

**FARKLI GAZ KARIŞIMLARINDA PLAZMA
PASTA BORLANMIŞ AISI 8620 ÇELİĞİNİN
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Şükrü ÜLKER

DANIŞMAN

Doç. Dr. Şükrü TAKTAK

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

MART 2012

Bu tez çalışması 0246 numaralı proje ile Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN)
tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

FARKLI GAZ KARIŞIMLARINDA PLAZMA PASTA BORLANMIŞ AISI 8620
ÇELİĞİNİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Şükrü ÜLKER

DANIŞMAN

Doç. Dr. Şükrü TAKTAK

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

MART 2012

TEZ ONAY SAYFASI

Şükrü ÜLKER tarafından hazırlanan “**Farklı Gaz Karışımlarında Plazma Pasta Borlanmış AISI 8620 Çeliğinin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi**” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 19/03/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metal Eğitimi Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Şükrü TAKTAK

- Başkan :** Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi
- Üye :** Doç. Dr. Şükrü TAKTAK
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi
- Üye :** Doç. Dr. Yılmaz YALÇIN
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi
- Üye :** Doç. Dr. Mustafa AYDIN
Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
- Üye :** Doç.Dr. Osman TORUN
Afyon Kocatepe Üniversitesi Bolvadin Meslek Yüksekokulu
- Üye :** Yrd. Doç. Dr. Sinan ULU
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

19/03/2012

Şükrü ÜLKER

ÖZET

Doktora Tezi

FARKLI GAZ KARIŞIMLARINDA PLAZMA PASTA BORLANMIŞ AISI 8620 ÇELİĞİNİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Şükrü ÜLKER

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Şükrü TAKTAK

Bu araştırmada, AISI 8620 çeliği, boraks ve B_2O_3 esaslı pasta karışımları (SiC ve B_4C ilaveli) ile plazma ortamında, farklı sıcaklık ve sürelerde, ve değişik gaz karışımlarında borlanmıştır.

Çalışmada numuneler kesitten metalografik olarak hazırlanmış ve optik mikroskopta tabaka kalınlığı ölçümü ve tabaka morfolojisi incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler üzerinde oluşan fazların analizi X-ışınları difraktometresinde CuK_{α} ($\lambda=1,5418 \text{ Å}$) radyasyonu kullanılarak yapılmıştır. Yüzey sertlikleri mikrosertlik (Shimadzu HMV-2) cihazında Vickers ucuyla 50 gr yük altında ölçülmüştür. Tribolojik testler bilye-disk sisteminde, kuru ortamda, 330 dev/dk sabit hızda ve 10 N yük altında gerçekleştirilmiştir.

Mikroyapı analizleri sonucunda plazma pasta borlama işlem sıcaklık ve süresinin artmasıyla birlikte borür tabaka kalınlıklarında artış gözlenmiştir. Plazma pasta borlama yapılan numunelerin XRD incelemeleri sonucunda Ar/H_2 gaz karışımında FeB , Fe_2B fazı elde edilirken $Ar/H_2/N_2$ gaz karışımlarında bu fazlara ilaveten Fe_3N ve $B_{25}N$ fazlarının bulunduğu tespit edilmiştir.

Plazma pasta borlama işlem sıcaklığının ve süresinin artmasıyla boraks ve B_2O_3 pastalı numunelerin sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir. SiC katkılı boraks ve B_2O_3 'li karışımlar, B_4C takviyelilere göre daha düşük sertlik değerlerinin elde edilmesine neden olmuştur.

Farklı % boraks ve B_2O_3 pasta karışımlarıyla plazma pasta borlanmış numunelerde borlama işlem sıcaklığının artmasıyla aşınma hızlarında düşüşler gözlenmiştir. Boraks pasta ile borlanan numunelerde aşınma direnci B_2O_3 pasta ile borlanan numunelere göre biraz daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ar/ H_2 / N_2 gaz karışımlarında sürtünme katsayısının 0,34-0,71 arasında değiştiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Plazma pasta borlama, Boraks, B_2O_3 , Triboloji

2012, xviii + 153 sayfa

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

AN INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES PLASMA PASTE BORONIZING OF AISI 8620 STEEL BY USING DIFFERENT GAS MIXTURES

Sukru ULKER

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metal Education

Supervisor: Associate Prof. Dr. Sukru TAKTAK

In this research, AISI 8620 steel was boronized by using borax and B_2O_3 based paste mixtures (in addition to SiC and B_4C) in plasma at different temperatures and times and at various gas mixtures.

In this study, cross-sections of boronized steels were prepared metallographically to observe morphological details using optical microscope and the thickness of the layers formed on the steels was measured by an optical micrometer attached to it. The analysis of phases formed on the steels were obtained in X-ray diffractometer using CuK_{α} ($\lambda=1,5418 \text{ \AA}$). The hardness of the layers was measured on the cross-sections using Micro-Vickers indenter (Shimadzu HMV-2) with 50 g loads. Tribological tests were carried out on ball-on-disc tribometer in dry environment at the speed of 330 rpm and load of 10 N.

The results of microstructure analysis showed that the boride layer thickness increased as the boriding temperatures and times increased. The boride layer on the steel consists of FeB and Fe_2B phases for Ar/ H_2 gas mixtures. Fe_3N and $B_{25}N$ phases have been found on the steel as well as FeB and Fe_2B borides for Ar/ H_2/N_2 gas mixtures.

It was observed that the surface hardness of the steels boronized using borax and B_2O_3 paste increased with increase in plasma paste boronizing temperatures and times. Furthermore, the surface of the steel boronized using borax and B_2O_3 paste with SiC had lower hardness than that of the steel boronized using paste added B_4C .

Dry tribological tests showed that the wear rates of the plasma paste boronized steel surface decreased as the boronizing temperatures increased. The wear resistance of the steels boronized using borax paste was higher when compared with the steels boronized using B_2O_3 paste. The friction coefficient was found 0,34-0,71 for the steels boronized in Ar/H₂/N₂ plasma.

2012, xviii + 153 pages

Keywords : Plasma paste boronizing, Borax, B_2O_3 , Tribology

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Şükrü TAKTAK'a, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Arş. Grv. Dr. İbrahim GÜNEŞ'e, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ ve Doç. Dr. Yılmaz YALÇIN'a, çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme, sabır ve desteklerinden dolayı sevgili eşime, proje kapsamında sağladığı maddi imkanlar nedeniyle Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü ve üniversiteme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Şükrü ÜLKER
AFYONKARAHİSAR, 2012

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

B_2O_3	Bor oksit
SiC	Silisyum karbür
B_4C	Bor karbür
$Na_2B_4O_7$	Susuz boraks
FeB	Demir bor
Fe_2B	Demir (II) bor
CO	Karbonmonoksit
SiO_2	Silisyum oksit
Na_2O	Sodyum oksit
μ	Sürtünme katsayısı,
F	Teğetsel kuvvet (sürtünme kuvveti),
W	Normal kuvvet (yük).
F	Sürtünme kuvveti,
F_{adh}	Kaynak bağı oluşturmuş yüzeyleri ayırmak için gerekli teğetsel kuvvet
F_{def}	Tepecik ve pürüzlerin yandan eğilmesi ve kesilmesi için gerekli kuvvet
τ	Kaynak noktalarındaki kayma mukavemeti,
A	Kaynak ve deformasyon noktaları alanı,
P_a	Malzemenin plastik akma basıncı,
H	Malzemenin Brinell sertliği
V	Aşınma hacmi
K	Malzemeye ait bir sabit
s	Kayma yolu

Kısaltmalar

PPB	Plazma pasta borlama
-----	----------------------

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

1. GİRİŞ.....	1
2. BOR ELEMENTİ VE BORLAMA HAKKINDA GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Bor Nedir ?.....	3
2.2 Bor Mineralleri ve Bileşikleri.....	4
2.3 Bor ve Ürünlerinin Kullanım Alanları.....	4
2.4 Bor Ürünlerinin Kullanım Sektörleri.....	5
2.5 Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları	7
2.6 Geleneksel Borlama Yöntemleri	8
2.6.1 Katı Ortamda Borlama.....	8
2.6.1.1 Pasta Borlama	10
2.6.2 Sıvı Ortamda Borlama	11
2.6.3 Gaz Ortamda Borlama	13
2.6.4 Plazma Borlama	14
2.6.5 Plazma Pasta Borlama	15
2.7. Borür Tabakasının Özellikleri	16
2.7.1 Borürlü Tabakanın Yapı ve Bileşimi.....	17
2.7.2 Borür Tabakası Çeşitleri	18
3. TRİBOLOJİ.....	20
3.1 Tribolojik Sistem ve Tribolojiyi Etkileyen Faktörler	20
3.2 Sürtünme	21
3.3 Aşınma Proseslerinin Sınıflandırılması	23
3.3.1 Adheziv (Yapışma) Aşınma.....	23
3.3.2 Abrasiv Aşınma.....	25
3.3.3 Yorulma ve Delaminasyon Aşınması.....	26
3.3.4 Oksidasyon Aşınması	27
4. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	29
4.1 Geleneksel Borlama İle İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	29
4.2 Plazma Destekli Borlama İle İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	41
5. MATERYAL VE METOT.....	45
5.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler	45

5.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar	45
5.2.1 Plazma Pasta Borlama Cihazı	45
5.2.2 Mikro Yapı Analizleri	46
5.3 Bor Kaynaklı Pastalarının Hazırlanması.....	48
5.4 Plazma Pasta Borlama İşlemi	49
5.4.1 Deney Parametrelerinin Kodlanması.....	50
5.5 Analizler ve Testler.....	51
5.5.1 Metalografik İşlemler	51
5.5.2 X-Işınları Difraksiyon Analizi	51
5.5.3 Düşük Açılı X-Işınları Difraksiyon Analizi (GAXRD)	51
5.5.4 Glow Deşarj Optik Emisyon Spektrometresi.....	51
5.5.5 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelenmesi	52
5.5.6 Mikro Sertlik Ölçümleri	52
5.5.7 Aşınma Deneyleri.....	52
6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	56
6.1. Mikro Yapısal Özellikler.....	56
6.1.1 700-2h-6H Deney Şartlarında Yapılan PPB İşlemi.....	56
6.1.2 700-2h-6N Deney Şartlarında Yapılan PPB İşlemi.....	58
6.1.3 700-5h-6H Deney Şartlarında Yapılan PPB İşlemi.....	60
6.1.4 700-5h-6N Deney Şartlarında Yapılan PPB İşlemi.....	62
6.1.5 800-2h-6H Deney Şartlarında Yapılan PPB İşlemi.....	64
6.1.6 800-2h-6N Deney Şartlarında Yapılan PPB İşlemi.....	66
6.1.7. 800-5h-6H Deney Şartlarında Yapılan PPB İşlemi.....	68
6.1.8 800-5h-6N Deney Şartlarında Yapılan PPB İşlemi.....	70
6.1.9 Farklı Gaz Karışımlarında Elde Edilen Borür Tabaka Kalınlıkları.....	72
6.2 Üç Farklı Gaz Karışımlarında X-Işınları Difraksiyon Analizi	76
6.2.1 700-2h-6H PPB işlemi XRD analizleri	87
6.2.2 700-5h-6H PPB işlemi XRD analizleri	88
6.2.3 800-2h-6H PPB işlemi XRD analizleri	90
6.2.4 800-5h-6H PPB işlemi XRD analizleri	92
6.2.5 700-2h-6N PPB işlemi XRD analizleri	94
6.2.6 700-5h-6N PPB işlemi XRD analizleri.....	95

6.2.7 800-2h-6N PPB işlemi XRD analizleri	97
6.2.8 800-5h-6N PPB işlemi XRD analizleri	99
6.3 Düşük Açılı XRD Sonuçları.....	101
6.4 Glow Deşarj Optik Emisyon Spektrometresi Sonuçları	106
6.5 Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi.....	109
6.6 Mikrosertlik Sonuçları	111
6.7 Aşınma ve Sürtünme Deney Sonuçları.....	119
6.8 Aşınma Bölgelerinin SEM İncelemesi.....	137
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	142
7.1 Sonuçlar.....	142
7.2 Öneriler	143
8. KAYNAKLAR.....	145
8.1. İnternet Kaynakları	153
ÖZGEÇMİŞ.....	154

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1 Katı borlama işleminin şematik görünümü	9
Şekil 2.2 a) Borlama sıvısının eritilmesi, b) Numunenin borlama sıvısına daldırılması.....	11
Şekil 2.3 Gaz ortamda borlama tertibatının şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.4 Borür tabakası çeşitleri.....	19
Şekil 3.1 Bir tribolojik sistemin DIN 50320 normuna göre şematik gösterimi	20
Şekil 3.2 Adheziv aşınmanın temel mekanizması.....	24
Şekil 4.1 Kolonsal morfolojideki FeB-Fe ₂ B tabakasının görünümü ve oluşturulan çatlak.....	30
Şekil 4.2 Aşınma Eğrileri a) 5N yük b) 20 N yük.....	31
Şekil 4.3 Malzemenin üzerinden tabaka kaldırıldıktan sonra demir üzerinde oluşan çoklu fazlı borür tabakalarının dış yüzeyinin farklı derinliklerde bilye izi metoduyla aşınma hızının belirlenmesi	32
Şekil 5.1 Plazma pasta borlama cihazı şematik gösterimi	46
Şekil 5.2 Borür tabaka kalınlığının (d) belirlenmesi için örnek gösterim	48
Şekil 5.3 Boraks ve borik asitin kalsinasyon işleminin akış şeması.....	48
Şekil 5.4 Rugosimeter cihazından elde edilen kesit alanı örneği	55
Şekil 6.1 700-2h-6H şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı	57
Şekil 6.2 700-2h-6N şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı	59
Şekil 6.3 700-5h-6H şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı	61
Şekil 6.4 700-5h-6N şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı	63
Şekil 6.5 800-2h-6H şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı	65
Şekil 6.6 800-2h-6N şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı	67

Şekil 6.7 800-5h-6H şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı	69
Şekil 6.8 800-5h-6N şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı	71
Şekil 6.9 Farklı sıcaklık ve sürelerde 10B pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri	77
Şekil 6.10 Farklı sıcaklık ve sürelerde 7B+3SiC pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri	78
Şekil 6.11 Farklı sıcaklık ve sürelerde 7B+3B ₄ C pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri	79
Şekil 6.12 Farklı sıcaklık ve sürelerde 3B+7SiC pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri	80
Şekil 6.13 Farklı sıcaklık ve sürelerde 3B+7B ₄ C pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri	81
Şekil 6.14 Farklı sıcaklık ve sürelerde 10B ₂ O ₃ pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri	82
Şekil 6.15 Farklı sıcaklık ve sürelerde 7B ₂ O ₃ +3SiC pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri	83
Şekil 6.16 Farklı sıcaklık ve sürelerde 7B ₂ O ₃ +3B ₄ C pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri	84
Şekil 6.17 Farklı sıcaklık ve sürelerde 3B ₂ O ₃ +7SiC pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri	85
Şekil 6.18 Farklı sıcaklık ve sürelerde 3B ₂ O ₃ +7B ₄ C pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri	86
Şekil 6.19 700-2h-6H-B pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri.....	87
Şekil 6.20 700-2h-6H-B ₂ O ₃ pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri.....	88
Şekil 6.21 700-5h-6H-B pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri.....	89
Şekil 6.22 700-5h-6H-B ₂ O ₃ pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri.....	90

Şekil 6.23 800-2h-6H-B pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri.....	91
Şekil 6.24 800-2h-6H-B ₂ O ₃ pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD sonuçları.....	92
Şekil 6.25 800-5h-6H-B pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri.....	93
Şekil 6.26 800-5h-6H-B ₂ O ₃ pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri.....	93
Şekil 6.27 700-2h-6N-B pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri.....	94
Şekil 6.28 700-2h-6N-B ₂ O ₃ pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri.....	95
Şekil 6.29 700-5h-6N-B pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri.....	96
Şekil 6.30 700-5h-6N-B ₂ O ₃ pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri.....	97
Şekil 6.31 800-2h-6N-B pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri.....	98
Şekil 6.32 800-2h-6N-B ₂ O ₃ pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri.....	99
Şekil 6.33 800-5h-6N-B pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri.....	100
Şekil 6.34 800-5h-6N-B ₂ O ₃ pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri.....	101
Şekil 6.35 700-2h-6H-10B pastasıyla yapılan PPB işlemi GAXRD analizleri	102
Şekil 6.36 700-5h-6H-10B pastasıyla yapılan PPB işlemi GAXRD analizleri	102
Şekil 6.37 800-2h-6H-10B pastasıyla yapılan PPB işlemi GAXRD analizleri	103
Şekil 6.38 800-5h-6H-10B pastasıyla yapılan PPB işlemi GAXRD analizleri	103
Şekil 6.39 700-2h-6N-10B pastasıyla yapılan PPB işlemi GAXRD analizleri	104
Şekil 6.40 700-5h-6N 10B pastasıyla yapılan PPB işlemi GAXRD analizleri.....	104
Şekil 6.41 800-2h-6N-10B pastasıyla yapılan PPB işlemi GAXRD analizleri	105
Şekil 6.42 800-5h-6N-10B pastasıyla yapılan PPB işlemi GAXRD analizleri	105

Şekil 6.43	700-5h-6H-10B pastasıyla yapılan PPB çeliğin GDOES analizi	106
Şekil 6.44	800-2h-6H-10B pastasıyla yapılan PPB çeliğin GDOES analizi	107
Şekil 6.45	700-5h-6N- 10B pastasıyla yapılan PPB çeliğin GDOES analizi	108
Şekil 6.46	800-2h-6N- 10B pastasıyla yapılan PPB çeliğin GDOES analizi	108
Şekil 6.47	800-5h-6N-10B pastasıyla yapılan PPB çeliğin GDOES analizi	109
Şekil 6.48	700-5h şartlarında PPB numunelerin SEM görüntüleri	110
Şekil 6.49	10B ₂ O ₃ pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı.....	113
Şekil 6.50	7B ₂ O ₃ +3SiC pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı.....	113
Şekil 6.51	7B ₂ O ₃ +3B ₄ C pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı.....	114
Şekil 6.52	3B ₂ O ₃ +7SiC pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı.....	115
Şekil 6.53	3B ₂ O ₃ +7B ₄ C pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı.....	115
Şekil 6.54	10B pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı.....	116
Şekil 6.55	%70B + %30 SiC pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı.....	116
Şekil 6.56	7B +3B ₄ C pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı.....	117
Şekil 6.57	3B +7SiC pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı.....	118
Şekil 6.58	3B+7B ₄ C pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı.....	118
Şekil 6.59	6H gaz karışımıyla farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin aşınma hız grafiği	123
Şekil 6.60	6N gaz karışımıyla farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin aşınma hız grafiği	124
Şekil 6.61	700-2h-6H şartlarında farklı B pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği	125

Şekil 6.62	700-2h-6H şartlarında farklı B_2O_3 pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği.....	126
Şekil 6.63	700-2h-6N şartlarında farklı B pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği	126
Şekil 6.64	700-2h-6N şartlarında farklı B_2O_3 pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği.....	127
Şekil 6.65	700-5h-6H şartlarında farklı B pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği	128
Şekil 6.66	700-5h-6H şartlarında farklı B_2O_3 pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği.....	128
Şekil 6.67	700-5h-6N şartlarında farklı B pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği	129
Şekil 6.68	700-5h-6N şartlarında farklı B_2O_3 pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği.....	130
Şekil 6.69	800-2h-6H şartlarında farklı B pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği	130
Şekil 6.70	800-2h-6H şartlarında farklı B_2O_3 pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği.....	131
Şekil 6.71	800-2h-6N şartlarında farklı B pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği	132
Şekil 6.72	800-2h-6N şartlarında farklı B_2O_3 pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği.....	132
Şekil 6.73	800-5h-6H şartlarında farklı B pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği	133
Şekil 6.74	800-5h-6H şartlarında farklı B_2O_3 pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği.....	134
Şekil 6.75	800-5h-6N şartlarında farklı B pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği	134
Şekil 6.76	800-5h-6H şartlarında farklı B_2O_3 pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği.....	135
Şekil 6.77	Farklı sıcaklık, süre ve gaz karışımlarında B ve B_2O_3 pastalarıyla PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği.....	136

Şekil 6.78 800-5h-6H şartlarında değişik pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin aşınma işleminden sonraki elektron mikroskop yüzey morfolojileri	137
Şekil 6.79 800-5h-6N şartlarında değişik pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin aşınma işleminden sonraki elektron mikroskop yüzey morfolojileri	139
Şekil 6.80 800-5h-6H-B numunesi aşındırıldıktan sonra A ve B bölgelerinden alınan EDX analiz sonuçları.....	140

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2.1 Bor mineralleri ve bileşikleri	4
Çizelge 2.2 Bor ürünlerinin kullanım sektörleri.....	5
Çizelge 2.3 Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları	7
Çizelge 2.4 Fe ₂ B ve FeB fazlarının tipik özellikleri	17
Çizelge 4.1 Bor karışımlarının ağırlıkça % karışımları	39
Çizelge 5.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi.....	45
Çizelge 5.2 Üçlü gaz karışımında gerçekleştirilen plazma pasta borlama deney parametreleri.....	50
Çizelge 6.1 Farklı sıcaklık, süre ve gaz karışımlarında yapılan PPB sonucu elde edilen tabaka kalınlıkları	75
Çizelge 6.2 6H gaz karışımında PPB aşındırılmış farklı % B ₂ O ₃ pasta karışımlarının aşınma iz derinlikleri.....	119
Çizelge 6.3 6H gaz karışımında PPB aşındırılmış farklı % B pasta karışımların aşınma iz derinlikleri	120
Çizelge 6.4 6N gaz karışımında PPB aşındırılmış farklı % B ₂ O ₃ pasta karışımların aşınma iz derinlikleri	121
Çizelge 6.5 6N gaz karışımında PPB aşındırılmış farklı % B pasta karışımların aşınma iz derinlikleri	122

RESİMLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Resim 5.1 Plazma pasta borlama cihazı.	46
Resim 5.2 Optik mikroskop (OM)	47
Resim 5.3 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	47
Resim 5.4 Aşınma cihazının görünüşü.	53
Resim 5.5 Aşınma deney programı	54

1. GİRİŞ

Teknolojik uygulamalarda kullanılan malzeme yüzeylerinin arzulanan performansı göstermesi için fonksiyonel olması gerekmektedir. Mühendislik malzemelerine olan ihtiyacın giderek artması yüksek aşınma ve korozyon gibi gelişmiş yüzey özellikleri gösteren malzemelerin geliştirilmesine imkan vermiştir. Son yıllarda teknolojinin gelişmesi ve malzemelerden daha üstün özelliklerin beklenmesi neticesinde kullanılan malzemelerin yüzey modifikasyonu gündeme gelmiştir. Bu amaçla borlama akla ilk gelen ve oldukça da etkili bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Borlama ortamı katı, sıvı gaz, pasta ve plazma olup bor kaynağı (B_4C , $Na_2B_4O_7$, H_2B_6), aktivatör (KBF_4), dolgu malzemesi ve deoksidanlardan meydana gelmektedir. Burada aktivatörler tabakanın düzenli büyümesini sağlarken, dolgu ve deoksidan malzemeler işlem sıcaklığında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluşturmakta ve ayrıca ortamdaki malzemelerin ana malzemeye yapışmasını önlemektedirler (Ozbek *et al.* 2000, Sinha 1991, Bozkurt 1984).

Çeliklerin borlanması ile yüzey sertlikleri 2100 HV değerine kadar çıkabilmektedir. Plazma borlama, konvansiyonel borlama işlemleri ile mukayese edildiğinde daha düşük işlem sıcaklığı ve daha az distorsiyon gibi bazı avantajlara sahiptir. Fakat plazma borlamada bor kaynağı olarak kullanılan gazların (B_2H_6 , BCl_3) pahalı, zehirli ve patlayıcı nitelikte olması gibi bazı dezavantajlara da sahiptir. Yine paslanmaz çelik hazne içerisinde oluşan klorürlü bileşiklerin yapmış olduğu korozyonda diğer bir ciddi problemdir. Plazma borlamadaki bu zorlukların üstesinden gelebilmek plazma pasta borlama ile mümkün olabilecektir. Plazma pasta borlamada kullanılacak boraks ve borik asit ülkemizde oldukça fazla miktarda bulunan (Bandırma ve Kırka Bor İşletmeleri) bir bor madeni olduğundan değerlendirilmesi açısından olumlu bir çalışma olacağı düşünülmektedir. Aynı zamanda prosesde kullanılan plazma sayesinde borlama işlem sıcaklığı ve süresi diğer borlama yöntemlerine (kutu, sıvı ve gaz borlama) göre daha da düşecektir. Buda enerji yönünden avantaj olduğu kadar çeliğin mekanik özelliklerine olumlu yansıyacak bir durumdur.

Bu tezde temel olarak, bor içerikli tozları pasta olarak kullanarak plazma pasta borlama yöntemiyle çeliklerin daha düşük sıcaklık ve sürelerde borlanması ve çelikler üzerinde kompleks borür tabakalarının oluşturulması amaçlanmaktadır. Bilindiği üzere, metallerin borlanmasında değişik yöntemler mevcuttur. En çok kullanılan kutu yönteminde Ekabor isimli ticari bor tozu kullanılmakta ve bu toz yurt dışından ithal edilmektedir. Klasik yöntemlerin yanında plazma destekli yöntemlerde giderek yaygınlaşmaktadır. Plazmanın en önemli avantajlarından biri sıcaklığın etkisiyle termokimyasal biriktirmenin yanında, hızlandırılmış atom ve iyon hareketleri sayesinde fiziksel bir biriktirme mekanizması oluşturmasıdır. Plazma ortamı ve bor esaslı bir pastanın birleştirilmesiyle çeliklerin üzerinde son derece fonksiyonel tabakaların oluşturulması muhtemeldir. Plazma ortamındaki gazların (Ar, H₂ ve N₂) oranları, tabaka morfolojisine etki etmekte tek tabakalı Fe₂B veya sert tabaka üzerinde bor nitrür oluşumu gibi tribolojik açıdan önemli tabakaların elde edilmesi kolaylaşmaktadır.

Bu tez çalışmasında;

Boraks, borik asit ve karışımlarını plazma ortamında pasta olarak kullanarak yurt içi bor tüketimini artırmaya yönelik çalışmaları genişletmek,

Plazma borlama işlemindeki olumsuz problemlerin (gazların pahalı, zehirli ve patlayıcı özelliklere sahip olması) elimine edilmesi,

Plazma pasta borlama yüzey işlemi ile geleneksel borlama işlemlerine göre daha düşük işlem sıcaklık ve sürelerinde prosesin gerçekleşmesi,

Farklı karışımlarda kullanılacak tozların (borik asit, boraks, SiC ve B₄C) borür tabakasına olan etkilerinin araştırılması (FeB ve Fe₂B tabakalarının beraber olması farklı genleşme katsayılarına sahip olmalarından dolayı arzu edilmemekte, genelde tek Fe₂B tabakasının olması arzu edilmektedir.)

Plazma pasta borlama işlemi ile farklı gaz kompozisyonlarının uygulanabilmesi ve bu gaz kompozisyonlarının borlama tabakasına etkisinin ve oluşabilecek fazların (FeB, Fe₂B, B_xN, Fe_xN vb.) araştırılması,

Bor esaslı pastaların kullanımı ile çelik üzerinde oluşacak borür tabakalarının tribolojik (aşınma ve sürtünme) davranışlarının araştırılması amaçlanmaktadır.

2. BOR ELEMENTİ VE BORLAMA HAKKINDA GENEL BİLGİLER

2.1 Bor Nedir ?

Yer kabuğunda 51. yaygın element olarak boratlar ve borosilikatlar halinde yer alan bor elementi, yaklaşık 3 ppm'lik konsantrasyon değerine sahiptir. (Özkan vd. 1997) Elementer bor, amorf formda iken koyu kahverengi bir tozdur. Kristal formda ise sert ve gevrek bir yapıdadır (İpekoğlu ve Polat 1987).

Kökeni Arapça'da Buraq/Baurach ve Farsça da Burah kelimelerinden gelen ve simgesi (**B**) olan Bor'un atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 ve ergime noktası 2190 ± 20 °C olup, periyodik sistemin üçüncü grubunun başında yer almaktadır. Yer kabuğunda toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan kristal yada amorf yapıdaki Bor miktarı ortalama 10 ppm mertebesinde. Doğada bulunan Bor, kütle numaraları 10(%19,8) ve 11(%80,2) olan iki kararlı izotopun karışımından oluşmaktadır (İnt.Kyn.1).

Borun elektrik iletkenliği oda sıcaklığında çok düşük olmasına rağmen ısıtıldıkça süratle artar. Bu, metallere has bir özellik değildir. Diğer metalik özelliklerinin de çok az olmasından dolayı bor bir ametaldir. Ergimiş iken soğutulduğunda çok sert ve kırılgan bir madde halini alır. Havada ısıtıldığında yeşil bir alevle yanar. Araştırmacılar borun bu özelliğinden, onu tayin etmekte yararlanmışlardır (İpekoğlu ve Polat 1987).

Bor ilk defa 1808 yılında Gay-Lussac ve Jacques Thenard ile Sir Humphry Davy tarafından Bor Oksit'in Potasyum ile ısıtılmasıyla elde edilmiştir. Daha saf Bor ancak bromit veya klorit formlarının tantalyum filamentleri vasıtasıyla hidrojen ile reaksiyona sokulmalarıyla elde edilmektedir. Kimyasal olarak ametallik bir element olan Kristal Bor, normal sıcaklıklarda su, hava ve hidroklorik/hidroflorik asitler ile soy davranış göstermekte, sadece yüksek konsantrasyonlu nitrik asit ile sıcak ortamda Borik Asit'e dönüşebilmektedir. Öte yandan yüksek sıcaklıklarda saf oksijen ile reaksiyona girerek Bor Oksit(B_2O_3), aynı koşullarda Nitrojen ile Bor Nitrit (BN), ayrıca bazı metaller ile Magnezyum Borit (Mg_3B_2) ve Titanyum Diborit (TiB_2) gibi endüstride kullanılan bileşikler oluşabilmektedir (İnt.Kyn.1).

2.2 Bor Mineralleri ve Bileşikleri

Çizelge 2.1 Bor mineralleri ve bileşikleri (Sümer 2004)

Ürün adı	Formülü	B ₂ O ₃ (%)	H ₂ O (%)	Bulunduğu yer
Tinkal	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	36,5	47,2	Türkiye, ABD, Arjantin
Kernit	Na ₂ B ₄ O ₇ .4H ₂ O	50	26,4	Arjantin,ABD
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ .5H ₂ O	50,8	21,9	Türkiye, ABD, Meksika
Üleksit	Na ₂ CaB ₅ O ₉ .8H ₂ O	43,0	35,6	Türkiye, ABD
Probertit	Na ₂ CaB ₅ O ₉ .5H ₂ O	49,6	25,6	ABD
Szaybelit	MgBO ₂ (OH)	41,4	10,7	Kazakistan, Çin
Datolit	Ca ₂ B ₄ Si ₂ O ₁₂ .2H ₂ O	26, 7	10,7	Kazakistan, Rusya
Sasolit (Doğal B. Asit)	H ₃ BO ₃	56,3	43,7	İtalya
Göl suları	Erimiş Tuzlar			ABD, Şili, Bolivya

Bor tabiatta serbest olarak bulunmaz. Bor elementi, doğada değişik oranlarda Bor Oksit(B₂O₃) ile 150'den fazla mineralin yapısı içinde yer almasına rağmen; ekonomik anlamda Bor mineralleri kalsiyum, sodyum ve magnezyum elementleri ile hidrat bileşikler halinde teşekkül etmiş olarak bulunur. Bor minerallerinden ticari değere sahip olanları; Tinkal, Kolemanit, Üleksit, Probertit, Borasit, Pandemit, Szyabelit, Hidroborasit ve Kernit'tir (İnt.Kyn.1).

2.3 Bor ve Ürünlerinin Kullanım Alanları

Bor bileşiği olarak, ilk tanınan ve kullanılan bileşik olan Tinkal'ın (Sodyum Tetraborat-Boraks) bazı medeniyetlerce çok eski zamanlardan beri kullanıldığı bilinmektedir. Sümerler ve Etiler dönemlerinde metallerin yüzeyindeki oksit tabakasını çözme işlevi nedeniyle Altın ve Gümüş işletmeciliğinde lehim elemanı olarak, yine Mezopotamya ve Mısır medeniyetlerinde antiseptik olarak, Çin'de seramik ve cam üretiminde, Romalılarda arenaların tabanına dezenfektan olarak ve cam yapımında, Arap doktorların

ise ilaç olarak Boraks kullandığına dair kaynaklar bulunmuştur. Bu dönemlerdeki Bor bileşenlerinin Tibet'ten getirildiği belirtilmekteyse de, Romalıların Anadolu kaynaklarını da kullanmış olmaları büyük bir olasılıktır.

Çok spesifik kimyasal karakteristiklerinden dolayı, özellikle II. Dünya Savaşı'ndan sonra Bor Kimyasının hızla gelişmesi sayesinde, bugün hammadde, rafine ürün ve nihai ürün şeklinde, en az 200'ünde alternatifsiz olmak üzere, adeta beşikten mezara kadar diyebileceğimiz 250'yi aşkın kullanım alanı oluşmuştur. Bor, ilave edildiği malzemelerin katma değerlerini olağanüstü derecede yükseltmekte, bu nedenle bugün sanayiinin tuzu olarak adlandırılmaktadır. Gelişen teknolojiler, bor kullanımını ve Bor'a bağımlılığı artırmakta, Borun stratejik mineral olma özelliği giderek daha da belirginleşmektedir (İnt.Kyn.1).

2.4 Bor Ürünlerinin Kullanım Sektörleri

Çizelge 2.2'de Bor ürünlerinin kullanım sektörleri görülmektedir.

Çizelge 2.2 Bor ürünlerinin kullanım sektörleri (İnt.Kyn.1)

Kullanım alanı	Kullanım yerleri
Askeri & Zırhlı Araçlar	Zırh Plakalar, Seramik Plakalar, Ateşli Silah Namluları vb.
Cam Sanayi	Borosilikat Camlar, Laboratuar Camları, Uçak Camlar, Borcam, Pyrex, İzole Cam Elyafı, Tekstil Cam Elyafı, Optik Lifler, Cam Seramikleri, Şişe, diğer Düz Camlar, Otomotiv Camları vb.
Elektronik ve Bilgisayar Sanayi	Mikro Chipler, LCD Ekranları, CD-Sürücüler, Akım Levhaları, Bilgisayar Ağlarında; Isıya-Aşınmaya Dayanıklı Fiber Optik Kablolar, Yarı İletkenler, Vakum Tüpler, Dielektrik Malzemeler, Elektrik Kondansatörleri, Kapasitörler, Gecikmeli Sigortalar, Bataryalar, Laser Printer tonerleri vb
Enerji Sektörü	Güneş Enerjisinin Depolanması, Güneş Pillerinde Koruyucu olarak, Hücre Yakıtları vb
Fotoğrafçılık ve Görüş Sis.	Kamera, Mercek Camları, Fotoğraf Makinaları, Dürbünler ve Film İmalatları
İlaç ve Kozmetik Sanayi	Dezenfekte Ediciler, Antiseptikler, Diş Macunları, Lens Solüsyonları,Kolonya, Parfüm, Şampuan vb
İletişim Araçlarında	Cep Telefonları, Modemler, Televizyonlar vb.

İnşaat Sektöründe	Çimentoya Mukavemet Artırıcı ve İzolasyon Amaçlı olarak
Kağıt Sanayi	Beyazlatıcı Olarak
Kauçuk ve Plastik Sanayi	Naylon vb Plastik Malzemeler vb.
Kimya Sanayi	Bazı Kimyasalların İndirgenmesi, Elektrolitik İşlemler, Flotasyon İlaçları, Banyo Çözeltileri, Katalistler, Atık Temizleme Amaçlı olarak, Petrol Boyaları, Yanmayan ve Erimeyen Boyalar, Tekstil Boyaları, Yapıştırıcılar, Soğutucu Kimyasallar, Korozyon Önleyiciler, Mürekkep, Pasta ve Cilalar, Kibrit, Kireçlenme Önleyicileri, Dezenfektan Sıvılar, Sabun, Toz Deterjanlar, Toz Beyazlatıcılar, Parlatıcılar Mumyalama vb
Koruyucu	Ahşap Malzemeler, Ağaçlarda Koruyucu, Boya ve Vernik Kurutucularında
Makine Sanayii	Manyetik Cihazlar, Zımpara ve Aşındırıcılar Kompozit Malzemeler, vb.
Metalürji	Kaplama Sanayiinde Elektrolit Olarak, Paslanmaz ve Alaşımli Çelik, Sürtünmeye-Aşınmaya Karşı Dayanıklı Malzemeler, Kaynak Elektrotları, Metalurjik Flaks, Refrakterler, Briket Malzemeleri, Lehimleme, Döküm Malzemelerinde Katkı Maddesi olarak, Kesiciler Kompozit Malzemeler, Zımpara ve Aşındırıcılar vb.
Nükleer Sanayi	Reaktör Aksamaları, Nötron Emiciler, Reaktör Kontrol Çubukları, Nükleer Kazalarda Güvenlik Amaçlı ve Nükleer Atık Depolayıcı olarak,
Otomobil Sanayi	Hava Yastıklarında, Hidroliklerde, Plastik Aksamda, Yağlarda ve Metal Aksamalarda, Isı ve Ses Yalıtımı Sağlamak Amacıyla, Antifrizler vb
Patlayıcı Maddeler	Fişek vb.
Seramik Sanayi	Emaye, Sır, Fayans, Porselen Boyaları vb
Spor Malzemeleri	Kayak Aksamaları, Tenis Raketleri, Balık Oltaları, Golf Sopaları, vb.
Tarım Sektörü	Biyolojik Gelişim ve Kontrol Kimyasalları, Gübreler, Böcek-Bitki Öldürücüler, Yabani Otlar vb.
Tekstil Sektörü	Isıya Dayanıklı Kumaşlar, Yanmayı Geciktirici ve Önleyici Selülozik Malzemeler, İzolasyon Malzemeleri, Tekstil Boyaları Deri Renklendiricileri, Suni İpek Parlatma Malzemeleri, vb.
Tıp	Osteopoz Tedavilerinde, Alerjik Hastalıklarda, Psikiyatride, Kemik Gelişiminde ve Artiritte, Menopoz Tedavisinde BNTC Terapi Yöntemiyle Beyin Kanserlerinin Tedavisinde, Manyetik Rezonans Görüntüleme Cihazlarında vb
Uzay ve Havacılık Sanayii	Sürtünmeye-Aşınmaya ve Isıya Dayanıklı Malzemeler, Roket Yakıtı, Uydular, Uçaklar, Helikopterler, Zeplinler, Balonlar vb

Çizelge 2.2 (Devamı) Bor ürünlerinin kullanım sektörleri

2.5 Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları

Çizelge 2.3'te Bor ürünlerinin kullanım alanları görülmektedir.

Çizelge 2.3 Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları (İnt.Kyn.1)

Ürün	Kullanım Alanları
Amorf ve Kristal Bor	Askeri Piroteknik, Nükleer Silahlar ve Nükleer Güç Reaktörlerinde Muhafaza, Metallerde Alaşım Elemanı ve Deoksidan, Bakır ve Alaşımlarında Gaz Giderici, Alüminyum Dökümlerinde Tane Rafinasyonu, Yarı İletkenlerde vb.
Bor Esterleri	Polimerizasyon Reaksiyonları için Katalist, Polimer Stabilizatörleri, Yangın Geciktiricileri
Bor Flamentleri	Havacılık ve Spor malzemeleri için Kompozitler
Bor Halidleri	İlaç Sanayii, Katalistler, Elektronik Parçalar, Bor Flamentleri ve Fiber Optikler
Bor Karbid	Kesme Ekipman Bileycileri, Endüstriyel Yataklar, Çok Yüksek Sıcaklıklarda Korozyon ve Oksitlenme Direnci Gerektiren ekipmanlar.
Bor Karbür	Askeri araçlarda Zırh Plakaları, Uzay Mekiklerinde Dış Yüzey Koruyucu, Aşındırıcılar, Tesviye Aksamları, Yüzey Parlaticılar, Yüksek aşınma Direnci ve Esnemezlik Gerektiren Diğer Alanlar.
Borazon	Yüksek Hızlı Kesiciler
Borik Asit	Antiseptikler, Göz Damlaları, Bor Alaşımları, Nükleer, Yangın Geciktirici, Naylon, Fotoğrafçılık, Tekstil, Dericilik, Gübre, Nikel Kaplama, kimyasal Katalist, Cam, Cam Elyafı, Emaye, Sır, vb.
Fluoborik Asit	Kaplama Solüsyonları, Fluoborat Tuzlar, Sodyum Bor Hidrürler
Kalsiyum Bor Cevheri (Kolemanit)	Tekstil Kalite Cam Elyafı, Bor Alaşımları, Cüruf Yapıcı, nükleer atık muhafazası
Özel Sodyum Boratlar	Fotoğrafçılık Kimyasalları, Yapıştırıcılar, Tekstil, "Finishing" Bileşikleri, Deterjan ve Temizlik Malzemeleri, Yangın Geciktiricileri, Gübreler ve Zirai Araçlar
Sodyum Bor Cevheri (Üleksit ve Probertit)	Yalıtım Cam Elyafı, Borosilikat Cam
Sodyum Bor Hidrürler	Özel Kimyasalları Saflaştırma, Kağıt Hamurunu Beyazlaştırma, Metal Yüzeylerin Temizlenmesi
Sodyum Metaborat	Yapıştırıcı, Deterjan, Zirai İlaçlama, Fotoğrafçılık, Tekstil
Sodyum Pentaborat	Yangın Geciktirici, Gübre
Sodyum Perborat	Deterjan ve Beyazlatıcı, Tekstil
Sodyum Tetraborat (Boraks)	Lehim ve Kaynak İşlemlerinde, Metal Yüzeylerinin Temizlenmesi, Seramikler, Sırlama, Yüksek Mukavemetli Camlar vb.
Susuz Boraks	Gübre, Cam, Cam Elyafı, Metalurjik Cüruf Yapıcı, Emaye, Sır, Yangın Geciktirici
Trimetil Borat	Kaplama Solüsyonları, Fluoborat Tuzlar, Sodyum Bor Hidrürler

2.6 Geleneksel Borlama Yöntemleri

Borlama, sert bor tabakaları üretmek için iş parçasının yüzeyine bor atomlarının difüzyonunu içine alan termokimyasal bir difüzyon işlemidir (Bayça ve Şahin 2004, Karakan *et al.* 2002). Borlama işlemi; yüzeyi sertleştirilmiş çeliklere, temperlenmiş çeliklere, takım çeliklerine, paslanmaz çeliklere, dökme çeliklere, dökme demirlere, sinterlenmiş metal tozlarına, nikel, kobalt, molibden ve titanyum gibi demir dışı metallere ve alaşımlarına uygulanabilmektedir. İşlem; yüzeyi çok iyi bir şekilde temizlenmiş olan malzemelere, 700-1000°C aralığında, tercihen 1-12 saat sürede, bor verici katı, sıvı, gaz veya plazma ortamlarda gerçekleştirilir (Uluköy ve Can 2006) Borlama işleminin çeliklere 1895 yılından bu yana uygulandığı bilinmektedir (Matuschka and Von 1980).

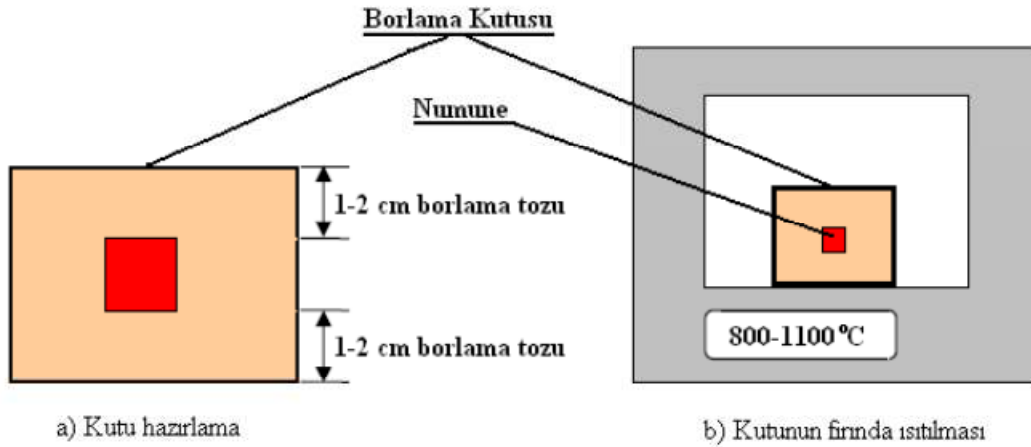
Borlama ortamı, bor kaynağı, aktivatörler, dolgu ve deoksidanlardan oluşmaktadır. Aktivatörler borür tabakasının düzenli gelişmesine etki ederler. Dolgu malzemesi ve deoksidanlar ise borlama esnasında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluştururlar ve borlama malzemesinin ana malzemeye yapışmasını önlerler (Baştürk ve Erten 2006)

2.6.1 Katı Ortamda Borlama

Yüzeyi borlanacak malzeme, toz halindeki bor verici ortam içinde genellikle 850°C 1000°C sıcaklıklarda 2-10 saat bekletilmesi ile yapılan işlemdir. Kutu sementasyona benzeyen bu yöntem soygaz atmosferinde yapılabildiği gibi sıkı kapatılmış kutularda olmak şartı ile normal, atmosferde de yapılabilir. Sistem ucuzdur. Özel teçhizat ve teknik gerektirmez (Bozkurt 1984). Yaygın olarak kullanılan bor kaynakları; bor karbür (B₄C), ferrobör ve amorf bördür. Ferrobör ve amorf bor çok iyi bor kaynakları olup, kalın borür tabakası oluşumunu sağlarlar. Akışkan katkısı olarak SiC ve Al₂O₃, aktifleyici olarak NaBF₄, KBF₄, (NH₄)₃BF₄, NH₄Cl, Na₂CO₃, BaF₂ ve Na₂B₄O₇ kullanılmaktadır. Amorf bor oldukça pahalıdır. Ferrobör ucuz olsa da ne ticari miktarlarda, ne de yeterli saflıkta üretilmemektedir. Dolayısı ile, endüstriyel uygulamalar için sadece bor karbür kullanılmaktadır. Bor karbürlerin fiyatı hem nispeten daha ucuz olmakta hem de kalitesinde bir değişim söz konusu olmamaktadır

(Şen 1997, Özbek 1999). Katı borlama işleminin şematik görünümü Şekil 2.1’de verilmiştir. Borlama kaynağı olarak kullanılan bazı toz karışımları aşağıda verilmiştir (Uluköy ve Can 2006, Çifci 1999, Özsoy 1991):

- %5 B₄C, %90 SiC, %5 KBF₄
- %50 B₄C, %45 SiC, %5 KBF₄
- %85 B₄C, %15 Na₂CO₃
- %95 B₄C, %5 Na₂B₄O₇
- %84 B₄C, %16 Na₂B₄O₇
- Amorf bor (%95-97), % (3-5) KBF₄
- %(40-80) B₄C, %(20-60) Fe₂O₃
- %60 B₄C, %5 B₂O₃ , %5 NaF, %30 demir oksit
- %50 amorf bor, %1 NH₄F.HF, %49 Al₂O₃
- %100 B₄C
- %20 B₄C, %5 KBF₄ , %75 Grafit
- %95 amorf bor, %5 KBF₄
- %95 B₄C, %5 NaF
- %80 B₄C, %20 Na₂CO₃



Şekil 2.1 Katı borlama işleminin şematik görünümü (Yurtseven 2008, Bayça ve Şahin 2004)

Katı ortamda borlamanın avantajları :

- Sistem ucuzdur.
- Özel teknik gerektirmez.
- Borlama tozları diğer borlama yöntemlerine göre daha kolay elde edilebilir.

- Toz terkibi deęiřtirilebilir.
- Minimum ekipman ve dūřuk maliyet gerektirir (Bařtūrk ve Erten 2006).

Katı ortamda borlamanın dezavantajı:

- Yūzeyde bor bileřimi homojen deęildir (Bařtūrk ve Erten 2006).

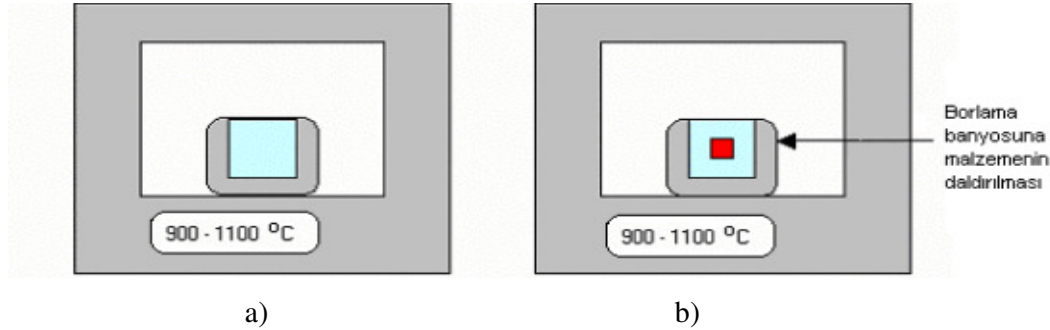
2.6.1.1 Pasta Borlama

Borlama iřlemi için hazırlanan pasta 1-2 mm'lik bir kalınlık elde edilinceye kadar malzemenin yūzeyine ya bir fırça ile ya da pūskūrtme ile sūrūlūr (Tezcan 1996). Pasta borlama, kutu borlamanın zor, daha pahalı olduęu veya fazla zaman kaybının olduęu durumlarda kullanılan bir yūntemdir. Parça yūzeyine sūrūlen macunun derhal sıcak hava akımında, ön ısıtma odasında veya kurutma fırınında maksimum 150°C'de kurutulması gerekir. Gerektięi takdirde macun ūzerine tekrar birkaç kez daha sūrūlebilir (Sinha 1991). Kurutma iřleminden sonra macun ile kaplanmış parçalar önceden ısıtılmış (800 – 1000°C) fırına konur ve fırın aęzı kapatılarak borlama sıcaklıęına ısıtılır. 5 saat sūreyle bu sıcaklıkta tutulan parçalar dıřarı alınır ve soęumaya terk edilir. Parçalar soęuduktan sonra yūzeyine yapışmış olan artıklar temizlenir ve böylece borlama yapılmış olur. Bu yūntemle borlama, mutlaka koruyucu gaz ortamında yapılmalıdır. Aksi takdirde ktū bir borūr tabakası oluřur. Bu yūntemde kullanılan koruyucu gazlar; argon, NH₃ ve saf azottur (Uzun 2002).

Karmařık řekilli veya kitlesel ūretilmiş parçaların tamamen veya kısmen seri bir řekilde borlanması, borlama pastası ile yapılabilir (zbek 1999). Bu metotta % 45 B₄C (tane būyūklūęū 200, 240 μm) ve % 55 kriyolit (Na₃AlF₆, flaks ilaveli) veya geleneksel borlama toz karıřımı (B₄C, SiC, KBF₄) iyi bir baęlayıcı ile (būtil asetatta zūnmüş nitroselūloz, metil selūlozun sulu çözeltisi veya hidrolize edilmiş etil silikat) uygulanmaktadır (Sinha 1991).

2.6.2 Sıvı Ortamda Borlama

Bor bileşikleri, aktivatör ve redükleyici maddelerden oluşan ergimiş tuza, iş parçasının daldırılması yöntemidir. Daldırma süresi borlama süresidir. Borlama sırasında elektrik akımı uygulanıyorsa elektrolitik borlama (elektroliz yöntemi ile borlama), uygulanmıyorsa normal sıvı ortamda daldırma yöntemi ile borlama ismini alır. Borlama işlemi 800 - 1000°C sıcaklıkta ve 2 - 9 saat süre ile yapılır. Bu yöntemin dezavantajı sıcaklıktır. Sıcaklığın 850°C'nin altına düşmesi durumunda erimiş boraksın akıcılığı azalacağından borlama imkansız hale gelecektir (Roskill 2006, Bayça ve Şahin 2004). İşlemden önce susuz boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), susuz borik asit (B_2O_3), metaborik asit (HBO_2), boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$), bor karbür (B_4C) gibi bor bileşiklerini kullanılır. Silisyum karbür, ferrosilisyum, grafit, NaCl, Al gibi redükleyiciler kullanılır. Borlayıcı ortamın sıvı olması için bor bileşiklerinin veya NaCl gibi eriticilerin miktarı yüksek olmalıdır. Böylece eritici olan bu maddeler diğer maddeleri de eriterek sıvı eriyik oluşturur (Bayça ve Şahin 2004). Sıvı borlama işleminin yapılışı Şekil 2.2'de görülmektedir.



Şekil 2.2 a) Borlama sıvısının eritilmesi, b) Numunenin borlama sıvısına daldırılması (Bayça ve Şahin 2004)

Sıvı ortamda kimyasal reaksiyonların daha hızlı olmasından kaynaklanan yüksek aktivite nedeniyle, sıvı ortamda borlama geniş ölçüde kullanılmaktadır. İşlem normal atmosfer altında yapılır, koruyucu atmosfere gerek yoktur. Ayrıca işlemde kullanılan cihaz ve donanım basit olduğu gibi, gerekli kimyasal maddeler de ucuzdur. Borlama sonrası parçaların temizlenmesi önemli bir problemdir (Özsoy 1991).

Sıvı ortamda borlamada kullanılan bazı tuz banyosu içerikleri aşağıda verilmiştir (Uluköy ve Can 2006, Çifci 1999):

1. %70 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, %30 SiC
2. %70 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, %20 SiC, %10 B_2O_3
3. %60 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, %40 B_4C
4. %2,5 B_4C , %10 KBF_4 , %87,5 SiC
5. %10 Boraks, %40 B_4C
6. %84 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, %10 B_2O_3 , %6 B
7. %65 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, %35 B_4C
8. %90 Na_2CO_3 , %10 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (Elektrolitik borlamada kullanılır.)
9. %100 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (Elektrolitik borlamada kullanılır.)
10. %100 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, %10 NaOH (Elektrolitik borlamada kullanılır.)

Sıvı ortamda borlama yönteminin avantajları :

İşlem ucuzdur.

Fazla ihtisas istemez (Baştürk ve Erten 2006)

Sıvı ortamda borlama yönteminin dezavantajları :

Sıvı ortamdaki redükleyici maddeler zamanla banyonun dibine çökelerek banyo akıcılığını olumsuz yönde etkiler.

Tuz kalıntılarının malzeme üzerinde kalması ve ortamda reaksiyona girmeyen borun varlığı zaman ve para kaybına yol açar.

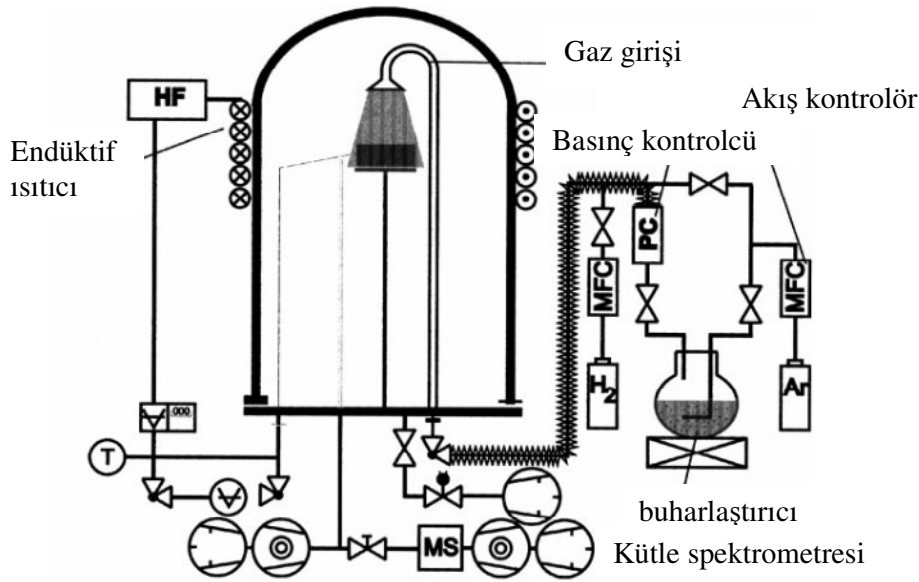
Borlama işleminin başarılı olabilmesi için banyo viskozitesinin artırılmaması gerekir ve bu sebeple tuz ilavesi yapılmaktadır. Bu da işlemin maliyetini arttırmaktadır.

İşlem için malzemeyi korozif ortamlardan koruyacak fırınlara ihtiyaç vardır.

Büyük boyutlu kompleks parçalara uygulanamaz (Baştürk ve Erten 2006, Uluköy ve Can 2006, Sinha 1991).

2.6.3 Gaz Ortamda Borlama

Gaz ortamda borlamada, bor kaynağı olarak bor halojenürleri, diboran ve organik bor bileşikleri kullanılır. Gaz borlayıcıların en önemli üstünlüğü, gaz sirkülasyonunun sonucu olarak daha üniform bir bor dağılımının sağlanabilmesi ve elde edilmelerinin kolay olmasıdır. Prensip olarak gaz ortamda borlamada, bor potansiyelinin ayarlanabilmesinden dolayı, tek fazlı tabaka elde etmek mümkündür (Özsoy 1991, Çelebi 2005). Gaz ortamda borlama tertibatının şematik gösterimi Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 Gaz ortamda borlama tertibatının şematik gösterimi (Küper *et al.* 2000)

Gaz borlamada en çok kullanılan ortamlar aşağıda verilmektedir:

Bor halid- H_2 /veya (75:25 N_2 - H_2) gaz karışımı,

Diboran (B_2H_6)- H_2 karışımı,

$(CH_3)_3B$ ve $(C_2H_5)_3B$ gibi organik bor bileşikleri (Sinha 1991).

Gaz borlama işlemi için en çok BCl_3 tercih edilmektedir (Özbek 1999).

Gaz borlama bileşikleriyle çalışmak için komplike cihazlar gereklidir. Buna ilaveten bazı sakıncalı tarafları daha vardır (Özsoy 1991):

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

2) Diboran, hidrojen ile karıştırıldığında bile çok pahalıdır.

3) Trimetilbor $[(CH_3)_3 B]$ ve trietilbor $[(C_2H_5)_3 B]$ ile yapılan gaz ortam borlamasında, bu bileşiklerin yüksek oranda karbon içermeleri sebebiyle karbürizasyon sözkonusu olabilmektedir. Bu etki trietilborda, trimetilbordan daha kuvvetlidir.

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

2.6.4 Plazma Borlama

Gaz, sıvı ve katı borlama gibi konvansiyonel borlama teknikleri birçok dezavantajlara sahiptir. Bunların başlıcaları oluşan tabakaların kontrol edilememesi ve porozitenin oluşumudur (Bochmann *et al.* 1984, Bloyce 1985, Planitz *et al.* 1991, Hunger and Löbig 1997).

Plazma borlama, ekonomik verimliliği, düşük proses sıcaklığı ve deneysel parametrelerin kontrolünün kolay olması gibi diğer tekniklere nazaran bir çok avantaja sahiptir. Ar, H_2 gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl_3 , B_2H_6 , BF_3 veya $B(OCH_3)_3$ (trimetilborat) kullanarak; 800 – 1000°C sıcaklıkta, yaklaşık 10^{-2} Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılır (Çelebi 2005).

Mikroyapı ve demir bor tabakalarının büyümesi işlem sıcaklığı, gaz karışım oranları, malzeme kompozisyonları, işlem basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla kontrol edilebilmektedir. Bu yöntem Almanya'da otomotiv sektöründe kullanılmaya başlanmasıyla üstün özellikleri nedeniyle endüstrinin dikkatini çekmiş ve artan ilgiyle araştırmalar yoğunlaşmıştır. En iyi işlem, düşük Cl iyonu yoğunluğu ve maksimum B iyonu yoğunluklarının olduğu plazmada ortaya çıkar. Yüksek Cl iyonu yoğunluğu plazma şiddetinde düşüşe, mikroyapıda gözenekliliğe ve demir bor tabakası üzerinde Cl ve B

birikmesine (kaplanmasına) sebep olur (Çelebi 2005). $\text{BCl}_3\text{-H}_2$ Ar gazlarının karışımı içinde plazma borlamanın BCl_3 konsantrasyonunun daha iyi kontrol edilmesi, kalıntı gerilmenin azalması ve borlu film tabakalarının daha yüksek mikro sertliği gibi olumlu özellikler gösterdiği iddia edilmektedir (Tezcan 1996).

Plazma borlamanın avantajları şunlardır:

- 1- Borlanan tabakanın bileşim ve derinlik kontrolü yapılabilmektedir.
- 2- Klasik paket borlamaya kıyasla daha yüksek bir bor potansiyeli vardır.
- 3- Daha ince borlu tabakalar elde edilebilmektedir.
- 4- İşlemden kullanılan sıcaklık ve uygulanan işlem süresinde azalma vardır.
- 5- Yüksek sıcaklık fırınlarına ve gerekli aksesuarlara ihtiyaç yoktur.
- 6- Enerji ve gaz sarfiyatında tasarruf sağladığından dolayı ekonomiktir.
- 7- Deney parametrelerinin kontrolü kolaydır (Tezcan 1996, Küper *et al.* 2000, Hunger ve Lobig 1997, Nam *et al.* 1998).

Plazma borlama işleminin en önemli dezavantajı, kullanılan atmosferin aşırı zehirli olmasıdır. Sonuçta bu işlem ticari yönüyle kabul görmemiştir (Tezcan 1996).

2.6.5 Plazma Pasta Borlama

Yeni bir borlama yöntemi olan plazma pasta borlama işlemi pasta borlama işleminin plazma ortamında 700-1000°C arasında Ar ve H_2 gibi gazlarla belirli bir vakum basıncı altında yapılmaktadır. İşlem vakum altında gerçekleştiği için herhangi bir koruyucu atmosfere gerek yoktur. Bor içerikli tozları pasta olarak kullanarak plazma pasta borlama yöntemiyle çeliklerin daha düşük sıcaklık ve sürelerde borlanması ve çelikler üzerinde kompleks borür tabakalarının oluşturulması sağlanabilmektedir. Plazmanın en önemli avantajlarından biri sıcaklığın etkisiyle termo-kimyasal biriktirmenin yanında, hızlandırılmış atom ve iyon hareketleri sayesinde fiziksel bir biriktirme mekanizması oluşturmasıdır. Plazma ortamı ve bor esaslı bir pastanın birleştirilmesiyle çeliklerin üzerinde son derece fonksiyonel tabakaların oluşturulması muhtemeldir. Ayrıca plazma borlamada bor kaynağı olarak kullanılan gazların (B_2H_6 , BCl_3) pahalı, zehirli ve

patlayıcı nitelikte olması bazı dezavantajlara da sahiptir. Plazma pasta borlama ile bu zararlı etkilerden kurtulmak mümkündür. Plazma destekli pasta borlama yüzey işlemi ile plazma borlama işlemindeki dezavantajlar yok edilebilmektedir. Kullanılan pastanın çevreye zararsız bor hammaddeleri olması, gazların ise genelde inert karakterde olan hidrojen, argon ve azot olması bu işlemi avantajlı kılmaktadır (Güneş 2010).

2.7. Borür Tabakasının Özellikleri

Yayınma yönüne bağlı olarak; kolonsal bir yapı sergileyen tek fazlı Fe_2B fazı, çift fazlı $\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$ fazlarına göre daha çok tercih edilir. Çünkü oluşum sırasında FeB ve Fe_2B fazları birbirlerine basma ve çekme gerilmeleri uygulamakta ve çoğu zaman bu gerilmeler nedeniyle iki faz arasında çatlaklar oluşmaktadır (FeB : Çekme gerilmesi, Fe_2B : Basma gerilmesi oluşturmaktadır) (Yapar *et al.* 2002). Dış etkenler, örneğin termal şok ve mekanik zorlamalar, bu yapıların zamanla ayrılmalarına ve yüzeyden kopmalara neden olur. Farklı termal katsayılarından dolayı $\text{FeB} / \text{Fe}_2\text{B}$ çift faz tabakasının ara yüzeyinde çatlaklar oluşur. Bu durum nedeniyle mekanik yüke maruz kaldıklarında pul pul dökülme gerçekleşir (Jain and Sundararajan 2002). Bu nedenle minimum FeB fazı içeren tabakalar elde edilmeye çalışılmalıdır. Tek Fe_2B fazı çift fazlı yapıdan daha yüksek aşınma direnci ve mekanik özellikler gösterir. En az aşınma Fe_2B fazında, en fazla aşınma ise daha sert (1800 – 2000 VSD) FeB fazında meydana gelmektedir. En yüksek aşınma dayanımının FeB içermeyen tabakalarda, yani sadece Fe_2B fazından oluşan tabakalarda elde edildiği deneylerle bulunmuştur (Karakan *et al.* 2002). Demir esaslı malzemelerde borlama sonucunda, Fe_2B fazının hakim olduğu dış yapısına benzer kolonsal bir yapı oluşur. Çift fazlı $\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$ tabakası, vakum altında 800°C 'de uzun süreli ısıtılma işlemi tabi tutulduğunda tek fazlı Fe_2B fazı elde edilebilmektedir. Bu fazların yanında yüksek karbonlu çeliklerde ve dökme demirlerde $\text{Fe}_3(\text{B,C})$ ve $\text{Fe}_5(\text{B,C})$ tipi fazlar da oluşabilir. Çizelge 2.4'te FeB ve Fe_2B fazlarının tipik özellikleri verilmektedir.

Çizelge 2.4 Fe₂B ve FeB fazlarının tipik özellikleri (Sinha 1991)

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Kristal yapı	Hacim merkezli tetragonal	Ortorombik
Latis parametresi (Å)	a=5,078, c=4.28	a=4,053, b=5,495, c=2,94
Mikrosertlik (Gpa)	18 - 20	19 - 21
Elastisite Modülü (Gpa)	280 - 295	590
Bor içeriği (%)	8,83	16,23
Yoğunluk (gr/cm ³)	7,43	6,75
Termal Genleşme Katsayısı (ppm/°C)	7,65(200-600 °C) 4,25(100-800 °C)	23 (200-600 °C)
Ergime sıcaklığı (°C)	1389 - 1410	1540-1657
Termal iletkenlik (W/m.	30,1 (20 °C)	12,0 (20 °C)
Elektriksel direnç(10 ⁻⁶	38	80
Renk	Gri	Gri

Borlama, demir grubu malzemelerin akma ve kopma dayanımlarını %10 – 20, yorulma dayanımını %25 ve korozyonlu yorulma ömrünü %200 artırmaya karşın, plastisite özelliklerini kötü yönde etkiler (Özsoy 1988).

2.7.1 Borürlü Tabakanın Yapı ve Bileşimi

Borür tabakasının özellikleri başta kullanılan malzemenin cinsine, borlama ortamına, sıcaklığa, zaman ve ısıtma işlemlere bağlı olarak değişmektedir. Bu unsurlara bağlı olarak çeliklerde borür tabakası ve geçiş bölgesi oluşmaktadır (Yünker 2000).

Borlamanın avantajları (Yapar 2002);

- Çelik alaşımlarında 1600 – 2800 VSD arasında yüksek sertlik değerleri elde edilebilir.
- Borür tabakasının sertliği yüksek sıcaklıklarda (650°C) bile sabit kalmaktadır.
- Borlama işlemi demir esaslı malzemelerin seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve erozyon direncini arttırmaktadır. Borlama işlemi ile düşük alaşımlı çeliklerin H₂SO₄, H₃PO₄ ve HCl gibi asitlere karşı direncini arttırmak olanaklıdır.
- Borlanmış çeliklerin yüksek sıcaklıklardaki (850°C) oksidasyon direnci ve sıcak metal korozyonuna direnci yüksektir.

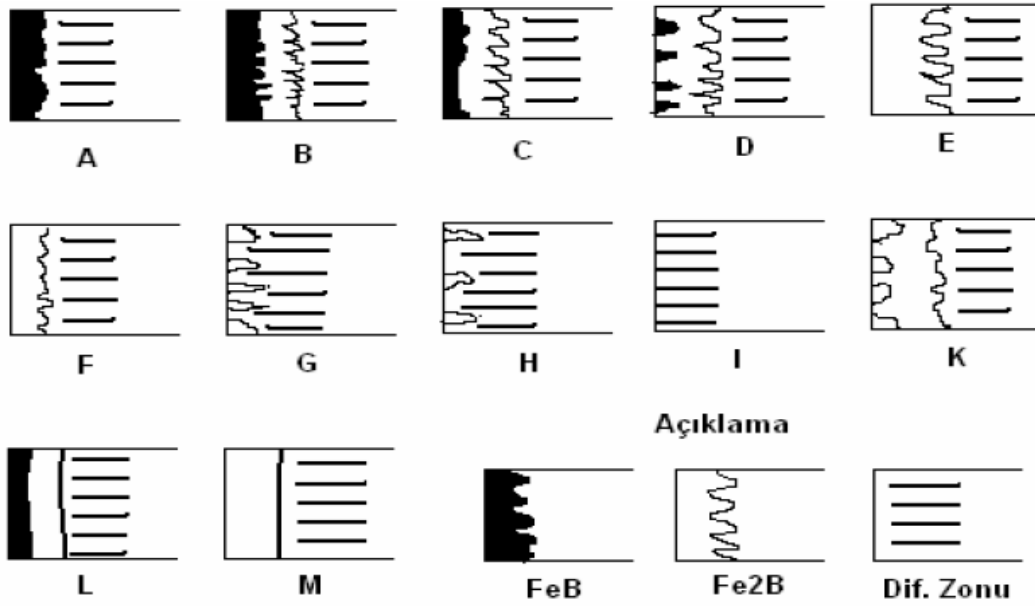
- Borlanmış parçaların yorulma ömürleri özellikle korozi ortamlarda %25 oranında artırılabilir.
- Bor bileşikleri sürtünme katsayısını düşürerek yağlayıcı kullanımını azaltmakta ve soğuk kaynaklanma eğilimini düşürmektedir.
- Borlama karmaşık şekillere de uniform olarak uygulanabilir.
- Borlama seçici olarak sadece sertleşmesi istenen bölgeye uygulanabilir.

Borlamanın dezavantajları (Yapar 2002);

- Proses esnek olmayıp, daha çok itina ister ve bu da prosesi pahalı yapar.
- Borlama işlemi ile borlanan hacimde hacimce %5 – 25 ‘lik artış olmaktadır.
- Çok düşük tolerans isteklerinde borlanmış yüzey sadece elmas taşlama yoluyla sağlanır. Çünkü geleneksel yöntemler yüzeyde kırılmalara sebep olur. Bu yüzden kusursuz borlama işlemleri çoğunlukla geniş kesitli parçalara uygulanır.
- Genellikle borlanmış alaşımlı çelik parçaların yorulma özellikleri karbürleşmiş ve nitrürlenmiş çeliklerle karşılaştırıldığında çok zayıftır. Bu nedenle dişli üretiminde sınırlama söz konusudur.
- Borlamadan sonra genellikle parçanın vakum ya da yansız bir ortamda sertleştirilmesine ve temperlenmesine ihtiyaç duyulur. Bu sayede borür tabakasının bütünlüğü, sağlamlığı artırılır.

2.7.2 Borür Tabakası Çeşitleri

Borür tabakalarının yapısı; borlama yöntemine, borlanan malzemenin bileşimine, borlama ortamına ve işlem şartlarına bağlı olmak üzere ya düz bir şekilde (örneğin yüksek alaşımlı çeliklerde) ya da parmaklı türde (zig – zag şekilli) olabilir. İşlem süresi arttıkça parmaklı türdeki borür tabakalarında maksimum ve minimum kalınlıklar arasındaki fark artar (Özsoy 1988).



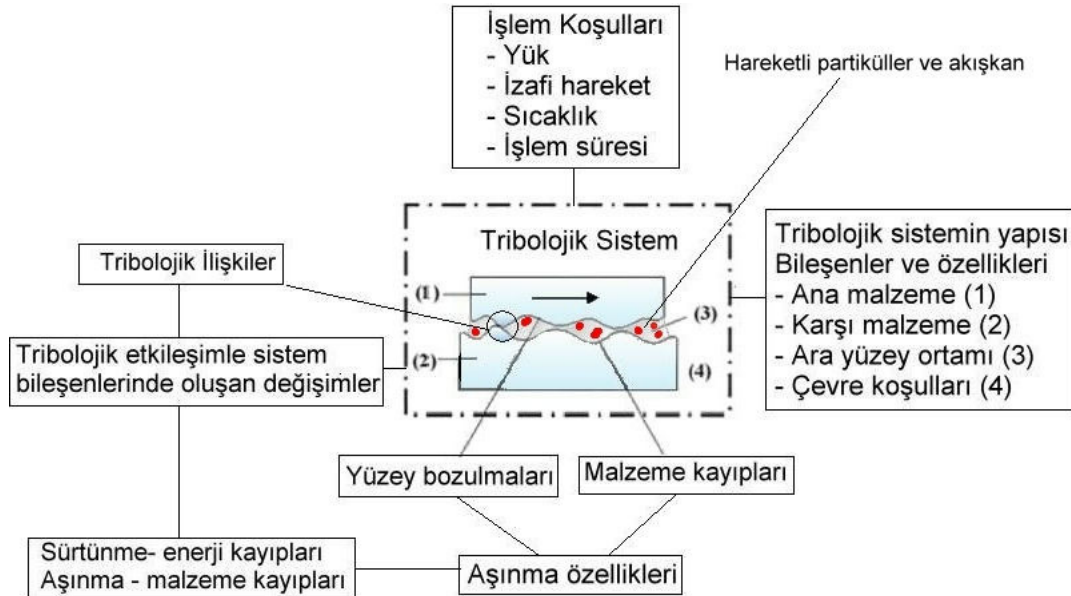
Şekil 2.4 Borür tabakası çeşitleri (Matuschka 1980)

- A** : Özellikle FeB'nin yoğun olduğu tek fazlı tabaka
- B** : Fe₂B ve FeB fazlı iki tabaka
- C** : İki fazlı tabaka, tabaka B'den daha ince FeB tabakası
- D** : İki fazlı, izole FeB dış şeklindeki tabaka
- E** : Tek fazlı tabaka, özellikle Fe₂B ağırlıklı
- F** : Tek fazlı tabaka, özellikle Fe₂B ağırlıklı
- G** : Fe₂B dış yapısı
- H** : Çok izole Fe₂B dış yapısı
- I** : Difüzyon bölgesi
- K** : Dejenere olmuş tabaka
- L** : Çift fazlı FeB ve Fe₂B tabakası
- M** : Tek fazlı FeB ve Fe₂B tabakası

3. TRIBOLOJİ

3.1 Tribolojik Sistem ve Tribolojiyi Etkileyen Faktörler

Triboloji, birbiri ile temasta olan ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük ve hareketin oluşturduğu sisteme verilen adlandırmadır. Temas halinde bulunan katı yüzeylerde, malzeme kaybı üç şekilde gerçekleşebilir. Bunlar bölgesel erimeler, kimyasal çözünme ve yüzeyden fiziksel anlamda oluşan ayrılmadır. Uygulamada aşınma kapsamına daha çok yüzeyden fiziksel anlamda ayrılan malzemenin sebep olduğu hasarlar dahil edilmektedir. Bir tribolojik sistemdeki önemli etkenlerden biri de çevre şartlarıdır. Sistem elemanlarının nem veya korozyon etkileriyle karşı karşıya kalması aşınmayı hızlandırır. Birbirleri ile temasta olan malzeme yüzeyleri, oksit filmleri, sert kaplamalar ve yağlayıcılar ile korunsalar bile mekanik yüklemeler altında tabakaların veya yağlamanın bozulması iki yüzeyin birbiri ile doğrudan temasına sebep olabilir. Bunun sonucunda oluşacak sürtünme, malzemenin çalışma koşullarındaki ömrünü ve performansını sınırlayan aşınmaya sebep olur (Moore 1975). Tribolojik sistemin standartlara uygun şematik olarak gösterimi Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1 Bir tribolojik sistemin DIN 50320 normuna göre şematik gösterimi (Ulutan 2007)

Tribolojiyi etkileyen faktörler şu şekilde sınıflandırılmaktadır (Kayalı 1993);

1. Ana malzemeye bağlı faktörler: Malzemenin kristal yapısı, malzemenin sertliği, elastisite modülü, deformasyon davranışı, yüzey pürüzlülüğü ve malzemenin boyutu.
2. Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi.
3. Ortamın etkisi: Sıcaklık, nem, atmosfer.
4. Servis şartları: Basınç, hız, kayma yolu.

3.2 Sürtünme

Sürtünme, birbirine göre izafi olarak hareket eden cisimlerin birbirlerine uyguladıkları direnç olarak tanımlanmaktadır. Genelde tanımlanan sürtünme her türlü yabancı maddeden arındırılmış yüzeylerin mutlak vakumdaki hareketlerini ifade eder. Fakat mevcut sistemlerin çoğunluğu normal atmosfer şartlarında çalışmaktadır. Atmosfer şartlarında çalışan yüzeyler ne kadar temizlenseler dahi oksit tabakası içermektedir. Bu yüzden yabancı maddelerden arındırılmış yüzeylerin atmosfer şartlarındaki sürtünme hali kuru sürtünme kabul edilmektedir. Malzemeler arasındaki sürtünme olaylarını izah ve formüle etmek için tarihsel gelişim içerisinde birçok teori ileri sürülmüştür. İlk zamanlar, sürtünme katsayısının pürüzlerin eğim açısının tanjantı ile ilişkili olduğu düşünülmüş, daha sonraları sürtünmede, iki katı arasındaki moleküler çekim kuvvetinin de etkili olduğu açıklanmıştır (Kragelskii 1965). Bunlar arasında Amontons ve Coulomb'un teorileri önemlidir. Coulomb, sürtünme katsayısının hızdan bağımsız olduğunu gözlemlemiş ve statik sürtünme katsayısını (μ_s) kaymaya başlama kuvveti ile, kinetik sürtünme katsayısını da (μ_k) hareketi devam ettirme kuvveti ile tarif etmiştir (Hutchings 1992).

Sürtünme katsayısı şu şekilde ifade edilebilir.

$$\mu = F / W \quad (3.1)$$

Burada;

μ : Sürtünme katsayısı,

F: Teğetsel kuvvet (sürtünme kuvveti),

W: Normal kuvvet (yük).

Bowden ve Tabor'un teorisine göre sürtünme kuvveti, yüzeyde tepeliklerdeki gerçek temas alanlarında oluşan adhezyon kuvveti ve sert yüzeyin yumuşak yüzey üzerinde oluşturduğu deformasyon kuvveti olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır (Bowden 1973).

$$F = F_{adh} + F_{def} \quad (3.2)$$

Burada;

F: Sürtünme kuvveti,

F_{adh} : Kaynak bağı oluşturmuş yüzeyleri ayırmak için gerekli teğetsel kuvvet,

F_{def} : Tepelik ve pürüzlerin yandan eğilmesi ve kesilmesi için gerekli kuvvet.

Yukarıdaki denklem normal kuvvete (yük) bölünürse, sürtünme katsayısının bileşenleri de bulunmuş olur.

$$\mu = \mu_{adh} + \mu_{def} \quad (3.3)$$

μ_{adh} , μ_{def} 'den çok daha büyük olduğundan, μ_{def} ihmal edilebilecek mertebededir.

Basınç uygulanması durumunda deformasyonun olduğu yerdeki adhezyon kuvveti, malzemenin kohezif kuvvetinden daha büyük olduğunda ayrışma veya kopma oluşur. Ara yüzeydeki adhezyonu zayıflatan nedenlerden biri, yüzeydeki adsorbe olmuş film veya oksitler diğeri ise, yüzeydeki pürüzler etrafındaki elastik deformasyonlardır (Hutchings 1992).

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{F_{adh}}{W} \cong \frac{\tau \cdot A}{H \cdot A} \cong \frac{\tau \cdot A}{P_a \cdot A} \cong \frac{\tau}{P_a} \cong 0.2 \quad (3.4)$$

Burada;

τ : Kaynak noktalarındaki kayma mukavemeti,

A: Kaynak ve deformasyon noktaları alanı,

P_a : Malzemenin plastik akma basıncı,

H: Malzemenin Brinell sertliği.

Yukarıdaki ifadeye göre, ana malzemedan daha düşük kayma mukavemetine sahip olan tabaka ve filmler sürtünme katsayısını düşürmektedir. Yine yukarıdaki ifadeye göre, yaklaşık olarak $\mu = 0,2$ 'dir. Fakat gerçekte bulunan değerler daha fazladır. Aradaki bu fark, sürtünme esnasında değme alanı büyümesi ve plastik sertleşme olaylarının meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır (Hutchings 1992).

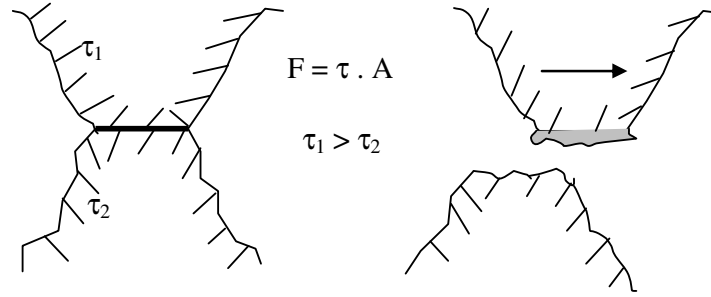
3.3 Aşınma Proseslerinin Sınıflandırılması

Aşınma prosesleri için birçok sınıflandırmalar yapılmıştır. Bunlardan birinde pürüzlerin (asperity) mekanik bozulması, pürüz yorulması, servis esnasında kırılma, oksit filmlerinin dökülmesi, moleküler etkileşim ve yüksek sıcaklıktan dolayı mekanik bozulma olarak genel bir sınıflandırma yapılmıştır (Peterson 1976). Bir diğerinde ise, elastik ve plastik yer değiştirme, kesme, yüzey filmlerinin bozulması ve aşınan malzemenin bozulması olarak sınıflandırılmıştır (Kragelskii 1965). Archard ise, malzeme ve yüzey arasındaki temas alanının, elastik ve plastik deformasyonu arasındaki farkları göz önüne alarak sınıflandırma yapmıştır (Peterson 1976). Genelde aşınma, Archard'ın sonuçlarına dayanan kategoriler içinde sınıflandırılmaktadır.

3.3.1 Adheziv (Yapışma) Aşınma

Adheziv aşınma en genel olarak, karşılıklı etkileşim içerisinde birbirlerine göre relatif hareket eden iki yüzeyin birisinden bir parçacığın koparak diğer yüzeye yapışması sonucunda, bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme taşınımı olarak tanımlanabilir. Basınç altında bir araya getirilmiş malzemelerde bulunan karşılıklı pürüzler, sürtünme ile oluşan ısı ve soğuk kaynaklaşma etkisi ile birbirlerine bağ yaparlar. Yüzeylerin relatif teğetsel hareketi, bağ kuvvetinin en zayıf olduğu noktadan kopmaya neden olur. Bunun

neticesinde Şekil 3.2’de görüldüğü gibi bir yüzeyden diğerine malzeme transferi meydana gelir (Holmberg 1994).



Şekil 3.2 Adheziv aşınmanın temel mekanizması (Holmberg 1994).

Archard, adheziv aşınmanın ağırlıklı olduğu hallerde, bu aşınma tipi için aşağıdaki bağıntıyı deneylerden çıkarmıştır.

$$V = \frac{K.W.s}{H} \quad (3.5)$$

Burada; V: Aşınma hacmi, K: Malzemeye ait bir sabit, W: Normal kuvvet (yük), H: Malzemenin sertliği, s: Kayma yolu.

Bu konuda yapılan teorik çalışmalar sonucunda, teorik yaklaşımlarda hemen hemen aynı sonuçlara varılmıştır. Bu sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

1. Adheziv aşınma miktarı, uygulanan yük ve kayma yolu ile doğru, malzemenin plastik akma mukavemeti ve sertliği ile ters orantılıdır.
2. Sonuçlardaki farklılıklar, sadece malzeme sabitleri diyebileceğimiz katsayılarda olmaktadır.
3. Yüksek hız, yüksek sıcaklık ve aşırı yükleme durumlarında, bu bağıntılarda sapmalar olabilir (Ulukan 1993).

3.3.2 Abraziv Aşınma

Abraziv aşınma, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan partiküllerle temasta olması ve sert partiküllerin malzeme yüzeylerinden parçalar koparması ile meydana gelir. Sert partiküller ya dışarıdan sisteme girer veya adheziv aşınma ürünleri olarak sistem içinde meydana gelir. Buna göre, abraziv aşınma iki elemanlı veya üç elemanlı olarak meydana gelmektedir. İki elemanlı abraziv aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbirleri ile etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abraziv aşınma ise, ana ve karşı malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olacağı gibi, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilir (Ashby 1996). Sert bir yüzey ile yumuşak bir yüzey üzerine bastırıldığında, sert yüzey üzerindeki pürüzler yumuşak malzeme üzerinde lokal plastik akış meydana getirir. Teğetsel hareketin etkisiyle sert yüzey yumuşak yüzeyden malzeme kaldırır (Lipson 1961). Abraziv aşınma mekanizmasında, sertlik aşındırıcı tane veya pürüzün boyut ve şekli, atak açısı, uygulanan normal yük, kayma hızı ve malzemelerin kırılma tokluğu önemli faktörlerdir.

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

Oymalı sürtünme aşınması, kütsel 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 ara yüzeyde aşınmadan kaynaklanan parçacıklar bulunmaktadır. Bu ara yüzeyde 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 ve kaldırmak suretiyle kopararak hasara neden olmaktadır. Örnek olarak bilyeli değirmenler gösterilebilir.

Erozif aşınma ise, sıvı veya hava gibi bir akışkan 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 hızı kazanmaktadır. Hatta bazı şartlarda, malzemenin yüzeyinin her tarafını korozyon ürünleri kaplayabilmektedir. Buna erozyonun korozyon etkisi de denilmektedir. Örnek olarak gemi pervaneleri verilebilir (Kayalı 1993, Collangelo ve Haiser 1974).

Hutchings, abraziv aşınma mekanizmasının plastik deformasyon veya gevrek kırılma olmak üzere iki şekilde meydana geldiğini belirlemiştir. Birinci durumda malzeme kaybı metallerdeki gibi plastik deformasyonla, ikinci durumda ise malzeme kaybı, özellikle seramiklerde ve düşük kırılma tokluğuna sahip malzemelerde olduğu gibi gevrek kırılma ile meydana gelmektedir. Çatlaklar, uygulanan yük kritik bir değeri (W^*) aştıktan sonra meydana gelmekte ve bu değer malzemelerin kırılma tokluğu ve sertliğine bağlı olarak

$$W^* \propto \left(\frac{K_c}{H}\right)^3 K_c \quad (3.6)$$

şeklinde değişim göstermektedir (Hutchings 1992).

3.3.3 Yorulma ve Delaminasyon Aşınması

Yorulma aşınması, değişken tekrarlı yüklemeler sonucu meydana gelir. Tribolojik zorlanmalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden, yorulma aşınması bir çok aşınma prosesinde görülür. Neticede, malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur; bu ise, yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur (Holmberg 1994).

Delaminasyon aşınması ise, birbiri üzerinde kayan yüzeylerde mikroskobik ölçekte ortaya çıkan bir çeşit yorulma aşınmasıdır. Temas bölgesinde oluşan basıncın sonucu yüzeyin hemen altında çatlaklar oluşur. Yükün daha fazla artması ve çatlağın deformasyonu, çatlağın yayılmasına ve diğer çatlaklarla birleşmesine neden olur. Çatlak yayılması yüzeye paraleldir. Nihayetinde plaka şeklinde yüzeyden kopmalar meydana gelir (Holmberg 1994).

Delaminasyon aşınma teorisi ilk defa Suh tarafından açıklanmıştır. Bu teoriye göre, aşınma esnasında malzemenin yüzeyi veya yüzeyine çok yakın yerler yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip değildir. Kayma hareketinin devam etmesi ile, yüzeyden sonlu uzaklıktaki dislokasyonlar peklemeye uğrar. Bunun neticesinde küçük boşluklar oluşur. Malzeme içerisinde ikinci bir sert fazın olması bu boşlukların oluşumunu kuvvetlendirir. Zamanla, boşluklar büyür ve nihayetinde yüzeye paralel çatlaklar ortaya çıkar. Bu çatlaklar kritik bir kalınlığa ulaştıklarında, yüzey ile çatlak arasındaki malzeme, plaka şeklinde partiküller halinde kesilir. Bu partiküllerin şekli, uzunluğa ve iç gerilmelere bağlıdır. Suh, kendi teorisine dayanan aşınma denklemi de geliştirmiştir. Bu teoriye göre aşınma hızı, normal yük ve kayma uzunluğu ile doğru orantılıdır. Archard'ın aşınma denkleminin tersine sertliğe direk olarak bağlı değildir (Suh 1973).

3.3.4 Oksidasyon Aşınması

Oksidasyon aşınması, en yaygın karşılaşılan kimyasal aşınma proseslerinden biridir. Metallerin yüzeyinde ince bir oksit tabakası her zaman oluşabilmektedir. Bu tabaka aynı zamanda, sürtünme ve aşınmaya karşı koruyucu tabaka özelliğine sahip olabilir (Holmberg 1994). Oksidasyon aşınması teorisine göre, kayan iki yüzey arasında ortaya çıkan sürtünme ısısı, metal yüzeyi üzerindeki oksit filminin kalınlığını artırmak için enerji sağlayabilir. Oksit filmi kritik bir kalınlığa ulaştığında çıkıntılar (asperities), aşınma partikülleri oluşturarak kırılırlar. Bu yığıntılar (debris) abraziv aşınmayı başlatabilir. Oksidasyon aşınmasının adheziv aşınmadan bir derece daha düşük olduğu düşünülür. Bu şekilde aşındırıcı partikül oluşturma ihtimali temas basıncı, kayma hızı, sıcaklık ve çevre gibi aşınma ortamı özelliklerine ve korozyon potansiyeli, oksidasyon

kinetiği, metalin oksijene afinitesi, mukavemet ve sertlik gibi aşınan metalin özelliklerine bağlıdır. Şartlar ince, sert ve yapışkan oksit filminin büyümesine izin verirse aşınma hızı, temas eden yüzeyler arasındaki adhezyonun azalmasına bağlı olarak azalabilir (Holmberg 1994).

4.LİTERATÜR BİLGİLERİ

4.1 Geleneksel Borlama İle İlgili Yapılmış Çalışmalar

Barış (2007), Ç 1040 çeliğini 900°C’de 4 ve 6 saat, 1000°C’de 4 saat süreyle Ekabor2 tozu kullanarak borlama işlemine tabi tutmuştur. Borlanan numunelere 10 N, 20 N ve 30 N sabit yük kullanılarak pim disk test cihazında aşınma uygulamaları gerçekleştirmiştir. Aşındırıcı olarak P 80 silisyumkarbür (SiC) zımpara kağıtlarını kullanmıştır. Tüm aşınma deneylerinde diskin dönme hızını 0,2 m/sn olarak ayarlamış ve aşınmayla oluşan ağırlık kayıplarını her 40 saniyede bir olmak üzere 3 defa ölçmüştür. 30N yüke karşı 16. m sonunda borlanmamış numune ile 900°C’de 6 saat borlanmış numuneyi karşılaştırdığında borlanmış numunenin aşınma direncinin yaklaşık %26 arttığını görmüştür (Barış 2007).

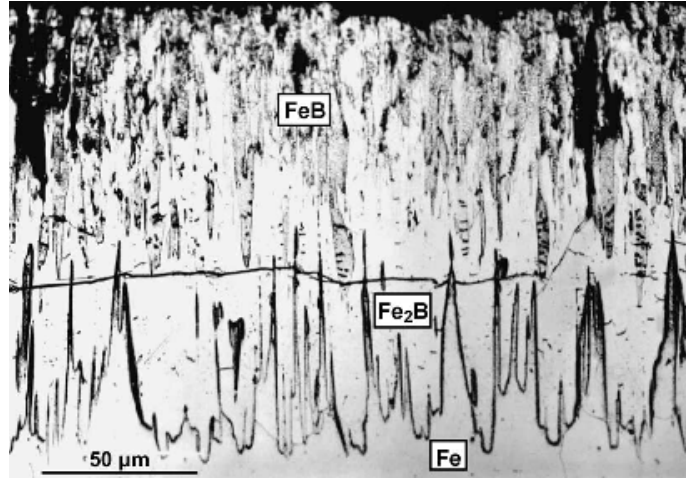
Soydan vd. (2008) AISI 1050, 4140 ve 8620 çeliklerini Ekabor1 tozunda 950°C’de 2 ve 8 saat süreyle borladıktan sonra pin-on-disk aşınma cihazında 30-300 N yük altında 2 m/s kayma hızında aşındırmışlardır. Ağırlık arttıkça aşınma artmıştır. Borlanmış çeliklerin oksidatif aşınma rejimi gösterdiğini tespit etmişlerdir. Borlanmış tabakanın alt kısmındaki Fe₂B tabakalarında oksidatif yorulma aşınma mekanizması gözlemlenmiştir. Borlamanın adheziv aşınmayı minimize ettiğini belirtmişlerdir. Borlanmış 8620 çeliğinin sertliği diğer iki çeliğe göre daha yüksek olmasına rağmen aşınma hızının en yüksek olduğunu tespit etmişlerdir (Soydan *et al.* 2008).

Soydan (1996) katı ortamda tozlar kullanarak borlanan AISI 1050, AISI 4140 ve 8620 çeliklerinin, yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının; borlama sıcaklığı (800, 850, 900, 950, 1000°C), borlama süresi (2, 4, 8, 12 saat) ve borlanan malzemeye bağlı olarak büyüme kinetiğini incelemiştir. Borür tabakasının kuru kayma halinde aşınma davranışları yanında, SiC zımpara diskler kullanarak yüzeylerin abraziv aşınma davranışlarını belirlemiştir (Soydan 1996).

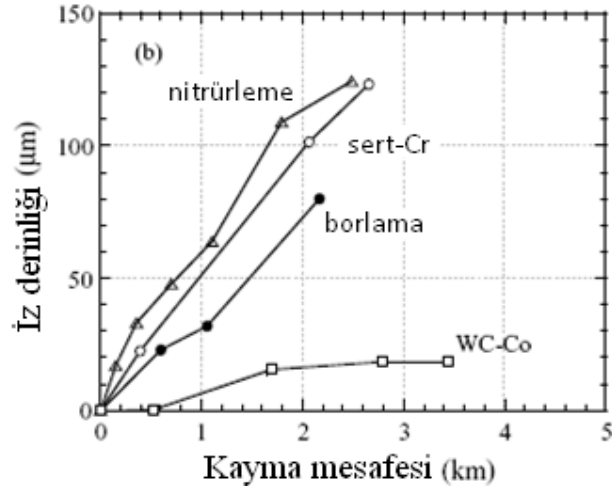
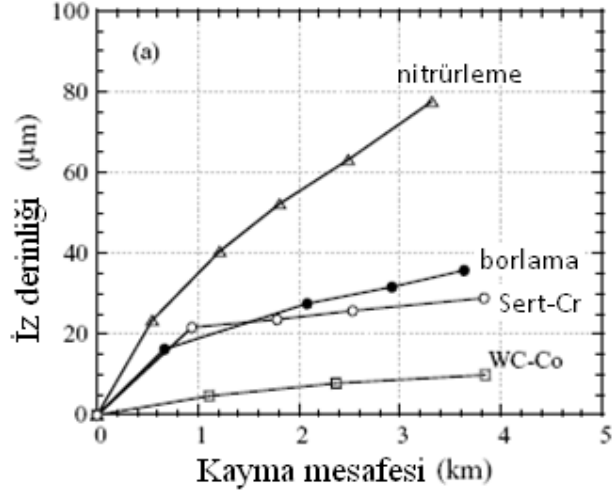
Yu vd. AISI 1018 (%C~0,2) çeliğinden numune hazırlayarak, 20 mm et kalınlığındaki kalıp içerisine, etrafını 5 mm B₄C ve SiC toz karışımı kaplayacak şekilde yerleştirerek 850°C’de 5, 15, 30, 60, 120 ve 240 dakika sürelerde plazma sinter borlama yapmışlardır.

5, 15, 30 dakika borlama sonucu yüzeyde FeB ve Fe₂B fazları oluşmuştur. 60 dakika borlama sonucu FeB tabakasının azaldığı tespit etmişler, 90 dakika borlama sonunda ise baskın olarak Fe₂B fazının oluştuğunu; 120 dakika borlama sonunda FeB fazını çok zor gözlemlemişlerdir (Yu *et al.* 2005).

Martini vd. orta karbonlu çeliği (UNI 38 NiCrMo 4) ve armco demirini (%99,99 saf) kutu sementasyon yöntemiyle 850°C’de 15 saat borlayarak borür tabakalarının aşınma direncini incelemişlerdir. Ayrıca karşılaştırmak amacıyla orta karbonlu çeliği 570°C’de gaz nitrürleme (~ 0,3 mm difüzyon derinliği), 10 µm kalınlığında (sertliği ~67-68 HRC) sert krom kaplama ve M 35 takım çeliği hava plazma sprej yöntemiyle (WC–18%Co, sertliği ~88 HRA) biriktirilmiş sert metal tabakasıyla kaplayarak aşınmalarını kıyaslamışlardır. Aşınma deneylerini silindir üzerinde kayma hareketi yapan aşınma cihazında 0,18 m/s kayma hızında, 5, 25 N yük altında 5 km kayma mesafesinde yapmışlardır. Abrasiv aşınmayı ise bilye izi geometrisine dayalı mikro ölçekli abrazyon aşınma cihazında yapmışlardır. Şekil 4.1’de borlanmış tabakanın morfolojisi Şekil 4.2’de ise aşınma eğrileri görülmektedir (Martini *et al.* 2004).

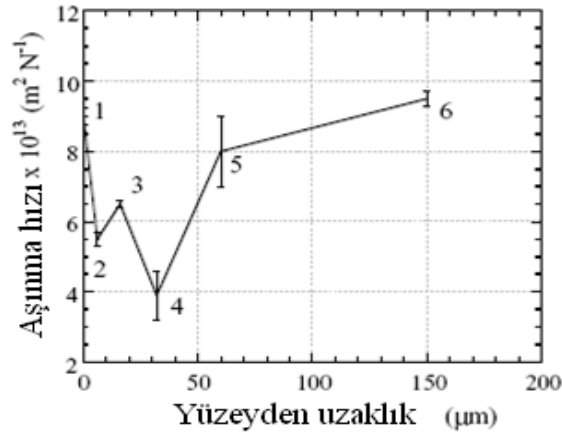


Şekil 4.1 Kolonsal morfolojideki FeB-Fe₂B tabakasının görünümü ve oluşturulan çatlak



Şekil 4.2 Aşınma Eğrileri a) 5N yük b) 20 N yük (Martini *et al.* 2004).

Şekil 4.3'te aşınma hızı grafiği verilmiştir. En dış tabaka gevrek olduğu için yükün büyük geldiğini (1 numara), iç bölgelerde (2 numara) daha düşük bir aşınma hızı ve metalografik gözlemler sonucu FeB fazı ve çok az miktarda Fe₂B fazı tespit etmişlerdir. Yüzeyden itibaren daha aşağıya inildiğinde FeB-Fe₂B ara yüzeyinde aşınma hızı arttığını (3 numara), yüksek miktarda sıralanmış Fe₂B kristalleriyle aşınma hızının minimum olduğu (4 numara) sonucuna varmışlardır. Sonra Fe₂B sütunları ve borlanmamış bölgelerde aşınma hızının arttığını (5 numara), 6 numarada abrazyon aşınması meydana geldiğini tespit etmişlerdir.



Şekil 4.3 Malzemenin üzerinden tabaka kaldırıldıktan sonra demir üzerinde oluşan çoklu fazlı borür tabakalarının dış yüzeyinin farklı derinliklerde bilye izi metoduyla aşınma hızının belirlenmesi (Martini *et al.* 2004).

Çelebi vd. (2004) AISI 8620 (21NiCrMo2) çeliğini Ekabor-2 tozu ile açık atmosferli fırında, 950⁰C'de 2, 4, 6 ve 8 saat süreler ile borlamış ve işlem sonucunda numuneleri havada soğumaya bırakmışlardır. Borlanmış yüzeylerin FeB ve Fe₂B fazlarından meydana geldiğini tespit etmişler, elde edilen borür tabakasının yaklaşık olarak kalınlıklarının sırasıyla 80 μm, 130 μm, 190 μm ve 220 μm; mikro sertliklerinin ise sırasıyla yaklaşık olarak 1400 HV, 1500 HV, 1600 HV ve 1700 HV olarak bulmuşlardır.

Celebi vd. (2008), 31CrMoV9 ve 34CrAlNi7 çeliklerini 850, 900 ve 950°C'de 2, 4, 6 ve 8 saat süreyle Ekabor II tozuyla borlamışlar ve kinetik özelliklerini incelemişlerdir. Borlama işlemi sonucunda 31CrMoV9 ve 34CrAlNi7 çeliklerinin sırasıyla 1672 HV ve 1600 HV sertlik değerlerine sahip olduklarını tespit etmişler ve borür tabakalarının kırılma tokluklarının 3,93-4,48 ve 3,87-4,40 MPa m^{1/2} arasında değiştiğini bulmuşlardır. Borlama sonucunda baskın olarak FeB ve Fe₂B fazları elde etmişlerdir. 31CrMoV9 ve 34CrAlNi7 çeliklerinin aktivasyon enerjilerinin 230 kJ/mol ve 270 kJ/mol olduğunu tespit etmişlerdir. 31CrMoV9 çeliğinde oluşan borür tabakasının 34CrAlNi7 çeliğinde oluşan borür tabakasına göre daha kalın olduğunu belirlemişlerdir. 34CrAlNi7 çeliğinde oluşan borür tabakasının daha kalın olmasının sebebi olarak aktivasyon enerjisinin düşük olmasında yüzeydeki borürlerin daha hızlı ve kolay büyüdüğünü ifade etmişlerdir.

Taştan vd. (2009) farklı kimyasal bileşime sahip AISI 1020, AISI 1040, AISI 4140 ve H13 çeliklerine borlama işlemi uygulamış ve malzeme bileşiminin borür tabakası özelliklerine etkisini incelemiştir. Borlama işlemini 820, 860, 900 ve 940°C sıcaklıklarda, 2, 4, 6, 8 saat sürelerde yapmışlardır. Kullanılan tüm malzemeler için, borlama sıcaklığı ve borlama süresi arttıkça borlama tabakası kalınlığının arttığını, tabaka artışının artan süreyle birlikte parabolik olarak değiştiğini tespit etmişlerdir. Alaşım elementi miktarı artışı borür tabakası gelişimini, dolayısıyla B difüzyonunu zorlaştırdığını belirlemiştir.

Toroghinezhad vd. (1997) yapı çeliğini borik asit, cryolite ($\text{Na}_3\text{B}_4\text{O}_7$) ve alüminyum ve alüminyum oksit içeren ortamda kutu borlama yapmışlardır. Ön karbürlenmiş ve karbürlenmemiş numunelerin borür tabakasına etkisini incelemiştir. Ön karbürlenmiş ve karbürlenmemiş numunelerin herikisinde de tek fazlı Fe_2B tabakası oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Er ve Par (2004) AISI 1030 ve 1050 sade karbonlu çeliklerine 950°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerde katı ortamda toz borlama tekniği ile yüzey sertleştirme işlemi uygulamıştır. Elde edilen numunelerin mikroyapı, sertlik incelemeleri yapmışlar ve abraziv aşınma dirençlerini belirlemiştir. Aynı malzemedeki artan borlama işlem süresiyle, artan borlu tabaka kalınlığı aşınmanın azalmasına neden olurken; farklı karbon miktarına sahip iki malzeme karşılaştırıldığında elde edilen borür tabakaların yaklaşık aynı aşınma davranışını sergilediklerini gözlemlemiştir.

Krumes vd. (2010) C15E ve C45E düşük karbonlu çelikler ile düşük alaşımlı 20MnCr5 ve 42CrMo4 çeliklerini 900°C'de 4 saat Ekabor3 tozu ile borladıktan sonra 529°C'de 40 dakika süreyle $\text{H}_2 / \text{N}_2 = 70/30$ gaz karışımıyla plazma nitrürlemiştir. Yüzeyde sert demir borür ve nitrürlerinin oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Şen vd. (2006) borlanmış, borlanmış+kısa süreli oksitlenmiş 4140 çeliğinin aşınma davranışlarını incelemiştir. 850 ve 950°C'de 2 ve 6 saat süreyle boraks, borik asit ve ferro silisyum içerikli banyoda borlama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Borlamadan sonra kısa süreli oksitleme işlemini ise 750°C'de 3 dakika süreyle yapmışlardır. Pim

şeklinde olan borlanmış ve kısa süreli oksitlenmiş numuneler 440C paslanmaz çelik diske (63 HRC) karşı pin on disk aşınma cihazında 20 N yük altında 1 m/s kayma hızında aşındırılmıştır. Borlanmış numunenin sürtünme katsayısı yaklaşık 0,5 iken borlanmış+kısa süreli oksitlenmiş numunenin sürtünme katsayısı yaklaşık 0,12 ye düşmüştür. Oksitlenmiş numunenin aşınma hızı $1,62 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N m}$ iken borlanmış numunelerin ise 3,23 den $7,54 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ye kadar çıkmaktadır (Şen ve diğerleri 2006).

Ulu vd. (2004) AISI 8620 (21NiCrMo2) çeliğini %65 boraks, %15 ferrosilisyum, %20 borik asit karışımından oluşan bir tuz banyosunda 900°C'de 5 saat süre ile sıvı borlamışlar ve numuneleri havada soğutmuşlardır. Borlama işlemi sonucunda FeB ve Fe₂B fazlarından oluşan borür tabakası elde edilmiş ve kalınlığının 200 µm civarında olduğunu tespit etmişlerdir. Oluşan borür tabakasının yüzey sertliğini 1600 HV_{0,1} olarak bulmuşlardır. Borür tabakasının kırılğan özelliğinden dolayı, aşınma hızında 15 N yükten fazla yüklerde sıra dışı bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Türktekin AISI H13 çeliğini borlama ve ardından nitrürleme, nitrürleme ve ardından borlama yaparak kaplama tabakasını karakterize etmiştir. Çalışmasında 900-950-1000°C sıcaklıklarda 2,5 saat sürede borlama 550°C sıcaklıkta 90 saat süreyle nitrürleme uygulamıştır. Borlama kaynağı olarak Ekabor pasta kullanmıştır. Nitrürleme için NH₃ gazı kullanmıştır. 1300 HV_{0,06} yüzey, 420 nitrasyon bölgesi ve 225 matriks sertliği sağlanırken, önce nitrülenip sonra borlama yapıldığında numunelerin mevcut sertliğini kaybettiği ve iyice yumuşadığını gözlemlemiştir (Türktekin 1998).

Balandin (2004) 2Kh9V6 ve 4Kh3VMF çeliklerine akışkan yataklı bir fırında 800-1000°C sıcaklıklarda, 30–120 dakika sürelerde borlama ve bor-nitrürleme işlemleri uyguladıktan sonra mikrosertlik ve aşınma deneyleri yapmıştır. Borlamayı, %5 B₄C, %0,5 NH₄Cl ve Al₂O₃ toz bileşiminde yapmıştır. Borlama sonrası borür tabakasının FeB ve Fe₂B fazlarından oluştuğunu ve elde edilen sertlikleri sırasıyla 1800 HV_{0,05} ve 1600 HV_{0,05} olarak bulmuştur. Bornitrürlenmiş tabakada FeB ve Fe₂B fazlarına ilave olarak, Fe₂B dişlerinin hemen altında azot katı çözültisi içeren bölge tespit etmiştir. Elde

edilen sertlikleri ise sırasıyla 1600 HV_{0,05}, 1400 HV_{0,05} ve 720 HV_{0,05} olarak bulmuştur (Balandin 2004).

Şen vd. (2005) AISI 5140, AISI D2 ve AISI 4340 çelikleri boraks, borik asit, ferro silisyum karışımında 800°C ve 1000°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süresince atmosferik şartlarda borlamışlardır. Sıvı borlama sonucunda numuneleri bulundukları potadan alarak oda sıcaklığına kadar havada soğutmuşlardır. Borlama işlemi sonucunda mikro sertlik değerlerinin 1077 HV-2140 HV arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Tabaka kalınlıklarının ise 21–238 µm arasında değiştiğini bulmuşlardır. AISI 5140, AISI 4340 ve D2 çeliklerinin aktivasyon enerjilerini sırasıyla 223, 234 ve 170 kJ/mol olarak tespit etmişlerdir.

Oliveria vd. (2010) AISI D2 çeliğini 800 ve 1000°C’de 4 saat süreyle boraks, ferro titanyum ve alüminyumdan oluşan 3 farklı boraks banyosunda borlamışlardır. Üç farklı banyoda borlama işlemi sonucunda borür tabaka kalınlıklarının 60-120 µm arasında, sertlik değerlerinin ise 1596-1744 HV arasında değiştiğini tespit etmişlerdir.

Selçuk vd. (2002) AISI 1020 çeliğini B₄C tozu içerisinde 930°C’de 1,5 saat süreyle kutu borlama prosesine tabi tutmuşlardır. Borlanan numunelerin aşınma ve korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Bor ile sertleştirilen yüzeylerin, normal borlanmamış numunelere göre hem aşınma hem de korozif aşınma direncinin oldukça yüksek olduğunu görmüşlerdir.

Gül ve Çetin (2011) GGG40 malzemesini Ekabor 2 borlama tozu içerisine gömerek 900°C’de 15, 30, 60 ve 120 dk olmak üzere 4 farklı sürede paket borlama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Borlanmış ve borlanmamış dökme demirlerin 1 m/s kayma hızında 1800 m kayma mesafesinde 40 ve 60 N yük altında pim disk cihazında adhesiv aşınma dirençlerini incelemişlerdir. Borlama işlemi ile adhesiv aşınma performansında 60 N yük altında 25 kat, 40 N yük altında yaklaşık 18 kat artış sağlamışlardır.

Eyre (1975) karbürleme ve borlama uygulanmış malzemelerin aşınma davranışlarını karşılaştırmış ve borlamanın adheziv aşınmayı önlediği, borlanmış tabakanın ömrünün uygulanan yükle değiştiğini belirlemiştir.

Gül (2010) ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demir malzemenin adheziv aşınma direnci üzerinde borlama ısı işlemi etkisini araştırmıştır. Borlama ısı işlemi, 960 °C'de 6 saat Ekabor II borlama malzemesinde gerçekleştirilmiştir. Adheziv aşınma testlerini disk üzerinde pim tipi aşınma cihazında 60 N yük altında 1 m/sn kayma hızında ve 3600 m, 7200 m, 10800 m ve 21600 m kayma mesafelerinde gerçekleştirmiştir. Borlanmış küresel grafitli dökme demirin adheziv aşınma direncinin, dökülmüş haldeki ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demirinkine göre 50 kat daha yüksek olduğunu tespit etmiştir.

Özmen (2007) DDK 60 küresel grafitli dökme demiri 850, 900 ve 950°C'de 2, 4, 6, 8 saat sürelerde ve katı ortamda Ekabor 2 tozu kullanarak borlama yapmıştır. Abraziv aşınma deneylerini, SiC'lü aşındırıcı kağıt kaplı metal disk kullanarak 42 N sabit yük altında yapmıştır. İşlem sıcaklık ve süresinin artmasıyla borür tabaka kalınlığının ve sertliğinin arttığını belirlemiştir. İşlem sıcaklığına ve borlama süresine bağlı olarak, borür tabakasının 34,75 µm ile 123,9 µm arasında değiştiğini, borlanmış numunelerin sertliğinin yüzeyden içeriye doğru ilerledikçe azaldığını belirlemiştir. Ayrıca, borür tabakasının faz türüne ve kalınlığına bağlı olarak aşınma miktarının değiştiğini belirlemiştir.

Akbayır (2005) AISI 1030 çeliğini 900°C, 950°C, 1000°C ve 1050°C'de 2, 4 ve 6 saat sürelerde, Ekabor2 tozunda borlayarak numunelerin abraziv aşınma direncini incelemiştir. Borlanmış AISI 1030 çeliğinin Alüminyum Oksitli zımpara kâğıtları ile yapılan abraziv aşınma deney sonuçlarını incelediğinde en az aşınmanın 950°C sıcaklığa 6 saat süreyle borlama sonucunda, en çok aşınmanın da 1050°C sıcaklıkta 4 saat işlem uygulanmış numunelerde olduğunu tespit etmiştir. Borlanmış AISI 1030 çeliğinin Silisyum Karbürlü zımpara kâğıtları ile yapılan abraziv aşınma deney sonuçlarını incelediğinde, en az aşınmanın 900°C'de 4 saat, en çok aşınmanın da 1050°C'de 2 saat işlem uygulanmış numunelerde olduğunu tespit etmiştir.

Tabur vd. (2009) Hardox 400 çeliğini katı ortamda borlama tekniği kullanarak borlamışlardır. Borlama malzemesi olarak ticari şekilde piyasada bulunan Ekabor2 tozunu kullanmışlardır. Borlama işlemini sırası ile her bir numuneye 2, 4 ve 6 saat sürelerde 850°C, 900°C ve 950°C sıcaklıklarda gerçekleştirmişlerdir. Farklı süre ve sıcaklıklarda borlanan numunelerin abraziv aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Borlanmış ve borlanmamış numuneleri pin on disk aşınma cihazında 80 ve 120 mesh zımparalar ve 10, 20, 30 N yükler altında aşınma testine tabi tutmuşlardır. Aşınma testlerini 20 m kayma mesafesinde ve 0,2 m/s kayma hızında gerçekleştirmişlerdir. Daha uzun borlama süresinin daha kalın tabaka oluşturduğunu görmüşlerdir. En iyi abraziv aşınma direncini 850°C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin gösterdiğini belirlemişlerdir.

Şahin vd. (2009) AISI 1040 çeliğine 820°C, 860°C ve 900°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta, 2, 4 ve 6 saat olmak üzere üç farklı sürede kutu borlama yapmışlardır. Mikroyapı sonuçlarını araştırmış, sertlik değerlerini tespit etmiş ve bilye-disk aşınma cihazını kullanarak aşınmasını incelemişlerdir. İşlem sıcaklığının ve süresinin değişmesi sertlik değerinin değişiminde bir etki göstermemiştir. Borlama süresi arttıkça aşınma oranının azaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Borlama sıcaklığının artması ile de genel olarak aşınma oranının azaldığını tespit etmişlerdir. Maksimum aşınma oranı değerini $4,251 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ile 860°C sıcaklıkta 2 saat süre ile yapılan borlamada elde ederken, minimum aşınma oranı değerini $0,7845 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ile 900°C sıcaklıkta 6 saat süre ile yapılan borlamada elde etmişlerdir.

Uzun (2002) %80 susuz boraks + %20 ferro silisyum bileşimi kullanarak 950°C’de 3 ve 5 saat 1000°C de 3 ve 5 saat sürelerle Ç1040 çeliğini kutu borlama yöntemiyle borlamıştır. 1000°C’de 5 saat süreyle borlanan numunelerin korozyon ve aşınma davranışlarını incelemiştir. Numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının dişli bir yapıya sahip olduğunu, borlama süresinin artmasıyla tabaka kalınlığının arttığını tespit etmiştir. Korozyon deneylerine tabi tutulan borlanmış numune, borlanmamış numuneye oranla yaklaşık 8 kat daha fazla korozyon dayanımı göstermiştir. Aşınma deneylerine tabi tutulan borlanmış numunenin borlanmamış numuneye göre aşınma dayanımının 6 kat daha yüksek olduğunu tespit etmiştir.

Yıldızlı (2002) sıvı ortamda 950, 1000 ve 1100°C sıcaklıkta 1, 3, 5, 7 ve 9 saat süreyle AISI 1020, 3315 ve 1390 çeliklerini borlayıp erozif aşınma davranışlarını araştırmıştır. Erozif aşınma oranının, borlama sıcaklığının artışı ile arttığını, aşındırma süresinin ve ortalama bor tabakası sertlik değerinin artışı ile azaldığını tespit etmiştir. Aşınma oranının minimum olduğu borlama süresi ve sıcaklığının 950°C’de 7 saat olduğunu belirlemiştir. Borlanmış çeliklerin borlanmamış olanlara göre; AISI 1020 çeliğinde 9; AISI 3315 çeliğinde 5 ve AISI 1390 çeliğinde 3 kat yüksek erozif aşınma direnci gösterdiğini tespit etmiştir.

Yılmaz vd. (2005) demir esaslı FeCu-Grafit kompozitinden toz metal parçalar üretmişlerdir. Bu parçalardan aşınma ve mekanik deney numuneleri üretip, bazılarını borlama işlemi uygulamışlardır. Parçaları pim-disk aşınma deney cihazında 17 N yükte, 50 dev/dak kayma hızında ve kuru ortamda aşındırarak aşınma özelliklerini belirlemişler ve mekanik deneylerle de mekanik özellikleri inceleyip birbiriyle karşılaştırmışlardır. Aşınma numunesi test cihazına bağlanarak toplam 4800 m olmak üzere her 400 m’de bir ağırlık kayıplarını hassas terazide ölçerek belirlemişlerdir. T/M yöntemiyle üretilmiş borlanmamış FeCu-grafit kompozitinin aşınması incelendiğinde, 236 mg lık bir ağırlık kaybı ve borlanmış FeCu-grafit kompozitinde ise yaklaşık 10 mg ağırlık kaybı olduğunu tespit etmişlerdir. Yani borlanmış numunede yaklaşık 24 kat bir artış olduğunu tespit etmişlerdir.

Bejar ve Moreno (2006) 1020, 1045, 4140 ve 4340 çeliklerini 950-1050°C sıcaklıklarda 2 ve 8 saat arasında kutu borlama tekniğiyle Çizelge 4.1’de gösterilen karışım oranlarında borlayıp 2-2,5 m/s kayma hızında 130 N yük altında abraziv aşınma yapmışlardır. Her bir çelikte tek fazlı Fe₂B tabakasının oluştuğunu görmüşlerdir. Aşınma deneyleri ASTM G95 standartına göre dizayn edilmiş abraziv aşınma makinasında disk ve numune arasında kuvars kumunda ve 130 N yük uygulayarak aşındırma işlemini yapmışlardır. En iyi abraziv aşınma direncini borlanmış 1020 çeliğinin gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Çizelge 4.1 Bor karışımlarının ağırlıkça % karışımları (Bejar ve Moreno 2006)

Karışım	Boraks	SiC	NH ₄ Cl	NaCl
M1	88,26	9,06	1,22	1,46
M2	73,26	24,06	1,22	1,46
M3	63,26	34,06	1,22	1,46

Balandin (2006) kalıp çeliklerini akışkan yataklı fırında 850–1000°C arasında 30-120 dakika aralığında bor, bor–nikel, bor-bakır difüzyon kaplama yapmıştır. 0,1 m/s kayma hızında 1 Mpa basınç altında kuru ortamda, gidip gelme hareketi yapan cihazda abraziv aşınma dirençlerini ölçmüştür. Borlamaya göre bor-nikelleme ve bor-bakırlama aşınma dirençlerinin daha iyi olduğunu tespit etmiştir.

David vd. (2008) St37, Ck60, 42CrMo4, X210Cr12, X40CrMoV51 çeliklerini 950°C’de akışkan yataklı fırında borlamışlardır. Kaplamanın optik mikroskopla tabaka kalınlığını, XRD ile oluşan fazları, mikrosertlik incelemeleri ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Diş şekilli morfolojiye sahip ve Fe₂B baskın fazına sahip tabakaların oluştuğunu ve bu fazın tribolojik özellikleri artırdığını tespit etmişlerdir.

Tabur vd. (2009) AISI 8620 çeliğini 800, 850, 950°C sıcaklıkta; 2, 4, 6 saat sürelerle Ekabor 2 tozu ile kutu borlama işlemine tabi tutmuşlardır. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış numunelerin abraziv aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Deneylerde 80 ve 120 mesh’lik Al₂O₃ zımpara kağıdı kullanmışlar ve numuneleri 0,2 m/s kayma hızında; 10, 20 ve 30 N yük altında aşınmaya tabi tutmuşlardır. 950°C sıcaklıkta 6 saat süreyle yapılan borlama işleminin sertliğini 1850 HV_{0,1}, 950°C sıcaklıkta 2 saat sürede 1710 HV_{0,1}, 850°C’de 6 saat sürede 1750 HV_{0,1}, 850°C’de 2 saat sürede 1650 HV_{0,1} olarak tespit etmişlerdir. Artan borlama sıcaklığıyla bor tabaka kalınlığının arttığını gözlemlemişlerdir. 950°C sıcaklıkta 6 saat süreyle yapılan borlama işleminde 250 µm, 950°C sıcaklıkta 2 saat süreyle yapılan borlama işleminde 110 µm, 850°C sıcaklıkta 6 saat süreyle yapılan borlama işleminde 150 µm, 850°C sıcaklıkta 2 saat süreyle yapılan borlama işleminde 80 µm tabaka kalınlığı tespit etmişlerdir. En büyük aşınma hızını 950°C sıcaklıkta 2 saat süreyle yapılan borlama işleminde, en küçük aşınma hızını 850°C sıcaklıkta 6 saat süreyle yapılan borlama işleminde elde etmişlerdir. Bunun

sebebi olarak daha uzun sürelerde borlanmış numunelerde oluşan FeB tabakasının gevrek yapıya sahip olmasından kaynaklandığını açıklamışlardır.

Kulka ve Pertek (2003) 41Cr4 çeliğini 950°C’de 2 saat süreyle gaz borlama yaptıktan sonra CO₂ lazeriyle numune üzerinde düzenli olarak tekli ve çoklu izler yaparak lazer ısıtım işlemine tabi tutmuşlardır. Borlamadan sonra yapılan lazer işleminden sonra tabakaların mikrosertlikleri sadece borlanmış numunelere göre daha düşük, ayrıca borlamadan sonra yapılan lazer işleminin, altlık malzeme ve difüzyon tabakası arasındaki sertlik dağılımını da düzenlediğini tespit etmişlerdir. Konvansiyonel ısıtım işleminden sonra borlanmış numune ile karşılaştırdıklarında borlamadan sonraki lazer işlemiyle tabakanın aşınma direncinin arttığını görmüşlerdir.

Atik vd. (2003) 1010, 1040, D2 ve 304 çeliklerini 900°C sıcaklıkta, 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerle Ekabor 3 tozu içerisinde borlayarak 0,157 m/s hızda 40 saat süreyle 1 mm çapındaki kum içerisinde çeliklerin abrazyon aşınma dirençlerini belirlemişlerdir. Sertlik değerleri ile aşınma arasında lineer bir ilişki olmadığı, yüksek sertlik değerlerindeki D2 ve 304 çeliklerinin aşınmasının negatif etkilendiği, aşınma mukavemetine tabaka kalınlığı ve sertlik değerlerinin doğrudan ilişkisinin olmadığı sonucuna varmışlardır.

Subrahmanya ve Gopinath (1984) tek fazlı borür tabakasının çift fazlı borür tabakasından daha iyi aşınma direnci gösterdiğini belirlemişlerdir. FeB ve altlık malzemenin aşınma mekanizmasının abrazyon ve oksidatif, Fe₂B fazının ise oksidatif yorulma aşınma mekanizması olarak belirlemişlerdir.

Demirel ve Çetin (2011) AISI 8640 çeliğini Ekabor 2 tozu altında 850, 900 ve 950°C sıcaklıklarda 2, 4, 6, 8’er saat borlama işlemine tabi tutarak, 10 ve 20 N yük altında 0,1 m/s kayma hızında, 10 m kayma mesafesinde abrazyon aşınma direncini belirlemişlerdir. En düşük aşınma kaybını 950°C’de 8 saat süreyle yapılan deneyler sonucunda elde etmişlerdir.

Güneş vd. (2011) GGG50 dökme demirini Ekabor2+%15 ferro silisyum tozu içerisinde 850°C, 900°C ve 950°C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlayarak 10 ve 20 N yük altında 0,1

m/s kayma hızında 10 m kayma mesafesinde abraziv aşınma direncini belirlemişlerdir. Aşındırıcı boyutunun ve uygulanan yükün artmasıyla aşınma kaybının arttığını, aynı borlama sıcaklığında numunelerin aşınma kaybının artan borlama zamanı ile azaldığını, en fazla aşınma miktarının işlemsiz numunelerde olduğunu, borlama işleminin GGG50 küresel grafitli dökme demirlerin aşınma dayanımlarında önemli ölçüde artışa sebep olduğunu tespit etmişlerdir.

Yünker (2000) St 37-2, St 60-2, X155 CrVMo 12 1, X5CrNi 18 9 çeliklerini 900°C'de 2, 4, 6, 8 saat sürelerde ve katı ortamda Ekabor 3 tozu ile borlama, 565°C sıcaklıkta amonyak gazı atmosferinde gaz nitürasyon işlemi, St 37-2 ve St 60-2 çeliklerine 930°C'de tuz banyosunda sementasyon işlemi, X155 CrVMo 12 1 çeliğini de 1020°C sıcaklığa kadar ısıtıp yağda su vererek dönüşüm sertleştirmesi işlemini yapmıştır. Abraziv aşınma deneyleri yapmıştır. Aşındırıcı olarak ortalama 1 mm çapındaki 0,157 m/s hızla dönen kum içinde sabit duran numuneleri her 5 saat sonunda kumdan çıkararak alkolle temizlemiş ve ağırlık kayıplarını belirlemiştir. Her tartımdan sonra numuneleri tekrar aynı yüzeyi aşınacak şekilde aşınma kabına yerleştirmiş ve toplam 40 saat boyunca aşındırma işlemine devam etmiştir. En iyi aşınma dayanımını borlanmış numunelerde elde etmiştir.

Venkataraman ve Sundararajan (1995) sürtünme dinamometresi kullanarak borlanmış orta karbonlu çeliğin yüksek hız kayma aşınma ve sürtünme davranışını incelemişlerdir. Aşınma deneylerini 8 m/s hızda 2MPa kadar yükle yapmışlardır. Yüksek kayma hızlarında, borlanmış çeliğin sürtünme katsayısının borlanmamış çeliğin sürtünme katsayısından büyük olduğunu tespit etmişlerdir. Borlanmış çelikte delaminasyon aşınması baskınken, borlanmamış çelikte oksidatif aşınmanın baskın olduğunu görmüşlerdir.

4.2 Plazma Destekli Borlama İle İlgili Yapılmış Çalışmalar

Kaestner vd. (2001) saf titanyum ve TiAl6V4 alaşımını 700-900°C arasında farklı sürelerde Ar-BCl₃ gaz karışımında plazma borlamışlardır. Proses parametrelerine bağlı

olarak yüzeyde borca zengin TiB_2 ve altında TiB tabakasının oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

Bartsch ve Leonhardt (1999) saf demiri, Ck45 ve 42CrMo4 çeliklerini BCl_3-H_2-Ar gaz karışımında $560^\circ C$ 'nin altındaki sıcaklıklarda plazma borlama çalışmaları yapmışlar ve FeB ve Fe_2B tabakasının oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Bejar ve Henriquez (2009) plazma ortamında borlama yapmışlar ve geleneksel diğer borlama yöntemlerine göre daha büyük borür tabaka kalınlıkları elde etmişlerdir.

Yoon vd. (1999), boraks ($Na_2B_4O_7$) ve amorf bor karışımından oluşan pastayı 304 paslanmaz çeliğin üzerine sürerek Ar/H_2 plazmasında değişik sıcaklıklarda borlamışlar ve tabakanın difüzyon kinetiğini ve morfolojisini incelemişlerdir. Ayrıca, optimum borür tabaka kalınlığı için değişik boraks ve amorf bor bileşikleri içeren pasta kullanmışlardır. Çalışmalar sonucunda %70 boraks ve %30 amorf bor içeren pastanın en yüksek kalınlığı verdiğini ve %100 boraks içeren pastanın da paslanmaz çelikte borür tabakası oluşturduğunu ifade etmiştir. Difüzyon kinetiği çalışmaları sonucunda plazma pasta borlama ile gerçekleştirilen borür tabakasının diğer borlama ortamlarına nazaran daha kalın ve aktivasyon enerjisinin de daha küçük olduğunu vurgulamışlardır.

Güneş (2010) AISI 8620 çeliğini değişik pasta karışımlarında plazma pasta borlayıp ve yüzey özelliklerini incelemiştir. Boraks ve B_2O_3 'e farklı yüzdelerde SiC ve B_4C ilave ederek elde ettiği bor pastaları ile AISI 8620 çeliğini plazma ortamında borlamıştır. İşlemi 700 , 750 ve $800^\circ C$ sıcaklıklarda 2, 5 ve 7 saat sürelerde %30 Ar -%70 H_2 gaz karışımında, 10 mbar çalışma basıncında gerçekleştirmiştir. Boraks bazlı pastalarda B_2O_3 bazlı pastalara göre nispeten daha kalın bor tabakası elde etmiştir. Çalışmalarının hepsinde en yüksek borür tabakasını % 100 boraks pastasında elde ederken en düşük borür tabakasını %70 B_2O_3 + %30 B_4C pasta karışımında elde etmiştir. Genel itibariyle boraks ve B_2O_3 içerisine SiC ve B_4C tozlarının katılması tabaka kalınlığında düşüşe yol açtığını fakat bu tozların erime sıcaklığının boraks ve B_2O_3 'e göre daha yüksek olduğundan işlem sonrası yüzey temizliğini kolaylaştırdığını ve işlemden sonra artık pasta veya cürufkların yüzeyden daha kolay kalktığını belirtmiştir. Yapılan plazma pasta

borlama işlemleri sonunda çelik yüzeyinde 700°C gibi düşük bir sıcaklıkta borür tabakasının oluştuğunu görmüştür. Kimyasal reaksiyon sonucunda boraks bor pastasında PPB sonucunda B₂O₃'e göre daha kalın bor tabakası oluştuğunu tespit etmiştir. Boraksın H₂ ile reaksiyona girmesi sonucunda (B₂O₃'e göre) borlama ortamına daha fazla bor miktarı verildiği için daha kalın borür tabakası oluştuğunu belirtmiştir. Plazma pasta borlama (PPB) esnasında meydana gelen kimyasal reaksiyonları Denklem 4.2- 4.31'de vermiştir.

Sadece boraks içeren pasta ile PPB reaksiyonu;



Boraks ve SiC içeren pasta ile PPB reaksiyonu;



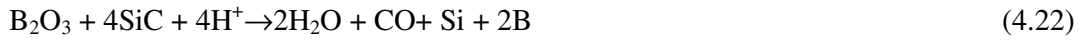
Boraks ve B₄C içeren pasta ile PPB reaksiyonu;



Sadece B₂O₃ içeren pasta ile PPB reaksiyonu;



B₂O₃ ve SiC içeren pasta ile PPB reaksiyonu;



B₂O₃ ve B₄C içeren pasta ile PPB reaksiyonu;



5. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan çelik malzeme, deney cihazları ve metotlar hakkında bilgiler verilmiştir.

5.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 8620 çeliği Asil Çelik'ten temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 8620 çeliğinin kimyasal analizi Çizelge 5.1'de verilmiştir. AISI 8620 çeliği Ø20x6 mm ebatlarında hazırlandıktan sonra numune yüzeylerinin birbirine paralel olması için düzlem yüzey taşlama tezgahında taşlanmıştır. Boraks ve borik asit tozları Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'nün Kırka ve Bandırma fabrikalarından temin edilmiştir.

Çizelge 5.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi

Çelik Türü	Kimyasal Bileşim (% Ağırlıkça)							
	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	S	P
AISI 8620	0.19	0.4	0.4	0.15	0.7	0.15	0.04	0.03

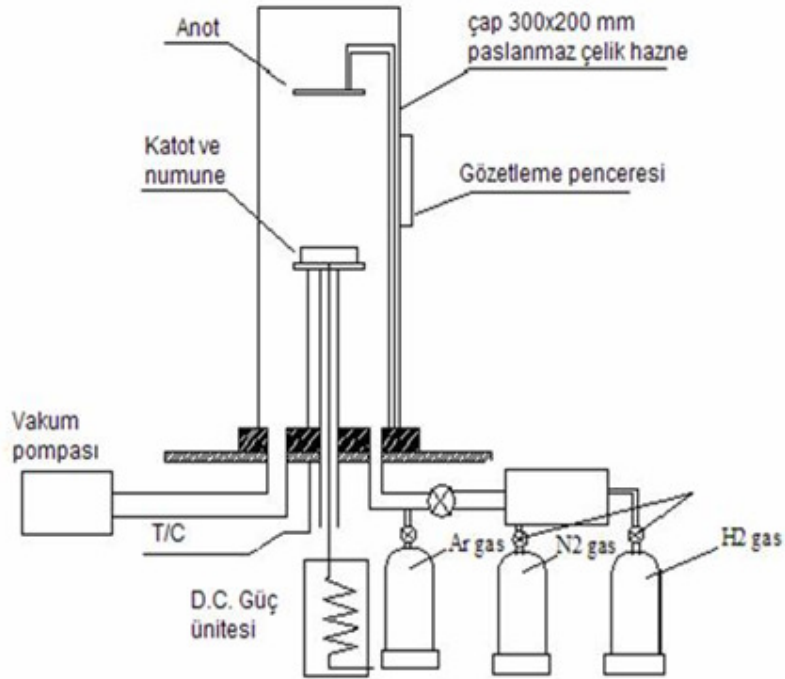
5.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar

5.2.1 Plazma Pasta Borlama Cihazı

Plazma pasta borlama işlemi Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü'nde bulunan plazma nitrüleme cihazı kullanılarak yapılmıştır. Plazma pasta borlama işlemlerinin gerçekleştirildiği plazma ünitesi Resim 5.1'de, şematik görünümü ise Şekil 5.1'de verilmiştir.



Resim 5.1 Plazma pasta borlama cihazı.



Şekil 5.1 Plazma pasta borlama cihazı şematik gösterimi

5.2.2 Mikro Yapı Analizleri

Numunelerin zımparalama ve parlatma işlemleri devir hızı ayarlanabilen hareketli iki disk üzerinde gerçekleştirilmiştir.

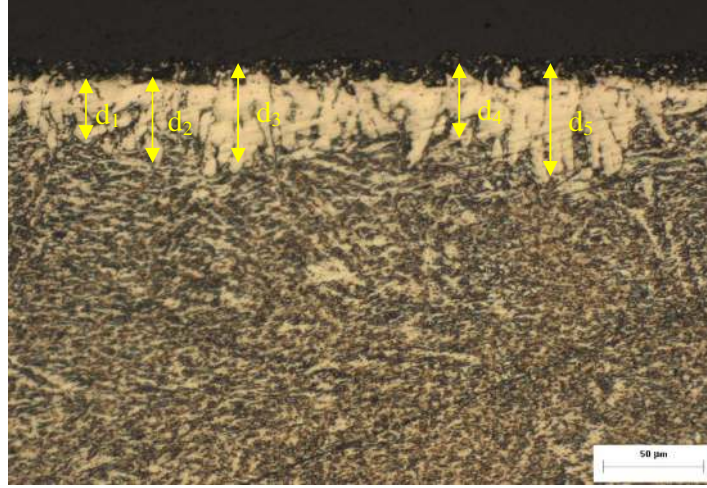
Dağlama işlemi sonrası mikroyapı görüntülerinin alınmasında Olympus marka Bx60 Model alttan ve üstten aydınlatmalı 3,3 megapikselli kamera ve bilgisayar destekli optik mikroskop (Resim 5.2) kullanılmıştır. Bu mikroskoptaki çekimler X50-X2000 büyütmeler arasında yapılabilmektedir. Ayrıca borlanmış numunelerin tabaka kalınlıkları Olympus BX-60 optik mikroskoba bağlı bir aparat yardımıyla 30 farklı yerden alınan değerlerin aritmetik ortalamasından bor tabakası kalınlıkları Denklem 5.1’de görüldüğü gibi hesaplanmıştır. Resim 5.3’te SEM incelemelerinde kullanılan LEO 1430 VP markalı taramalı elektron mikroskobu görülmektedir.



Resim 5.2 Optik mikroskop (OM)



Resim 5.3 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)



Şekil 5.2 Borür tabaka kalınlığının (d) belirlenmesi için örnek gösterim

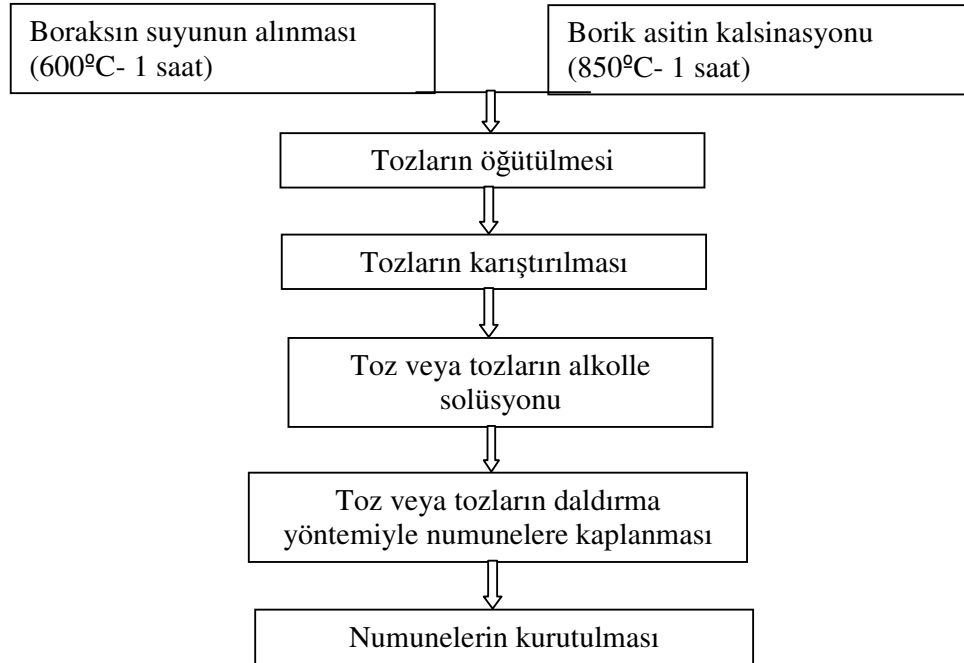
d: Tabaka kalınlığı

n: Ölçüm sayısı

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (5.1)$$

5.3 Bor Kaynaklı Pastalarının Hazırlanması

Şekil 5.3'te boraks ve borik asitin kalsinasyon işlemi ve pasta haline getirilinceye kadar geçen sürecin işlem akış şeması görülmektedir.



Şekil 5.3 Boraks ve borik asitin kalsinasyon işleminin akış şeması

5.4 Plazma Pasta Borlama İşlemi

Plazma pasta borlama işlemi aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmiştir:

- Hazırlanan numuneleri katot üzerine yerleştirdikten sonra anot katot arasına ısıнын dışarıya dağılımını önlemek için kuvars cam boru konarak plazma haznesi kapatıldı.
- Vakum basıncı 2×10^{-2} mbar vakuma getirildi.
- PPB işlemine geçmeden önce 5 mbar gaz basıncında yaklaşık 500V gerilim altında ve 20 dakika süreyle H_2 gazı ile ön saçılma yapıldı.
- Deney planında belirlenen oranda gaz karışımı ortama verilmiştir.
- Ortam basıncı iğne vanalar yardımıyla 10 mbar'a sabitlenmiştir.
- Uygulanan gerilim artırılarak deney planındaki sıcaklığa ulaşınca kadar numuneler ısıtılmıştır. Katot üzerine yerleştirilen numuneler arasındaki simetri nedeniyle ortadaki bir numuneden alınan sıcaklık değeri bütün numuneler için aynı kabul edilmiştir. Sıcaklık ölçümü için mineral izoleli K tipi temokupl kullanılmıştır.
- Belirlenen sıcaklığa ulaşır ulaşmaz PPB işlem zamanı başlatılmıştır.
- İşlem sonunda numunelerin oksitlenmemesi için vakum pompasının çalıştırılması ve gaz gönderimi devam ettirilmiş, numuneler oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır.

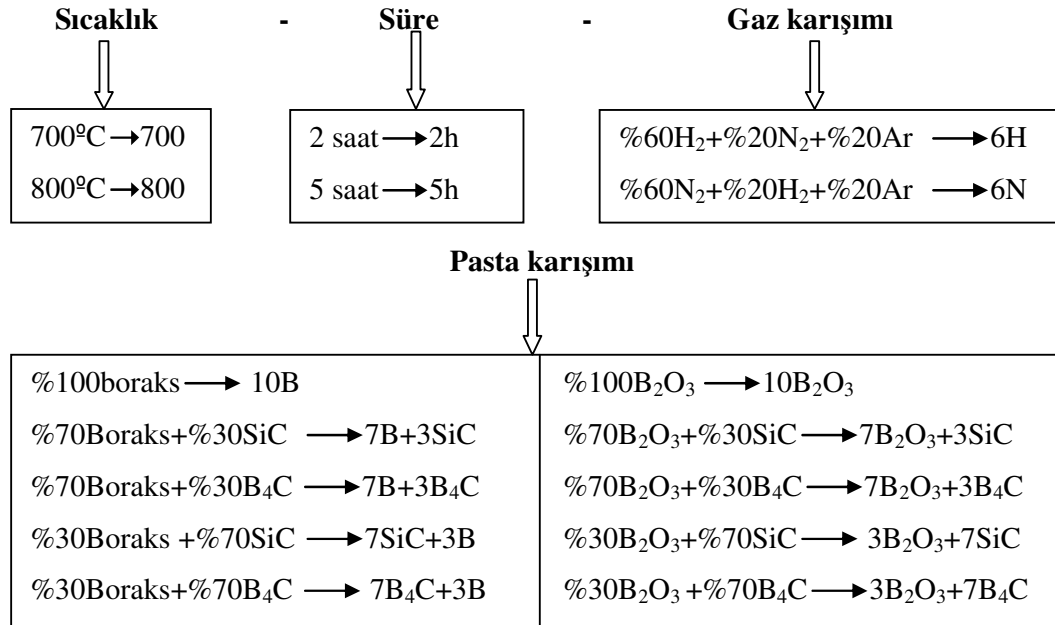
İşlem sonrası vakum haznesinden çıkarılan numuneler sıcak su içerisinde bekletilip yüzeylerindeki kalıntılar giderilmiştir. Daha sonra ultrosonik banyo içerisinde numunelerin yüzeyleri son defa temizlenmiştir. Deneyler iki defa tekrar edilmiş ve elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır.

Çizelge 5.2'de üçlü gaz karışımlarında plazma pasta borlama işlem parametreleri görülmektedir.

Çizelge 5.2 Üçlü gaz karışımında gerçekleştirilen plazma pasta borlama deney parametreleri

DENEY PARAMETRELERİ								
Gaz Karışım Oranları (%)			Karışım Türü ve % Miktarları			Karışım Türü ve % Miktarları		
H ₂	Ar	N ₂	Boraks	SiC	B ₄ C	B ₂ O ₃	SiC	B ₄ C
60	20	20	100	-----	-----	100	-----	-----
			70	30	-----	70	30	-----
			70	-----	30	70	-----	30
			30	70	-----	30	70	-----
			30	-----	70	30	-----	70
20	20	60	100	-----	-----	100	-----	-----
			70	30	-----	70	30	-----
			70	-----	30	70	-----	30
			30	70	-----	30	70	-----
			30	-----	70	30	-----	70
Deney İşlem Süresi, (Saat)				2 ve 5				
Deney İşlem Sıcaklığı, (°C)				700 – 800				

5.4.1 Deney Parametrelerinin Kodlanması



Örnek kodlama

800°C sıcaklıkta 2 saat süreyle %60H₂+%20N₂+%20Ar gaz karışımında %70Boraks+%30B₄C pasta karışımıyla PPB için kodlama aşağıdaki şekildedir:

800-2h-6H-7B+3B₄C

5.5 Analizler ve Testler

5.5.1 Metalografik İşlemler

PPB numuneler, kesitten kesilerek kalıplanmış ve gerekli 240-1200 grid'lik zımparalama kademesinden geçirilmiştir. Parlatma işlemi 1µm alümina süspansiyon ile gerçekleştirilmiştir. Dağlayıcı olarak % 3'lük nital kullanılmıştır.

5.5.2 X-Işınlari Difraksiyon Analizi

PPB çeliklerin yüzeyinde oluşan fazların analizi Shimadzu XRD-6000 model X-ışınları cihazı yardımıyla tespit edilmiştir. X- ışını radyasyonu olarak CuKα radyasyonu kullanılmış olup numune yüzeyleri 2θ, 20-90 derece arasında taranmıştır.

5.5.3 Düşük Açılı X-Işınlari Difraksiyon Analizi (GAXRD)

Üçlü gaz karışımlarında 10B pastasıyla PPB çeliklerin yüzeyinde oluşan ince filmlerin faz analizleri Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan RIGAKU XRD D/MAX/2200/PC model X-ışınları cihazı yardımıyla yapılmıştır. X- ışını radyasyonu olarak CuKα radyasyonu kullanılmış olup numune yüzeyleri 2θ, 20-90 derece arasında ve 1 derece giriş açısıyla taranmıştır.

5.5.4 Glow Deşarj Optik Emisyon Spektrometresi

Üçlü gaz karışımlarında 10B pastasıyla PPB çeliklerin derinlik profillerinin belirlenmesinde Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde bulunan HORIBA JOBIN

YVON marka GD Profiler HD model Glow Deşarj Optik Emisyon Spektrometresi kullanılmıştır.

5.5.5 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelenmesi

PPB numunelerin mikro yapı analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan LEO 1430 VP markalı taramalı elektron mikroskobu ve Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir.

5.5.6 Mikro Sertlik Ölçümleri

Numunelerin yüzeylerinde oluşan borürlerin sertlik ölçümleri SHIMADZU HMV-2 model sertlik cihazı ile yüzeyden merkeze doğru 50 gr. yük altında vickers yöntemiyle yapılmıştır.

5.5.7 Aşınma Deneyleri

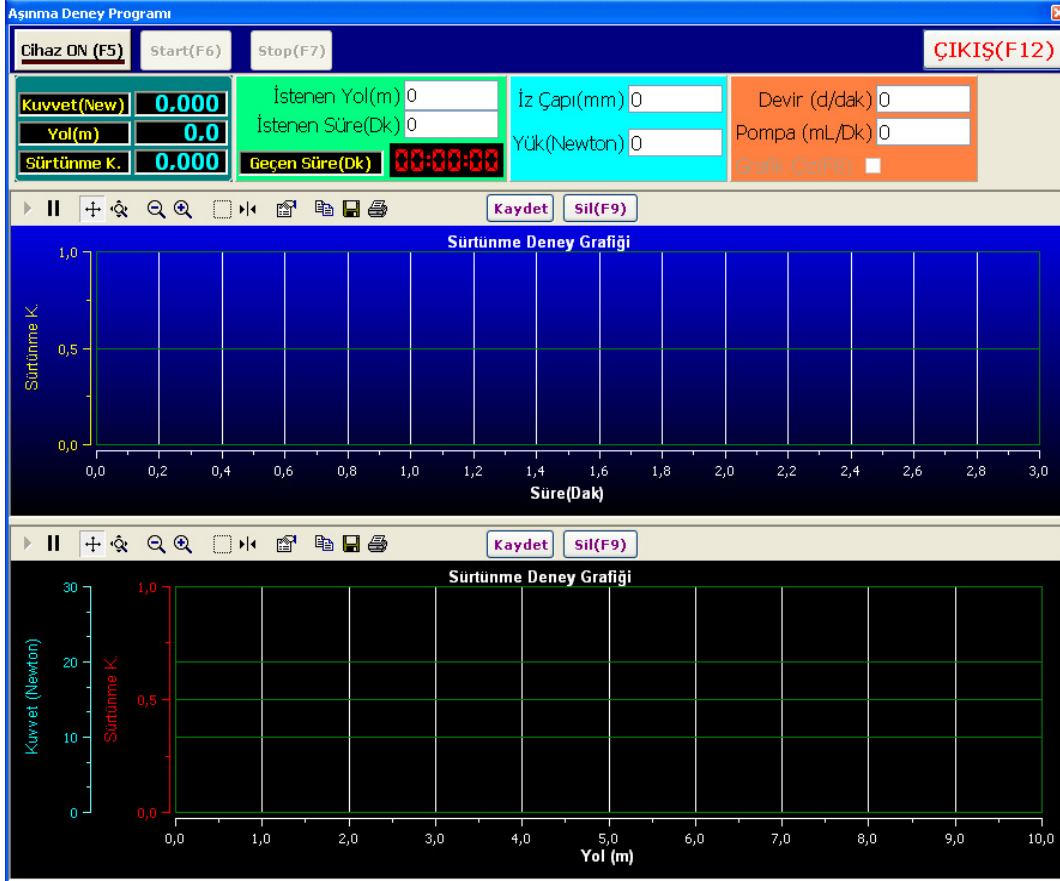
PPB numunelere kuru kayma şartlarında, oda sıcaklığında aşınma testleri uygulanmıştır. Aşınma test cihazı ASTM G99'a uygun olarak tasarlanan bilye-disk cihazıdır (Resim 5.4). Bu sistemde, sabit duran ve yüklemenin üzerinden yapıldığı bilye tutucu ve bunun karşısında dönme hareketi yapan bir disk vardır. Diskin hareketi, 0,75 kW gücünde, dikey olarak yerleştirilen bir A.C motoru ile sağlanmıştır. Motora bağlanan kontrol ünitesi ile bilgisayar programından devir sayısı 0-1000 dev./dak. arasında ayarlanabilmektedir.

Aşınma sırasındaki sürtünme katsayılarının belirlenmesi için yükleme kolunda bilye tutucuya yakın olan kısma yük ölçer (load cell) monte edilmiştir. Standart uzama ölçerle (strain gage) donatılmış ve Wheatstone köprü sistemine göre çalışan yük ölçer (load cell) vasıtasıyla bilye ve disk sistemindeki teğetsel kuvvetler tespit edilmiştir. Yük ölçerden alınan sinyaller ADAM-3016 amplifikatörde düzenlendikten sonra, I/O dönüştürücü kart (PCL-812PG) vasıtasıyla bilgisayara aktarılmaktadır. Sürtünme

katsayısını ölçmek için Borland Delphi 5’de yapılan program, μ sürtünme katsayısını süreye bağlı olarak çizen bir grafik vermektedir. Program test boyunca, saniyede 15 veri almakta ve bu verilerin ortalamasını almaktadır. Aşınma deney programı Resim 5.5’te görülmektedir. Sürtünme katsayısı programı vasıtasıyla kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda plazma pasta borlama sıcaklığına bağlı olarak sürtünme katsayısı ve aşınma hızı grafikleri çizilmiştir.



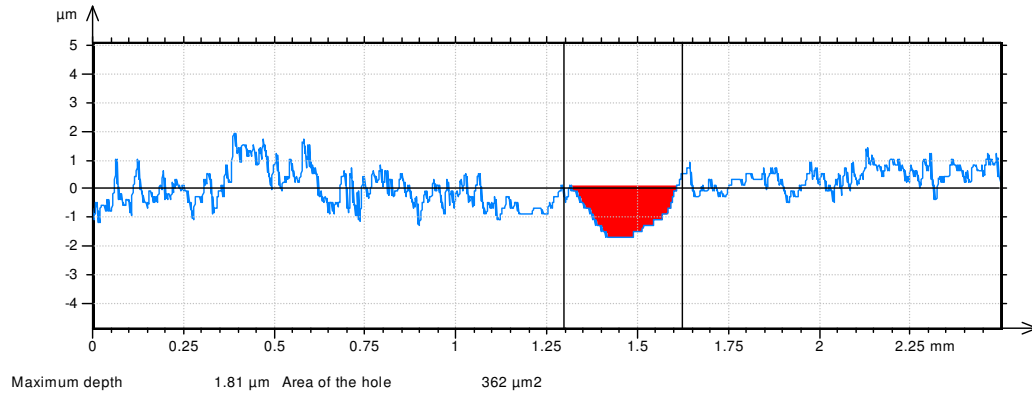
Resim 5.4 Aşınma cihazının görünüşü.



Resim 5.5 Aşınma deney programı

Aşınma deneylerinde bilye olarak SpheroTech GmbH firmasından temin edilen 8 mm çapında ve ortalama 1895 HV sertliğe sahip WC-Co bilyeler kullanılmıştır. Her deney için ayrı bir aşındırma elemanı kullanılarak, yüzeyin bozulmasından kaynaklanabilecek hatalar ortadan kaldırılmıştır. Bilye disk sisteminde kuru sürtünme şartında oda sıcaklığında, 330 dev/dk. sabit hızda, 10 N yük altında, 0,2 m/sn kayma hızında, 500 m mesafe boyunca gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyi öncesinde ve sonrasında her bir numune ve aşındırma elemanı alkolle temizlenmiştir. Aşınma kesit alanları ve aşınma iz derinlikleri, Taylor Hubson Surtronic 25 marka Rugosimeter cihaz ile tespit edilmiştir. Cihazdan elde edilen kesit alanı örneği Şekil 5.4'te görülmektedir. Deney sonrası numunelerin aşınma hacimleri Rugosimeter cihazından elde edilen aşınma kesit alanlarının aşınma izi çevresiyle çarpımı sonucunda bulunmuştur. Aşınma hızı ise Denklem (5.2) ile hesaplanmıştır.

$$\text{Aşınma hızı} = \frac{\text{Aşınma hacmi}}{\text{Uygulanan yük x Kayma mesafesi}}, \text{ mm}^3/\text{Nm} \quad (5.2)$$



Şekil 5.4 Rugosimeter cihazından elde edilen kesit alanı örneği

6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

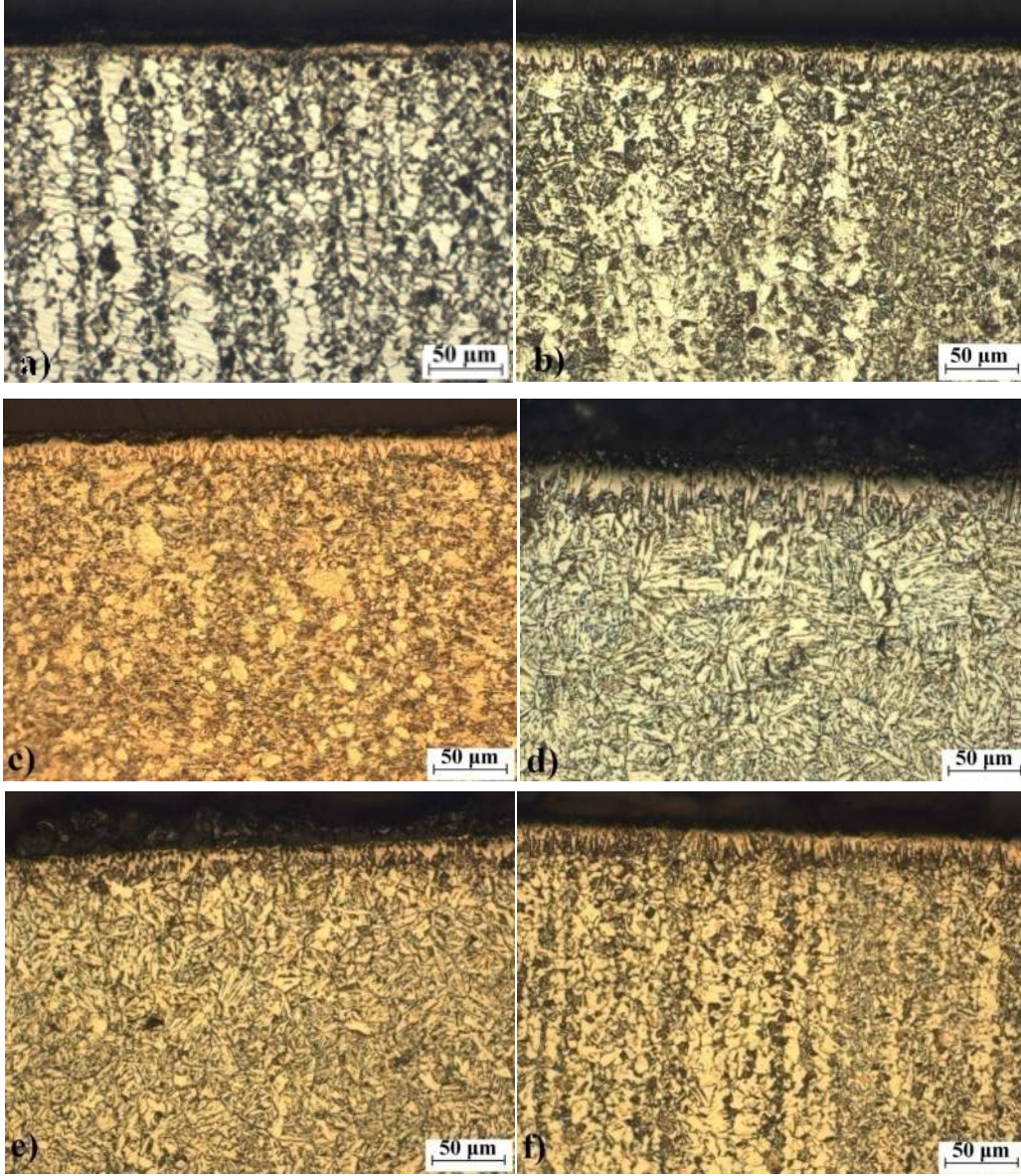
6.1. Mikro Yapısal Özellikler

Borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla borür tabaka kalınlığının arttığı görülmüştür. Daha yüksek sıcaklık ve borlama sürelerinde yüksek tabaka kalınlıklarına ulaşılmıştır. Bu durum literatürle uyum göstermektedir (Uzun 2002, Ozdemir *et al.* 2006, Oliveria *et al.* 2010, Tabur *et al.* 2009, Sen *et al.* 2005). Borür tabakası testere dişli bir morfolojiye sahiptir (Uzun 2002, Calık *et al.* 2009). Borür tabakasının kalınlığı malzemenin kimyasal kompozisyonu, işlem sıcaklığı ve süresiyle doğrudan ilgilidir (Şen ve Şen 2003, Ozbek *et al.* 2004) Düşük alaşımlı çeliklerde testere dişli bir yapı elde edilirken yüksek alaşımlı çeliklerde düz bir yapı elde edilmektedir (Taktak 2007, Martini vd. 2004). Güneş vd. (2011) AISI 8620 çeliğini %100 boraks pastasıyla 700 ve 800⁰C'de 3 ve 5 saat sürelerle %70H₂+%30Ar gaz karışımında plazma pasta borlamışlar ve sıcaklık ve sürenin artmasıyla borür tabaka kalınlığının arttığını tespit etmişlerdir. Uzun (2002) 1040 çeliğini %80 susuz boraks+%20 ferro silisyum karışımında 950-1000 °C'de 3 ve 5 saat süreyle kutu borlama işlemine tabi tutmuştur. Oluşan borür tabakasının dişli bir yapıya sahip olduğunu borlama süresinin artmasıyla tabaka kalınlığının arttığını tespit etmiştir.

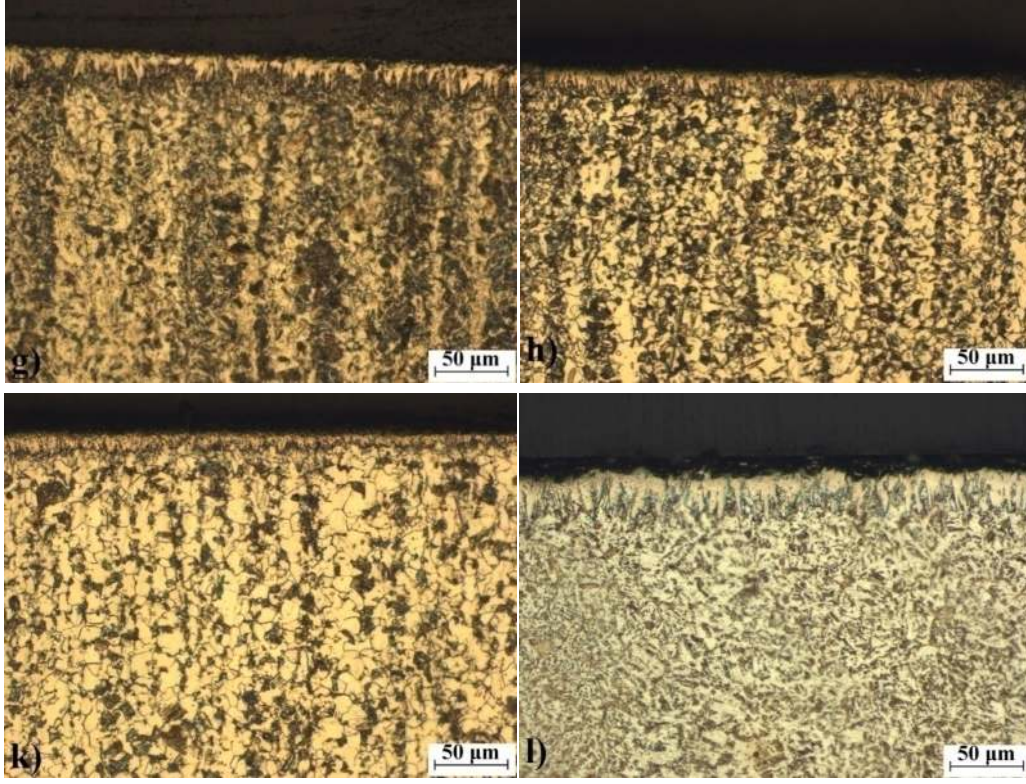
B pastasına SiC ve B₄C ilavesiyle borür tabakasının azaldığı görülmüştür.

6.1.1 700-2h-6H Deney Şartlarında Yapılan PPB İşlemi

Şekil 6.1'de 6H gaz karışımıyla PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikro yapıları verilmiştir. 700-2h PPB sonucunda numuneler üzerinde borür tabakalarının oluştuğu tespit edilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi bor tabakaları testere dişi morfolojisine sahiptir (Campos *et al.* 2006).



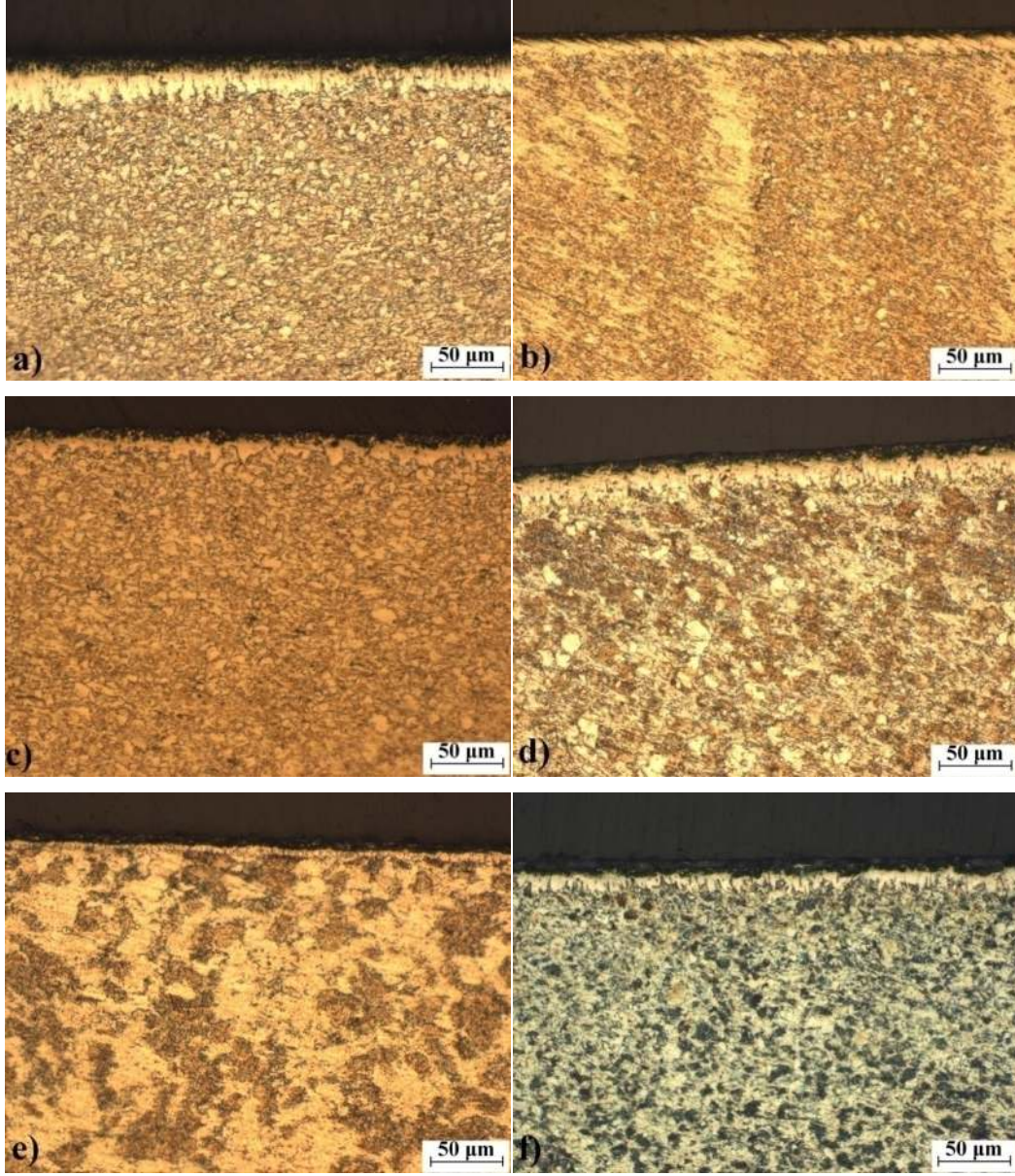
Şekil 6.1 700-2h-6H şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı, a) $10\text{B}_2\text{O}_3$, b) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{SiC}$, c) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{B}_4\text{C}$, d) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{SiC}$, e) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{B}_4\text{C}$, f) 10B , g) $7\text{B}+3\text{SiC}$, h) $7\text{B}+3\text{B}_4\text{C}$, k) $3\text{B}+7\text{SiC}$, l) $3\text{B}+7\text{B}_4\text{C}$



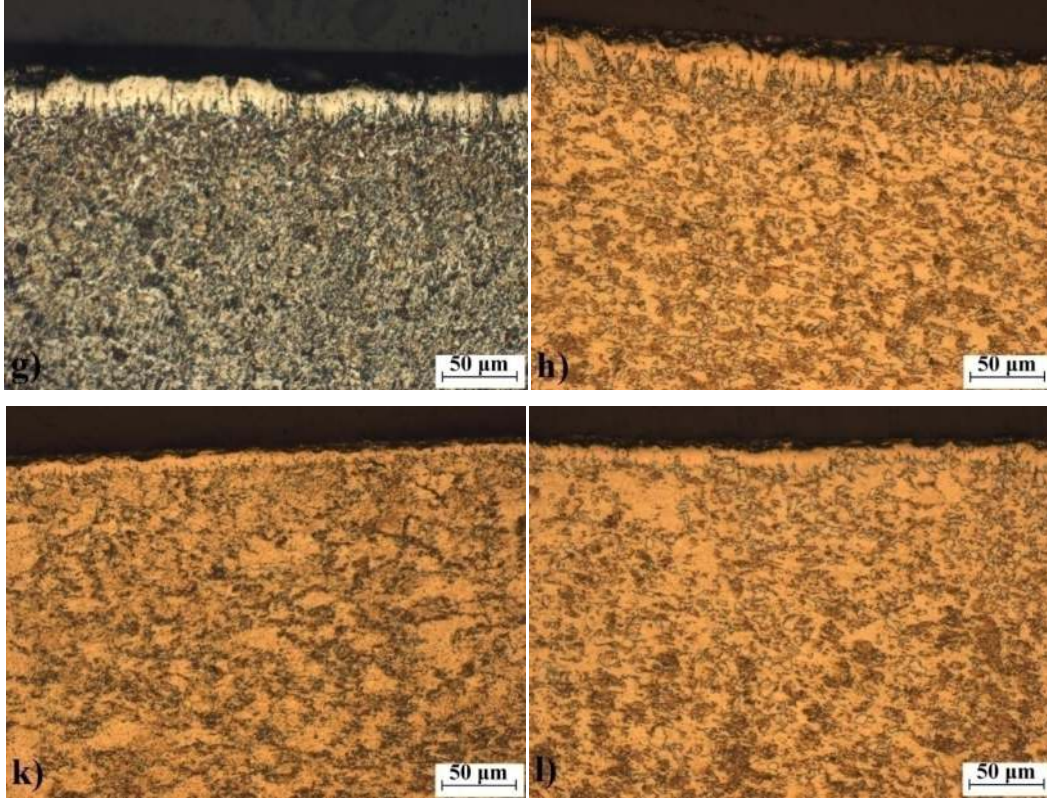
Şekil 6.1 (Devamı) 700-2h-6H şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı, a) $10B_2O_3$, b) $7B_2O_3+3SiC$, c) $7B_2O_3+3B_4C$, d) $3B_2O_3+7SiC$, e) $3B_2O_3+7B_4C$, f) $10B$, g) $7B+3SiC$, h) $7B+3B_4C$, k) $3B+7SiC$, l) $3B+7B_4C$

6.1.2 700-2h-6N Deney Şartlarında Yapılan PPB İşlemi

Şekil 6.2’de 700-2h farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı görülmektedir. 6H gaz karışımında olduğu gibi 6N gaz karışımında ve tüm pasta karışımlarında borür tabakasının oluştuğu görülmüştür. 6H gaz karışımına göre tabakaların tam anlamıyla testere dişli olmadığı düz bir yapı şeklinde oluştuğu görülmüştür.



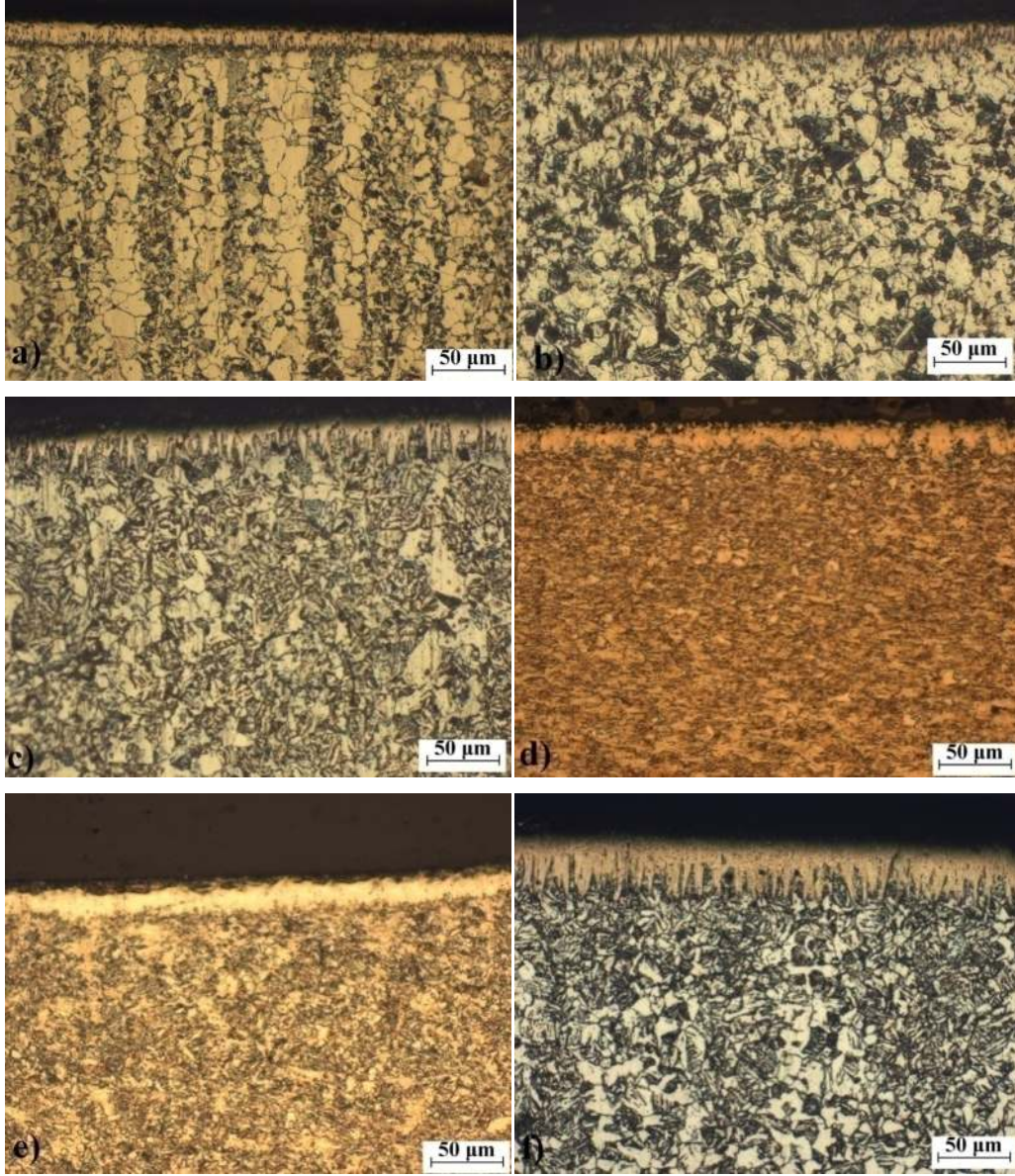
Şekil 6.2 700-2h-6N şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı, a) $10\text{B}_2\text{O}_3$, b) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{SiC}$, c) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{B}_4\text{C}$, d) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{SiC}$, e) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{B}_4\text{C}$, f) 10B , g) $7\text{B}+3\text{SiC}$, h) $7\text{B}+3\text{B}_4\text{C}$, k) $3\text{B}+7\text{SiC}$, l) $3\text{B}+7\text{B}_4\text{C}$



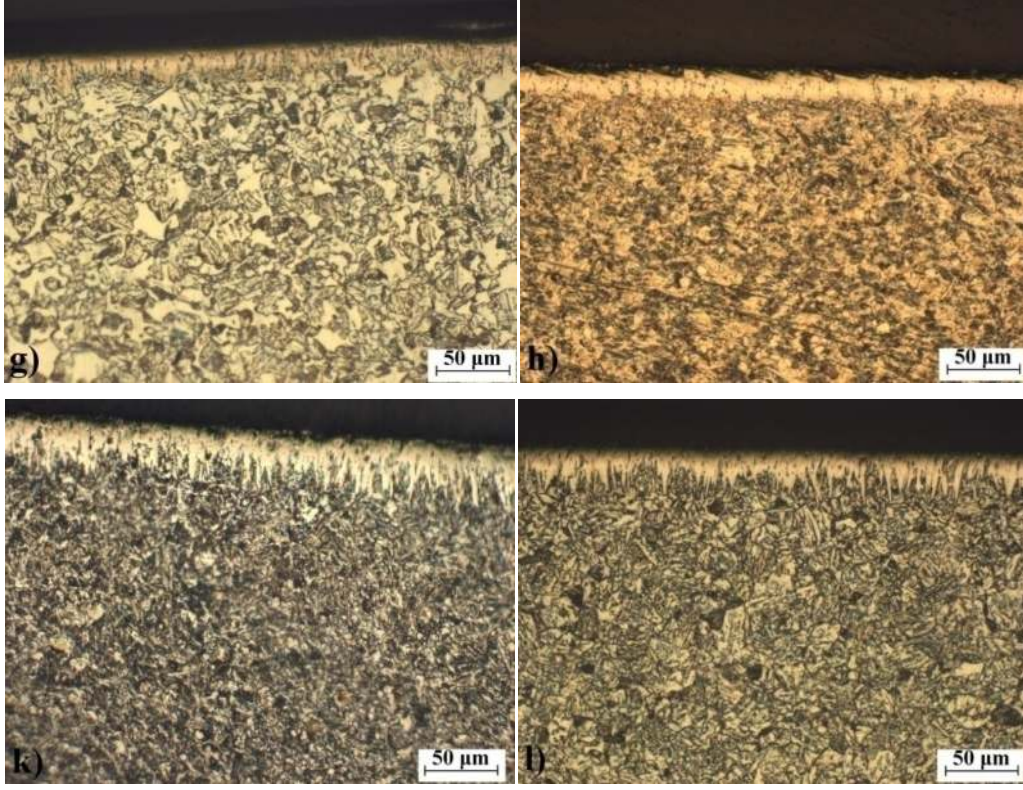
Şekil 6.2 (Devamı) 700-2h-6N şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı, a) $10B_2O_3$, b) $7B_2O_3+3SiC$, c) $7B_2O_3+3B_4C$, d) $3B_2O_3+7SiC$, e) $3B_2O_3+7B_4C$, f) $10B$, g) $7B+3SiC$, h) $7B+3B_4C$, k) $3B+7SiC$, l) $3B+7B_4C$

6.1.3 700-5h-6H Deney Şartlarında Yapılan PPB İşlemi

Şekil 6.3'te 6H gaz karışımında yapılan PPB sonucunda elde edilen borür tabakaları görülmektedir. $10B_2O_3$ numunesinde tabakanın daha ince olduğu, $3B_2O_3+7SiC$ ve $3B_2O_3+7B_4C$, $7B+3SiC$ ve $7B+3B_4C$ numunelerinde düz bir yapının, diğer numunelerde ise testere dişli yapının olduğu görülmüştür. 2 saatlik deneylerle karşılaştırıldıklarında sürenin artmasıyla daha kalın borür tabakalarının olduğu tespit edilmiştir (Bejar and Moreno 2006).



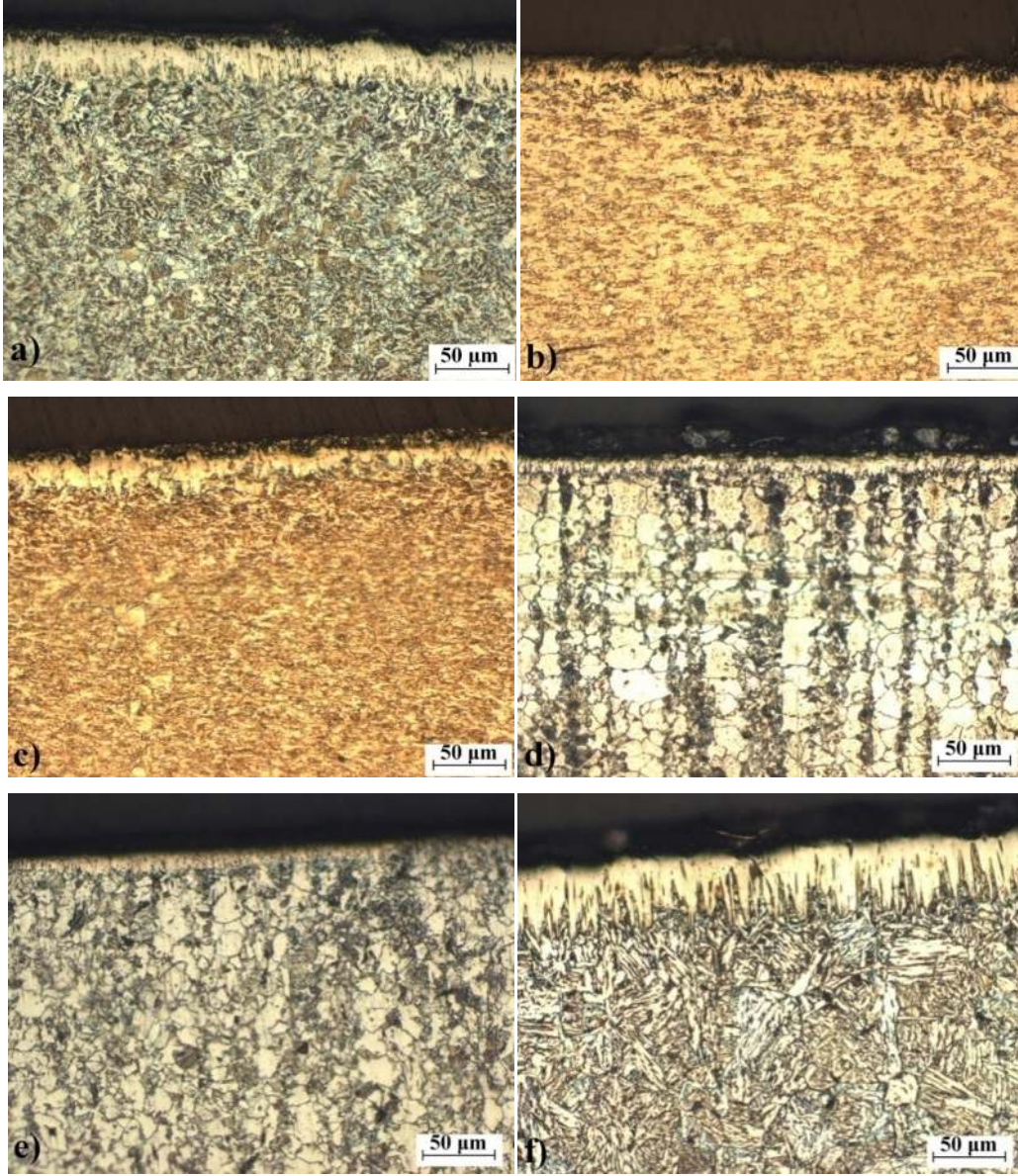
Şekil 6.3 700-5h-6H şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı, a) $10\text{B}_2\text{O}_3$, b) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{SiC}$, c) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{B}_4\text{C}$, d) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{SiC}$, e) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{B}_4\text{C}$, f) 10B , g) $7\text{B}+3\text{SiC}$, h) $7\text{B}+3\text{B}_4\text{C}$, k) $3\text{B}+7\text{SiC}$, l) $3\text{B}+7\text{B}_4\text{C}$



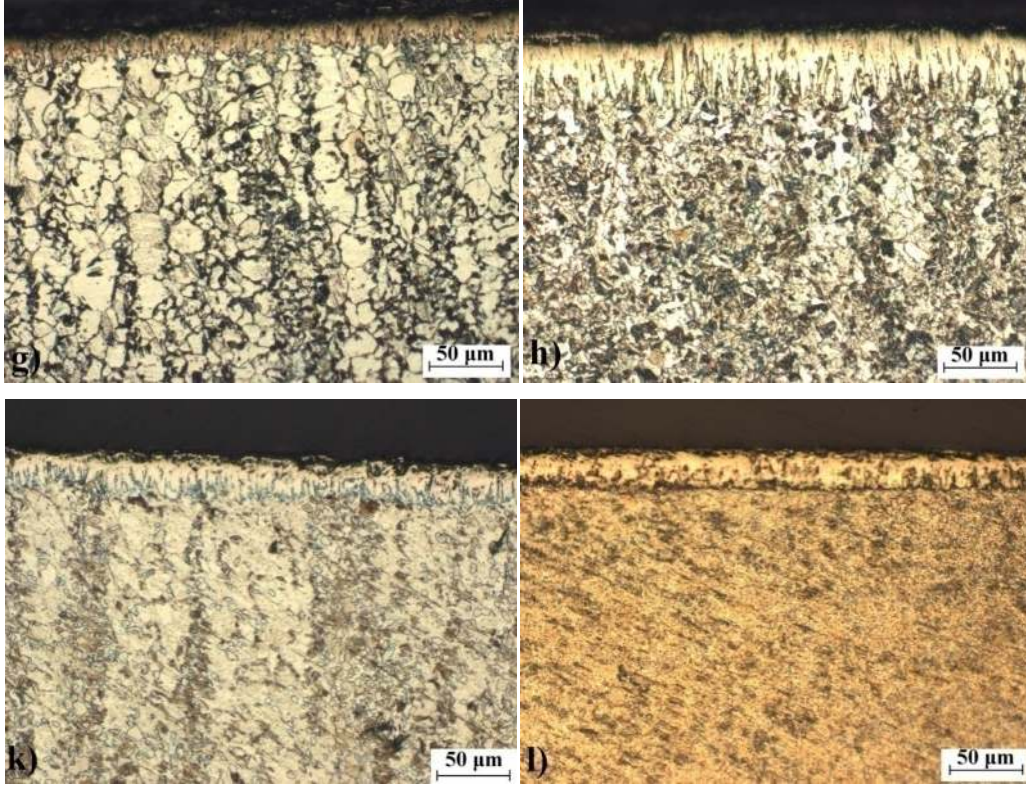
Şekil 6.3 (Devamı) 700-5h-6H şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı, a) $10\text{B}_2\text{O}_3$, b) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{SiC}$, c) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{B}_4\text{C}$, d) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{SiC}$, e) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{B}_4\text{C}$, f) 10B , g) $7\text{B}+3\text{SiC}$, h) $7\text{B}+3\text{B}_4\text{C}$, k) $3\text{B}+7\text{SiC}$, l) $3\text{B}+7\text{B}_4\text{C}$

6.1.4 700-5h-6N Deney Şartlarında Yapılan PPB İşlemi

Şekil 6.4'te 700-5h-6N şartlarında PPB sonucunda elde edilen borür tabakaları görülmektedir. Aynı sıcaklıkta sürenin artmasıyla birlikte borür tabakalarında artış gözlenmiştir.



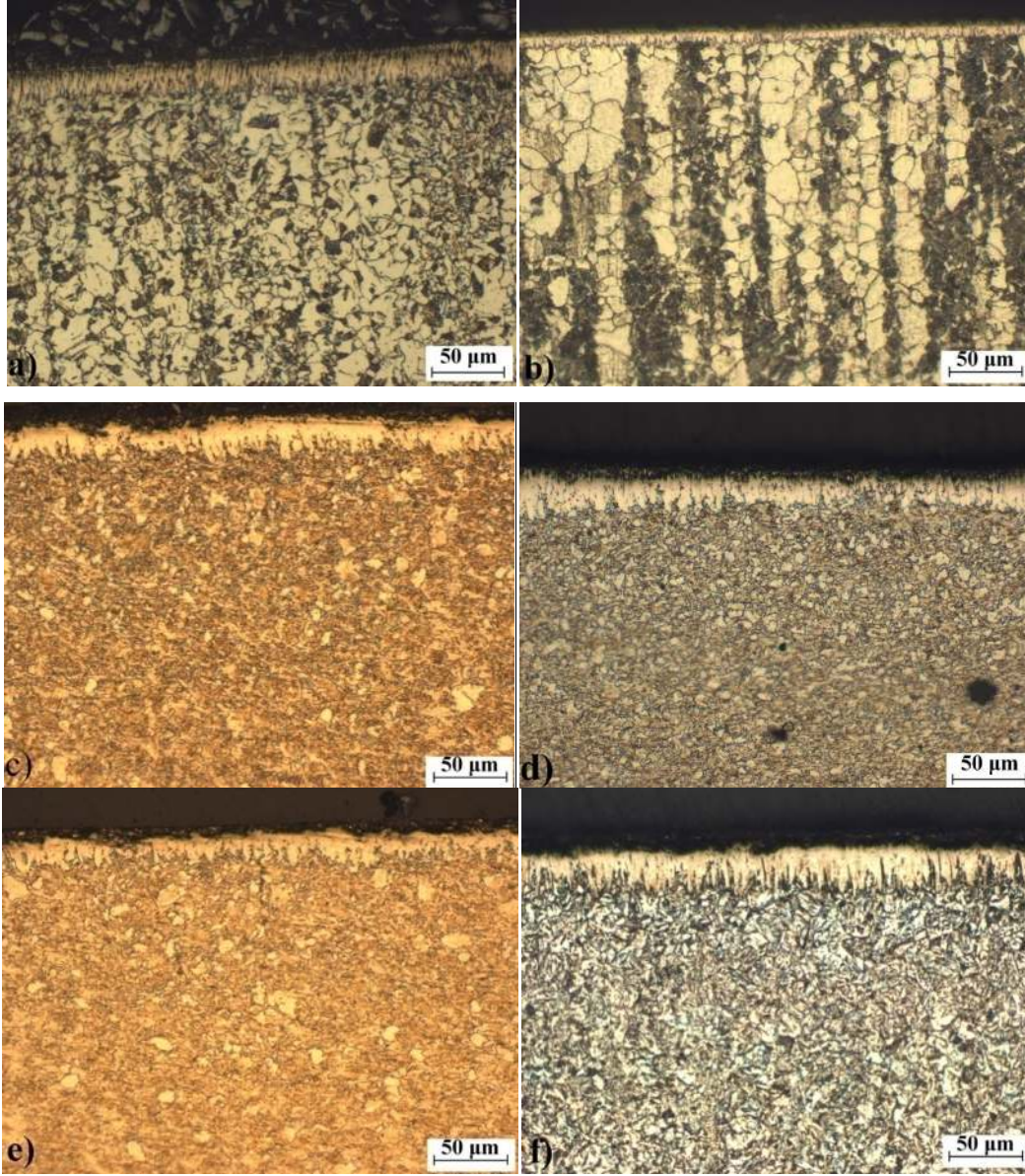
Şekil 6.4 700-5h-6N şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı, a) $10\text{B}_2\text{O}_3$, b) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{SiC}$, c) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{B}_4\text{C}$, d) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{SiC}$, e) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{B}_4\text{C}$, f) 10B , g) $7\text{B}+3\text{SiC}$, h) $7\text{B}+3\text{B}_4\text{C}$, k) $3\text{B}+7\text{SiC}$, l) $3\text{B}+7\text{B}_4\text{C}$



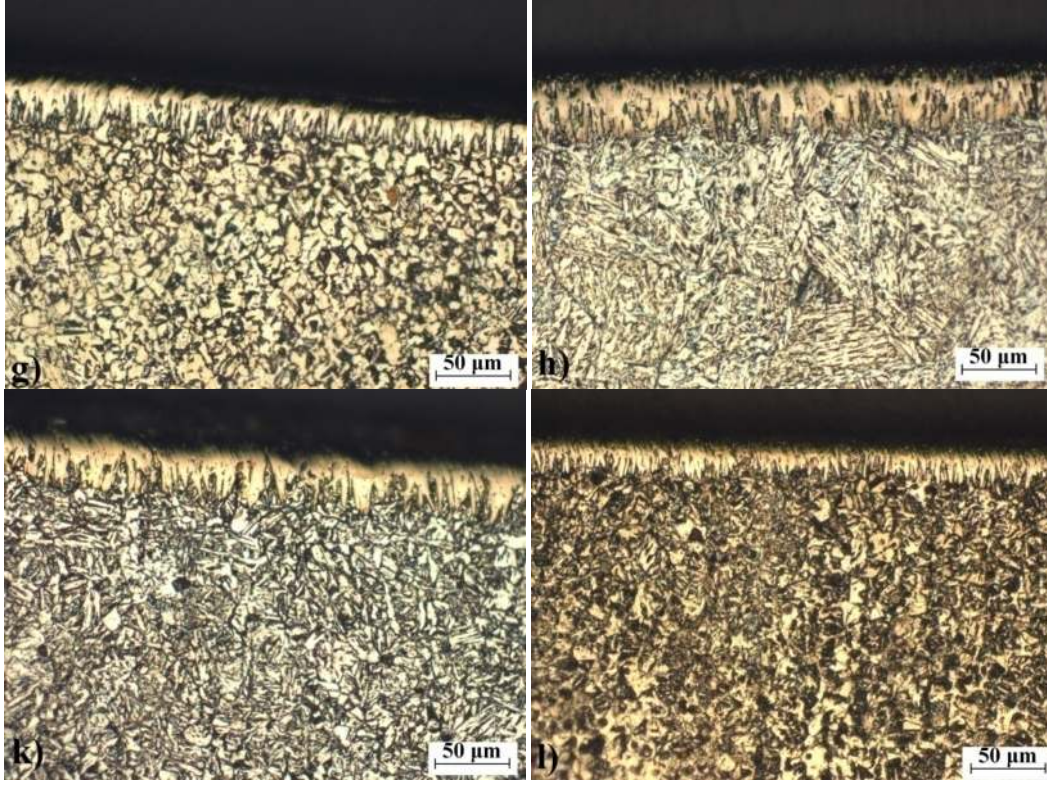
Şekil 6.4 (Devamı) 700-5h-6N şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı, a) $10\text{B}_2\text{O}_3$, b) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{SiC}$, c) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{B}_4\text{C}$, d) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{SiC}$, e) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{B}_4\text{C}$, f) 10B , g) $7\text{B}+3\text{SiC}$, h) $7\text{B}+3\text{B}_4\text{C}$, k) $3\text{B}+7\text{SiC}$, l) $3\text{B}+7\text{B}_4\text{C}$

6.1.5 800-2h-6H Deney Şartlarında Yapılan PPB İşlemi

Şekil 6.5'te 800-2h-6H deney şartlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi bor tabakaları testere dişli bir yapı halinde oluşmuştur (Uslu vd. 2007)..



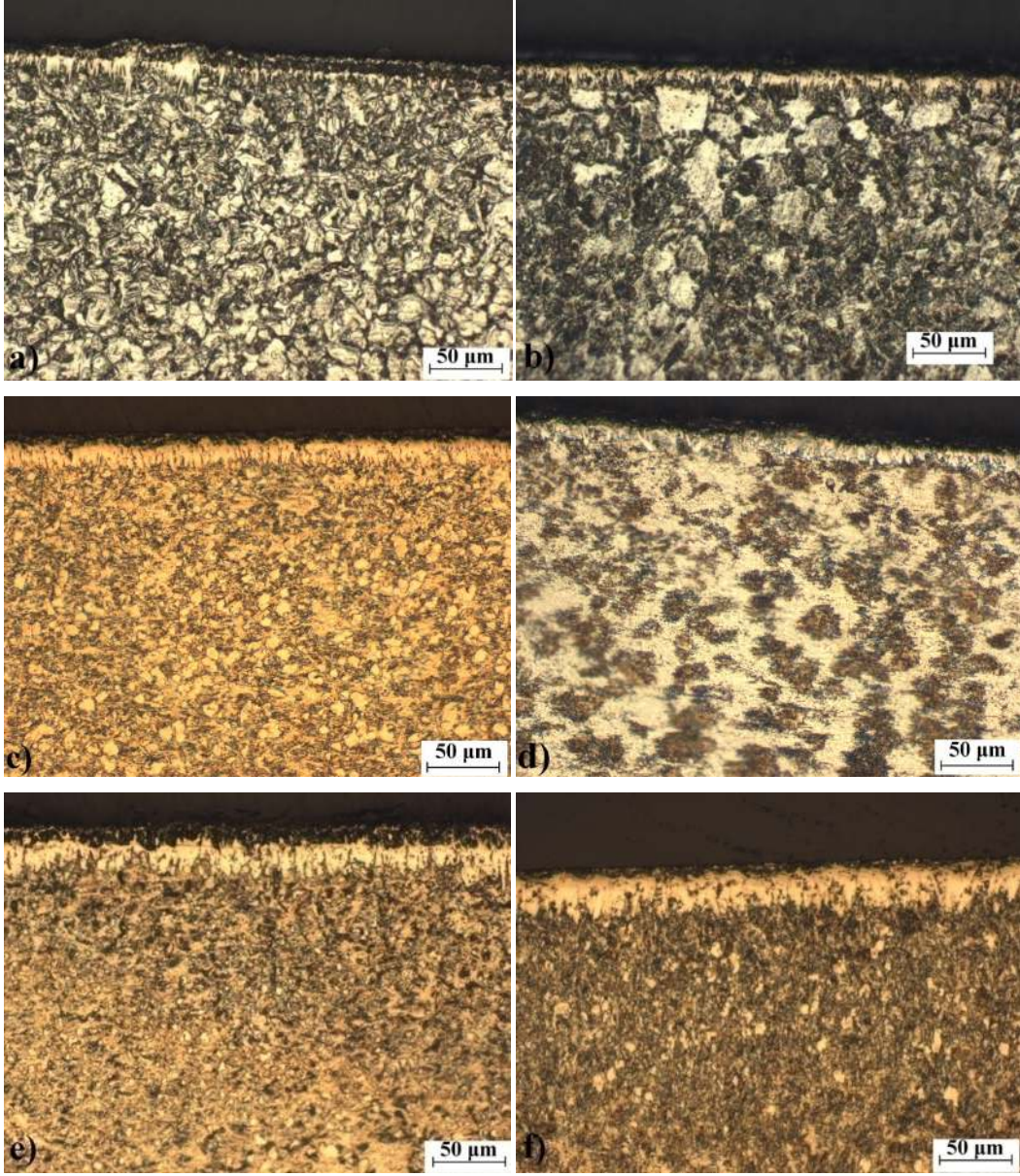
Şekil 6.5 800-2h-6H şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı, a) $10\text{B}_2\text{O}_3$, b) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{SiC}$, c) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{B}_4\text{C}$, d) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{SiC}$, e) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{B}_4\text{C}$, f) 10B , g) $7\text{B}+3\text{SiC}$, h) $7\text{B}+3\text{B}_4\text{C}$, k) $3\text{B}+7\text{SiC}$, l) $3\text{B}+7\text{B}_4\text{C}$



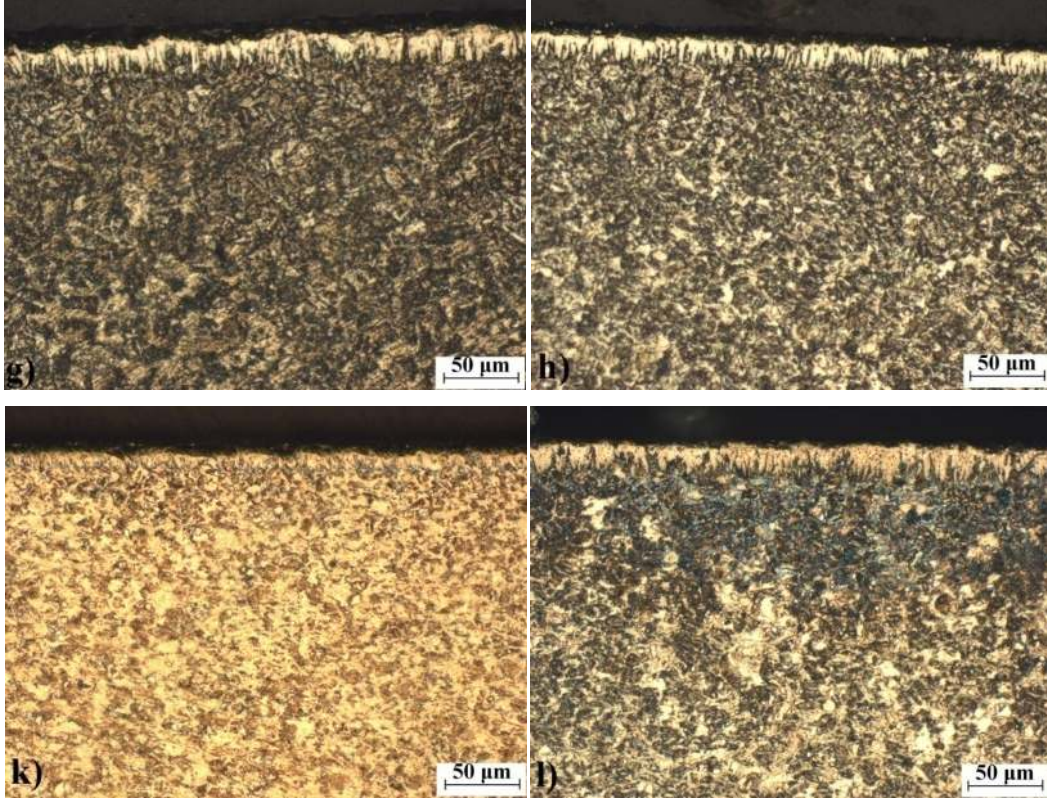
Şekil 6.5 (Devamı) 800-2h-6H şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı, a) $10\text{B}_2\text{O}_3$, b) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{SiC}$, c) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{B}_4\text{C}$, d) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{SiC}$, e) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{B}_4\text{C}$, f) 10B , g) $7\text{B}+3\text{SiC}$, h) $7\text{B}+3\text{B}_4\text{C}$, k) $3\text{B}+7\text{SiC}$, l) $3\text{B}+7\text{B}_4\text{C}$

6.1.6 800-2h-6N Deney Şartlarında Yapılan PPB İşlemi

Şekil 6.6'da 800-2h-6N şartlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı görülmektedir. Ortamdaki bor miktarının artmasıyla tabaka kalınlığında artış meydana geldiği görülmüştür.



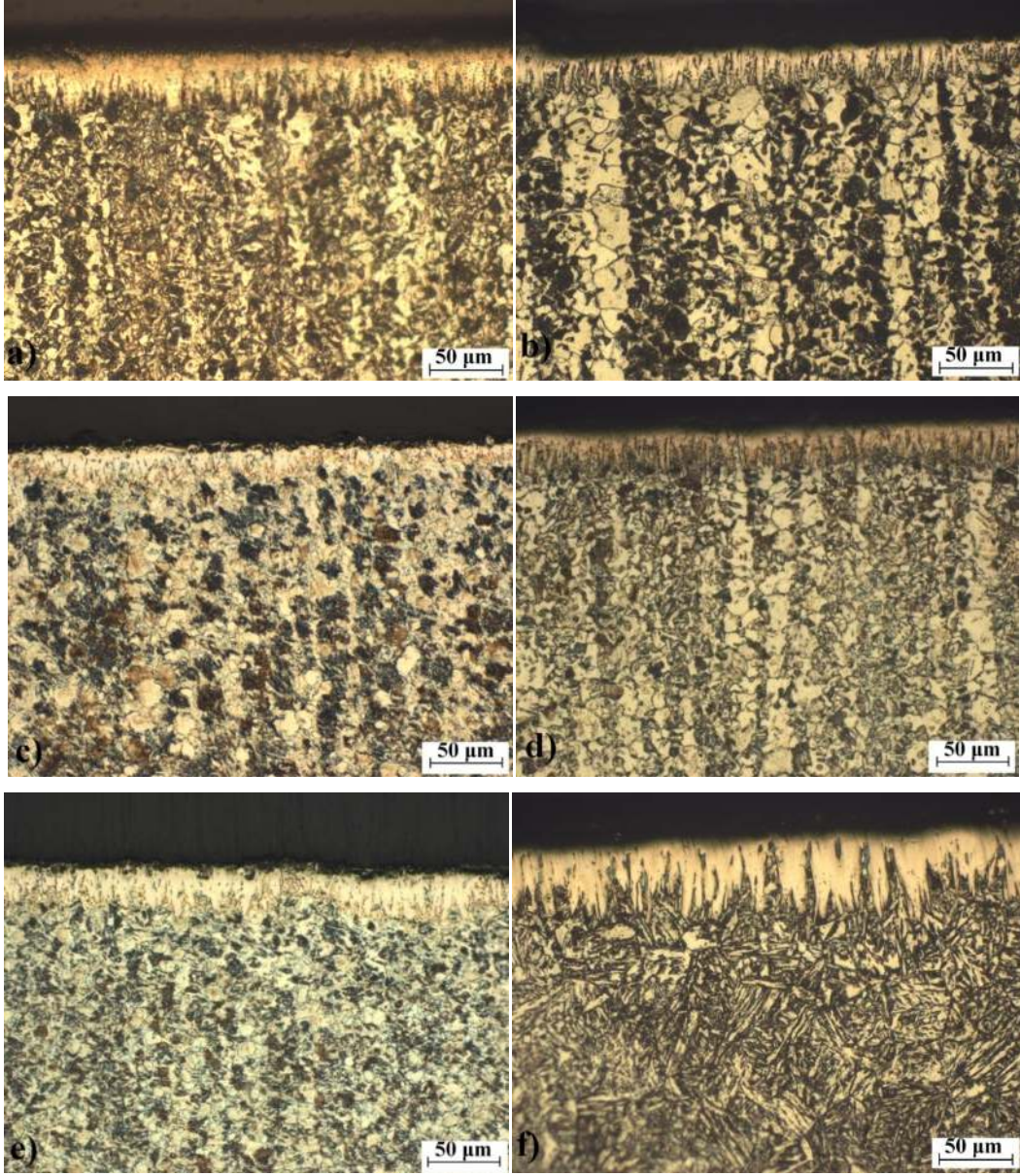
Şekil 6.6 800-2h-6N şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı, a) $10\text{B}_2\text{O}_3$, b) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{SiC}$, c) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{B}_4\text{C}$, d) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{SiC}$, e) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{B}_4\text{C}$, f) 10B , g) $7\text{B}+3\text{SiC}$, h) $7\text{B}+3\text{B}_4\text{C}$, k) $3\text{B}+7\text{SiC}$, l) $3\text{B}+7\text{B}_4\text{C}$



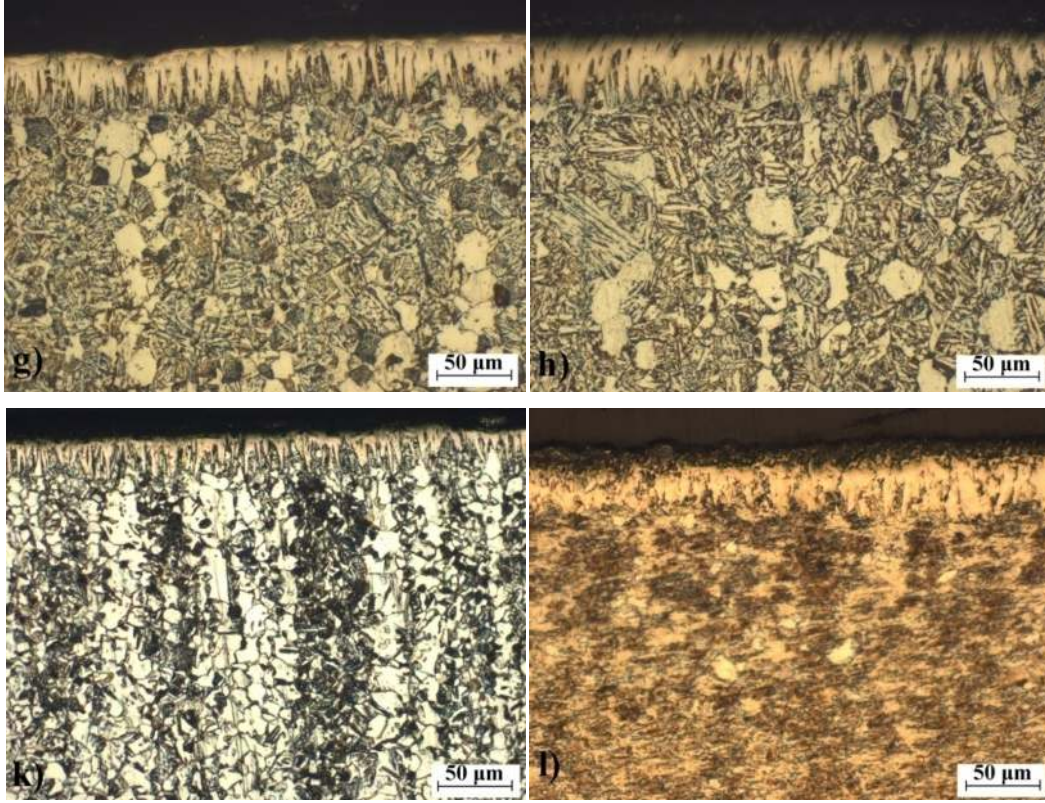
Şekil 6.6 (Devamı) 800-2h-6N şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı, a) $10\text{B}_2\text{O}_3$, b) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{SiC}$, c) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{B}_4\text{C}$, d) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{SiC}$, e) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{B}_4\text{C}$, f) 10B , g) $7\text{B}+3\text{SiC}$, h) $7\text{B}+3\text{B}_4\text{C}$, k) $3\text{B}+7\text{SiC}$, l) $3\text{B}+7\text{B}_4\text{C}$

6.1.7. 800-5h-6H Deney Şartlarında Yapılan PPB İşlemi

Şekil 6.7’de 800-5h-6H deney şartlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı görülmektedir. Sıcaklık ve sürenin artmasıyla tabaka kalınlıkları artmıştır.



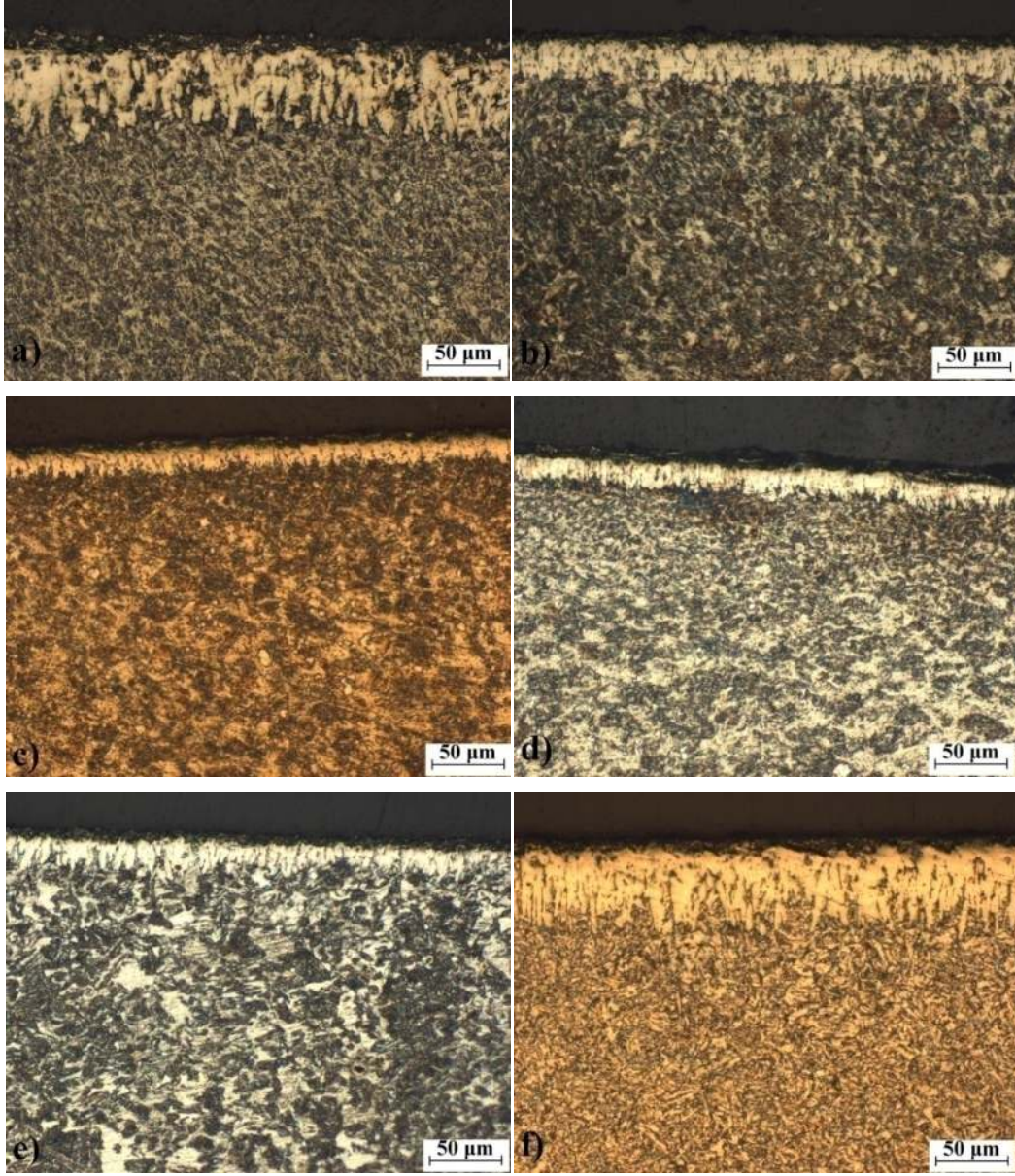
Şekil 6.7 800-5h-6H şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı, a) $10\text{B}_2\text{O}_3$, b) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{SiC}$, c) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{B}_4\text{C}$, d) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{SiC}$, e) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{B}_4\text{C}$, f) 10B , g) $7\text{B}+3\text{SiC}$, h) $7\text{B}+3\text{B}_4\text{C}$, k) $3\text{B}+7\text{SiC}$, l) $3\text{B}+7\text{B}_4\text{C}$



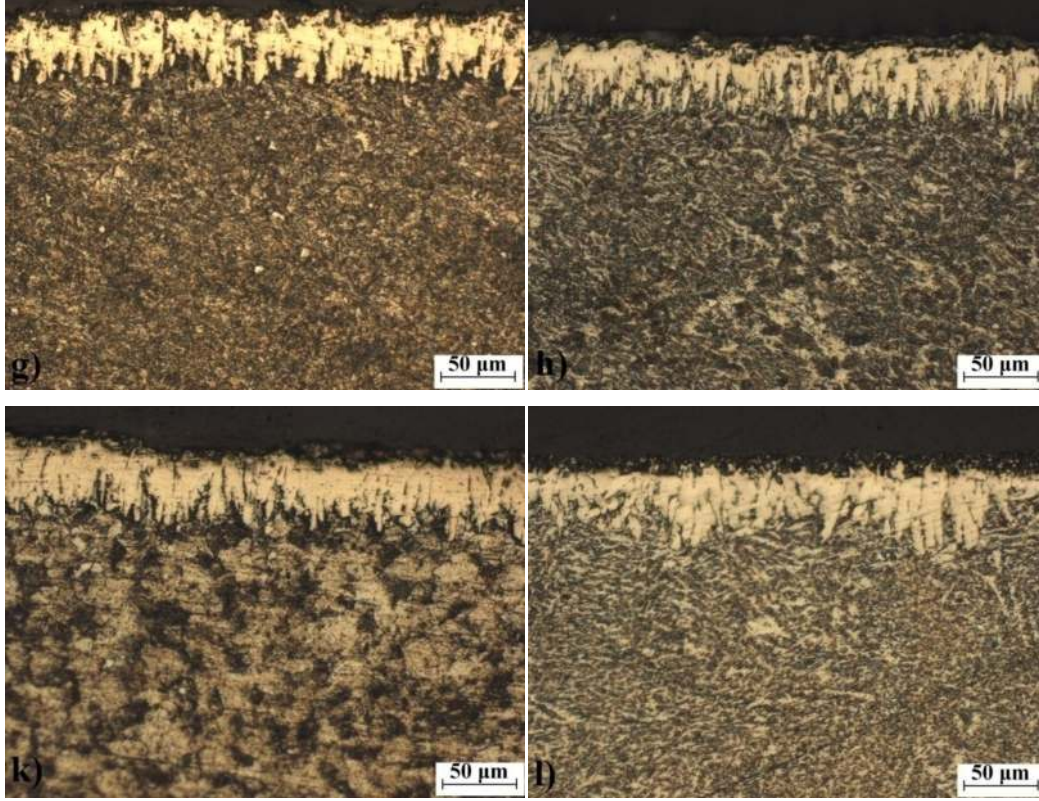
Şekil 6.7 (Devamı) 800-5h-6H şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı, a) $10B_2O_3$, b) $7B_2O_3+3SiC$, c) $7B_2O_3+3B_4C$, d) $3B_2O_3+7SiC$, e) $3B_2O_3+7B_4C$, f) $10B$, g) $7B+3SiC$, h) $7B+3B_4C$, k) $3B+7SiC$, l) $3B+7B_4C$

6.1.8 800-5h-6N Deney Şartlarında Yapılan PPB İşlemi

Şekil 6.8’de 800-5h-6N şartlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı görülmektedir. B_2O_3 pasta karışımlarına bakıldığında $10B_2O_3$ pastası haricindeki karışımlarda düz yapı, diğer karışımlarda ise testere dişi şeklinde oluşmuş borür tabakaları görülmektedir. B ve pasta karışımlarında ise testere dişi şeklinde borür tabakaları oluşmuştur.



Şekil 6.8 800-5h-6N şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı, a) $10\text{B}_2\text{O}_3$, b) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{SiC}$, c) $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{B}_4\text{C}$, d) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{SiC}$, e) $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{B}_4\text{C}$, f) 10B , g) $7\text{B}+3\text{SiC}$, h) $7\text{B}+3\text{B}_4\text{C}$, k) $3\text{B}+7\text{SiC}$, l) $3\text{B}+7\text{B}_4\text{C}$



Şekil 6.8 (Devamı) 800-5h-6N şartlarında farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin kesit mikroyapısı, a) $10B_2O_3$, b) $7B_2O_3+3SiC$, c) $7B_2O_3+3B_4C$, d) $3B_2O_3+7SiC$, e) $3B_2O_3+7B_4C$, f) 10B, g) $7B+3SiC$, h) $7B+3B_4C$, k) $3B+7SiC$, l) $3B+7B_4C$

6.1.9 Farklı Gaz Karışımlarında Elde Edilen Borür Tabaka Kalınlıkları

Çizelge 6.1’de farklı sıcaklık, süre ve gaz karışımında yapılan PPB sonucu elde edilen tabaka kalınlıkları verilmiştir. 6H karışımında 10B pastasıyla yapılan PPB sonucu, $10B_2O_3$ pastasıyla yapılan PPB’den daha kalın borür tabakası elde edilmiştir. Boraks pastasıyla daha kalın borür tabakası oluşmasının sebebi B_2O_3 pastasına oranla borlama ortamına daha fazla bor miktarı verildiğinden dolayıdır (Güneş 2010). B_2O_3 ergime sıcaklığı B’a göre daha düşük olduğu için tabaka kontrolü zorlaşmaktadır. B_2O_3 pasta içerisine SiC ve B_4C ilavesiyle B_2O_3 ’ün akıcılığı azaltılmış numune yüzeyinde daha üniform bir borür tabakası oluşturulmuştur. Ayrıca B içerisine SiC ve B_4C tozlarının katılması tabaka kalınlığında düşüşe yol açmasına rağmen bu tozların erime sıcaklığı B’a göre daha yüksek olduğundan işlem sonrası yüzey temizliğini kolaylaştırmakta ve işlemden sonra artık pasta veya cürufaların yüzeyden daha kolay kalkmasını sağlamaktadır (Güneş 2010). En yüksek borür tabakası kalınlığı 10B pastası ile 800-5h-

6H PPB sonucu 50 μm , en düşük tabaka 700-2h-6H-10B₂O₃ pastası ile PPB sonucu 8 μm olarak elde edilmiştir. Genel itibariyle B pastalarına B₄C ve SiC ilave edildiğinde tabaka kalınlığında düşüşler gözlenmiştir. B₄C ve SiC ilave edilmiş tabakalar kendi aralarında kıyaslandığında B₄C ilaveli pasta karışımları ile nispeten daha kalın tabakalar elde edilmiştir (Sviridov vd. 2010, Martini and Palombarini 2004)

Nam vd. (1998) 0,18 C lu düşük alaşımlı (SS41) çeliğini 800°C'de 1, 2 ve 4 saat süreyle borlamışlar ve sürenin artmasıyla tabaka kalınlığının arttığını tespit etmişlerdir.

6N gazı ile yapılan PPB sonucu elde edilen tabaka kalınlıklarına bakıldığında B pasta karışımlarıyla yapılan PPB'larda B₂O₃ pasta karışımlarıyla yapılan PPB'lardan daha kalın borür tabakası elde edilmiştir. En yüksek borür tabakası kalınlığı 10B pastası ile 800-5h-6N şartlarında PPB sonucu 60 μm , en düşük tabaka 700-2h-6N şartlarında 7B₂O₃+3B₄C pastası ile yapılan PPB sonucu 8 μm olarak elde edilmiştir. B ve B₂O₃ pastalarına B₄C ve SiC ilave edildiğinde tabaka kalınlığında düşüşler gözlenmiştir. B₄C ve SiC ilave edilmiş tabakalar kendi aralarında kıyaslandığında B₄C ilaveli pasta karışımları ile nispeten daha kalın tabakalar elde edilmiştir. Gaz karışım oranları kıyaslandığında 700-2h şartlarında PPB'larda azot miktarının artmasıyla 10B₂O₃ hariç diğer B₂O₃ pasta karışımlarında tabaka kalınlığı azalmıştır. 700-5h şartlarındaki PPB'larda azot miktarının artmasıyla 3B₂O₃ +7SiC, 7B₂O₃+3B₄C, 3B₂O₃ +7B₄C, 7B+3SiC, 3B+7B₄C pasta karışımlarında tabakalar azalmış, diğer pasta karışımlarda tabaka kalınlıkları artış göstermiştir. 800-2h şartlarında yapılan PPB'larda azot miktarının artmasıyla 10B₂O₃ hariç diğer B₂O₃ pasta karışımlarında tabaka kalınlığı azalmıştır. B pasta karışımlarında ise 7B+3B₄C ve 7B₄C+3B pastalarında tabaka kalınlığında azalma olmuştur. 800-5h şartlarında PPB'larda azot miktarının artmasıyla 3B₂O₃+7SiC, 3B₂O₃+7B₄C ve 7B+3B₄C pasta karışımlarında tabakaların kalınlığının azaldığı görülmüştür.

Yapılan çalışmalarda Çelebi vd. (2004) AISI 8620 (21NiCrMo2) çeliğini Ekabor-2 tozu ile açık atmosferli fırında, 950⁰C'de 2, 4, 6 ve 8 saat süreler ile borlamış ve işlem sonucunda numuneleri havada soğumaya bırakmışlardır. Elde edilen borür tabakasının yaklaşık kalınlıkları sırasıyla 80 μm , 130 μm , 190 μm ve 220 μm olarak bulmuşlardır.

Soydan (1996) AISI 8620 eliđini 800⁰C'de 2, 4, 8 ve 12 saat sürelerle ekabor-2 tozu ile kutu borlama yapmış ve borür tabaka kalınlıklarını sırasıyla 27±8, 40±12, 56±7, 73±13 μm elde etmiştir. PPB numunelerle karşılaştırıldığında 800-2h-6H-10B numunesinde 30 μm, 800-2h-6N-10B numunesinde 43 μm, 800-5h-6H-10B numunesinde 50 μm, 800-5h-6N-10B numunesinde 60 μm kalınlığında borür tabakaları elde edilmiştir. Buradan aynı sıcaklık ve sürelerde yapılan PPB ile kutu borlamaya göre daha kalın borür tabakası elde edilebileceği sonucu çıkmaktadır.

Çizelge 6.1 Farklı sıcaklık, süre ve gaz karışımlarında yapılan PPB sonucu elde edilen tabaka kalınlıkları

	6H gaz karışımı				6N gaz karışımı			
Pasta Karışımları	Tabaka Kalınlıkları (µm)				Tabaka Kalınlıkları (µm)			
	Sıcaklık (°C)				Sıcaklık (°C)			
	700		800		700		800	
	2h	5h	2h	5h	2h	5h	2h	5h
10B₂O₃	8	15	18	46	15	33	20	53
7B₂O₃ + 3SiC	15	18	24	32	13	26	18	34
7B₂O₃ + 3B₄C	16	23	23	30	8	18	22	30
3B₂O₃ + 7SiC	13	22	23	25	12	18	14	20
3B₂O₃ + 7B₄C	12	18	24	35	10	16	12	21
10B	16	48	30	50	20	50	43	60
7B+ 3SiC	13	30	24	34	18	21	28	47
7B+ 3B₄C	14	20	26	36	17	30	23	35
3B+ 7SiC	11	20	23	30	9	25	26	45
3B+ 7B₄C	20	32	22	33	10	28	21	40

6.2 Üç Farklı Gaz Karışımlarında X-Işınları Difraksiyon Analizi

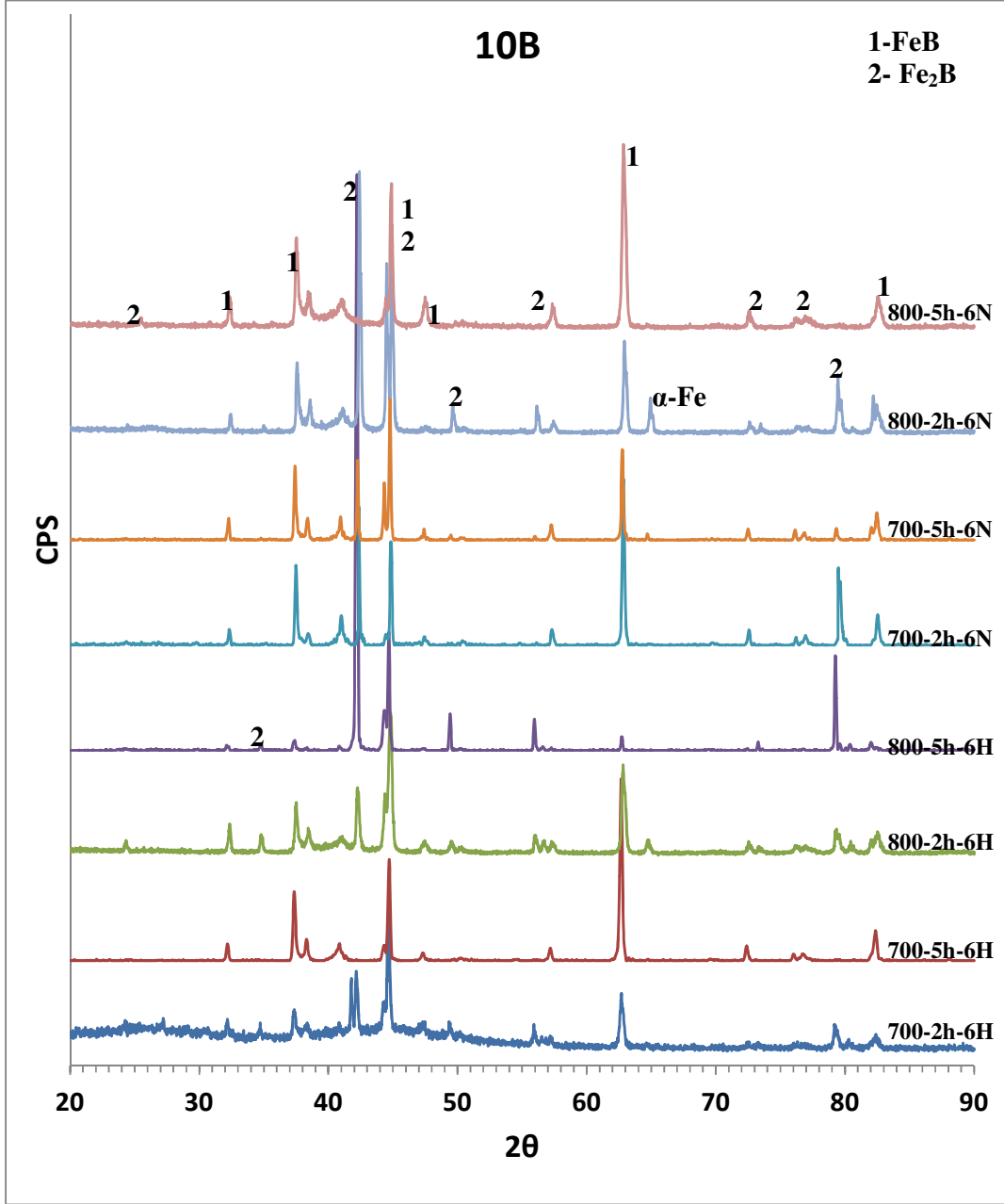
XRD patern çekimleri 6H ve 6N gaz karışımlarında farklı pasta karışımlarında 2 ve 5 saat sürelerde 700 ve 800°C’de PPB numunelere uygulanmıştır. X-ışını difraksiyon analizleri sonucunda numuneler üzerinde FeB, Fe₂B, B₂₅N fazları tespit edilmiştir. Maragoudakis vd. (2002) US 37-1 çeliğini 1000°C’de 8 saat süreyle borlamışlar ve ardından 500°C’de 18 saat süreyle gaz atmosferli bir fırında nitrülemişlerdir. Deney sonucunda borür tabakasının üzerinde Fe₄N ve B₂₅N fazlarının oluştuğunu tespit etmişlerdir.

6N gaz karışımında yapılan PPB sonucu elde edilen Fe₂B faz şiddetlerinin daha büyük ayrıca B₂₅N pik şiddetlerinin 6H gaz karışımına göre daha fazla olduğu görülmüştür. Borlama sıcaklığının artmasıyla birlikte Fe₂B fazının pik şiddetinde azalma meydana gelirken FeB fazı pik şiddetinde ise artış meydana gelmiştir (Özbek *et al.* 2002, Culha *et al.* 2008, Sahin *et al.* 2010).

Sviridov vd. (2010) saf demiri %70Na₂B₄O₇ + %30B₄C ve %70Na₂B₄O₇ + %30SiC karışımında 1000°C’de 0,5-18 saat sürelerle borlamışlardır. B₄C karışımlı deneylerde çift faz (FeB+Fe₂B) SiC karışımlı deneylerde tek faz Fe₂B oluşmuştur. Campos vd. (2008) AISI 1045 çeliği yüzeyine 4 mm kalınlığında B₄C pastası sürerek 850, 900, 850 ve 1000°C’de 8 saat süreyle borlama yapmışlardır. Borlamadan sonra Fe₂B fazının oluştuğunu tespit etmişlerdir.

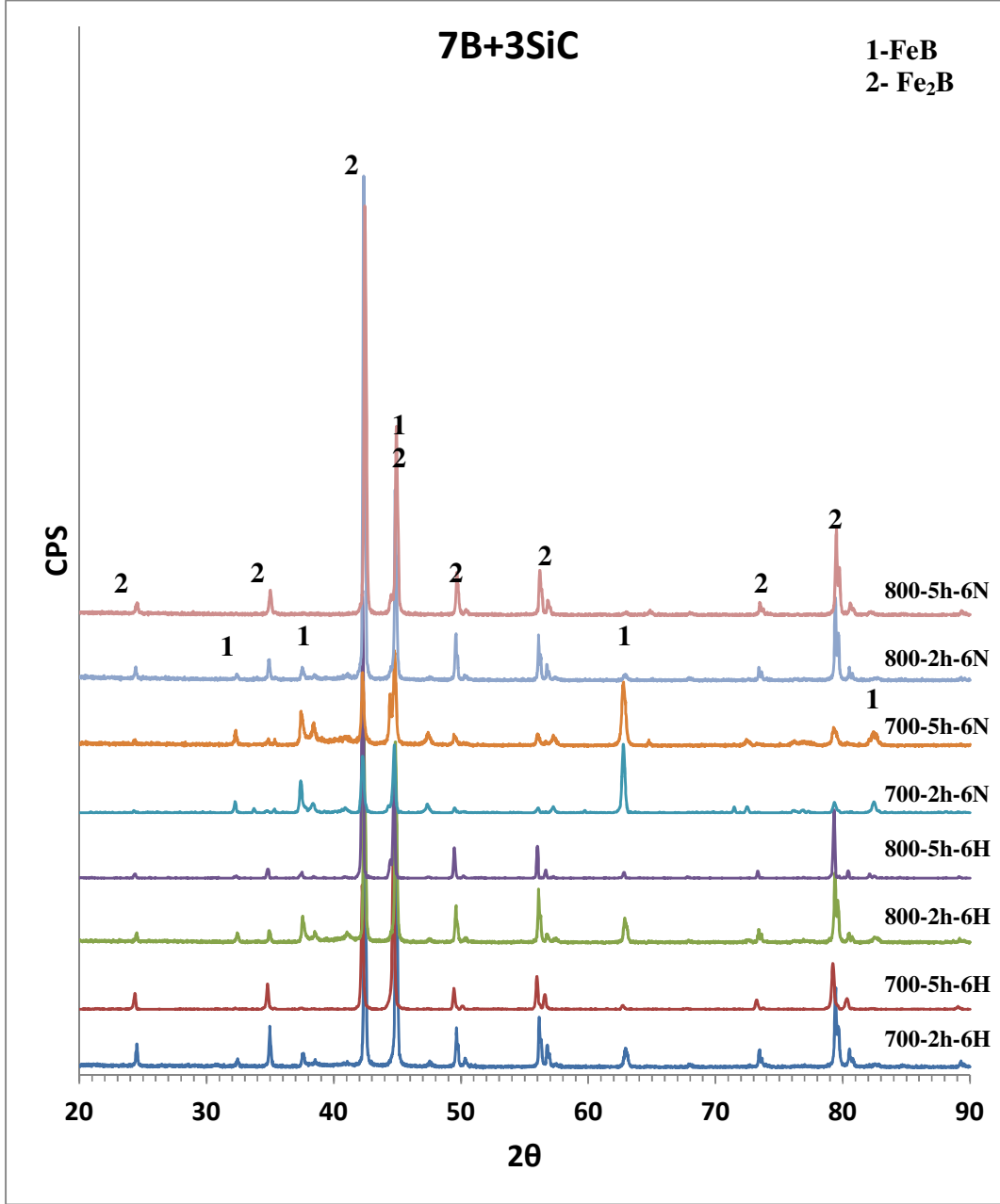
Şekil 6.9-6.18’de her bir pasta karışımları için farklı sıcaklık, süre ve gaz karışımlarında plazma pasta borlanan numunelerin XRD grafikleri çizilmiş ayrıca farklı pasta karışımlarının etkisini incelemek amacıyla PPB numunelerin toplu halde XRD grafikleri de çıkarılmıştır.

Şekil 6.9’da farklı sıcaklık ve sürelerde 10B pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri görülmektedir. FeB ve Fe₂B fazları tespit edilmiştir. Yaklaşık 2θ=38 derecedeki FeB fazları 6N gaz karışımında yapılan PPB’larda daha şiddetli oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.9 Farklı sıcaklık ve sürelerde 10B pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri

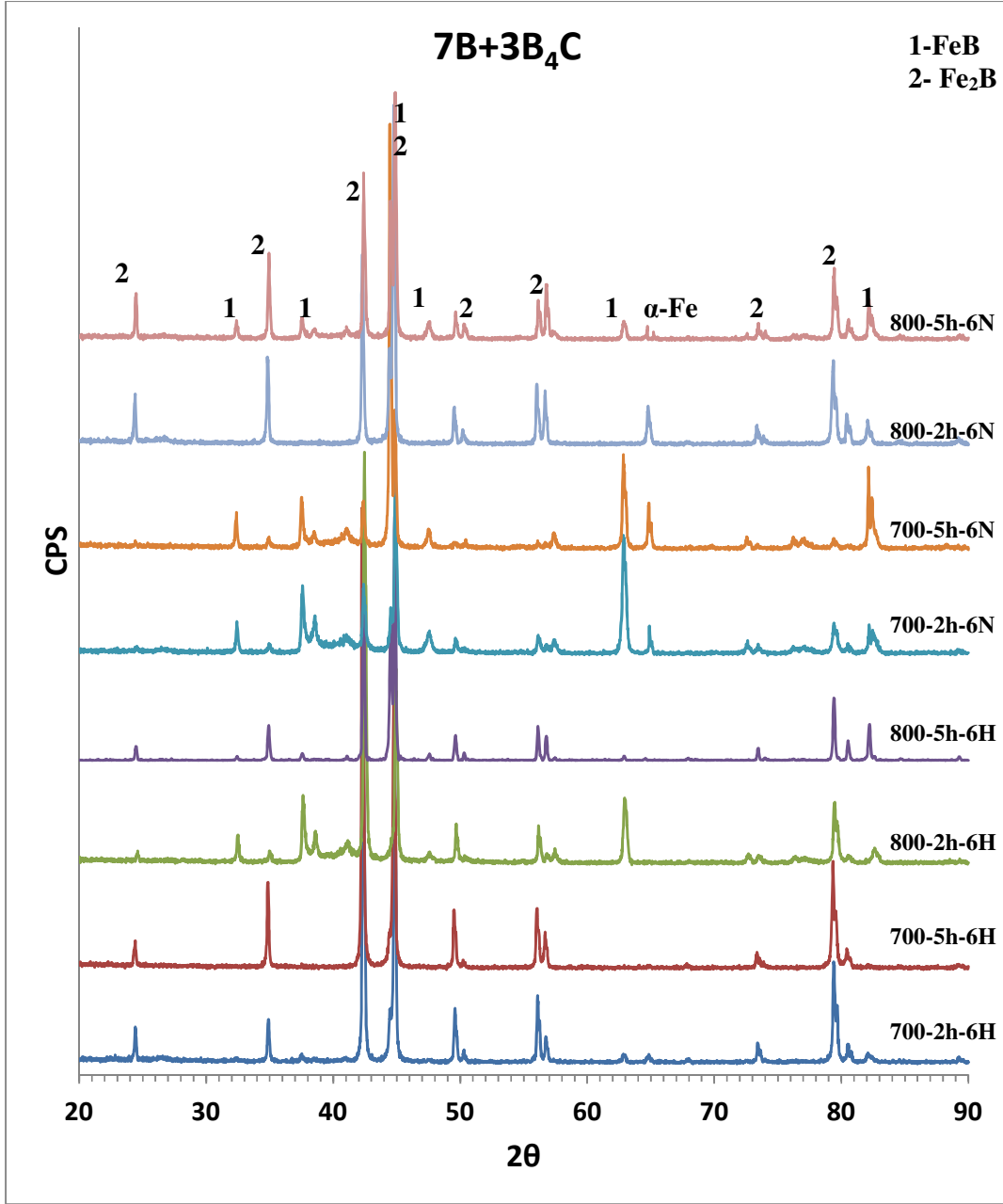
Şekil 6.10'da farklı sıcaklık ve sürelerde 7B+3SiC pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri görülmektedir. B pastasıyla yapılan PPB'ya oranla FeB piklerinin azaldığı görülmektedir. 800-5h-6N numunesi yüzeyinde tek fazlı Fe₂B tabakasının oluştuğu görülmüştür.



Şekil 6.10 Farklı sıcaklık ve sürelerde 7B+3SiC pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri

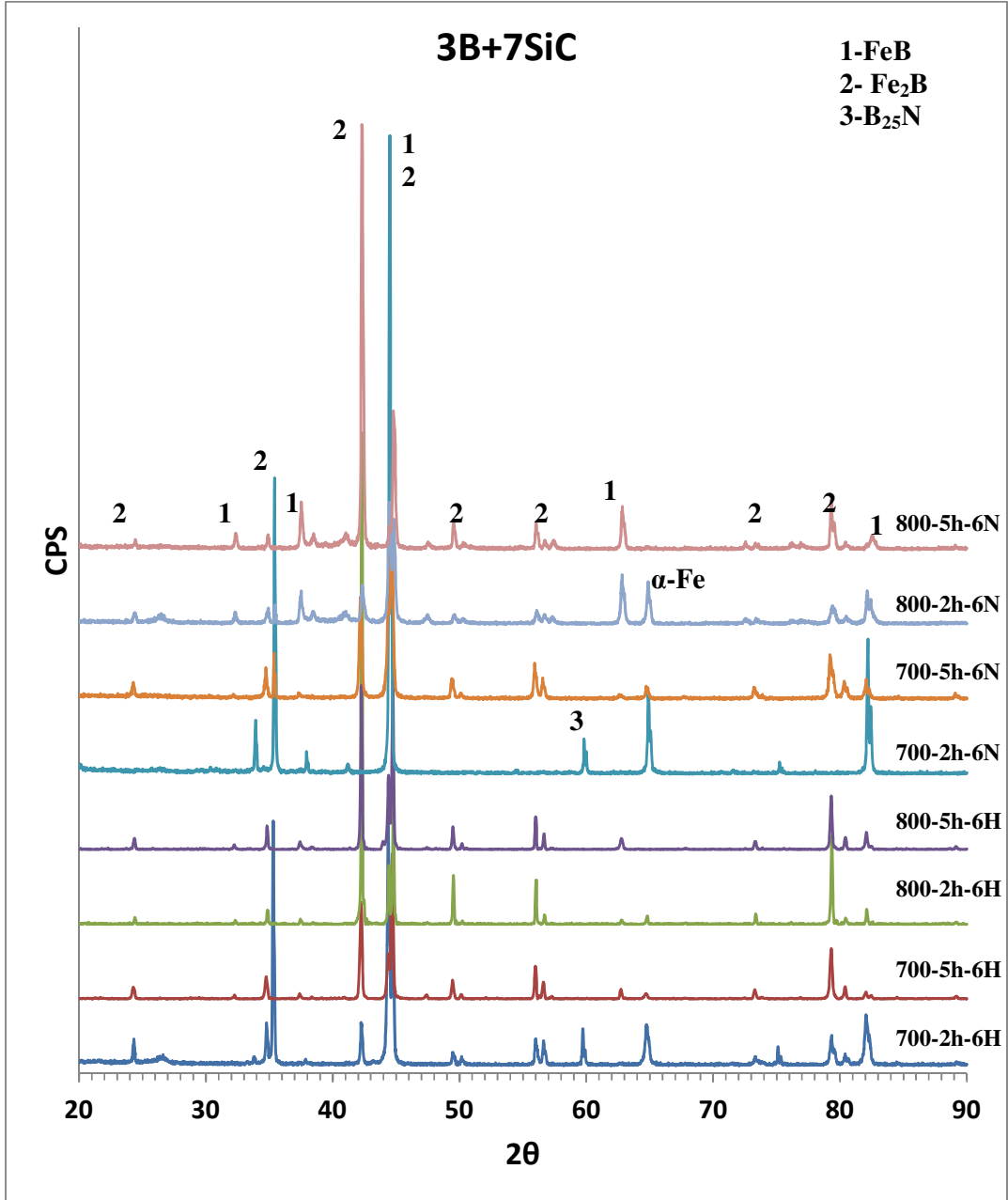
Şekil 6.11’de farklı sıcaklık ve sürelerde 7B+3B₄C pastası ile plazma pasta borlanmış AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri görülmektedir. 6H karışımında yapılan PPB’larda 2θ=65 derecede α-Fe piki görülmezken 6N gaz karışımında yapılan plazma pasta

borlamalarda $2\theta=65$ derecede α -Fe piki görülmüştür. 700-5h-6H numunesinin yüzeyinde tek fazlı Fe_2B tabakasının oluştuğu görülmüştür.



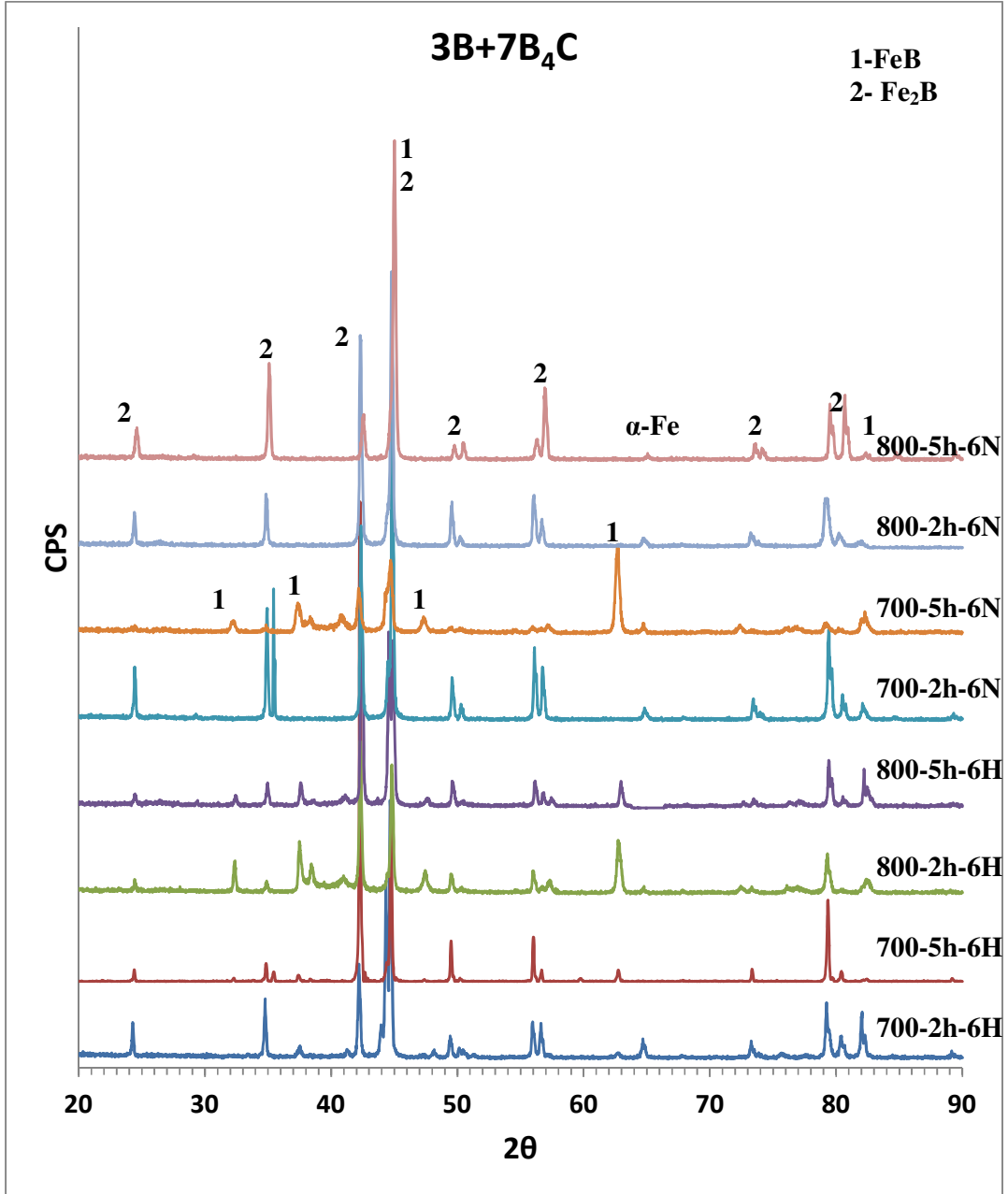
Şekil 6.11 Farklı sıcaklık ve sürelerde 7B+3B₄C pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri

Şekil 6.12’de farklı sıcaklık ve sürelerde 3B+7SiC pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri görülmektedir. 700°C sıcaklıkta her iki gaz karışımında da PPB numunelerin XRD analizlerine bakıldığında yaklaşık $2\theta=60$ derecede $B_{25}N$ fazının oluştuğu görülmektedir.



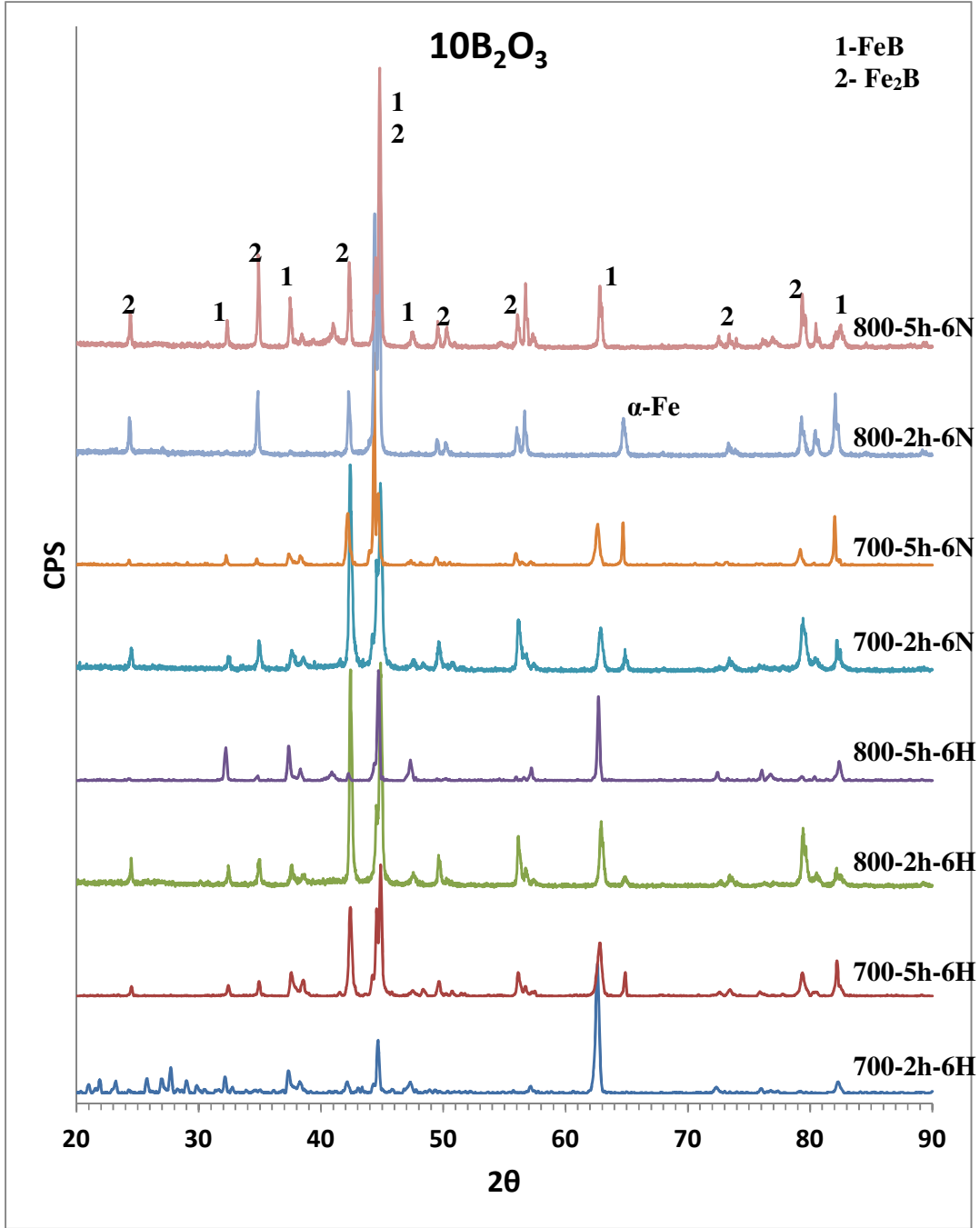
Şekil 6.12 Farklı sıcaklık ve sürelerde 3B+7SiC pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri

Şekil 6.13'te farklı sıcaklık ve sürelerde 3B+7B₄C pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri görülmektedir. Şekle bakıldığında 6H gaz karışımında tüm sıcaklık ve sürelerde yaklaşık 2θ=63 derecede oluşan FeB piki, 6N gaz karışımında sadece 700-5h PPB sonucunda ortaya çıktığı görülmüştür.



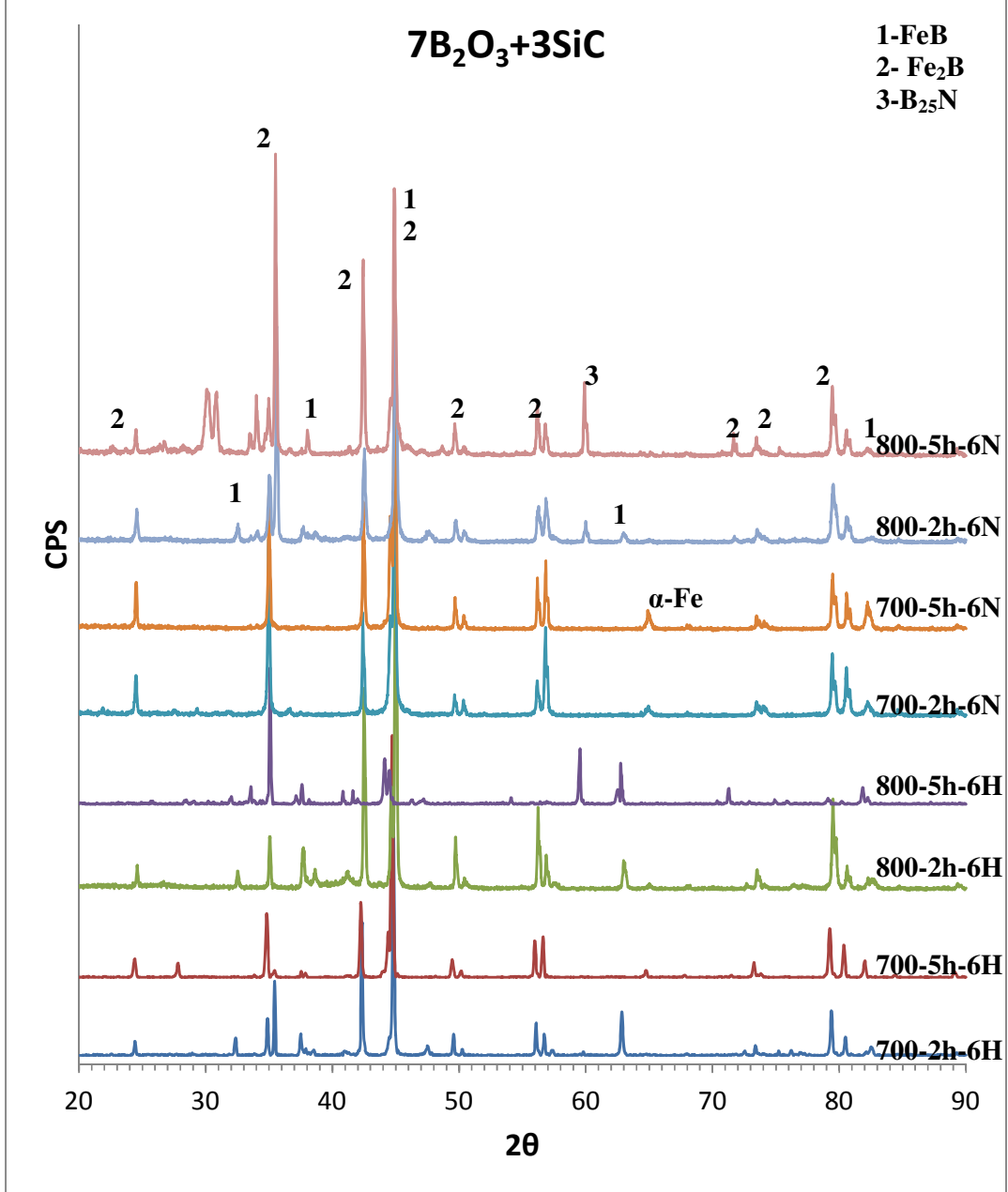
Şekil 6.13 Farklı sıcaklık ve sürelerde 3B+7B₄C pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri

Şekil 6.14'te farklı sıcaklık ve sürelerde $10\text{B}_2\text{O}_3$ pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri görülmektedir. FeB ve Fe_2B fazları tespit edilmiştir. 6N gaz karışımında 800°C 'de yapılan deneylerin XRD sonuçlarına bakıldığında diğer gaz karışımına oranla yaklaşık $2\theta=35$ dereceki Fe_2B pikinin daha şiddetli olduğu görülmektedir.



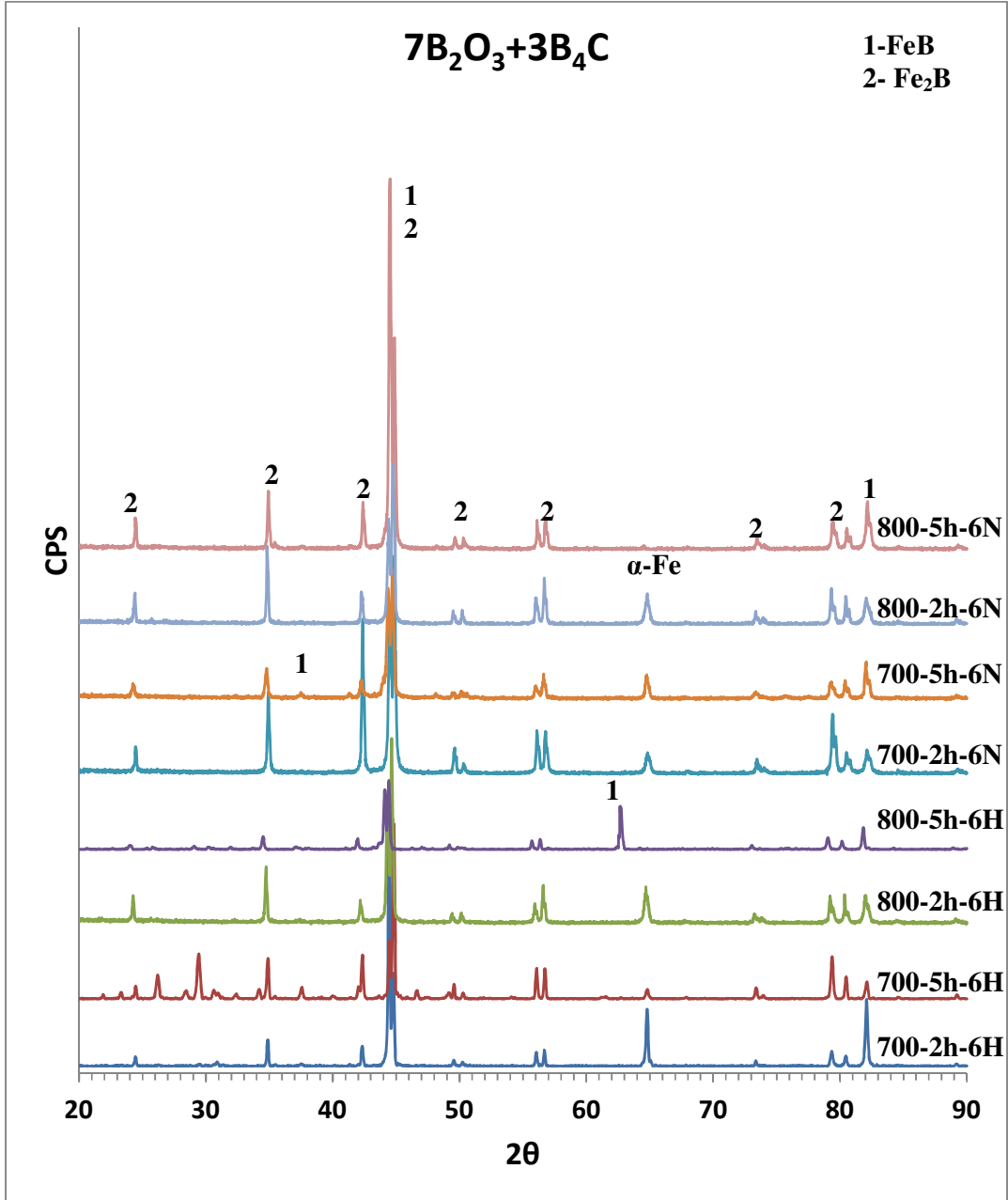
Şekil 6.14 Farklı sıcaklık ve sürelerde $10\text{B}_2\text{O}_3$ pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri

Şekil 6.15'te farklı sıcaklık ve sürelerde $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{SiC}$ pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri görülmektedir. Her iki gaz karışımında 800-5h süreyle yapılan deneyler sonucunda B_{25}N fazı tespit edilmiştir.



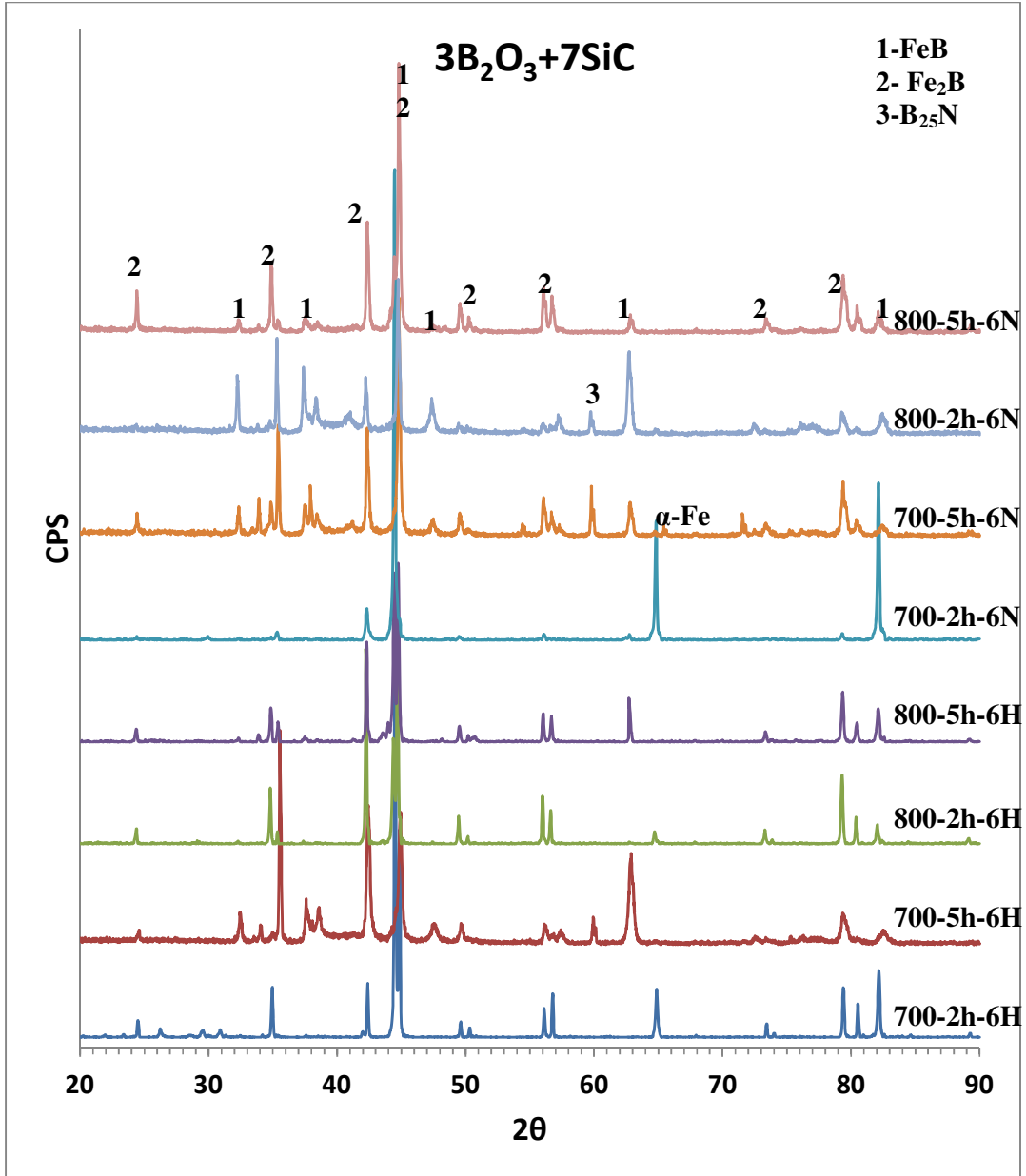
Şekil 6.15 Farklı sıcaklık ve sürelerde $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{SiC}$ pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri

Şekil 6.16'da farklı sıcaklık ve sürelerde $7B_2O_3+3B_4C$ pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri görülmektedir. Deneyler sonucunda FeB ve Fe_2B fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Her iki pasta karışımında da 800-5h süreyle yapılan deneyler haricindeki sıcaklık ve sürelerde α -Fe piki tespit edilmiştir.



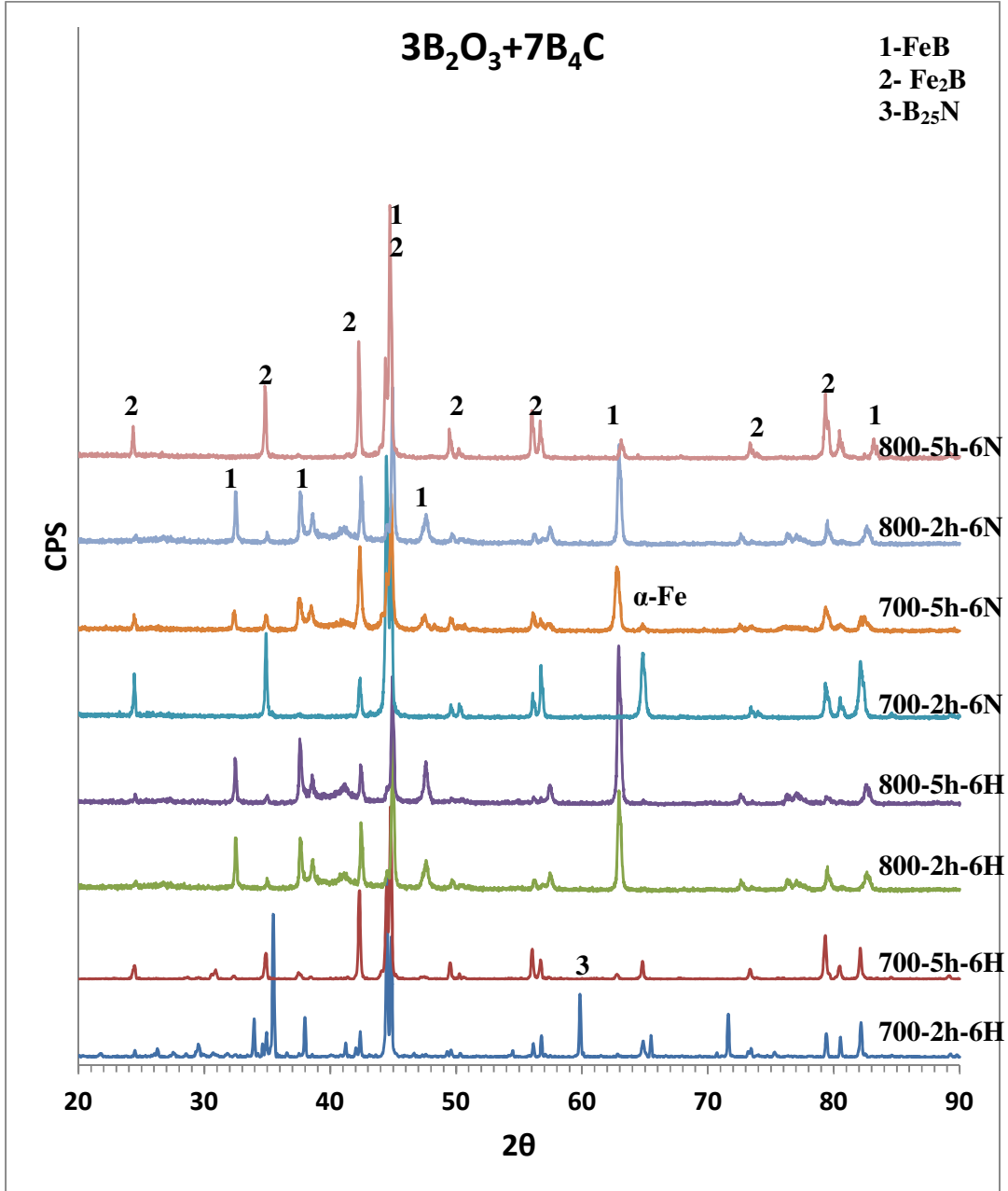
Şekil 6.16 Farklı sıcaklık ve sürelerde $7B_2O_3+3B_4C$ pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri

Şekil 6.17’de farklı sıcaklık ve sürelerde $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{SiC}$ pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri görülmektedir. Her iki gaz karışımında 700-5h süreyle ve 800-2h süreyle 6N gaz karışımında yapılan PPB’lar neticesinde B_{25}N fazının oluştuğu tespit edilmiştir. 6N gaz karışımlarında 700-2h hariç diğer sıcaklık ve sürelerde yaklaşık $2\theta=39$ derecede FeB fazı oluşmuştur. 6H gaz karışımlarında 700-2h ve 800-2h deneyleri sonrası $2\theta=65$ derecede $\alpha\text{-Fe}$ piki görülürken, sürenin artmasıyla beraber $\alpha\text{-Fe}$ yok olmuştur.



Şekil 6.17 Farklı sıcaklık ve sürelerde $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{SiC}$ pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri

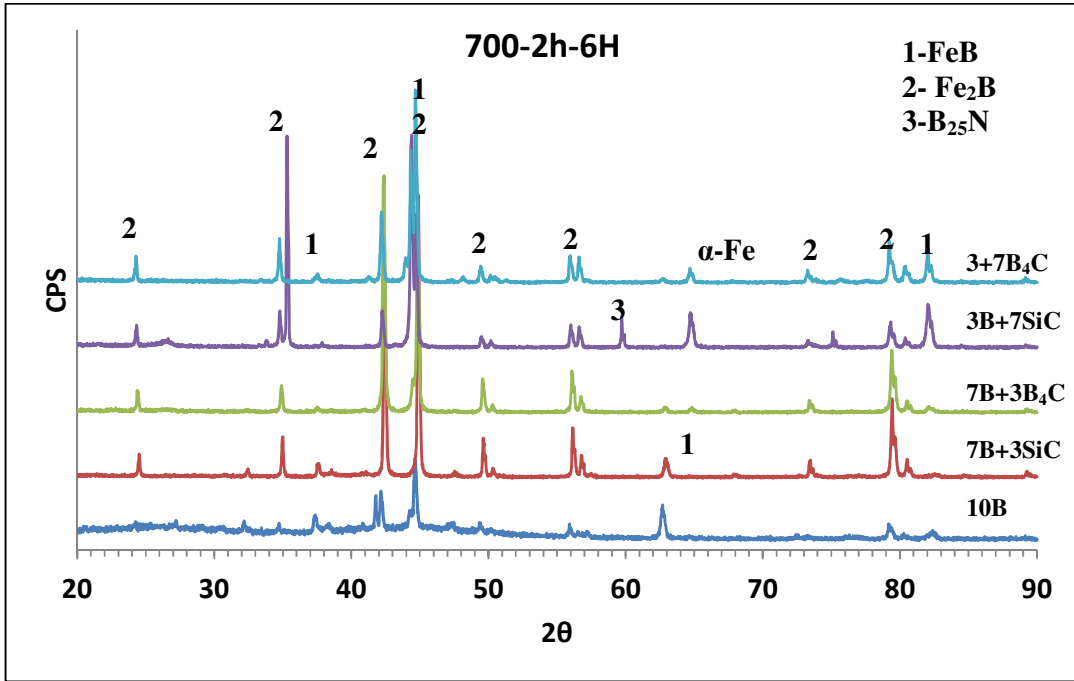
Şekil 6.18’de farklı sıcaklık ve sürelerde $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{B}_4\text{C}$ pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri görülmektedir. 700-2h süreyle 6H gaz karışımında PPB sonucunda FeB, Fe_2B ve B_{25}N fazının oluştuğu tespit edilmiştir. Diğer sıcaklık ve sürelerde FeB ve Fe_2B fazlarının oluştuğu görülmektedir.



Şekil 6.18 Farklı sıcaklık ve sürelerde $3\text{B}_2\text{O}_3+7\text{B}_4\text{C}$ pastası ile PPB AISI 8620 çeliğine ait XRD paternleri

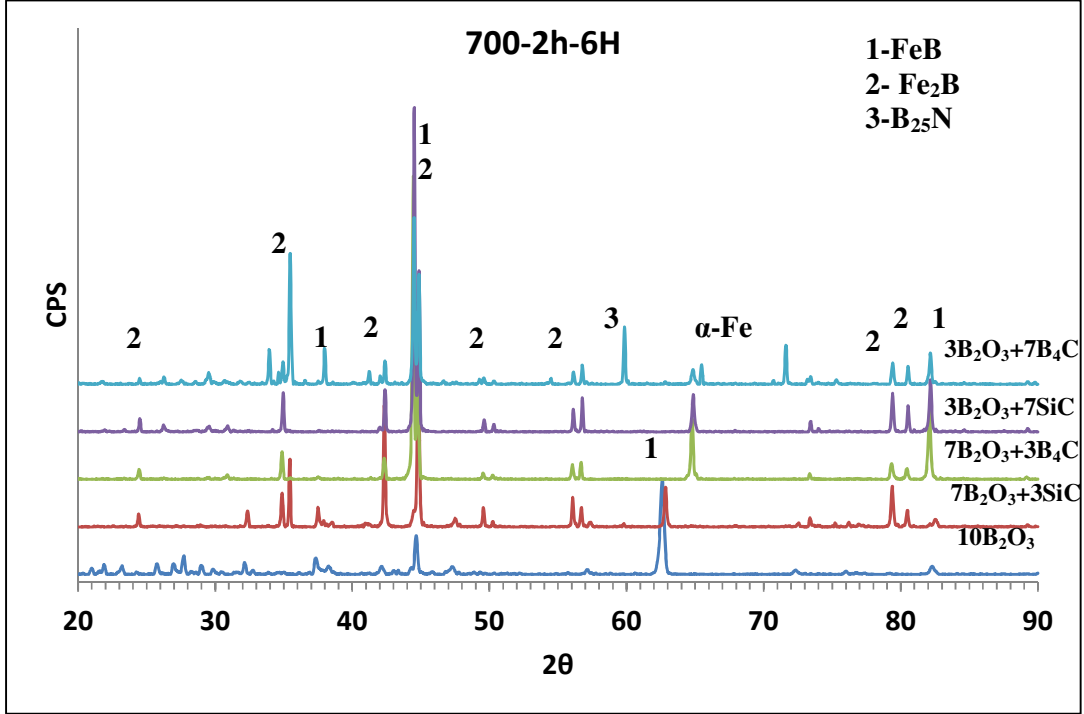
6.2.1 700-2h-6H PPB işlemi XRD analizleri

Şekil 6.19'da 700-2h-6H-B pasta ve karışımlarında PPB çeliklerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. Şekle bakıldığında 7B + 3SiC karışımında pik şiddetlerinin daha büyük olduğu görülmektedir. Baskın faz olarak Fe_2B görülmekte fakat az da olsa FeB fazı tespit edilmiştir. 10B ve 7B + 3SiC pasta karışımlarında FeB fazı daha fazla miktarda oluşmuştur. Ayrıca 3B+7B₄C ve 3B+7SiC pasta karışımlarında $2\theta=65$ derecede $\alpha\text{-Fe}$ tespit edilmiştir ve 3B+7SiC pasta karışımında B₂₅N fazı tespit edilmiştir.



Şekil 6.19 700-2h-6H-B pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri

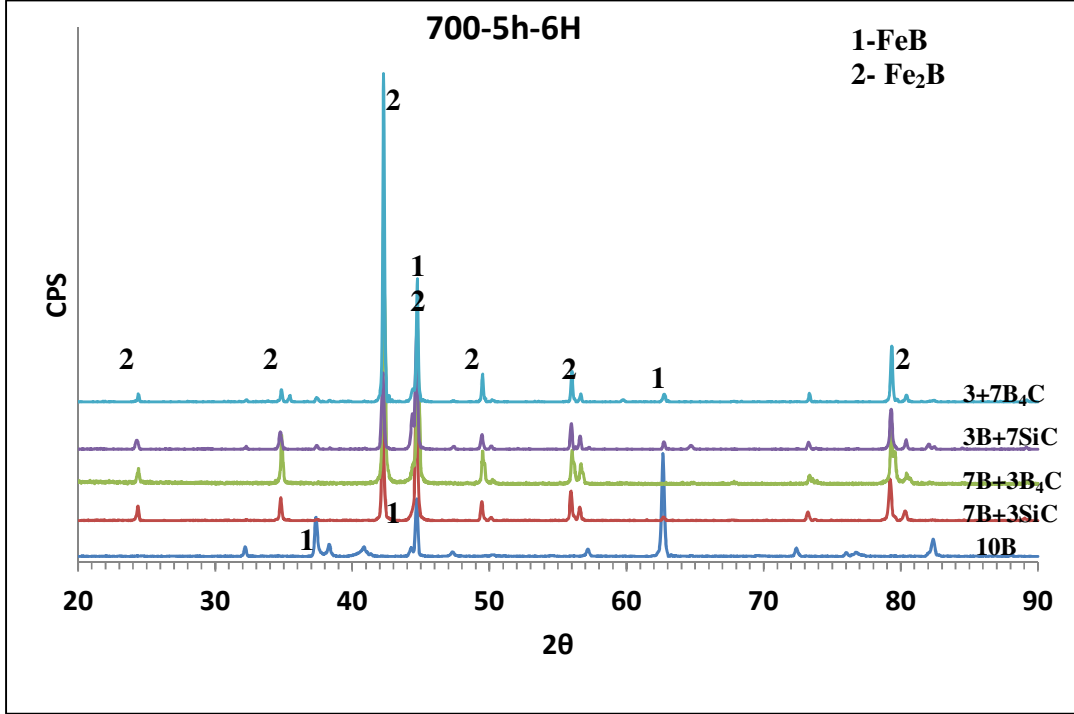
Şekil 6.20'de 700-2h süreyle B₂O₃ pasta karışımlarında PPB çeliklerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. Şekil incelendiğinde 10B₂O₃ pastasında FeB ve Fe₂B fazlarının pik sayısı ve şiddetinin diğer pasta karışımlarına göre az olduğu görülmüştür. Ayrıca 10B₂O₃ pastasında diğer pasta karışımlara göre FeB fazının baskın olduğu görülmektedir. 7B₂O₃+3B₄C, 3B₂O₃+7B₄C ve 3B₂O₃+7SiC pasta karışımlarında $2\theta=65$ derecede $\alpha\text{-Fe}$ görülmektedir. Ayrıca 3B₂O₃ + 7B₄C pasta karışımında B₂₅N fazı tespit edilmiştir.



Şekil 6.20 700-2h-6H-B₂O₃ pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri

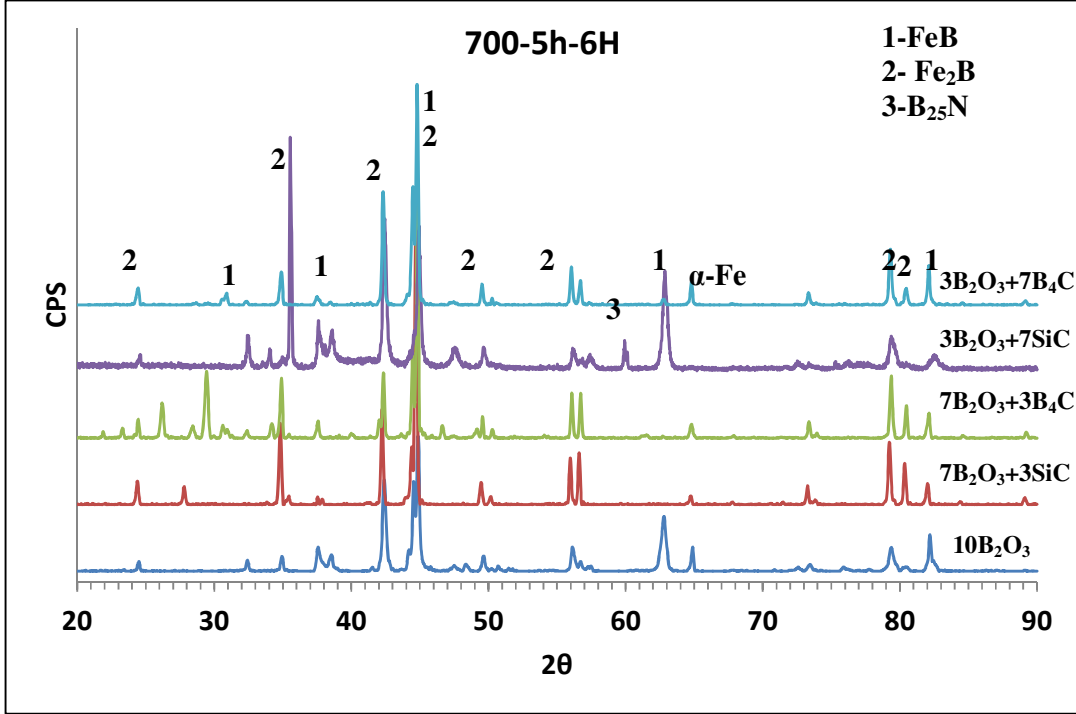
6.2.2 700-5h-6H PPB İşlemi XRD analizleri

Şekil 6.21’de 700-5h-6H-B pasta ve karışımlarında PPB çeliklerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. Şekil 6.21’e bakıldığında FeB ve Fe₂B fazları tespit edilmiştir. 2 saat süreyle 3B+7B₄C ve 3B+7SiC pasta karışımlarında yapılan deneylerde 2θ=65 derecede görülen α-Fe piki 5 saatlik deneylerde görülmemiştir.



Şekil 6.21 700-5h-6H-B pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri

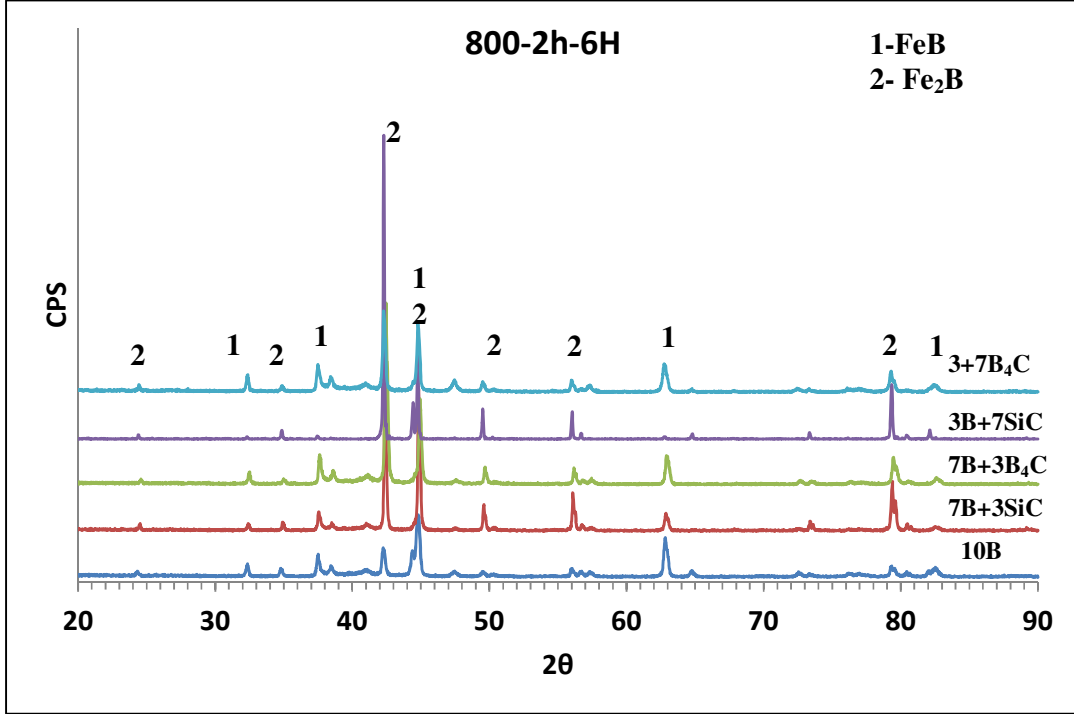
Şekil 6.22’de 700-5h-6H-B₂O₃ pasta ve karışımlarında PPB çeliklerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. Şekil 6.22’de görüldüğü gibi 10B₂O₃ ve pasta karışımlarında FeB ve Fe₂B fazlarının oluştuğu görülmektedir. Bütün pasta karışımlarında genellikle Fe₂B fazı baskın olup az miktarda FeB fazı tespit edilmiştir. En şiddetli Fe₂B fazı 7SiC+3B₂O₃ pasta karışımında oluşmuştur. 2 saat süreyle 7B₂O₃+3B₄C pastasıyla yapılan borlamada α-Fe piki görülürken, 5 saatlik deney sonucunda α-Fe piki şiddeti azalmış, yine 2 saat süreyle 7SiC+3B₂O₃ pasta karışımlarında yapılan deneylerde 2θ=65 derecede görülen α-Fe piki 5 saatlik deneylerde görülmemiştir.



Şekil 6.22 700-5h-6H-B₂O₃ pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri

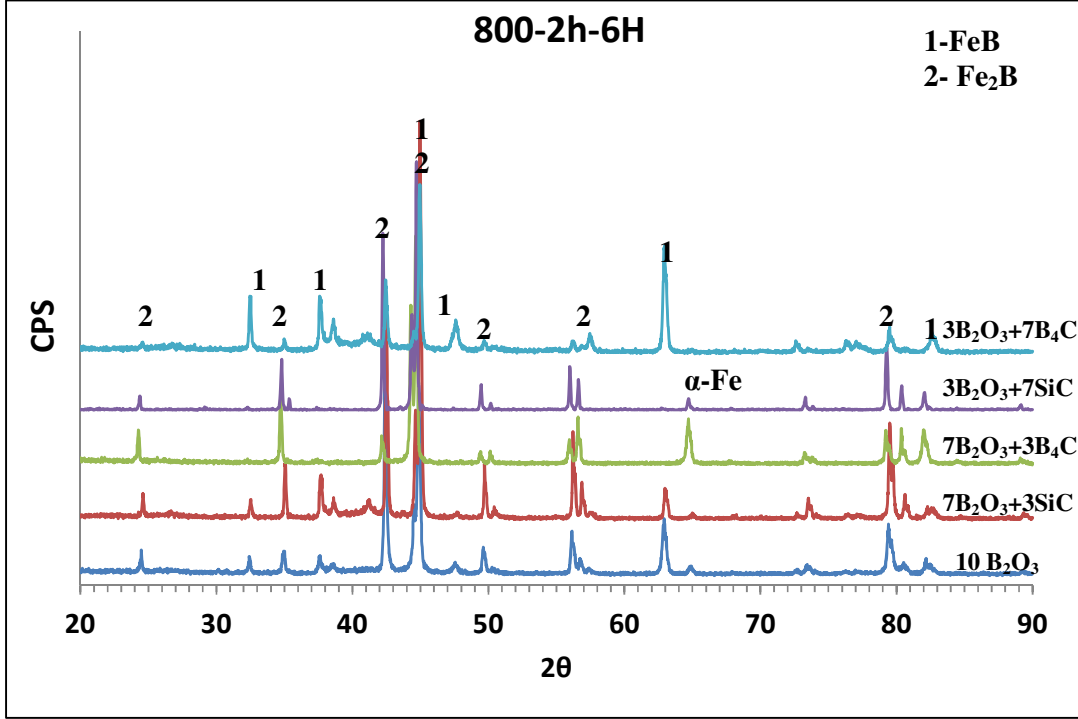
6.2.3 800-2h-6H PPB işlemi XRD analizleri

Şekil 6.23'te 800-2h-6H-B pasta ve karışımlarında PPB çeliklerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. Şekil 6.23'e bakıldığında 3B+7SiC karışımında yapılan borlama işleminde pik şiddetlerinin diğerlerine göre daha büyük olduğu görülmektedir. 3B+7SiC karışımında yapılan deney sonucunda baskın fazın Fe₂B fazının olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.23 800-2h-6H-B pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri

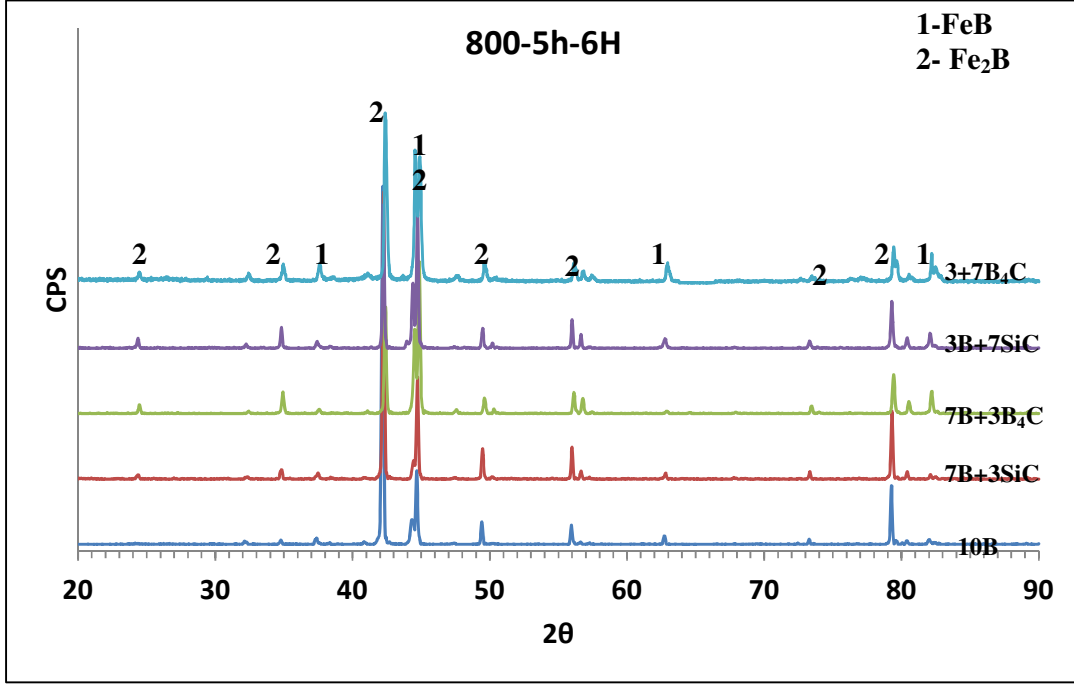
Şekil 6.24'te 800-2h-6H-B₂O₃ pasta ve karışımlarında PPB çeliklerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. PPB sonucunda Fe₂B ve FeB fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Oluşan fazlardan Fe₂B fazının FeB fazına göre daha baskın olduğu gözlenmiştir. Diğer karışımlara göre 10B₂O₃, 7B₂O₃+3SiC ve 3B₂O₃+7B₄C pastalarında 2θ=63 ve 2θ=38 derecelerde FeB fazının oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.24 800-2h-6H-B₂O₃ pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD sonuçları

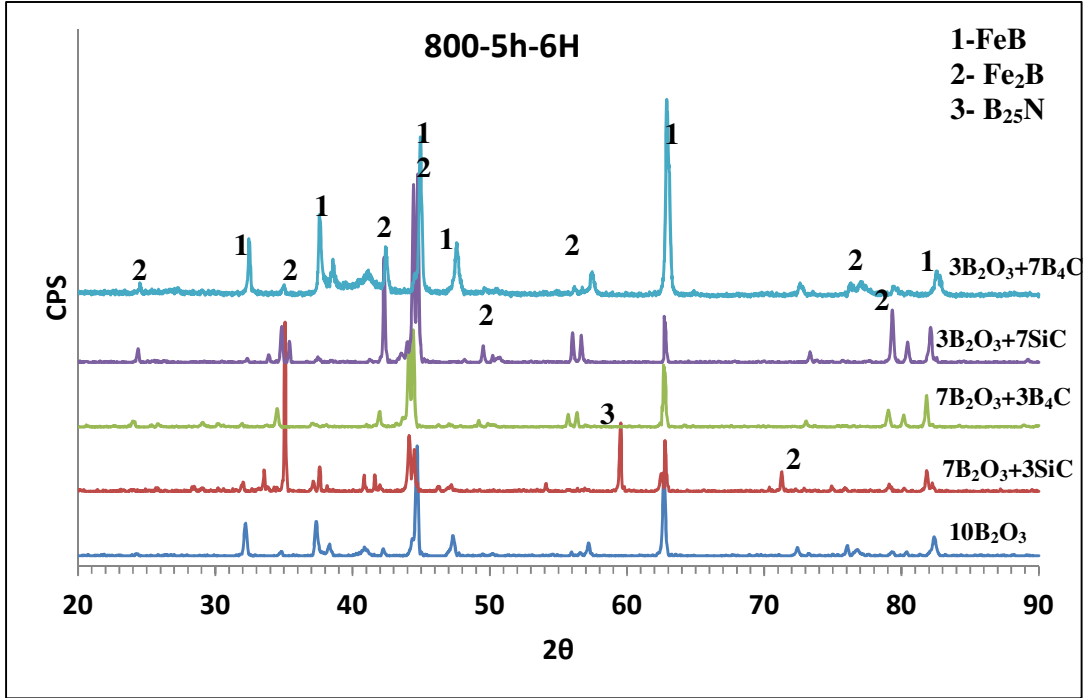
6.2.4 800-5h-6H PPB işlemi XRD analizleri

Şekil 6.25'te 800-5h-6H-B pasta ve karışımlarında PPB çeliklerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. Şekil 6.25'e bakıldığında bütün pasta karışımlarında FeB ve Fe₂B faz şiddetlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 6.25 800-5h-6H-B pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri

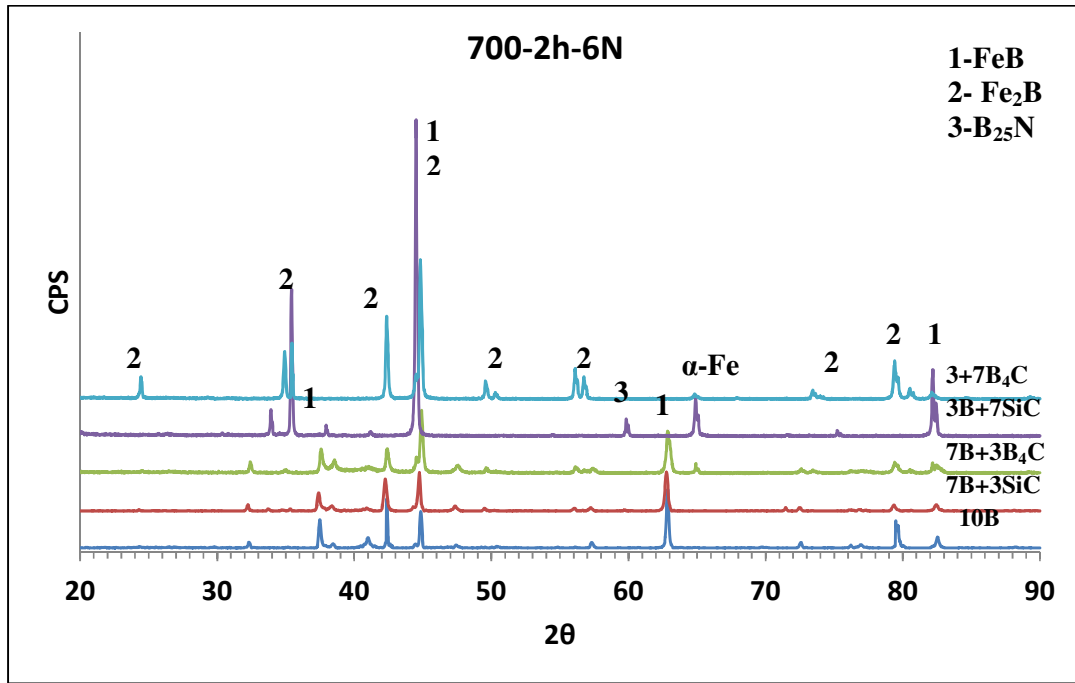
Şekil 6.26'da 800-5h-6H-B₂O₃ pasta ve karışımlarında PPB çeliklerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. PPB sonucunda FeB, Fe₂B ve B₂₅N fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.26 800-5h-6H-B₂O₃ pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri

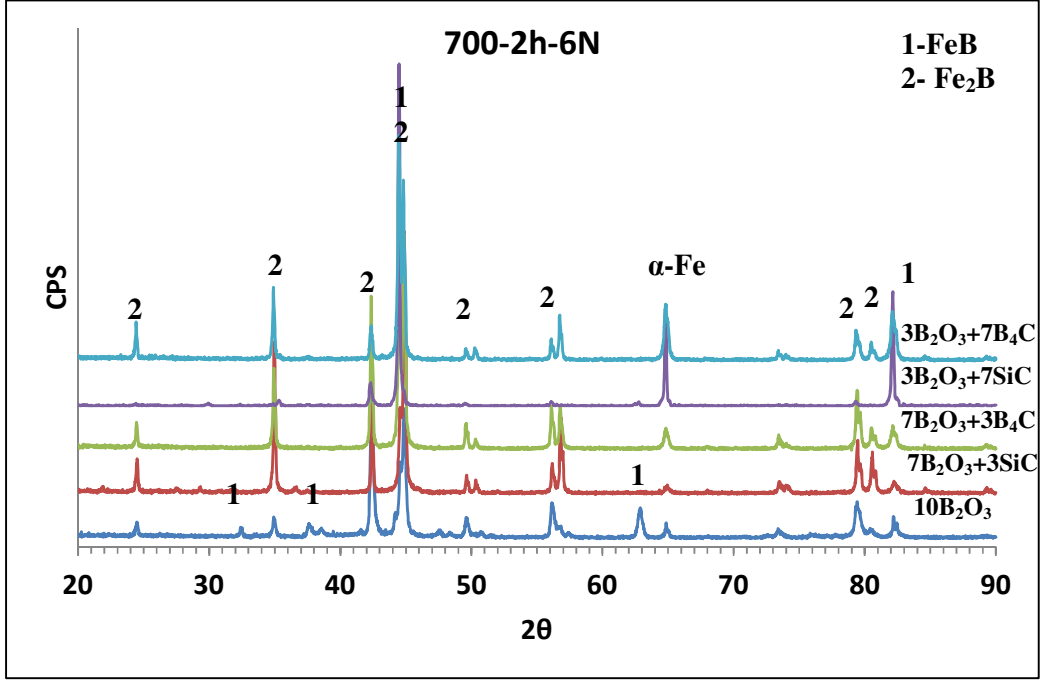
6.2.5 700-2h-6N PPB işlemi XRD analizleri

Şekil 6.27’de 700-2h-6N-B pasta ve karışımlarında PPB çeliklerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. Şekil 6.27’ye bakıldığında PPB sonucunda FeB, Fe₂B ve B₂₅N fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. 3B+7SiC ve 3B+7B₄C pasta karışımında diğer pasta karışımlarında 2θ=32,5 ve 2θ=63 derecede oluşan FeB fazı oluşmamış fakat bu iki pasta karışımında da diğer karışımlardan farklı olarak 2θ=35 derecedeki Fe₂B fazı oluşmuştur.



Şekil 6.27 700-2h-6N-B pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri

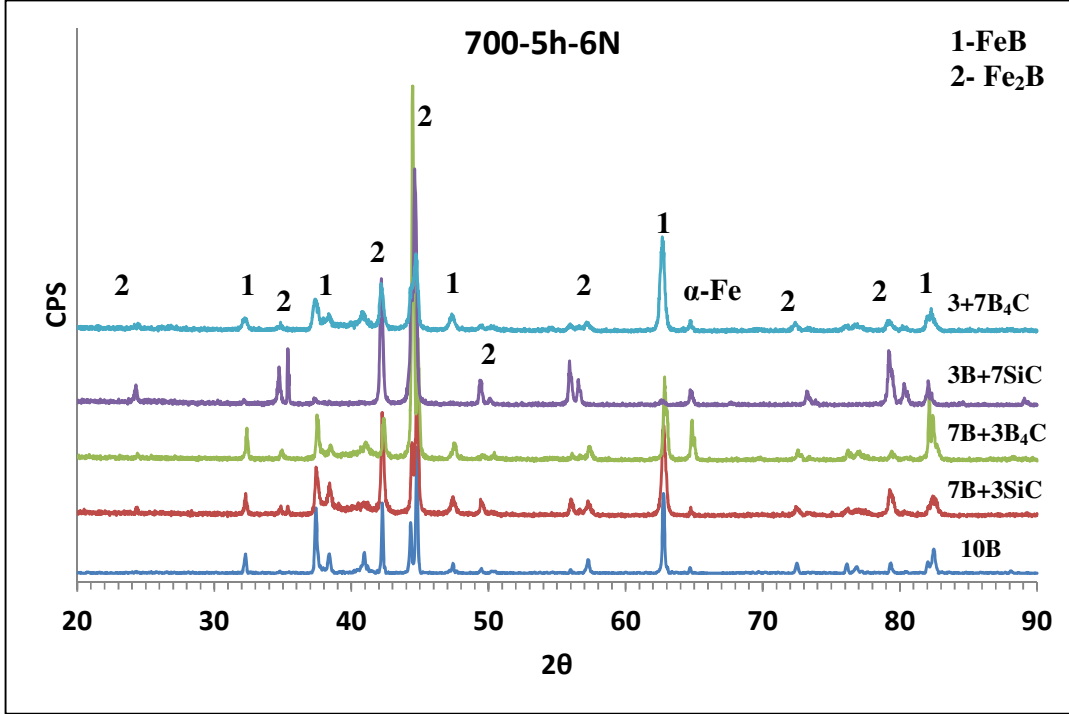
Şekil 6.28’de 700-2h-6N-B₂O₃ pasta ve karışımlarında PPB çeliklerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. Fe₂B fazının FeB fazına göre baskın olduğu tespit edilmiştir. Diğer karışımlardan farklı olarak 10B₂O₃ pastasında yaklaşık 2θ=37,5 ve 2θ=63 derecede FeB fazı oluşmuştur. B₂O₃ pasta karışımlarında 2θ=65 derecede α-Fe görülmüştür.



Şekil 6.28 700-2h-6N-B₂O₃ pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri

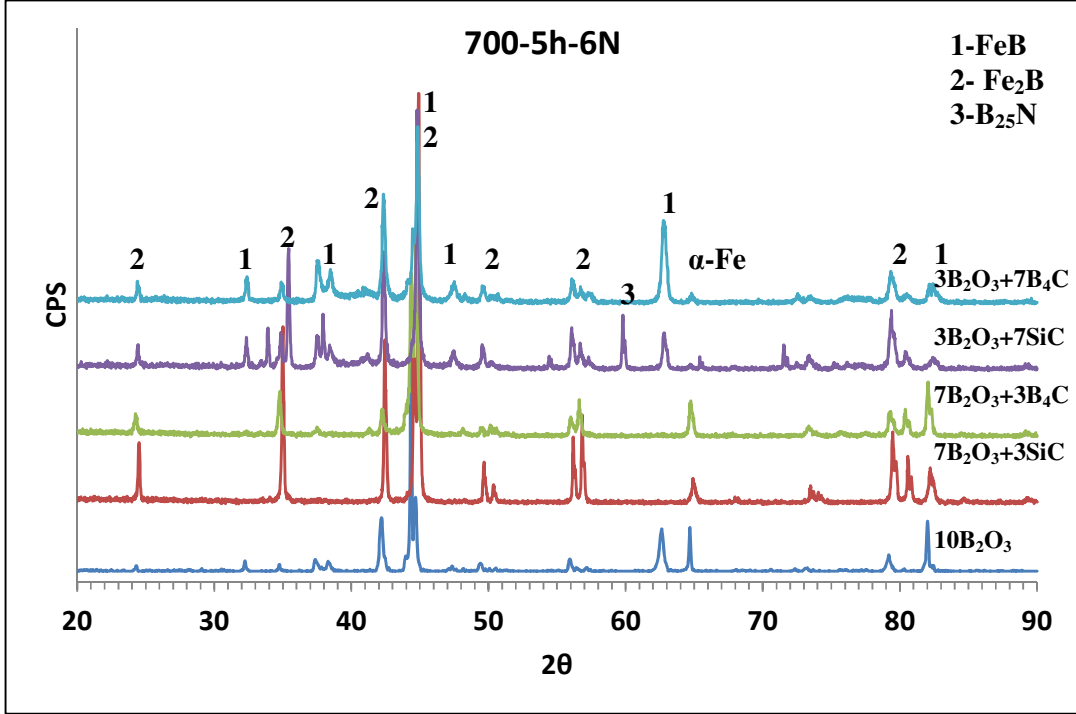
6.2.6 700-5h-6N PPB işlemi XRD analizleri

Şekil 6.29'da 700-5h-6N-B pasta ve karışımlarında PPB çeliklerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. Şekle bakıldığında FeB ve Fe₂B fazları tespit edilmiştir. 3B+7SiC pastasında yaklaşık 2θ=32, 2θ=38 ve 2θ=63 derecelerdeki FeB piki görülmemiş ve baskın faz olarak Fe₂B fazı görülmüştür. B pasta karışımlarında 2θ=65 derecede α-Fe görülmektedir.



Şekil 6.29 700-5h-6N-B pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri

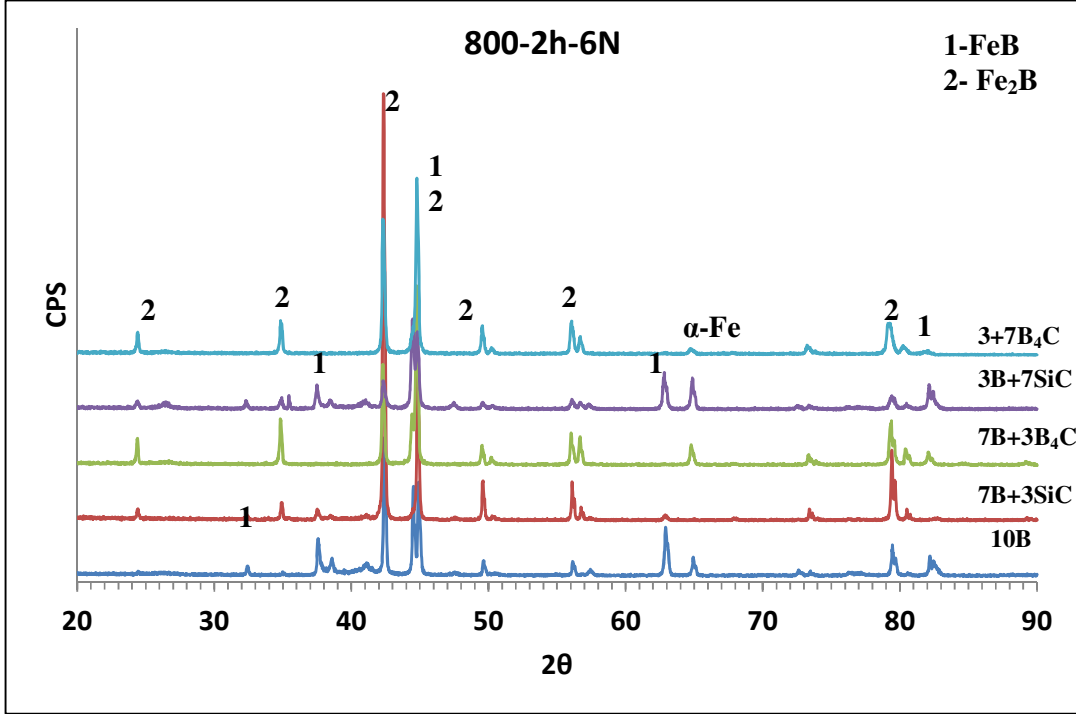
Şekil 6.30'da 700-5h-6N-B₂O₃ pasta ve karışımlarında PPB çeliklerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. PPB sonucunda 7SiC+3B₂O₃ pasta karışımında FeB, Fe₂B fazına ilaveten B₂₅N fazının oluştuğu tespit edilmiştir. 7B₂O₃+3SiC pasta karışımında diğer pasta karışımlara göre Fe₂B fazının daha şiddetli olduğu gözlenmiştir. 7B₂O₃+3SiC ve 7B₂O₃+3B₄C pasta karışımlarında yaklaşık $2\theta=32$, $2\theta=38$ ve $2\theta=63$ derecelerdeki FeB fazı pikleri görülmemiştir. Pasta karışımların tümünde Fe₂B fazı FeB fazına göre daha baskındır. En şiddetli Fe₂B fazı 7B₂O₃+3SiC pasta karışımında oluşmuştur.



Şekil 6.30 700-5h-6N-B₂O₃ pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri

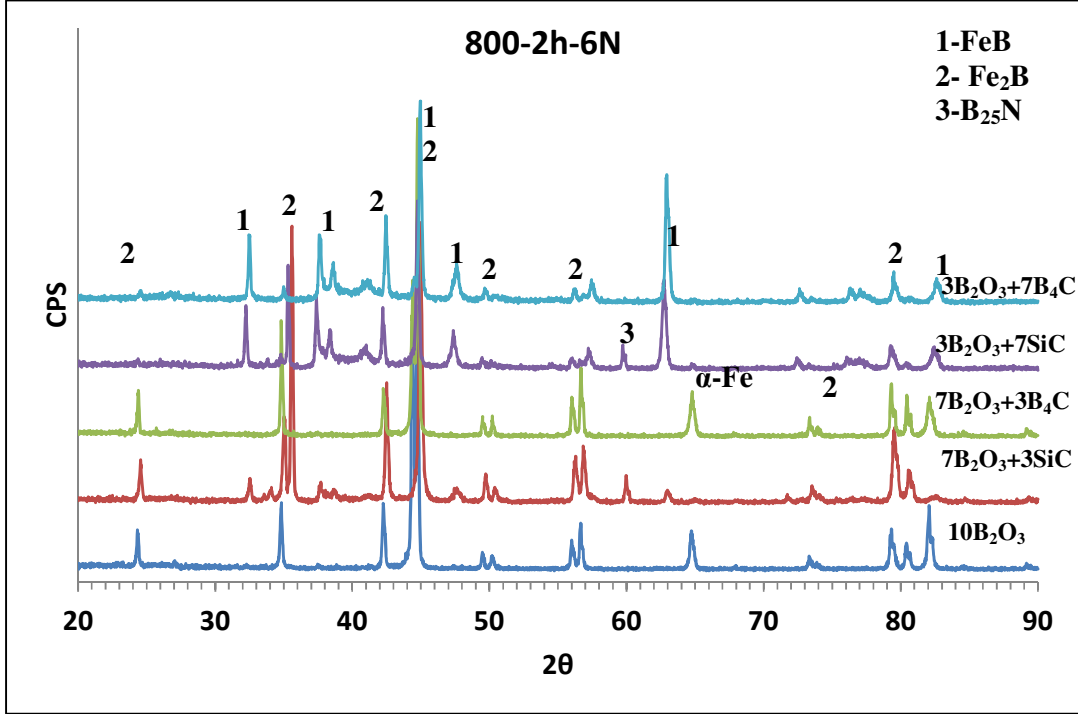
6.2.7 800-2h-6N PPB işlemi XRD analizleri

Şekil 6.31’de 800-2h-6N-B pasta ve karışımlarında PPB çeliklerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. Fe₂B fazının FeB fazına göre daha baskın olduğu görülmüştür. En şiddetli Fe₂B fazı 7B+3SiC pasta karışımında oluşmuştur.



Şekil 6.31 800-2h-6N-B pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri

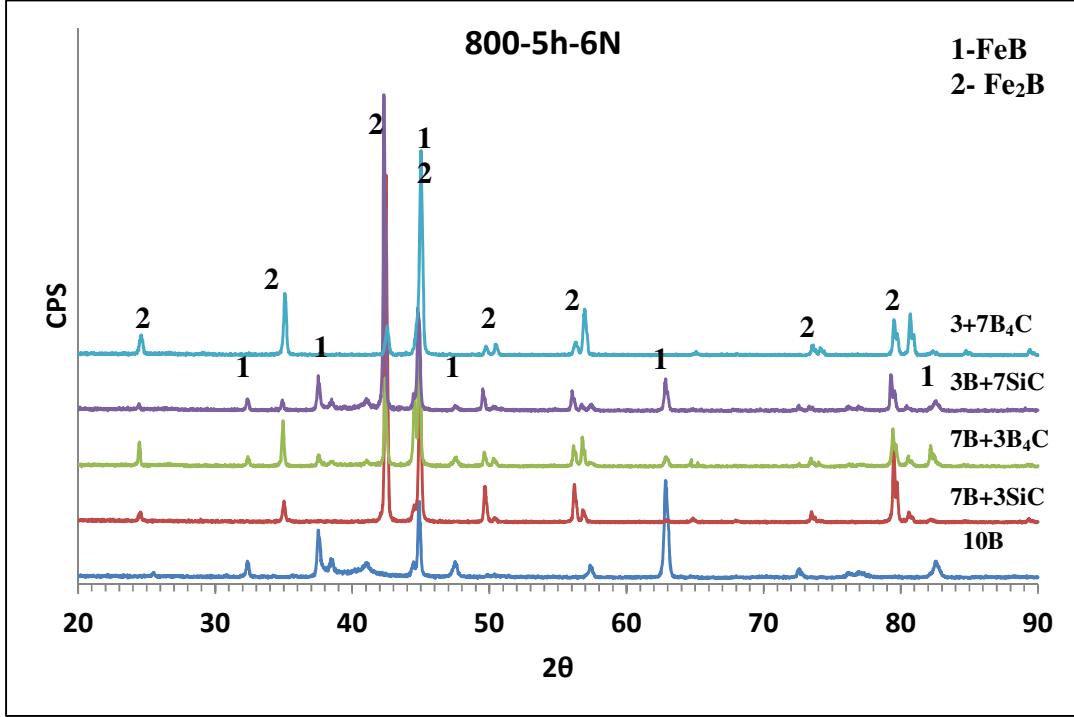
Şekil 6.32’de 800-2h-6N-B₂O₃ pasta ve karışımlarında PPB çeliklerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. 7B₂O₃+3SiC pasta karışımında daha Fe₂B fazının diğer karışımlara göre şiddetli olduğu görülmüştür. 7SiC+3B₂O₃ ve 7B₂O₃+3SiC pasta karışımlarında FeB, Fe₂B fazına ilaveten B₂₅N fazının oluştuğu tespit edilmiştir. 7B₂O₃+3SiC, 3B₂O₃ + 7SiC, 3B₂O₃+7B₄C pasta karışımlarında 2θ=63 derecede oluşan FeB fazı, 10B₂O₃ ve 7B₂O₃ + 3B₄C pasta karışımlarında oluşmamış ve 10B₂O₃ ve 7B₂O₃+3B₄C pasta karışımlarında 2θ=65 derecede α-Fe görülmektedir.



Şekil 6.32 800-2h-6N-B₂O₃ pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri

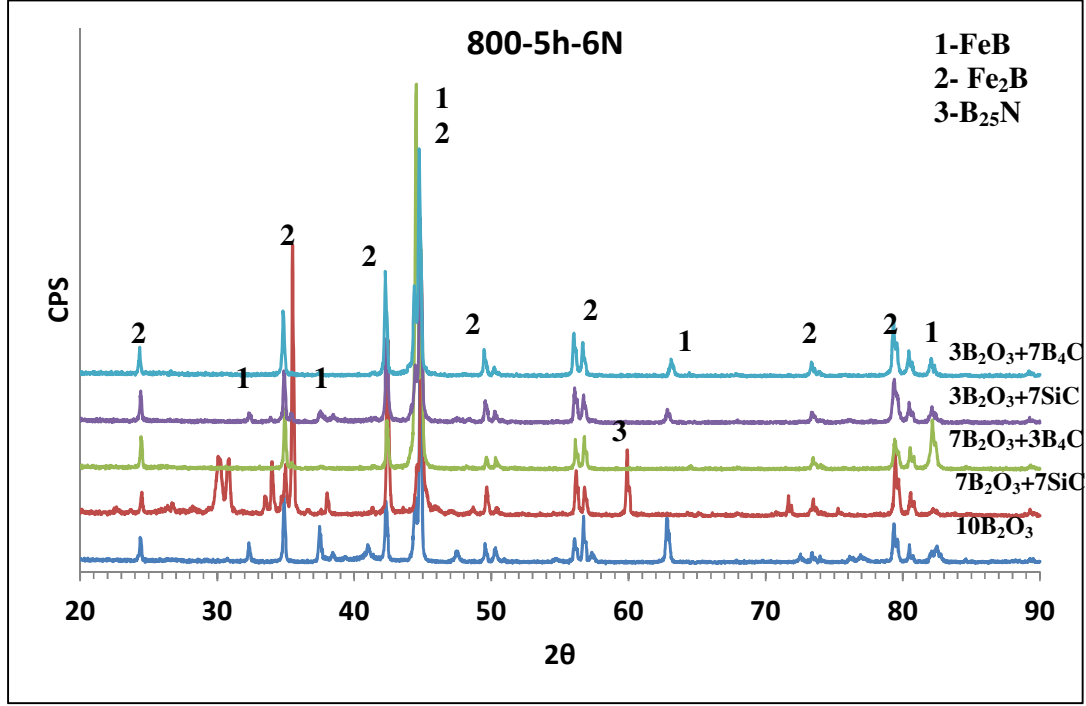
6.2.8 800-5h-6N PPB işlemi XRD analizleri

Şekil 6.33'te 800-5h-6N-B pasta ve karışımlarında PPB çeliklerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. 10B, 3B+7SiC ve 7B+7B₄C pasta karışımlarında yaklaşık 2θ=38 ve 2θ=63 derecelerde oluşan FeB fazı pikleri diğer karışımlarda görülmemiştir.



Şekil 6.33 800-5h-6N-B pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri

Şekil 6.34'te 800-5h-6N-B₂O₃ pasta ve karışımlarında yapılan PPB çeliklerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. 7B₂O₃+3SiC pasta karışımında FeB, Fe₂B fazına ilaveten B₂₅N fazının da oluştuğu tespit edilmiştir. 10B₂O₃, 3B₂O₃+7SiC, 3B₂O₃+7B₄C pasta karışımlarında yapılan borlama sonucu 2θ=63 derecede oluşan FeB fazı, 7B₂O₃+3SiC, 7B₂O₃+3B₄C pasta karışımlarında oluşmamıştır.

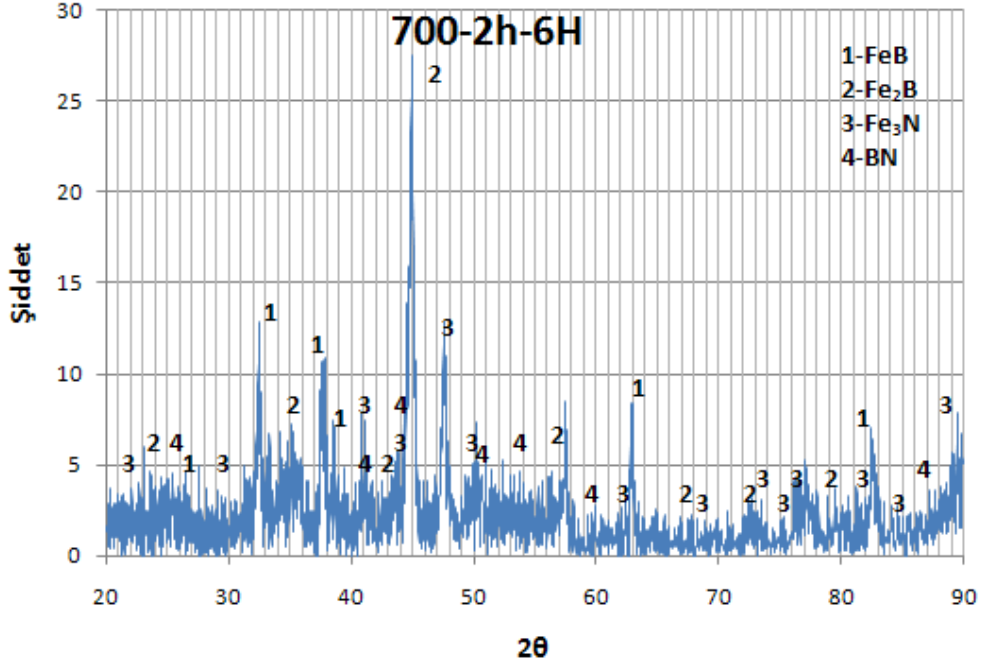


Şekil 6.34 800-5h-6N-B₂O₃ pasta ve karışımlarında yapılan PPB işlemi XRD analizleri

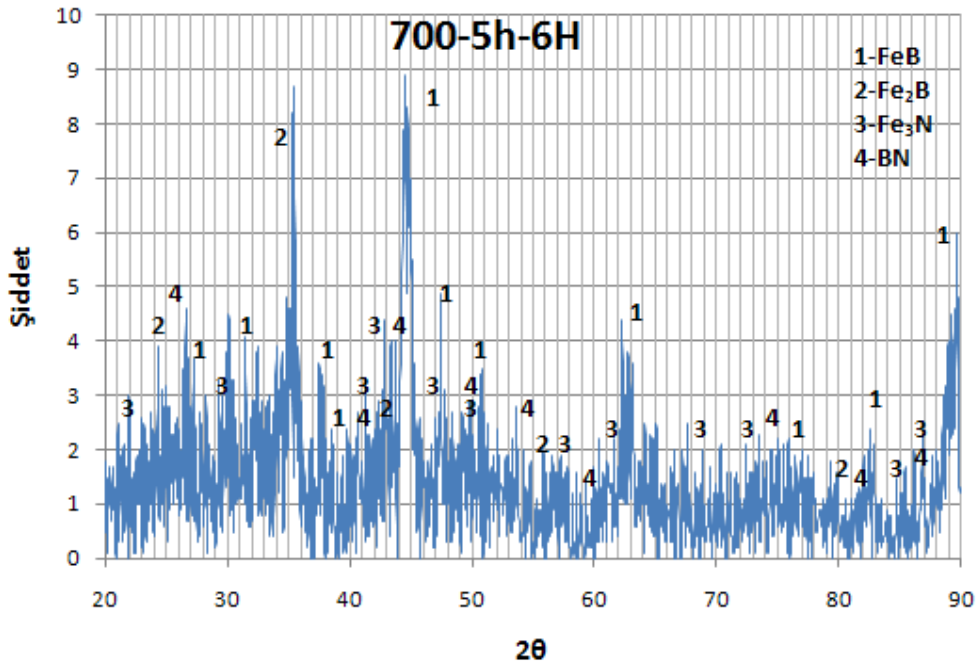
6.3 Düşük Açılı XRD Sonuçları

Şekil 6.35-6.42 arasında farklı gaz karışımlarda ve pasta oranlarında, farklı sıcaklık ve sürelerde PPB numunelerin düşük açılı XRD analiz sonuçları görülmektedir. 6H gazı altında yapılan PPB işleminde normal XRD sonuçlarında çıkan FeB ve Fe₂B fazlarının yanı sıra Fe₃N, BN fazları düşük açılı XRD çekimlerinde tespit edilmiştir. Ayrıca 6N gazı altında yapılan PPB işleminde ise FeB, Fe₂B, Fe₃N, BN ve CrB fazları tespit edilmiştir. Bu durum literatürle de uyumludur. Maragoudakis ve arkadaşları (2002) US 37-1 çeliğini 1000 °C’de 8 saat süreyle borlamışlar ve ardından 500°C’de 18 saat süreyle gaz atmosferli bir fırında nitrürlemişlerdir. Deney sonucunda borür tabakasının üzerinde Fe₄N ve B₂₅N fazlarının oluştuğunu tespit etmişlerdir. Yan vd. (2002) C45 çeliğini 920°C’de 4 saat süreyle kutu borlama yaptıktan sonra iyon implantasyon işlemi uygulamışlardır. N⁺ implantasyonundan sonra c-BN, FeN, Fe₂N, Fe₃N fazları oluşmuştur. c-BN fazının; yüksek dozlu N⁺ iyon implantasyonunda sadece çift FeB+Fe₂B fazlarında oluşturulabiliyorken, düşük dozlu N⁺ iyon implantasyonunda sadece tek fazlı Fe₂B fazı ile oluşturulabildiğini rapor etmişlerdir. Krumes vd. (2010)

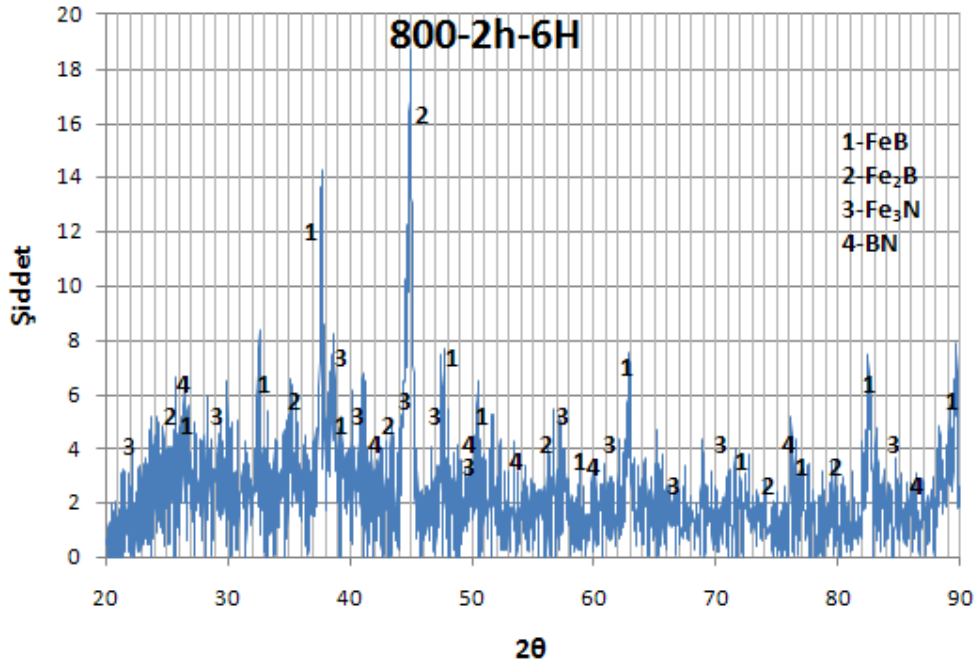
borlama sonrası plazma nitrüleme yapmışlar ve yüzeyde sert demir borür ve nitrürlerinin oluştuğunu tespit etmişlerdir.



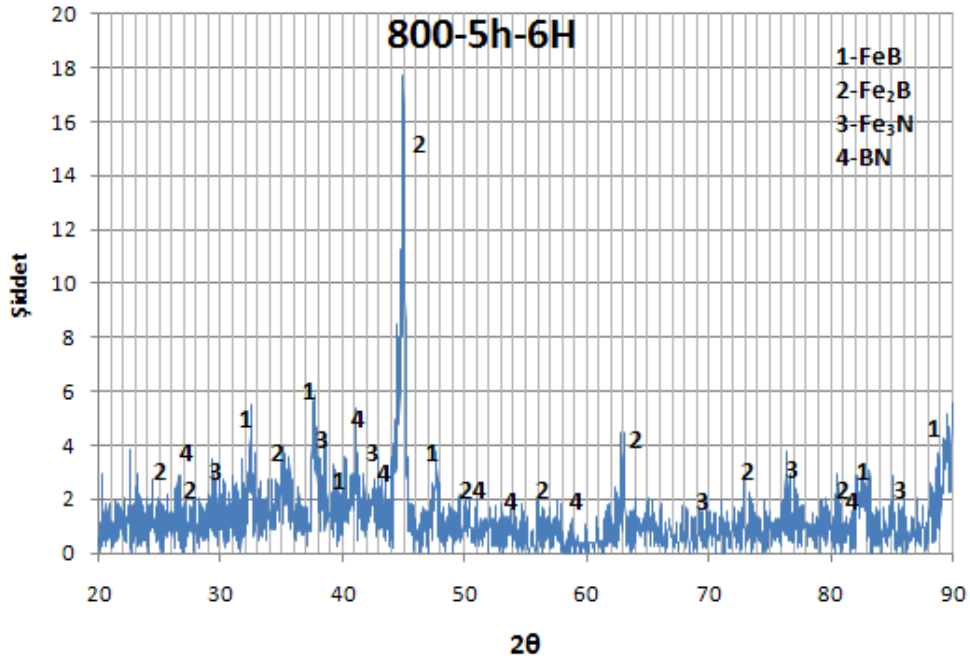
Şekil 6.35 700-2h-6H-10B pastasıyla yapılan PPB işlemi GAXRD analizleri



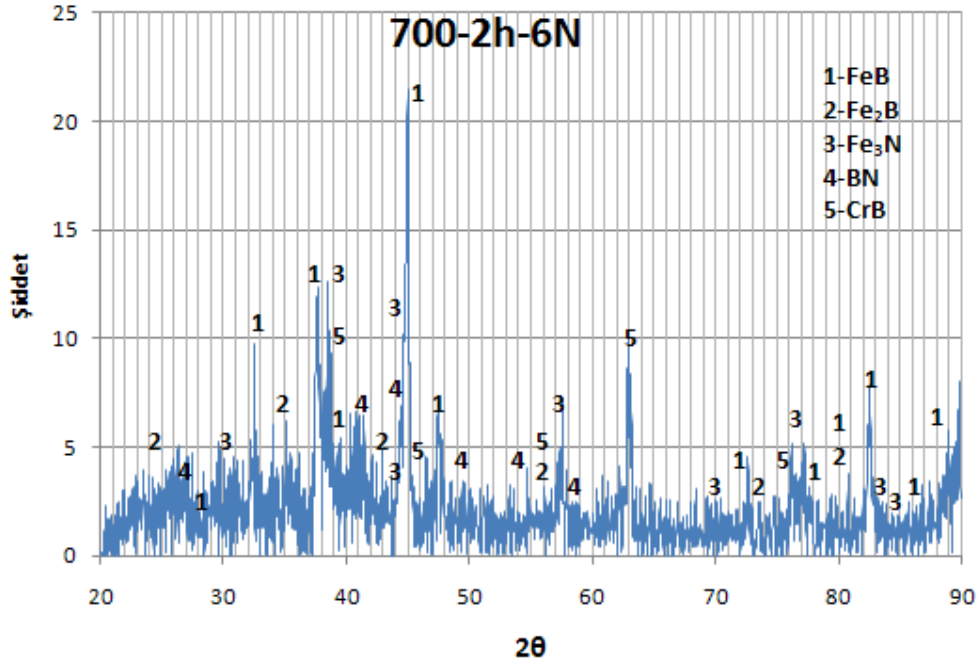
Şekil 6.36 700-5h-6H-10B pastasıyla yapılan PPB işlemi GAXRD analizleri



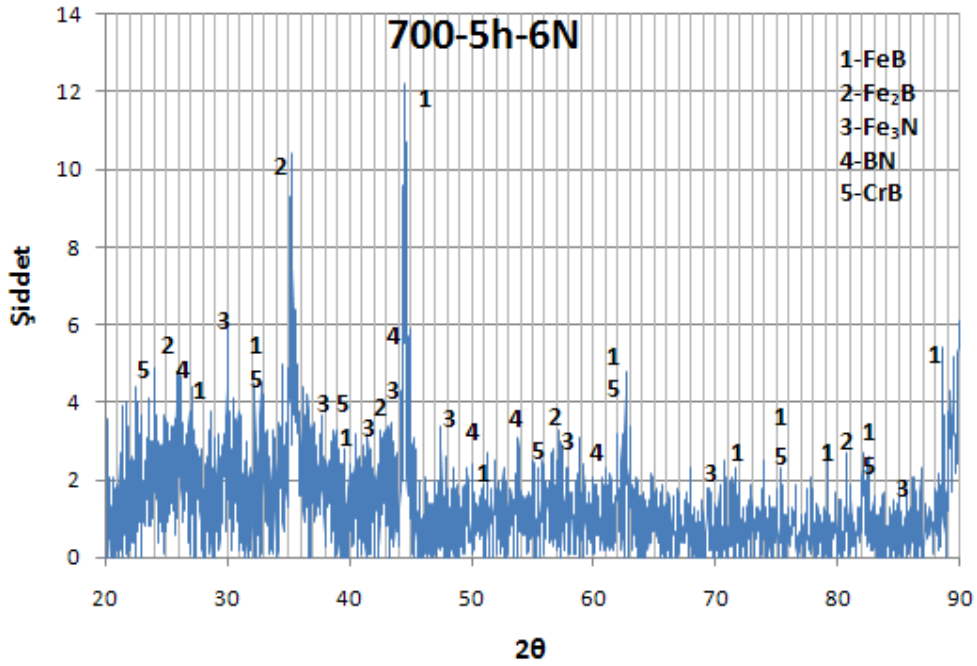
Şekil 6.37 800-2h-6H-10B pastasıyla yapılan PPB işlemi GAXRD analizleri



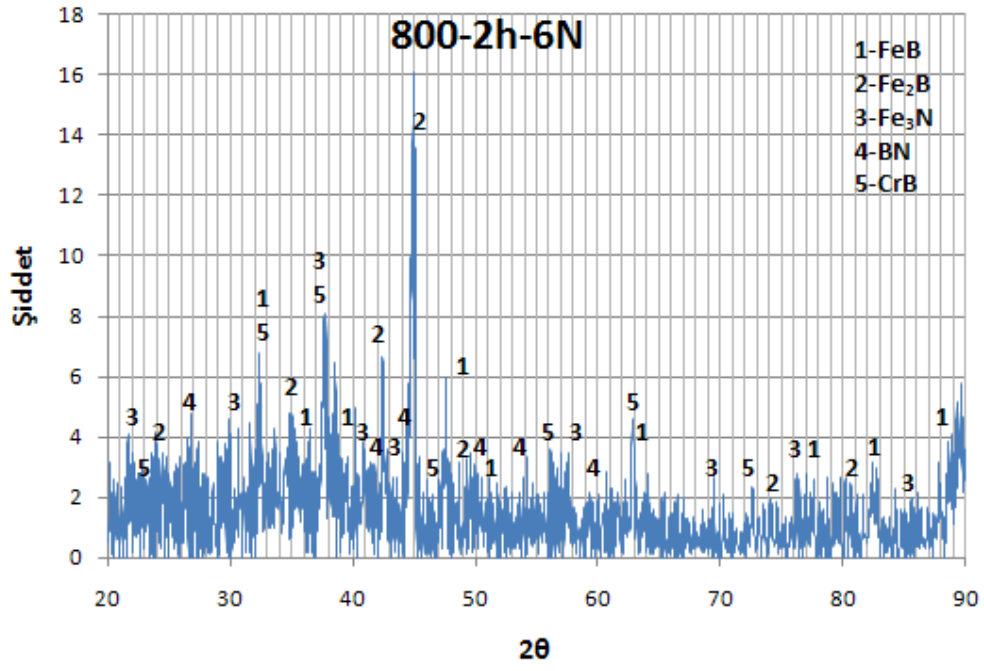
Şekil 6.38 800-5h-6H-10B pastasıyla yapılan PPB işlemi GAXRD analizleri



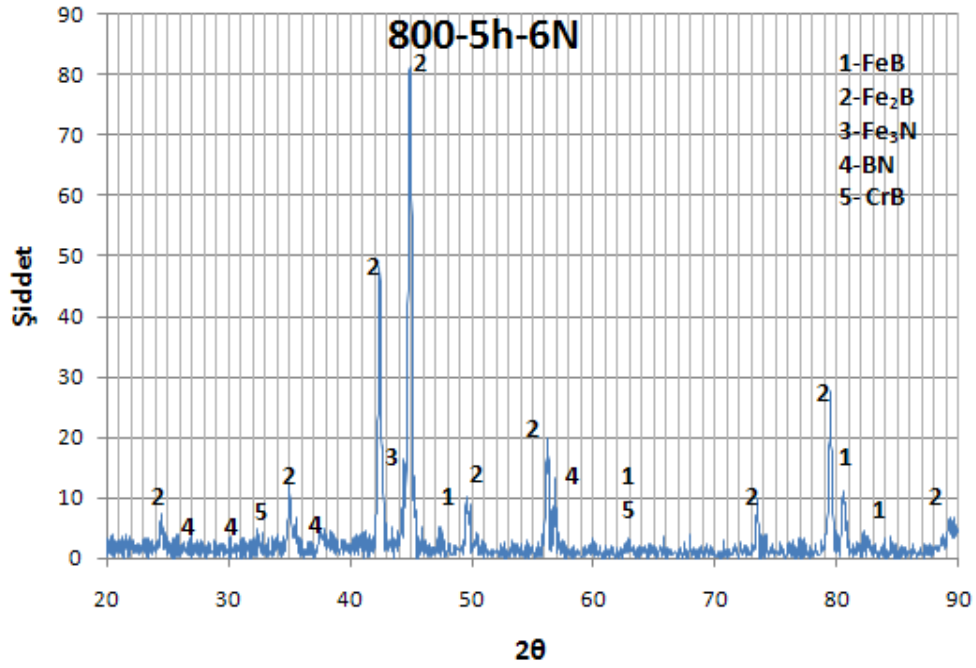
Şekil 6.39 700-2h-6N-10B pastasıyla yapılan PPB işlemi GAXRD analizleri



Şekil 6.40 700-5h-6N-10B pastasıyla yapılan PPB işlemi GAXRD analizleri



Şekil 6.41 800-2h-6N-10B pastasıyla yapılan PPB işlemi GAXRD analizleri



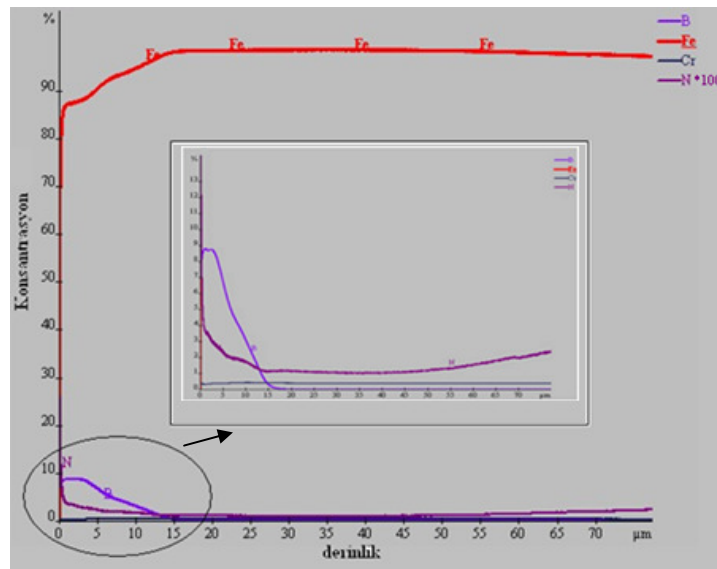
Şekil 6.42 800-5h-6N-10B pastasıyla yapılan PPB işlemi GAXRD analizleri

6.4 Glow Deşarj Optik Emisyon Spektrometresi Sonuçları

Şekil 6.43-6.47’de farklı gaz karışımlarında 700 ve 800°C sıcaklıkta 2 ve 5 saat süreyle 10B pastasıyla PPB numunelerin GDOES analiz sonuçları görülmektedir. 6N gaz karışımında yapılan deneylerde numune yüzeyine yakın 6H gaz karışımına göre azot konsantrasyonunun daha fazla olduğu sıcaklık ve sürenin artmasıyla numune yüzeyindeki bor konsantrasyonunun arttığı tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda bor daha derine difüze olmuştur. Bu durum literatürle uyumludur (Oliveria et al. 2010).

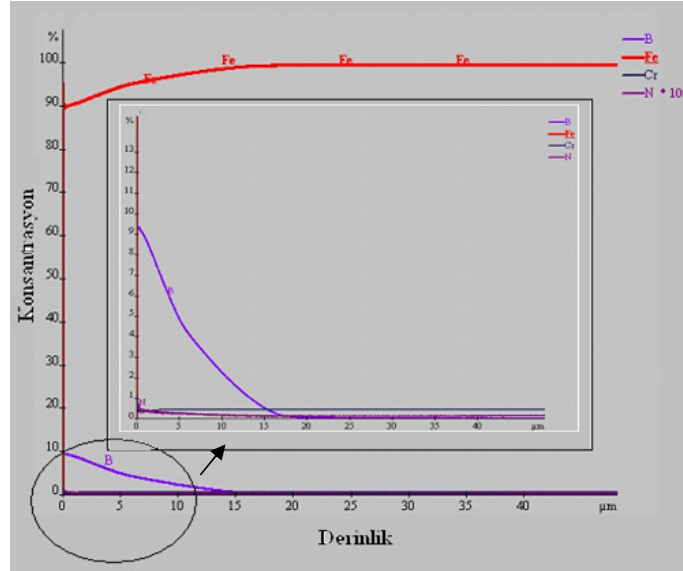
Tabaka kalınlıkları optik mikroskop ölçümleriyle kıyaslandığında GDOES analizlerinde daha düşük çıkmıştır. GDOES analizleri tam anlamıyla derinliğe bağlı olarak elemental analiz sonucunu verememiştir. Analizin birkaç kez yapılması daha net bir sonuç verebilir (Hosseini and Ashrafzadeh 2009). 6N gaz karışımında yapılan deneylerde numune yüzeyine yakın bölgelerde 6H gaz karışımına göre azot konsantrasyonunun daha fazla olduğu sıcaklık ve sürenin artmasıyla numune yüzeyindeki bor konsantrasyonunun arttığı tespit edilmiştir.

Şekil 6.43’te 700-5h-6H-10B pastasıyla yapılan PPB çeliğin GDOES analizi görülmektedir. Grafikten bor atomlarının 13 µm derinliğe kadar nüfuz ettiği, azot atomlarının ise bor konsantrasyonundan daha az olmasına rağmen 70 µm’luk mesafeye difüzyon ettiği görülmektedir.



Şekil 6.43 700-5h-6H-10B pastasıyla yapılan PPB çeliğin GDOES analizi

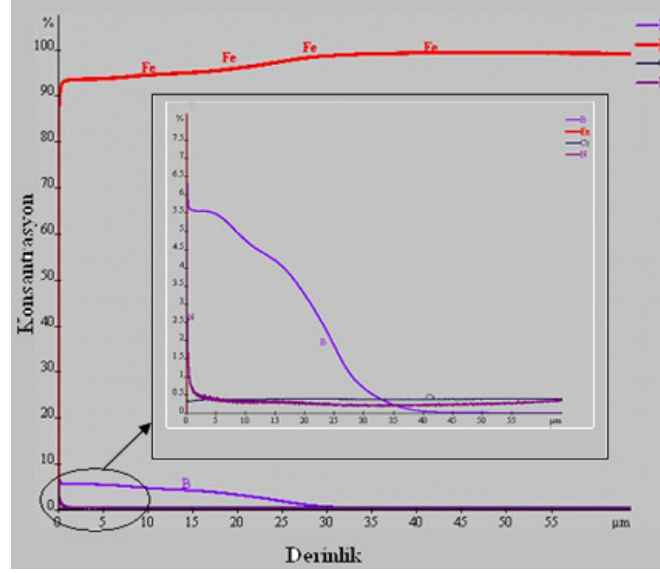
Şekil 6.44'te 800-2h-6H-10B pastasıyla yapılan PPB çeliğin GDOES analizi görülmektedir. Bor konsantrasyonunun 18 μm derinliğe kadar giderek azaldığı ve bu değerden sonra okunamadığı grafikten görülmektedir.



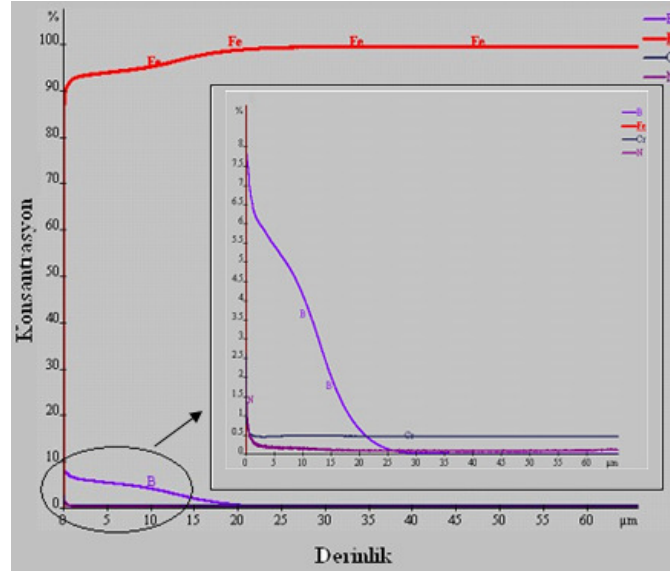
Şekil 6.44 800-2h-6H-10B pastasıyla yapılan PPB çeliğin GDOES analizi

Şekil 6.45'te 700-5h-6N-10B pastasıyla yapılan PPB çeliğin GDOES analizi görülmektedir. Bor atomlarının yaklaşık 40 μm derinliğe kadar nüfuz ettiği görülmektedir.

Şekil 6.46'da 800-2h-6N-10B pastasıyla yapılan PPB çeliğin GDOES analizi görülmektedir. Bor atomlarının yaklaşık 35 μm derinliğe kadar nüfuz ettiği görülmektedir.

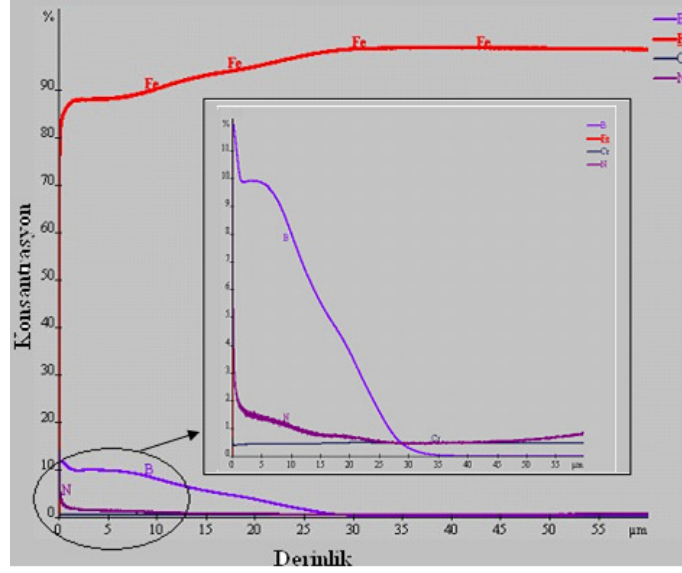


Şekil 6.45 700-5h-6N-10B pastasıyla yapılan PPB çeliğin GDOES analizi



Şekil 6.46 800-2h-6N-10B pastasıyla yapılan PPB çeliğin GDOES analizi

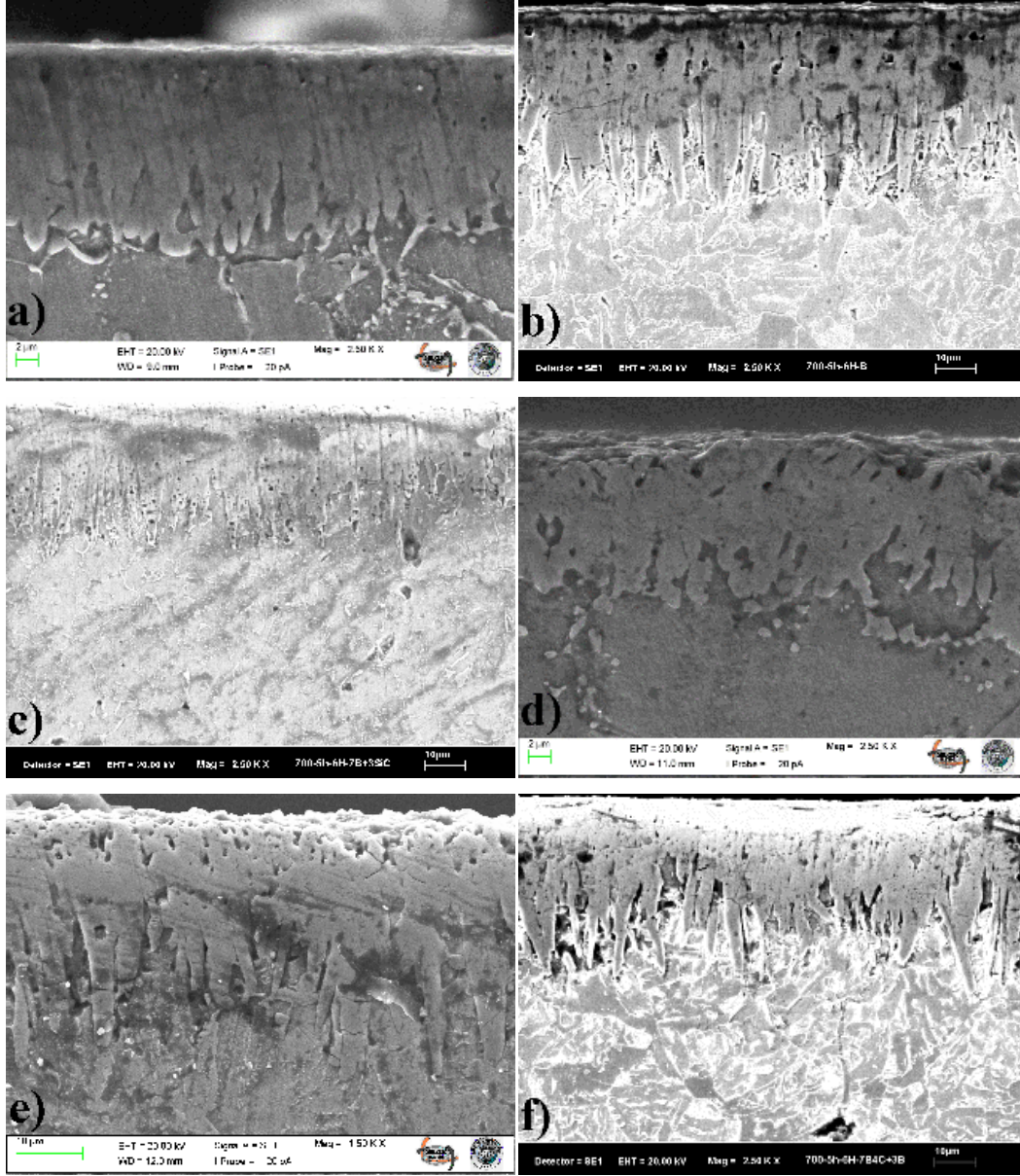
Şekil 6.47’de 800-5h-6N-10B pastasıyla yapılan PPB çeliğin GDOES analizi görülmektedir. Yüzeyde yaklaşık %12 bor ve %5 N konsantrasyonu tespit edilmiş olup bor atomlarının yüzeyden itibaren 38 μm derinliğe kadar N atomlarının ise 55 μm derinliğe kadar ilerlediği görülmektedir.



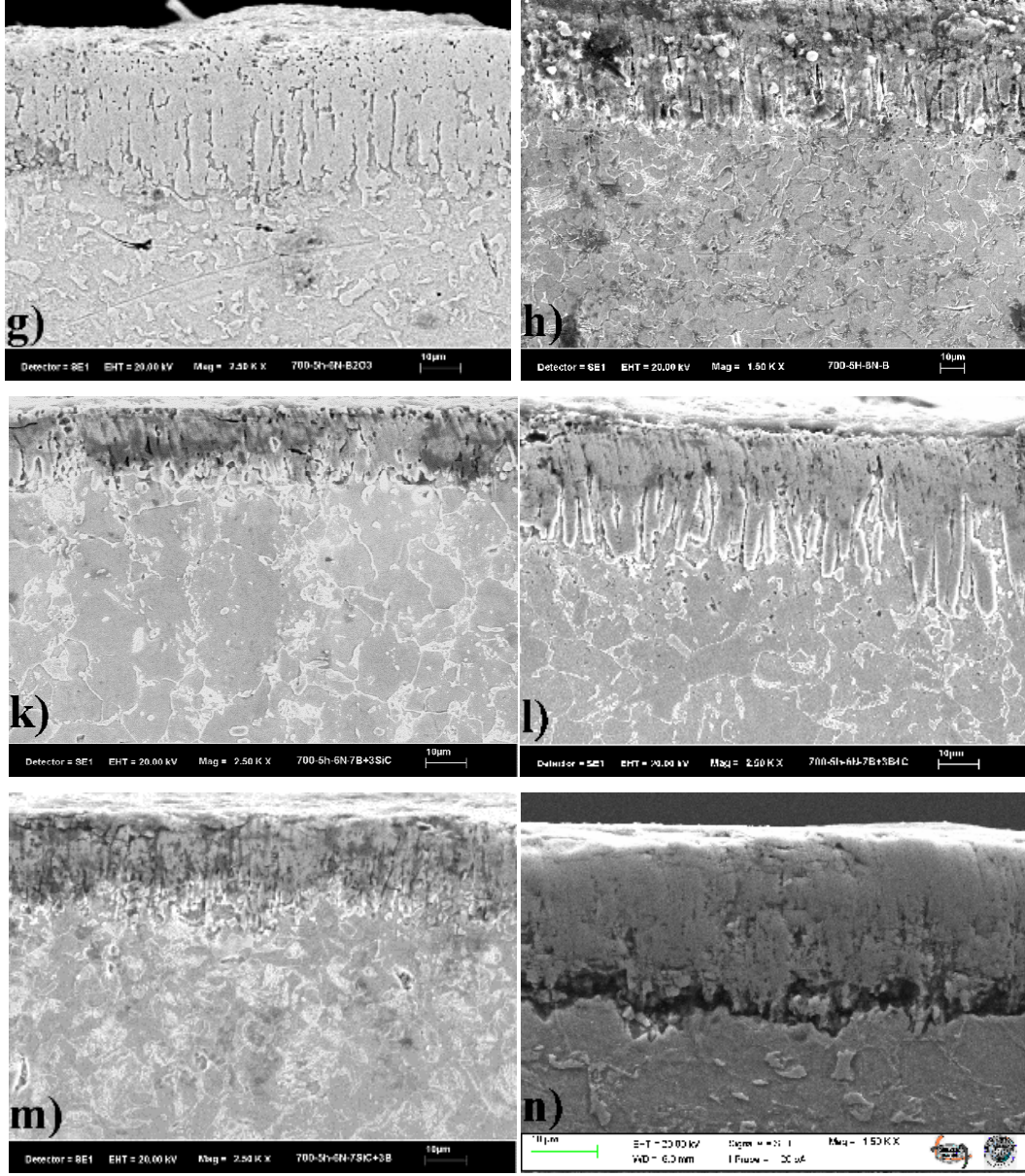
Şekil 6.47 800-5h-6N-10B pastasıyla yapılan PPB çeliğin GDOES analizi

6.5 Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi

Şekil 6.48’de 700-5h-6H ve 700-5h-6N şartlarında $10B_2O_3$, 10B, 7B+3SiC, 7B+3B₄C, 3B+7SiC, 3B+7B₄C, pasta karışımlarıyla PPB numunelerin SEM görüntüleri görülmektedir. Tüm numunelerde borür tabakasının olduğu görülmektedir. PPB sonucu elde edilen borür tabakalarının hem 6H hem de 6N gaz karışımlarında testere dişli bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. 10B pastasıyla yapılan PPB sonucunda $10B_2O_3$ pastasıyla yapılan PPB’ya göre daha kalın bir borür tabakası elde edilmiştir. Şekil 6.48 b, e’ de borür tabakasında ve 6.51 n’de ise borür tabakası ile matris arasında gözenekli boşluklu bir yapının olduğu görülmüştür. Literatürde de bazı plazma borlama çalışmalarında bu şekilde oluşan borür tabakaları görülmüştür (Nam vd. 1998, Nam vd. 2005)



Şekil 6.48 700-5h şartlarında PPB numunelerin SEM görüntüleri; a-f arası 6H' lı karışımda a) 10B₂O₃, b) 10B, c) 7B+3SiC, d) 7B+3B₄C, e) 3B+7SiC, f) 3B+7B₄C, g-n arası 6N'li karışımda, g) 10B₂O₃, h) 10B, k) 7B+3SiC, l) 7B+3B₄C m) 3B+7SiC, n) 3Boraks +7B₄C.



Şekil 6.48 (Devamı) 700-5h şartlarında PPB numunelerin SEM görüntüleri; a-f arası 6H'lı karışımında a) $10B_2O_3$, b) 10B, c) $7B+3SiC$, d) $7B+3B_4C$, e) $3B+7SiC$, f) $3B+7B_4C$, g-n arası 6N'li karışımında, g) $10B_2O_3$, h) 10B, k) $7B+3SiC$, l) $7B+3B_4C$, m) $3B+7SiC$, n) 3Boraks + $7B_4C$.

6.6 Mikrosertlik Sonuçları

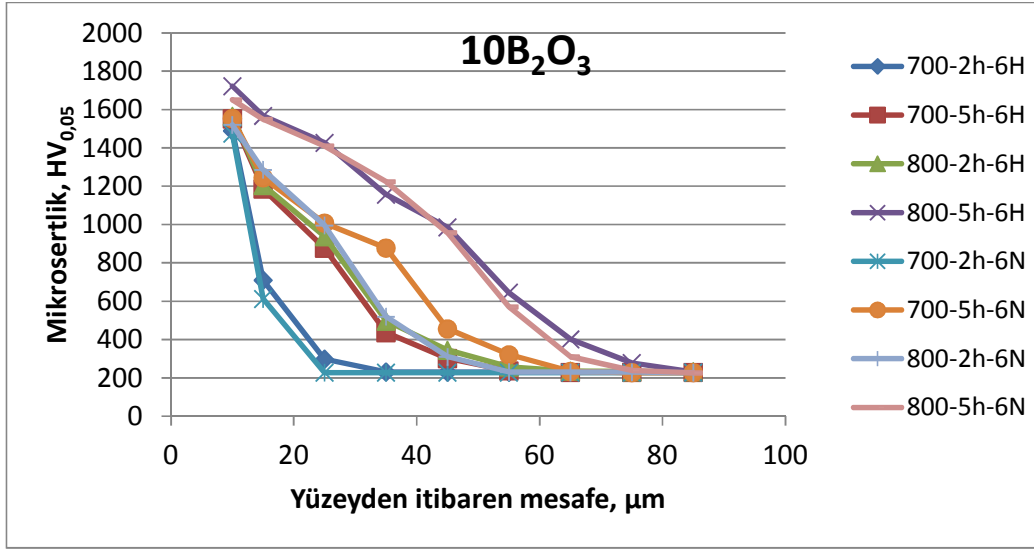
Şekil 6.49-6.59'da 700 ve 800°C'de 2 ve 5 saat süresince farklı B ve B_2O_3 karışımlı bor pastalarında 6H ve 6N gaz karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğine ait yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımlarını gösteren grafikler görülmektedir. PPB sıcaklık ve süresinin artmasıyla hem farklı B pastalı numunelerin hem de farklı B_2O_3 pastalı numunelerin

sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir. Çelikyürek (2006) demir alüminatları borlamış ve uygulanan işlem şartlarında bütün alaşımlar için işlem süresi ve sıcaklığı arttıkça oluşan borür tabakası sertliğinin arttığını tespit etmiştir. Li vd. (2008) yüksek krom içerikli Cr12Mn2V2 dökme demirini 900 ve 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerle borlamışlardır. Sıcaklık ve sürenin artmasıyla yüzey sertliğinin arttığını tespit etmişlerdir.

SiC takviyeli B ve B₂O₃’li karışımlarının B₄C takviyelilere göre daha düşük sertlik değerlerine sahip oldukları gözlenmiştir. 700-2h-6N şartında 3B₂O₃+7SiC pastasında 1394 HV_{0,05} elde edilirken, en yüksek sertlik değeri 800-5h-6H şartında 10B pastasında 1765 HV_{0,05} elde edilmiştir. Maragoudakis vd. (2002) US 37-1 çeliğini 1000°C’de 8 saat süreyle borlayıp ve ardından 500°C’de 18 saat süreyle gaz atmosferli bir fırında nitrüledikten sonra maksimum 1705 HV sertlik elde ederken, minimum 280 HV sertlik değeri elde etmişlerdir.

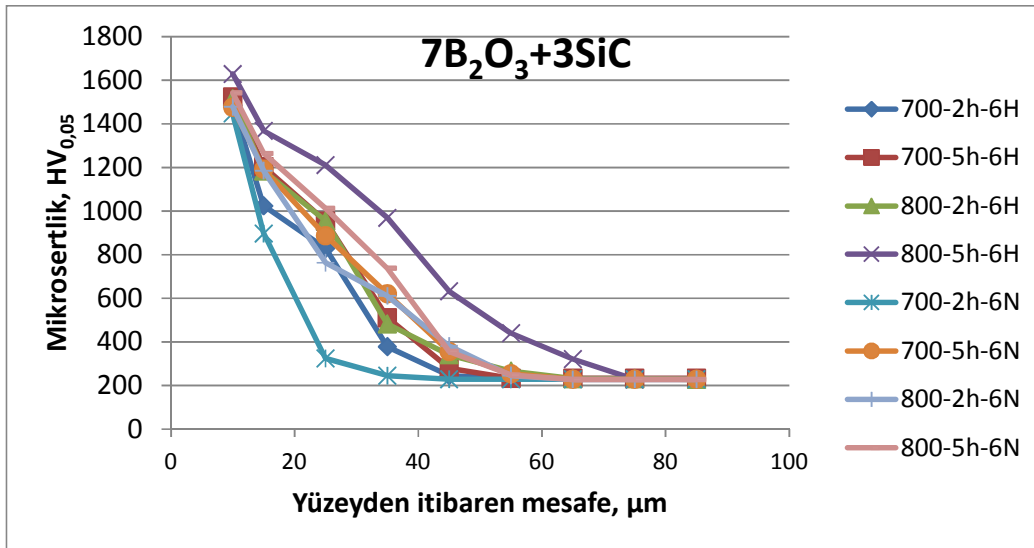
Tabur vd. (2009) AISI 8620 çeliğini 800, 850, 950°C sıcaklıkta; 2, 4, 6 saat sürelerle Ekabor 2 tozu ile kutu borlama işlemine tabi tutmuşlardır. 950°C sıcaklıkta 6 saat süreyle yapılan borlama işleminin sertliği 1850 HV_{0,1}, 950°C’de 2 saat sürede 1710 HV_{0,1}, 850°C’de 6 saat sürede 1750 HV_{0,1}, 850 °C ‘de 2 saat sürede 1650 HV_{0,1} olarak tespit etmişlerdir. Soydan (1996) 950°C’de 8 saat süreyle borlanmış AISI 8620 çeliğinin sertliğini 1700-1800 HV₁₀₀ olarak bulmuştur. Çalık vd. (2009) 1578-1610 HV_{0,1} değeri elde etmişlerdir. Sviridov vd. (2010) saf demiri %70Na₂B₄O₇+%30B₄C ve %70Na₂B₄O₇ + %30SiC karışımında 1000°C’de 0,5-18 saat aralıklarında borlamışlardır. FeB sertliği 1655 ± 60 HV, Fe₂B sertliği 1400 ± 60 HV ve demirin sertliğini 90 ± 10 HV olarak tespit etmişlerdir. Bu durum plazma pasta borlama ile daha düşük sıcaklık ve sürelerde, kutu borlama yapılmış çelik ile aynı sertlik değerlerine ulaşılabilirdiğinin bir göstergesidir.

Şekil 6.49’da 10B₂O₃ pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı görülmektedir. Şekle bakıldığında en yüksek sertlik değeri 800-5h-6H numunesinde yaklaşık olarak 1722 HV_{0,05} ve en düşük sertlik değeri ise 700-2h-6H numunesinde yaklaşık olarak 1490 HV_{0,05} tespit edilmiştir.



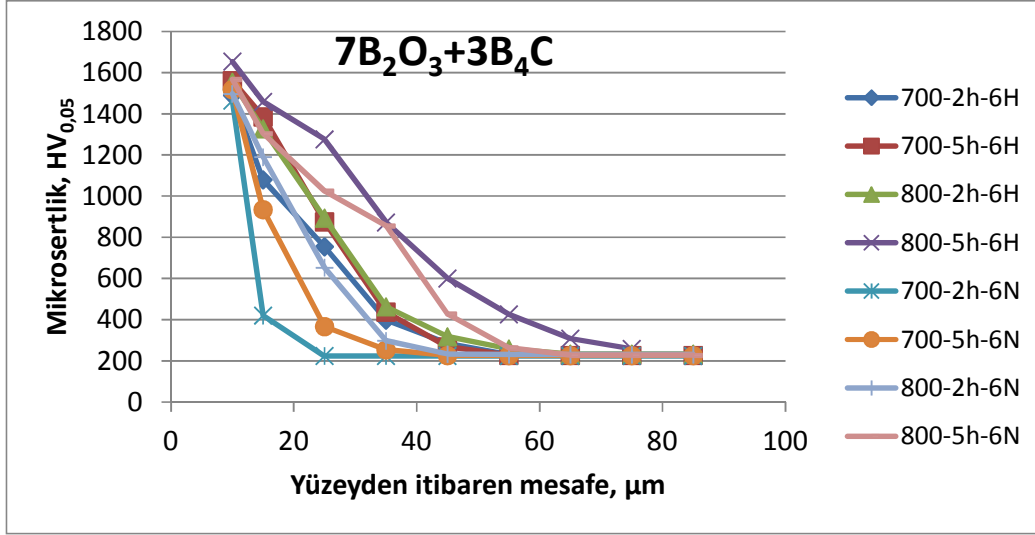
Şekil 6.49 10B₂O₃ pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı.

Şekil 6.50’de 7B₂O₃+3SiC pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı görülmektedir. Şekle bakıldığında en yüksek sertlik değeri 800-5h-6H numunesinde yaklaşık olarak 1628 HV_{0,05} ve en düşük sertlik değeri ise 700-2h-6N numunesinde yaklaşık olarak 1476 HV_{0,05} tespit edilmiştir.



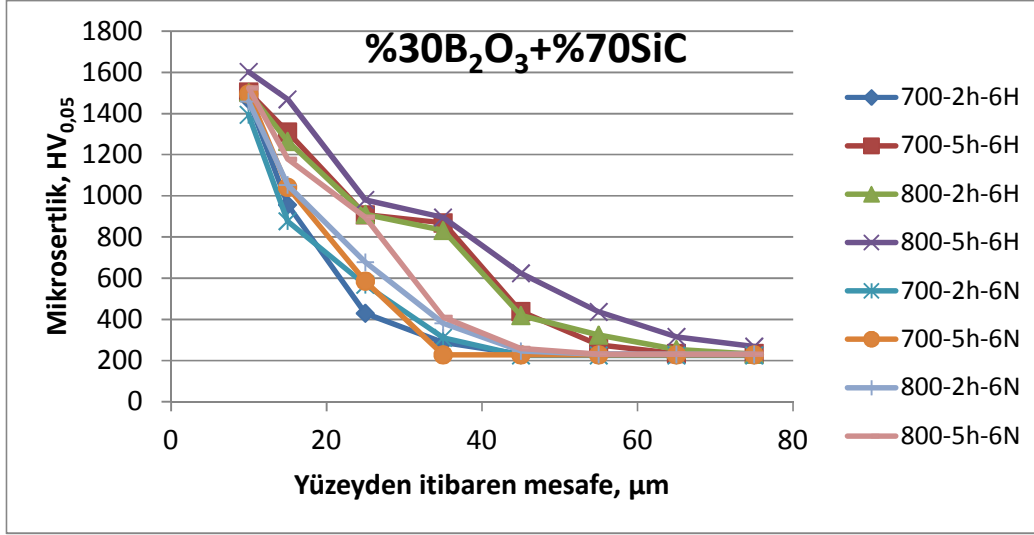
Şekil 6.50 7B₂O₃+3SiC pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı.

Şekil 6.51’de $7B_2O_3+3B_4C$ pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı görülmektedir. Şekle bakıldığında en yüksek sertlik değeri 800-5h-6H numunesinde yaklaşık olarak 1654 $HV_{0,05}$ ve en düşük sertlik değeri ise 700-2h-6N numunesinde yaklaşık olarak 1465 $HV_{0,05}$ tespit edilmiştir.



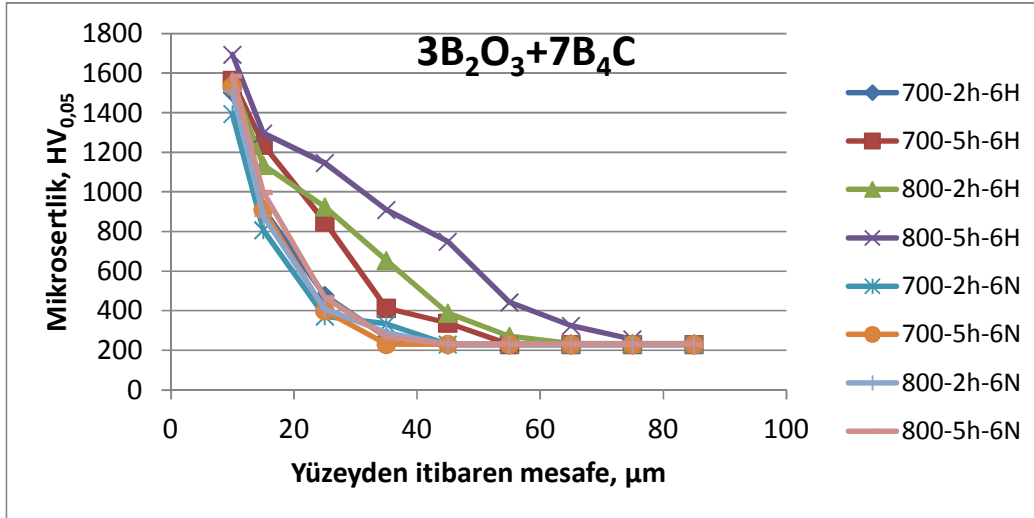
Şekil 6.51 $7B_2O_3+3B_4C$ pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı.

Şekil 6.52’de $3B_2O_3+7SiC$ pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı görülmektedir. Şekle bakıldığında en yüksek sertlik değeri 800-5h-6H numunesinde yaklaşık olarak 1602 $HV_{0,05}$ ve en düşük sertlik değeri ise 700-2h-6N numunesinde yaklaşık olarak 1394 $HV_{0,05}$ tespit edilmiştir.



Şekil 6.52 3B₂O₃+7SiC pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı

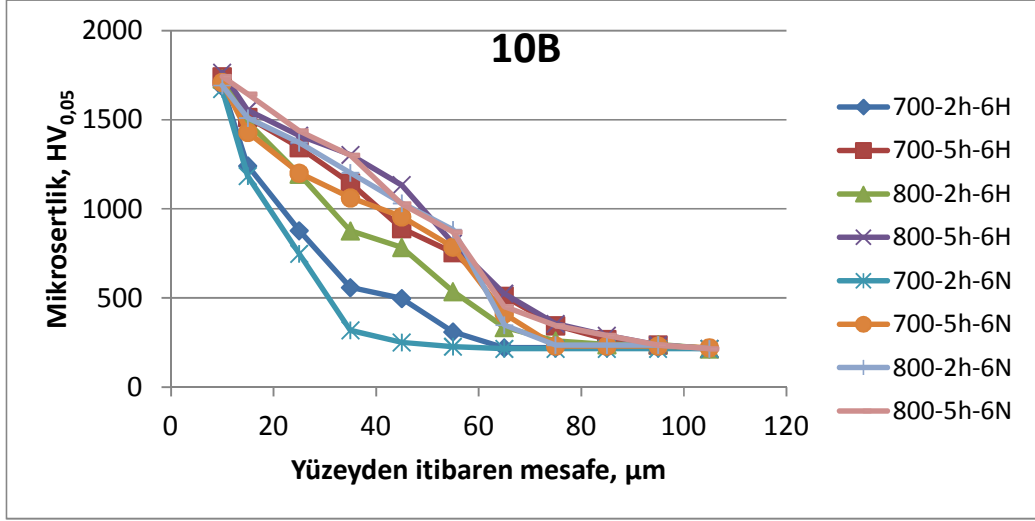
Şekil 6.53'te 3B₂O₃+7B₄C pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı görülmektedir. Şekle bakıldığında en yüksek sertlik değeri 800-5h-6H numunesinde yaklaşık olarak 1694 HV_{0,05} ve en düşük sertlik değeri ise 700-2h-6N numunesinde yaklaşık olarak 1397 HV_{0,05} tespit edilmiştir.



Şekil 6.53 3B₂O₃+7B₄C pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı

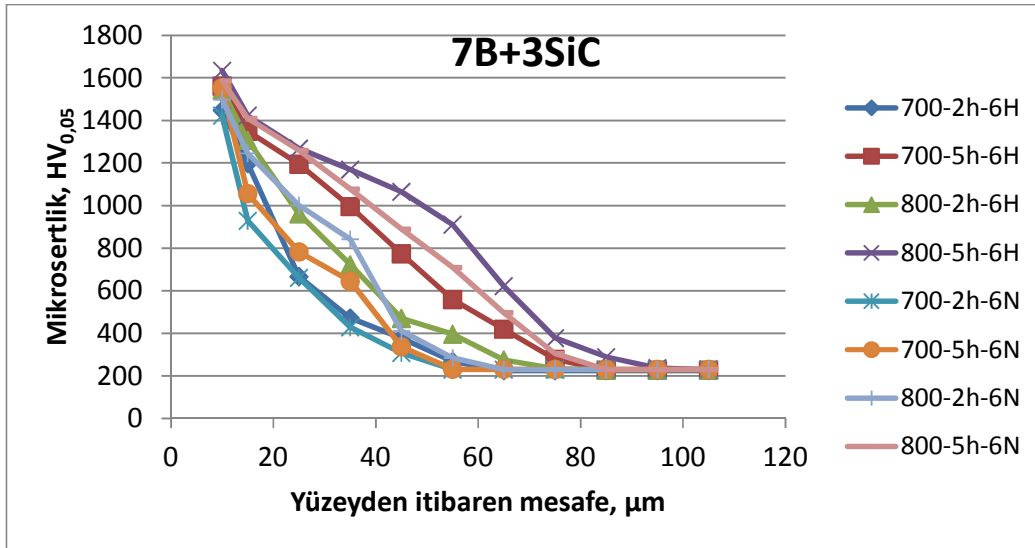
Şekil 6.54'te 10B pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı görülmektedir. Şekle bakıldığında en yüksek sertlik değeri 800-5h-6H

numunesinde yaklaşık olarak 1765 HV_{0,05} ve en düşük sertlik değeri ise 700-2h-6N numunesinde yaklaşık olarak 1673 HV_{0,05} tespit edilmiştir.



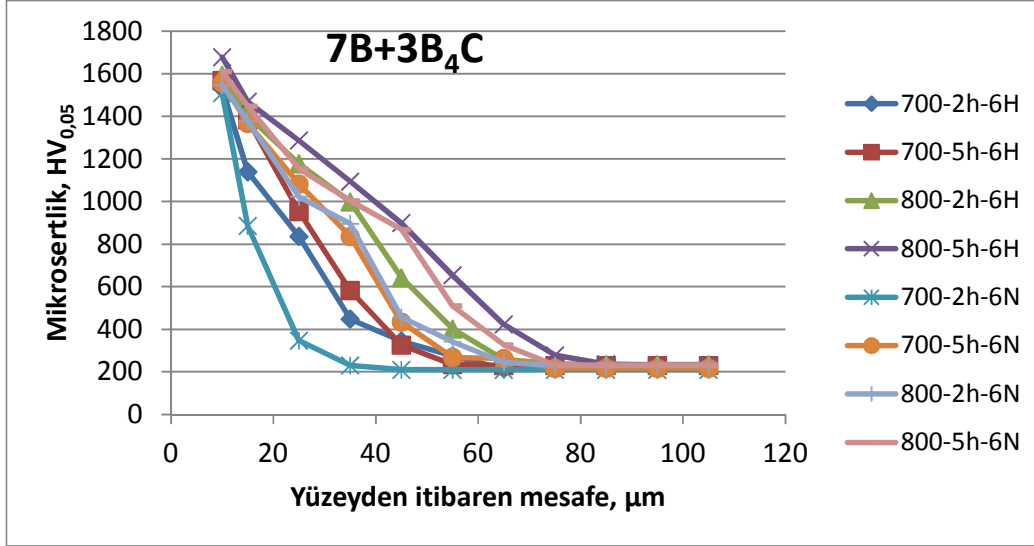
Şekil 6.54 10B pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı

Şekil 6.55'te 7B+3SiC pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı görülmektedir. Şekle bakıldığında en yüksek sertlik değeri 800-5h-6H numunesinde yaklaşık olarak 1634 HV_{0,05} ve en düşük sertlik değeri ise 700-2h-6N numunesinde yaklaşık olarak 1423 HV_{0,05} tespit edilmiştir.



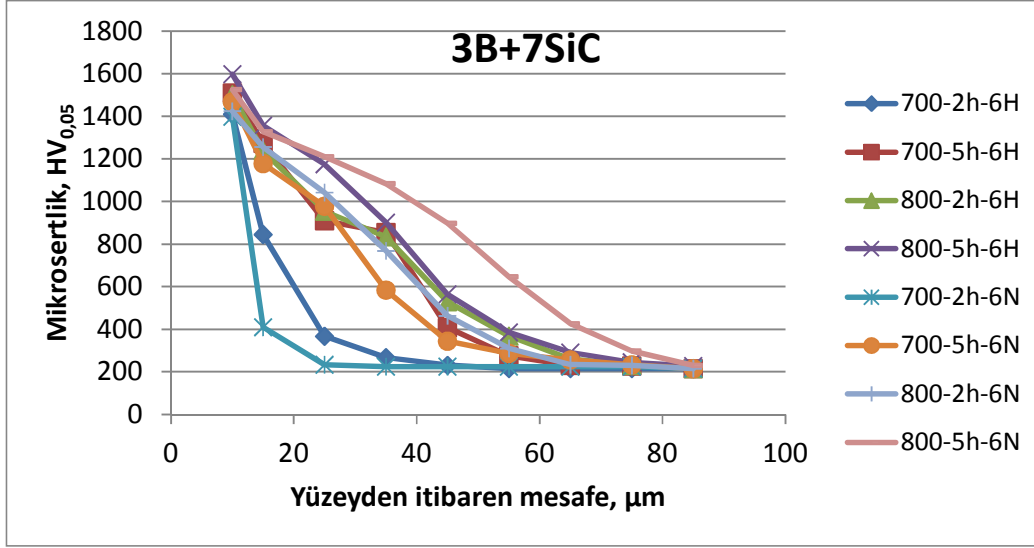
Şekil 6.55 %70B +%30 SiC pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı

Şekil 6.56'da 7B+3B₄C pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı görülmektedir. Şekle bakıldığında en yüksek sertlik değeri 800-5h-6H numunesinde yaklaşık olarak 1678 HV_{0,05} ve en düşük sertlik değeri ise 700-2h-6N numunesinde yaklaşık olarak 1510 HV_{0,05} tespit edilmiştir.



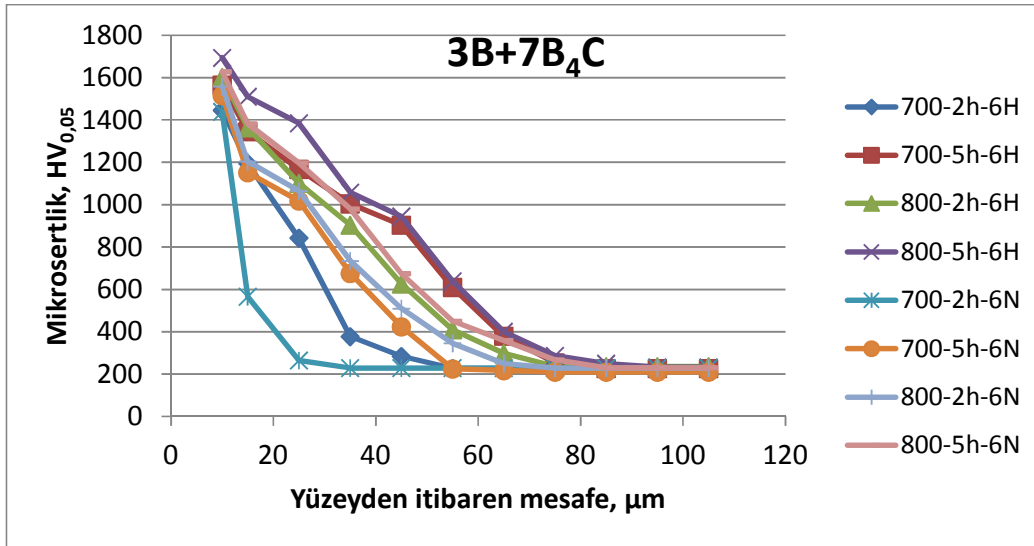
Şekil 6.56 7B +3B₄C pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı

Şekil 6.57'de 3B+7SiC pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı görülmektedir. Şekle bakıldığında en yüksek sertlik değeri 800-5h-6H numunesinde yaklaşık olarak 1598 HV_{0,05} ve en düşük sertlik değeri ise 700-2h-6N numunesinde yaklaşık olarak 1392 HV_{0,05} tespit edilmiştir.



Şekil 6.57 3B +7SiC pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı

Şekil 6.58'de 3B+7B₄C pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı görülmektedir. Şekle bakıldığında en yüksek sertlik değeri 800-5h-6H numunesinde yaklaşık olarak 1694 HV_{0,05} ve en düşük sertlik değeri ise 700-2h-6N numunesinde yaklaşık olarak 1439 HV_{0,05} tespit edilmiştir.



Şekil 6.58 3B+7B₄C pastasıyla PPB AISI 8620 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı

6.7 Aşınma ve Sürtünme Deney Sonuçları

Çizelge 6.2-6.5'te farklı gaz karışımlarında ve sıcaklıklarda B ve B₂O₃ pastalarında PPB aşındırılmış numunelerin aşınma iz derinlikleri verilmiştir. Aşınma sonrasında PPB bütün numunelerde aşınma iz derinliklerinin borür tabakasının altına inmediği tespit edilmiştir. Artan borlama sıcaklığıyla birlikte iz derinliklerinde düşüşler gözlenmiştir. 6H gaz karışımında B pastalar içinde en düşük aşınma iz derinliği 800-5h-6H-7B+3SiC numunesinde görülmüştür. 6H gaz karışımında B₂O₃ pasta karışımları içinde en düşük aşınma iz derinliği 800-5h-6H-7B₂O₃+3B₄C numunesinde görülmüştür. 6N gaz karışımında en düşük iz derinliği 800-5h-6N-7B₂O₃+3SiC ve 800-5h-6N-10B pastalı numunelerde elde edilmiştir.

Çizelge 6.2'te 6H gaz karışımında farklı % oranlarındaki B₂O₃ pasta karışımlarıyla PPB aşındırılmış numunelerin aşınma iz derinlikleri verilmiştir. Çizelgeye bakıldığında en düşük aşınma iz derinliği 800-5h-6H-7B₂O₃+3B₄C numunesinde aşınma sonucu 2,6 µm, en büyük aşınma iz derinliği ise 700-2h-6H-3B₂O₃+7B₄C numunesinde aşınma sonucu 11,5 µm iz derinliği tespit edilmiştir. Aşınma alanlarına baktığımızda en büyük aşınma alanı 2917 µm² ile 700-2h-6H-3B₂O₃+7SiC numunesinde elde edilirken, en küçük aşınma alanı 800-5h-6H-10B₂O₃ numunesinde 526 µm² elde edilmiştir.

Çizelge 6.2 6H gaz karışımında PPB aşındırılmış farklı % B₂O₃ pasta karışımlarının aşınma iz derinlikleri

Pasta Karışımı	İşlem Sıcaklığı (°C)	İşlem Süresi (saat)	Tabaka Kalınlığı (µm)	Aşınma İz Derinliği (µm)	Aşınma Alanı (µm) ²
10 B ₂ O ₃	700	2	8	6,60	2012
	700	5	15	6,46	1005
	800	2	18	5,81	1061
	800	5	46	4,65	526
7B ₂ O ₃ +3SiC	700	2	15	6,27	2188
	700	5	18	5,89	1294
	800	2	24	5,48	1147
	800	5	32	3,21	724
7B ₂ O ₃ +3B ₄ C	700	2	16	7,61	2202
	700	5	23	6,80	1064
	800	2	23	4,5	1103
	800	5	30	2,6	715

3B ₂ O ₃ +7SiC	700	2	13	8,49	2917
	700	5	22	5,17	1658
	800	2	23	6,01	1426
	800	5	25	2,74	836
3B ₂ O ₃ +7B ₄ C	700	2	12	7,45	2558
	700	5	18	11,5	1186
	800	2	24	6,89	1215
	800	5	35	5,3	767

Çizelge 6.2 (Devamı) 6H gaz karışımında PPB aşındırılmış farklı % B₂O₃ pasta karışımlarının aşınma iz derinlikleri

Çizelge 6.3'te 6H gaz karışımında farklı % oranlarındaki B pasta karışımlarıyla PPB aşındırılmış numunelerin aşınma iz derinlikleri verilmiştir. Çizelgeye bakıldığında en düşük aşınma iz derinliği 800-5h-6H-7B+3SiC numunesinde aşınma sonucu 1,4 µm, en büyük aşınma iz derinliği ise 700-5h-6H-3B+7SiC numunesinde aşınma sonucu 11,8 µm iz derinliği tespit edilmiştir. Aşınma alanlarına baktığımızda en büyük aşınma alanı 3B+7SiC pastasıyla 700-2h PPB aşındırılmış numunede 1905 µm² elde edilirken, en küçük aşınma alanı 800-5h 10B pastasıyla 313 µm² elde edilmiştir. Aşınma iz derinliği en düşük 800-5h-6H-7B+3SiC pastasıyla borlama sonucu elde edilmesine rağmen iz genişliği daha kalın olduğu için aynı sıcaklık ve sürede 10B pastasıyla yapılan pasta borlamaya göre daha büyük aşınma alanı ortaya çıkmıştır.

Çizelge 6.3 6H gaz karışımında PPB aşındırılmış farklı % B pasta karışımların aşınma iz derinlikleri

Pasta Karışımı	İşlem Sıcaklığı (°C)	İşlem Süresi (saat)	Tabaka Kalınlığı (µm)	Aşınma İz Derinliği (µm)	Aşınma Alanı (µm) ²
10B	700	2	16	11,6	1445
	700	5	48	5,4	891
	800	2	30	9,1	895
	800	5	50	1,61	313
7B+3SiC	700	2	13	8,84	1456
	700	5	30	4,44	955
	800	2	24	3,14	923
	800	5	34	1,4	386
7B+3B ₄ C	700	2	14	7,85	1431
	700	5	20	3,43	871
	800	2	26	3,14	923
	800	5	32	3,75	435

3B+7SiC	700	2	11	5,63	1905
	700	5	20	11,8	1008
	800	2	23	3,6	1041
	800	5	30	4,9	612
3B+7B ₄ C	700	2	20	5,17	1658
	700	5	32	4,42	1100
	800	2	22	3,85	1025
	800	5	33	8,02	586

Çizelge 6.3 (Devamı) 6H gaz karışımında PPB aşındırılmış farklı % B pasta karışımların aşınma iz derinlikleri

Çizelge 6.4'te 6N gaz karışımında farklı % oranlarındaki B₂O₃ pasta karışımlarıyla PPB aşındırılmış numunelerin aşınma iz derinlikleri verilmiştir. Çizelgeye bakıldığında en düşük aşınma iz derinliği 800-5h-6N-7B₂O₃+3SiC numunesinde aşınma sonucu 2,61 µm, en büyük aşınma iz derinliği ise 700-2h-6N-7B₂O₃+3SiC pastasıyla borlama sonucu 11,2 µm olarak tespit edilmiştir. Aşınma alanlarına baktığımızda en büyük aşınma alanı 2536 µm² ile 3B₂O₃+7SiC pastasıyla elde edilirken, en küçük aşınma alanı 800-5h-6N-10B₂O₃ pastasıyla 432 µm² elde edilmiştir.

Çizelge 6.4 6N gaz karışımında PPB aşındırılmış farklı % B₂O₃ pasta karışımların aşınma iz derinlikleri

Pasta Karışımı	İşlem Sıcaklığı (°C)	İşlem Süresi (saat)	Tabaka Kalınlığı (µm)	Aşınma İz Derinliği (µm)	Aşınma Alanı (µm) ²
10B ₂ O ₃	700	2	15	8,89	2440
	700	5	33	3	930
	800	2	20	3,83	1162
	800	5	53	5,58	432
7B ₂ O ₃ +3SiC	700	2	13	11,2	2491
	700	5	26	6,73	1287
	800	2	18	4,07	1380
	800	5	34	2,61	576
7B ₂ O ₃ +3B ₄ C	700	2	8	7,4	2242
	700	5	18	4,07	1342
	800	2	22	4,8	991
	800	5	30	3,19	477
3B ₂ O ₃ +7SiC	700	2	12	9,07	2536
	700	5	18	5,23	1255
	800	2	14	6,82	1467
	800	5	20	3,58	615

3B ₂ O ₃ +7B ₄ C	700	2	8	8,29	2424
	700	5	12	6,55	1341
	800	2	16	4,2	1359
	800	5	21	3,15	516

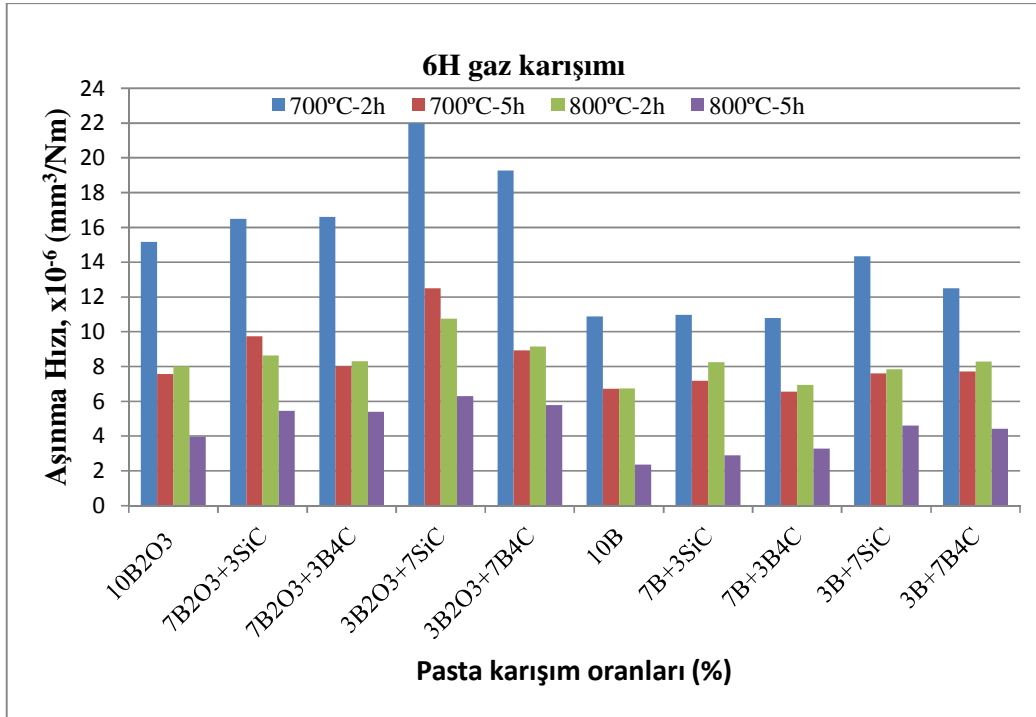
Çizelge 6.4 (Devamı) 6N gaz karışımında PPB aşındırılmış farklı % B₂O₃ pasta karışımların aşınma iz derinlikleri

Çizelge 6.5’de 6N gaz karışımında farklı % oranlarındaki B pasta karışımlarıyla PPB aşındırılmış numunelerin aşınma iz derinlikleri verilmiştir. Çizelgeye bakıldığında en düşük aşınma iz derinliği 800-5h-6N-10B numunesinde aşınma sonucu 1,71 µm, en büyük aşınma iz derinliği ise 800-2h-6N-3B+7B₄C numunesinde aşınma sonucu 8,66 µm olarak tespit edilmiştir. Aşınma alanlarına baktığımızda en büyük aşınma alanı 1949 µm² ile 700-2h-6N-3B+7SiC pastasıyla elde edilirken, en küçük aşınma alanı 800-5h-6N-10B pastasıyla 334 µm² tespit edilmiştir.

Çizelge 6.5 6N gaz karışımında PPB aşındırılmış farklı % B pasta karışımların aşınma iz derinlikleri

Pasta Karışımı	İşlem Sıcaklığı (°C)	İşlem Süresi (saat)	Tabaka Kalınlığı (µm)	Aşınma İz Derinliği (µm)	Aşınma Alanı (µm) ²
10B	700	2	20	6,39	1882
	700	5	50	4,78	1045
	800	2	43	4,5	877
	800	5	60	1,71	334
7B+3SiC	700	2	21	6,31	1849
	700	5	18	6,37	1252
	800	2	28	3,41	1113
	800	5	47	3,2	422
7B+3B ₄ C	700	2	17	7,28	1787
	700	5	30	6,85	1186
	800	2	23	3,6	897
	800	5	35	3,61	345
3B+7SiC	700	2	9	6,01	1949
	700	5	25	4,82	1284
	800	2	26	4,39	1160
	800	5	45	2,4	494
3B+7B ₄ C	700	2	10	7,58	1776
	700	5	28	5,03	1189
	800	2	21	8,66	938
	800	5	40	6,29	437

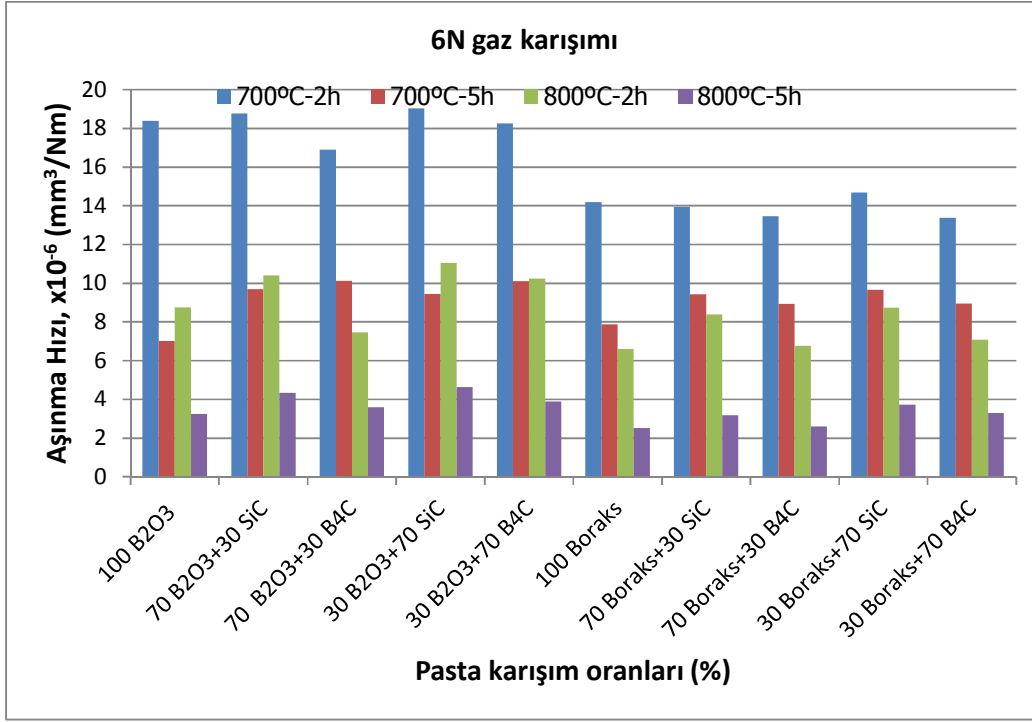
Şekil 6.59’da 6H gazı altında farklı % B ve B₂O₃ pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin borlama sıcaklığına ve süresine bağlı olarak aşınma hızı değişimi grafikleri görülmektedir. Şekle bakıldığında farklı % B ve B₂O₃ pasta karışımlarıyla PPB numunelerde borlama işlem sıcaklığının ve süresinin artmasıyla aşınma hızlarında düşüşler gözlenmiştir (Şahin vd. 2009). Cho vd. (2004) Ni-Cr-Mo çeliğini plazma pasta borlayıp ASTM G65’e göre dizayn edilmiş aşınma cihazında aşınma deneylerini yapmışlardır. Borlama işlemini 700-1000°C arasında 1-7 saat sürelerle 2:1 Ar/H₂ gaz karışımında gerçekleştirmişler ve en iyi aşınma direncini 900 ve 1000°C’de yapılan borlama deneyleri sonucunda bulmuşlardır. En düşük aşınma hızı 800-5h-6H-10B numunesinde yaklaşık olarak $2,359 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ iken, en yüksek aşınma hızı ise 700-2h-6H-3B₂O₃+7SiC numunesinde $21,982 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.59 6H gaz karışımıyla farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin aşınma hız grafiği

Şekil 6.60’da 6N gazı altında yapılan PPB numunelerin aşınma hızı grafikleri görülmektedir. 6H gaz karışımında olduğu gibi sıcaklığın ve sürenin artmasıyla aşınma hızlarında düşüşler gözlenmiştir (Yünker 2000). B pastasıyla yapılan PPB numunelerin

B₂O₃ pastasıyla yapılan PPB numunelere göre aşınmaya karşı dirençlerinin daha iyi olduğu görülmüştür. En düşük aşınma hızı 800-5h-6N-10B numunesinde yaklaşık olarak $2,517 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ iken, en yüksek aşınma hızı ise 700-2h-6N-3B₂O₃+7SiC numunesinde $19,035 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ olarak tespit edilmiştir.



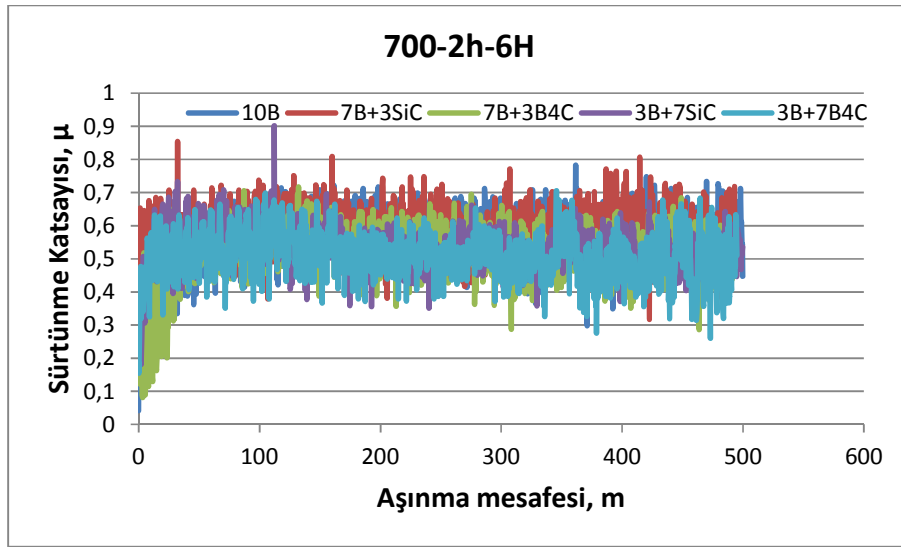
Şekil 6.60 6N gaz karışımıyla farklı pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin aşınma hız grafiği

B pastalı numunelerde aşınma hızı B₂O₃ pastalı numunelere göre biraz daha düşüktür. B pastalı numunelerin sertliğinin daha yüksek olduğundan daha uzun süre aşınmaya karşı direnç göstermiştir. B ve B₂O₃ pastalarına ilave SiC ve B₄C karşılaştırıldığında B₄C ilaveli pasta karışımlarının SiC ilaveli pasta karışımlarına oranla daha iyi aşınma direnci göstermişlerdir.

Gaz karışım oranlarına bakıldığında azot miktarının artmasıyla aşınma hızlarında bir miktar artış gözlenmiştir. Örneğin 6H gaz karışımında 800-5h-6H-10B PPB numune aşınma hızı $2,358 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ iken aynı sıcaklık ve sürede 6N gaz karışımında 10B numunesinde $2,517 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ tespit edilmiştir. 6N gaz karışımında yapılan PPB sonucunda yüzeyde çok bileşenli borür ve nitrür fazlarının oluşması, bunlarında

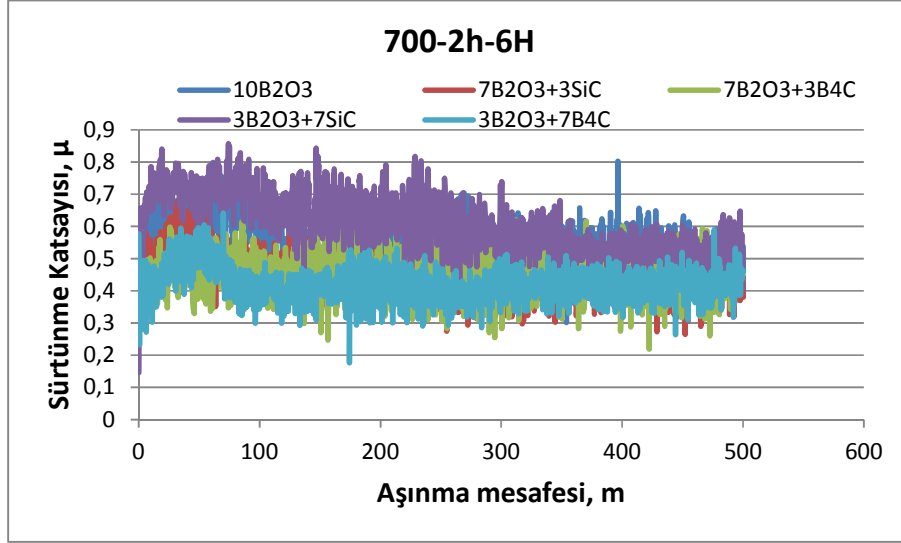
genleşme katsayılarının farklı olmasından dolayı 6H gaz karışımına göre biraz daha fazla aşınmış olabilirler.

Şekil 6.61'de 700-2h-6H-B ve B pasta karışımlarında PPB numunelerin aşınma mesafesi-sürtünme katsayısı grafikleri görülmektedir. Sürtünme katsayıları birbirine yakın değerler tespit edilmiştir. Yapılan deneylerin ortalaması alındığında en düşük sürtünme katsayısı 3B+7B₄C numunesinde yaklaşık olarak 0,51 iken, en yüksek sürtünme katsayısı ise 7B+3SiC numunesinde yaklaşık olarak 0,58 tespit edilmiştir.



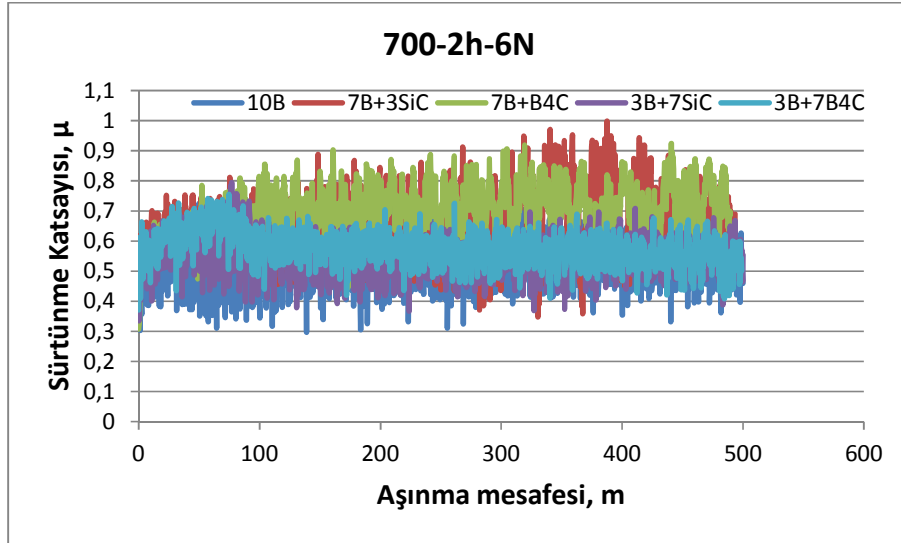
Şekil 6.61 700-2h-6H şartlarında farklı B pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 6.62 'de 700-2h-6H-B₂O₃ ve B₂O₃ pasta karışımlarında PPB numunelerin aşınma mesafesi-sürtünme katsayısı grafikleri görülmektedir. Başlangıçta 3B₂O₃+7SiC numunesinde sürtünme katsayısı yüksekken daha sonra düşüş gözlenmiştir. Yapılan deneylerin ortalaması alındığında en düşük sürtünme katsayısı 3B₂O₃+7B₄C numunesinde yaklaşık olarak 0,42 iken, en yüksek sürtünme katsayısı ise 3B₂O₃+7SiC numunesinde yaklaşık olarak 0,61 tespit edilmiştir.



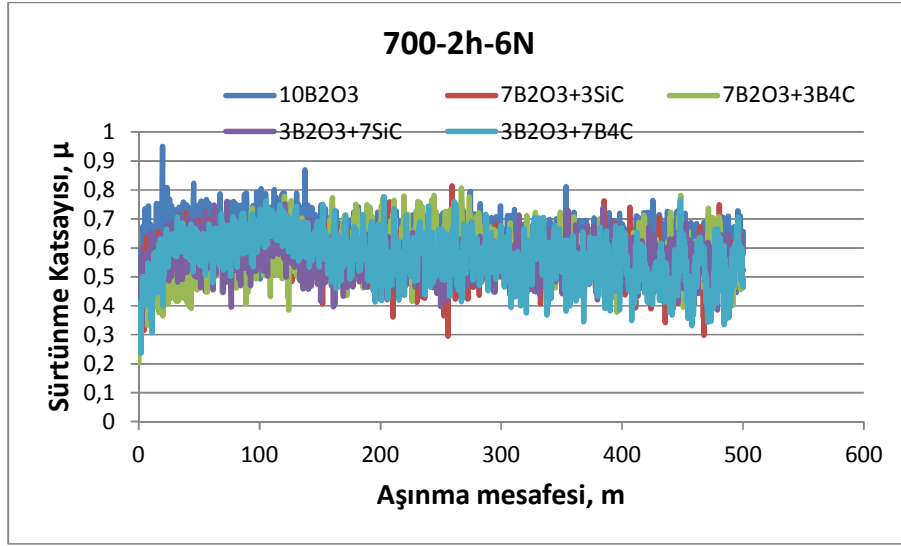
Şekil 6.62 700-2h-6H şartlarında farklı B_2O_3 pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 6.63 'te 700-2h-6N-B ve B pasta karışımlarında PPB numunelerin aşınma mesafesi-sürtünme katsayısı grafikleri görülmektedir. Pasta karışımlarının sürtünme katsayıları birbirine yakın çıkmıştır. Aşınma mesafesine bağlı olarak büyük bir değişiklik olmamıştır. Yapılan deneylerin ortalaması alındığında en düşük sürtünme katsayısı 10B numunesinde yaklaşık olarak 0,53 iken, en yüksek sürtünme katsayısı ise 7B+3B₄C numunesinde yaklaşık olarak 0,7 tespit edilmiştir.



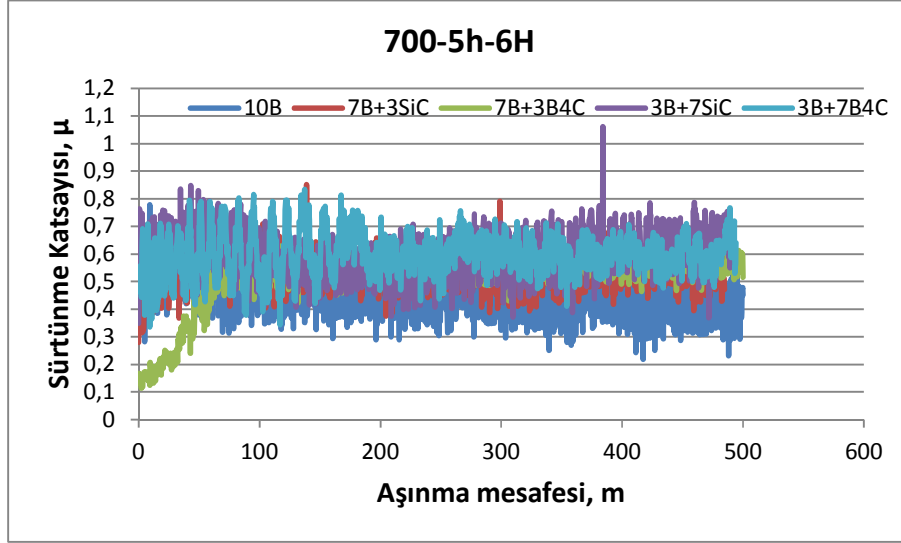
Şekil 6.63 700-2h-6N şartlarında farklı B pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 6.64 'te 700-2h-6N-B₂O₃ ve B₂O₃ pasta karışımlarında PPB numunelerin aşınma mesafesi-sürtünme katsayısı grafikleri görülmektedir. Pasta karışımlarının sürtünme katsayıları birbirine yakın çıkmıştır. Yaklaşık 50 m aşınma sonunda sürtünme katsayılarında az miktarda artış görülmüştür. Yapılan deneylerin ortalaması alındığında en düşük sürtünme katsayısı 10 B₂O₃ numunesinde yaklaşık olarak 0,55 iken, en yüksek sürtünme katsayısı ise 7B₂O₃+3B₄C ve 3B₂O₃+7B₄C numunesinde yaklaşık olarak 0,7 tespit edilmiştir.



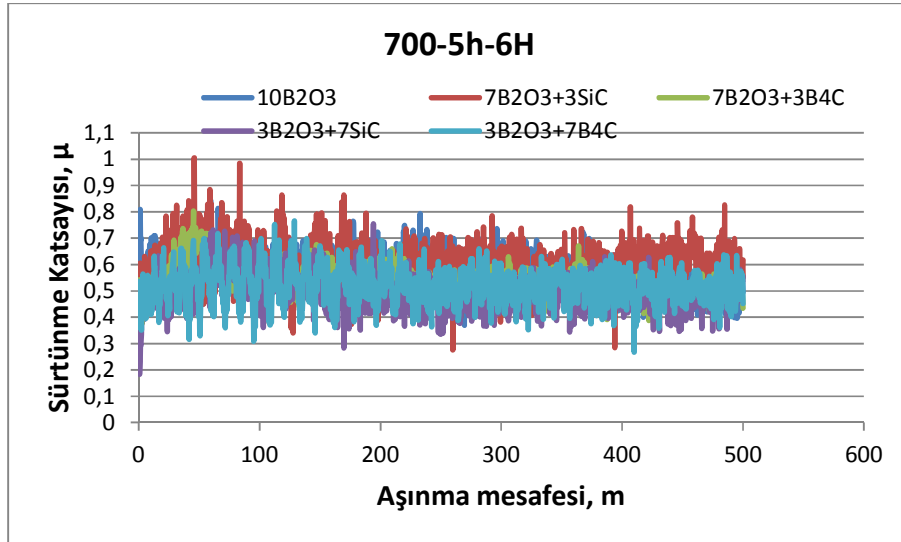
Şekil 6.64 700-2h-6N şartlarında farklı B₂O₃ pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 6.65 'te 700-5h-6H-B ve B pasta karışımlarında PPB numunelerin aşınma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı grafikleri görülmektedir. Pasta karışımlarının sürtünme katsayıları birbirine yakın çıkmıştır. 7B+3B₄C numunesinin başlangıçta sürtünme katsayısı değeri, diğer karışımların sürtünme katsayısına oranla düşükken, yaklaşık 80 m sonunda diğer pasta karışımlarının sürtünme katsayısı ile hemen hemen eşitlenmiştir. Yapılan deneylerin ortalaması alındığında en düşük sürtünme katsayısı 10 B numunesinde yaklaşık olarak 0,45 iken, en yüksek sürtünme katsayısı ise 3B+7SiC numunesinde yaklaşık olarak 0,59 tespit edilmiştir.



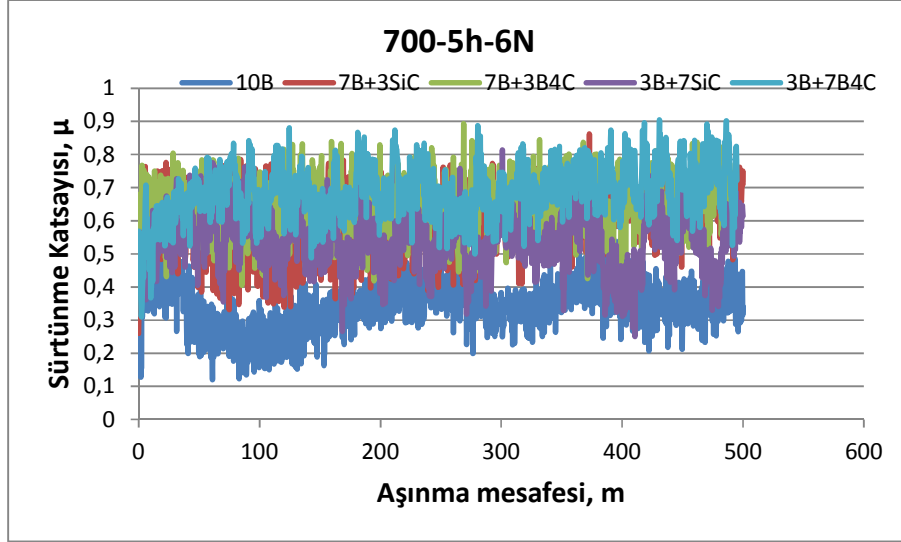
Şekil 6.65 700-5h-6H şartlarında farklı B pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 6.66 'da 700-5h-6H- B_2O_3 ve B_2O_3 pasta karışımlarında PPB numunelerin aşınma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı grafikleri görülmektedir. Pasta karışımlarının sürtünme katsayıları birbirine yakın çıkmıştır. 500m mesafe sonunda sürtünme katsayılarında değişiklik olmamıştır. Yapılan deneylerin ortalaması alındığında en düşük sürtünme katsayısı $7B_2O_3+3SiC$ numunesinde yaklaşık olarak 0,43 iken, en yüksek sürtünme katsayısı ise $10B_2O_3$ numunesinde yaklaşık olarak 0,57 tespit edilmiştir.



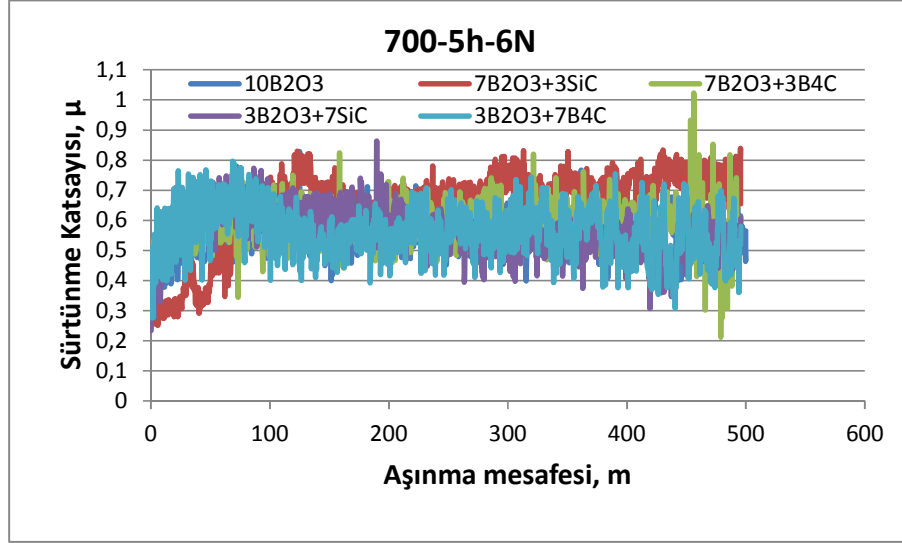
Şekil 6.66 700-5h-6H şartlarında farklı B_2O_3 pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 6.67’de 700-5h-6N-B ve B pasta karışımlarında PPB numunelerin aşınma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı grafikleri görülmektedir. Pasta karışımlarının sürtünme katsayıları birbirine yakın çıkmıştır. 10B numunesinin sürtünme katsayısı değeri, diğer karışımların sürtünme katsayısına oranla düşük çıkmıştır (yaklaşık 0,34). En yüksek sürtünme katsayısı ise 7B+3B₄C numunesinde yaklaşık olarak 0,64 tespit edilmiştir.



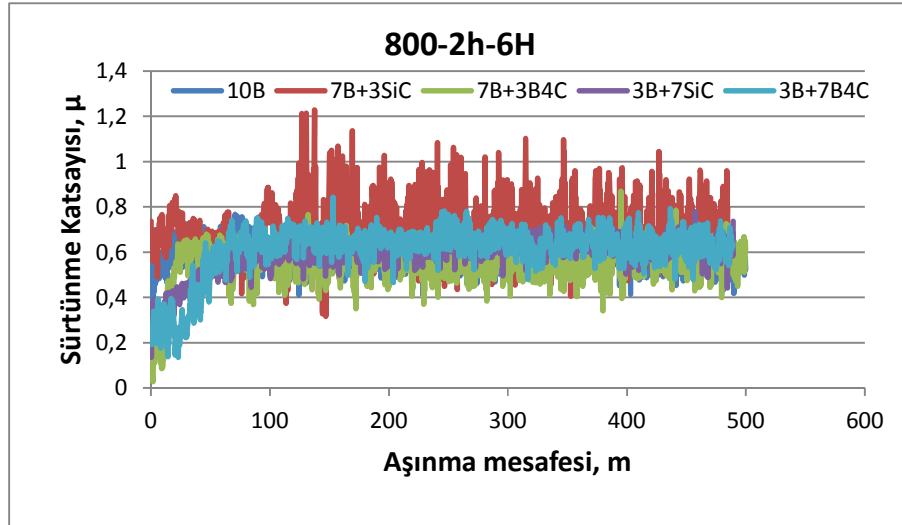
Şekil 6.67 700-5h-6N şartlarında farklı B pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 6.68’de 700-5h-6N-B₂O₃ ve B₂O₃ pasta karışımlarında PPB numunelerin aşınma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı grafikleri görülmektedir. Pasta karışımlarının sürtünme katsayıları birbirine yakın çıkmıştır. Başlangıçta sürtünme katsayıları düşükken yaklaşık 80 m yol sonunda sürtünme katsayılarında bir miktar artış tespit edilmiştir. Yapılan deneylerin ortalaması alındığında en düşük sürtünme katsayısı 7B₂O₃+3B₄C numunesinde yaklaşık olarak 0,54 iken, en yüksek sürtünme katsayısı ise 7B₂O₃+3SiC numunesinde yaklaşık olarak 0,65 tespit edilmiştir.



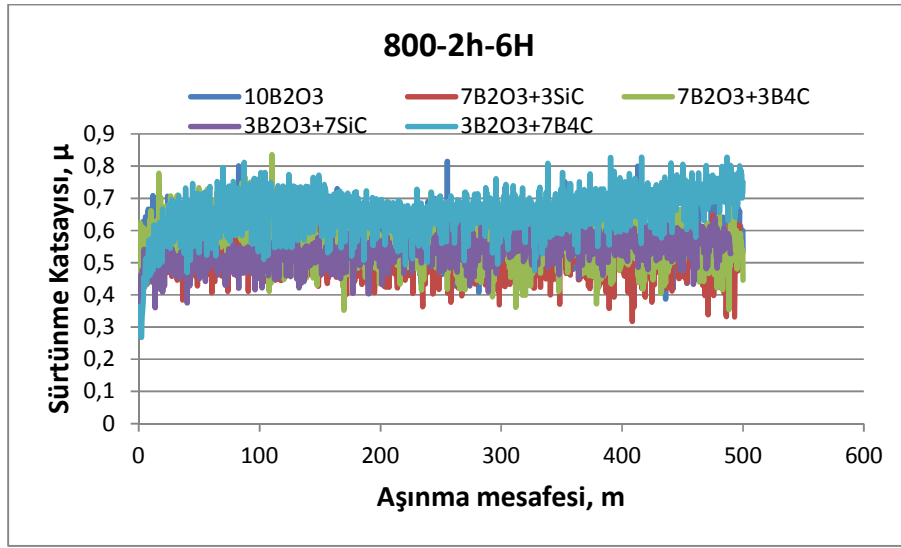
Şekil 6.68 700-5h-6N şartlarında farklı B₂O₃ pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 6.69'da 800-2h-6H-B ve B pasta karışımlarında PPB numunelerin aşınma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı grafikleri görülmektedir. Grafiğe bakıldığında 7B+3SiC numunesi yaklaşık 120 m sonunda sürtünme katsayısı sapma miktarında (genlik) artış olmuştur. Diğer pasta karışımlarında değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Yapılan deneylerin ortalaması alındığında en düşük sürtünme katsayısı 7B+3B₄C numunesinde yaklaşık olarak 0,55 iken, en yüksek sürtünme katsayısı ise 7B+3SiC numunesinde yaklaşık olarak 0,71 tespit edilmiştir.



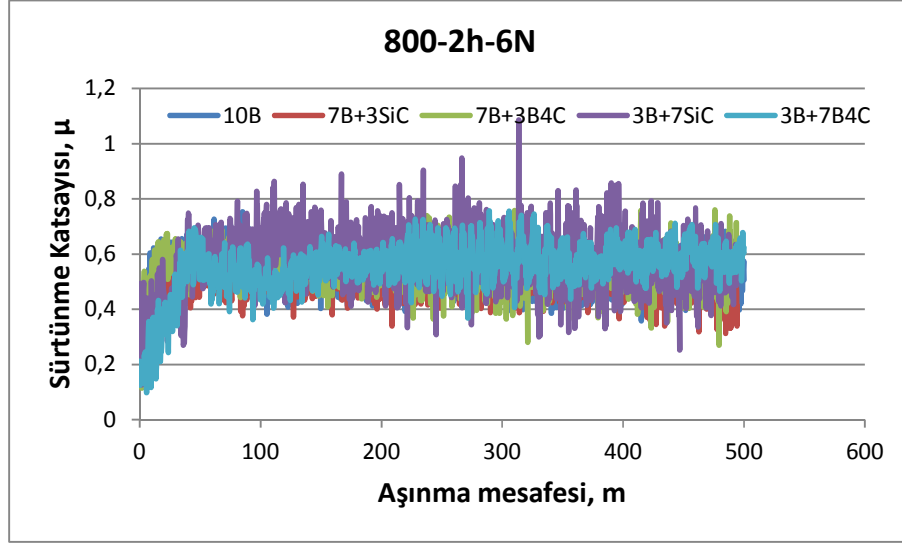
Şekil 6.69 800-2h-6H şartlarında farklı B pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 6.70'de 800-2h-6H-B₂O₃ ve B₂O₃ pasta karışımlarında PPB numunelerin aşınma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı grafikleri görülmektedir. Pasta karışımlarının sürtünme katsayıları birbirine yakın çıkmıştır. Sürtünme katsayıları 500m yol boyunca neredeyse hiç değişmemiştir. Yapılan deneylerin ortalaması alındığında en düşük sürtünme katsayısı 7B₂O₃+3SiC numunesinde yaklaşık olarak 0,51 iken, en yüksek sürtünme katsayısı ise 3B₂O₃+7B₄C numunesinde yaklaşık olarak 0,62 tespit edilmiştir.



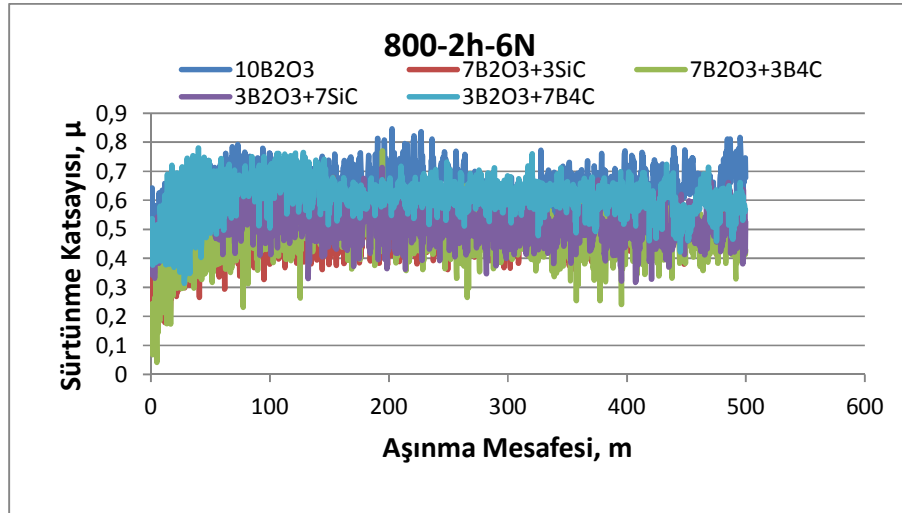
Şekil 6.70 800-2h-6H şartlarında farklı B₂O₃ pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 6.71'de 800-2h-6N-B ve B pasta karışımlarında PPB numunelerin aşınma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı grafikleri görülmektedir. Pasta karışımlarının sürtünme katsayıları birbirine yakın çıkmıştır. Yapılan deneylerin ortalaması alındığında en düşük sürtünme katsayısı 3B+7B₄C numunesinde yaklaşık olarak 0,48 iken, en yüksek sürtünme katsayısı ise 3B+7SiC numunesinde yaklaşık olarak 0,67 tespit edilmiştir.



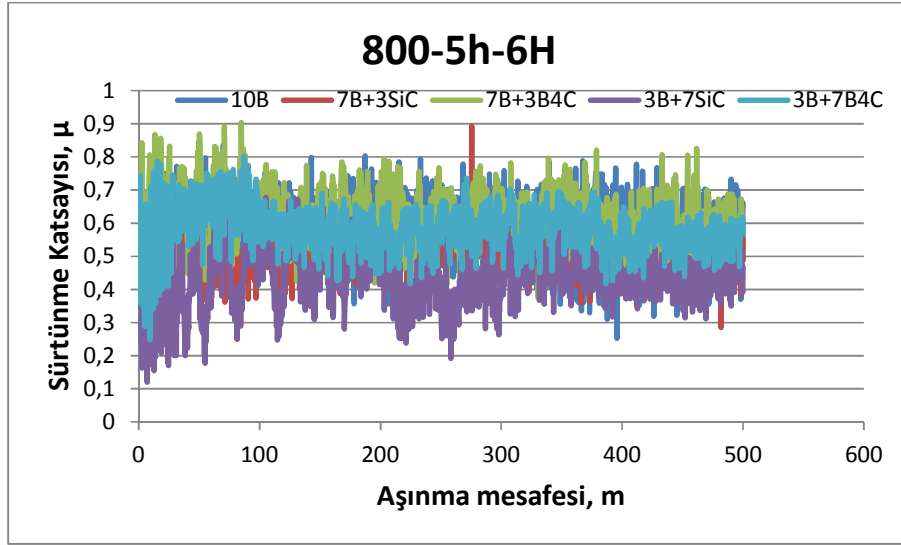
Şekil 6.71 800-2h-6N şartlarında farklı B pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 6.72’de 800-2h-6N-B₂O₃ ve B₂O₃ pasta karışımlarında PPB numunelerin aşınma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı grafikleri görülmektedir. Pasta karışımlarının sürtünme katsayıları birbirine yakın çıkmıştır. Sürtünme katsayıları 500 m yol boyunca neredeyse hiç değişmemiştir. Yapılan deneylerin ortalaması alındığında en düşük sürtünme katsayısı 7B₂O₃+3SiC numunesinde yaklaşık olarak 0,47 iken, en yüksek sürtünme katsayısı ise 10B₂O₃ numunesinde yaklaşık olarak 0,66 tespit edilmiştir.



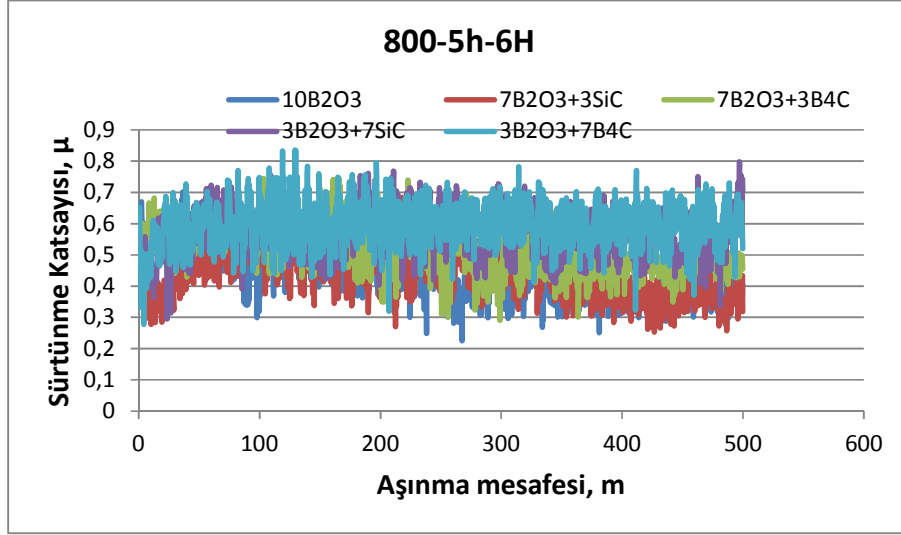
Şekil 6.72 800-2h-6N şartlarında farklı B₂O₃ pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 6.73'te 800-5h-6H-B ve B pasta karışımlarında PPB numunelerin aşınma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı grafikleri görülmektedir. Diğer pasta karışımlarından farklı olarak 3B+7SiC pastasında sürtünme katsayısı daha düşüktür (0,45). Yapılan deneylerin ortalaması alındığında en yüksek sürtünme katsayısı ise 3B+7B₄C numunesinde yaklaşık olarak 0,66 tespit edilmiştir.



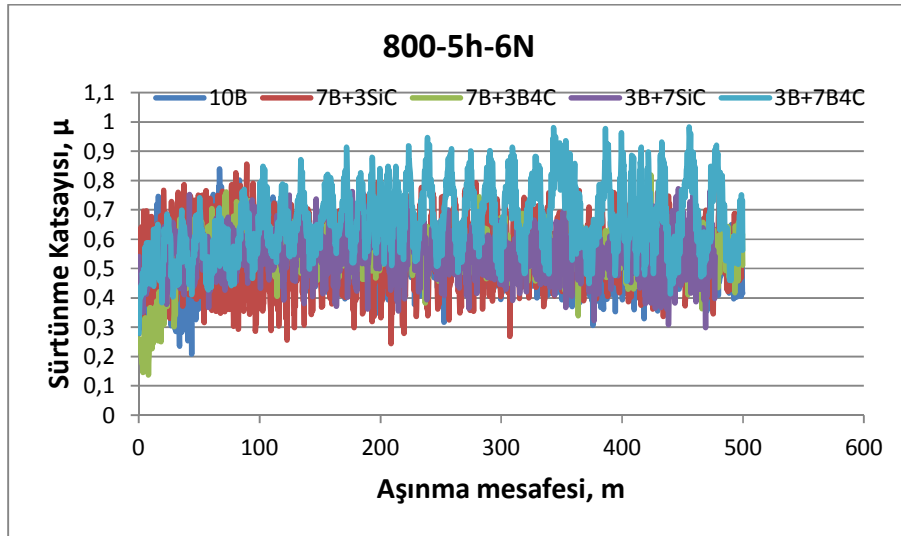
Şekil 6.73 800-5h-6H şartlarında farklı B pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 6.74'te 800-5h-6H-B₂O₃ ve B₂O₃ pasta karışımlarında PPB numunelerin aşınma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı grafikleri görülmektedir. Pasta karışımlarının sürtünme katsayıları birbirine yakın çıkmıştır. Sürtünme katsayıları 500 m yol boyunca neredeyse hiç değişmemiştir. Yapılan deneylerin ortalaması alındığında en düşük sürtünme katsayısı 7B₂O₃+3SiC numunesinde yaklaşık olarak 0,44 iken, en yüksek sürtünme katsayısı ise 3B₂O₃+7B₄C numunesinde yaklaşık olarak 0,6 tespit edilmiştir.



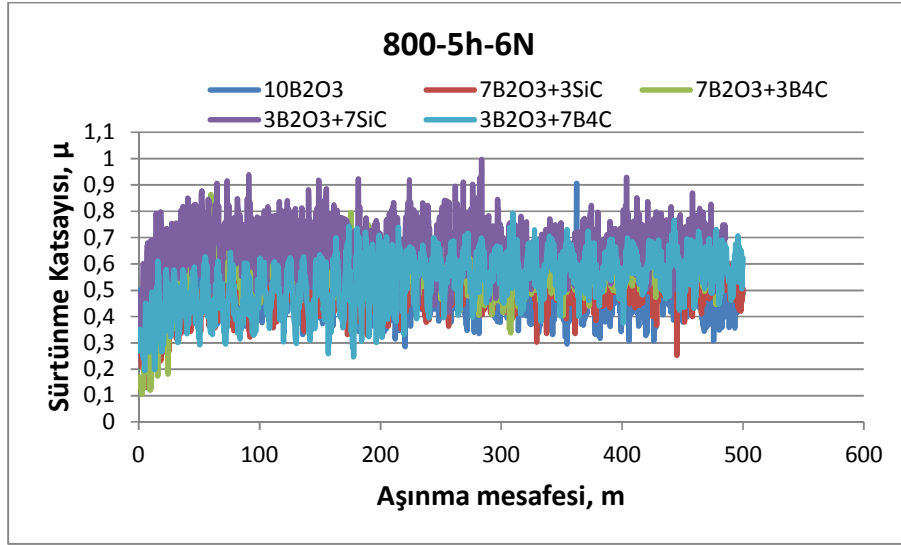
Şekil 6.74 800-5h-6H şartlarında farklı B_2O_3 pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 6.75'te 800-5h-6H-B ve B pasta karışımlarında PPB numunelerin aşınma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı grafikleri görülmektedir. Diğer pasta karışımlarından farklı olarak 7B+3B₄C pastasında sürtünme katsayısı başlangıçta daha düşüktür, yaklaşık 80 m sonunda sürtünme katsayısında bir miktar artış gözlenmiştir. (0,45). Yapılan deneylerin ortalaması alındığında en düşük sürtünme katsayısı 10B ve 7B+3B₄C numunelerinde 0,53 iken, en yüksek sürtünme katsayısı ise 3B+7B₄C numunesinde yaklaşık olarak 0,66 tespit edilmiştir.



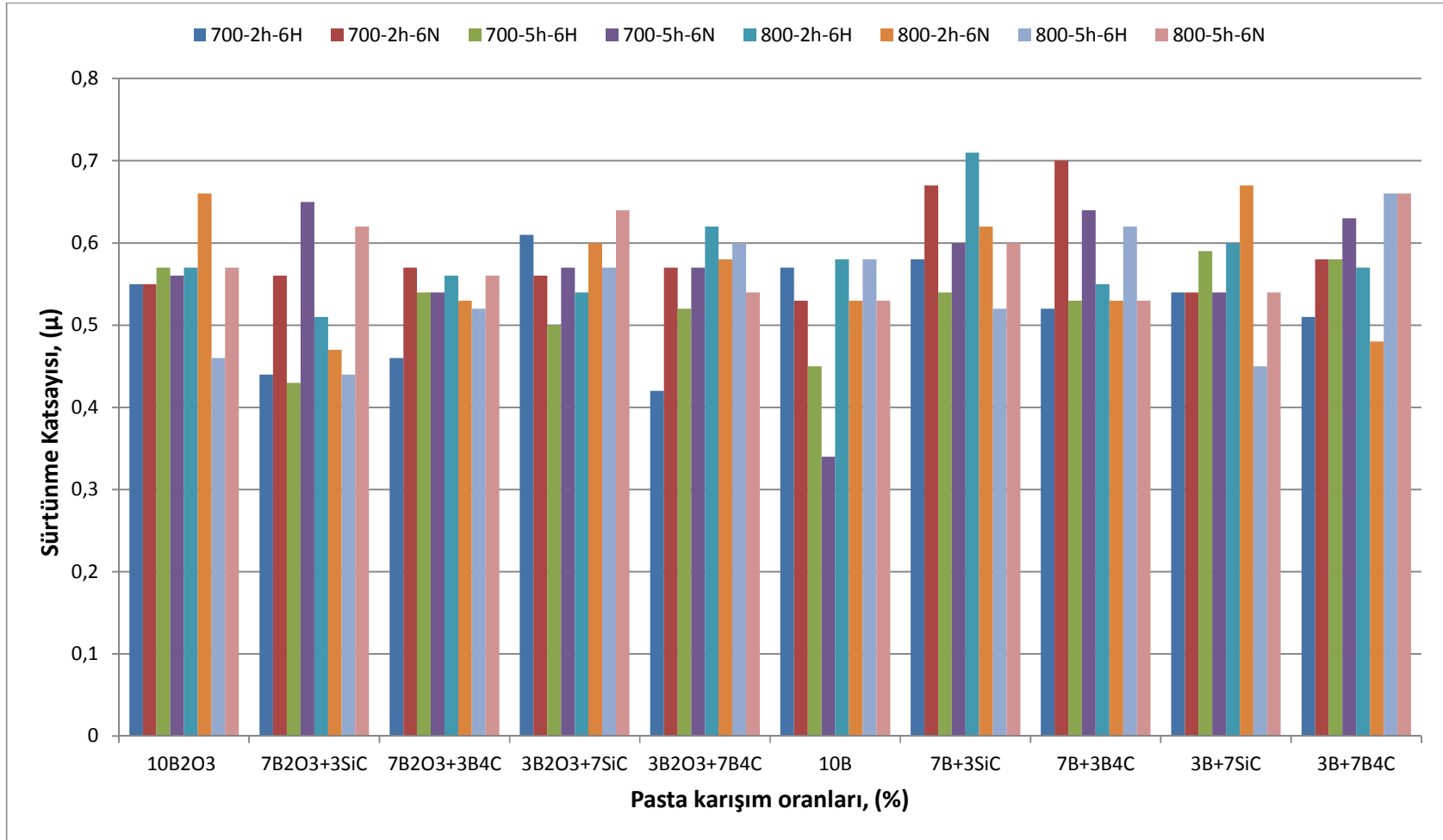
Şekil 6.75 800-5h-6N şartlarında farklı B pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 6.76'da 800-5h-6N-B₂O₃ ve B₂O₃ pasta karışımlarında PPB numunelerin aşınma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı grafikleri görülmektedir. Pasta karışımlarının sürtünme katsayıları birbirine yakın çıkmıştır. Yapılan deneylerin ortalaması alındığında en düşük sürtünme katsayısı 3B₂O₃+7B₄C numunesinde yaklaşık olarak 0,54 iken, en yüksek sürtünme katsayısı ise 3B₂O₃+7SiC numunesinde yaklaşık olarak 0,64 tespit edilmiştir.



Şekil 6.76 800-5h-6H şartlarında farklı B₂O₃ pasta karışımlarında PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

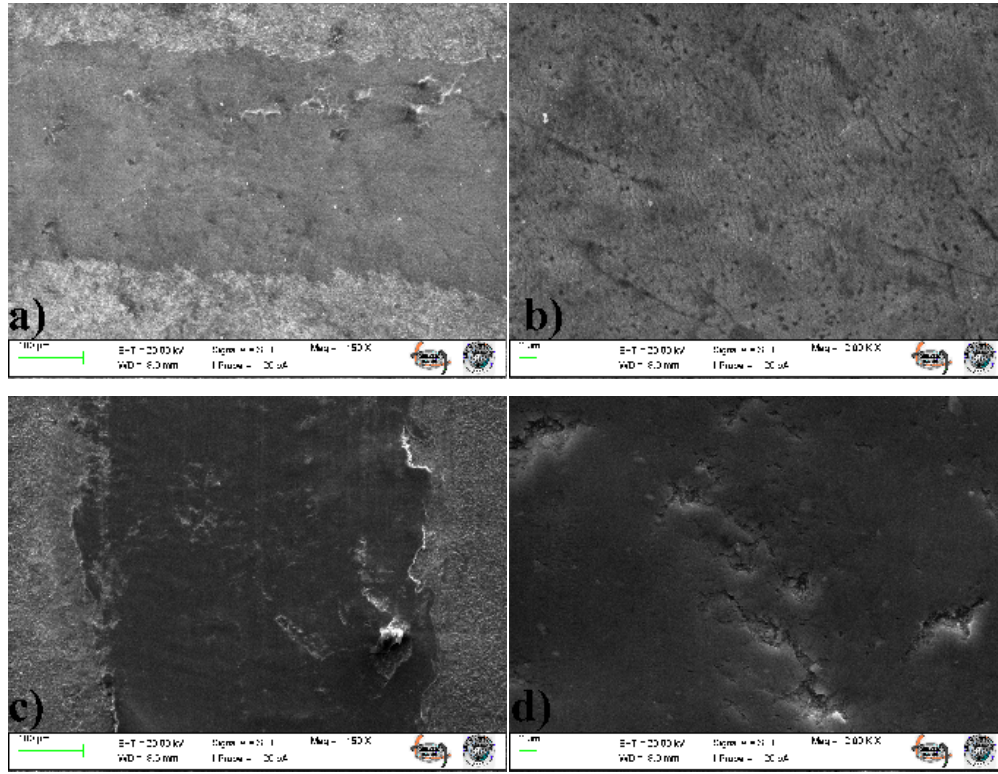
Şekil 6.61-6.76'daki sürtünme katsayısı grafiklerinin ortalaması alınıp Şekil 6.77'de sütun grafiği şeklinde yeniden çizdirilmiştir. Şekil 6.72'de ise tüm deneylerden elde edilen sürtünme katsayısı değerleri tek bir grafik altında toplanmıştır. Sürtünme katsayıları 6H gaz karışımında 0,42-0,71; 6N gaz karışımında ise 0,34-0,7 arasında değişmektedir. Aşınma hızı ile sürtünme katsayısı karşılaştırıldığında ikisi arasında doğrudan bir ilişki olmadığı sonucu ortaya çıkmıştır. Bu durum literatürle de uyumludur (Soydan 1996).



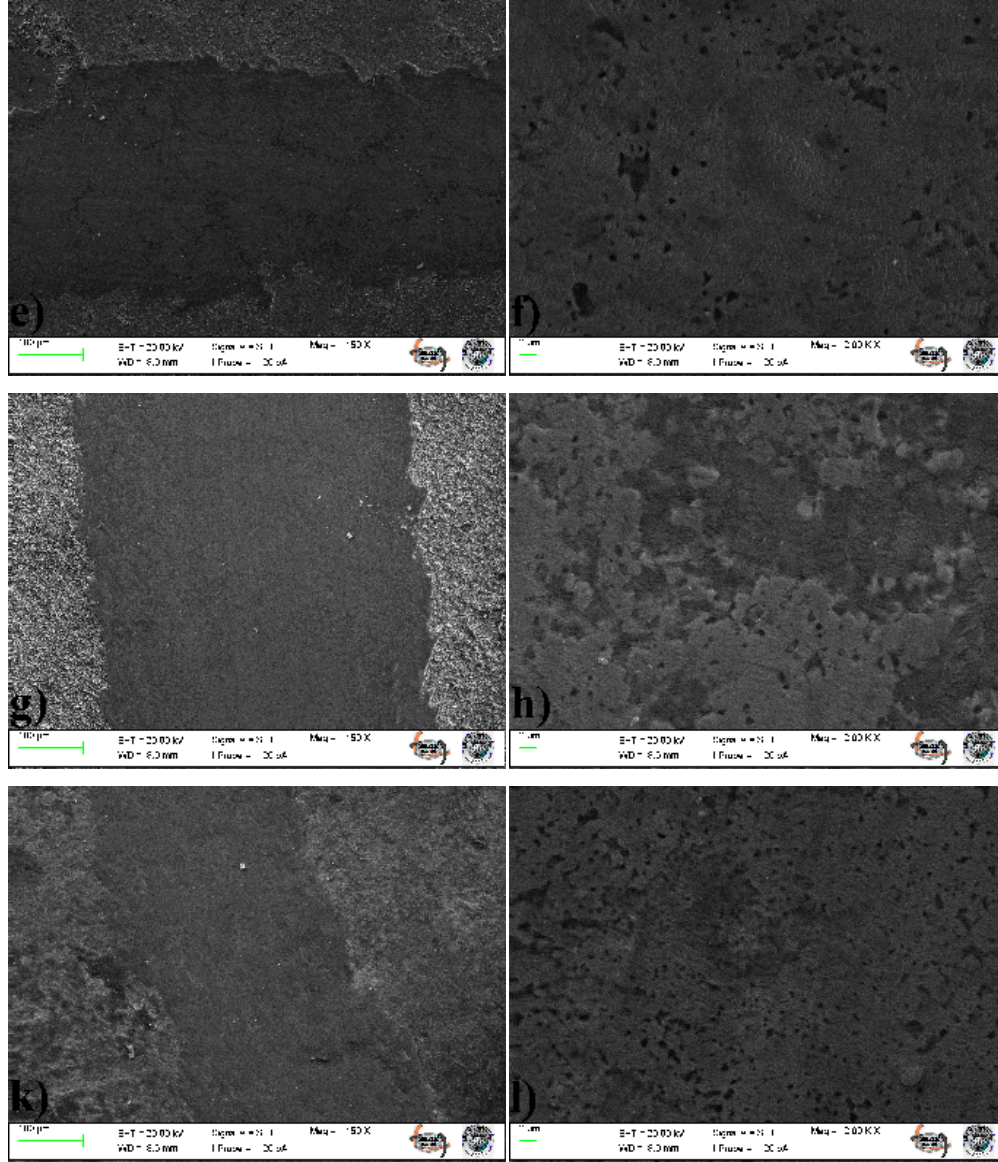
Şekil 6.77 Farklı sıcaklık, süre ve gaz karışımlarında B ve B₂O₃ pastalarıyla PPB numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

6.8 Aşınma Bölgelerinin SEM İncelemesi

Şekil 6.78’de 800-5h-6H şartlarında $10B_2O_3$, 10B, $7B_2O_3+3B_4C$, $7B+3SiC$, $7B+3B_4C$ ve $3B+7SiC$ pastalarıyla PPB AISI 8620 çeliğinin 10 N yük altında WC-Co bilye ile aşınma işleminden sonraki elektron mikroskop yüzey morfolojileri görülmektedir. Aşınma derinliği ölçümleri de kanıtlamaktadır ki aşınma derinliği borür tabakası kalınlığını geçmemektedir. Şekillere bakıldığında aşınmadan sonra gözenekli bir yapının oluştuğu görülmektedir.

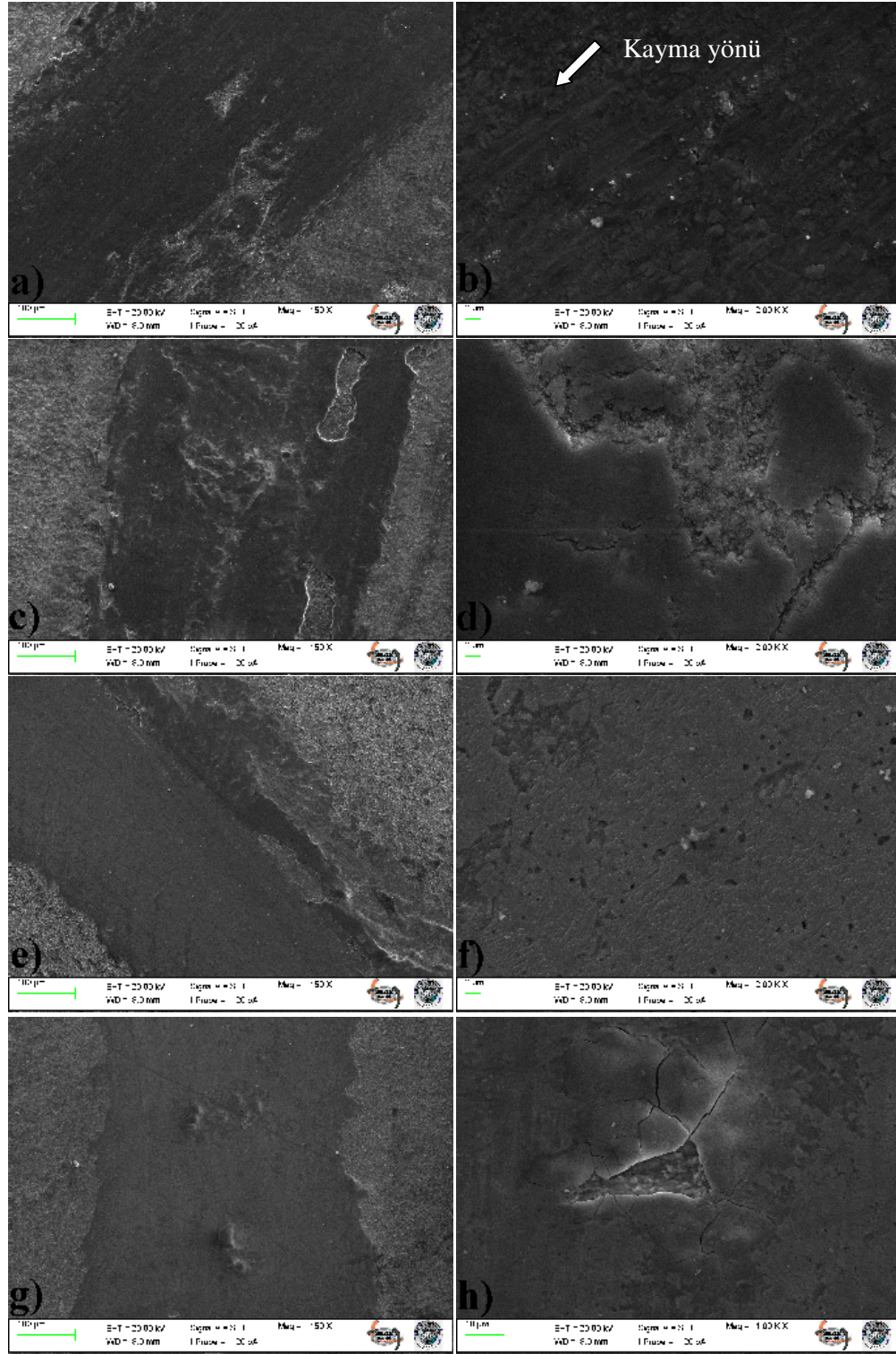


Şekil 6.78 800-5h-6H şartlarında değişik pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin aşınma işleminden sonraki elektron mikroskop yüzey morfolojileri a) ve b) $10B_2O_3$, c) ve d) 10B, e) ve f) $7B+3SiC$, g) ve h) $7B+3B_4C$, k) ve l) $3B+7SiC$

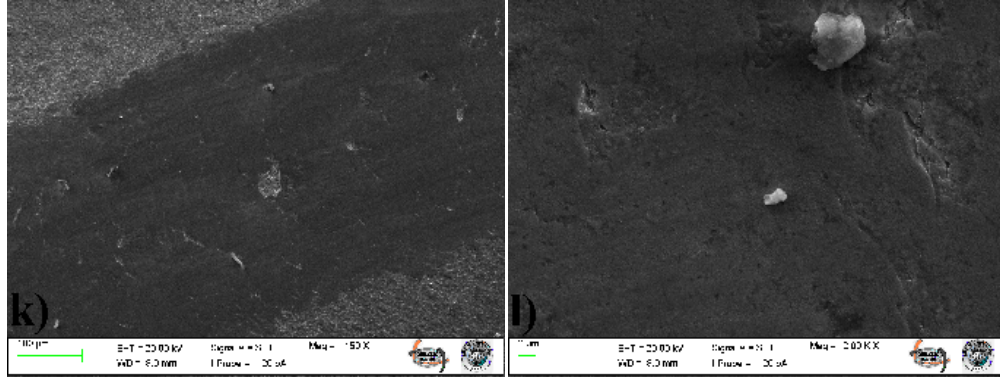


Şekil 6.78 (Devamı) 800-5h-6H şartlarında değişik pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin aşınma işleminden sonraki elektron mikroskop yüzey morfolojileri, a) ve b) $10B_2O_3$, c) ve d) $10B$, e) ve f) $7B+3SiC$, g) ve h) $7B+3B_4C$, k) ve l) $3B+7SiC$

Şekil 6.79 800-5h-6N şartlarında $10B_2O_3$, $10B$, $7B_2O_3 + 3B_4C$, $7B+3SiC$, $7B+3B_4C$ ve $3B+7SiC$ pastalarla PPB AISI 8620 çeliğinin 10 N yük altında WC-Co bilye ile aşınma işleminden sonraki elektron mikroskop yüzey morfolojilerini göstermektedir. Aşınma doğrultusunda kayma yönünde sıvama şeklinde izlerin oluştuğu görülmektedir. Delaminasyon aşınmasına imkan veren çatlaklar oluşmuştur. Şekle bakıldığında $7B+3B_4C$ pastasında tabakada çatlak başlangıcı ve devamında tabakanın malzemeden küçük miktarda ayrıldığı görülmektedir.

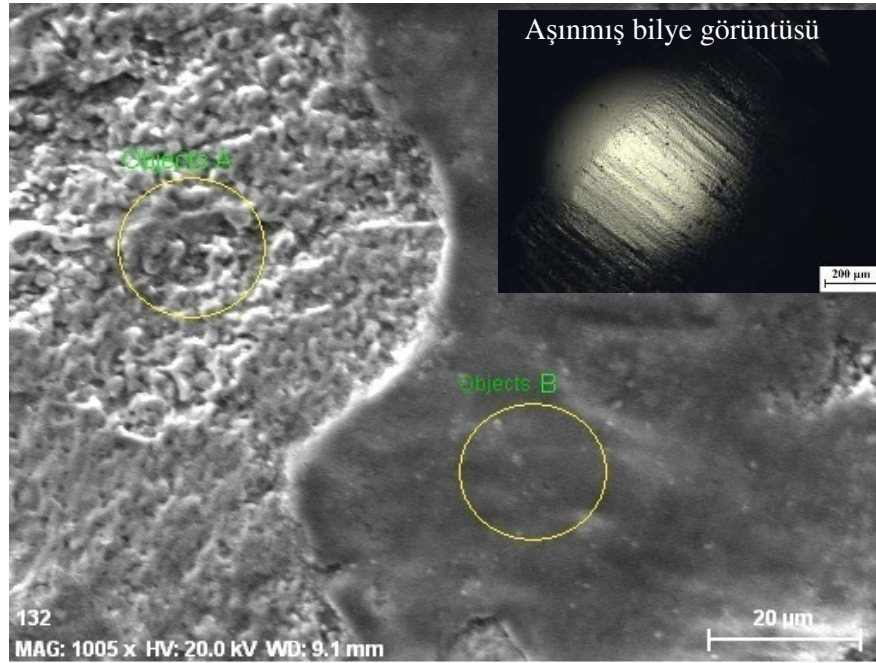


Şekil 6.79 800-5h-6N şartlarında değişik pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin aşınma işleminden sonraki elektron mikroskop yüzey morfolojileri a) ve b) $10B_2O_3$, c) ve d) $10B$, e) ve f) $7B+3SiC$, g) ve h) $7B+3B_4C$, k) ve l) $3B+7SiC$

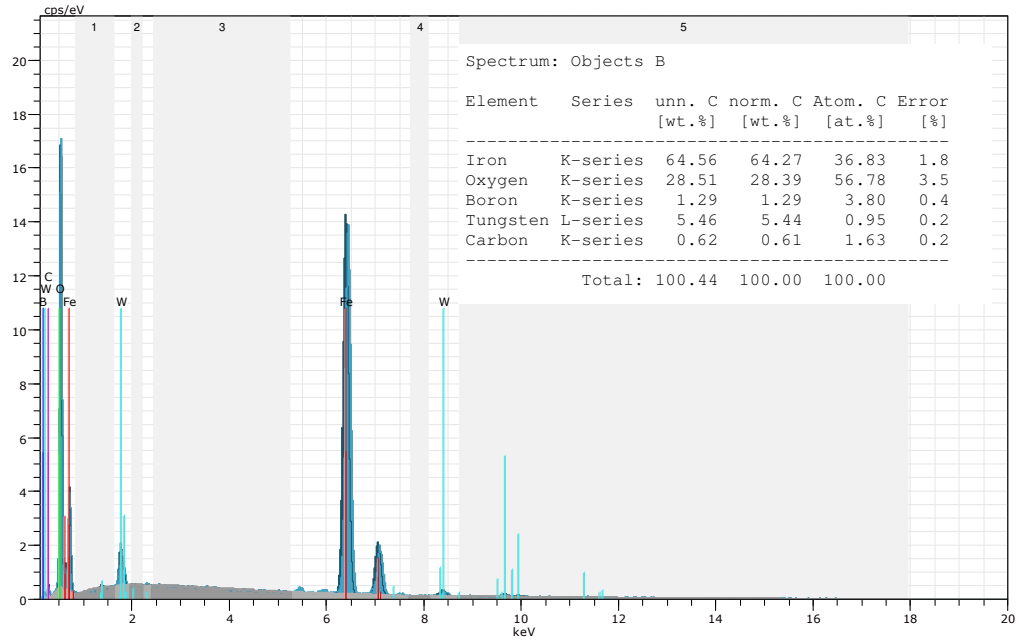
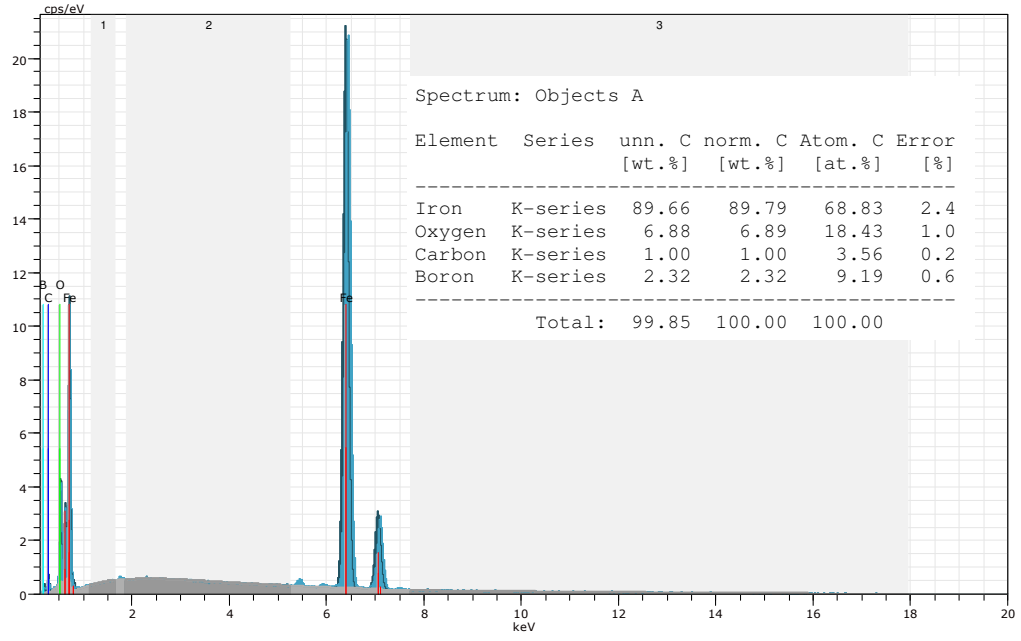


Şekil 6.79 (Devamı) 800-5h-6N şartlarında değişik pasta karışımlarında PPB AISI 8620 çeliğinin aşınma işleminden sonraki elektron mikroskop yüzey morfolojileri a) ve b) $10B_2O_3$, c) ve d) $10B$, e) ve f) $7B+3SiC$, g) ve h) $7B+3B_4C$, k) ve l) $3B+7SiC$

Şekilde 6.80'de 800-5h-6H-10B numunesi aşındırıldıktan sonraki SEM görüntüsü verilmiştir. A ve B bölgelerinden alınan EDX analiz sonuçları görülmektedir. A ve B bölgelerine bakıldığında aşındırıcı bilyeden numune yüzeyine malzeme transferinin gerçekleştiği görülmüştür. Aşınma esnasında temas bölgesindeki oluşan flaş sıcaklıktan dolayı sıvama bölgesi oksitlenmiştir. SEM fotoğrafının sağ üstündeki fotoğraf ise aşınmış bilyenin optik mikroskop görüntüsüdür. Bilye üzerinde de kayma yönünde izlerin oluştuğu görülmektedir.



Şekil 6.80 800-5h-6H-B numunesi aşındırıldıktan sonra A ve B bölgelerinden alınan EDX analiz sonuçları



Şekil 6.80 (Devam) 800-5h-6H-B numunesi aşındırıldıktan sonra A ve B bölgelerinden alınan EDX analiz sonuçları

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1 Sonuçlar

Yapılan deneyler sonucunda 700°C gibi düşük sıcaklıklarda PPB yapılabildiği görülmüştür. Geleneksel yöntemlerin dışında PPB işleminde kullanılabileceği ortaya çıkmıştır. Borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla borür tabaka kalınlığının arttığı tespit edilmiştir. Daha yüksek sıcaklık ve borlama sürelerinde yüksek tabaka kalınlıklarına ulaşılmıştır. Elde edilen borür tabakaları testere dişli bir morfolojiye sahiptir. Her iki gaz karışımında (6H ve 6N) B pasta karışımlarıyla yapılan PPB ile B_2O_3 pasta karışımlarıyla yapılan PPB'dan daha kalın borür tabakası elde edilmiştir. 6H gaz karışımlarında en yüksek borür tabakası kalınlığı 10B pastası ile 800-5h-6H PPB sonucu 50 μm , en düşük tabaka kalınlığı ise $10B_2O_3$ pastası 700-2h-6H PPB ile 8 μm olarak elde edilmiştir. B pastalarına B_4C ve SiC ilave edildiğinde tabaka kalınlığında düşüşler gözlenmiştir. Bununla birlikte B_4C ilaveli pasta karışımları ile nispeten daha kalın tabakalar elde edilmiştir. 6H gaz karışımında B_2O_3 'e SiC ve B_4C ilave edilmesiyle tabakanın daha düzgün şekilde oluştuğu görülmüştür. 6N gaz karışımında en yüksek borür tabakası kalınlığı 10B pastası ile 800-5h-6N PPB sonucu 60 μm , en düşük tabaka $7B_2O_3+3B_4C$ pasta karışımında 700-2h-6N PPB sonucu 8 μm tabaka kalınlığı elde edilmiştir. 6N gaz karışımında B ve B_2O_3 pastalarına B_4C ve SiC ilave edildiğinde tabaka kalınlığında düşüşler gözlenmiştir.

PPB sıcaklık ve süresinin artmasıyla hem farklı B pastalı numunelerin hem de farklı B_2O_3 pastalı numunelerin sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir. SiC takviyeli B ve B_2O_3 'li karışımlar, B_4C takviyelilere göre daha düşük sertlik değerlerine neden olmuştur. 700-2h-6N deney şartlarında $3B_2O_3+7SiC$ pastasında 1394 $HV_{0,05}$ elde edilirken, en yüksek sertlik değeri 800-5h-6H deney şartlarında 10B pastasında 1765 $HV_{0,05}$ elde edilmiştir.

6H ve 6N gaz karışımlarında farklı B ve B_2O_3 pasta karışımlarında 2 ve 5 saat sürelerde 700 ve 800°C'de PPB numunelerin XRD paterneleri incelenmiştir. İncelemeler sonucunda numuneler üzerinde FeB, Fe_2B , $B_{25}N$ fazları tespit edilmiştir. 6H gaz

karışımında Fe_2B faz şiddetinin 6N gaz karışımına göre daha düşük olduğu gözlenmiştir. Ayrıca 6N gaz karışımında B_{25}N pik şiddetlerinin 6H gaz karışımına göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

6H ve 6N gaz karışımlarında 700 ve 800°C sıcaklıklarda 2 ve 5 saat sürelerle 10B pastası ile PPB numunelere 1° giriş açısıyla düşük açılı XRD (GAXRD) analizi yapılmıştır. 6H gazı altında yapılan PPB işleminde XRD sonuçlarında çıkan FeB ve Fe_2B fazlarının yanı sıra Fe_3N , BN fazları düşük açılı XRD çekimlerinde tespit edilmiştir. Ayrıca 6N gazı altında yapılan PPB işleminde ise FeB, Fe_2B , Fe_3N , BN ve CrB fazları tespit edilmiştir.

6H ve 6N gaz karışımlarında 700 ve 800°C sıcaklıklarda 2 ve 5 saat sürelerle 10 B pastası ile PPB numuneler üzerindeki bor ve azot atomlarının derinlik profillerinin belirlenmesi için GDOES analizi yapılmıştır. 6N gaz karışımında yapılan deneylerde numune yüzeyine yakın bölgelerde 6H gaz karışımına göre azot konsantrasyonunun daha fazla olduğu sıcaklık ve sürenin artmasıyla numune yüzeyindeki bor konsantrasyonunun arttığı tespit edilmiştir.

PPB numunelerin aşınma deneyleri sonucunda aşınma iz derinliklerinin borür tabakasının altına inmediği Rugosimeter cihazıyla tespit edilmiştir. Artan borlama sıcaklığıyla birlikte aşınma izi derinliklerinde düşüşler gözlenmiştir. En düşük aşınma iz derinliği 800-5h-6H deney şartlarında $7\text{B}+3\text{SiC}$ pastasıyla borlanan numunede görülmüştür. B_2O_3 pasta karışımlarında en düşük aşınma iz derinliği 800-5h-6H- $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{B}_4\text{C}$ numunesinde görülmüştür. 800-5h-6N deney şartlarında en düşük aşınma iz derinliği $7\text{B}_2\text{O}_3+3\text{SiC}$ ve 10B pastalı numunelerde elde edilmiştir. Sürtünme katsayıları 6H gaz karışımında 0,42-0,71; 6N gaz karışımında ise 0,34-0,7 arasında değişmektedir.

7.2 Öneriler

Bu çalışmada üzerinde farklı % karışım ve oranlarda pasta biriktirilen çelikler plazma cihazının vakum haznesinin içerisine yerleştirilmiş ve hazne yaklaşık 2×10^{-2} mbar vakuma alınarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Plazma pasta borlama işlemi

üçlü ($\%60\text{N}_2+\%20\text{H}_2+\%20\text{Ar}$ ve $\%60\text{H}_2+\%20\text{N}_2+\%20\text{Ar}$) gaz karışımında 700 ve 800°C’de 2, 5 saat süresince 10 mbar işlem basıncında plazma ortamında gerçekleştirilmiştir.

1. Plazma pasta borlanmış çeliklerin korozyon ve oksidasyon özelliklerinin araştırılması faydalı olacaktır.
2. Yorulma deneyleri yapılarak plazma pasta borlanmış çeliklerin S-N eğrileri çıkarılabilir.
3. Aşınma deneyleri farklı yük, hız ve mesafede yapılarak aşınma davranışları geniş bir aralıkta incelenerek aşınma haritaları çıkarılabilir.
4. AISI 8620 çeliği üzerinde oluşturulan borür tabakalarının elektrik iletkenliği ve manyetik özellikleri incelenebilir.
5. PPB sonucu oluşan borür tabakalarının büyüme kinetiği incelenebilir.

8. KAYNAKLAR

- Akbayır, Ö. (2005). Katı Ortamda Borlanmış AISI 1030 Çeliğinde İşlem Parametrelerinin Yüzey ve Aşınma Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Atik, E., Yunker, U. and Meric, C. (2003). The effects of Conventional Heat Treatment and Boronizing on Abrasive Wear and Corrosion of SAE 1010, SAE1040, D2 and 304 Steels. *Tribology International*, **36**: 155-161.
- Ashby, F. and Jones, R.H. (1996). Engineering Materials, Butterworth / Heinemann, Oxford.
- Balandin, Y. A. (2004). Boronitriding of Die Steels in Fluidized Bed, *Metal Science and Heat Treatment*, **46**: 385-387,
- Balandin, Yu. A. (2006). Boron Based Complex Wear-Resistant Coatings Protection of Metals. **42- 2**: 137–139.
- Barış, M. (2007). Farklı Borlama Sürelerinin Transmisyon Çeliğinde Abrasiv Aşınma Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bartsch, K. and Leonhardt, A. (1999). Formation of Iron Boride Layers on Steel by D.C.-Plasma Boriding and Deposition Processes. *Surface and Coatings Technology*, **116–119**: 386–390.
- Baştürk, S. ve Erten, M. (2006). Borlama ile Yüzey Sertleştirme Çalışmaları. *Mühendis Makine*, **47**: Sayı 563.
- Bayça, S.U. ve Şahin, S. (2004). Borlama. *Mühendis ve Makine Dergisi*, **45**: 51-59.
- Bejar, M.A and Moreno, E. (2006). Abrasive Wear Resistance of Boronized Carbon and Low-Alloy Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, **173**: 352-358.
- Bejar, M.A. and Henríquez, R. (2009). Surface Hardening of Steel by Plasma-Electrolysis Boronizing. *Materials and Design*, **30**: 1726-1728.
- Bloyce, A., Dearnley, P.A. and Bell, T. (1985). Boride surface modifications. in: I.A. Bucklow (Ed.), Proceedings of the International Conference on Surface Engineering vol. 3, Welding Institute, Cambridge, pp. 93–108.
- Bochmann, G., Spörl, T., Ritzel, B., Wiesner, S., Wagner, W. and Marx, G. (1984) Neue Hütte **29**: 26.
- Bowden, F. P. and Tabor, D. (1973). Friction; An Introduction to Tribology, Anchor Press, New York.

- Bozkurt, N. (1984). Bor Yayınımı İle Çeliklerde Yüzey Sertleştirme. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Calık, A., Duzgun, A., Ekin, A.E., Karakas, S. and Ucar, N. (2009). Comparison of Hardness and Wear Behaviour of Boronized and Carburized AISI 8620 Steels. *Acta Physica Polonica A*, **116**: 1029-1032.
- Campos, I., Torres, R., Ramirez, G., Ganem, R. and Martinez, J. (2006). Growth Kinetics of Iron Boride Layers: Dimensional Analysis. *Applied Surface Science*, **252**: 8662-8667.
- Campos, I., Farah, M., Lopez, N., Bermudez, G., Rodriguez, G. and Villa, V, C. (2008). Evaluation of the Tool Life and Fracture Toughness of Cutting Tools Boronized By The Paste Boriding Process. *Applied Surface Science*, **254**: 2967-2974.
- Campos, S, I., Balankin, A.S., Sierra, A. H., Lopez, P, N., Escobar, G, R. and Morales, M, D. (2008). Characterization of Rough Interfaces Obtained by Boriding. *Applied Surface Science*, **255**: 2596-2602.
- Campos, I., Palomar, M., Amador, A., Ganem, R. and Martinez, J. (2006). Evaluation of the Corrosion Resistance of Iron Boride Coatings Obtained by Paste Boriding Process. *Surface and Coatings Technology*, **201**: 2438-2442.
- Cho, J. H., Park, H.K., Son, K. S., Yoon., J. H., Kim, H. S. and Kim, C. G. (2004). A Study on the Sand Resistance and Formation Behavior of Boride Layer Formed on Ni-Cr-Mo Steel By Plasma Paste Boronizing Treatment. *Korean Journal of Materials Research*, 14-1.
- Culha, O., Toparli, M., Sahin, S. and Aksoy, T. (2008). Characterization and Determination of FeB Layers Mechanical Properties. *Journal of Materials Processing Technology*, **206**: 231-240.
- Collangelo, V.J. and Haiser, F.A. (1974). Analysis of Metallurgical Failures, A Wiley Interscience Publication, Pp: 206-223.
- Çelebi, Efe, G., İpek, M., Özbek, İ. and Bindal, C. (2008). Kinetics Of Borided 31CrMoV9 and 34CrAlNi7 Steels, *Materials Characterization*, **59**: 23-31.
- Çelebi, G., İpek, M., Yılmaz, Ş. ve Bindal, C. (2004). AISI 8620 Çeliği Üzerinde Oluşan Borürlerin Bazı Mekanik Özellikleri, 10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 25-29.
- Çelebi, F.G. (2005). 31CrMoV9 ve 34CrAlNi7 Çeliklerinin Borlama Kinetiklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Çelikyürek, İ. (2006). Demir Aluminatların Borlanması ve Aşınma Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Çifci, C. (1999). Sade Karbonlu Çeliklerin Borlanmasında, Borür Tabakası Özelliklerine, Karbon Miktarının Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- David, K., Anthymidis, K.G., Agrianidis, P. and Petropoulos, G. (2008). Characterization and Tribological Properties of Boride Coatings of Steels in a Fluidized Bed Reactor. *Industrial Lubrication and Tribology*, **60/1**: 31–36.
- Demirel, Ç. ve Çetin, M. (2011). Borlanmış AISI 8640 Çeliğinin Abrasiv Aşınma Davranışı, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, 16-18 May
- Er, Ü. ve Par, B. (2004). Bor Yayınımıyla Yüzeyi Sertleştirilmiş AISI 1030 ve AISI 1050 Çeliklerinin Abrasiv Aşınma Dayanımlarının İncelenmesi. *Osmangazi Üniversitesi, Müh.Mim.Fak.Dergisi* **17**: 1.
- Eyre, T.S. (1975). Effect of Boronized Friction and Fear of Ferrous Metals. *Wear*, **34**: 383-397.
- Güneş., İ. (2010). AISI 8620 Çeliğinin Değişik Pasta Karışımlarında Plazma Pasta Borlanması ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Gunes, I., Ulker, S. and Taktak, S. (2011). Plasma Paste Boronizing of AISI 8620, 52100 and 440C Steels. *Materials and Design*, **32**: 2380–2386.
- Güneş, E., Demirel, Ç., Toprak, G., Çetin, M. ve Gül, F. (2011). GGG 50 Malzemenin Abrasiv Aşınma Davranışına Borlamanın Etkisi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, 239-243.
- Gül, F. (2010). Ferritik-Perlitik Küresel Grafitli Dökme Demirin Adhesiv Aşınma Dayanımı Üzerinde Borlama Yüzey İşleminin Etkisi. *Gazi Üniv. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **25-2**: 389-395.
- Gül, F. ve Çetin, M. (2011). Küresel Grafitli Dökme Demirin Adhesiv Aşınma Davranışı ve Sürtünme Kuvveti Üzerine Borlama Süresinin Etkisi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, 303-306. 16-18 Mayıs.
- Holmberg, K. and Matthews A. (1994). Coating Tribology, Elsevier Science B.V., 45-74.
- Hosseini, S.R. and Ashrafi-zadeh, F. (2009). Accurate Measurement and Evaluation of the Nitrogen Depth Profile in Plasma Nitrided Iron. *Vacuum*, **83**: 1174–1178.

- Hunger, H. J. and Lobig, G. (1997). Generation of Boride Layers on Steel and Nickel Alloys by Plasma Activation of Boron Trifluoride. *Thin Solid Films*, 310: 244-250.
- Hutchings, I. M. (1992). Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Adward Arnold, London.
- İpek, M. (2005). İki Farklı Yolla Üretilmiş Alumina-Zirkonya Kompozitlerin Sinterlenme ve Kırılma Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- İpekoğlu, Ü. ve Polat, M., (1987). Bor Endüstrisine Genel Bakış. *Madencilik*, 26: Sayı /No: 1
- Jain, V. and Sundararajan, G. (2002). Influence of the Pack Thickness of the Boronizing Mixture on the Boriding of Steel. *Surface and Coatings Technology*, 149: 21-26.
- Kaestner, P., Olfe, J. and Rie, K.T. (2001). Plasma-Assisted Boriding of Pure Titanium and TiAl6V4. *Surface and Coatings Technology*, 142-144: 248-252.
- Karakan, M., Alsaran, A., Çelik, A. (2002). Plazma Borlama. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 43(512): 51-54.
- Kayalı, E.S. (1993). Sürtünme ve Aşınma, Workshop on Antiwear Coatings, Tübitak, Gebze, 24-25.
- Kragelskii, I. V. (1965). Friction and Wear, Butter Worths, London.
- Krumes, D., Kladarić, I., Marušić, V., Stubičar, M., Milinović, A., Mihailescu I. N. (2010). Influence Of Thermodiffusion Treatments On Improvement Of Surface Layers Properties Created On Low-Carbon And Low-Alloyed Steels. 14th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2010, Mediterranean Cruise, 11-18 September
- Kulka, M. and Pertek, A. (2003). The Importance of Carbon Content Beneath Iron Borides After Boriding Of Chromium and Nickel-Based Low-Carbon Steel. *Applied Surface Science*, 214: 61-171.
- Küper, A., Qiao, X. and Stock, H. R. (2000). A Novel Approach to Gas Boronizing. *Surface and Coatings Technology*, 130: 87-94.
- Li, C., Shen, B., Li, G. and Yang, C. (2008). Effect of Boronizing Temperature and Time on Microstructure and Abrasion Wear Resistance of Cr12Mn2V2 High Chromium Cast Iron. *Surface and Coatings Technology*, 202: 5882-5886.

- Lipson, C. and Colwell, L.V. (1961). Handbook of Mechanical Wear, University of Michigan, Michigan.
- Maragoudakis, N. E., Stergioudis, G., Omar, H., Paulidou, E. and Tsipas, D.N. (2002). Boro-nitriding of Steel US 37-1. *Materials Letter*, **57C**: 949-952.,
- Martini, C., Palombarini G., Poli, G. and Prandstraller D. (2004). Sliding and Abrasive Wear Behaviour of Boride Coatings. *Wear*, **256**: 608-613.
- Martini, C. and Palombarini, G. (2004). Mechanism of Thermochemical Growth of Iron Borides on Iron. *Journal of Materials Science*, **39**: 933– 937.
- Matuschka, A. Von, G. (1980). Boronizing. The Alden Pres Ltd., Oxford, England, s.11- 45, 58, 61-65.
- Meric, C., Sahin, S., Backir, B. and Köksal, N.S. (2006). Investigation of the Boronizing Effect on the Abrasive Wear Behaviour in Cast Irons. *Mater. Des.* **27**: 751-757.
- Moore, D.F. (1975). Principles and Applications of Tribology, Pergamon Press, Oxford.
- Nam, K. S., Lee, K. H., Lee, S. R. and Kwon, S. C. (1998). A Study on Plasma-Assited Boriding of Steels. *Surface and Coatings Technology*, **98**: 886-890.
- Nam, K. S., Lee, K. H., Lee, D. Y. and Song, Y. S. (2005). Metal surface modification by plasma boronizing in a two-temperature-stage process. *Surface and Coatings Technology*, **197**: 51– 55.
- Oliveria, C. K. N., Casteletti, L.C., Lombardi, N. A., Totten, G. E. and Heck, S. C. (2010). Production and Characterization of Boride Layers on AISI D2 Tool Steel. *Vacuum*, **84**: 792-796.
- Ozbek, I., Akbulut H., Zeytin, S. and Bindal C., Ucisik, A.H. (2000). The characterization of borided %99,5 purity nickel. *Surface and Coatings Technology*, **126**: 166-170.
- Ozbek, I., Konduk, B. A., Bindal, C. and Ucisik, A. H. (2002). Characterization of Borided AISI 316L Steel Implant. *Vacuum*, **65C**: 521-525.
- Ozbek, I., Sen, S., Ipek, M., Bindal, C., Zeytin, S. and Ucisik, A. H. (2004). A Mechanical Aspect of Borides Formed On The AISI 440C Stainless-Steel. *Vacuum*, **73C**: 643-64.
- Ozdemir, O., Usta, M., Bindal, C. and Ucisik, A. H. (2006). Hard Iron Boride (Fe₂B) on 99.97 wt% Pure Iron. *Vacuum*, **80**: 1391-95.

- Özbek, İ. (1999). Borlama Yöntemiyle (AISI M50 ve AISI M2) Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Özmen, T. (2007). Katı Ortamda Borlanmış Ddk 60 Dökme Demirin Borür Tabakası Büyüme Kinetiği ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Özsoy A. (1991). Çeliğin Borlanması Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Özsoy, A. (1988). Termal Çevrimli Borlama Uygulamaları. Doktora Tezi, A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Peterson, M.B. (1976). Wear Testing Objectives and Approaches, Selection and Use of Wear Tests for Metals. ASTM STP 615, R.G. Bayer Edit., American Society for Testing and Materials.
- Planitz, H. Treffer, G. and Bochmann, G. (1991). Metalloberfläche, **45**: 135.
- Roskill, The Economics of Boron. Roskill Information Services Ltd., London, 6,7, 149-201(2006).8, 21
- Sahin, S. (2009). Effects of Boronizing Process on the Surface Roughness and Dimensions of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2714. *Journal of Materials Processing Technology*, **209**: 1736-1741.
- Sahin, S., Meric, C. and Saritas, S. (2010). Production of Ferroboron Powders by Solid Boronizing Method. *Advanced Powder Technology*, **21**: 483-487.
- Sinha, A.K. (1991). Boriding. ASM Handbook, Vol:4, Pp:437-447.
- Selçuk, B., Yüksek, S. ve Uysal, Ö. (2002). Demir Esaslı Makina Elemanlarının Aşınma ve Korozyon Direncinin Arttırılmasında Borun Rolü. 1. Uluslararası Bor Sempozyumu, Kütahya.
- Sen, S., Ozbek, I., Sen, U. and Bindal, C. (2001). Mechanical Behavior of Borides Formed on Borided Cold Work Tool Steel. *Surface and Coatings Technology*, **135**: 173-177.
- Sen, S., Sen, U. and Bindal, C. (2005). An Approach to Kinetic Study of Borided Steels. *Surface and Coatings Technology*, **191**: 274-285.
- Sen, Ş., Sen, U. and Bindal, C. (2005). The Growth Kinetics of Borides Formed on Boronized AISI 4140 Steel. *Vacuum*, **77**: 195-202.
- Sen, S., Sen, U. and Bindal, C. (2006). Tribological Properties of Oxidised Boride Coatings Grown on AISI 4140 steel. *Materials Letters*, **60**: 3481-3486.

- Soydan, Y. (1996). Katı Ortamda Bor Yayınımı ile Sertleştirilen Çelik Yüzeylerinin Kuru Kayma Halinde Sürtünme ve Aşınma Davranışları. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Soydan, Y., Koksall, S., Demirer, A. and Celik, V. (2008). Sliding Friction and Wear Behavior of Pack-Boronized AISI 1050, 4140, and 8620 Steels. *Tribology Transactions*, **51**: 74-81.
- Subrahmanya, J. and Gopinath, K. (1984). Wear Studies on Boronized Mild Steel. *Wear*, **95**: 287-292.
- Sviridov, S. I., Tyurnina, Z. G., Tyurnina, N. G. (2010). Diffusion Formation of Boride Phases on the Iron Surface. *Glass Physics and Chemistry*, **36-3**: 382-387.
- Suh, N. P. (1973). The Delamination Theory of Wear. *Wear*, **25**: 111-124.
- Sümer, G., (2004). Bor Bileşikleri. *Uluslararası Bor Sempozyumu*, 23-25 Eylül, Eskişehir.
- Şahin, S., Gençalp, S. ve Tastan, F. (2009). Borlanmış AISI 1040 Çeliğinin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, 1086-1090.
- Şen, U. (1997). Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Bor Kaplanması ve Kaplama Özellikleri. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Şen,U. and Şen,U. (2003). The Fracture Toughness of Borides Formed on Boronized Cold Work Tool Steels. *Materials Characterization*, **50**: 261-267
- Tabur, M., İzçiler, M. ve Gül, F. (2009). Borlanmış Hardox 400 Çeliğinin Abrasiv Aşınma Davranışları. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, 1095-1100.
- Tabur, M., İzçiler, M., Gul, F. and Karacan, I. (2009). Abrasive Wear Behavior of Boronized AISI 8620 Steel. *Wear*, **266**: 1106-1112.
- Taktak, S. (2007). Some Mechanical Properties of Borided AISI H13 and 304 Steels. *Materials and Design*, **28**: 1836-1843.
- Taştan, F., Akgün, S., ve Şahin, S. (2009). Borlama İşleminde Malzemenin Bileşiminin Borür Tabakası Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs, Karabük.
- Tezcan, R. (1996). Borlama İşlemi ve Endüstriyel Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- Toroghinezhad, M.R., Salehi, M. Ashrafizadeh, F. (1997). The Effect of Precarburizing Treatment on Morphology of the Boride Layer. *Materials and Manufacturing Processes*, **12**, No:1, 117-123.
- Türktekin, M. (1998). H13 Sıcak İş Takım Çeliklerine Borlama ve Nitrürleme İşlemlerinin Birlikte Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Ulu, S., Aytekin, H. ve Taktak, Ş. (2004). Borlanmış ve Karbürlenmiş AISI 8620 Çeliklerinin Abrasiv Aşınma Davranışı. 10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi, Denizli, 94-100.
- Ulukan, L. (1993). Makine Elemanları III, Ders Notu, İstanbul.
- Uluköy, A., Can, A. Ç. (2006). Çeliklerin Borlanması. *Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **12(2)**: 189-198 .
- Ulutan, M. (2007). AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması. Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ulutan, M., Celik, O. N., Gasan, H. and Er, U. (2010). Effect of Different Surface Treatment Methods on The Friction and Wear Behavior of AISI 4140 Steel. *J. Mater. Sci. Technol.*, **26(3)**: 251-257.
- Uslu, I., Comert, H., Ipek M., Celebi, F. G., Ozdemir, O. and Bindal, C. (2007a). A Comparison of Borides Formed on AISI 1040 and AISI P20 Steels. *Materials and Design*, **28**: 1819–1826.
- Uslu, I., Comert, H., Ipek, M., Ozdemir, O. and Bindal, C. (2007b). Evaluation of Borides Formed on AISI P20 Steel. *Materials and Design*, **28**: 55–61.
- Uzun, H.A. (2002). Borlama İle Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Venkataraman, B. and Sundararajan, G. (1995). The high Speed Sliding Wear Behaviour of Boronized Medium Carbon Steel. *Surface and Coatings Technology*, **73**: 177-184.
- Yan, P.X., Wei, Z.Q., Wen, X.L., Wu, Z.G., Xu, J.W., Liu, W.M. and Tian, J. (2002). Post Boronizing Ion Implantation of C45 Steel, *Applied Surface Science*, **195**: 74-79.
- Yapar, U., Başman, G., Arısoy, C.F. ve Şeşen, M.K. (2002). Çeliklerde Borlama Yoluyla Yüzey Sertleştirme. *Metal Dünyası Dergisi*, **115**: 69 – 74

- Yapar, U. (2003). Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama ile Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yılmaz, S.S., Ünlü, B.S. ve Varol, R. (2005). Borlanmış Demir Esaslı FeCu-Grafit T/M Malzemenin Aşınma ve Mekanik Özellikleri. www.teknolojikarastirmalar.org ISSN:1304-4141, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi , **3**: 11-21.
- Yıldızlı, K. (2002). Borlamanın Çeliklerde Erozif Aşındırma Davranışına Olan Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Yoon, J. H., Jee, Y. K. and Lee, S. Y. (1999). Plasma Paste Boronizing Treatment of the Stainless Steel AISI 304. *Surface and Coatings Technology*, **112**: 71-75.
- Yu, L.G., Chen, X.J. and Khor, K.A. Sundararajan, G. (2005). FeB/Fe₂B Phase Transformation During SPS Pack-Boriding: Boride Layer Growth Kinetics. *Acta Materialia*, **53**: 2361-2368.
- Yünker, U. (2000). Borlanmış Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Yurtseven, R. (2008). Tel Çekme Sanayinde Borlamanın Endüstriyel Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

8.1. İnternet Kaynakları

Erişim Tarihi

1-http://www.maden.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=109&tipi=5&sube=0 **19:40**
01.04.2011

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Şükrü ÜLKER

Doğum Yeri ve Tarihi : 26.07.1982/Afyon

Yabancı Dili : İngilizce

İletişim (Telefon/e-posta) : 0555 649 41 04/sukruulker@hotmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Afyon Endüstri Meslek Lisesi Tesviye Bölümü/1999

Lisans : Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim
Öğretmenliği/2003

Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine
Eğitimi/2006

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Afyon Kocatepe Üniversitesi Proje Asistanlığı 2005-2008

Afyon Kocatepe Üniversitesi Görevlendirme ile Öğretim Görevlisi 2006-2009

Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Arş.
Grv. 2010-

Afyon Kocatepe Üniversitesi İncehisar Meslek Yüksek Okulu (Görevlendirme) Öğr. Grv.
2010-

Yayınları (SCI ve diğer) :

SCI, SSCI, AHCI Tarafından Taranan Dergide Yayınlanan Makaleler

Ulker, S., Gunes, I. and Taktak, S. (2011). Investigation of tribological behaviour of plasma paste boronized of AISI 8620, 52100 and 440C steels. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, **18-5**: 370-376.

Gunes, I., Ulker, S. and Taktak, S. (2011). Plasma Paste Boronizing of AISI 8620, 52100 and 440C Steels. *Materials and Design*, **32**: 2380-2386.

Taktak, S., Gunes, I., Ulker, S. and Yalcin, Y. (2008). Effect of N₂+H₂ Gas Mixtures in Plasma Nitriding on Tribological Properties. *Materials Characterization*, **59**: 1784 – 1791.

Taktak, S., Ülker, S. and Gunes, I. (2008). High Temperature Wear and Friction Properties of Duplex Surface Treated Bearing Steels. *Surface & Coatings Technology*, **202**: 3367-3377.

Uluslararası Konferans ve Sempozyumlardaki Tebliğler

Güneş, İ., Ülker, Ş. ve Taktak, Ş. (2010). AISI 52100, 8620 ve 440C Çeliklerinin Plazma Pasta Borlama İşlemi, 13th International Material Symposium, Denizli, 13-15 October.

Aslantaş, K., Taktak, Ş., Ülker, Ş., Güneş, İ. ve Yalçın, Y. (2008). Çift Yüzey İşlem Uygulanmış Çeliklerde Temas Gerilmelerinin Sonlu Elemanlar Analizi. Proceedings of 12th International Materials Symposium (IMSP'2008), Denizli, 15-17 October, 274-284.

Güneş, İ., Taktak, Ş. ve Ülker, Ş. (2008). TRD Yöntemiyle Kromlanmış Çeliklerin Puls Plazma Nitrürlenmesi ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. 14. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul.

Güneş, İ., Taktak, Ş., Ülker, Ş., Yalçın, Y. ve Aslantaş, K. (2008). Çift Yüzey İşlem Uygulanmış Çeliklerin Aşınma Davranışı Üzerine Plazma Nitrürlenmedeki N₂-H₂ Gaz Karışımının Etkisi. 12. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, Proceedings of 12th International Materials Symposium (IMSP'2008), Denizli, 15-17 October, 285-294.

Ülker, Ş., Taktak, Ş. ve Güneş, İ. (2008). AISI 52100 Çeliğinin Puls (Darbeli) Plazma Nitrürlenmesi ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. 14. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul

Ülker, Ş., Taktak, Ş., Güneş, İ., Yalçın, Y., Aslantaş, K. (2008). AISI 440C Paslanmaz Çeliğinin Puls (Darbeli) Plazma Nitrürlenmesi ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. 12. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, Proceedings of 12th International Materials Symposium (IMSP'2008), Denizli, 15-17 October, 38-46.

Güneş, İ., Kayalı, Y., Ülker, Ş., Taktak, Ş. ve Yalçın, Y. (2006). TRD Yöntemiyle Yatak Çelikleri Üzerine Oluşturulan TiC_x Kaplamaların Yüksek Sıcaklıktaki Aşınma Davranışı. Proceedings of 11th International Materials Symposium, Denizli, 284-289.

Kayalı, Y., Güneş, İ., Ülker, Ş., Taktak, Ş. ve Yalçın, Y. (2006). Borlanmış AISI 4140 Çeliğinin Aşınma Davranışına Sıcaklığın Etkisi Proceedings of 11th International Materials Symposium, Denizli, 377-381.

PROJE DENEYİMİ

Proje No	Proje Adı	Görevi ve Yılı
104M213 No'lu TÜBİTAK Projesi	Darbeli Plazma Nitrürleme ve Borlama Prosesi İle Yatak Çeliklerinin Tribolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi	Bursiyer Öğrenci 2005-2008
AKÜ-BAPK 08.TEF.01	Plazma Nitrürleme ve Borlama ile Çift Yüzey İşlem Uygulanmış AISI 8620 Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi	Yardımcı Araştırmacı 2008-2009
ULUSAL BOR ARAŞTIRMA ENSTİTÜSÜ 2009-Ç0246 No'lu Proje	Bor Kaynaklı Pasta Karışımları İle Plazma Pasta Borlanmış AISI 8620 Çeliğinin Yüzey Karakterizasyonu ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi	Yardımcı Araştırmacı 2009- 2011
AKÜ-BAPK 10TEF-02	Değişik Gazlar Altında Çeliğin Plazma Pasta Borlanması ve Aşınma-Sürtünme Davranışlarının Belirlenmesi	Yardımcı Araştırmacı 2010- 2012

Yaptığı Tezler:

Lisans Tezi: Hidrolik Pres Tasarımı ve İmalatı

Yüksek Lisans Tezi: Puls Plazma Nitrürleme Cihazının Tasarımı ve AISI 52100 Çeliğinin Plazma Nitrülenmesi