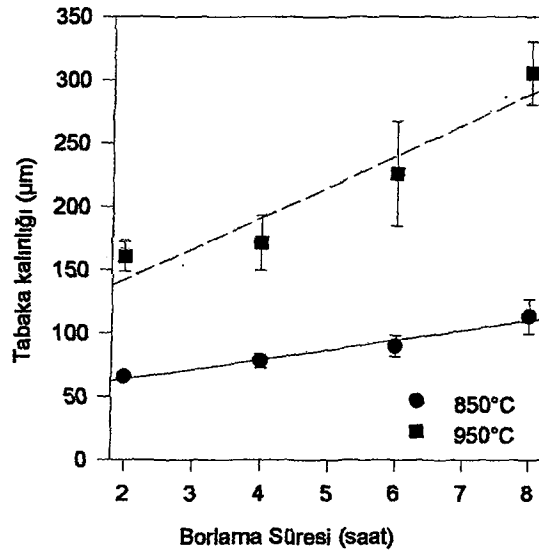


Şekil 5.45 850°C 'de borlanan A, B ve C serisi KGDD 'lerde borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlığındaki değişim

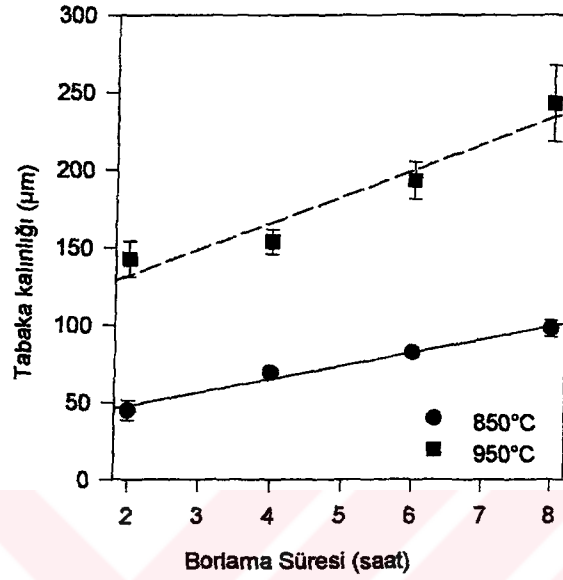


Şekil 5.46 950°C 'de borlanan A, B ve C serisi KGDD 'lerde borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlığındaki değişim

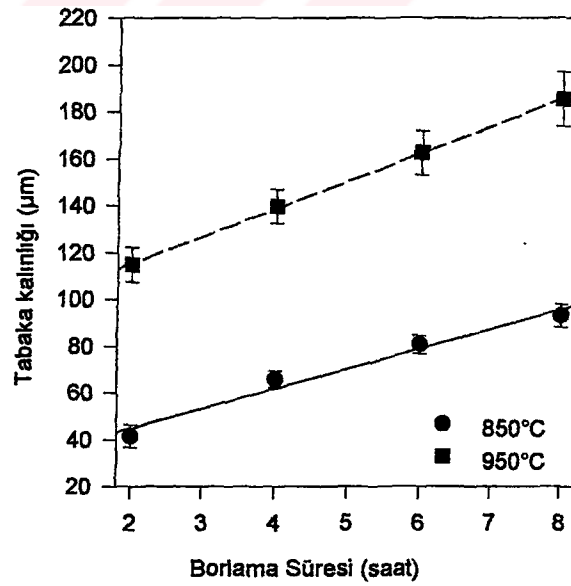
Şekil 5.47-49 'da A, B ve C serisi numunelerin borlama sıcaklığına bağlı olarak kaplama tabaka kalınlıklarındaki değişim gösterilmektedir.



Şekil 5.47 850°C ve 950°C sıcaklıklarda borlanan A serisi numunelerde borlama süresine bağlı olarak borür tabaka kalınlığının değişimi



Şekil 5.48 850°C ve 950°C sıcaklıklarda borlanan B serisi numunelerde borlama süresine bağlı olarak borür tabaka kalınlığının değişimi



Şekil 5.49 850°C ve 950°C sıcaklıklarda borlanan C serisi numunelerde borlama süresine bağlı olarak borür tabaka kalınlığının değişimi

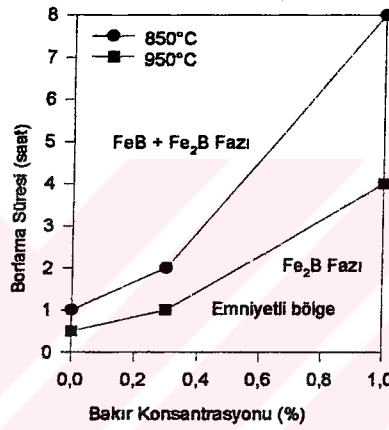
Bor kaplanmış KGDD numunelerin farklı bölgelerinde yapılan incelemeler ve ölçümlerde, borür tabaka kalınlığının sıcaklık ve süreye bağlı olarak artış gösterdiği tesbit edilmiştir. Difüzyon kontrollü sementasyon, karbürizasyon, nitrasyon ve borlama işlemlerinde zaman ve sıcaklığa bağlı olarak, tabaka kalınlığının artması beklenen bir sonuçtur. Ayrıca, matris içerisinde bulunan alaşım elementleri de borür tabaka kalınlıklarını etkilemektedir [84]. Yapılan borlama işlemlerinde borür tabaka kalınlıkları numunenin her tarafında homojen olarak gerçekleşmesine rağmen, yer yer farklı boylarda borür kolonlarına rastlanmaktadır. Şekil 5.17 -5.32.'de SEM geri saçılan elektron (SEM-BEI) mikroyapı görüntülerinde borür tabakası boyunca kolonların boylarındaki değişiklikler açıkça görülmektedir.

Bor kaplanmış KGDD malzemelerin tümünün yüzeyinde oluşan borür tabaka kalınlıkları borlama süresi ve sıcaklığının artışına bağlı olarak artış göstermektedir. Sırasıyla A, B ve C serisi numunelerde bakır miktarının artışı, borür tabaka kalınlığında azalmaya neden olmaktadır. KGDD 'lerde oluşan borür tabaka kalınlıkları 850°C 'de birbirine yakın değerler sergilemektedir. Ancak Cu konsantrasyonuna bağlı olarak, en yüksek borür tabaka kalınlığı A serisinde görülürken, en düşük tabaka kalınlığı C serisi numunelerde saptanmıştır. 850 °C sıcaklıkta A, B ve C serisi numunelerde elde edilen borür tabaka kalınlıklarının sırasıyla minimum ve maksimum değerleri, 65.64-113.26µm, 45.12-97.72µm ve 41.50-93.10 µm arasında değişmektedir.

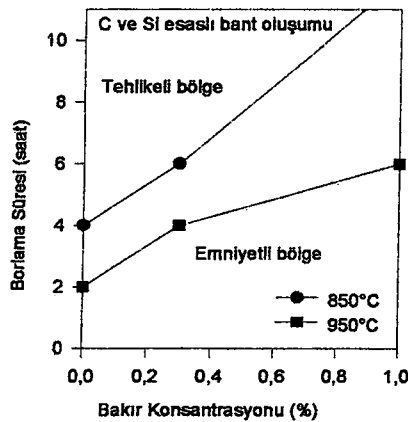
950°C sıcaklıkta borür tabaka kalınlıklarındaki değişim çok daha etkili olarak kendini göstermekte ve A serisi numunelerde borür tabaka kalınlıkları en yüksek seviyeye ulaşırken %1 Cu içeren C serisi numunelerde düşük seviyelerde gerçekleşmektedir. 950 °C sıcaklıkta borür tabaka kalınlıkları A, B ve C serisi numunelerde sırasıyla, minimum ve maksimum değerleri 160.58-305.48µm 142.50-242.88µm ve 114.76-185.46µm arasında değişmektedir.

Fe<sub>2</sub>B istenen bir borür fazıdır. Yaptığımız çalışmalar, KGDD'lerde borlama yapılacaksa, Şekil 5.50 'de verildiği gibi borlama süresi-% bakır konsantrasyonu emniyetli bölgede kalınacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu sayede homojen Fe<sub>2</sub>B

fazından oluşan bir borür tabakası elde edilebilmektedir. Örneğin %0.6 Cu içeren KGDD numune 950°C sıcaklıkta 2 saatin altında bir süre ile borlanmalıdır. Aynı şekilde C-Si esaslı bant teşekkülünün oluşumunu engellemek için de, Şekil 5.51’de verildiği gibi borlama süresi-% bakır konsantrasyonu emniyetli bölgede kalınacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu şartlar en ekonomik şartlardır. Çünkü borlama süresinin ve sıcaklığının artması, iki fazlı tabaka oluşumuna ve bant teşekkülüne neden olurken, maliyeti de artırmaktadır.



Şekil 5.50 Bor kaplanmış KGDD ’lerde  $Fe_2B$  fazından oluşan borür tabakasının elde edilmesi için bakır konsantrasyonunun, borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak değişimi.



Şekil 5.51 Bor kaplanmış KGDD ’lerde C-Si esaslı bant oluşumunu engellemek için bakır konsantrasyonunun, borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak değişimi.

### 5.3 Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği

A, B ve C serisi numunelerde borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak elde edilen tabaka kalınlıkları, sayfa 113’de Tablo 5.2-5.4 ’de verilmektedir. Bu üç seri KGDD malzemelerin yüzeyinde oluşan borür tabaka kalınlıklarındaki değişim, alaşım elementlerinin miktarına bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Borür tabaka kalınlığının kinetik açıdan incelenmesi sırasında, difüzyon katsayısının(D) hesaplanması için Eşitlik 5.1 ’den faydalanılmıştır.

$$d^2=Dt \quad (5.1)$$

Burada;

$d$  = Tabaka kalınlığı (cm)

$t$  = Zaman (sn)

$D$  = Difüzyon katsayısı ( $\text{cm}^2/\text{sn}$ ) ’nı göstermektedir.

Aktivasyon enerjisi(Q) ve frekans faktörü( $D_0$ ) değerlerinin belirlenmesinde ise Eşitlik 5.2 ’den yararlanılmıştır.

$$D=D_0 \exp (-Q/RT) \quad (5.2)$$

$D$  = Difüzyon katsayısı ( $\text{cm}^2/\text{sn}$ )

$D_0$ = Frekans faktörü ( $\text{cm}^2/\text{sn}$ )

$Q$  = Aktivasyon enerjisi (kal./mol.)

$R$  = Gaz sabiti, 1,987(kal./mol.°K)

$T$  = Sıcaklık (°K)

Hesaplamalar sonucunda C serisi numuneler için elde edilen difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi değerleri Tablo 5.5 ’de verilmektedir.

Tablo 5.5 C serisi numunelerin difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi.

| Özellik                                        | C Serisi              |                       |
|------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                                | 850°C                 | 950°C                 |
| Difüzyon Katsayısı ( $\text{cm}^2/\text{sn}$ ) | $1.70 \times 10^{-9}$ | $8.20 \times 10^{-8}$ |
| Aktivasyon Enerjisi (Kkal/mol)                 | 30.532                |                       |

C serisi numuneler için bor difüzyon katsayısı;  $D = 1.4 \times 10^{-3} \text{ Exp } (-15.365/T)$

Elde edilen bu kinetik verilerden ( $D$ ,  $Q$  ve  $D_0$ ) faydalanılarak, pratik açıdan verilen bir sıcaklık ve süre için tabaka kalınlıkları önceden belirlenebilmektedir.

Yapılan kinetik çalışmada, kullanılan KGDD ve banyo bileşimleri etkili olmaktadır. Bozkurt [24]'un çelikler üzerinde yapmış olduğu kinetik çalışmalarda da banyo ve malzeme bileşiminin kinetik değerler üzerinde etkili olduğu belirtilmektedir. İncelemeler sonucunda bulunan difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjileri, KGDD malzemelerin bileşiminde bulunan bakır miktarının tabaka kalınlığında etkili olduğunu ve dolayısıyla kinetik değerleri de etkilediğini açıkça göstermektedir.

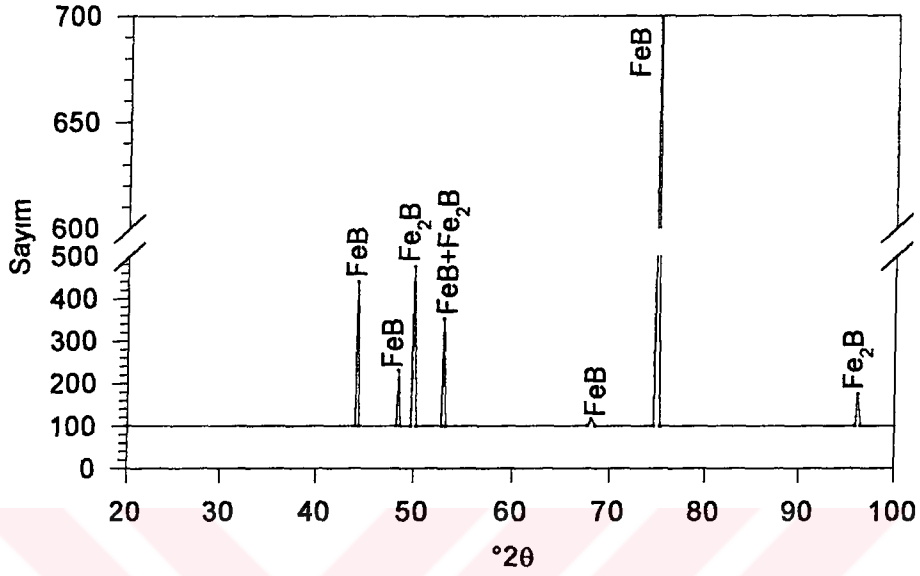
#### 5.4 X-Işınları Difraksiyon Analizi

Kaplama tabakasında oluşan fazları tespit etmek için x-ışınları difraksiyon analiz yöntemi kullanılmıştır. A, B ve C serisi numunelerin 850°C ve 950°C sıcaklıklarda 6 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulmaları sonucunda elde edilen borür tabakalarında oluşan fazlar, PHILIPS marka x-ışınları difraktometresi kullanılarak saptanmaya çalışılmıştır. Analiz sırasında,  $\text{Co-K}_\alpha (\lambda = 1.7902 \text{ \AA})$  ışın demeti kullanılmıştır. 850°C ve 950°C sıcaklıklar için FeB ve  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazlarının saptandığı 2 $\theta$  değerleri, Tablo 5.6 'da verilmiştir. Ayrıca 850°C ve 950°C sıcaklıklarda 6 saat süre ile borlanan A, B ve C serisi numunelerin x-ışınları difraksiyon paternleri Şekil 5.52-5.57 'de sırası ile verilmektedir.

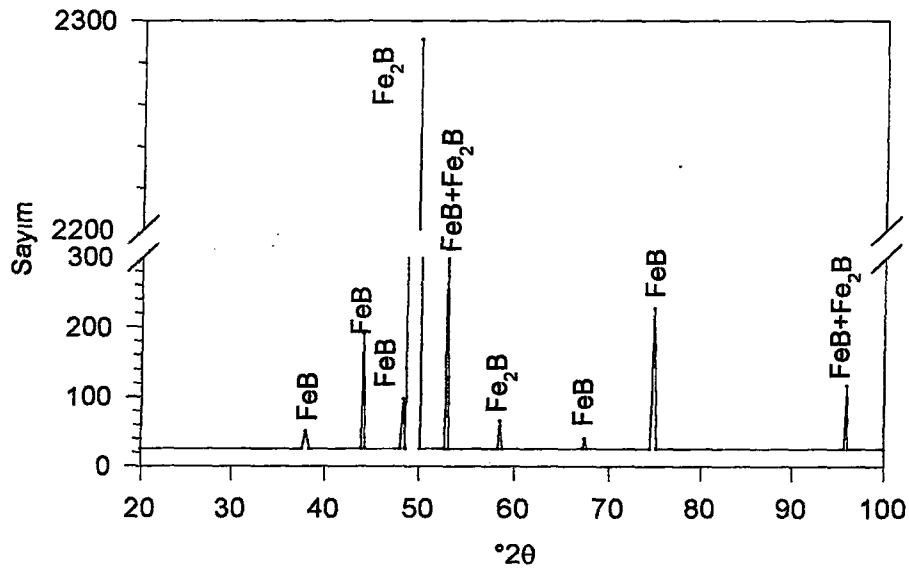
A, B ve C serisi numuneler üzerinde yapılan x-ışınları difraksiyon analizlerinde FeB ve  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazlarının bütün serilerde bulunduğu görülmüştür. Ayrıca, SEM-BEI geri saçılan elektron görüntülerinde borür tabakasının iki fazlı olduğu ve daha önceki araştırmacıların yapmış oldukları çalışmalarda bu iki fazdan dış yüzeyde oluşanın FeB ve bunun altında oluşan borür fazının ise  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazı olduğu belirtilmektedir [21].

Tablo 5.6 850 ve 950°C sıcaklıklarda 6 saat süre ile borlanan A, B ve C serisi numunelerde borür tabakasında tesbit edilen  $\text{Fe}_2\text{B}$  ve  $\text{FeB}$  fazlarının difraksiyon açıları. (+) işareti verilen açıda fazın varlığını, (-) işareti faz olmadığını göstermektedir.

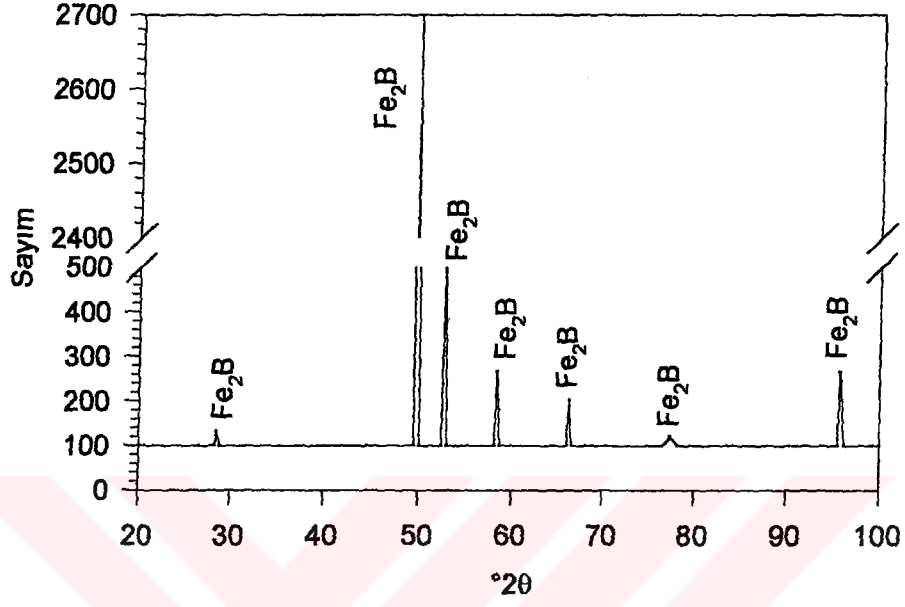
| Bileşik               | 2θ     | Küresel Grafitli Dökme Demir |       |          |       |          |       |
|-----------------------|--------|------------------------------|-------|----------|-------|----------|-------|
|                       |        | A Serisi                     |       | B Serisi |       | C Serisi |       |
|                       |        | 850°C                        | 950°C | 850°C    | 950°C | 850°C    | 950°C |
| $\text{Fe}_2\text{B}$ | 28,67  | -                            | +     | -        | -     | +        | -     |
|                       | 31,084 | -                            | -     | -        | -     | -        | -     |
|                       | 40,998 | -                            | -     | -        | +     | -        | -     |
|                       | 49,811 | +                            | +     | +        | -     | +        | +     |
|                       | 52,824 | +                            | +     | +        | +     | +        | +     |
|                       | 58,434 | -                            | +     | +        | -     | +        | -     |
|                       | 59,305 | -                            | -     | -        | -     | -        | +     |
|                       | 66,669 | -                            | +     | -        | -     | +        | -     |
|                       | 67,191 | -                            | -     | -        | -     | -        | +     |
|                       | 81,059 | -                            | -     | -        | -     | +        | -     |
|                       | 88,156 | -                            | -     | -        | -     | -        | -     |
|                       | 95,937 | +                            | +     | +        | -     | +        | +     |
|                       | 97,464 | -                            | -     | -        | -     | -        | -     |
| $\text{FeB}$          | 31,76  | -                            | -     | -        | -     | -        | -     |
|                       | 37,938 | -                            | -     | +        | -     | -        | -     |
|                       | 44,078 | +                            | -     | +        | -     | -        | +     |
|                       | 46,265 | -                            | -     | -        | -     | -        | -     |
|                       | 48,245 | +                            | -     | +        | -     | -        | -     |
|                       | 52,802 | +                            | +     | +        | +     | -        | +     |
|                       | 56,029 | -                            | -     | -        | -     | -        | -     |
|                       | 59,529 | -                            | -     | -        | -     | -        | +     |
|                       | 64,669 | -                            | -     | -        | -     | -        | -     |
|                       | 66,405 | -                            | -     | -        | -     | -        | +     |
|                       | 68,005 | -                            | -     | -        | -     | -        | -     |
|                       | 74,745 | +                            | -     | +        | -     | -        | +     |
|                       | 75,925 | +                            | -     | -        | +     | -        | -     |
|                       | 83,482 | -                            | -     | -        | -     | -        | -     |
|                       | 86,71  | -                            | -     | -        | -     | -        | -     |
|                       | 87,006 | -                            | -     | -        | -     | -        | -     |
|                       | 91,706 | -                            | -     | -        | -     | -        | -     |
|                       | 92,577 | -                            | -     | -        | -     | -        | -     |
|                       | 92,785 | -                            | -     | -        | -     | -        | -     |
|                       | 93,337 | -                            | -     | -        | -     | -        | -     |
|                       | 94,917 | -                            | -     | -        | -     | -        | -     |
|                       | 96,398 | -                            | -     | -        | -     | -        | +     |



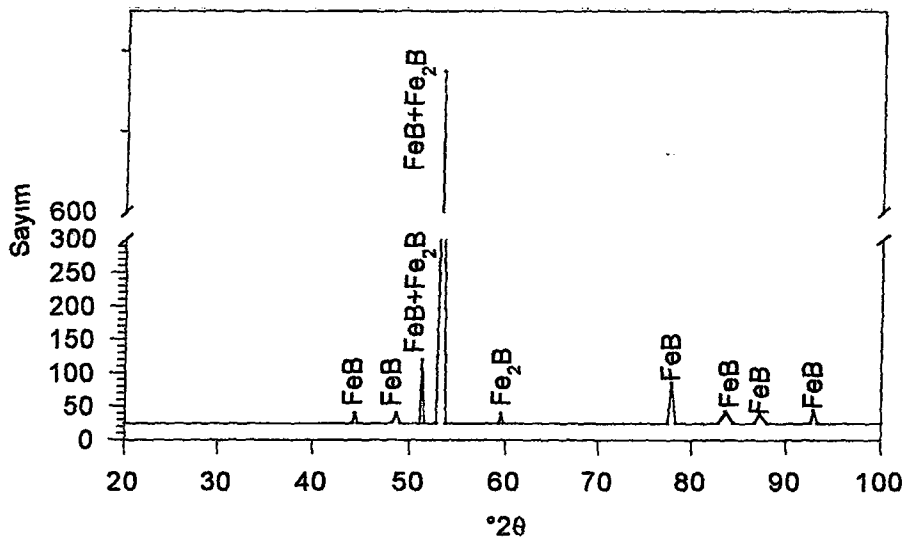
Şekil 5.52 850°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış A serisi numunenin x-ışınları difraksiyon paterni



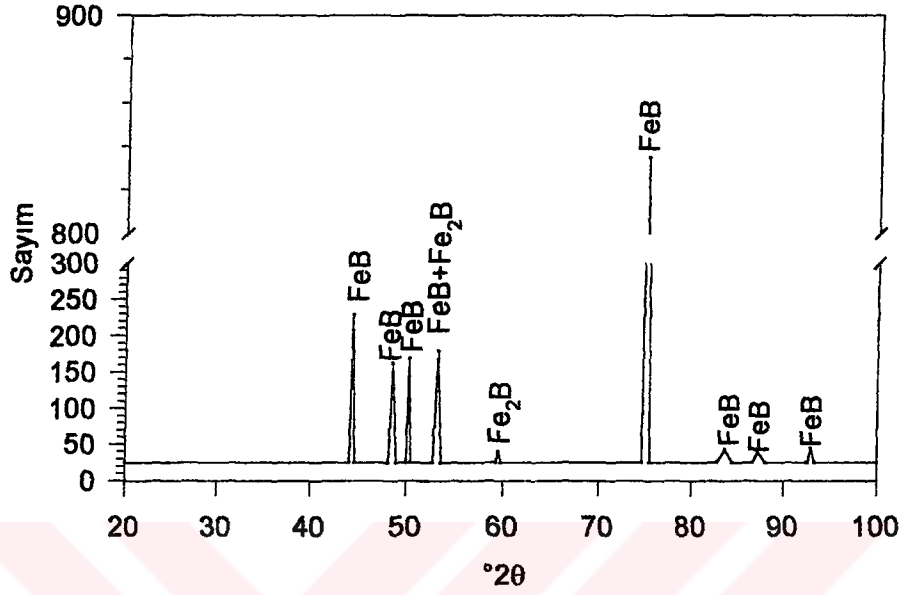
Şekil 5.53 850°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış B serisi numunenin x-ışınları difraksiyon paterni



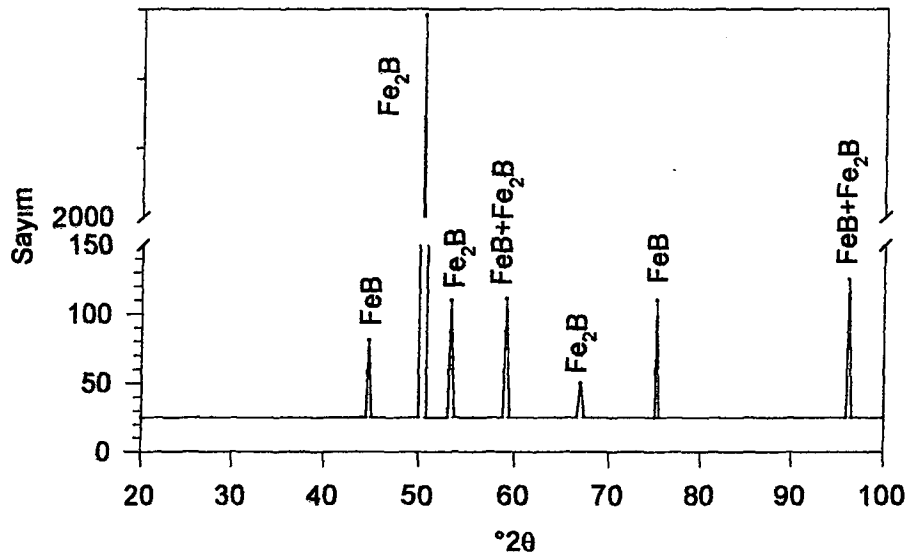
Şekil 5.54 850°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış C serisi numunenin x-ışınları difraksiyon paterni



Şekil 5.55 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış A serisi numunenin x-ışınları difraksiyon paterni



Şekil 5.56 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış B serisi numunenin x-ışınları difraksiyon paterni



Şekil 5.57 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanmış C serisi numunenin x-ışınları difraksiyon paterni

V.S. TIRAZÜSTÜK İNŞAAT  
 ÇOKİŞLİMLİ BORLAMA  
 2011

### 5.5 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elementer Analiz İncelemesi

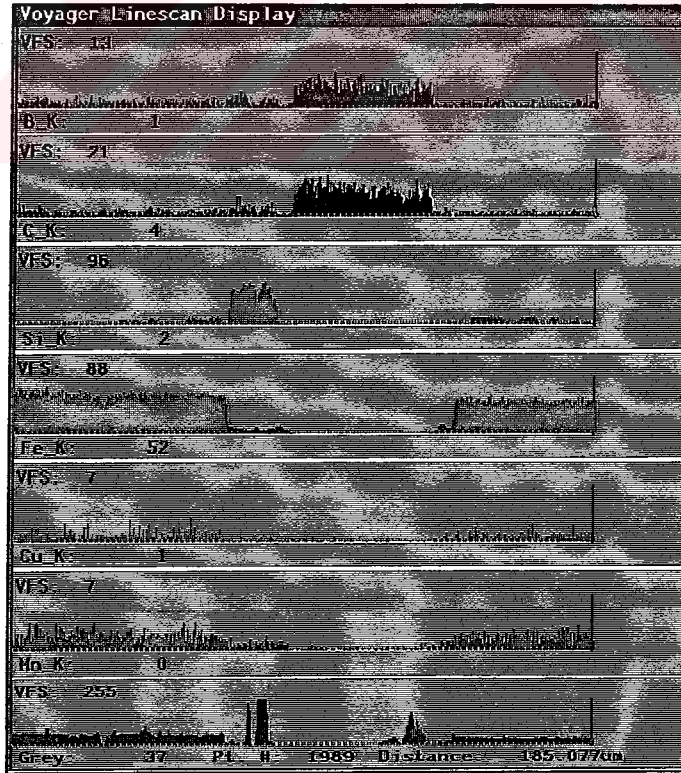
Borlanmış A, B ve C serisi numunelerin metalografik olarak incelenen yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri, taramalı elektron mikroskobunda 500 büyütme ve 15 kV enerjide ikincil elektronlardan faydalanılarak elde edilmiştir (Şekil 5.17-5.32). Ayrıca, 950 °C sıcaklıkta 6 saat süreyle borlanan A, B ve C serisi numunelerin lineer elementer analizleri borür tabakası boyunca gerçekleştirilmiş (Şekil 5.58-5.60) ve tabakaların belirli bölgelerinden noktasal analizleri alınarak, kaplama tabakası içerisinde bulunan elementler belirlenmiştir (Şekil 5.61-5.62).

Optik mikroskop incelemeleri haricinde, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan geri saçılan elektronlara dayalı incelemelerde (SEM-BEI), borür tabakasında yer alan fazların, renk farklılığından ayırt edilmeleri mümkün olmuştur (Şekil 5.17-5.32). Genel olarak, bütün seriler üzerinde yapılan çalışmalarda, FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının miktarı bileşimlere bağlı olarak değişmektedir. C serisi numunelerde, düşük sıcaklıklarda ve yüksek sıcaklık-düşük sürelerde elde edilen kaplamalarda, FeB fazı ihmal edilebilir seviyede az gerçekleşirken diğer serilerde bu fazların oldukça fazla olduğu görülmektedir.

Şekil 5.17-5.24 'de verilen SEM-BEI mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, A ve B serisi numunelerde borlama sonrasında oluşan tabakaların en dış yüzeyde koyu renkli FeB fazı içerdiği ve kaplama-matris arayüzeyinde karbon ve silisyum elementlerinin birikiminin olduğu görülmektedir. C serisi numunelerde ise FeB fazına eser miktarda yada hiç rastlanmamaktadır.

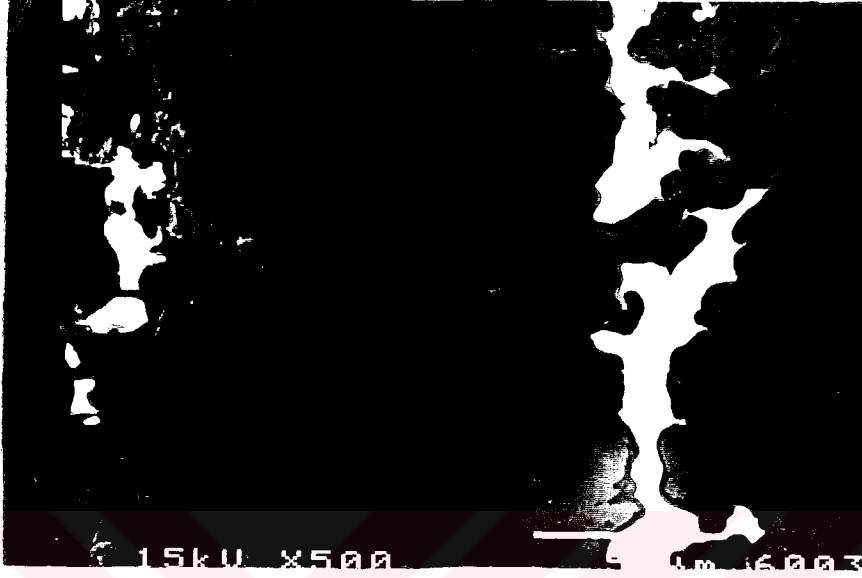


(a)

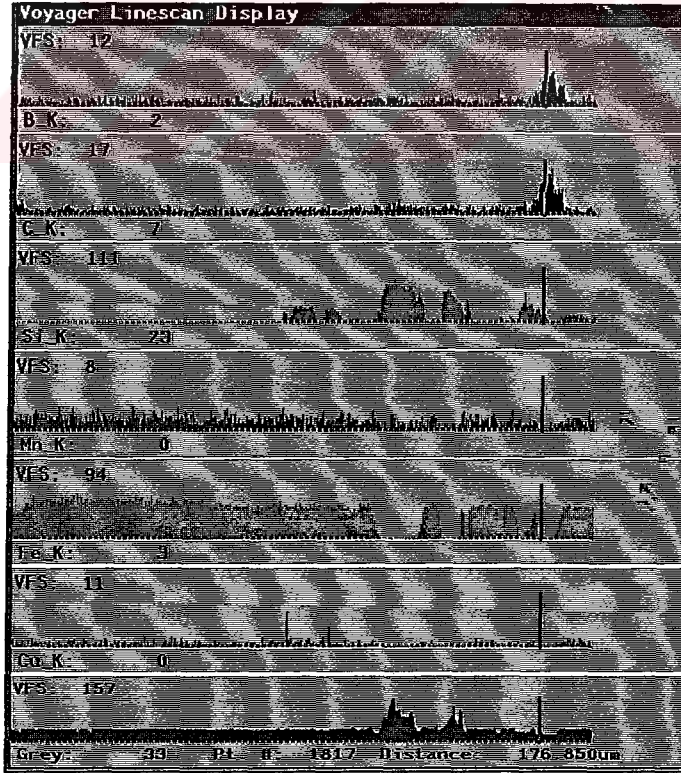


(b)

Şekil 5.58 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile bor kaplanmış A serisi numunenin kaplama tabakasının elementer analiz dağılımı. (a) Mikroyapı görüntüsü, (b) Çizgisel analiz diyagramı



(a)

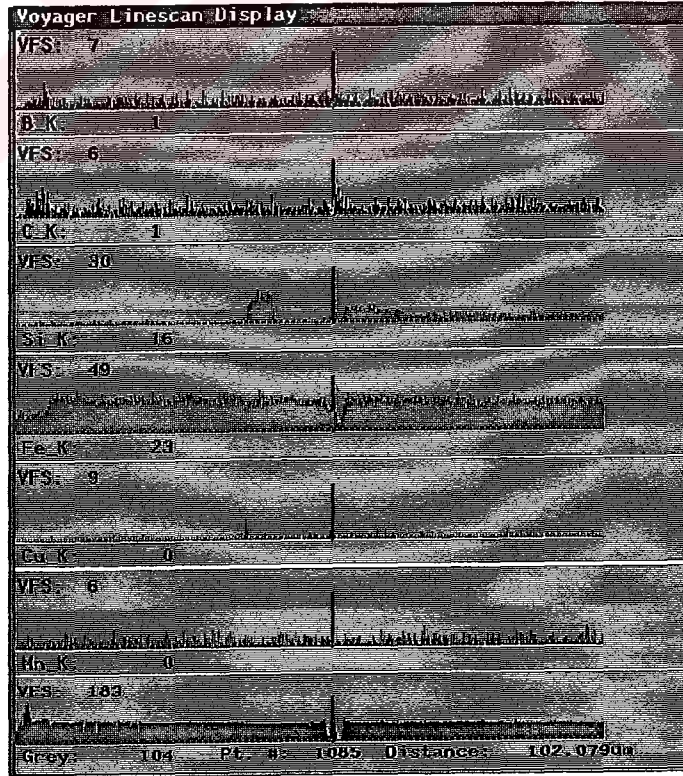


(b)

Şekil 5.59 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile bor kaplanmış B serisi numunenin kaplama tabakasının elementer analiz dağılımı. (a) Mikroyapı görüntüsü, (b) Çizgisel analiz diyagramı

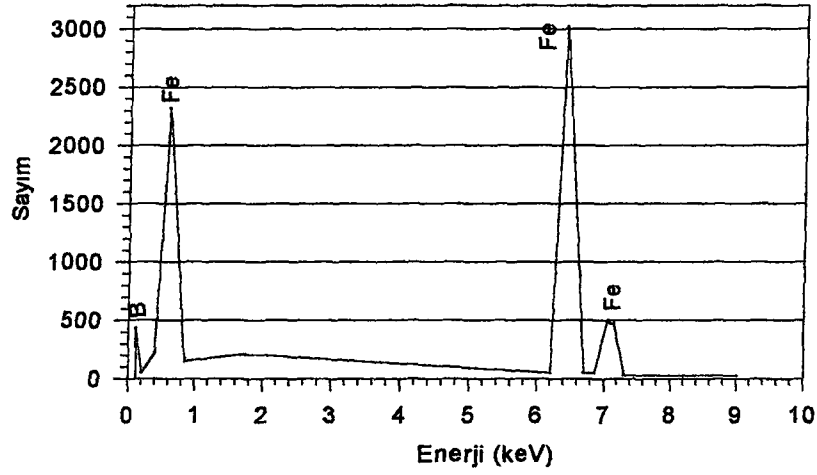


(a)

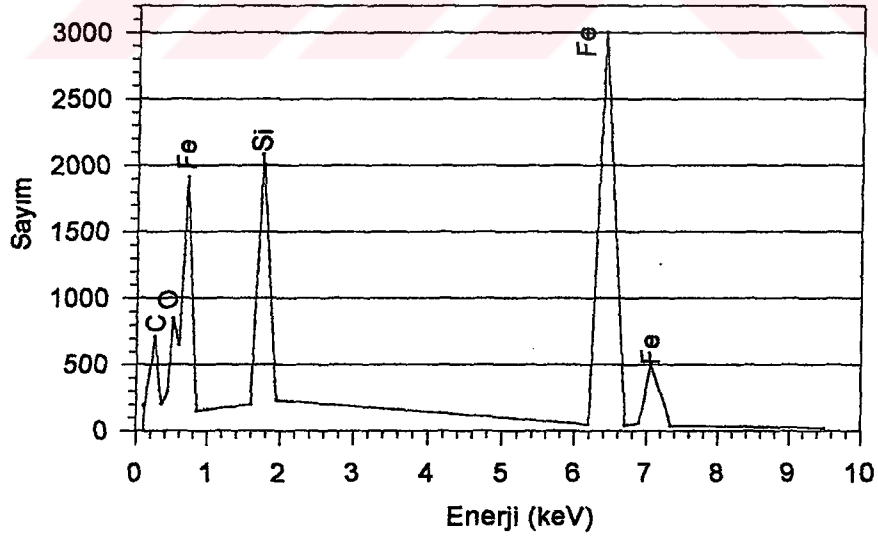


(b)

Şekil 5.60 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile bor kaplanmış C serisi numunenin kaplama tabakasının elementer analiz dağılımı. (a) Mikroyapı görüntüsü, (b) Çizgisel analiz diyagramı



Şekil 5.61 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile bor kaplanmış C serisi numunede, kaplama tabakasının noktasal analiz diyagramı



Şekil 5.62 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile bor kaplanmış A serisi numunede kaplama-matris arayüzeyinde bulunan siyah tabakanın noktasal analiz diyagramı

950°C 'de 6 saatlik sürelerde borlama işlemine tabi tutulan A ve B serisi numuneler üzerinde yapılan çizgisel analizlerde karbon ve silisyumun borür tabakası boyunca matrise doğru ötelenerek, kaplama-matris arayüzeyinde biriktiği görülmektedir. Aynı şekilde, Vettters [75] 'in silisyum içeren çelikler üzerinde yapmış olduğu çalışmalarda, benzer sonuçlara rastlanmaktadır. Silisyum içeren çeliklerde, kaplama-matris arayüzeyinde silisyum ve karbon birikerek, diğer çeliklerin aksine kaplama tabakasının hemen altında ferritik bir matris oluşmaktadır. Silisyum ve karbonun kaplama tabakası içerisinde çözünürlüğü oldukça sınırlıdır. Ancak %1 Cu içeren C serisi numunelerde kaplama-matris arayüzeyinde karbon ve silisyumun birikimi önemli ölçüde engellenerek, borür tabakası boyunca elementlerin homojen bir dağılım sergilediği görülmüştür (Şekil 5.9-5.16). Demir esaslı alaşımlarda bakır, perlit fazını kararlı hale getirici bir element olması sebebiyle [7], Si-ferrit oluşumunu sınırlayarak, karbonun perlit oluşturacak şekilde dağılım göstermesinde etkili olmuştur. Kaplama-matris arayüzeyinde karbon ve silisyumun birikmesi, noktasal ve çizgisel analizlerle saptanmıştır (Şekil 5.58-5.62).

### 5.6 Sertlik Ölçümleri

A, B ve C serisi numunelerin işlem öncesi (döküm) sertlik değerleri Tablo 5.7'de verilmektedir. Borlama sonrasında kaplama tabakasının yüzeyden itibaren sertlik dağılımları Leitz marka vickers sertlik cihazında 100gr. yük altında ölçülmüştür. Borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak, A, B ve C serisi numunelerin yüzeyinde oluşan borür tabakalarının sertlik dağılımları Tablo 5.8-5.13 'de ve Şekil 5.63-5.68 'de verilmektedir.

Tablo 5.7 A, B ve C serisi numunelerin işlem öncesi sertlikleri.

| Numune   | Sertlik (HB) |
|----------|--------------|
| A Serisi | 158          |
| B Serisi | 185          |
| C Serisi | 245          |

Borlanan bütün numunelerde sertlik, dış yüzeyden muayyen bir derinliğe kadar en yüksek değerine çıkmakta ve daha sonra lineerlik arzetmekte ve parabolik bir azalma ile matris sertliğine düşmektedir. En yüksek sertlik değeri, borür fazlarının yer aldığı kaplama tabakalarında ölçülmüştür. Çelikler [4,6,21] ve demir dışı metaller üzerinde [45] yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla borun demirle oluşturduğu bileşikler ve seramik kompozitler (FeB, Fe<sub>2</sub>B) en sert kısımları meydana getirmektedir. Borür tabakasının oluşturduğu kolonsal bölge, matris malzemesinin bileşimine ve borlama şartlarına bağlı olarak değişiklik arz etmektedir. Borlama işlemine tabi tutulan üç farklı KGDD sınıfında da FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarına rastlanmıştır. Bu iki fazın varlığı optik mikroskop, SEM-BEI ve x-ışınları çalışmaları ile kanıtlanmıştır. Yapılan incelemelerde, borür tabakasının sertliğinin FeB ve Fe<sub>2</sub>B faz dağılımından etkilendiği görülmektedir. Araştırmacılar tarafından sertlik dağılımlarının yalnızca plastisiteye bağlı olmadığı, bunun yanında elastik-plastik parametrelere de bağlı olduğu belirtilmektedir [45,71]. Bu durumda, aynı malzeme üzerinde farklı bileşenlere ait bileşim ve oryantasyon farkı, sertlik ölçümleri üzerinde muhtemelen etkili olmaktadır.

Sertlik-yüzeyden itibaren mesafe diyagramlarında (Şekil 5.63-5.68) ve ilgili tablolarda (Tablo 5.8-5.13) en yüksek sertlik değerlerinin tesbit edildiği kolonlarda sertlikteki küçük değişiklikler muhtemelen, borürlere ait elastik-plastik parametreler ve faz dağılımlarındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Ayrıca, KGDD'lerde, sertlik ölçümlerinin yapıldığı bölgenin hemen altında küresel grafit bulunma olasılığı da her zaman vardır. Bununla birlikte, ölçümlerde büyük farklılıklar görülmemiştir.

Borlama işlemi öncesinde üç ayrı KGDD'in sertlik değerleri birbirlerinden farklı olarak tesbit edilmiştir (Tablo 5.7). Alaşım elementi olarak kullanılan bakır miktarı, KGDD malzemelerde perlit fazını dengeli hale getirerek, sertliğini artırmaktadır. A, B ve C serisi numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda, başlangıç sertliğinin borür tabaka sertlikleri üzerine belirgin bir etkisine rastlanmamıştır. Ancak bakır içermeyen A ve düşük miktarlarda bakır içeren B serisi numunelerin, borür tabaka kalınlığının ve sertliğinin, C serisi numunelere nazaran daha yüksek olduğu görülmüştür. C serisi numunelerde, FeB fazının bulunmaması yada ihmal

edilebilecek seviyede az olması bu farklılığın sebebini açıklamaktadır. Bu durumun, SEM-BEI mikroyapı görüntülerinde de tesbit edildiği üzere, A ve B serisi numunelerin bor kaplamalarında FeB fazının hakim faz olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. FeB fazının, Fe<sub>2</sub>B fazına göre daha sert olduğu bir çok araştırmacı tarafından belirtilmektedir [13,29,36].

Yüzeyden itibaren ölçülen sertlik dağılımları, kolonların boylarına göre değişmektedir. Ayrıca, kaplama tabakasının sertliği faz dağılımıyla da ilgilidir. Yapılan sertlik ölçümleri, en az beş farklı bölgeden alınarak, ortalama değerleri ve standart sapmaları tesbit edilmiştir. Ancak ölçüm yapılan yerdeki kolon boyu her zaman gerçek tabaka kalınlığını temsil etmemekle birlikte, ortalama bir değer vermektedir. Şekil 5.63-5.68 'de sertlik-yüzeyden itibaren mesafe diyagramlarında görülen en yüksek sertlik değeri, ölçüm yapılan kolona ait mesafe ile kolonun bittiği uzaklığı temsil etmektedir.

A, B ve C serisine ait numunelerde borlama süresi (2-8 saat) ve sıcaklığına (850°C ve 950°C) bağlı olarak yüzeyden itibaren matrise doğru elde edilen sertlik dağılımları sırası ile Şekil 5.63-5.68 'de verilmektedir. Ayrıca Şekil 5.69-5.76 'da 850°C ve 950 °C sıcaklıklarda A, B ve C serisi numunelerin her bir borlama süresi için sertlik dağılımları sırasıyla birarada verilmektedir.

Tablo 5.8 850°C 'de borlanmış A serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.

| Yüzeyden İtibaren<br>Mesafe (µm) | Sertlik (HV) (kg/mm <sup>2</sup> ) |        |        |        |
|----------------------------------|------------------------------------|--------|--------|--------|
|                                  | 2 saat                             | 4 saat | 6 saat | 8 saat |
| 15                               | 2065                               | 2145   | 2290   | 2145   |
| 35                               | 925                                | 925    | 1630   | 2145   |
| 50                               | 410                                | 450    | 610    | 1350   |
| 100                              | 410                                | 350    | 435    | 450    |
| 150                              | 410                                | 435    | 435    | 450    |

Tablo 5.9 850°C 'de borlanmış B serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.

| Yüzeyden İtibaren<br>Mesafe (μm) | Sertlik (HV) |        |        |        |
|----------------------------------|--------------|--------|--------|--------|
|                                  | 2 saat       | 4 saat | 6 saat | 8 saat |
| 15                               | 1540         | 2065   | 2065   | 2145   |
| 35                               | 410          | 900    | 900    | 2085   |
| 50                               | 350          | 515    | 440    | 775    |
| 100                              | 350          | 330    | 435    | 400    |
| 150                              | 350          | 330    | 435    | 400    |

Tablo 5.10 850°C 'de borlanmış C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.

| Yüzeyden İtibaren<br>Mesafe (μm) | Sertlik (HV) |        |        |        |
|----------------------------------|--------------|--------|--------|--------|
|                                  | 2 saat       | 4 saat | 6 saat | 8 saat |
| 15                               | 1160         | 1160   | 1665   | 2210   |
| 35                               | 410          | 464    | 905    | 1765   |
| 50                               | 350          | 464    | 555    | 830    |
| 100                              | 350          | 464    | 445    | 465    |
| 150                              | 350          | 464    | 445    | 465    |

Tablo 5.11 950°C 'de borlanmış A serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.

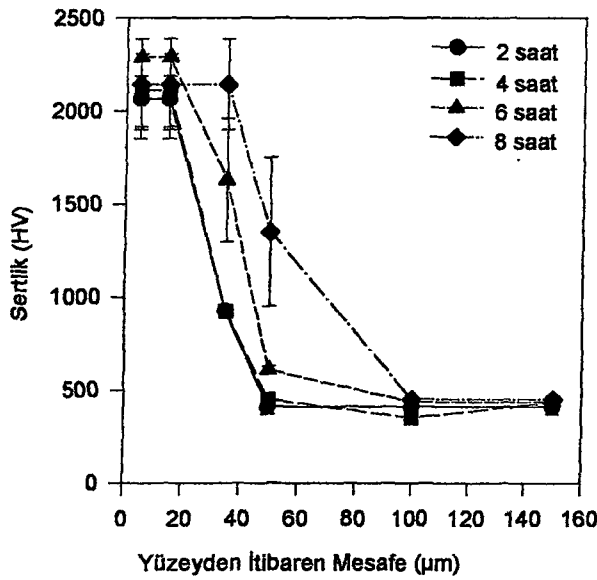
| Yüzeyden İtibaren<br>Mesafe (μm) | Sertlik (HV) |        |        |        |
|----------------------------------|--------------|--------|--------|--------|
|                                  | 2 saat       | 4 saat | 6 saat | 8 saat |
| 15                               | 2130         | 2130   | 2210   | 2210   |
| 35                               | 1800         | 1990   | 2210   | 2210   |
| 50                               | 880          | 1800   | 2210   | 2210   |
| 100                              | 464          | 880    | 2210   | 2210   |
| 150                              | 464          | 515    | 1990   | 2000   |
| 200                              | 464          | 515    | 755    | 915    |
| 250                              | 464          | 495    | 495    | 500    |
| 300                              | 464          | 495    | 495    | 480    |
| 350                              | 464          | 495    | 480    | 480    |

Tablo 5.12 950°C 'de borlanmış B serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.

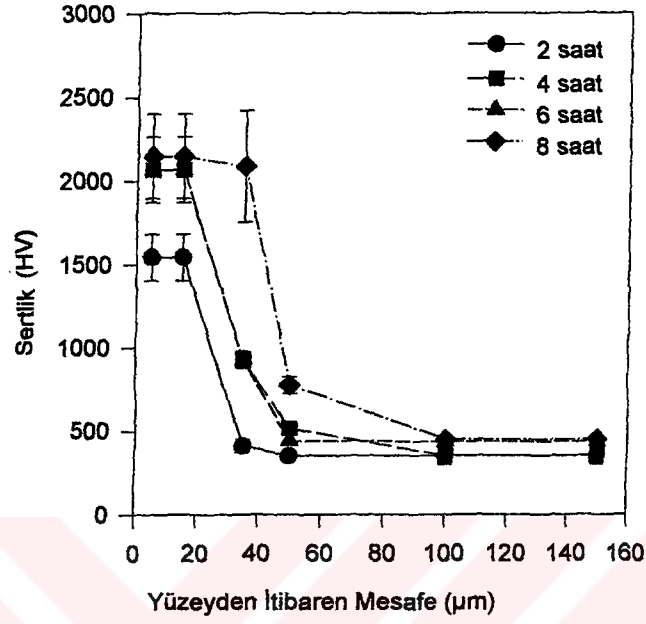
| Yüzeyden İtibaren<br>Mesafe (μm) | Sertlik (HV) |        |        |        |
|----------------------------------|--------------|--------|--------|--------|
|                                  | 2 saat       | 4 saat | 6 saat | 8 saat |
| 15                               | 2000         | 2000   | 2140   | 2280   |
| 35                               | 1855         | 1920   | 2140   | 2280   |
| 50                               | 715          | 1855   | 1930   | 2145   |
| 100                              | 455          | 770    | 1495   | 2000   |
| 150                              | 440          | 465    | 555    | 855    |
| 200                              | 440          | 450    | 435    | 455    |
| 250                              | 440          | 450    | 435    | 455    |

Tablo 5.13 950°C 'de borlanmış C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.

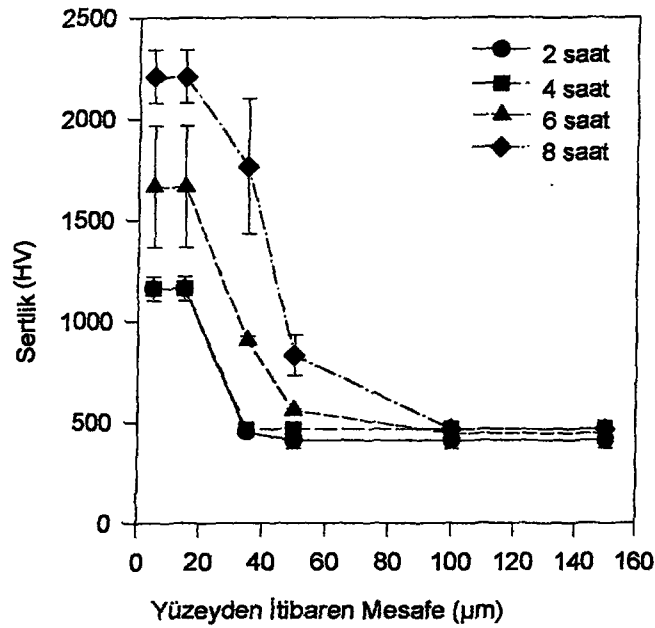
| Yüzeyden İtibaren<br>Mesafe (μm) | Sertlik (HV) |        |        |        |
|----------------------------------|--------------|--------|--------|--------|
|                                  | 2 saat       | 4 saat | 6 saat | 8 saat |
| 15                               | 1920         | 1920   | 1985   | 2140   |
| 35                               | 1665         | 1920   | 1985   | 2140   |
| 50                               | 555          | 1490   | 1985   | 1990   |
| 100                              | 445          | 445    | 755    | 755    |
| 150                              | 445          | 445    | 555    | 555    |
| 200                              | 445          | 445    | 455    | 455    |
| 250                              | 445          | 445    | 455    | 455    |



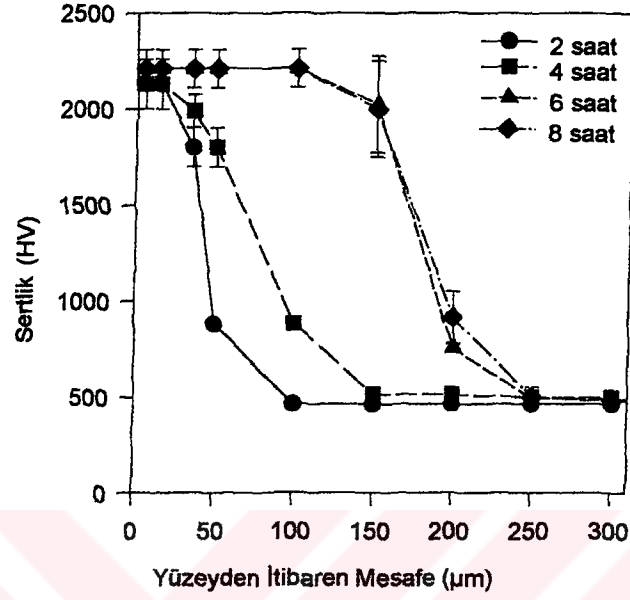
Şekil 5.63 850°C 'de bor kaplanmış A serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları



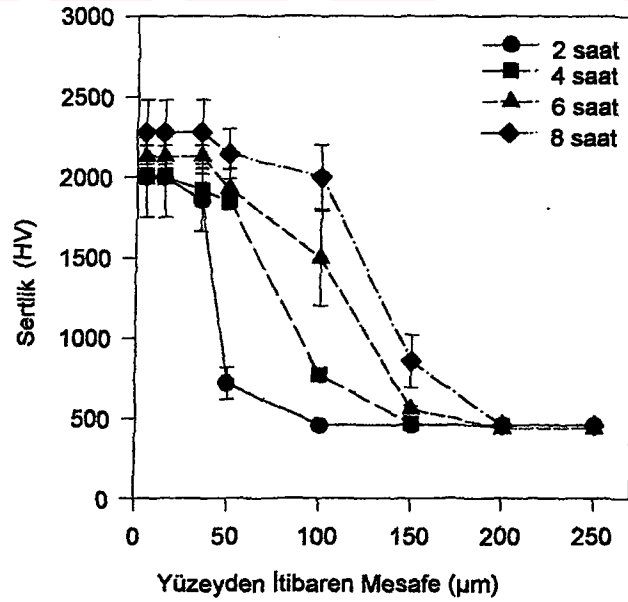
Şekil 5.64 850°C 'de bor kaplanmış B serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları



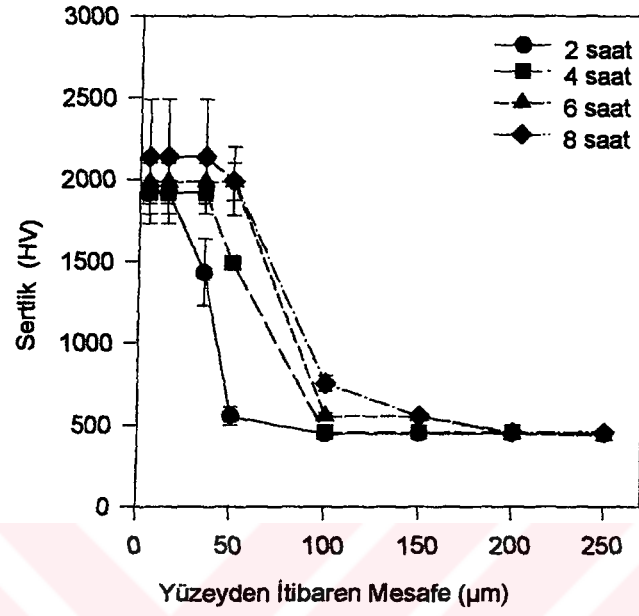
Şekil 5.65 850°C 'de bor kaplanmış C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları



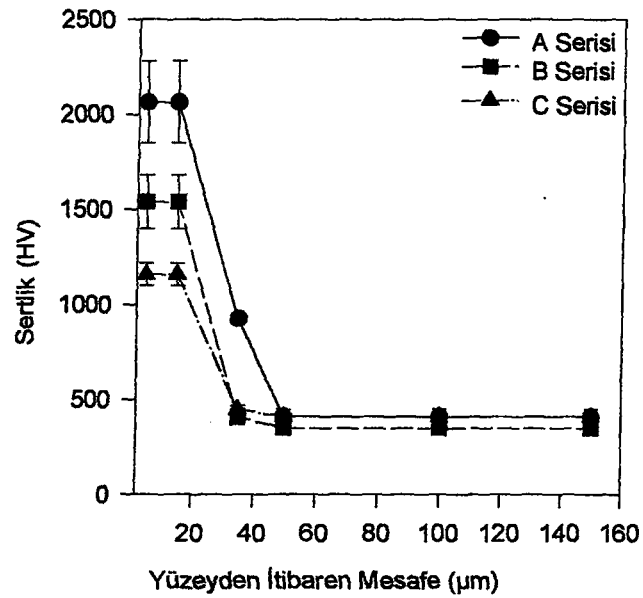
Şekil 5.66 950°C 'de bor kaplanmış A serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları



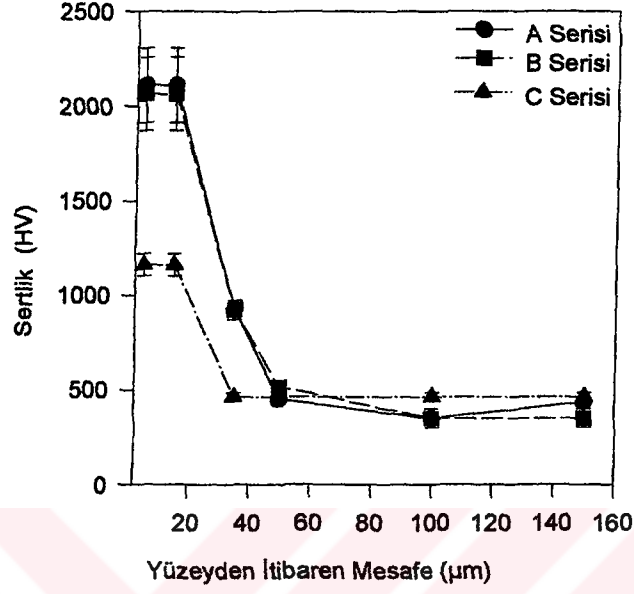
Şekil 5.67 950°C 'de bor kaplanmış B serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları



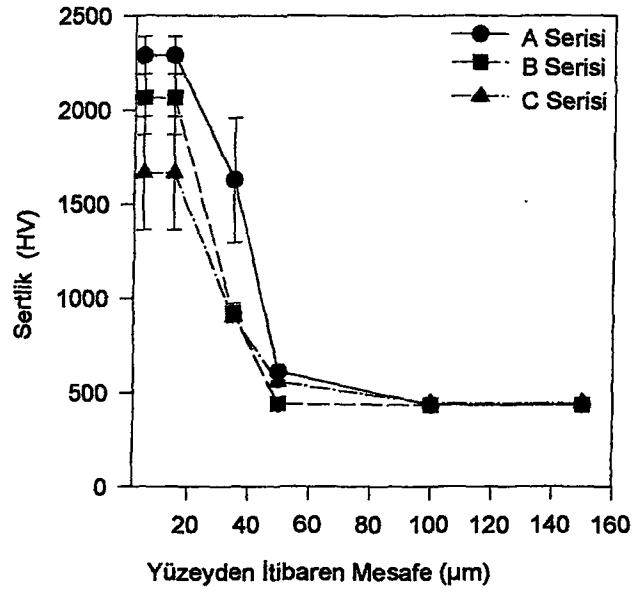
Şekil 5.68 950°C 'de bor kaplanmış C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları



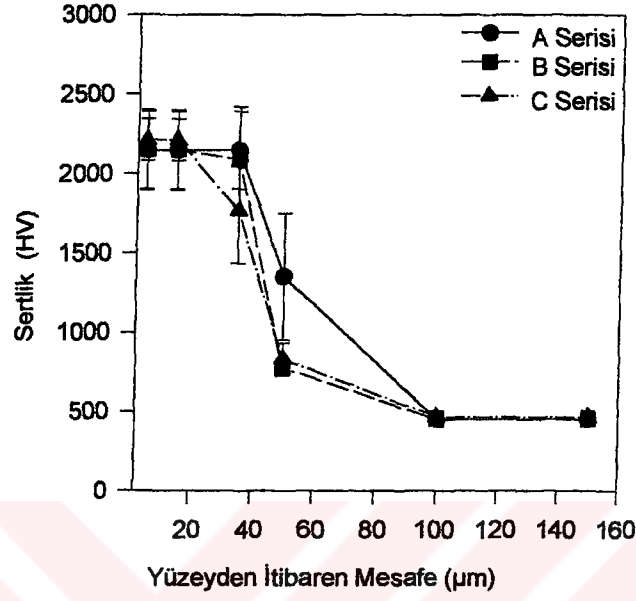
Şekil 5.69 850°C 'de 2 saat süre ile bor kaplanmış A, B ve C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları



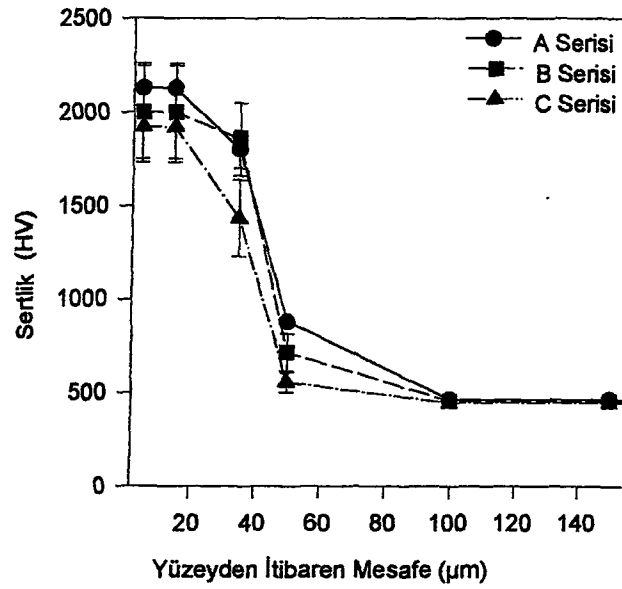
Şekil 5.70 850°C 'de 4 saat süre ile bor kaplanmış A, B ve C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları



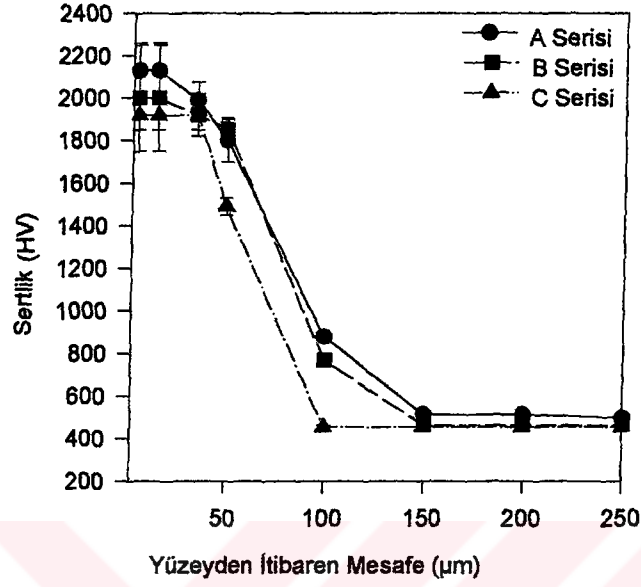
Şekil 5.71 850°C 'de 6 saat süre ile bor kaplanmış A, B ve C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları



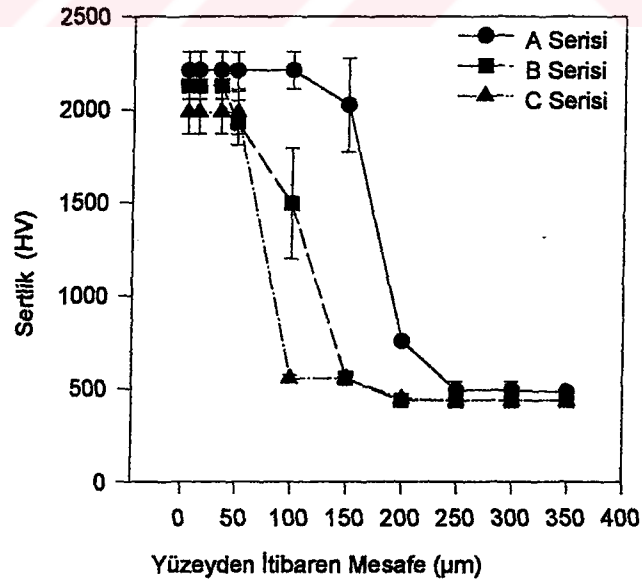
Şekil 5.72 850°C 'de 8 saat süre ile bor kaplanmış A, B ve C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları



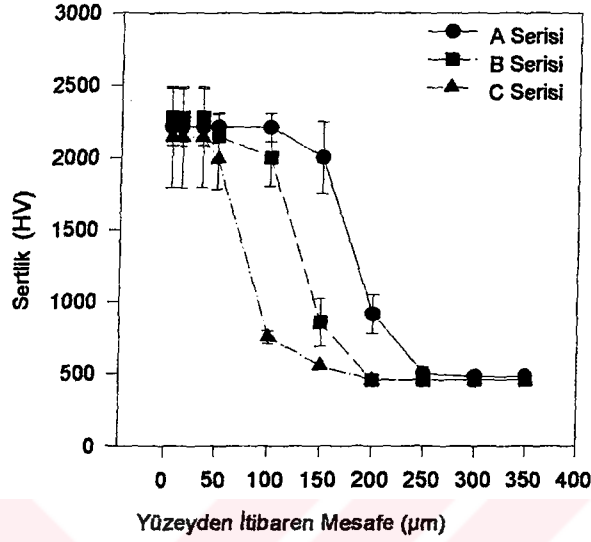
Şekil 5.73 950°C 'de 2 saat süre ile bor kaplanmış A, B ve C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları



Şekil 5.74 950°C 'de 4 saat süre ile bor kaplanmış A, B ve C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları



Şekil 5.75 950°C 'de 6 saat süre ile bor kaplanmış A, B ve C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları



Şekil 5.76 950°C 'de 8 saat süre ile bor kaplanmış A, B ve C serisi numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları

Bor kaplanmış KGDD malzemelerde borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak, bor tabaka kalınlığı artmakta ve buna bağlı olarak sertlik derinliği de artmaktadır. Buna ilaveten, alaşım elementi olarak bakır konsantrasyonu artarken, sertlik azalmaktadır.

### 5.7 Kırılma Tokluğu

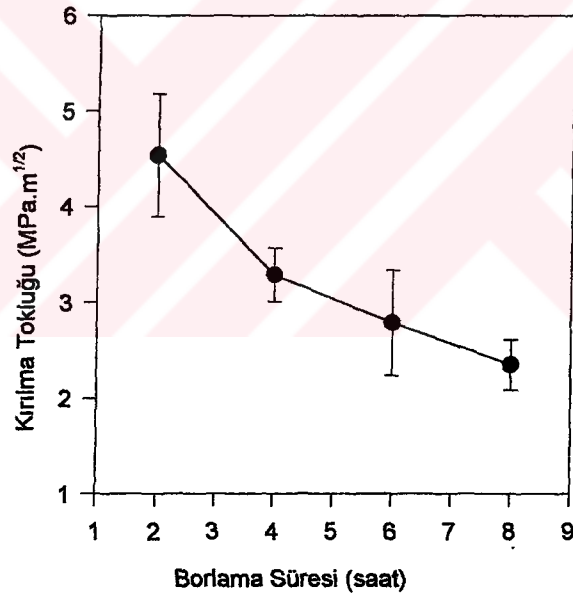
KGDD malzemelerin borlanması sonucunda oluşan borür tabakasının kırılma tokluğu, seramik ve gevrek malzemelerin kırılma tokluklarının tayininde kullanılan “İndentasyon Tekniği” ile belirlenmiştir.

A ve B serisi numunelerin kaplama tabakalarında ağırlıklı olarak bulunan FeB fazı sebebiyle, FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazı arasında fiziksel özelliklerindeki farklılıktan kaynaklanan belirgin çatlaklar oluşmuştur. Bu sebeple, homojen Fe<sub>2</sub>B fazı içeren borlanmış C Serisi KGDD malzemelerin kırılma tokluğu ölçülmüştür. Kırılma tokluğunun hesaplanmasında kullanılan Fe<sub>2</sub>B fazının elastik modülü ( $E_{Fe_2B}=285-295$  GPa), Sinha [13] 'nın çalışmalarından alınmıştır. Kırılma tokluğunun tesbiti en az üç ölçümün ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir.

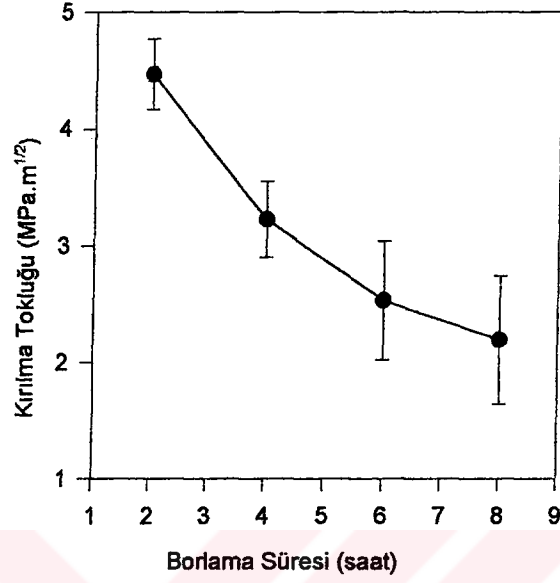
Bu çalışmada elde edilen kırılma tokluğu değerlerinin borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak değişimi Tablo 5.14 'de ve Şekil 5.77-79 'da verilmektedir.

Tablo 5.14 Borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak borlanmış C serisi numunelerin kırılma tokluğu değerleri.

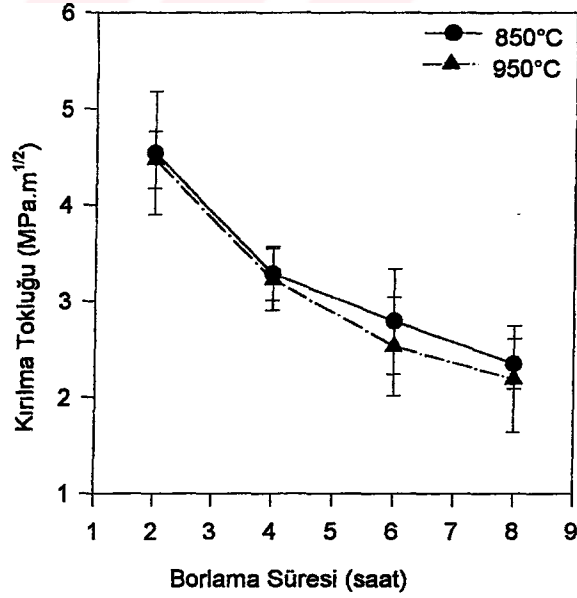
| Borlama Süresi<br>(saat) | Kırılma Tokluğu ( $\text{MPa.m}^{1/2}$ ) |       |
|--------------------------|------------------------------------------|-------|
|                          | 850°C                                    | 950°C |
| 2                        | 4.54                                     | 4.47  |
| 4                        | 3.29                                     | 3.21  |
| 6                        | 2.79                                     | 2.53  |
| 8                        | 2.35                                     | 2.19  |



Şekil 5.77 850°C 'de borlanan C serisi numunelerinin borür tabakalarının kırılma tokluğu değerlerinin borlama süresi ile değişimi



Şekil 5.78 950°C 'de borlanan C serisi numunelerinin borür tabakalarının kırılma tokluğu değerlerinin borlama süresi ile değişimi



Şekil 5.79 850 ve 950°C 'de borlanan C serisi numunelerinin borür tabakalarının kırılma tokluğu değerlerinin borlama süresi ile değişimi

850 ve 950°C sıcaklıklarda; 2, 4, 6 ve 8 saatlik sürelerde borlama işlemine tabi tutulan C serisi numunelerin kırılma tokluklarında borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak bir azalma meydana geldiği görülmüştür (Şekil 5.77-5.79). Borlama sıcaklığı ve süresinin artışına bağlı olarak, daha gevrek karaktere sahip olan FeB fazının oluşumunun artması ve FeB-Fe<sub>2</sub>B arayüzeyinde, her iki fazın sahip olduğu farklı özelliklerden kaynaklanan çatlakların oluşumunun kolaylaşması muhtemeldir. Bu çatlak tahlilleri, Graf ve Matushka [21] tarafından belirtilmektedir. A ve B serisi numuneler borlama işlemi sonrasında zaten çatlak içerdikleri için kırılma tokluğu ölçümlerinin yapılmasına gerek duyulmamıştır. Şekil 5.17-5.32 'de SEM-BEI geri saçılan elektron mikroyapı görüntülerinde bu çatlaklar açık olarak görülmektedir. Kırılma tokluğu değerlerinin ölçülmesinde Eşitlik 5.3 'den faydalanılmıştır [121].

$$K_c = 0.028 (E/H)^{1/2} \cdot P/C^{3/2} \quad (5.3)$$

Elde edilen kırılma tokluğu değerleri, bir çok seramik malzeme ile rekabet edebilecek düzeydedir. Örneğin; %6 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve %4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> malzemelerin kırılma tokluğu, 4.2 MPa.m<sup>1/2</sup> olarak tespit edilmiştir [29,69,126]. Borlanmış düşük alaşımlı çelikler üzerinde Bindal [69], kırılma tokluğu değerlerini ölçmüş ve bulduğu sonuçlar borlanmış KGDD malzemelerle uyumlu çıkmıştır (4.54 MPa.m<sup>1/2</sup>). Unutulmaması gereken bir husus da, kırılma tokluğunun tayininde bir çok formülün geliştirilmiş olması ve bu formüllerin birbirine göre yakın sonuçlar vermesidir.

## 5.8 Aşınma Özellikleri

A, B ve C serisi KGDD numunelerde metalografik incelemeler sonucunda, tek fazlı homojen mikroyapının yalnızca C serisi numunelerde elde edilmesi sebebiyle, aşınma deneyleri bu seri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler, borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak CSEM marka tribometre cihazında disk üzerinde bilya metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde WC-Co esaslı 6 mm çapında bilyalar kullanılmıştır. Aşınma deneyleri, 2, 5 ve 10 N değişken yüklerde, kullanılan yükler için sırasıyla 2 mm iz yarıçapları seçilerek, 5.000 devir mesafede 200 devir/dak. hızda gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri öncesinde numuneler

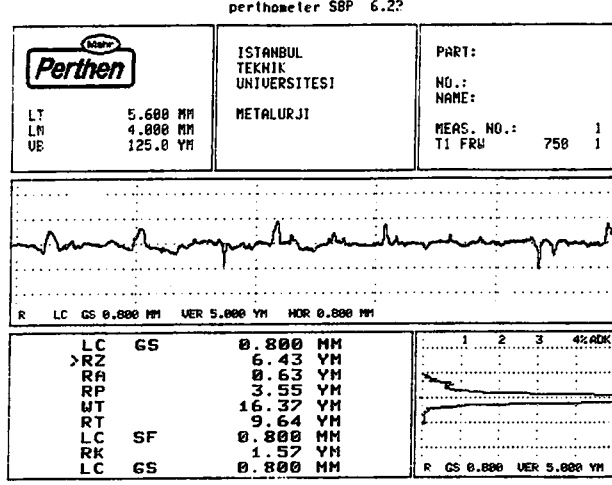
metalografik olarak hazırlanarak, yüzey pürüzlülükleri Perthen marka yüzey pürüzlülüğü cihazında ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda maksimum 0.63  $\mu\text{m}$  yüzey pürüzlülüğü değeri belirlenmiştir (Şekil 5.80). Aşınma deneylerinin sonrasında, aşınma izlerinin ölçümü, OLYMPUS B 071 marka optik mikroskobun bünyesinde bulunan aparatlarla gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyi öncesinde numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve aşınma deneyi sırasında sürtünme katsayısının aşınma mesafesi ile değişimi Tablo 5.15’ de verilmektedir. Borlama sıcaklığı, süresi ve uygulanan aşınma yüküne bağlı olarak, aşınma miktarlarındaki değişim, Tablo 5.16 ’da verilmektedir. Ayrıca, bazı numunelerin aşınma yoluna bağlı olarak sürtünme katsayılarının değişimi Şekil 5.81-5.84 ’de verilmektedir. Şekil 5.85 ’de C serisi KGDD numunelerin döküm haliyle aşınma hızlarının yüke bağlı olarak değişimi verilmektedir. Şekil 5.86-5.88 ’de bor kaplanmış C serisi numunelerin, uygulanan yüke bağlı olarak aşınma hızının borlama süresi ve sıcaklığı ile değişimi görülmektedir. Şekil 5.89 ’da aşınma hızlarının toplu sonuçları görülmektedir. Genel bir sonuç olarak, aşınma hızı; borlama süresi, sıcaklığı ve aşınma yükünün artmasına bağlı olarak artış göstermektedir.

Tablo 5.15 Aşınma testine tabi tutulan numunelerin aşınma deneyi öncesi yüzey pürüzlülükleri sürtünme katsayısı değerleri.

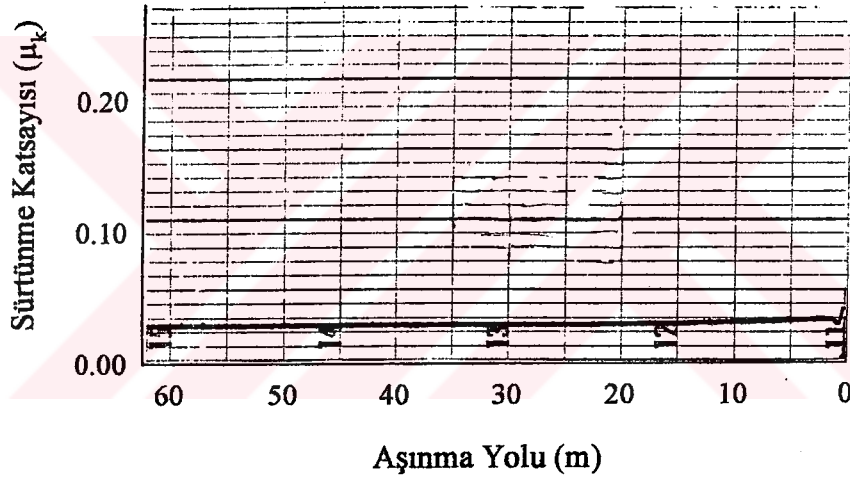
| Borlama Süresi (saat) | Yüzey Pürüzlülüğü RA ( $\mu\text{m}$ ) |       | Sürtünme Katsayısı( $\mu_k$ ) |                 |                  |                 |                   |                 |
|-----------------------|----------------------------------------|-------|-------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
|                       |                                        |       | Aşınma Yüğü (2N)              |                 | Aşınma Yüğü (5N) |                 | Aşınma Yüğü (10N) |                 |
|                       | 850°C                                  | 950°C | 850°C                         | 950°C           | 850°C            | 950°C           | 850°C             | 950°C           |
| 2                     | 0.18                                   | 0.63  | 0.16 $\pm$ 0.02               | 0.15 $\pm$ 0.01 | 0.17 $\pm$ 0.02  | 0.16 $\pm$ 0.01 | 0.20 $\pm$ 0.01   | 0.13 $\pm$ 0.02 |
| 4                     | 0.15                                   | 0.11  | 0.12 $\pm$ 0.01               | 0.17 $\pm$ 0.02 | 0.12 $\pm$ 0.01  | 0.17 $\pm$ 0.02 | 0.16 $\pm$ 0.01   | 0.20 $\pm$ 0.02 |
| 6                     | 0.15                                   | 0.10  | 0.20 $\pm$ 0.02               | 0.16 $\pm$ 0.01 | 0.17 $\pm$ 0.02  | 0.17 $\pm$ 0.01 | 0.17 $\pm$ 0.01   | 0.19 $\pm$ 0.02 |
| 8                     | 0.07                                   | 0.08  | 0.20 $\pm$ 0.01               | 0.18 $\pm$ 0.02 | 0.17 $\pm$ 0.02  | 0.18 $\pm$ 0.02 | 0.19 $\pm$ 0.01   | 0.19 $\pm$ 0.03 |
| İşlemsiz              | 0.08                                   |       | 0.12 $\pm$ 0.01               |                 | 0.08 $\pm$ 0.01  |                 | 0.025 $\pm$ 0.005 |                 |

Tablo 5.16 Aşınma testine tabi tutulan C serisi numunelerin borlama süresi, sıcaklığı ve aşınma yüküne bağlı olarak, aşınma hızlarının değişimi (Nem: 0.33)

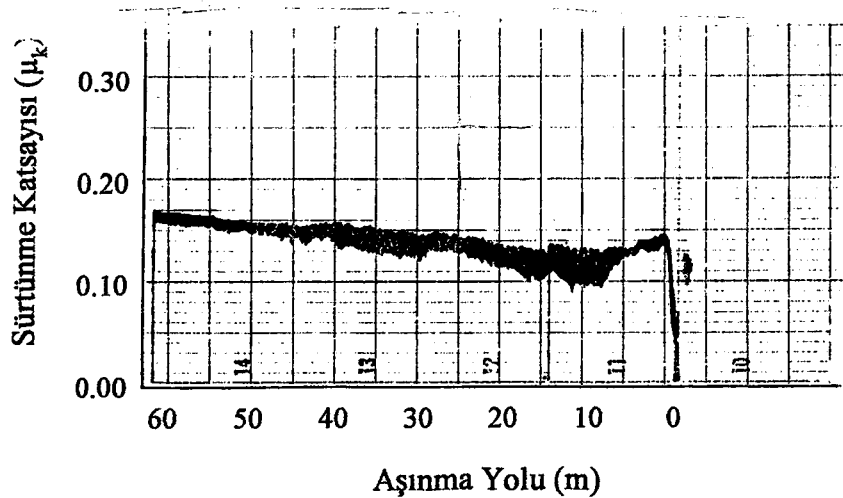
| Borlama Süresi (saat) | Aşınma Hızı ( $\text{mm}^3/\text{m}$ ) $\times 10^{-3}$ |       |       |       |       |       |
|-----------------------|---------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                       | 2N                                                      |       | 5N    |       | 10N   |       |
|                       | 850°C                                                   | 950°C | 850°C | 950°C | 850°C | 950°C |
| İşlemsiz              | 13.1                                                    |       | 38.9  |       | 83.9  |       |
| 2                     | 8.67                                                    | 36.8  | 9.62  | 83.2  | 36.4  | 90.4  |
| 4                     | 10.1                                                    | 64.8  | 10.7  | 93.1  | 38.6  | 125   |
| 6                     | 10.1                                                    | 66.9  | 11.9  | 96.4  | 45.2  | 125   |
| 8                     | 30.5                                                    | 84.9  | 49.8  | 96.6  | 49.8  | 135   |



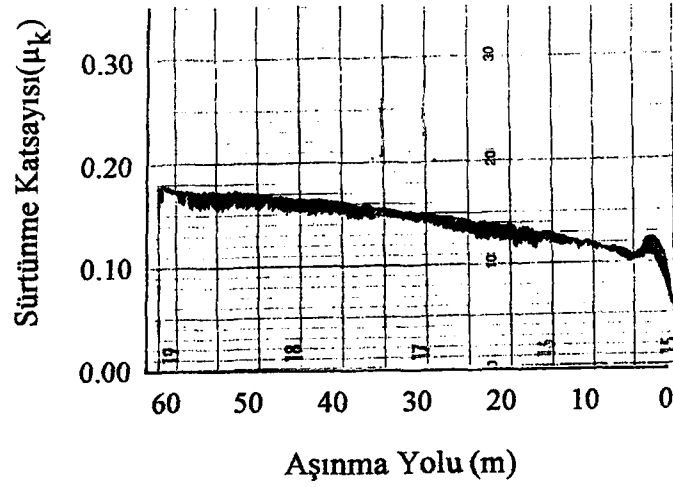
Şekil 5.80 950°C 'de 2 saat süre ile borlanan numunenin aşınma deneyi uygulanmadan önce ölçülen yüzey pürüzlülüğü eğrisi



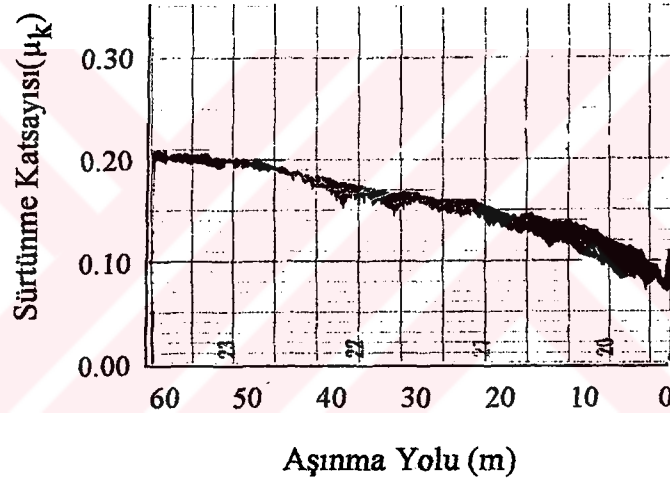
Şekil 5.81 Döküm haliyle 10N yük altında aşınma yoluna bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi



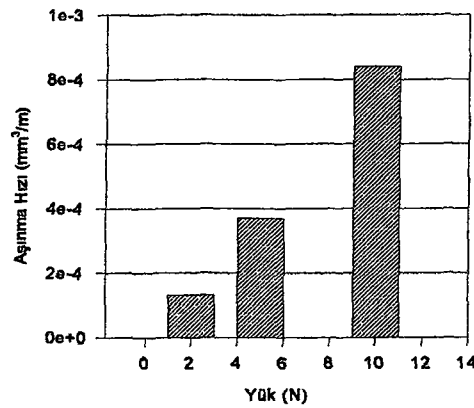
Şekil 5.82 850°C 'de 2 saat süre ile borlanmış C serisi numunelerin 2N yük altında aşınma yoluna bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi



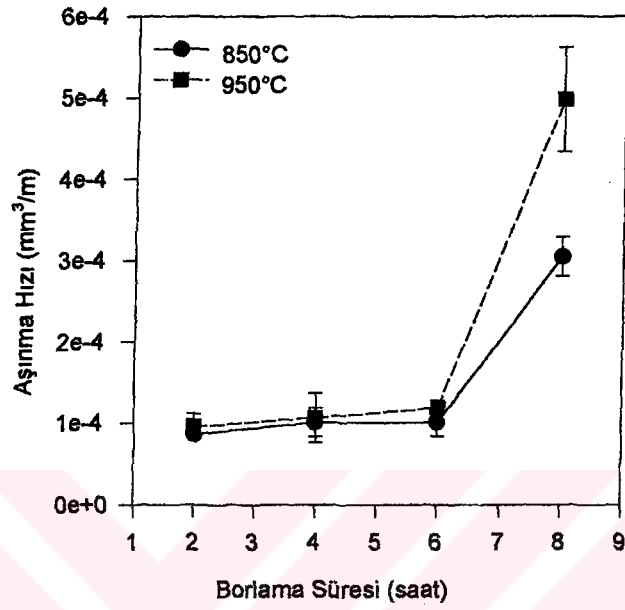
Şekil 5.83 850°C 'de 2 saat süre ile borlanmış C serisi numunelerin 5N yük altında aşınma yoluna bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi



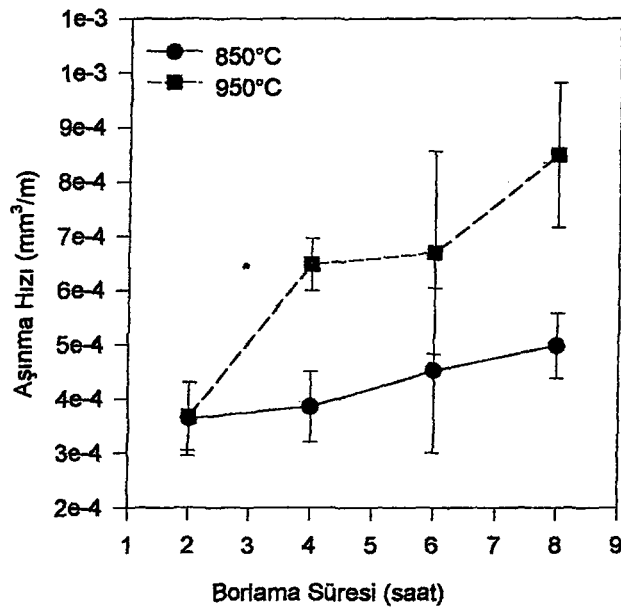
Şekil 5.84 850°C 'de 2 saat süre ile borlanmış C serisi numunelerin 10N yük altında aşınma yoluna bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi



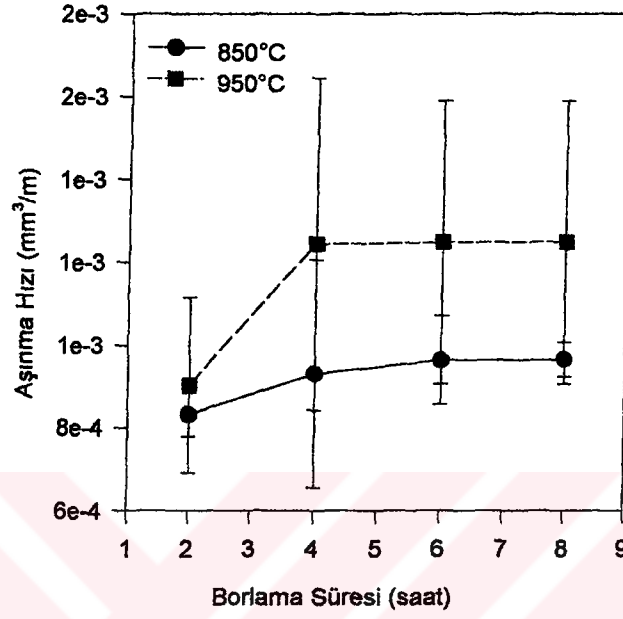
Şekil 5.85 Döküm haliyle C serisi numunelerin 2N, 5N ve 10N yük altında aşınma hızlarının değişimi



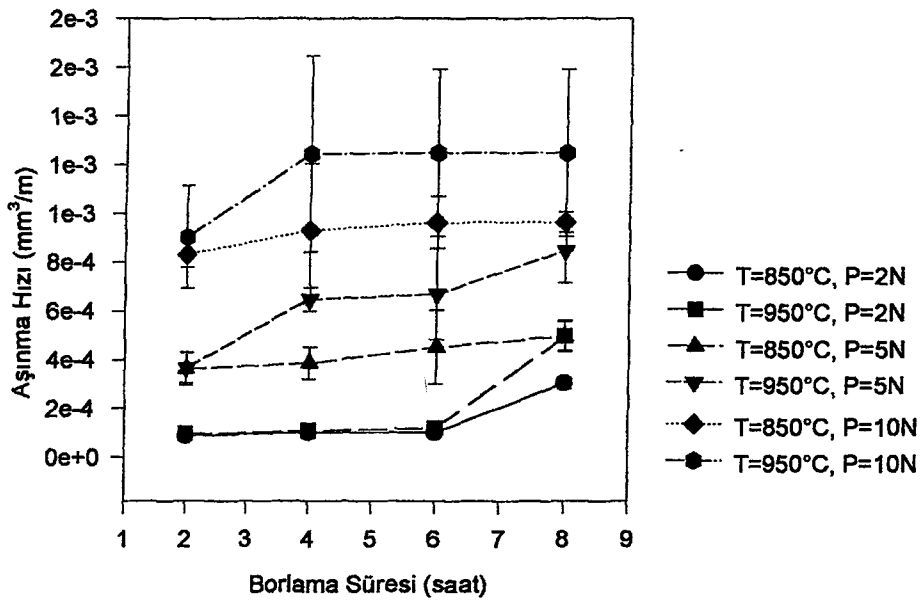
Şekil 5.86 850°C ve 950°C 'de borlanmış C serisi numunenin, 2N yük altında aşınma hızının borlama süresi ile değişimi



Şekil 5.87 850°C ve 950°C 'de borlanmış C serisi numunenin, 5N yük altında aşınma hızının borlama süresi ile değişimi



Şekil 5.88 850°C ve 950°C 'de borlanmış C serisi numunenin, 10N yük altında aşınma hızının borlama süresi ile değişimi



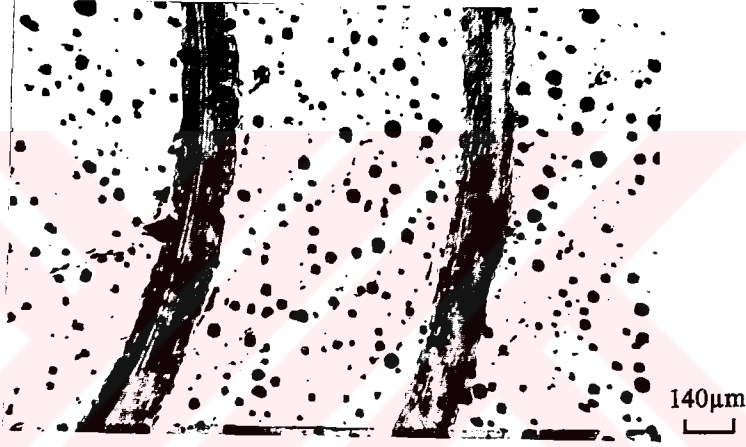
Şekil 5.89 850°C ve 950°C 'de borlanmış C serisi numunenin 2N, 5N ve 10N yük altında aşınma hızlarının borlama süresi ile değişimi

Borlanmış C serisi KGDD malzemelerin WC-Co bilyeye karşı aşındırılması sırasında sürtünme katsayısı değerleri, 0.1 ile 0.2 arasında değişmektedir. Bor kaplamaların genel olarak sürtünme katsayısı değerleri oldukça yüksektir. Bor kaplanmış çelik malzemelerde sürtünme katsayısı 0.65'e kadar yükselmektedir [101]. Soydan [20], çeşitli bor kaplanmış çeliklerin, sementle edilmiş çeliklere karşı yaptığı aşınma deneylerinde, 0.35-0.45 arasında sürtünme katsayısı belirlemiştir. Eyre [104], bor kaplanmış çelikler ve gri dökme demirler üzerinde yapmış olduğu çalışmalarda, dökme demirlerin sürtünme katsayılarının, çeliklere göre daha düşük olduğunu belirtmektedir. Genel olarak, yaptığımız optik mikroskop ve SEM çalışmalarında, KGDD malzemelerin yüzeyinde oluşan borür tabakasının kompozit karakterli olduğu görülmektedir. Bu yüzden, kaplama tabakası içerisinde yer alan grafit kürelerinin yağlayıcı özelliği sebebiyle, sürtünme katsayısının azaldığı düşünülmektedir. Optik mikroskopla saptanmış olan mikroyapı görüntülerinde (Şekil 5.90-5.99) kürelerin hemen etrafında yer alan gri renkli bölgenin grafitin yağlayıcı etkisi sebebiyle oluştuğu ve bu sayede, aşınma sırasında sürtünme katsayısının azaldığı sanılmaktadır. Eyre [104] gri dökme demirler üzerinde yaptığı çalışmalarda da aynı fikri savunmaktadır. Ayrıca C serisi KGDD malzemelerin döküm haliyle yapılan aşınma deneylerinde, sürtünme katsayısı değerleri 0.12-0.025 arasında değişmektedir. Artan aşınma yükü karşısında, grafitin yağlayıcı etkisi artış göstermektedir. Gerçekleştirilen aşınma deneyinde döküm haliyle KGDD numunelerin sürtünme katsayısı, 2 N yük altında 0.12 iken, 10 N yük altında 0.025 olarak tespit edilmiştir.

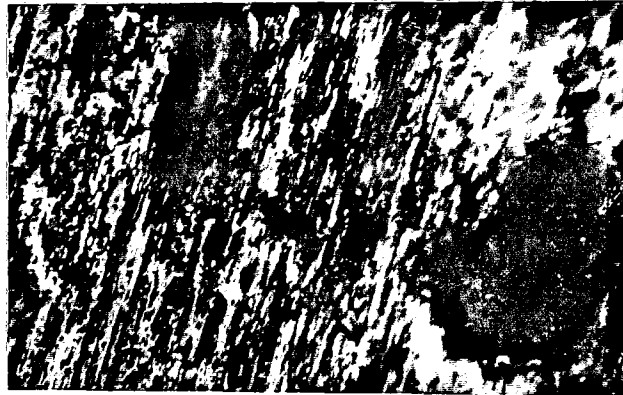
Yapılan aşınma deneyleri sonucunda elde edilen hacimsel aşınma hızları incelendiği takdirde, aşınma hızlarının  $8.7 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  ile  $124.8 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  arasında değişiklik arzettiği, borlama süresi ve sıcaklığının artmasına bağlı olarak, aşınma hızında bir artış olduğu görülmüştür. Aşınma hızlarının borlama süresi, sıcaklığı ve aşınma yüküne bağlı olarak değişimi, Tablo 5.15 'de verilmektedir.

Düşük borlama sıcaklığı ve sürelerinde aşınma hızlarının düşük çıkması, Şekil 5.17-5.32 'de görüldüğü gibi,  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazının hakim olduğu bir kaplama oluşması sebebiyledir. Borür tabakasının her iki fazı ( $\text{FeB}+\text{Fe}_2\text{B}$ ) birlikte içermesi, aşınma

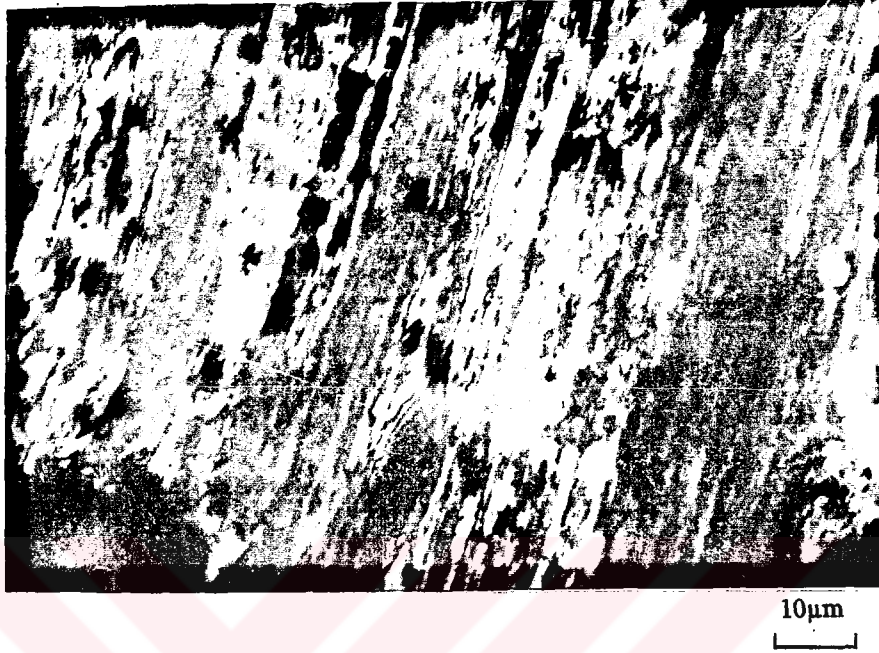
hızının artmasında rol oynamaktadır. Subrahmanyam [115], tek fazlı borür tabakasının, çift fazlı tabakaya göre 11 kat daha iyi aşınma direnci sergilediğini belirtmektedir. Aynı şekilde Takeuchi [116], iki fazlı borür tabakasının aşınma hızını artırıcı rol oynadığını açıklamaktadır. Borür tabakasında bu iki fazın bir arada bulunması durumunda, FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının farklı fiziksel özelliklere sahip olmaları sebebiyle, FeB fazının aşınmayı hızlandırıcı etkisinin olduğu belirtilmektedir. Borlama süresi ve sıcaklığının artışına bağlı olarak, FeB fazının miktarı artış göstermekte ve aşınma hızlı olmaktadır.



Şekil 5.90 İşlemsiz (döküm haliyle) malzeme yüzeyine uygulanan aşınma deneylerinde oluşan izlerin mikroyapı görüntüsü



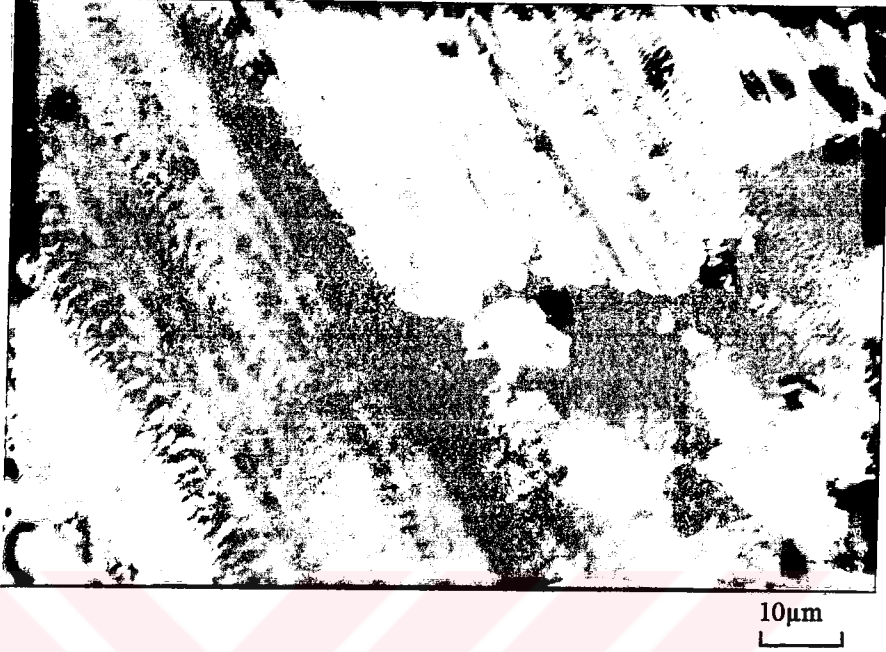
Şekil 5.91 Döküm haliyle KGDD numuneye 2N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü



Şekil 5.92 Döküm haliyle KGDD numuneye 5N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü



Şekil 5.93 Döküm haliyle KGDD numuneye 10N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü



Şekil 5.94 850°C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanan C serisi numuneye 10N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü

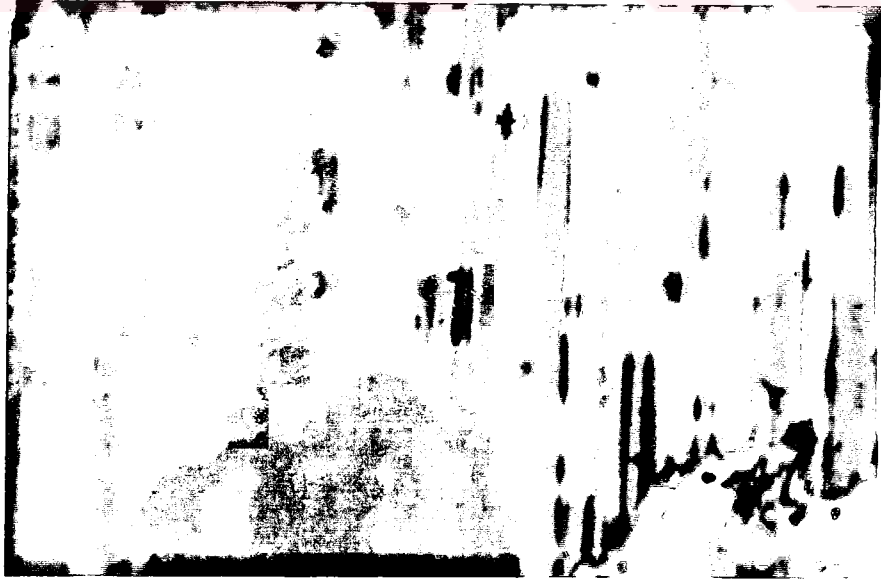


Şekil 5.95 850°C sıcaklıkta 8 saat süre ile borlanan C serisi numuneye 5N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü



10µm

Şekil 5.96 950°C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanan C serisi numuneye 2N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü

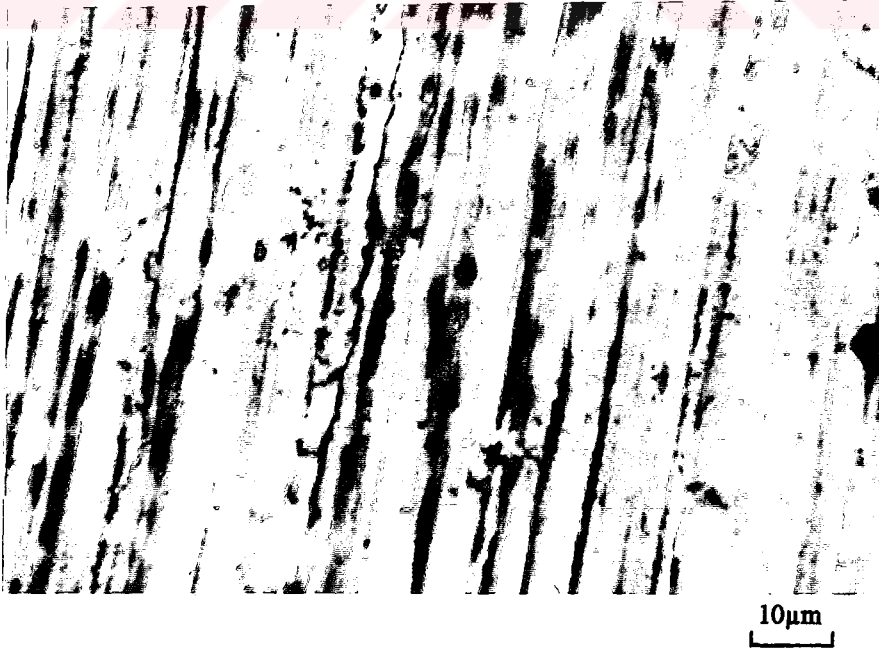


10µm

Şekil 5.97 950°C sıcaklıkta 4 saat süre ile borlanan C serisi numuneye 10N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü



Şekil 5.98 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile korlanan C serisi numuneye 2N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü



Şekil 5.99 950°C sıcaklıkta 6 saat süre ile korlanan C serisi numuneye 5N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonucunda oluşan izin mikroyapı görüntüsü

Aşınma izleri incelendiğinde (Şekil 5.90-5.99) iz boyunca derin çizgiler görülmektedir. Bu derin çizgilerin bir kazıma neticesinde oluşabileceği düşünülmektedir. Aşınma deneyi sırasında seramik esaslı bir kaplamayla seramik esaslı bir aşındırıcı bilye kullanılmıştır. Bu yüzden aşınma mekanizması daha çok abrasiv karakterli olmuştur. Ancak, aşınma sırasında oluşan izlerden anlaşıldığı üzere, Subrahmanyam [115] 'ın da belirtmiş olduğu gibi, optik mikroskop incelemelerinde görülen kırmızı renkler  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , gri renkler  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ve yeşilimsi beyaz renkler  $\text{B}_2\text{O}_3$  fazlarından oluşmaktadır. Takeuchi [116], aşınma deneyleri sırasında bor kaplamalar üzerinde oksitlenme meydana geldiğini ve bu oksitlenmenin aşınmayı azaltıcı rolünün olduğunu açıklamaktadır. Aşınma sırasındaki sürtünme nedeniyle oluşan ısı neticesinde, oksitlenmenin oluşması muhtemeldir. Benzer sonuçlar, Soydan [20] tarafından da bulunmuştur. Buradan, aşınmanın oksidatif karakterli olduğu söylenebilmektedir. Erdemir[109,111], bor kaplamaların aşınma hızlarının oksitlenme neticesinde azaldığını belirtmektedir. Döküm haliyle aşınma testine tabi tutulan KGDD malzemelerle bor kaplanmış KGDD'lerin aşınma sonuçları kıyaslandığı zaman, aşınma hızlarının birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak, döküm haliyle aşınma testine tabi tutulan numunelerde yükün artışına bağlı olarak, sürtünme katsayısının 0.025'e kadar düşerek mükemmel bir yağlama sağlaması söylenebilir. Bor kaplanmış KGDD'lerde sürtünme katsayısı 0.15 civarında tesbit edilmiştir.

Aşınma deneyleri sonucunda belirtilmesi gereken bir husus da, KGDD malzemelerin bor kaplamaları sonucunda, bünyede bulunan grafit sayesinde sürtünme katsayısının 0.15'ler seviyesine kadar düşüş göstermesidir. Bunun yanında, tek fazlı  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazının oluşturulması durumunda aşınma hızı son derece düşük seviyelere çekilebilmektedir. Çep ve arkadaşlarının [124] bor kaplanmış AISI H11 çeliği üzerinde yapmış olduğu çalışmalarda,  $3.11 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  değerinde aşınma hızı elde edilmiştir. Bor kaplanmış KGDD malzemelerde elde edilen en iyi sonuç,  $8.7 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  'dir. Buradan da anlaşılabacağı gibi, bor kaplanmış çeliklerin aşınma dirençleri KGDD 'lere yakındır. Ancak sürtünme katsayısı WC, VC, TiN, bor kaplanmış AISI H11 çeliği ve NbC 'den daha düşük çıkmıştır. Bunun yanında, bor kaplanmış KGDD'lerin aşınma dirençleri, NbC'le benzerlik göstermiştir. Öktem ve

arkadaşları [127], su verilmiş yüksek karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler üzerinde de aşınma deneyi gerçekleştirmişlerdir. Ancak, bor kaplanmış KGDD numuneler 8-10 kat daha iyi aşınma direnci sergilemişlerdir.

Sonuç olarak, düşük sürtünme katsayısı ve düşük aşınma hızları için, KGDD'lere önerilen borlama sıcaklığı ve süresi; düşük sıcaklık, 850 °C ve düşük borlama süresi, 4 saattir. Borlanmış KGDD 'ler kompozit karaktere sahip olduklarından, borlanmış çeliklere göre daha düşük sürtünme katsayısı ve eşdeğer aşınma direnci sergilemektedirler.



## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### 6.1 Sonuçlar

1) Klasik metalografi teknikleri ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan optik mikroskop incelemeleri neticesinde, borlama işlemine tabi tutulan bütün numunelerde borür tabakası, kaplama-matris arayüzeyi ve matris açık bir şekilde ortaya çıkmıştır. Borür tabakasının çeliklere benzer şekilde kolonsal bir yapı sergilediği ve kaplama tabakası üzerinde dağılmış olan grafit kürelerinin adeta kompozit formda bir kaplama tabakası oluşturduğu gözlenmiştir. Gerçekleştirilen borlama işlemi sonrasında, borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak seramik esaslı bir kaplama tabakası ve matris fazından oluşan iki farklı bölge ortaya çıkmıştır. Ayrıca oluşan her iki bölgenin küresel formda grafitler içerdiği de gözlenmiştir. Oluşan bölgeler;

- i) Demir borür bileşimine sahip ve kolonsal bir yapı sergileyen seramik esaslı birinci bölge ve hemen altında yer alan kaplama-matris arayüzeyinde band halinde teşekkül eden karbon ve silisyum esaslı ara bölge,
- ii) Karbon-silisyum esaslı band bölgesinin hemen altında oluşan ferrit fazı ve ana matristen oluşan ikinci bölge şeklindedir.

Kaplama tabakası homojen olarak malzeme yüzeyinde süreklilik arzederken, kaplama-matris arayüzeyinde oluşan karbon esaslı, muhtemelen grafit formunda bant şeklinde bulunan yapıda süreklilik yoktur ve alaşım bileşimine bağlı olarak bu yapı, morfolojik olarak değişiklik göstermektedir.

2) Bant şeklinde ortaya çıkan karbon-silisyum birikimi, A ve B serisi numunelerde zaman ve sıcaklığın artışına bağlı olarak kaplama tabakasıyla birlikte artış göstermekte ve kısmi ayrılmalara yol açmaktadır. Aynı zamanda, kaplama tabakasının kalınlığında da zaman ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak artış gözlenmektedir. Mikroyapı incelemelerinde görülen bu siyah bölgenin karbon esaslı olduğu noktasal ve çizgisel analizlerle de desteklenmiştir. C serisi numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda, kaplama-matris arayüzeyinde karbon birikmesi oluşmamış veya yüksek sıcaklık ve sürelerde çok sınırlı olarak görülmüştür.

3) Bütün numuneler üzerinde yapılan metalografik incelemeler sonucunda, küresel grafitli dökme demirlerde çeliklere benzer şekilde, belirgin bir geçiş zonuna rastlanmamıştır. Bunun yerine, silisyum içeren çeliklerin borlanması sonucunda elde edilen mikroyapılara benzer şekilde, silisyum içeren beyaz renkli bir ferritik bölgenin olduğu saptanmıştır.

4) Borlama işlemi sonucu karbon ve silisyum, kaplama-matris arayüzeyine doğru itilirken borür tabakası içerisinde yer alan küresel grafitlerin boyutlarında değişikliklerin meydana geldiği görülmektedir. Yapılan ölçümlerde, borlama sonrasında matris ve kaplama tabakasındaki grafit kürelerinin boyutları arasındaki farkın, borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca bileşimdeki bakır konsantrasyonunun artışına bağlı olarak, küre boyutlarındaki artış düşmektedir. Borür tabakasındaki küre boyutlarındaki artış, A serisi numunelerde maksimuma ulaşırken C serisi numunelerde minimum değerlerdedir.

5) A, B ve C serisi numunelerde bakır konsantrasyonunun artışına bağlı olarak, kaplama-matris arayüzeyinde yeralan koyu renkli karbon-silisyum band tabakasının azaldığı ve %1 Cu içeren C serisi numunelerde bu tabakanın yok denecek kadar az olduğu görülmüştür. Aynı şekilde, kaplama tabakalarının altında ferrit fazının çok sınırlı olduğu ve Cu miktarının artışına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Yapılan

kinetik çalışmada, malzeme ve banyo bileşiminin kinetik değerler üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. İncelemeler sonucunda bulunan difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjileri, KGDD malzemelerin bileşiminde bulunan bakır konsantrasyonunun tabaka kalınlığında etkin olduğunu ve dolayısıyla kinetik değerleri etkilediğini açıkça göstermektedir.

6) Borlanan bütün numunelerde sertlik, dış yüzeyden itibaren muayyen bir derinliğe kadar en yüksek değerine çıkmakta ve daha sonra doğrusallık arz ederek, parabolik bir azalma ile matris sertliğine düşmektedir. En yüksek sertlik değeri, borür fazlarının yer aldığı dış yüzeyde ölçülmüştür. Çelikler ve demir dışı metaller üzerinde yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla borun demirle meydana getirdiği bileşikler ve seramik kompozitler (FeB, Fe<sub>2</sub>B) en sert kısımları meydana getirmektedir. Borür tabakasının oluşturduğu kolonsal bölge, matris malzemesinin bileşimine ve borlama şartlarına bağlı olarak değişiklik arz etmektedir. Borlama işlemine tabi tutulan üç farklı KGDD sınıfında FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarına rastlanmıştır. Bu iki fazın varlığı optik mikroskop, SEM-BEI ve x-ışınları çalışmaları ile kanıtlanmıştır. Yapılan incelemelerde, borür tabakasının sertliğinin FeB ve Fe<sub>2</sub>B faz dağılımından etkilendiği görülmüştür. Genel olarak, bütün seriler üzerinde yapılan çalışmalarda, FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının miktarı, bileşimlere bağlı olarak değişmektedir. C serisi numunelerde, düşük sıcaklıklarda ve yüksek sıcaklık-kısa sürelerde elde edilen kaplamalarda, FeB fazı ihmal edilebilir seviyede gerçekleşirken diğer serilerde bu fazların oldukça fazla olduğu görülmüştür.

7) Bakır içermeyen A ve az miktarlarda bakır içeren B serisi numunelerde, borür tabaka kalınlığının ve sertliğinin daha yüksek olduğu görülmüştür. C serisi numunelerde, FeB fazının bulunmaması ya da ihmal edilebilecek seviyede az olması, bu farklılığın sebebini açıklamaktadır. Bu durumun, SEM-BEI mikroyapı görüntülerinde de tesbit edildiği üzere, A ve B serisi numunelerin bor kaplamalarında FeB fazının hakim faz olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

FeB fazının  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazına göre daha sert olduğu bir çok araştırmacı tarafından belirtilmektedir.

8) 850°C ve 950°C sıcaklıklarda; 2, 4, 6 ve 8 saatlik sürelerde borlama işlemine tabi tutulan C serisi numunelerin kırılma tokluklarında, borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak bir azalma meydana geldiği görülmüştür. Borlama sıcaklığı ve süresinin artışına bağlı olarak, daha gevrek karaktere sahip olan FeB fazının oluşumunun artması ve FeB- $\text{Fe}_2\text{B}$  arayüzeyinde, her iki fazın sahip olduğu farklı özelliklerden kaynaklanan çatlakların oluşumu muhtemelen kolaylaşmaktadır. Bu sebeple, borlama süresinin artışına bağlı olarak kırılma tokluğu,  $4.54 \text{ MPa.m}^{1/2}$ 'den  $2.35 \text{ MPa.m}^{1/2}$ 'ye düşmektedir. Kırılma tokluğu üzerine borlama sıcaklığının etkisi, oldukça düşük seviyelerde olmuştur.

9) Bor kaplanmış C serisi KGDD malzemelerin WC-Co bilyeye karşı aşındırılması sırasında, sürtünme katsayısı değerleri, 0.1 ile 0.2 arasında değişmektedir. Bor kaplamaların genel olarak sürtünme katsayısı değerleri oldukça yüksektir. Bor kaplanmış çelik malzemelerde sürtünme katsayısı 0.65'e kadar yükselmektedir. Genel olarak, yapılan optik mikroskop ve SEM çalışmalarında, KGDD malzemelerin yüzeyinde oluşan borür tabakasının kompozit karakterli olduğu görülmüştür. Bu yüzden kaplama tabakası içerisinde yer alan grafit kürelerinin yağlayıcı özelliği sebebiyle, sürtünme katsayısının azaldığı düşünülmektedir. Optik mikroskop ile saptanmış olan mikroyapı görüntülerinde, kürelerin hemen etrafında yer alan gri renkli bölgenin grafitin yağlayıcı etkisi sebebiyle oluştuğu ve bu sayede aşınma sırasında sürtünme katsayısının azaldığı tahmin edilmektedir.

10) Yapılan aşınma deneyleri sonucunda elde edilen hacimsel aşınma hızları incelendiği takdirde, aşınma hızlarının  $8.7 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  ile  $124.8 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  arasında değişiklik arzettiği, borlama süresi ve sıcaklığının artmasına bağlı olarak, aşınma hızında bir artış olduğu görülmüştür.

Aşınma izinin mikroyapıları incelendiğinde, iz boyunca derin çizgiler görülmektedir. Bu derin çizgilerin bir kazıma neticesinde oluşabileceği düşünülmektedir. Aşınma deneyi sırasında, seramik esaslı bir kaplamayla, seramik esaslı bir aşındırıcı bilye kullanılmıştır. Bu yüzden, aşınma mekanizması daha çok abrasiv karakterli olmuştur. Ancak, aşınma sırasında oluşan izlerden anlaşıldığı üzere, optik mikroskop incelemelerinde görülen kırmızı renkler  $Fe_2O_3$ , gri renkler  $Fe_3O_4$  ve yeşilimsi beyaz renkler  $B_2O_3$  fazlarından oluşmaktadır. Aşınma sırasındaki sürtünme nedeniyle oluşan ısı neticesinde, oksitlenmenin oluşması muhtemeldir. Buradan aşınmanın oksitleyici bir karaktere sahip olduğu söylenebilmektedir.

Bor kaplanmış AISI H11 çeliği üzerinde yapılmış olan çalışmalarda,  $3.11 \times 10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/m aşınma hızı elde edilmiştir. Bor kaplanmış KGDD malzemelerde elde edilen en iyi sonuç,  $8.7 \times 10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/m 'dir. Buradan da anlaşılabacağı gibi, bor kaplanmış çeliklerin aşınma dirençleri KGDD'lerle birbirine yakın değerler sergilemektedir. Ancak sürtünme katsayısı, WC, VC, TiN, bor kaplanmış AISI H11 çeliği ve NbC'den daha düşük çıkmıştır. Bunun yanında, bor kaplanmış KGDD'lerin aşınma dirençleri, NbC'le benzerlik göstermiştir. Su verilmiş yüksek karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerden, bor kaplanmış KGDD numuneler 8-10 kat daha iyi aşınma direnci sergilemişlerdir.

Sonuç olarak, KGDD malzemeler başarıyla termo-kimyasal olarak bor kaplanabilmektedir. Ancak, KGDD malzemelerin kimyasal kompozisyonu, kaplama kalitesi üzerinde oldukça etkili olmaktadır. Örneğin, bir çok araştırmacı, silisyum içeren çeliklerin borlanması sakıncalı olduğunu belirtmektedir. KGDD malzemeler yüksek seviyede silisyum içermektedir. Yapılan araştırma, KGDD malzemelerin bor kaplanmasında çelikler için önerilenlerden daha çok parametreler vardır. Alaşımsız veya düşük seviyede alaşım elementi içeren KGDD malzemelerin yüzeyinde oluşturulan borür tabakası, kaplama-matris arayüzeyinde karbon esaslı bir ara bölge oluşturmakta ve bu tabakanın zayıf olması sebebiyle, kaplama tabakasında kısmi ayrılmalar olmaktadır. Ancak alaşım elementi olarak %1 bakır

ilavesi karbon birikimini engellemekte ve tek fazlı  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazının oluşmasını sağlamaktadır. Oluşan kaplama tabakası homojen olarak malzemenin bütün yüzeyinde elde edilmektedir. Ayrıca bor kaplanmış KGDD malzemenin kaplama tabakasında, grafit kürelerinin dağılımıyla kompozit karakterli bir yapı sergilenmektedir. Bu sayede, sürtünme katsayısı çeliklere göre oldukça düşük seviyelere çekilebilmektedir. KGDD 'lere önerilen bileşim ve işlem parametrelerine bağlı olarak, borlama endüstriyel boyutlarda uygulanabilir.

## 6.2 Öneriler

- 1) Bu çalışmada, alaşımsız ve bakırın alaşım elementi olarak kullanıldığı KGDD malzemelerin bor kaplanabilirliği araştırılmıştır. Diğer alaşım elementlerinin etkileri de araştırılabilir.
- 2) KGDD malzemelerde alaşım elementi olarak kullanılan bakır, kaplama-matris arayüzeyinde karbon ve silisyum elementlerinin birikmesini engelleyerek, tek fazlı  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazından oluşan borür tabakasının oluşumuna imkan tanımıştır. Silisyum içeren çeliklere alaşım elementi olarak bakır ilavesinin, kaplama tabakası üzerine etkisi araştırılabilir.
- 3) KGDD malzemelerin yüzeyinde oluşan borür tabakası, küresel formulu grafitler içererek kompozit karakterli bir kaplama tabakası oluşturmuştur. Benzer çalışmalar, lamel grafitli ve vermiküler grafitli dökme demirler üzerinde yapılarak özellikleri araştırılabilir.
- 4) KGDD malzemelerin yüzeyinde oluşan borür tabakası ile matris arayüzeyindeki karbon ve silisyum elementlerinin birikimi bakır ilavesi ile engellenebilmiştir. Bu işlemin diğer alaşım elementleri ile yapılabilirliği araştırılabilir.

5) Bu çalışmada, borlama işlemi boraks-borik asit-ferro silisyum ve alüminyum esaslı bir sıvı banyoda gerçekleştirilmiştir. Benzer çalışma, borlama ortamı değiştirilerek yapılabilir.

6) Yapılan çalışmada, KGDD malzemelerin yüzeyinde oluşan borür tabakalarında en iyi sonuçlar, en kısa sürede ve düşük sıcaklıkta oluşan kaplamalarla elde edilmiştir. Borlama süresi ve sıcaklığı daha da düşürülerek optimum değerlerin daha yüksek seviyelere çıkarılması sağlanabilir.

7) KGDD malzemelerde, bakır konsantrasyonu daha da artırılarak kaplama tabakasının kalitesi üzerindeki etkileri araştırılabilir. Aynı şekilde, KGDD malzemeler bor kaplanarak, teknolojik uygulamalar için etkileri de araştırılabilir.

8) Borlanmış KGDD malzemeler üzerinde korozyon, oksidasyon ve yorulma direnci gibi özelliklerin belirlenmesi için gerekli çalışmalar yapılabilir.

9) KGDD malzemeler üzerine çok bileşenli borür kaplamaların uygulanabilirliği üzerinde çalışılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **HOCKING, M. G., VASANTASREE, V., SIDKY, P. S.**, Metalic and Ceramic Coatings, John Villey & Sons Inc., Newyork, pp. 1, (1989).
- [2] **ÖĞEL, B.**, Metal Yüzeylere Uygulanan İşlemler, Yöntem ve Malzeme Seçimi, Metalurji dergisi, pp. 5-10, (1988).
- [3] **BONETTI, R.**, Hard Coating for Improved Tool Life, Metal Progress, pp. 44-47, (1981).
- [4] **ÇAKIR, A. F.**, Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemiyle Yüzey Kaplama, Metalurji Dergisi, pp. 14-29, (1993).
- [5] **OĞUZ, A.**, Hafif Dirençli ve Dayanıklı bor Cevheri, Bilim ve Teknik Dergisi, TÜBİTAK, 319, Haziran (1994).
- [6] **STAFANESCU, D. M.**, Classification and Basic Metallurgy of Cast Iron, Metals Handbook, 10<sup>th</sup> Edition, ASM International, USA, pp. 3-55, (1990).
- [7] **KARSAY, I. S.**, Ductile Iron-Production Practices, AFS, Second Edition, USA, (1979).
- [8] **JANOWAK, J. F., GUDLANCH, R. B.**, Approaching Austempered Ductile-Iron Properties by Controlled Cooling in the Foundry, J.Heat Treating, Vol 4, No.1, June (1985).
- [9] **FORREST, R. D.**, The Challenge an Opportunity Presented to the SG Iron Industry by the Development of Austempered Ductile Iron, BCIRA Report 1700, July (1987).
- [10] Cast Iron v.s. Steel: the Differance in Austempering, Heat Treat., May (1985).
- [11] **ÖZEL, A.**, GGG-40-80 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Isıl İşlemin Darbe Direnci ve Darbe Geçiş Sıcaklığına Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Eylül (1994).
- [12] **KARL, B. R.**, Heat Trating of Ductile Irons, pp.682-692. Metals Handbook, 10.th Edition, Vol.4. (1990).
- [13] **SINHA, A. K.**, Boriding(Boronising), ASM Handbook, Vol. 4, J. Heat Treating, pp. 437-447, (1991).

- [14] What is Boronising? Lindberg Heat Treating Company Ceramic Consulting Group, 12/(1995).
- [15] WANG, N., FISCHER, T. E., Modification of Tribological Properties of Aluminum Oxide by Pack Boronization, Lubricant Engineering, Vol. 49, (1993).
- [16] RUS, J., LUIS de LIAL, C., TSIPAS, D. N., Boronising of 304 Steel, J.Mat. Sci. Let., Vol.4, pp.558-560, (1985).
- [17] FICHTL, W., TRAUSNER, N., MATUSCHKA, A. G., Borieren mit Ekabor, ESK GmbH, (1987).
- [18] JAMES, D. H., SMART, R. F., REYNOLDS, J. A., Surface Treatments in Engine Component Technology, Wear, 34, 3, pp. 373-382, (1975).
- [19] SAMSANOV, G. V., EPIK, A. P., Coatings of High Temperature Materials, Ed. HAUSNER, H. H., Plenum Press, pp.7-35, (1966).
- [20] SOYDAN, Y., Katı Ortamda Bor Yayınımı ile Sertleştirilen Çelik Yüzeylerinin Kuru Kayma Halinde Sürtünme ve Aşınma Davranışları, Doktora Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Mart (1996).
- [21] GRAF, A., MATUSHCKA, W., Borieren, Carl Hanser Verlag, München, Wien, pp. 1-87, (1977).
- [22] ATENS, H., KUNST, H., Über Die Festigkeits-und Zähigkeitseigenschaften Borierten Stähles Magnesium Electron Ltd., 28, pp. 266-270, Nov. (1975).
- [23] PENGXUN, Y., Gaseous Boronising with Solid Boron-Yielding Agents, Thin Solid Films, 214, pp. 44-47, (1992).
- [24] BOZKURT, N., Bor Yayınımı ile Çeliklerde Yüzey Sertleştirme, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, Eylül (1984).
- [25] ÖZSOY, A., YAMAN, Y. M., The Effect of Thermocycling Liquid Boronising on the Thickness of the Boride Layer and the Transition Zone, Scripta Met. Vol.29., pp. 231-236, (1993).
- [26] SEONG, H. H., JOHN, S. C., A Study on the Electroboronizing of steel by Superimposed Cyclic Current, J.Mater.Sci., 15, pp. 1379-86, (1980).
- [27] HEGEVALDT, F., SINGHEISER, L., TÜRK, M., Gas Borieren, HTM, 39, 1, (1984).

- [28] **KNITEK, O., LUGSCHEIDER, E., LEUSCHEN, K.**, Surface Layer on Cobalt Base Alloys by Boron Diffusion, *Thin Solid Films*, 45, pp. 331-339, (1983).
- [29] **REYMOND, A. C.**, Engineering Properties of borides, *Engineering materials Handbook*, Vol.4, Ceramic and Glasses, ASM International, pp. 787-803, Dec. (1991).
- [30] **Metal Borides**, *Chemical Encyclopedia*, Vol. 4, pp. 304-307.
- [31] **GOEURIOT, F. P., THEVENOT, J., DRIVER, H.**, Surface Treatment of Steels: Borudif, a New Boriding Process, *Thin Solid Films*, 78, pp. 67-76, (1981).
- [32] **VLACK, W.**, *Elements of Materials Science and Engineering*, Addison Wesley Published Company Inc., USA, (1985).
- [33] **KOHN, J. A., NYE, W. F., GAULE, G. K.**, *Boron*, Prenium Press Inc., New-York, (1960).
- [34] **YILMAZ, F., ŞEN, U.**, *Alaşımaların Yapı ve Özellikleri*, SA.Ü. Matbası, Adapazarı, (1996).
- [35] **HAYASHI, Y., SUGENO, T.**, Nature of Boron in a Iron, *Acta Metallurgica*, Vol. 18, pp. 693-697, June (1970).
- [36] **LIAO, P. K., SPEAR, K. E.**, B-Fe (Boron-Iron) Binary Diyagrams of Binary Iron Alloys, pp. 41-47
- [37] **LUCCI, A., DELLA, G. G., VANTURELLA, G.**, On the Solubility of Boron in High Purity Alpha Iron, *J. Mater. Sci.*, Vol. 3, pp. 14-17, (1969).
- [38] **FICHTL, W.**, Über neue Erkenntnisse auf dem Gebiet des Oberflächen-Borierens, *HTM*, 29, 2, (1974).
- [39] **ST JOHN, M. R., SAMMELS, A. F.**, Characterization of an Iron Boride Coating Produced by Pack Boronization of Low Carbon Steel, *J. Mater. Sci. Let.*, Vol. 16, pp. 2327-29, (1981).
- [40] **BADINI, C., CIANOGLIO, C., PARADELLI, G.**, The Effect of Carbon, Chromium and on the Hardness of Borided Layers, *Surface and Coatings Technology*, 30, pp. 157-170, (1987).
- [41] **CASADESUS, P., GANTOIS, M.**, Über Das Borieren Von Eisen Legierungen Mittels Ionenebeschu Mit Diboran, *HTM*, 33, 4, pp. 202-208, (1978).
- [42] **PALOMBARINI, G., CARBUCICCHIO, M.**, Growth of Boride Coatings on Iron, *J. Mater. Sci. Let.*, pp. 415-16, (1987).

- [43] **PALOMBARINI, G., CARBUCICCHIO, M.,** On the Morphology of Thermochemically Produced Fe<sub>2</sub>B/Fe Interfaces, *J. Mater. Sci. Let.*, 3, pp. 791-94, (1984).
- [44] **GRIBERS, E. M., CHIRKOVA, F. V.,** The Dislocation Structure of Diffusion Layers of Boron in Iron, *Metalloved. Term. Obrab. Met.*, Vol. 1, Russian, (1988) (*Met. Abstract*, 57-1061 'deki özeti).
- [45] **CARBUCICCHIO, M., BADINI, C., SAMBOGNA, G.,** On the Early Stages of High Purity Iron Boriding with Crystalline Boron Powder, *J. Mater. Sci.*, 15, pp. 1483-90, (1980).
- [46] **CARBUCICCHIO, M., BADINI, C., PALOMBARINI, G.,** Mössbauer and Metallographic Analysis of Borided Surface Layers on Armco Iron, *J. Mater. Sci.*, 15, pp. 711-19, (1980).
- [47] **CARBUCICCHIO, M., MEAZZA, G., PALOMBARINI, G.,** Surface Structure of Boride Layers Grown on Fe-C-Ni Alloys, *J. Mater. Sci.*, 17, pp. 3123-28, (1983).
- [48] **CARBUCICCHIO, M., PALOMBARINI, G., CENTO, L.,** Electron Probe Microanalysis of Nickel and Chromium in Fe-C-Ni and Fe-C-Cr Alloys Borided at 850°C, *J. Mater. Sci.*, 19, pp. 3732-38, (1984).
- [49] **CARBUCICCHIO, M., ZECCHI, E., PALOMBARINI, G., SAMBOGNA, G.,** Phase Composition and Structure of Boride Layers Grown Laboratory-Cast Low-Chromium Alloys, *J. Mater. Sci.*, 18, pp. 3355-62, (1982).
- [50] **CARBUCICCHIO, M., PALOMBARINI, G., SAMBOGNA, G.,** Composition and Structure of Boride Layers Grown on Low-Manganese Ternary Iron Alloys, *J. Mater. Sci.*, 15, pp. 4035-39, (1984).
- [51] **GALIBOS, A., BOUTENKO, O., VOYZELE, B.,** Mechanism of Formation of Boron Layers on Steels at High Temperature, *Technique des Poudres, Acta Met.*, Vol. 28, pp. 1765-71, (1980).
- [52] **LUBKIEWICZ, J., TACIKAWSKI, J.,** Eigenschaften von Borierschichten auf Stählen Mittleren Kohlenstoffgehaltes, *HTM*, 27, Heft. 3, pp. 174-180, (1972).
- [53] **DIN 17014,** Heat Treatment of Ferrous Materials, UDC 621.785:669.1.4, August (1988).

- [54] **SWAIN, M. Y.**, A Note on the Residual Stress About a Pointed Indentation Impression in a Brittle Solid, *J. Mater. Sci. Let.*, 11, pp. 345-48, (1976).
- [55] **BRAKMAN, C. M., GOMMERS, A. W. J., MITTEMEIJER, E. J.**, Boriding of Iron and Fe-C, Fe-Cr, Fe-Ni Alloys: Boride Layers Growth Kinetics, *J. Mater. Res.*, Vol. 4, No. 6, pp. 1354-70, Nov/ Dec., (1989).
- [56] **BADINI, C., MAZZA, D.**, Preferred Orientation of Boride Crystals in the Borided Layers: A Quantative Method of Evaluation, *J. Mater. Sci.*, Vol. 23, pp. 3061-6, (1988).
- [57] **CARBUCICCHIO, M., PALOMBARINI, G.**, Effect of Alloying Elements on The Growth of Iron Boride Coatings, *J. Mater. Sci. Let.*, Vol. 6, pp. 1147-49, (1987).
- [58] **WIEZCHON, T., POKRASEN, S., KARPINSKI, T.**, Plasmaborieren-Faktoren, die Keimbildung der Boridschicht auf Stahl Bedingen, *HTM*, 38, 2, pp. 57-62, (1983).
- [59] **HUNGER, H. J. and TRUE, G.**, Boronising to Produce Wear-Resistant Surface Layers, *Heat Treatment of Metals*, 2, pp. 31-39, (1994).
- [60] **BADINI, C., MAZZA, D.**, The Texture of Boride Layers Grown on Fe-Ni, Fe-Cr Alloy, *J. Mater. Sci. Let.*, 7, pp. 661-2, (1988).
- [61] **GIANOGLIO, C., BADINI, C.**, Distribution Equilibria of Iron and Nickel Two Phase Fields of the Fe-Ni-B System, *J. Mater. Sci.*, Vol. 21, pp. 4331-34, (1986).
- [62] **BLAZON, M., STANOJEVIC, B., VELJKOVIC, V.**, Effect of Alloying Elements on the Formation of Boride Layer on Steel, *Scripta Metallurgica*, Vol. 9, pp. 1153-56, (1975).
- [63] **ÖZSOY, A.**, Çeliğin Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matris Özelliklerinin İyileştirilmesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, (1991).
- [64] **LU, M. J.**, Die Bildungs-Und Wachstums-kinetik Moophasiger Boridhschichten, *HTM*, 38, 4, pp. 156-68, (1983).
- [65] **VILSMEIER, J., CASEDESUS, P., SCHMIT-THOMAS, Kh. G., GANTOIS, M.**, Untersuchung Über die Elemeentverteilung in Legierten Stählen Bein Borieren, *HTM*, 35, 1, (1980).
- [66] **GEURIOT, P., FILLIT, R., THEVENOT, F., DRIVER, J. H., BRUVAS, H.**, The Influence of Alloying Elements Additions of The Boriding Steels, *J. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 55, pp. 9-19, (1982).

- [67] **BADINI, C., GIANOGLIA, C., PRADELLI, G.**, The Effects of Carbon, Chromium and Nickel on the Hardness of Boride Layers, Surface and Coating Technology, Vol. 30, pp. 157-170, (1987).
- [68] **BADINI, C., GIANOGLIA, C., PRADELLI, G.**, Borurazione Die Acciai: Contributo Allo Studio Del Meccanismo Die Diffusione Del Boro, La Metallurgia, Italiana, No. 10, Ottobre, pp. 747-756, (1987).
- [69] **BİNDAL, C.**, Az Alaşımlı ve Karbon Çeliklerinde Borlama ile Yüzeye Kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tesbiti, Doktora Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağustos (1991).
- [70] **PRADELLI, G., GIANOGLIA, C., BADINI, C.**, Balance of Distribution of Some Transition Metals Between the  $(M', M'')B$  and  $(M', M'')_2B$  Phases, Met. Trans. A, Vol. 17 A, pp. 1665-69, October (1986).
- [71] **FRANS, J. J., VAN, L., JOHAN, A., VAN, B.**, Reactions and Phase Relations in the Systems Fe-Ni-B and Fe-Co-B, Z. Metallkde, Bd 80, H.4, pp. 245-50, (1989).
- [72] **TSIPAS, D. N., RUS, J.**, Boronising of Alloy Steels, J. Mater. Sci. Let., 6, pp. 118-120, (1987).
- [73] **TRAUSNER, N.**, Borieren-ein Bewährtes Verfahren für den Verschleisschutz, International Institut für Industrielle Technologic Trauster, pp. 199-215, (1988).
- [74] **KASTNER, B., PRZYBYLOWICZ, K., GRGORUK, I.**, Untersuchungen Von Boridschichten auf Stählen, HTM, 34, 4, pp. 173-79, (1974).
- [75] **VETTERS, H.**, IV. Die Untersuchung der Schichtausbildung Von Borieren Proben aus 61CrNiV5 und X 5 CrNi 18 9 mit den Methoden der Elektronenstrahlanalyse, HTM, 30, Haft 4, pp. 298-301, (1975).
- [76] **LU, M. J.**, Die Bildungs und Wachstums Kinetik Monophasiger Boridschichten, HTM, 38, pp. 156-168, (1983).
- [77] **PORTER, D. A., EASTERLING, K. E.**, Phase Transformation in Metals and Alloys, Chapman & Hall, London, pp. 60-106, (1993).
- [78] **GUPTA, D., HO, P. S.**, Diffusion Processing Thin Solid Films, 72, pp. 399-418, (1980).
- [79] **WENDONG, W. SANHONG, Z., XINLAI, H. E.**, Diffusion of Boron in Alloys, Acta. Metall., Vol. 43, No. 4, pp. 1693-99, (1995).
- [80] **MATS, H. A., LI, C.**, On the Grain Boundary Diffusion in Surface Alloying, Scandinavian Journal of Metallurgy, 10, pp. 171-76, (1981).

- [81] **MATHUSCHKA, A. G.**, Boronising, Carl Hanser Verlag, München, pp. 100, (1987).
- [82] **KUNST, H., SCHABER, O.**, Borieren von Eisenwerkstoffen und Titan, HTM, 26, Haft. 1, pp. 18-20, (1971).
- [83] **KEHRER, H. P.**, Oberflächenhärten Durch Borieren VDI-Berichde Nr., 242, . pp. 9-19, (1975).
- [84] **BADINI, C., GIANOGLIO, C., PRADELLI, G.**, Caratteristiche Chimiche Morfologiche E Drometriche Dello Strato Borurato Ottenute Su Leghe Ferrose, La Metallurgia Italiana, No. 6, pp. 523-34, (1988).
- [85] **PARICE, G., FRANCOIS, T., JULIAN, H. D., THIERRY, M.**, Method of Examining Brittle Layers Obtained by a Boriding Surface Treatment (Borudif), 8<sup>th</sup>. International Conferance of Chemical Vapor Deposition, Gouvieux-chantilly France, September 15-18, pp. 1-12, (1981).
- [86] **MARRELS, S., WETTINCK, E.**, Borieren und Silicieren mit Activierten Carbiden, HTM, 40, 4, (1985).
- [87] **PRADELLI, G., GIANOGLIO, C., ELEZI, D., BADINI, C., COCCHIS, F.**, Indurimento Superficiale Di Acciai Mediante Borocarburazione, La Matallurgia Italiane, Vol. 81, No. 6, pp. 527-32, (1989).
- [88] **GUAN, Z. M., LIU, G. X., XU, H. J., PENG, S. R.**, The Impregnation of Oxygen, Sulfur, Boron, Carbon and Nitrogen into the Surface of High Speed Steel Cutters in an Gaseous Medium, J. Heat Treating, Vol. 3, No.1, pp. 16-22, June (1983).
- [89] **FISCHER, R. C.**, Das Mehr komponenttenborieren -Eine Technologie zum Erzeugen von Boridschichten, Mit Besonderen Eigenschaften, HTM, 36, 5, pp. 248-54, (1981).
- [90] **FISCHER, R. C.**, Time to Take a Look at Multi Component Boriding, Metal Progress, pp. 24-37, April (1986).
- [91] **ASHBY, F. M., JONES, D. R. H.**, Engineering Materials I, Pergamon Press, pp. 223-29, (1980).
- [92] DIN 5032, Taschenbuch 56, Beuth Velag GembH, 38, (1983).
- [93] ASTM G 40-93, Standard Terminology Relating to Wear and Errosion, (1993).
- [94] **KAYALI, E. S.**, Sürtünme ve Aşınma, Workshop on Anti-Wear Coatings, TÜBİTAK-MAM, Kocaeli, 11/(1993).

- [95] Mc Graw-Hill Encyclopedia of Engineering, Ed Parker, pp. 1201-3, (1974).
- [96] **WELLINGER, E. H. K.**, Lehrstuhl für Material Prüfung, Stuttgart University, pp. 131-43, (1974).
- [97] **COLLANGELLO, V. J., HAISER, F. A.**, Analysis of Metallurgical Failures, A Wiley Interscience Publication, pp. 206-23, (1974).
- [98] **PEKİN, Ş., VUORISTI, P., MANTYLA, T.**, System Approach for Wear Resistant coatings, Workshop on Anti-Wear Coatings, TÜBİTAK-MAM, Kocaeli, 11/(1993).
- [99] **MİMAROĞLU, A., YILMAZ, F.**, Influence of Carbide Size, Hardness and Temperature on Sliding Friction and Wear of Boundary Lubricated High-Speed Steel and  $\text{Si}_3\text{N}_4$  Ceramics, Tribology Transactions, Vol.40, pp.173-177, (1997).
- [100] Wear Failures, Metals Handbook, 8<sup>th</sup>. Edition , ASM, pp. 134-56, (1975).
- [101] **HOLMBERG, K., MATTHEWS, A.**, Coatings Tribology , Elsevier Science B.V., pp. 45-74, (1994).
- [102] **LIM, S. C., ASHBY, M. F.**, Overviev No:55, Wear Mechanism Maps, Acta Metall., Vol. 35, pp. 1-24, (1987).
- [103] **HABIG, K. H.**, Wear Behavior of Surface Coatings of Steels, Tribology International, Vol. 27, No.2, pp. 65-73, April (1989).
- [104] **EYRE, T. S.**, Effect of Boronising on Friction and Wear of Ferrous Metals, Wear, 34, pp. 383-397, (1975).
- [105] **BIDDULPH, R. A.**, Boronising for Erosion Resistance, Thin Solid Films, 45, pp. 341-347, (1977).
- [106] **SINGHAL, S. C.**, A Hard Diffusion Boride Coating for Ferrous Materials, Thin Solid Films, 45, pp. 321-329, (1977).
- [107] **FORMANEK, B., SWADZBA, L., MACIEJNY, A.**, Microstructure, Wear Resistance and Errosion Resistance of Plasma Sprayed Boride Coatings, Surface and Coatings Technology, 56, pp. 225-231, (1993).
- [108] **FENSKE, G. R., HU, R., BALDO, P. M., ERCK, R. A., ERDEMİR, A., LEE, R. H., BUSCH, D.E., NICHOLS, F. A., REHN, L. E.**, Ion Beam Mixing of Fe/B Layers for Tribological Applications, J. Soc. Tri. & Lub. Eng., Vol. 47, 9, pp. 779-786, (1991).

- [109] **ERDEMİR, A., FENSKE, G. R., NICHOLS, F. A., ERCK, R. A.,** Self-Lubrication Films for Tribological Applications, Proceedings of the Japan International Tribology Conference, Nagoya, (1990).
- [110] **ERDEMİR, A.,** Tribological Properties of Boric Acid and Boric Acid Forming Surfaces. Part 1: Crystal Chemistry Mechanism of Self-Lubrication of Boric Acid, J. Soc. Tri. & Lub. Eng., pp. 168-172, March (1991).
- [111] **ERDEMİR, A., FENSKE, G. R., ERCK, R. A., NICHOLS, F. A., BUSCH, D.E.,** Tribological Properties of Boric Acid and Boric Acid Forming Surfaces. Part 1: Crystal Chemistry Mechanism of Self-Lubrication of Boric Acid, J. Soc. Tri. & Lub. Eng., pp. 179-183, March (1991).
- [112] **QURESHI, I. J., TABAKOFF, W.,** The Influence of Coating Process and Process Parameters on Surface Erosion Resistance and Substrate Fatigue Strength, Surface and Coating Technology, 36, pp. 433-444, (1988).
- [113] **HOWARD, C., FIEDLER & SIERASKI, R. J.,** Boriding Steels for Wear Resistance, Metall Progress, pp. 101-107, (1971).
- [114] **VENKATARAMAN, B., SUNDARARAJAN, G.,** High Speed Sliding Wear Behaviour of Boronized Medium Carbon Steel, Surface and Coating Technology, 73, pp. 177-184, (1995).
- [115] **SUBRAHMANYAM, J., GOPINATH, K.,** Wear Studies on Boronized Mild Steel, Wear, Vol. 95, pp. 293-311, (1984).
- [116] **TAKEUCHI, E., FUJII, K., KATAKIRI, T.,** Sliding Wear Characteristics of Gas Boronized Steel, Wear, 55, pp. 121-130, (1979).
- [117] **PONTON, C. B., RAWLINGS, R.D.,** Vickers Indentation Fracture Toughness Test Part 1. Review of Literature and Formulation of Standardised Indentation Toughness Equations, Mat. Sci. Tec., Vol. 5, pp. 865-871, September (1989).
- [118] **MARSHALL, D. B., LAWN, B. R.,** Residual Stress Effect in Sharp Contact Cracking, J. Mat. Sci., Vol. 14, pp. 2001-12, (1979).
- [119] **LAWN, B. R., FULLER, E.R.,** Equilibrium Penny-Like Cracks in Indentation Fracture, J. Mat. Sci., Vol. 10, pp. 2016-2024, (1975).
- [120] **LAWN, B. R., SWAIN, M. V.,** Microfracture Beneath Point Indentation in Brittle Solids, J. Mat. Sci., Vol. 10, pp. 113-122, (1975).
- [121] **FUJITA, S., MAEDA, K., HIYODO, S.,** Radiation Enhanced Dislocation Glide Effect on Indentation- Induced Fracture of GaAs Single Crystals, Phys. Stat. Sol. (a), Vol. 109, pp. 383-393, (1988).

- [122] American Society for Testing and Materials, ASTM G 99-90.
- [123] CSEM Tribometer Pin-on-Disc Machine Manual, (1991).
- [124] **ÇEP, H., ZEYTİN, S., ÖKTEM, Z.**, Wear Characterization of Coatings on Steels, Workshop on Anti-Wear Coatings, TÜBİTAK-MRC, Kocaeli, 11/(1993).
- [125] **AKBULUT, H.**, Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Mikroyapı-Darbe Enerjisi ve Sertlik İlişkisi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, Şubat (1990).
- [126] **YILMAZ, F.**, Sürtünme ve Aşınma, 9.Metalurji ve Malzeme Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Cilt 1. pp.229-257, 11-15 Haziran (1997).
- [127] **ÖKTEM, Z., ZEYTİN, S., TEPECİK, M., ÇAPAN, L.**, Yüksek Karbonlu Çeliklerde Mikroyapı ve Aşınma Karakteristiklerinin Optimizasyonu, 5.Denizli Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, pp. 438-447, 7-9 Nisan (1993).

## **ÖZGEÇMİŞ**

Uğur ŞEN, 1966 yılında Ordu ilinin Fatsa ilçesinde doğmuştur. 1982 Yılında Fatsa Lisesi'ni iyi derece ile bitirmiştir. 1984 yılında girdiği İ.T.Ü Sakarya Mühendislik Fakültesi, Metalurji Mühendisliği Bölümü'nden 1988 yılında iyi derece ile mezun olmuştur. Aynı yıl İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Programı'nda Yüksek Lisans eğitime başlamıştır. İ.T.Ü Dil ve İnkilap Tarihi Bölümü'nde bir yıl İngilizce hazırlık sınıfına devam ettikten sonra, 1993 Şubat döneminde Pekiyi derce ile Metalurji Yüksek Mühendisi ünvanını almıştır. Aynı dönemde İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Programı'nda doktora öğrenimine başlamıştır.

1990 yılında Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji Mühendisliği Bölümü'ne Araştırma Görevlisi olarak atanan Uğur ŞEN, 1995 yılında Sakarya Üniversitesi, Sakarya Meslek Yüksek Okulu, Döküm Bölümü'ne Öğretim Görevlisi olarak atanmıştır. Hala bu görevini devam ettiren Uğur ŞEN, evli ve bir çocuk babasıdır.