

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



**YÜZEY BORLANMIŞ VE FARKLI MATRİKS YAPILI
KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN AŞINMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KENAN GÜLSÜN

BALIKESİR, HAZİRAN - 2016

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



**YÜZEY BORLANMIŞ VE FARKLI MATRİKS YAPILI
KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN AŞINMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KENAN GÜLSÜN

Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ (Tez Danışmanı)

Prof. Dr. İrfan AY

Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN

BALIKESİR, HAZİRAN - 2016

KABUL VE ONAY SAYFASI

Kenan GÜLSÜN tarafından hazırlanan “**YÜZEY BORLANMIŞ VE FARKLI MATRİKS YAPILI KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 20.06.2016 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ

Üye
Prof. Dr. İrfan AY

Üye
Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 2013/45 nolu proje ile desteklenmiştir.

ÖZET

**YÜZEY BORLANMIŞ VE FARKLI MATRİKS YAPILI KÜRESEL
GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KENAN GÜLSÜN
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. ALAADDİN TOKTAŞ)**

BALIKESİR, HAZİRAN - 2016

Bu çalışmada Cu, Ni ve Mo alaşımlı küresel grafitli dökme demire 800, 825 ve 850°C' de 3, 4.5 ve 6 saat sürelerle katı borlama termo-kimyasal ısıl işlemi uygulanmıştır. Borlanmış KGDD numunelerin bor tabaka kalınlıkları ile bu tabakadaki iç yapı incelemeleri yapılmıştır. Elde edilen borlanmış numunelere sertlik ve aşınma deneyleri yapılmış; sürtünme katsayıları ve kütle kayıpları belirlenmiş, aşınma izleri optik ve elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Ayrıca borlanmış KGDD numuneler ile döküm(perlitik), temperli martenzit, alt ve üst ösferritik matriks yapılı numunelerin sertlik ve aşınma özellikleri (kütle kayıpları, sürtünme katsayıları ve aşınma izleri) karşılaştırılmıştır. Borlanmış yüzeylerde tek fazlı Fe₂B fazı oluşmuş, artan borlama sıcaklık ve süresiyle bor tabaka kalınlıkları ile yüzey sertlikleri artmıştır. Bütün numunelerde en yüksek yüzey sertliği ve en az kütle kaybının 850°C/6 saat borlanmış numunede olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELEER: Borlama, küresel grafitli dökme demir, matriks yapı, sertlik, aşınma.

ABSTRACT

THE INVESTIGATION ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF BORIDED AND VARIOUS MATRIX STRUCTURED DUCTILE IRON

MSC THESIS

KENAN GÜLSÜN

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. ALAADDİN TOKTAŞ)

BALIKESİR, JUNE - 2016

In this study, a thermochemical heat treatment process called pack boronizing was applied on Cu, Ni and Mo alloyed ductile iron at 800, 825 and 850°C for 3, 4.5 and 6 hours. The boride layer thicknesses and microstructures on this layer of the borided ductile irons were investigated. The hardness and wear tests were performed on borided ductile irons, the friction coefficients and mass losses were determined and wear tracks were investigated by optic and electron microscopes. Also, the hardness and wear properties (mass losses, friction coefficients and wear tracks) of the borided ductile irons were compared with that of the as-cast(pearlitic), tempered martensitic, lower and upper ausferritic structured ductile irons. The single phased Fe₂B was occurred on borided layers. The borided layer thicknesses and surface hardnesses were increased by the boriding temperature and time. The highest surface hardness and the lowest mass loss were obtained for the specimen borided at 850°C for 6 hours.

KEYWORDS: Boriding, ductile iron, matrix structure, hardness, wear.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
2. BOR ELEMENTİ	3
2.1 Bor Elementinin Özellikleri	4
2.2 Bor Ürünleri	6
2.2.1 Boraks Dekahidrat.....	6
2.2.2 Boraks Pentahidrat	6
2.2.3 Susuz Boraks.....	7
2.2.4 Borik Asit	7
2.2.5 Bor Oksit (Susuz Borik Asit)	7
2.2.6 Sodyum Perborat.....	8
2.2.7 Diğer Bor Bileşikleri	8
2.3 Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları	9
3. BORLAMA YÖNTEMLERİ	10
3.1 Katı Ortamda Borlama	12
3.1.1 Toz Ortamda Borlama.....	13
3.1.2 Macun İle Borlama.....	14
3.2 Sıvı Ortamda Borlama	15
3.2.1 Daldırma.....	16
3.2.2 Elektroliz	16
3.2.3 Derişik Çözelti	17
3.3 Gaz Ortamda Borlama	18
3.4 Plazma Borlama	19
3.5 Borlama İşleminin Avantajları ve Dez Avantajları.....	20
3.5.1 Borlama İşleminin Avantajları.....	20
3.5.2 Borlama İşleminin Dezavantajları.....	22
4. BORÜR TABAKASININ ÖZELLİKLERİ	23
4.1 Borür Tabakası	23
4.2 Geçiş Bölgesi	27
4.3 Borür Tabakasının Yapısına Alaşım Elemanlarının Etkisi	30
4.4 Borlu Tabakanın Mekanik Özellikleri	31
4.4.1 Sertlik	32
4.4.2 Aşınma Özellikleri	33
4.4.3 Korozyona Karşı Dayanıklılık	35
4.5 Borlu Tabakanın Kalınlığı	37
4.6 Bor Tabakası Çeşitleri.....	38

4.7 Borür Tabakasındaki Kalıntı Gerilmeler.....	39
4.8 Borlama işlemi Sonrası Uygulanabilen Isıl İşlemler	39
4.9 Borlanabilen Malzemeler	41
5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	44
6. MATERYAL VE METOD	49
6.1 Deney Amacı.....	49
6.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	49
6.3 Deney Programı	50
6.4 Metalografi Numunesi Kesimi.....	52
6.5 Tabaka Kalınlığı ve Mikro Sertlik Ölçümleri	52
6.6 Aşınma Deneyi.....	53
6.7 Mikro Yapı İncelemesi, XRD analizi ve SEM Görüntüleme	54
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	57
7.1 Mikroyapılar.....	57
7.1.1 Borlanmamış Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri	57
7.1.2 Borlanmış Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri	59
7.1.2.1 Bor Tabakası Kalınlıklarının İncelenmesi	62
7.1.2.2 XRD Analizi	63
7.2 Mikro Sertlik Ölçümleri ve Sertlik Taramaları	64
7.2.1 Mikro Sertlik Sonuçlarının İncelenmesi	64
7.2.2 Sertlik Taraması Sonuçlarının İncelenmesi	66
7.3 Aşınma Testleri Sonuçlarının İncelenmesi	67
7.3.1 Aşınma İzleri Optik Mikroskop Görüntüleri	72
7.3.2 Aşınma İzleri SEM Görüntüleri	74
7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	78
8. KAYNAKLAR.....	79

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Beyaz, beta boru, 5 değişik bor yapısından sadece birisi	4
Şekil 2.2: Borun kafes yapısı	6
Şekil 3.1: Borlama işleminde sertlik ve yüzeyden mesafe ilişkisi	11
Şekil 3.2: Fe-B denge diyagramı	12
Şekil 3.3: Gaz ortamda borlama tertibatının şematik gösterimi	19
Şekil 3.4: Plazma borlama tesisat şeması	20
Şekil 4.1: Borlama sonrası alaşımsız çelikte FeB ve Fe ₂ B fazları içyapısı	26
Şekil 4.2: Dış biçimli demirborür kristalleri (Fe ₂ B)	27
Şekil 4.3: Borlanmış AISI 1020 çeliginde yüzeyin mikro yapısı	29
Şekil 4.4: Borlanmış AISI 4140 çeliginde yüzeyin mikro yapısı	29
Şekil 4.5: Borlanmış alaşımlı ve alaşımsız çeliklerde eşit şartlarda borlama ile elde edilen borür tabaka kalınlıkları	30
Şekil 4.6: Borlu tabaka ile sementasyonlu tabakanın sertlik dağılımları	33
Şekil 4.7: Borlu ve borsuz AISI 1116 çeliğinin yüke karşı aşınma davranışları	34
Şekil 4.8: % Alaşım elementleri miktarının borür tabakası kalınlığına etkisi	37
Şekil 4.9: Borür tabakası çeşitleri	38
Şekil 4.10: Borlamadan sonra yapılabilen ısıl işlem örnekleri	40
Şekil 6.1: Deney numunelerinin geometrisi	50
Şekil 6.2: Borlama işleminin yapıldığı fırın	51
Şekil 6.3: Numune kesme cihazı	52
Şekil 6.4: Metcon Mh-3 MicroVickers sertlik ölçüm cihazı	53
Şekil 6.5: Er-Mir Ball-on-disk aşınma test cihazı fotoğrafı	53
Şekil 6.6: Ball-on-disk mekanizması	54
Şekil 6.7: Zeiss Evo40 taramalı elektron mikroskobu	55
Şekil 6.8: Altın-Paladyum Uygulaması	56
Şekil 6.9: Taramalı elektron mikroskobuna yerleştirilen numuneler	56
Şekil 7.1: Döküm yapısı (perlitik) mikroyapı görüntüleri	57
Şekil 7.2: Alt ösferrit ve üst ösferrit mikroyapı görüntüleri	58
Şekil 7.3: Temperli martenzit mikroyapı görüntüleri	59
Şekil 7.4: Borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüleri(200x)	60
Şekil 7.5: Borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüleri(500x)	61
Şekil 7.6: Borlama sıcaklık ve süresinin oluşan bor tabakası kalınlığına etkisi	63
Şekil 7.7: 800 °C de 6 saat borlanmış KGDD'in XRD paterni	64
Şekil 7.8: Borlama süresine ve sıcaklığına bağlı olarak oluşan yüzey sertlikleri	66
Şekil 7.9: 800 °C'de borlanan numunelerin sertlik taraması	67
Şekil 7.10: 825 °C'de borlanan numunelerin sertlik taraması	67
Şekil 7.11: 850 °C'de borlanan numunelerin sertlik taraması	68
Şekil 7.12: Matriks yapılar ve borlanmış numunelerdeki yüzey sertlikleri ve kütle kayıpları	69
Şekil 7.13: Matriks yapıların sürtünme katsayıları	70
Şekil 7.14: 800 °C'de borlanmış numunelere aitsürtünme katsayıları	71

Şekil 7.15: 825 °C’de borlanmış numunelere ait sürtünme katsayıları..	72
Şekil 7.16: 850 °C’de borlanmış numunelere ait sürtünme katsayıları..	72
Şekil 7.17: Borlanmış numunelerin aşınma yüzey izlerinin optik mikroskop görüntüleri (100X).....	73
Şekil 7.18: Borlanmamış numunelerin aşınma yüzey izlerinin optik mikroskop görüntüleri (100X).....	74
Şekil 7.19: Aşınma yüzey izlerinin SEM görüntüleri (150X).....	75
Şekil 7.20: Aşınma yüzey izlerinin SEM görüntüleri (2000X).....	76

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Borun kristal yapısı ve kafes parametreleri	5
Tablo 2.2: Bor ve bazı bileşiklerin sertlikleri.....	5
Tablo 2.3: Bor ürünlerinin kullanıldığı sektörler	9
Tablo 3.1: Koruyucu gaz atmosferinin özellikleri	15
Tablo 3.2: Sıvı ortam borlamasında kullanılan bor kaynakları ve özellikleri.....	16
Tablo 4.1: FeB ve Fe ₂ B fazlarının tipik özellikleri	24
Tablo 4.2: FeB ve Fe ₂ B fazlarının bazı özellikleri.....	27
Tablo 4.3: Çeşitli işlemlere tabi tutulmuş malzemelerin mikro sertlik değerleri..	32
Tablo 4.4: 800-1000 °C sıcaklıklarda 2-6 saat borlanan ve borsuz numunelerin aşınma esnasında sürtünme katsayıları	34
Tablo 4.5: 4 saat süreyle borlanmış ve borlanmamış 3 adet özel hazırlanan alaşımda 56 °C sıcaklıktaki % 10 H ₂ SO ₄ korozif ortamında ağırlık kaybı testi ile elde edilen korozyon değerleri	36
Tablo 4.6: Sementasyon ve borlama ile elde edilen sertliklere ısıl işlem sıcaklığının etkisi.....	41
Tablo 4.7: Borlanabilen bazı ferro malzemeler ve kullanım alanları	42
Tablo 6.1: Küresel Grafitli Dökme Demir in kimyasal bileşimi (% Ağırlık)	49
Tablo 6.2: Borlama deney program	50
Tablo 7.1: Borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak oluşan bor tabakası kalınlıkları	62
Tablo 7.2: Matriks yapıların sertlik değerleri	65
Tablo 7.3: Borlama sıcaklığına ve süresine bağlı oluşan sertlik değerleri	65
Tablo 7.4: Aşınma testlerinde oluşan kütle kayıpları.....	69

SEMBOL LİSTESİ

P	: Basınç
T	: Sıcaklık
HV	: Vickers Sertlik
Al₂O₃	: Alüminyum oksit
Al	: Alüminyum
B	: Ötektoid üstü çeliklerde tam östenit alanına geçiş sıcaklığı
B₄C	: Bor karbür
BCl₃	: Bortriklorit
BN	: Bor nitrür
C	: Karbon
Fe	: Demir
FeB	: Demir borür
Fe₂B	: Demirdiborür.
AISI	: American Iron and Steel Institute
µm	: Mikrometre
φ	: Çap
VSD	: Vickers Sertlik Değeri
daN	: Deka Newton

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince şahsıma her konuda destek ve yol gösterici olan saygıdeğer danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ ve benden yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Gülcan TOKTAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince beni sürekli motive eden ve manevi olarak sürekli destek olan aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Balıkesir, Haziran 2016

Kenan GÜLSÜN

1. GİRİŞ

Makine Sanayinde kullanılan malzemelerin sürtünme, korozyon ve aşınma gibi tribolojik etkiler neticesinde azalan ömürlerinin artırılması ancak çalışan yüzey bölgelerinin iyileştirilmesi ile mümkün olabilmektedir. Aşınma ve korozyondan dolayı dünya da her yıl önemli malzeme kayıplar olmaktadır. Ülkelerin korozyon nedeniyle meydana gelen kayıplar gayrisafi milli hâsıllarının % 3,5 - 5 'ini temsil etmektedir. Yalnız Türkiye'deki 1991 yılı kaybı 4,5 milyar dolar olarak tahmin edilmektedir [1].

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

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

Çok genel bir tarif olarak, % 2 'den daha az karbon içeren demire çelik adı verilmektedir. % 2 'den fazla karbon içeren alaşım ise Dökme-Demir olarak adlandırılır [5]. Genel tarifte % 2 üst sınırı konulmuş olmakla beraber sade karbonlu takım çeliklerinin dışında kalan çeliklerde karbon % 1,2 değerini pek aşmaz. Çeliklerde; Demir ve Karbonun dışında üretimden gelen Mangan, Silisyum ve az miktarda Fosfor ve Kükürt bulunur. Özellikle P ve S gerek karbon çeliklerinde, gerekse alaşımli çeliklerde en düşük miktarda tutulmaya çalışılır [5].

Bu çalışmada borlama ısıl işlemine tabi tutulmuş bileşimi Bölüm 6.2`de belirtilen küresel grafitli dökme demirde, mikro yapılar ve tribolojik özelliklerin borlama parametreleri olan borlama sıcaklığı ve borlama süresine bağlı olarak nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca aynı malzemenin ham döküm hali, alt ösferritik, st ösferritik ve temperlenmiş martenzit halleri ile borlama sonundaki hali mikro yapıları ve tribolojik özellikleri açısından karşılaştırılmıştır.

Bu alışmada Cu, Ni, Mo alaşımlı küresel grafitli dökme demir farklı borlama parametrelerinde (sıcaklık ve süre) borlanarak, borlama parametrelerinin oluşan bor tabakasının özelliklerine (kalınlık, sertlik ve iç yapı) ve aşınma özelliklerine (ağırlık kaybı, sürtünme katsayısı ve aşınma izleri) etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca; Borlanan küresel grafitli dökme demirin aşınma özelliklerinin farklı matris yapıları (perlitik-ferritik, temperlenmiş martenzit, alt – st ösferritik) sahip küresel grafitli dökme demirin aynı özellikleri ile karşılaştırılması da amaçlanmıştır.

2. BOR ELEMENTİ

Kökeni Buraq/Baurach (Arapça) ve Burah (Farsça) kelimelerinden gelen ağırlıklı olarak metalimsi davranış gösteren Yapısı Şekil 2.1’de görülen Bor (B), ilk defa 1808 yılında Gay- Lussac ve Jacques Thenard ile Sir Humphry Davy tarafından Bor Oksit’in Potasyum ile ısıtılmasıyla elde edilmiştir. Kimyasal olarak ametal bir element olan kristal bor, normal sıcaklıklarda su, hava ve hidroklorik/hidroflorik asitler ile soy davranış göstermekte olup sadece yüksek konsantrasyonlu Nitrik Asit ile sıcak ortamda Borik Asit’e dönüşebilmektedir. Öte yandan yüksek sıcaklıklarda saf oksijen ile reaksiyona girerek Bor Oksit (B_2O_3), aynı koşullarda nitrojen ile Bor Nitrit (BN), ayrıca bazı metaller ile Magnezyum Borit (Mg_3B_2) ve Titanyum Diborit (TiB_2) gibi endüstride kullanılan bileşikler oluşabilmektedir [6, 7, 8, 9].

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



Şekil 2.1 : Beyaz, beta boru, 5 değişik bor yapısından sadece birisi. [71]

Yaklaşık Atom Ölçüsü	:10,811
Peryodik Atom Numarası	:5
Ergime Noktası Kaynama Noktası	:2180°C
Kaynama Noktası	:3650°C
Oksidasyon Sayısı	:3
Yoğunluk	:2,35 g/cm ³
Sertlik (Mohs)	:Cs.109,3
Atom Çapı	:85 pm
Elektron Dağılımı	:[He]2s ² 2p ¹
Doğadaki İzotopları	:B-10 19,57%
	:B-11 80,43%
Elektronegatiflik	:2,04 (Pauling)

2.1 Bor Elementinin Özellikleri

Periyodik sistemin III. grubunda bulunan borun atom numarası 5, atom ağırlığı 10.81, atom çapı 1.78 Å(7) ve ergime noktası 2400°C' dir [12, 13]. Bor 2.33 ± 0.002 gr/cm³ yoğunluklu kristal ve 2.3 gr/cm³ yoğunluklu amorf olmak üzere iki şekilde bulunur. Kristalin borun yapısı ve kafes parametreleri Tablo 2.1' de, bor ve bazı bileşiklerin sertlikleri ise Tablo 2.2' de verilmiştir [12].

Tablo 2.1: Borun Kristal yapısı ve kafes parametreleri. [71]

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

Tablo 2.2: Borun ve bazı bileşiklerin sertlikleri. [71]

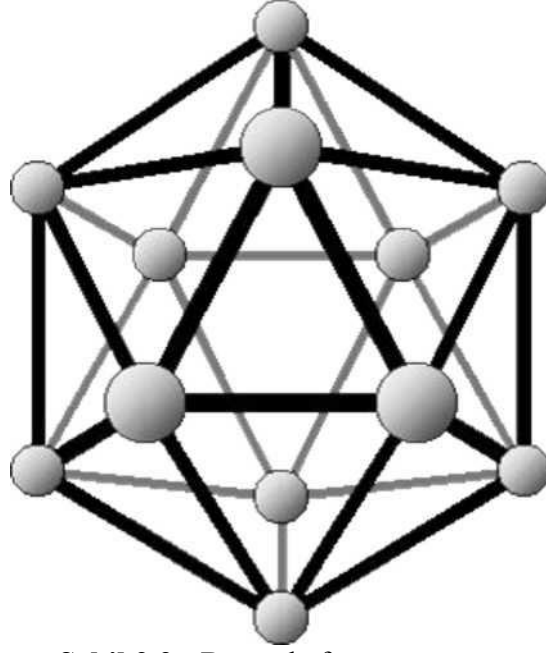
Malzeme	Mohs Sertlik
Bor (element)	9,3
Bor karbür (B ₄ C)	9,32
Elmas (standart)	10

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

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

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

Bor madeni beyaz bir kayayı andırır, çok serttir ve ısıya dayanıklıdır. Doğada serbest bir element olarak bulunmaz, tuz şeklinde bulunur. Ülkemizde bulunana Bor’ un kalitesi de diğerlerine oranla daha yüksektir. Toprağın 40 metre altında bulunan borun işlenmesi de, diğer elementlerle az karıştığı için kolaydır [15].



Şekil 2.2 : Borun kafes yapısı. [71]

2.2 Bor Ürünleri

2.2.1 Boraks Dekahidrat

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

2.2.2 Boraks Pentahidrat

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

2.2.3 Susuz Boraks

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

2.2.4 Borik Asit

Borik asit(H_3BO_3) molekül ağırlığı 61,83 gr/mol, B_2O_3 içeriği %56.3, ergime noktası 169 °C, özgül ağırlığı 1.44, oluşum ısı, -1089 kJ/mol, çözünme ısı, 22,2 kJ/mol olan kristal yapılı bir maddedir. Oda sıcaklığında sudaki çözünürlüğü az olmasına rağmen, sıcaklık yükseldikçe çözünürlüğü de önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle sanayide borik asidi kristallendirmek için genellikle doymuş çözeltiyi 80°C' den 40°C' ye soğutmak yeterli olmaktadır. Bor minerallerinden geniş ölçüde üretilen borik asit başlıca; cam, seramik ve cam yünü sanayiinde kullanılmakta olup, kullanım alanları çok çeşitlidir. Borik asit, bor minerallerinin genel olarak sülfürik asit ile asitlendirilmesi ile elde edilmektedir. Türkiye'de borik asit üretimi başlıca; Bandırma'daki Eti Bor A.Ş. Boraks ve Asit Fabrika İşletmeleri tarafından yapılmaktadır.

2.2.5 Bor Oksit (susuz borik asit)

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

2.2.6 Sodyum Perborat

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

2.2.7 Diğer Bor Bileşikleri

Yukarıda açıklanan bor ürünleri dışında yaygın olarak kullanılan diğer bor bileşikleri aşağıda özet olarak verilmiştir.

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

-Bor Karbür: Bor-karbon sistemindeki tek bileşik olan bor karbür, genellikle granül katı olarak elde edilir. Masif ürün olarak elde edilmek istendiğinde, 1800 - 2000 °C 'de garafit kalıplarda preslenir. Saf bor karbür kristalleri hafif parlak görünümündedir. Yoğunluğu $2,52 \text{ gr/cm}^3$, ergime sıcaklığı 2450 ° C 'dir. Sıcak preslenmiş bor karbür, aşındırıcı parçalarda, contalarda, seramik zırhlı yüzeylerin yapılmasında kullanılır. 2000 ° C'nin üzerindeki sıcaklıkların ölçülmesinde termoçift olarak kullanılır. Sertliği nedeniyle abrasif malzeme yapımında kullanılır.

-Bor Nitrür: Bor nitrür genellikle hegzagonal yapıda oluşur. Hegzagonal sistemde iken beyaz, talk 'a benzeyen, $2,27 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluğunda bir tozdur. Kübik sistemde ise oldukça serttir. Teorik yoğunluğu $3,45 \text{ gr/cm}^3$ 'tür ve iyi bir elektrik izolatörüdür. Ergitilerek masifleştirilmiş bor nitrit büyük bir kimyasal dirence

sahiptir. Kübik yapıdaki bor nitrit çok iyi bir abrasiv malzemedir. Bu özelliğinden dolayı, kesici aletlerin yapımında ve sert alaşımların işlenmesinde kullanılır.

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

2.3 Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları

Bor ürünlerinin kullanıldığı sektörleri Tablo 2.3 'de maddeler halinde verilmiştir [8].

Tablo 2.3: Bor ürünlerinin kullanıldığı sektörler. [71]

<i>Kullanım Alanı</i>	<i>Kullanım</i>
Savunma	Zırh Plakalar, Seramik Plakalar, Ateşli Silah Namluları, Fişek vb
Cam Sanayi	Mikro Chipler, LCD Ekranları, CD-Sürücüleri, Akım Levhaları, Bilgisayar Ağlarında; Isıya- Aşınmaya Dayanıklı Fiber Optik Kablolar, Yarı iletkenler, Vakum TüplerBataryalar, Laser
Enerji Sektörü	Gaz türbinleri, Yüksek ısı transistörleri, Bor hidrür yakıtları(boranlar), Piller, Hidrojen depolayıcılar, Güneş
Kimya Sanayi	Yanmayan ve Erimeyen Boyalar, Tekstil Boyaları, Yapıştırıcılar, Soğutucu Kimyasallar, Korozyon Önleyiciler, Mürekkep, Pasta ve Cilalar, Kibrit, Kireçlenme Önleyicileri
Koruyucu	Ahşap Malzemeler ve Ağaçlarda Koruyucu olarak, Boya ve vernik Kurutucularında, Küf ve mantar önleyiciler, vb.
Makine Sanayii	Manyetik Cihazlar, Zımpara ve Aşındırıcılar Kompozit Malzemeler, Titreşim söndürücü malzemeler,
Metalürji	Kaplama elemanları, Yüksek sıcaklık refrakterleri, Kaplama Sanayiinde Elektrolit Olarak, Paslanmaz ve Alaşımli Çelik, Sürtünmeye-Aşınmaya Karşı Dayanıklı Malzemeler, Kaynak Elektrotları, Briket Malzemeleri, Lehimleme, Döküm Malzemelerinde.
Nükleer Sanayi	Nükleer atık depolama (kolemanit cam bloklar), Reaktör Aksamları, Nötron Emiciler, Reaktör Kontrol Çubukları, Nükleer Kazalarda

3. BORLAMA YÖNTEMLERİ

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

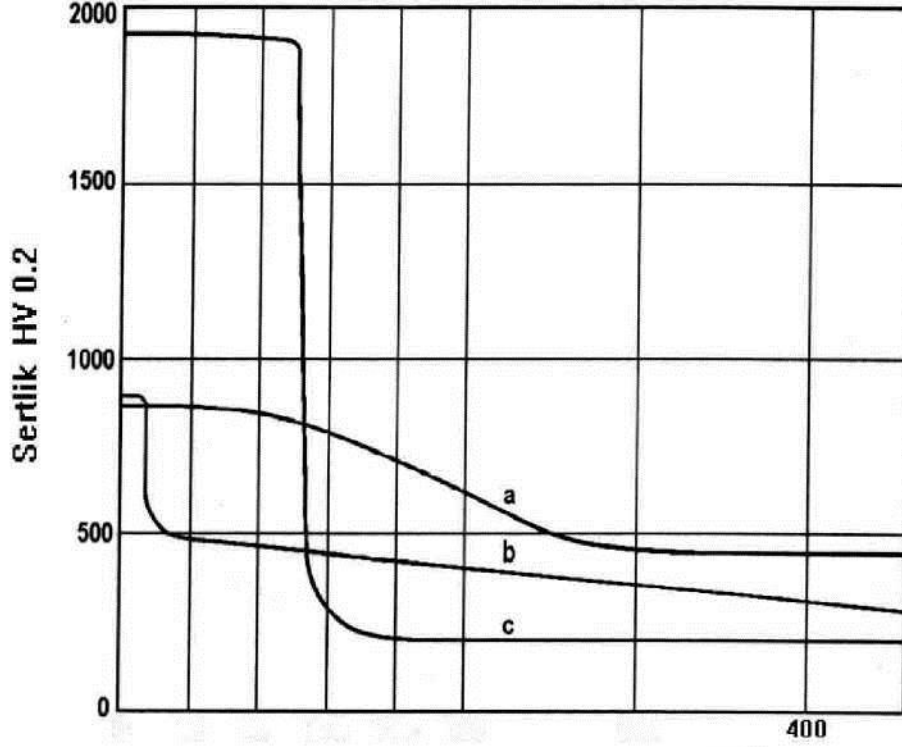
Borlama, esas olarak yaygın işlemidir. Bor kaynağının fiziksel durumu katı, sıvı, gaz olabilir. Genel olarak çelik, borlama ortamında 2 - 10 saat, 850 °C - 1000 °C 'de bekletilerek borlama işlemine tabi tutulur. Borlama ortamı, bor kaynağı (B_4C , $Na_2B_4O_7$, H_2B_6), aktivatör (KBF_4), dolgu veya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

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

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

Malzemelerin yüzeyine değişik metotlarla kaplamalar yapılır. Örneğin; hem karbürleme yapılması istendiğinde sertleşmeden sonra sürekli bir geçişle sert kenar bölgesinden yumuşak çekirdek halinde tutabilmek için, hem tuz banyosunda nitro karbürlemede, nitrür tabaka özelliğinin yanında, tabaka altındaki yarı metal difüzyon

bölgesi çok önemli bir rol oynar. Bor kaplamada ise sadece kenar bölgesi, yani borür tabakası ilgili alandır. Buna göre değişik ısıl işlemler sonucu oluşan, sertlik-yüzeyden mesafe ilişkileri Şekil 3.1 'de görülmektedir [3].



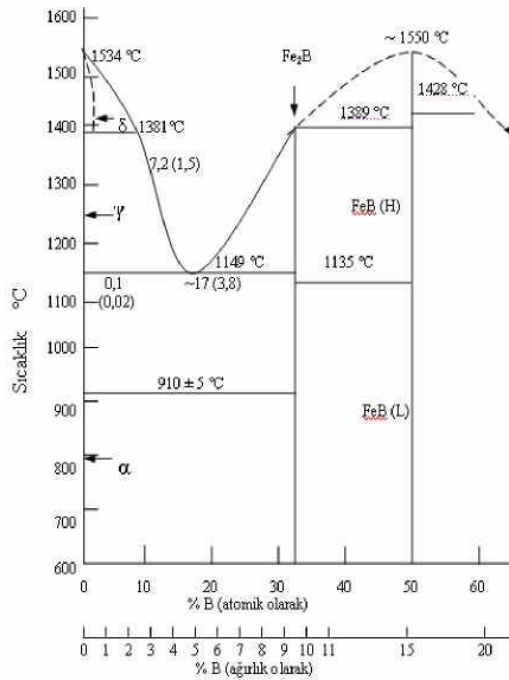
Şekil 3.1 : Borlama işleminde, sertlik-yüzeyden mesafe ilişkisi [3].

- Sertleştirme (16MnCr₅ , 1 saat, 860 °C , sementasyon işlemi ve yağda sertleştirme)
- Tuz banyosunda nitro karbürleme (C15, 90 dakika, 580 °C banyoda su verme.)
- Borlama (x45 3 saat, 900 °C, Durborid2, yavaş soğutma)

Yüksek sıcaklıkta (850 - 1050 °C) yapılan borlama işlemi ile demir yüzeyine bor yayılması gerçekleşir. Bu yayılma işlemi ile tek fazlı Fe₂B veya iki fazlı Fe₂B + FeB den oluşan ferrobör tabakası elde edilir. Tek faz Fe₂B oluşumu, iki faz Fe₂B + FeB „nin oluşumundan daha fazla istenir. Çünkü borca zengin FeB fazının kırılabilirliği yüksektir; bu yüzden FeB fazının oluşması istenmez. FeB nin ısıl genişleme katsayısı (23.10 - 6 / °C), Fe₂B nin genişleme katsayısından (7,85.10 - 6 / °C) büyüktür. İki fazlı sistemde oluşan Fe₂B ve FeB fazları arasındaki ısıl genişleme

farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlamlar oluşur. Bu çatlamları önlemek FeB fazını azaltmak veya FeB fazının oluşmasını önlemek ile mümkündür [19, 24, 25, 20].

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



Şekil 3.2 : Fe-B denge diyagramı [26].

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

3.1 Katı Ortamda Borlama

Yüzeyi borlanacak malzeme, toz halindeki bor verici ortam içinde genellikle 850 - 1000 °C sıcaklıklarda 2 - 10 saat bekletilmesi ile yapılan işlemdir. Kutu

sementasyona benzeyen bu yöntem soygaz atmosferinde yapılabildiği gibi sıkı kapatılmış kutularda olmak şartı ile normal, atmosferde de yapılabilir. Sistem ucuzdur. Özel teçhizat ve teknik gerektirmez [27]. Ticari alanda katı ortam borlama maddeleri kullanım alanlarına göre sınıflandırılarak satılmaktadır [12].

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

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

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

Ekabor HM: Sert metallerin borlanması için özel olarak üretilmiştir.

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

3.1.1 Toz Ortamda Borlama

Yüzeyi borlanacak malzeme, toz halindeki bor verici ortam içinde 800 - 1000 °C sıcaklıklarda 4 - 10 saat bekletilerek borlama işlemi yapılır. Borlama tozu ısıya dayanıklı çelik saç kutu içine konur ve borlanacak parça bu tozun içine gömülür. Bu toz, parçanın tüm yüzeylerinde en az 10 mm kalınlığında olmalıdır. Kutuların ağzı bir kapak ile kapatılarak önceden belirli bir sıcaklığa ısıtılmış fırına konur ve fırın kapağı kapatılarak fırın içi sıcaklığı borlama sıcaklığına yükseltilir. Bir süre bekletildikten sonra kutu fırından alınarak soğutulur ve parça içinden çıkarılır. Bu sırada çelik kutunun kapağı kutunun üzerinde kendi ağırlığı ile durmalıdır. Sementasyonda olduğu gibi sıkıca kapatılmasına gerek yoktur. Eğer işlem normal atmosfer de yapılacaksa kapak sıkıca kapatılır. Bu yöntem koruyucu gaz atmosferi içinde de yapılabilir. Yöntem ucuzdur ve özel bir teknik gerektirmez [28].

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

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

1. % 60 B₄C + % 5 B₂O₃ + % 5 NaF + % 30 Demir oksit
2. % 50 Amorf bor + % 1 NH₄F.HF + % 49AhO₃
3. % 100 B₄C
4. % (7,5 - 40) B₄C + % (2,5 - 10) KBF₄ + % (50-90) SiC
5. % 84 B₄C + % 16 Na₂B₄O₇
6. % 95 Amorf bor + % 5 KBF₄
7. % 20 B₄C + % 5 KBF₄ + % 75 Grafit
8. % (40 - 80) B₄C + % (20 - 60) Fe₂O₃
9. % 80 B₄C + % 20 Na₂CO₃
10. % 98 [% 75 Al₂O₃ + % 25 (% 30 Al + % 70 B₂O₃)] + % 2 NaF

3.1.2 Macun İle Borlama

Borlama için kullanılacak tozlar macun haline getirilir ve borlanacak parçanın üzerine 2 mm kalınlıkta sürülür. Parça yüzeyine sürülen macun derhal sıcak hava akımında, ön ısıtma odasında veya kurutma fırınında maksimum 150 °C 'de kurutulması gerekir. Gerektiği takdirde macun üzerine tekrar birkaç kez daha sürülebilir. Kurutma işleminden sonra macun ile kaplanmış parçalar önceden

ısıtılmış fırına konur ve fırın ağzı kapatılarak borlama sıcaklığına ısıtılır. Belirli süre bu sıcaklıkta tutulan parçalar dışarı alınır ve soğumaya terk edilir. Parçalar soğuduktan sonra yüzeyinde yapışmış olan artıklar temizlenir ve böylece borlama yapılmış olur [28].

Bu yöntemle borlama mutlaka koruyucu gaz ortamında yapılması gerekir. Aksi takdirde kötü bir borür tabakası oluşur. Bu yöntemle kısmi borlama yapılabilir. Bor korbür (B_4C), kriyolit (Na_3AlF_6) ve bağlayıcı olarak da hidrolize edilmiş etilsilikat karışımından macun yaparak borlama yapılmıştır. Bu yöntemde kullanılan koruyucu gazlar; Argon, Formier Gazı, NH_3 ve saf azottur. Bu yöntemde kullanılan koruyucu gazlar ise Tablo 3.1 'te verilmiştir [17]

Tablo 3.1: Koruyucu gaz atmosferinin özellikleri [17].

Koruyucu Gaz Adı	Bileşimi
Argon	% 99.996 Ar
Kalıp gazı (Fonnier Gazı)	% 5 - 30 H_2 , geri kalanı N_2
NH_3 - Spalt gazı (Amonyak)	% 75 H_2 , % 25 N_2
Saf Azot	% 99 N_2 , % 1 H_2

3.2 Sıvı Ortamda Borlama

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

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

Tablo 3.2: Sıvı ortam borlanması için kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri [30].

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

3.2.1 Daldırma Yöntemi

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

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

3.2.2 Elektroliz Yöntemi

Yüksek sıcaklıkta tuz banyosu, elektrolit iş parçası katot ve grafit çubuk anot olarak işlem gerçekleştirilir. Tuz banyosu ise ergitilmiş boraktır. Bu yöntem

laboratuar çalışmalarında gayet iyi sonuçlar vermiştir. Ancak ergimiş boraksın viskozitesinin çok yüksek olması, endüstriyel uygulamalarda sıcaklığın homojenliğini engeller yani boraks eriğinin yüksek viskozitesi 850 °C 'nin altında borlamayı pratik olarak imkânsız kılar. 850 °C 'nin üzerinde ise banyodaki düzgün sıcaklık dağılımı oldukça güçleşir [27].

Farklı akım şiddetleri, özellikle karmaşık şekilli parçalarda borür tabakasının kalınlığının düzgün olmasına neden olur. Bu yöntemde iş parçası bir tuz tabakasıyla kaplanır ki bunu temizlemek oldukça masraflıdır. Elektrolizle borlama da anodun bir tarafında ince borür tabakası oluşur. Bu da gölge etkisi yaparak değişik ve düzensiz kalınlıklara sebep olur. Sodyum klorür ve borasit anhidritin karışımı ile yapılan çalışma sonucu banyodaki sıcaklık dağılımının eşit olduğu, parçaların daha kolay yıkandığı ve viskozitenin azaldığı görülmektedir. Ayrıca NaCl, B₄C ve NaBF bileşiminden oluşan tuz eriğinde diğer problemler çıkmaktadır. Bu yöntemin tesiatı pahalıdır ve karmaşık şekilli parçalarda homojen kalınlıklı tabaka oluşumu oldukça zordur. İşlem 800 - 1000 °C arasında 0,5 - 5 saat süre ile yapılır. Banyo bileşimlerinde 0.2 A/cm² akım yoğunluğu, 600 - 700 °C sıcaklık ve 2 - 6 saat süre şartlarını kullanarak sade karbonlu çelikte 15 - 70 µm kalınlıkta borlu tabaka elde edilmiştir [17].

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

3.2.3 Derişik Çözeltilde Borlama

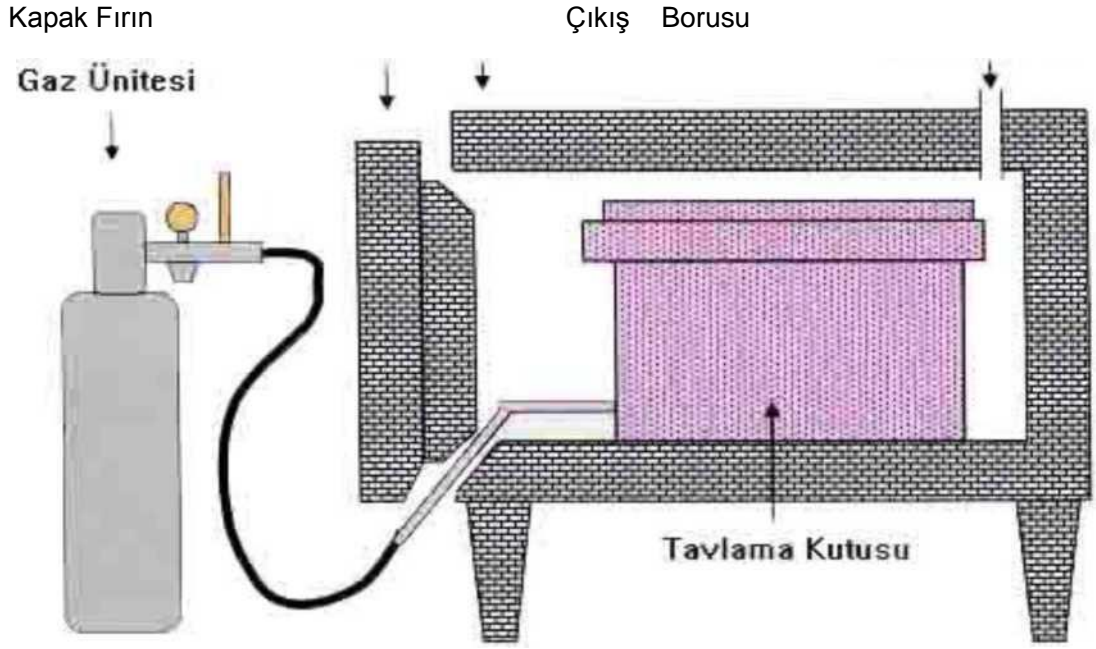
Boraks ve Borasitli anhidriti içeren derişik ortamlarda yüksek frekanslı ısıtmayla deneyler yapılmıştır. Belli bir bor difüzyonu sağlandığı halde birleşik tabakalar elde edilememiştir. Boraks ve borasidi anhidriti içeren değişik miktarlı çözeltilerde yapılan deneyler kapalı borür tabakası vermemiş ve 1000 °C'de 10 dakika süre ile 0,1 A/cm² ve 450 kHz frekans ile doymuş boraks çözeltisinde tabakalar elde edilmiştir. Bu yöntem esnasında açığa çıkan bor halojenleri ilgili (uygun) asit oluşumları altında su ile kuvvetli reaksiyona girerler. Bu sebeple derişik çözeltilde borlama başarılı olmamıştır [29].

3.3 Gaz Ortamda Borlama

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

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

- 1) Diboran, kullanılan temel bileşiktir ve çok zehirlidir. Diboran için en düşük zehirlilik sınırı 0.1 ppm 'dir. Çok tehlikeli olarak bilinen hidrojen siyanür (prussik asit) için bile 10 ppm'e kadar müsaade edilmektedir. Diboran, hidrojen ile karıştırıldığında bile çok pahalıdır.
- 2) Trimetilbor $[(CH_3)_3B]$ ve trietilbor $[(C_2H_5)_3B]$ ile yapılan gaz ortam borlamasında, bu bileşiklerin yüksek oranda karbon içermeleri sebebiyle karbürizasyon söz konusu olabilmektedir. Bu etki trietilborda, triemetilbordan daha kuvvetlidir.
- 3) Bor halojenürleri korozyona sebep olabilirler. Gaz ortamın bileşimi, basıncı ve gazın tanktan akış hızı borlamayı etkiler.



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

3.4 Plazma Borlama

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

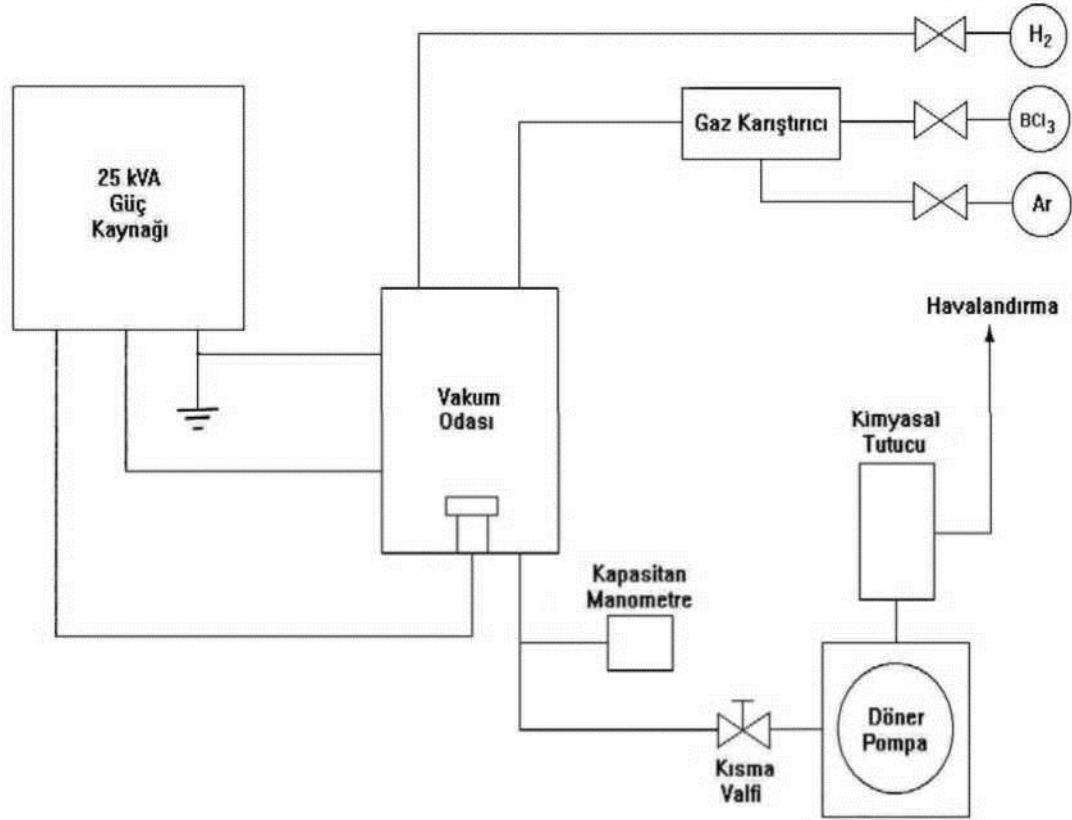
BCl_3-H_2Ar gazlarının karışımı içinde plazma borlamanın BCl_3 konsantrasyonunun daha iyi kontrol edilmesi, kalıntı gerilmenin azalması ve borlu film tabakalarının daha yüksek mikro sertliği gibi olumlu özellikler gösterdiği iddia edilmektedir. Şekil 3.4 'te bir plazma borlama imalathanesinin şematik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

Plazma borlamanın avantajları şunlardır [31].

- 1- Borlanan tabakanın bileşim ve derinlik kontrolü yapılabilmektedir.
- 2- Klasik paket borlamaya kıyasla daha yüksek bir bor potansiyeli vardır.
- 3- Daha ince borlu tabakalar elde edilebilmektedir.
- 4- İşleminde kullanılan sıcaklık ve uygulanan işlem süresinde azalma vardır.

- 5- Yüksek sıcaklık fırınlarına ve gerekli aksesuarlara ihtiyaç yoktur.
- 6- Enerji ve gaz sarfiyatında tasarruf sağlanmaktadır.

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



Şekil 3.4 : Plazma borlama tesisat şeması [31].

3.5 Borlama İşleminin Avantajları ve Dezavantajları

3.5.1 Borlama İşleminin Avantajları

- Borlama işleminin en önemli özelliği, elde edilen borür tabakasının çok yüksek sertlik (1450 - 5000 HV) ve yüksek ergime sıcaklığına sahip olmasıdır. Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme yöntemleri olan sementasyon ve nitrürasyonla elde edilenlere göre çok daha yüksektir.

- Borür tabakalarının yüksek yüzey sertliğine ve düşük sürtünme katsayısına sahip olmaları; adhesiv, kimyasal tribo - oksidasyon, yüzey yorulması ve abrasif aşınma gibi temel aşınma mekanizmalarının oluşumunu önlemede çok önemli yararlar sağlar. Bu sayede kalıp üreticilerinin, pahalı ve zor işlenebilen takım çelikleri yerine, üstelik orijinal malzemeninkinden daha üstün özelliklere ve aşınma direncine sahip olan kolay işlenebilen çelikleri kullanabilmeleri mümkün olmuştur. Bu da takım ve kalıp ömrünü artırdığı gibi yağlayıcı kullanımını da azaltır.
- Borür tabakası, yüksek sıcaklıklarda bile sertliğini korumaktadır.
- Katı ortam borlamasında yüzey oldukça temiz çıkmakta, ayrıca temizleme işlemine gerek kalmamaktadır.
- Kutu borlamasının kolay uygulanması, toz bileşiminin değiştirilebilmesi, çok az ilk yatırım maliyetinin olması nedenleriyle oldukça ekonomiktir.
- Isıl işlem uygulanabilen malzemeler, performanslarının geliştirilmesi amacı ile borlama sonrası tamamen sertleştirilebilirler.
- Borlama; bir iş parçasının sertleştirilmesi istenen seçilmiş bölgelerin ve düzensiz karmaşık şekilli parçalara düzgün ve dengeli olacak şekilde uygulanabilir.
- Borlama, oksitleyici ve korozyif ortamlarda parçanın yorulma ömrünü artırır.
- Borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin oksitleyici olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerin erozyon direncini arttırdığından; bu özellikleri nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Borlama işlemiyle, düşük alaşımlı çeliklerin H_2SO_4 , H_3PO_4 ve HCl gibi etkili asitlere karşı direncini artırmak mümkündür.
- Borlanmış yüzeyler, 850 °C dolaylarındaki yüksek sayılabilecek sıcaklıklarda orta seviyede oksidasyon direncine ve oldukça yüksek sayılabilecek düzeyde ergimiş metal korozyon direncine sahiptir.

3.5.2 Borlama İşleminin Dezavantajları

- Borlama teknikleri esnek değildir. Gaz ortamda sementasyon ve plazma nitrürasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre işçilik ve işletim maliyetleri daha yüksektir. Daha esnek olan gaz karbürizasyonu ve plazma nitrürasyonu işlemlerinin kısa sürede ve daha kolay gerçekleşmesi borlamaya göre bazı avantajlar sağlamaktadır. Buna rağmen; yüksek sertlik ve kalıcı yüksek aşınma korozyon direncinin arzu edildiği durumlarda borlama işlemi tercih edilmektedir. Ucuz iş gücü temin edilebilen yerlerde de borlama tercih edilen bir işlemdir.
- Borlamaya tabi tutulan malzemelerde bor tabaka kalınlığının % 5 - 20 'si oranında boyutsal artış gözlenmektedir. Örneğin, 25 µm 'lik bir tabaka kalınlığı, 1.25 - 6.25 µm 'lik bir büyümeye neden olmaktadır. Bu kalınlık artışı borlanan malzemenin cinsine ve borlama koşullarına bağlıdır
- Çok hassas toleranslarla çalışmak gerektiği zaman, kaplamanın işlenmesi elmas takımlarla mümkün olmaktadır. Çünkü yüzeyin geleneksel tekniklerle işlenmesi sırasında kaplama tabakasında kırılmalar meydana gelmektedir. Bu da kaplama kalitesinde bozulmalara ve çatlamalara yol açmaktadır.
- Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı zorlanmalarda yorulma özellikleri, 2000N 'luk yük altında bulunan yüksek basınçlı yüzeylerde karbürizasyon ve nitrürasyonla kıyaslandığı zaman çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği nedeniyle, dişli üretiminde bir sınırlama söz konusu olmaktadır.
- Bu yöntemin işlem parametrelerinin kontrol yeteneğinin çok kötü olması, otomasyonun mümkün olmaması nedeniyle, elle çalışma zorunluluğu gerektirmesi ve atık ürünlerin çevreye verdiği olumsuz ve zararlı etkilere sahiptir.
- Borlama sonrası ısıl işlem görecektir olan çeliklerde borür tabakasının özelliklerinin korunması için soy gaz atmosferi veya vakum altında çalışmak gerekmektedir [32, 34].

4. BORÜR TABAKASININ ÖZELLİKLERİ

4.1 Borür Tabakası

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

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

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

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

Demir esaslı malzemelerde borlama sonucunda, Fe_2B fazının hakim olduğu dış yapısına benzer kolonsal bir yapı oluşur. Çift fazlı $Fe_2B + FeB$ tabakası, vakum altında 800 °C 'de uzun süreli ısıl işleme tabi tutulduğunda tek fazlı Fe_2B fazı elde edilebilmektedir. Bu fazların yanında yüksek karbonlu çeliklerde ve dökme

demirlerde $Fe_3(B, C)$ ve $Fe_5(B, C)$ tipi fazlar da oluşabilir. Tablo 4.1 'de FeB ve Fe_2B fazlarının tipik özellikleri verilmektedir [38].

Tablo 4.1: FeB ve Fe_2B fazlarının tipik özellikleri [38].

Özellik	Fe_2B	FeB
Kristal Yapı	Hacim merkezli tetragonal	Ortorombik
Kafes Parametresi (Å)	a = 5.078, c = 4.28	a = 4.053 , b = 5.495 c = 2.946
Mikrosertlik (GPa)	18 - 20	19 - 21
Elastisite Modülü (Gpa)	280 - 295	590
Bor içeriği (% ağırlıkça)	8.83	16.23
Yoğunluk (gr / cm ³)	7.43	6.75
Termal genişleme katsayısı Ppm / °C	7.65 (200 - 600 °C) 4.25 (100 - 800 °C)	23 (200 - 600 °C)
Ergime sıcaklığı (°C)	1389 - 1410	1540 - 1657
Termal İletkenlik (W / m . K)	30.1 (20 °C)	12.0 (20 °C)
Elektriksel Direnç (10 ⁻⁶ cm)	38	80
Curie Noktası (°C)	742	325
Renk	Gri	Gri

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

Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertlikleri ve yüksek aşınma mukavemetleri ile tanınırlar. Eğer ortamda aşırı bor oranı mevcutsa ya da yüzeye geçişen bor oranı yüksekse, Fe_2B fazı (% 8,84 B) yanında, borca zengin FeB (%B) fazı da meydana gelebilir. Yüksek iç gerilmeye sahip olduğundan ve Fe_2B tabakasının üzerinden kavlanarak döküldüğünden dolayı FeB fazının oluşumu arzu edilmez [30, 41]. Borlu tabakanın aşınma dayanımı ve özellikleri, tabakanın tek veya çift fazlı olduğuna ve oluşum biçimine bağlıdır. En az aşınmanın daha tok ve sünek Fe_2B fazında, en fazla aşınmanın ise daha sert ve gevrek olan FeB fazında (1800 - 2000 HV) olan tabakada meydana geldiği bilinmektedir. En yüksek aşınma dayanımının FeB içermeyen, yani sadece Fe_2B fazından oluşan tabakalarda elde edildiği deneylerle bulunmuştur [41]. Borlama işleminde, borun yüzeye yayınması sonucu parçanın en üst bölümünde bileşik tabaka adı verilen borlu bölge, onun altında yayınma bölgesi ve en iç kısımda ise matriksi oluşturan çekirdek bölgesi yer alır. Yüzeyde borca

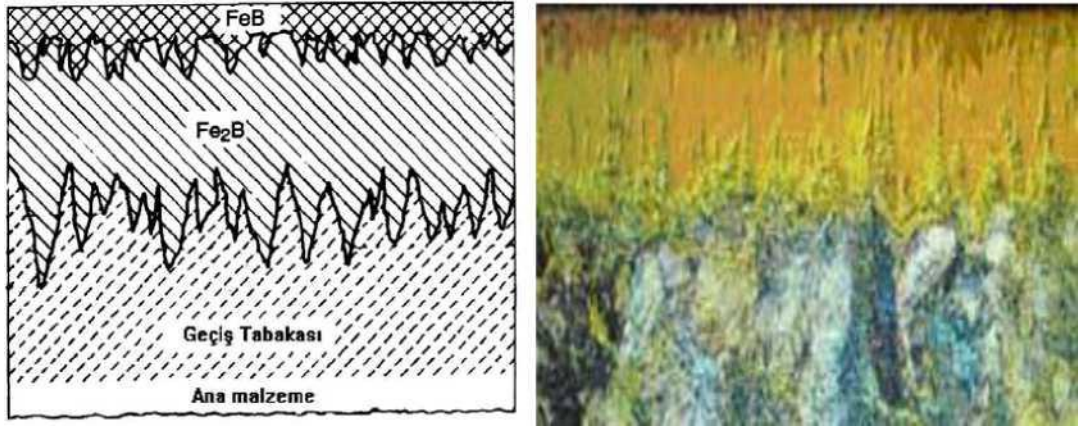
zengin FeB en üstte oluşurken, onun hemen altında daha homojen ve sünek olan Fe₂B olmak üzere iki demirborür fazı meydana gelir. Termal uzama katsayıları farklı olan bu iki fazın, yapıda aynı anda birlikte bulunmaları istenmez. Yapıda bulunan krom (Cr), tungsten (W), molibden (Mo) vs. alaşım elementleri, bor elementine karşı gösterdikleri yüksek afiniteden dolayı, tabaka kalınlığının düşmesine neden olurlar [42].

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

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

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

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

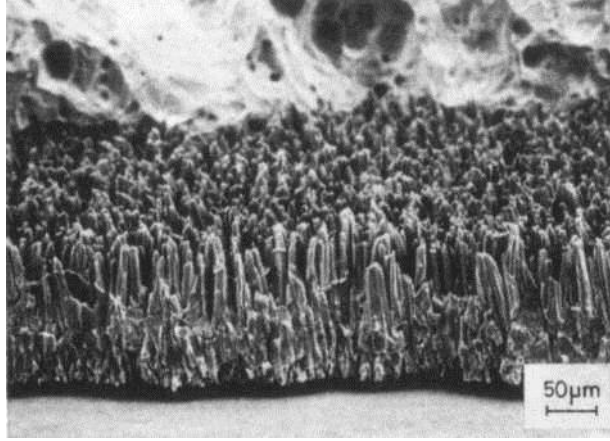


Şekil 4.1 : Borlama sonrası alaşımsız çelikte FeB ve Fe₂B fazlarının içyapı görüntüsü [3, 44].

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

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

Taramalı elektron mikroskobunda elde edilen; borlanmış bir çeliğin % 18 hidroklorik çözeltisi içinde birkaç saat kaynatılması sonrası çözünmüş, yaklaşık 120 µm uzunluğunda dış biçimli demirborür kristalleri (Fe₂B) Şekil 4.2’de görülmektedir. Fe₂B ve FeB’ye ait bazı özellikler Tablo 4.2 ’de verilmiştir[27].



Şekil 4.2 : Diş biçimli demirborür kristalleri (Fe_2B) [3, 26].

Tablo 4.2: FeB ve Fe_2B fazlarının bazı özellikleri [27, 44].

Özellik	Fe_2B	FeB
Ergime Noktası (° C)	1390	1550
Mikro sertlik (Vickers)	1600-1800	1800-2400
Uzama Katsayısı (1000 ° C)	$8.0 \times 10^{-6} K^{-1}$	$10-160 \times 10^{-6} K^{-1}$
Termal İletkenlik (1000 ° C)	0.2-0.3 W/cm °C	0.1-0.2 W/cm °C
Kuri (Curie) Noktası (° C)	742	325
Kristal Sistemi	Tetragonal Hacim Merkezli	Ortorombik
Kafes Parametreleri (Å ⁰)	a: 5.075 b: 4.249	a: 4.053 b: 5.495 c: 2.496
Yoğunluk (gr/cm ³)	7.32	-

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

4.2 Geçiş Bölgesi

Geçiş bölgesi, borlanmış metalde borür tabakası ile ana metal arasındaki ara bölgeyi tanımlar. Borlama sonucu oluşan borür tabakasında karbon çözünemediği için metalin yapısında bulunan karbon, bor difüzyonu sırasında

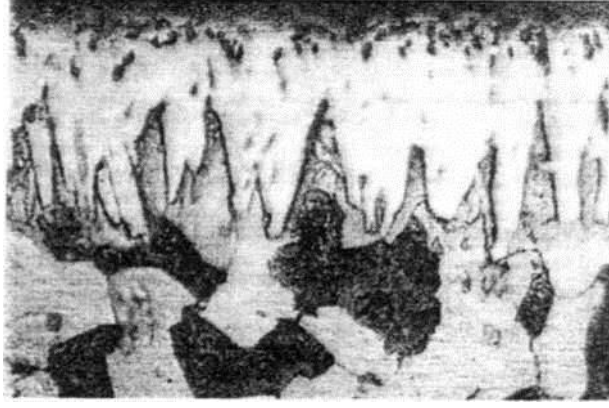
yüzeyden iç kısımlara itilir. Bunun sonucu olarak karbonca zengin geçiş bölgesi oluşur [30].

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

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

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

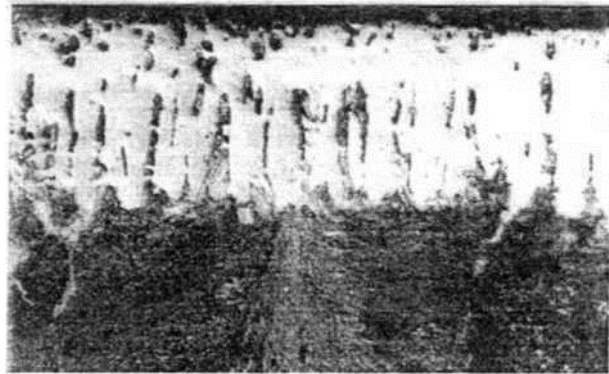
Yüzey tabakalarının incelendiği bir borlama işlemi deneyinde, deney numunesi olarak kullanılan AISI 1020, AISI 1040 çeliklerinin aynı şartlarda borlandığında, birbirinden farklı özelliklere sahip yüzey tabakaları sergiledikleri görülmüştür. Bu özellikler alaşımsız ve alaşımlı çeliklerde aşağıdaki şekilde gözlenmiştir. Düşük ve alaşımsız çeliklerde borlama sonucu oluşan yüzey tabakası Şekil 4.3 de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.3 : Borlanmış AISI 1020 çeliğinde yüzeyin mikro yapısı [21].

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

Alaşımli AISI 4140 çeliğinin borlanması neticesinde elde edilen yapı Şekil4.3'de görülmektedir. Malzeme yüzeyinde açık renkli dişli forma sahip borür tabakası bulunmaktadır. Borür tabakasının ana malzemeye bağlantısı, ana malzemedan ve borür tabakasından farklı özelliklere sahip bir geçiş bölgesi üzerinden gerçekleşir. Geçiş bölgesi alaşımli ve yüksek karbonlu çeliklerde meydana gelmektedir. Tane sınırları belirli olmayıp koyu renkte perlitik bir görünüme sahiptir [21].

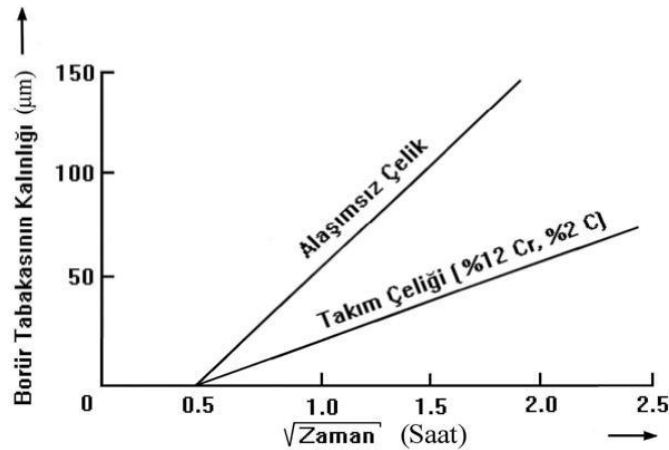


Şekil 4.4 : Borlanmış AISI 4140 çeliğinde yüzeyin mikro yapısı [21].

4.3 Borürlü Tabakanın Yapı ve Bileşimine Alaşım Elemanlarının Etkisi

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

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



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

Alaşımlı çeliklerin borlanması sırasında alaşım elementlerinden Co, Ni ve Mn 'nın oluşan Fe₂B tabakasının derinliğini artırdıkları saptanmıştır. Dikkati çeken bir nokta da, borür tabakasının karbon içermemesi ve silisyum çözünürlüğünün de çok düşük olmasıdır. Borlama esnasında Si ve C, borür tabakası tarafından içeri

doğru itilerek geçiş zonuunda C ve Si zenginleşmesine yol açtığı ileri sũrũlmũřtũr. % 1 'in izerinde Si içeren çeliklerde borũr tabakası altında silisyumca zengin bir tabaka gũrũlmekte ve bu ferrit çukuru olarak adlandırılmaktadır. Özellikle darbe ve lokal basınçlara maruz kalan borlanmış parçalarda Si içeriği % 0.7 'nin altında olması istenir [3].

Karbon, borũr tabakasının sertliğinde artışa sebep olmakta ancak bu artış % 0.4 karbona kadar devam etmektedir [49]. Karbon, ötektoid ũstũ çeliklerde borun difũzyonuna kuvvetle engel olur ve esasen daha ince tabaka kalınlığına neden olur. Bu gũrũnũm ostenit içinde karbonun ũzũnũrlũđũnũn artması ile borun toplanması sayesinde ve bũylece borũr dişlerin bũyũme frontunda sementitten ayrılmaya sebep olduğu izah edilmektedir. Ötektoid altı çeliklerde karbonun borlanabilirliğe etkisi farklı Őekillerde yorumlanır. Artan karbon miktarı, borũr tabakası kalınlığının aıkca azalmasına gũtũrdũđũ anlayışı kabul edilmektedir [50].

Alaşım elemanının orijinal malzemede yaptığı etki, borlanan yũzeyde “bor” un etkisiyle birleşerek daha bũyũk lũlere varabilmektedir. Yani borlu yũzeylerdeki sertlik, borũrlerin cinsi, miktarı ve oryantasyonuna bağlıdır. Her ne kadar Mn ve Cr borũrlerle birlikte demir borũrlerin rolũ var ise de, yũzeyi borla kaplı karbon çelikler ve özel alaşımlı çelikler arasındaki yũzey sertlik farkı izahını sadece alaşım elementlerine bağlamak gerekir [49].

4.4 Borlu Tabakanın Mekanik zellikleri

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

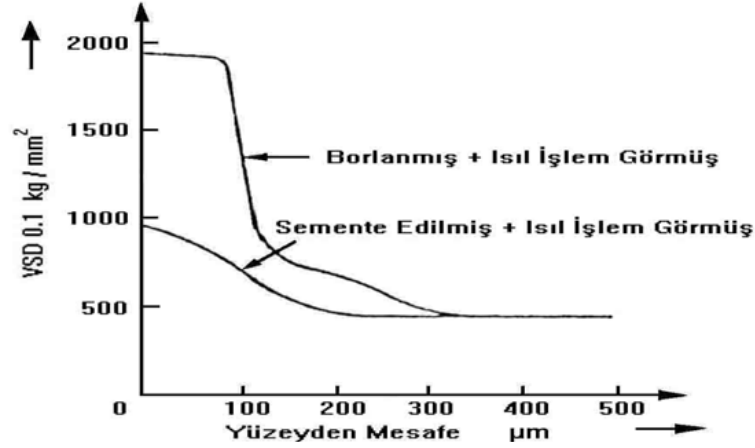
4.4.1 Sertlik

Borlamanın en büyük etkisi sertlik üzerine olup, ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak borür fazlarına bağlıdır. FeB fazı Fe_2B 'den daha sert ve gevrektrir [5 1] .

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

Tablo 4.3: Çeşitli işlemlere tabi tutulmuş malzemelerin mikrosertlik değerleri [45].

Malzeme	Mikrosertlik, HV
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 kalıp çeliği	630-700
Yüksek hız takım çeliği BM42	900-910
Nitrürlenmiş çelik	650-1700
Karbürlenmiş düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
Sementit karbürler WC + CO	1160-1820 (30Kg)
$Al_2O_3 + ZrO_2$ seramikler	1483 (30Kg)
$Al_2O_3 + TiC + ZrO_2$	1730 (30Kg)
Sialon seramikler	1768 (30Kg)
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B4C	5000
Elmas	S 10000



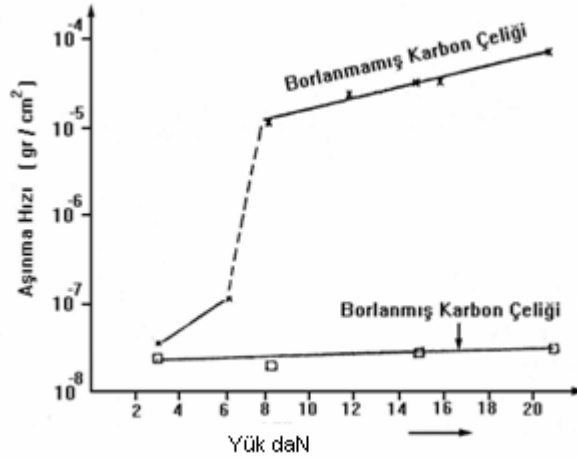
Şekil 4.6 : Borlu tabaka ile semantasyonlu tabakanın sertlik dağılımları kıyaslaması [27].

4.4.2 Aşınma Özellikleri

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

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

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



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

Bir başka çalışmada, borlamanın aşınma esnasındaki sürtünme katsayılarına etkisi üzerine; borlanmamış gri dökme demir numuneler ile % 66 Boraks, % 20 Ferro - Silis ve % 14 Kalsine Borik asit kullanılarak, 800 - 1000 ° C sıcaklıklarda 2 - 1 1 saat süre ile borlanmış gri dökme demir numuneler kullanılarak yapılan deneylerde Tablo 4.4. 'de farklı sürelerde borlanmış numuneler ile borlanmamış numunelerin sürtünme katsayıları verilmiştir.[52].

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

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

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

4.4.3 Korozyona Karşı Dayanıklılık

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

Borlama, düşük alaşımlı çeliklerin, asitlere ve sıvı çinkonun korozyonuna karşı direnci artırır. Borlamaya, özellikle ostenitik çeliklerin, hidroklorik asitlere karşı korozyon direncinde büyük bir artış sağlanır. Tuz vesodanın sudaki çözeltilerinde takım çeliklerinin korozyon direnci borlama sonrasında artar, alkali çözeltilerinde ise azalır [46].

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

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

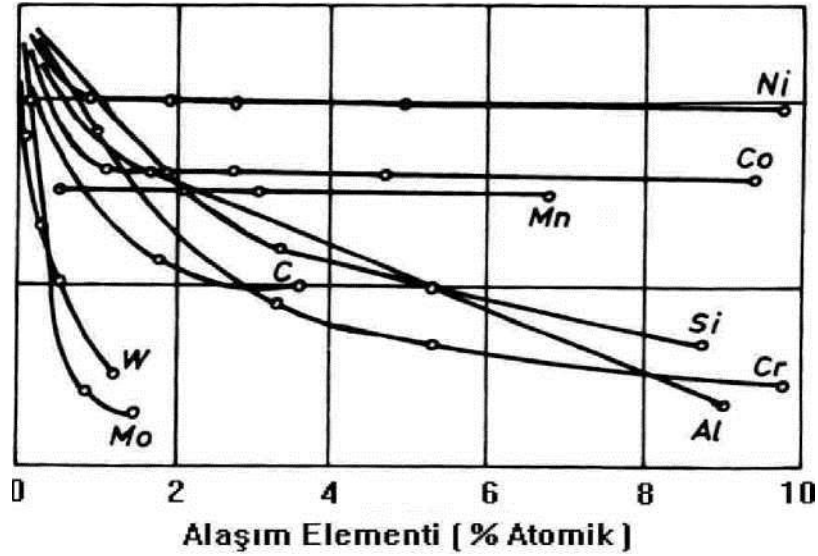
Yapılan bir çalışmada 3 saat süreyle borlanan 3 adet çeliğin % 10 H₂SO₄ içerisinde 56 °C 'deki borlanmış ve borlanmamış durumdaki kıyaslamaları Tablo'de verilmiştir [49].

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

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

4.5 Borlu Tabakanın Kalınlığı

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



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

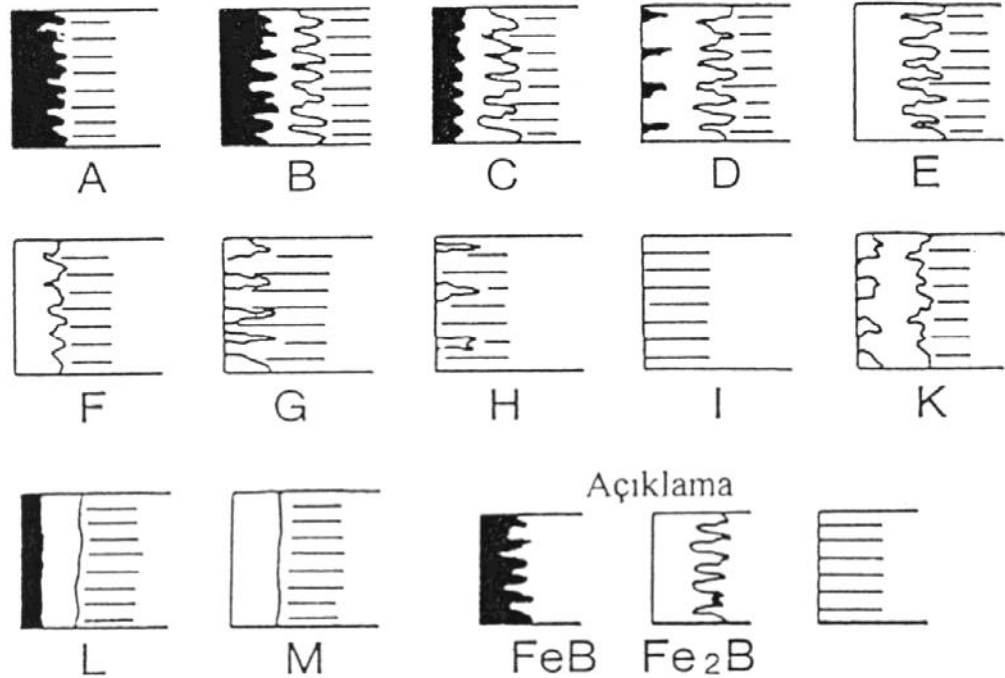
Bor yayındırma sıcaklığı, malzemenin cinsine, istenilen derinlik miktarına bağlı olarak değişmektedir. Borlama ile elde edilen kaplama derinliği, temel olarak malzemenin işleme hassasiyetine bağlıdır. Örneğin 130 µm 'luk kaplama derinlikleri, düşük alaşımlı ve karbon çelikleri üzerinde elde edilebilir.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

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

4.6 Bor Tabakası Çeşitleri

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

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



Şekil 4.9 : Borür tabakası çeşitleri. [71]

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

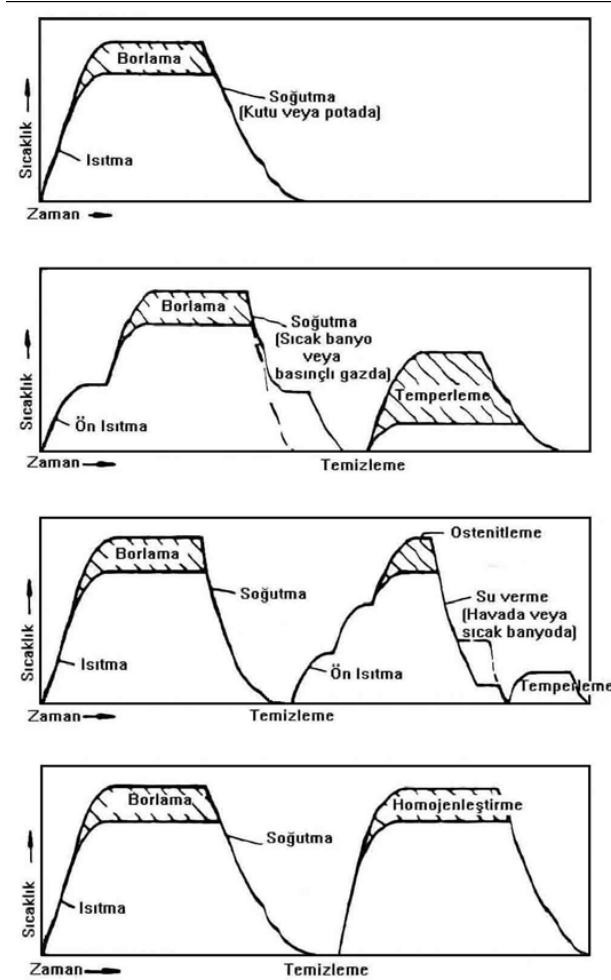
4.7 Borür Tabakasındaki Kalıntı Gerilmeler

Borür tabakasının mekanik özellikleri kalıntı gerilme ile ilgilidir. Isıl işlem, malzeme cinsi ve borlama şartlarına bağlı olarak, borür tabakası ve tabaka - ana metal ara yüzeyinde iç gerilmeler oluşur. Tabakanın faz yapısı (çift fazlı Fe₂B + FeB, tek fazlı FeB) ve geometrisi (girintili çıkıntılı veya düz oluşu), iç gerilmelerin tabakada yapacağı hasara etki eder. İdeal tabaka için tek faz (Fe₂B) ve iç gerilmenin daha geniş bir alana yayılması için tabaka geometrisinin girintili çıkıntılı olması arzu edilir. Tabakanın Fe₂B yanında FeB de içermesinin sakıncası, iki tabakada da farklı yönlendirilmiş iç gerilmelerin oluşmasıdır. İç gerilmeler Fe₂B 'de basma, FeB 'de ise çekme gerilmesi şeklindedir. Fe₂B ile FeB arasında 90 kg/mm² kadar bir basma gerilmesi oluşabilmektedir. Bu tür gerilmeler tabakanın çatlamasına ve FeB tabakasının dökülerek malzeme yüzeyinin bozulmasına neden olur [18].

4.8 Borlama İşlemi Sonrası Uygulanabilen Isıl İşlemler

Borlama işleminin en önemli üstünlüklerinden biri de, borlamadan sonra matris malzemesine istenilen ısıl işlemin yapılabilmesidir. Matris, malzemesinin mekanik özelliklerini iyileştirmek için yapılacak ısıl işlemlerin koruyucu gaz, vakum veya nötr tuz banyolarında yapılması önerilmektedir. Bu ısıl işlemler, eğer katı borlama yapılmışsa borlama kutusuyla birlikte, borlama işleminin ardından hızlı

soğutma olarak yapılabilir. Ayrıca ılık banyo ve basınçlı gazda hızlı soğutma, ardından temperleme, ostenitleme veya matriks malzemesini homojenleştirme şekil 4.10. 'daki gibi işlemler yapılabilir [54].



Şekil 4.10 : Borlamadan sonra yapılabilen ısı işlem örnekleri [54].

Yüksek basınçlara maruz kalacak borlanmış parçalar, ısı işlemine tabi tutulmadan kullanılamaz. Borlu tabakanın altı (ana yapı) yumuşaksa, lokal basınçlar yüzünden tabaka çökmesi ve dökülmesi olabilir. Bütün difüzyon yöntemlerinde olduğu gibi borür tabakasının oluşumunda da bir hacim artışı olmaktadır. Boyut değişimi, tabaka kalınlığı ve kullanılan malzemeye bağlıdır. Boyut artışı genel olarak tabaka kalınlığının % 20 'si kadardır. Alaşımli çeliklerde ise, bu değer % 80 'e kadar çıkabilmektedir. Borür tabakasının (Fe_2B) genleşme katsayısı, çelik grubu malzemelerin ortalama genleşme katsayılarına yakın olduğundan, bu tür malzemelere borür tabakasına hasar vermeden alışlagelmiş metotlarla ısı işlem

uygulanabilmektedir. Ostenitleme, 1150 °C 'nin üstüne çıkmama koşuluyla, nötr atmosferde yapılmalıdır [27].

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

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

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

Numuneler söz konusu sıcaklıklara kontrollü atmosferde ısıtılmış ve 30 dakika bu sıcaklıklarda bekledikten sonra havada soğutulmuştur. Sertlikler oda sıcaklığında 30 gr 'lık yüklerle Vickers olarak alınmıştır. Tablo 4.6 'dan anlaşıldığı gibi yüzey işleminden sonraki ısıl işlem, sementasyon tabakasını yumuşatırken, borlu tabaka sertliğini 900 °C 'lara kadar muhafaza etmektedir [27].

4.9 Borlanabilen Malzemeler

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

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

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

Malzeme Numarası	DIN	AISI	Kullanım Alanları
1.0037	St 37		Kovanlar, manifoldlar, nakil boruları, darbe plakaları, yatak levhaları, civatalar, çarklar, diş kılavuzları
1.0401	C15 (Ck15)	C1020	Dişli kutuları, pompa şaftları
1.0503	C 45	C1043	Pimler, taşlama diskleri, civatalar, bilyalar
1.0052	St50-1		Manivelalar, hamlaçlar
1.0727	45 S 20 (K)	C1138	Bilezikler, miller, zimbalar
1.1191	Ck 45	C1042	Helezon gövdeler, hamlaçlar, civatalar, haddeleme silindirleri
1.1730	C 45 W 3		Döküm levhalar
1.1740	C 60 W 3	W1	Bağlama kelepçeleri, kılavuz çubuklar
1.2080	X210Cr12	D3	Pres kalıpları, zimbalar, matriksler (dişi kalıplar), burçlar, pleytler, mandrenler
1.2210	115 CrV 3	C2	Sementasyonlu pimler ve saplamalar, kalıp zımbaları
1.2311	40 CrMnMo 7		Döküm levhalar, bükme çeneleri
1.2343	X 38 CrMoV 51	H11	Delme takımları, Pistonlar, baskı silindirleri, ağızlıklar (zivanalar), ingot (kütük) kalıpları
1.2344	X 40 CrMoV 51	H13	
1.2365	X 32 CrMoV 33	H10	Enjeksiyon zımbaları, dövme kalıpları
1.2379	X155 Cr V Mo 121	D2	Değişik formlardaki haddeler
1.2419	105 WCr 6		Gravür merdaneleri
1.2436	X 210 CrW 12	D6	Doğrultma merdaneleri
1.2550	60 WCrV 7	S1	Mandrenler, matriksler, çekme ve hadde kalıpları, zimbalar, kalıp bilezikleri
1.2601	X 165 CrMoV 12	D2	Çekme takımları, soğuk haddeleme silindirleri
1.2714	56 NiCrMoV 7	L6	Civatalar, dövme kalıpları
1.2767	X 45 Ni Cr Mo 4		Baskı aletleri, bükme kalıpları çeneleri, pres kalıpları, kalıpları, delici zimbalar
1.2842	90 MnCrV 8	O2	
1.3505 (2067)	100 Cr 6		Bilyalarda (rulmalar), kılavuzlar
1.3947	X 50 CrMnNiV 22 9		Mıknatıslanmayan aletler (avadanlıklar)
1.4006	X10 Cr13	410	Valf parçaları
1.4034	X40 Cr13	420	
1.4300	X 12 CrNi 18 8	302	Dişli gövdeleri ve kovanları
1.4401	X 5 CrNiMo 18 10	316	Eleklerin delikli parçaları
1.4410	G-X 10 CrNiMo 18		Erkek kılavuzlar
1.4541	X 10 CrNiMo 8	321	Bağlama bilezikleri, besleme memeleri, dişli gövdeleri
1.6580	30 CrNiMo 8		Haddeleme silindirleri
1.6587	17 CrNiMo 6	4317	Konik dişli çarklar (konik mahruti dişliler)
1.7131	16 Mn Cr 5	5115	Helisel dişliler, kızak yatakları
1.7147	20 Mn Cr 5		Kızak kolonları
1.7225	42 CrMo 4	4140	Pres matriksleri, ekstrüder sonsuz vidaları, helisel silindirleri, pistonlar, geri hareket mandalları
1.7228	50 CrMo 4	4150	
1.7707	30 CrMoV 9		Sonsuz dişliler, silindirler, enjektör meme plakları
	Gri pik döküm Örneğin: GG 20		Tekstil makinesi parçaları, bilezikler, kalıplar

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

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

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

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

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

5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kayali, Yalcin, Ulu ve Taktak in birlikte yaptıkları bu çalışmada boro-tempeleme ısı işleminin küresel grafitli dökme demir üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Standart gerilme ve Charpy deney numuneleri 900 °C de 1-3 ve 5 saat süre ile borlanmış daha sonra 4 değişik sıcaklıkta (250-300-350-450 °C) 1 saat süre ile temperlenmişlerdir. Mikro sertlik ölçümleri metalografik olarak hazırlanmış numunelerin enine kesitlerinde yapılmıştır. Bor tabakasının sertliği 1654–1867 HV0.05 arasında ölçülmüştür. Mekanik özellikler üzerinde temperleme sıcaklığının borlama zamanından daha etkili olduğu gözlenmiştir. Optimum mekanik özellikler 1-3 saat borlama ve ardından 250-350 °C de 1 saat temperleme neticesinde elde edilmiştir. [56]

Şahin ve Meriç 2001 tarihli çalışmalarında gri dökme demir küresel grafitli dökme demir ve kompakt dökme demir katı boron taneleri ile kutu borlama metodu ile borlama yapılmıştır. Çalışmalarda Ekabor 3 tozu kullanılmıştır ve 850-900-950 °C sıcaklıklarda 2-3-4-5-6 saat borlama işlemi yapılmıştır. Çalışma sonucunda bor tabasının kalınlığının sıcaklığa ve borlama zamanına bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Oluşan bor tabakasında FeB ve Fe₂B fazlarına rastlanmıştır. Borlama sıcaklığı ve zamanı ne olursa olsun bor tabakası ve dökme demirdeki grafit morfolojinin değişmediği veya zarar görmediği gözlemlendi. Sonuç olarak dökme demirin üç farklı çeşidi üzerinde yapılan bu deneylerde en kalın bor tabası gri dökme demirin 950 °C 6 saat borlanması ile oluşan yapıda gözlemlenmiştir (1387µm), küresel grafitli dökme demir ve kompakt dökme demir için daha düşük değerler gözlemlenmiştir. Mikro sertlik ölçümlerinde ise bor tabakasının sertliği küresel grafitli dökme demir ve kompakt dökme demir için 2685 HV değeri gözlemlenirken gri dökme demir için mikro sertlik değeri 2465 HV gözlemlenmiştir. [57]

Borlamanın dökme demir üzerindeki etkisinin araştırıldığı bir diğer çalışmada borlama yöntemi ile küresel grafitli dökme demirin yüzey özelliklerini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmada borlama işlemi boraks, borik asit ve ferro silikon içeren tuz banyosunda 850-950 °C aralığında 2-8 saat uygulanmıştır. Üç değişik küresel grafitli dökme demir (GGG50-60-80) yüzey özellikleri açısından araştırılmıştır. Borlanmış tabakanın yapısal karakterizasyonu optik mikroskop, SEM,

elektron mikroskobu ve X-ray diffraction kullanılarak incelenmiştir. Bor tabakasının sertlik ölçümleri 100g yüklemde Vickers ucu kullanılarak ölçülmüştür. Yapılan analiz çalışmaları göstermiştir ki karbon ve silikon alt tabaka ve bor tabakası ile konsantre bir şekilde birleşmiştir. Küresel dökme demir içerisindeki bakır konsantrasyonu arttığında bor tabakası ve alt tabaka arasında zenginleştirilen bölgede karbon ve silikonun azaldığı gözlemlenmiştir. XRD analizleri borlanmış GGG50 ve GGG60 küresel grafitli dökme demirlerin FeB ve Fe₂B fazlarının olduğunu göstermiştir. Buna rağmen borlanmış GGG80 de 850 °C de deney zamanı aralıklarında yalnızca Fe₂B oluştuğu görülmüştür. Bu arada GGG80 üzerinde oluşan borlanmış tabakanın sertliği GGG50 ve GGG60 a göre daha düşüktür. [58]

Baydoğan ve İzzet tarafından yapılan bir başka çalışmada borlama ve östemperleme GGG40 a birbirini müteakiben uygulanmıştır burada amaç iki ayrı çalışmadan elde edilecek avantajları tek bir çalışma da elde etmektir. Bu yeni uygulama ile alt yüzeyinde dönüşmüş östenit ve iğne yapılı ferrit bulunan, yüzeyde 30 mikron kalınlığında bir bor tabakası oluşturulmuştur. Yapılan aşınma testleri göstermiştir ki bu proses ile elde edilen aşınma dayanımı, alt yüzey mikro yapısı ferrit ve perlit içeren konvansiyonel yöntemlerle yapılan borlama işlemlerine göre çok daha fazla sertlik dayanımına sahiptir. [59]

Sakarya Üniversitesinden Şen ve arkadaşları 2003 tarihinde yaptıkları çalışmalarında borlama zamanının bor tabakasına olan etkisini incelemişlerdir. Borlama tuz banyosunda atmosfer basıncı altında 950 °C ve 6 saat için yapılmıştır. Oluşan FeB ve Fe₂B fazları Xray Diffraction XRD, SEM ve Optik mikroskop ile gözlenmiştir. Alaşım elementinin dağılımı x-ray spectroscopy ile gözlemlenmiştir. Deney sonucunda borlama zamanının borlanan tabakanın kalınlığına etki ettiği görülmüştür. Borlanmış tabakanın optik mikroskopta enine kesitinin incelenmesinde iğneli bir morfoloji görülmüştür. Sertlik ve kırılma tokluğunun ölçümünde Vickers ucu kullanılmıştır. Borlanmış yüzeyin mikro sertliği 1160-2140 HV ve kırılma tokluğunun 2.19–4.47MPa m^{1/2} aralığındadır.[60]

Şen ve arkadaşları yaptıkları bir diğer çalışmada borlanmış küresel grafitli dökme demirin kırılma tokluğunu incelemişlerdir. Borlama işlemi borax borik asit ve ferro-silikon içeren tuz banyosunda, atmosfer basıncı altında, 850 °C-950°C sıcaklık ve 2 - 8 saat için gerçekleştirilmiştir. FeB ve Fe₂B fazları XRD ile gözlemlenmiştir.

Aynı zamanda en uzun borlama zamanında en kalın FeB ve Fe₂B tabakalarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Optik mikroskopta deney numunelerinin enine kesitleri incelendiğinde iğneli bir iç yapının oluştuğu görülmüştür. Küresel grafitli dökme demirin bor tabakasında yapılan mikro sertlik ölçümlerinde mikro sertliğinde 1160-2140HV_{0,1} aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Bor tabakası kalınlığı 45-185µm aralığında ölçülmüştür. En kalın bor tabakası en yüksek sıcaklık ve en uzun borlama süresi için elde edilmiştir. Borlanmış tabakaların kırılma tokluğu ise 2,19 ve 4,5 MPa m^{1/2} olarak ölçülmüştür. Borlama süresi uzadıkça artan FeB fazı nedeni ile sürtünme sertliği azalmıştır [61]

Borlamanın aşınma üzerine etkisinin incelendiği bir başka çalışmada 2005 yılında Manisa Celal Bayar Üniversitesinden Meric ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada gri dökme demir, küresel grafitli dökme demir ve kompakt dökme demir kutu borlama metodu ile EKABor 3 tozu kullanılarak borlanmıştır. Borlayıcı olarak kullanılan ekabor 3 tozu 900 °C de 2,3,4,5 ve 6 saat uygulanmıştır. Borlanmış tabakanın; kalınlığı, mikro sertliği ve mikro yapısı incelenmiştir. Borlanmış ve borlanmamış dökme demirin aşınma davranışları incelenmiştir. Bunun için numunelerin test edilmesinde pin-on disk test aparatı kullanılmıştır. Hareketli yüzey olarak 1040 çeliği kullanılmıştır. Abresif aşınma davranışı sabit kuvvet ve sabit hız ile gözlemlenmiştir. Ağırlık kaybı ölçülmüş ve sürtünmüş yüzeyi incelenmiştir. Çalışma sonucunda oluşan bor tabakalarının iğneli yapıya sahip olduğu ve kalınlığının borlama süresi ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Üç farklı tip dökme demir içerisinde en büyük bor tabakası kalınlığı 900 °C de 6 saat borlama işlemine tabi tutan gri dökme demir de 110 µm olarak ölçülmüştür. Mikro sertlik değeri küresel dökme demir ve kompakt dökme demirde 2685 HV_{00,4} , gri dökme demir de ise 2465 HV_{00,4} olarak ölçülmüştür. Aşınma deneyleri sonucu ağırlık kaybının bor tabakası kalınlığı ile doğru orantılı olarak azaldığı görülmüştür. Borlanmış numunelerde sürtünme nedeni ile meydana gelen kayıpların numuneler ısınmaya başladıkça borlanmamış numuneler gibi davranmaya başladığı gözlenmiştir. [62]

2004 yılında Er tarafından yapılan çalışmada borlanmış ve borlanmamış malzemeler arasındaki abrazif aşınma dayanımını karşılaştırılmıştır. Yapılan bu çalışmada AISI 1030 ve AISI 1050 çeliğine bor kaplama işlemi uygulanmıştır.

Deneylem sonucunda yüzey sertliklerinin ve aşınma dayanımlarının işlemsiz borlanmamış hallerine göre 8 - 10 kat arttığını, sade karbonlu çelik malzemelerde artan karbon miktarının elde edilen borür tabaka kalınlıklarını belirgin bir şekilde azalttığı buna karşılık yüzey sertlik değerlerinde ise az da olsa artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir [55].

Selam 1996 tarihli bu çalışmasında gri dökme demirin yüzeyini borlamış ve aşınma dayanımını incelemiştir. Borlu tabakanın aşınma dayanımının yüksek olduğunu tespit etmiştir. Kayma yolunun artmasıyla sürtünme katsayısının numunelerdeki bor tabakası kalınlığına ters orantılı olarak arttığını, artan yük ve hız değerlerinde borsuz numunelerin aşınma miktarlarının borlu numunelere göre daha fazla olduğunu ifade etmiştir [52].

Osman Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisans tezi olarak borlama işlemi ve endüstriyel uygulamaları konu alan Tezcan nin yapmış olduğu bir çalışmada, borlama işlemi üzerine yapılmış çalışmalardan bir derleme yapılmıştır. Değişik borlama metotlarını ele almış ve endüstride çeşitli makine parçalarında uygulama örneklerinden bahsetmektedir [31].

Şen küresel grafitli dökme demirin borlanması ve özellikleri konulu doktora tezinde, küresel grafitli dökme demir (KGDD) malzemelerin termokimyasal olarak borlanabileceği üzerine çalışmalar yapmış ve başarıyla uygulanabileceğini ancak, KGDD malzemelerin kimyasal kompozisyonu, kaplama kalitesi üzerinde oldukça etkili olduğunu, örneğin silisyum içeren çeliklerin borlanması sakıncalı olduğunu belirtmektedir. KGDD malzemeler yüksek seviyede silisyum içermektedir. Yapılan araştırma, KGDD malzemelerin bor kaplanması için önerilenlerden daha çok parametreler olduğu alaşım veya düşük seviyede alaşım elementi içeren KGDD malzemelerin yüzeyinde oluşturulan borür tabakası, kaplama - matris ara yüzeyinde karbon esaslı bir ara bölge oluşturmakta ve bu tabakanın zayıf olması sebebiyle, kaplama tabakasında kısmi ayrılmalar olduğunu belirtmiştir. Ancak alaşım elementi olarak % 1 bakır ilavesi karbon birikimini engellemekte ve tek fazlı Fe₂B fazının oluşmasını sağlamakta olduğunu belirtmiştir. Oluşan kaplama tabakası homojen olarak malzemenin bütün yüzeyinde elde edildiğini ayrıca bor kaplanmış KGDD malzemenin kaplama tabakasında, grafit kürelerinin dağılımıyla kompozit

karakterli bir yapı sergilendiğini belirtmiş. Bu sayede, sürtünme katsayısı çeliklere göre oldukça düşük seviyelere ekilebildiğini ve KGDD 'lere önerilen bileşim ve işlem parametrelerine bağlı olarak, borlama endüstriyel boyutlarda uygulanabilirliğini belirtmiştir [32].

6. MATERYAL METOT

6.1 Deneyin Amacı

Bu araştırmada; alaşımlı KGDD numunelerin farklı sıcaklık ve sürelerde katı borlama işlemleri yapılması, borlama sıcaklığı ve borlama zamanının, KGDD malzemenin yüzeylerinde oluşan bor difüzyonu derinliğine olan etkisi ve aşınma direncine olan etkisinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca aynı KGDD'den daha önce değişik ısıl işlemler şartları ile [70] elde edilmiş alt ösferrit, üst ösferrit ve temperli martenzit matriks yapılarının, aşınma direnci ve yüzey sertliği açısından borlanmış numuneler ile karşılaştırılması hedeflenmiştir. Kimyasal bileşimi Tablo 6.1'de verilen döküm numuneler 800 °C, 825 °C ve 850 °C sıcaklıklarda 3, 4.5 ve 6 saat sürelerde borlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Aynı bileşimde malzemelerin döküm hali (perlitik-ferritik), alt ösferritik, üst ösferritik ve temperli martenzit matriks yapıları ile birlikte toplamda 13 adet numunenin mikro sertlik ölçümleri, sertlik dağılımları ve aşınma testleri yapılarak elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmış ve yorumlar yapılmıştır.

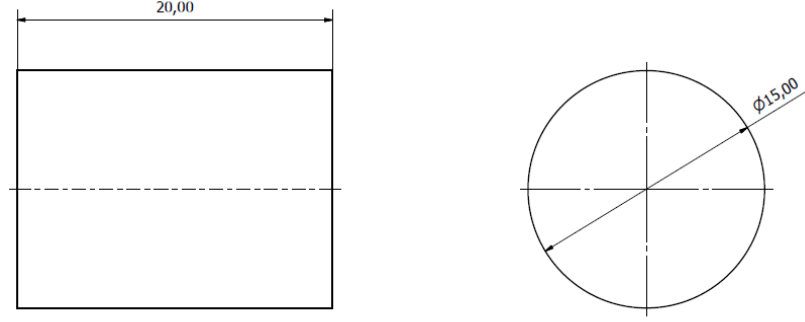
6.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler

Borlama işlemlerinde kimyasal bileşimi Tablo 6.1'de verilen küresel grafitli dökme demir malzemeler kullanılmıştır.

Tablo 6.1: Küresel Grafitli Dökme Demir numunenin kimyasal bileşimi (% Ağırlık).[70]

Kimyasal Bileşim % Ağırlık										
C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Ni	Mo	Cr	Fe
3,73	2,55	0,30	0,045	0,023	0,044	1,03	1,25	0,18	0,032	90,816

Deneysel çalışmalar için hazırlanan deney numunelerinin geometri ve ölçüleri Şekil 6.1 de verilmiştir.



Şekil 6.1 : Deney numunelerinin geometrisi. (Tüm ölçüler mm dir)

6.3 Deney Programı

Kimyasal bileşimi Tablo 6,1’de verilen döküm yapısındaki küresel grafitli dökme demir malzemeler üç farklı sıcaklık ve her sıcaklıkta üç farklı zamanda (dokuz farklı borlama parametresinde) borlama işlemine tabi tutulmuşlardır(Tablo 6.2).

Tablo 6.2: Borlama Deney Programı.

Borlama sıcaklığı (°C)	Borlama süresi (Saat)
800	3
	4.5
	6
825	3
	4.5
	6
850	3
	4.5
	6

Borlama işlemi Tablo 6.2 ’de verilen sıcaklık ve sürelerde yapılmıştır. Her bir borlama parametresi için 3’er adet numune borlanmıştır. Numunelerin karışmasını

önlemek için borlama işleminden önce tüm numuneler kodlanmış ve işlem sonrasında bu kodlara göre ayırt edilmişlerdir.

Borlama ısıl işlemi, katı ortamda yapılmıştır. Paslanmaz çelikten imal edilen kutu içine her bir borlama sıcaklığı için toplam 9 adet numune konmuş ve kutu Şekil 6.2’de verilen fırın içine yerleştirilerek, fırınla beraber ısıtılmıştır. Deney süresi, fırın istenen sıcaklığa ulaştığı andan itibaren tutulmuştur. Bor sağlayıcı olarak “ E-Kabor 2 ” adlı bor tozu kullanılmıştır. Tozların tane büyüklükleri 75-106 µm arasındadır. E - Kabor 2’nin içeriği; B₄C - SiC - KBF₄ şeklindeki bir bor sağlayıcı bileşik olup içeriğindeki bileşiğin oranları Vezneli A.Ş. (Salihli - Manisa) firması tarafından tarafımıza verilmemiştir. Paslanmaz çelik kutu tabanına 2 cm yüksekliğinde (E-Kabor 2) konduktan sonra numuneler yan kısımlarından ve birbirinden en az 1 cm mesafede olacak şekilde kutuya yerleştirilmişlerdir (Şekil 6.2). Daha sonra numunelerin üzeri 2 cm (E-Kabor 2) ile doldurulmuş, en üst kısma (“Ekrit”= Deoksidan) tozu konarak kapak kapatılmıştır. Ekrit de; saf demir ve oksit tutucu bileşenlerden oluşmaktadır. Tüm numuneler bu şekilde değişik sıcaklık ve sürelerde borlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Borlama ısıl işleminden sonra kutuda soğutulan numuneler, kutudan çıkartılıp temizlenmişlerdir.



Şekil 6.2: Borlama işleminin yapıldığı fırın.

Temperli martenzitik yapı elde etmek için KGDD numuneler ön ısıtmadan sonra nötr banyoda 900 °C’de 1 saat ostenitlenerek, 80 °C’ye ısıtılmış yağda soğutulmuş ve elektrikli fırında 400 °C’de 1 saat temperlenmişlerdir.

Alt ösferritik yapı elde etmek için KGDD numuneler ön ısıtmadan sonra 900 °C'deki nötr banyoda 1 saat süreyle ostenitlenmiş ve ardından hızla 300 °C'deki tuz banyosuna alınıp burada 1 saat süreyle ostemperlenmiş ve havada soğutulmuşlardır.

Üst ösferritik yapı elde etmek için ise numuneler ön ısıtmadan sonra 900 °C'deki nötr banyoda 1 saat süreyle ostenitlenip ardından hızla 365 °C'deki tuz banyosuna alınıp bu sıcaklıkta 1 saat süreyle ostemperlenmiş ve havada soğumaya bırakılmışlardır.

6.4 Metalografi Numunesi Kesimi

Metalografi numuneleri, borlama işlemine tabi tutulan numunelerden Şekil 6.3'de fotoğrafı bulunan kesme cihazı ile Ø15 x 20 mm boyutlarında kesilerek elde edilmişlerdir. Numuneler yarıçap ekseni boyunca 20 mm yükseklik doğrultusunda tam ortadan kesilerek hazır hale getirilmişlerdir.



Şekil 6.3: Numune kesme cihazı.

6.5 Tabaka Kalınlığı ve Mikro Sertlik Ölçümleri

Mikro Sertlik ölçümleri ($HV_{0,01}$) Şekil 6.4 de verilen Metcon (Mh-3) marka mikro vickers sertlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Sertlik dağılımı ölçümleri için her bir numuneden yüzeyden çekirdeğe doğru 20, 40, 60, 80, 100, 200, 300, 400, 500 µm derinliklerde her bir derinlik için toplam 5 ölçüm yapılarak ortalaması alınmıştır.



Şekil 6.4: Metcon Mh-3 MicroVickers sertlik ölçüm cihazı.

Yüzey sertlik ölçümleri (HV_1) için ise her bir numune için 10 ayrı noktadan ölçüm yapılarak bunların ortalaması alınmıştır.

6.6 Aşınma Deneyi

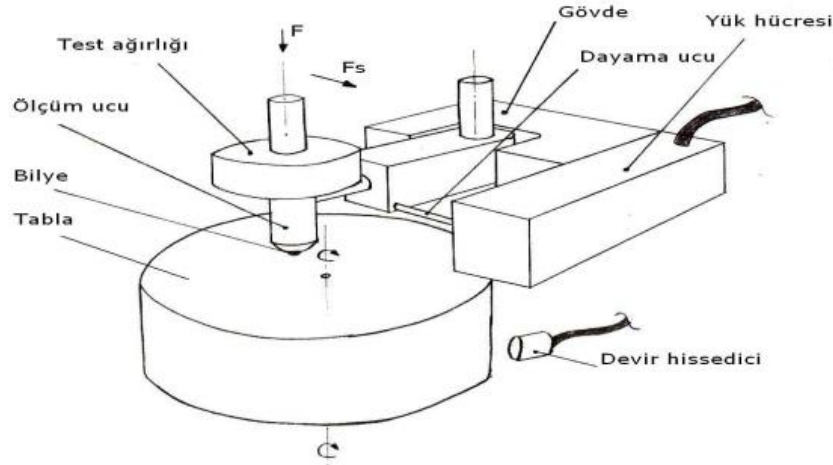
Aşınma testleri maksimum 10 N ölçüm kuvveti olan ve 18 devir/dakika ile çalışan Er-Mir marka ball on disk mekanizmalı deney cihazında yapılmıştır (Şekil 6.5).



Şekil 6.5: Er-Mir Ball-on-disk aşınma test cihazı.

Aşınma deneylerinde yüzeyleri borlanmış ve matriks yapıları değiştirilmiş numuneler Şekil 6.6'de görülen döner tabla üzerine bağlanarak, 5 mm çapındaki tungsten karbür bilya yardımıyla, 6.45 mm/s kayma hızında 6 saat (yaklaşık 140 m

mesafe) süreyle 6.8 N'luk sabit kuvvet altında, oda sıcaklığında ve kuru sürtünme şartlarında aşınmaya maruz bırakılmışlardır. Sürtünme katsayıları deney sırasında yük hücresi tarafından ölçülerek bilgisayara aktarılan sürtünme kuvveti yardımıyla elde edilmiştir.



Şekil 6.6: Ball-on-disk mekanizması.

6.7 Mikro Yapı İncelemesi, XRD Analizi ve SEM Görüntüleme

Mikro yapı incelemeleri için numune yüzeyleri standart metalografik yöntemler kullanılarak hazırlanmıştır. Dağlama ayraç olarak %5'lik Nital (HNO_3) çözeltisi kullanılmış ve dağlama daldırma suretiyle gerçekleştirilmiştir. Optik mikroskop görüntüleme çalışmalarında 50X-100X-200X ve 500X büyütmelerde görüntüler elde edilmiştir. Mikro yapı çalışmaları 6. Bakım Merkezi Komutanlığı bünyesindeki Kalite-Güvence biriminde bulunan Nikon marka Eclipse MA100 model optik mikroskopta gerçekleştirilmiştir.

XRD (X Işını Difraksiyonu) analizi için küresel grafitli dökme demir numunelerin 800°C 'de 6 saat (ortalama bor tabaka kalınlığı ve difüzyon derinliği göz önüne alınmak suretiyle) süre ile borlanmış numunesi üzerinde çalışılmıştır. Çalışmada TÜBİTAK-MAM laboratuvarlarında bulunan PANalytical X'Pert PRO MPD model XRD cihazında Cu X-ışını tüpü ile $\lambda=1,5405$ Angstrom dalga boylu ışın kullanılarak yapılan noktasal faz analizi ile borlanma neticesinde oluşan bileşikler tespit edilmiştir.

SEM (Taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri için ise Şekil 6.7’de verilen Zeiss marka Evo40 model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Aşınma testine tabi tutulan borlanmış numunelerden seçilen 4 adet numune ile alt ösferritik, üst ösferritik, temperli martenzit ve döküm yapısı(perlitik) için toplam 8 numunede aşınma izlerinin 35-150-600-2000-8000-15000X de görüntüleri alınmış ve birbirleri ile mukayese edilmişlerdir.



Şekil 6.7: Zeiss Evo40 Taramalı Elektron Mikroskobu.

SEM görüntüsü almak istediğimiz, ölçüleri Şekil 6.1’de verilen numunelerin boyları mikroskoba sağlıklı şekilde bağlanabilmeleri için 15 mm’ye düşürülmüştür. Numunelerin yüzeyleri alkol ile temizlendikten sonra 140 sn vakum altında bekletilerek yüzeye yapışmış olabilecek kir ve cüruf gibi partiküllerden temizlenmiştir. Bu işlemlerden önce numunelerimizi aşınma testine tabi tuttuğumuz için numunelerimiz bakalite alınmıştı, taramalı elektron mikroskobu çalışma prensibi gereği numunenin üst kısmı iletken, alt kısmı yalıtkan bakalit olduğu için ikisi arasında iletkenlik sağlamak amacıyla altın paladyum kaplama yapıldı. Bu işlem Şekil 6.8 de görülebilir.



Şekil 6.8: Altın-Paladyum uygulaması.

Son olarak numunelerimiz taramalı electron mikroskobuna konularak inceleme aşamasına geçildi(Şekil 6.9).



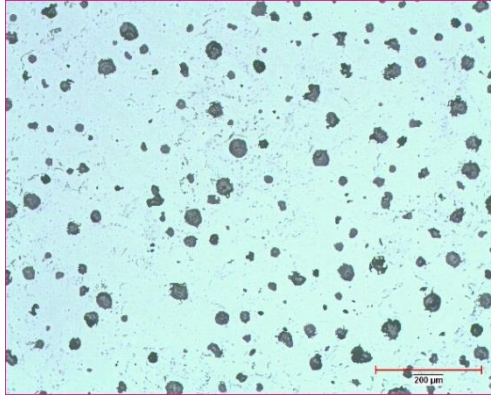
Şekil 6.19: Taramalı elektron mikroskobuna yerleştirilen numuneler.

7 SONUÇLAR VE TARTIŞMA

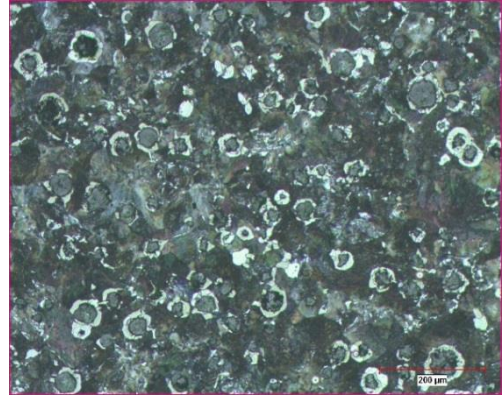
7.1 Mikro Yapılar

7.1.1 Borlanmamış Numunelerin Mikro Yapı İncelemeleri

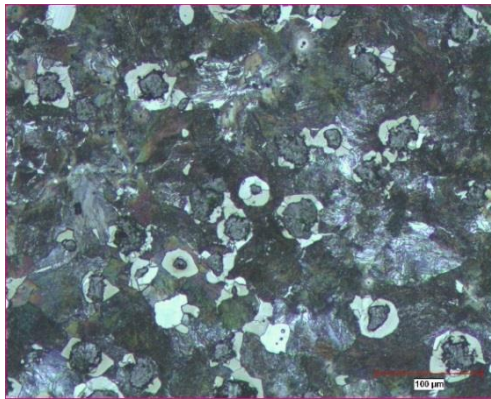
Isıl işlem görmemiş döküm yapısındaki numunenin iç yapı görüntüleri Şekil 7.1'de 100, 200 ve 500 büyütme oranlarında verilmiştir. Şekilden döküm yapısının grafit kürelerinin etrafını çevreleyen ferrit fazı (beyaz alanlar) ile birlikte perlitik-ferritik matris yapısına sahip olduğu görülmektedir.



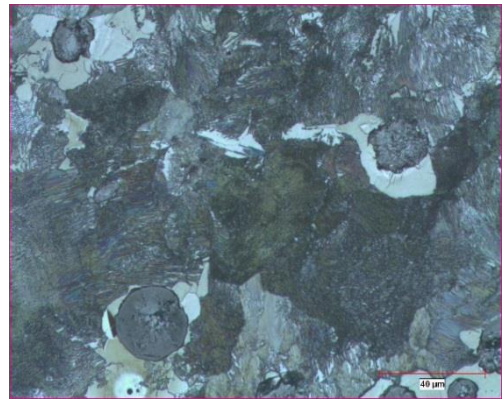
Dağlanmamış (a)



Dağlanmış (b)



Dağlanmış (c)

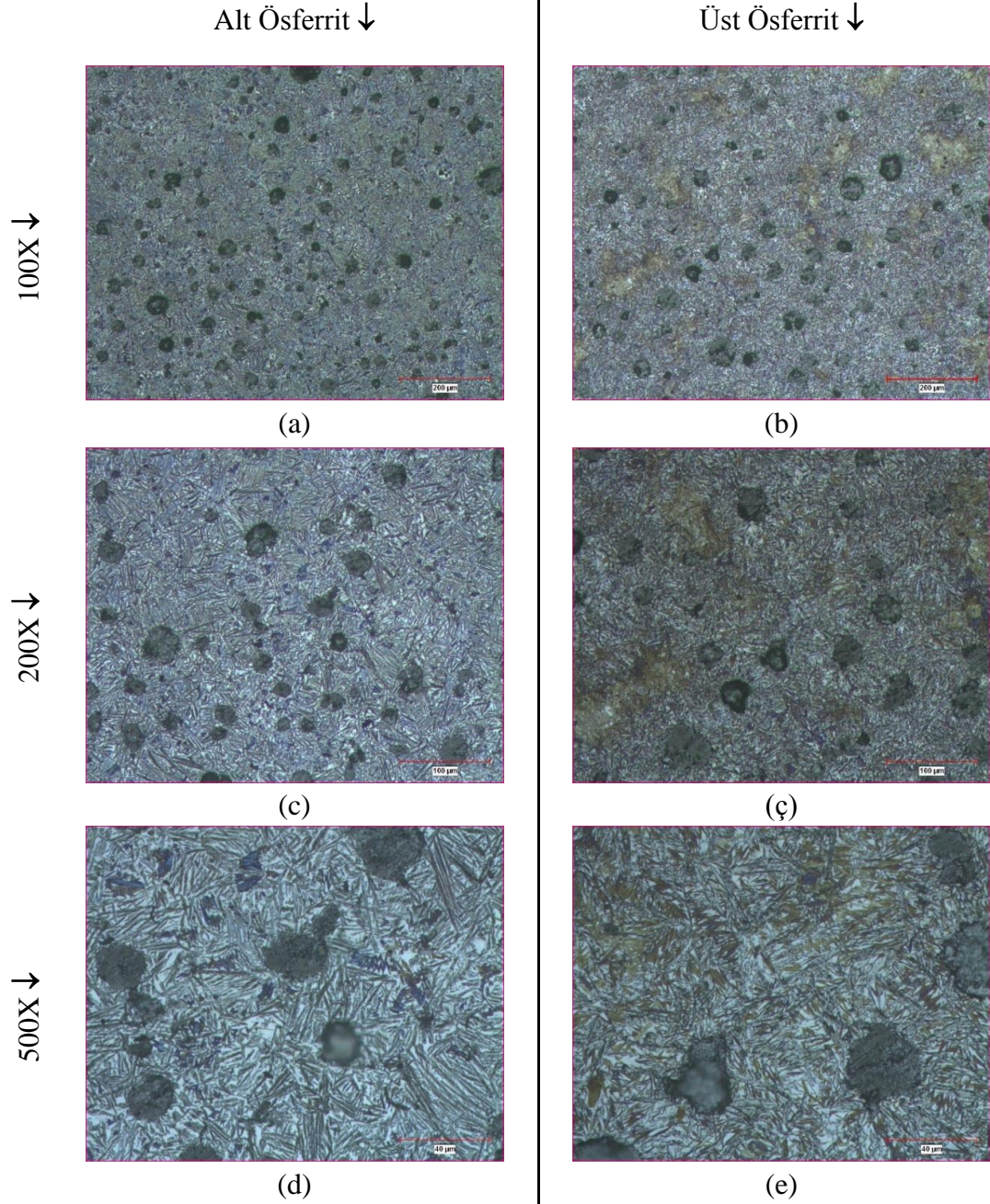


Dağlanmış (ç)

Şekil 7.1: Döküm yapısı(perlitik-ferritik) mikro yapı görüntüleri.

(a) 100x, (b) 100x, (c) 200x, (d) 500x

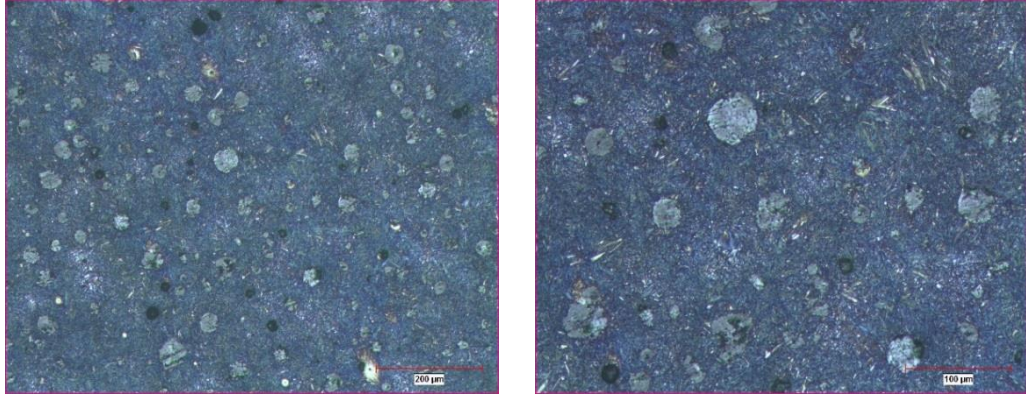
Östempereleme ısııl işlemeyle elde edilen alt ösferrit ve üst ösferrit numunelerin iç yapı görüntüleri Şekil 7.2’de verilmiştir. Alt ösferritik numunenin iç yapısı incelendiğinde 300 °C’de 1 saat östempereleme işleme ile matris yapıda iğnesel ferrit (koyu kısımlar) ile karbonca zengin ostenit (beyaz kısımlar) fazlarının birlikte bulunarak ösferritik yapıyı meydana getirdiği gözlenmiştir.



Şekil 7.2: Alt ösferrit ve Üst ösferrit mikro yapı görüntüleri.

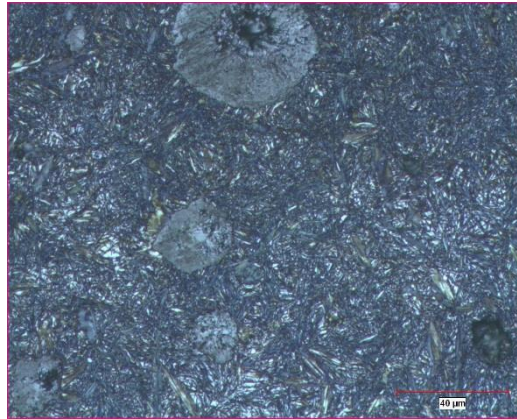
(a) Alt Ösferritik 100x, (b) Üst Ösferritik 100x, (c) Alt Ösferritik 200x, (ç) Üst Ösferritik 200x, (d) Alt Ösferritik 500x, (e) Üst Ösferritik 500x

Temperli martenzit numunenin iç yapı görüntüleri Şekil 7.3’de 100, 200 ve 500 büyütme oranlarında gösterilmiştir. Mikro yapı resimleri incelendiğinde az miktar kalıntı ostenit (beyaz alanlar) ile birlikte matriks yapıya iğnesel martenzitin hakim olduğu görülmektedir.



(a)

(b)



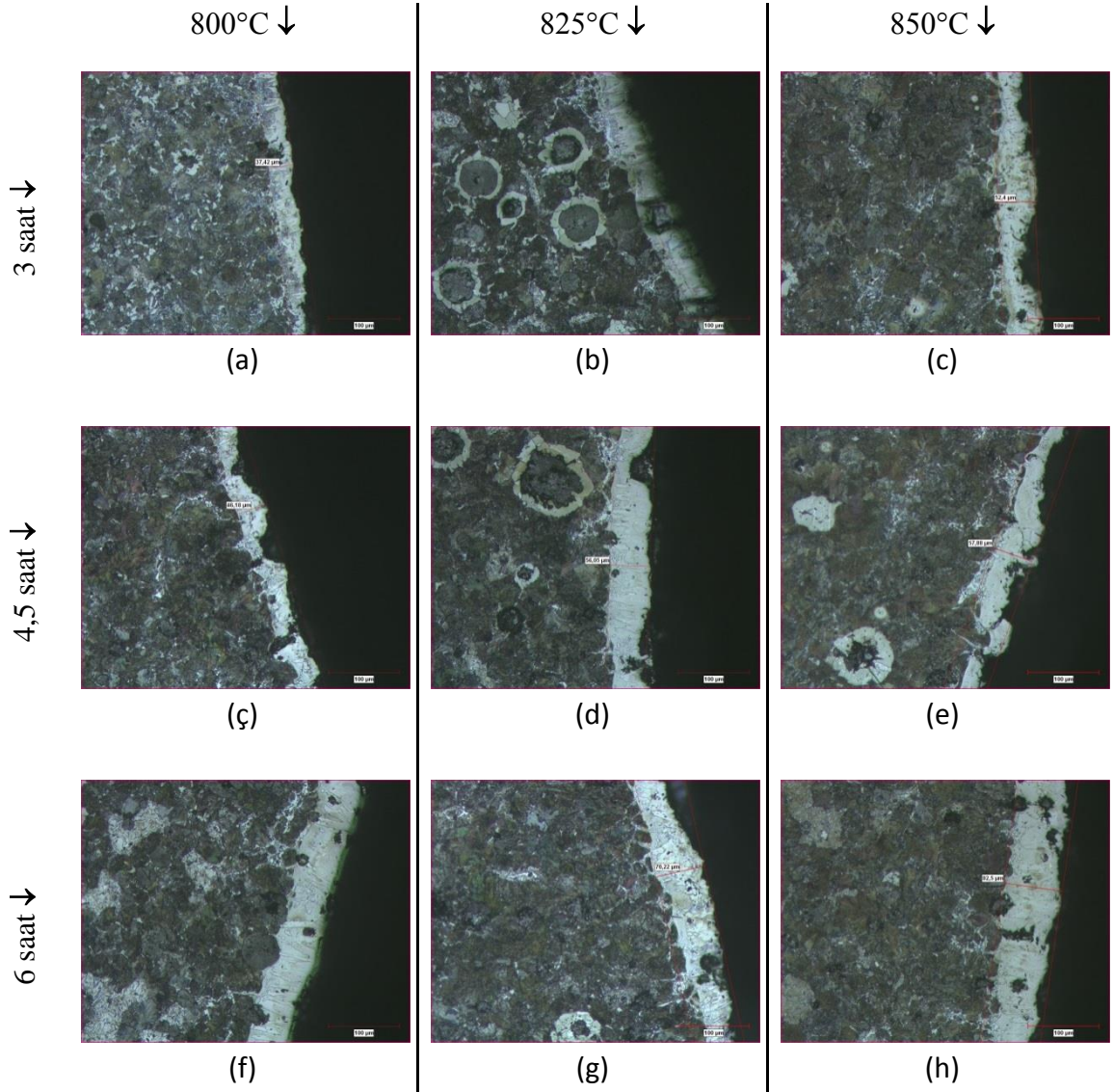
(c)

Şekil 7.3: Temperli Martenzit mikroyapı görüntüleri.

(a) Temperli Martenzit 100x, (b) Temperli Martenzit 200x, (c) Temperli Martenzit 500x

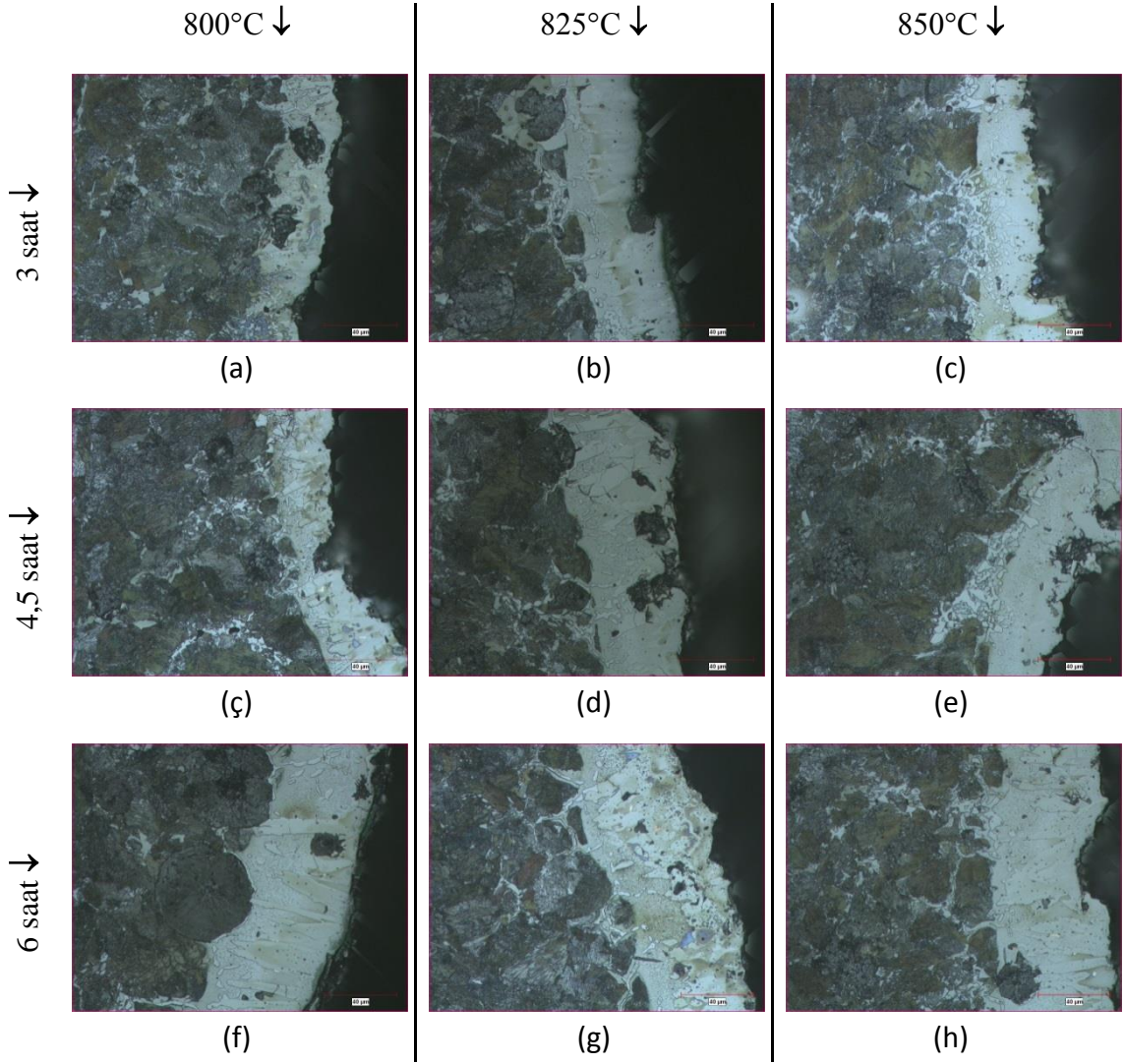
7.1.2 Borlanmış Numunelerin Mikro Yapı İncelemeleri

800°C, 825°C ve 850°C borlama sıcaklıklarında 3, 4.5 ve 6 saat sürelerde borlama işlemine tabi tutulan numunelerin bor tabakasını gösteren iç yapı görüntüleri Şekil 7.4 ve 7.5'te sırasıyla 200X ve 500X büyütmelerde verilmiştir.



Şekil 7.4: Borlanmış numunelerin mikro yapı görüntüleri (200X).

(a) 800°C'de 3 saat, (b) 825°C'de 3 saat, (c) 850°C'de 3 saat, (ç) 800°C'de 4,5 saat, (d) 825°C'de 4,5 saat, (e) 850°C'de 4,5 saat, (f) 800°C'de 6 saat, (g) 825°C'de 6 saat, (h) 850°C'de 6 saat.



Şekil 7.5: Borlanmış numunelerin mikro yapı görüntüleri (500X).

(a) 800°C'de 3 saat, (b) 825°C'de 3 saat, (c) 850°C'de 3 saat, (ç) 800°C'de 4,5 saat, (d) 825°C'de 4,5 saat, (e) 850°C'de 4,5 saat, (f) 800°C'de 6 saat, (g) 825°C'de 6 saat, (h) 850°C'de 6 saat.

Bor tabakası ile matriks ara yüzeyinde bazı bölgelerde az miktarda düzensiz ve çizgisel beyaz alanlar gözlenmiştir (Şekil 7.5). Literatürde [63, 62, 64] bu oluşumun silisyum bakımından zengin ferrit fazı olabileceği belirtilmiştir. Bunun nedeni; borlama işlemi sırasında yüzeye yayılan bor atomlarının yüzeydeki C, Si ve Al elementlerini iç kısımlara doğru düzensiz olarak itmesine [65], bor tabakası-matriks ara yüzeyinde silisyumca zengin bölgelerin oluşmasına ve silisyumun da ferrit çekirdeklenmesine katkıda bulunmasından bu bölgelerde yavaş soğumanın etkisiyle silisyum bakımından zengin ferrit bölgelerinin oluşmasına bağlanmıştır.[66]

7.1.2.1 Bor Tabakası Kalınlıklarının İncelenmesi

Optik mikroskop görüntüleri üzerinden ölçülen ve borlama sıcaklığı ve borlama süresine bağlı olarak oluşan bor tabakası kalınlıkları Tablo 7.1’de verilmiştir. Bor tabakası kalınlığı hem sıcaklığa ve hem de süreye bağlı olarak artış göstermiştir.

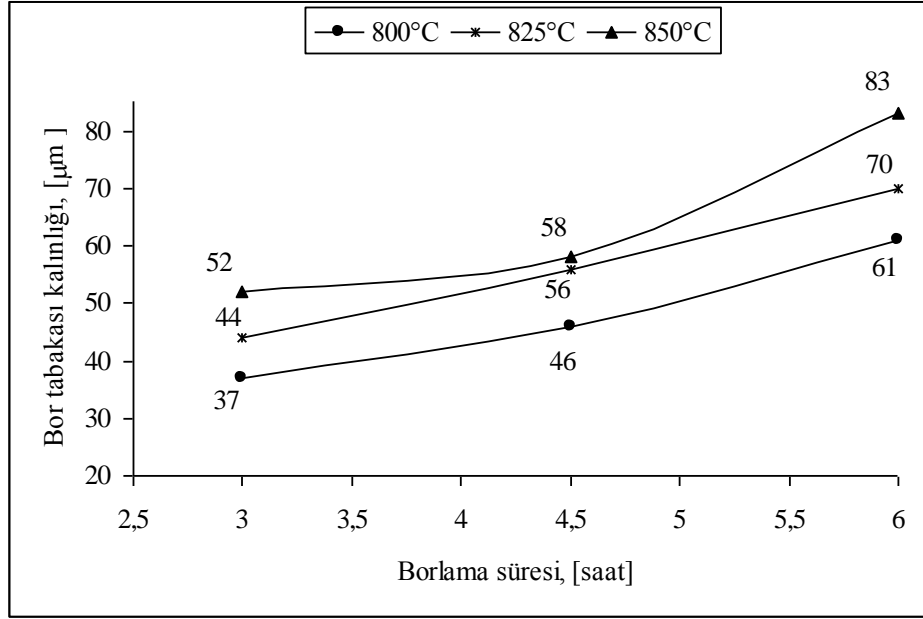
Borlama süresinin oluşan bor tabakası kalınlığına etkisi Şekil 7.5 ve Tablo 7.1 üzerinden incelendiğinde borlama süresinin artışı ile oluşan bor tabakası kalınlığının arttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç Şen ve Meriç’in yaptıkları çalışma ile örtüşmektedir [57].

Şen ve arkadaşları tarafından yapılan bir başka çalışmada da 950 °C borlama sıcaklığında farklı sürelerde borlanan küresel grafitli dökme demir numunelerde oluşan bor tabakası kalınlıkları ölçülmüş ve zamana bağlı olarak tabaka kalınlıklarının arttığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu çalışmalarımızda elde edilen sonuçlarla paralellik göstermektedir [60].

Tablo 7.1: Borlama sıcaklık ve süresine bağlı olarak oluşan bor tabakası kalınlıkları.

Borlama sıcaklığı [°C]	Borlama süresi [saat]	Bor tabakası kalınlığı [µm]
800	3	37
	4,5	46
	6	61
825	3	44
	4,5	56
	6	70
850	3	52
	4,5	58
	6	83

Borlama sıcaklık ve süresinin bor tabaka kalınlığına etkisini daha net görebilmek amacıyla sıcaklık ve süreye bağlı olarak bor tabaka kalınlıkları Şekil 7.6'da gösterilmiştir. Tabaka kalınlığına uzun borlama sürelerinde sıcaklığın, yüksek sıcaklıklarda ise borlama zamanının etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür (Şekil 7.6). Borlama, difüzyon esaslı bir işlem olduğundan bu sonuç uygun ve beklenen bir sonuçtur.

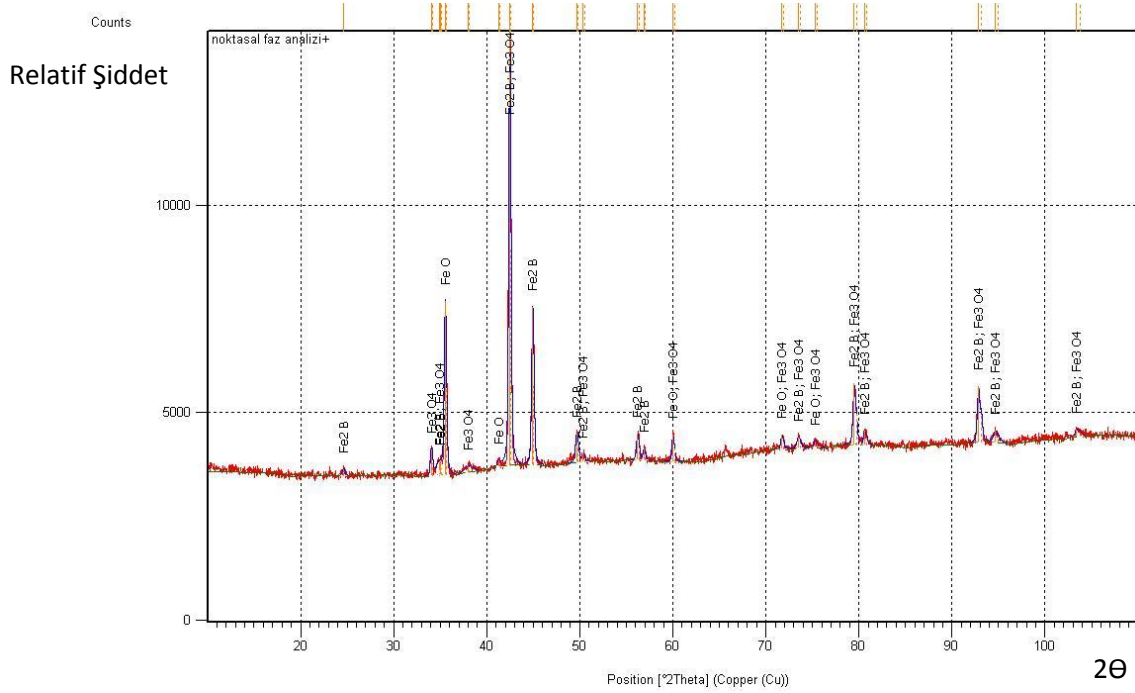


Şekil 7.6: Borlama sıcaklık ve süresinin oluşan bor tabakası kalınlığına etkisi.

7.1.2.2 XRD Analizi

800°C'de 6 saat borlama işlemi yapılmış KGDD numuneden alınan XRD analizinde; bor tabakasında Fe₂B bileşiğinin varlığı görülürken, FeB bileşiğine ise rastlanmamıştır (Şekil 7.7). Şen ve arkadaşları [58,68] farklı % Cu (%0.01, %0.3 ve %0.98) içeriklerine sahip KGDD'in borlanması ile ilgili yaptıkları çalışmalarda, % Cu miktarı arttıkça oluşan bor tabakasının kalınlığının azaldığını, tabakanın sadece Fe₂B bileşiğinden oluştuğunu bildirmişlerdir. Çalışmamızda kullanılan KGDD'in % Cu miktarı % 1.03 olduğundan, elde edilen bor tabakasında FeB bileşiğinin olmaması uygun ve beklenen bir sonuçtur. Mu ve Shen [69] düşük bor potansiyeline sahip borlama ortamlarının tek fazlı Fe₂B tabakasının oluşmasına neden olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmalarında elde ettikleri tek fazlı bor tabakasının oluşumunu

borlama ortamının bileşimine ve ortamdaki SiC tozunun indirgeyici madde olarak rol oynamasına bağlamışlardır.



Şekil 7.7: 800° C’de 6 saat borlanmış KGDD’in XRD paterni.

7.2 Mikro Sertlik Ölçümleri ve Sertlik Taramaları

7.2.1 Mikro Sertlik Ölçümlerinin İncelenmesi

Tablo 7.2 ve 7.3’te sırasıyla matriks yapısına ve borlama süresine bağlı olarak KGDD’in yüzey sertlikleri HV_1 olarak verilmiştir. Tablo 7.2’den temper martensitik yapılı KGDD’in sertliğinin daha yüksek olduğu ve Tablo 7.3’ten borlama sıcaklık ve süresi ile birlikte yüzey sertliğinin de arttığı gözlenmiştir. Bor tabakasında elde edilen sertlik değerleri daha önce yapılan çalışmaların sonuçlarına nazaran nispeten daha düşük elde edilmiştir. Bunun nedeni; çalışmamızda kullanılan borlama sıcaklığı ve süresi, KGDD’in bileşimi, kullanılan borlama ortamı ve yüzeyde oluşan bor tabakası morfolojisi gibi pek çok parametreye bağlanabilir. Şen ve arkadaşları [61], yüksek borlama sıcaklıkları ve uzun borlama sürelerinde daha sert (1920-2140 $Hv_{0.1}$ arasında) FeB fazından oluşan en dış tabakanın kalınlığının arttığı sonucunu bulmuşlardır. Çalışmamızda kullanılan düşük borlama sıcaklığı (800 °C) dikkate

alındığında bor tabakasında FeB/Fe₂B çift fazlı tabakadan ziyade tek fazlı ve daha düşük sertliğe sahip (1160-1920 Hv_{0,1} arasında) Fe₂B fazının oluştuğu söylenebilir.

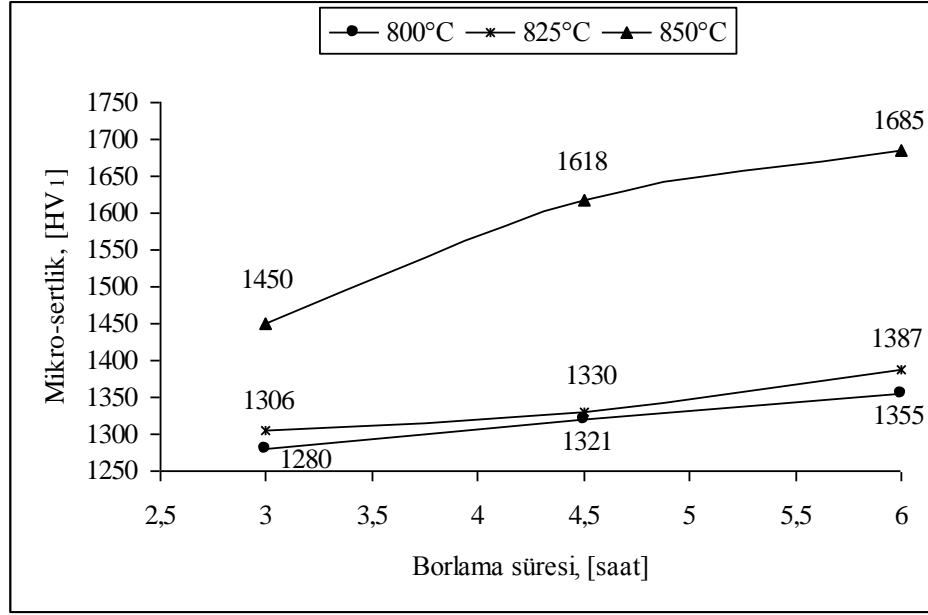
Borlanan numunelerin yüzey sertliklerinin borlama sıcaklık ve süresine bağlı olarak değişimi Şekil 7.8’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde borlama sıcaklığı ve borlama süresi arttıkça oluşan yüzey sertliklerinin de arttığı görülmektedir. 850°C’de yapılan borlama ile daha yüksek yüzey sertlikleri elde edilmiş olup, bu sıcaklıkta borlama süresinin de yüzey sertliğine etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür.

Tablo 7.2: Matriks yapıların sertlik değerleri.

Matriks yapısı	Sertlik (Makro)	HV ₁
Perlitik (döküm hali)	298 HB(≈31,3 HR _C)	413
Temperli martenzit	46,8 HR _C	614
Alt ösferrit	33,7 HR _C	464
Üst ösferrit	42,6 HR _C	494

Tablo 7.3: Borlama sıcaklığına ve süresine bağlı olarak yüzey sertlik değerleri.

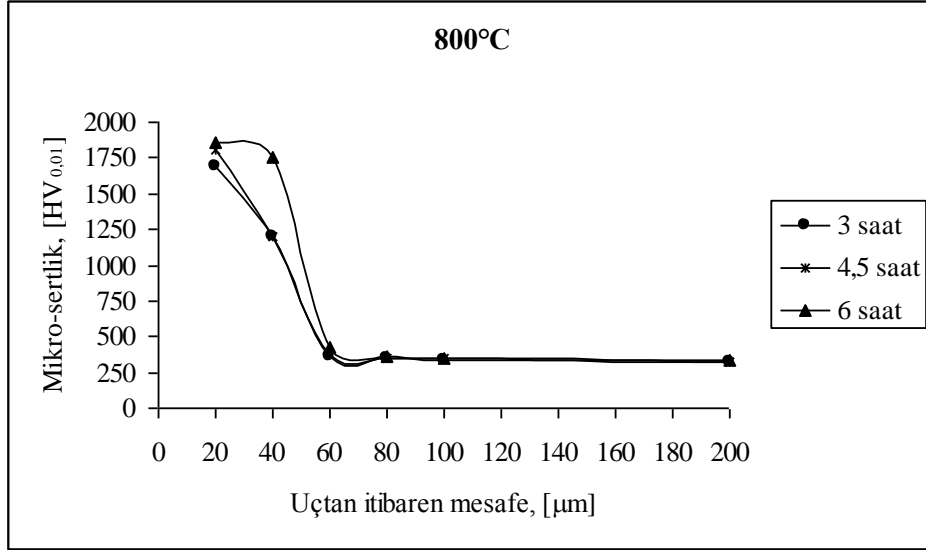
Borlama sıcaklığı [°C]	Borlama süresi [saat]	Sertlik [HV ₁]
800	3	1280
	4,5	1321
	6	1355
825	3	1306
	4,5	1330
	6	1387
850	3	1450
	4,5	1618
	6	1685



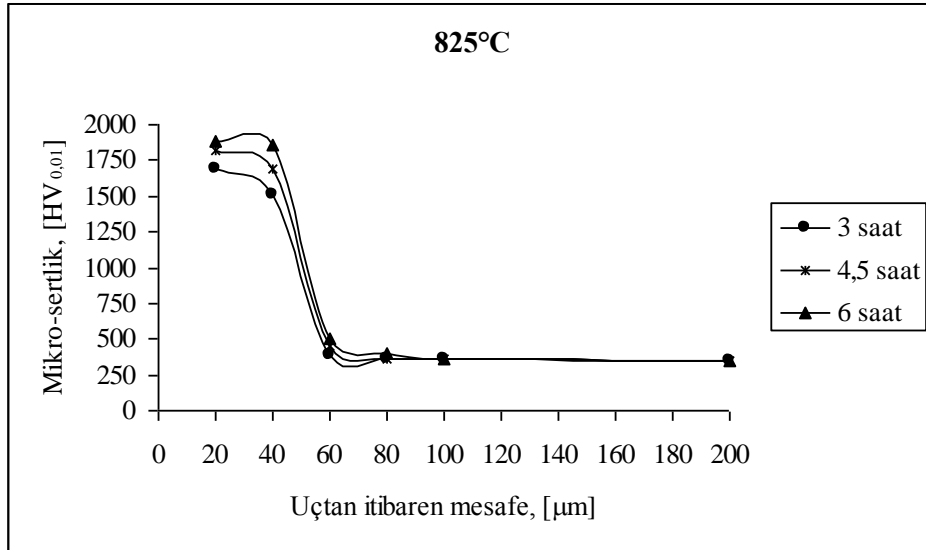
Şekil 7.8: Borlama süresine ve sıcaklığına bağlı olarak oluşan yüzey sertlikleri.

7.2.2 Sertlik Taraması Sonuçlarının İncelenmesi

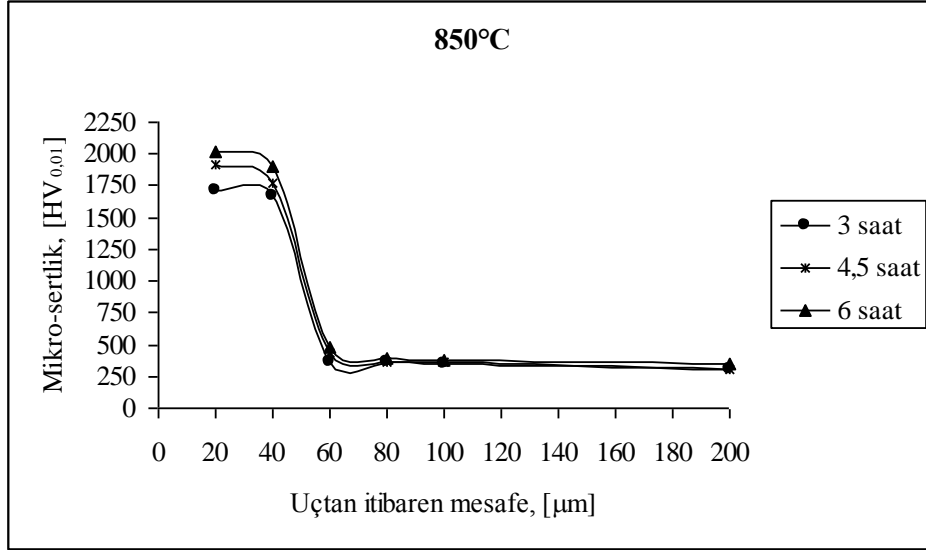
Borlanan malzemelerin yüzeyinden merkezine doğru 20 µm aralıklarla yapılan mikro sertlik incelemeleri 800°C, 825°C ve 850°C borlama sıcaklıkları için sırasıyla Şekil 7.9, Şekil 7.10 ve Şekil 7.11’de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde yüzeyden yaklaşık 60 µm içeriye kadar yüksek sertlikler gözlenirken, daha iç kısımlarda sertliklerin sabit kaldığı gözlenmiştir.



Şekil 7.9: 800 °C'de borlanan numunelerin sertlik taraması.



Şekil 7.10: 825 °C'de borlanan numunelerin sertlik taraması.



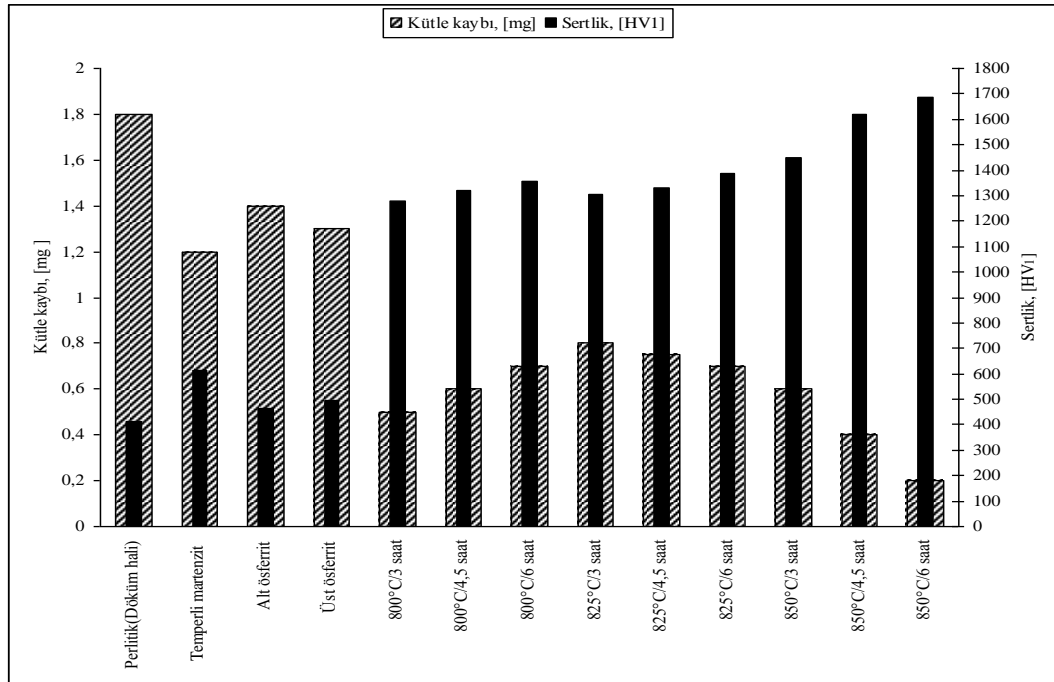
Şekil 7.11: 850 °C’de borlanan numunelerin sertlik taraması.

7.3 Aşınma Testi Sonuçlarının İncelenmesi

Matriks yapılı ve borlanmış KGDD numunelerin aşınma deneyleri sonucunda elde edilen kütle kayıpları numunelerin yüzey sertlikleri ile birlikte Tablo 7.4 ve Şekil 7.12’de toplu halde verilmiştir. Beklenildiği gibi yüksek sertlikteki numunelerde kütle kayıplarının daha az olduğu görülmüştür. Yalnız 800°C’de yapılan borlama işlemi bu sonuca küçük değerlerle de olsa ters düşmektedir. Şöyle ki; 800°C’de artan borlama süresiyle sertlikte az da olsa artış gözlenirken, beklenilenin aksine kütle kayıplarında da artış görülmüştür. Bu durum Şekil 7.7’de verilen XRD grafiği ile açıklanabilir. Şekilden görüldüğü gibi, 800°C’de 6 saat borlanan numunenin bor tabakasında fazlaca FeO ve Fe₃O₄ gibi demir oksitler bulunmaktadır. Bu oksitler, borlama işlemi öncesinde numune yüzeylerinin yeterince temizlenememiş olması, borlama ortamının bor potansiyelinin yeterli olmaması veya borlama ortamının atmosfer kontrolsüz olması gibi daha pek çok başka nedenden kaynaklanmış olabilir. Borlama süresinin artması ile birlikte oluşan bu demir oksitlerin miktarının da artmış olması muhtemeldir. Aşınma esnasında bu oksitlerin, bor tabakasının sürekliliğini bozarak yüzeyden kolayca ayrıldıkları ve yeterli sertliğe sahip olduklarından temas yüzeyinde aşındırıcı etkisi yaparak yüzeyden daha fazla malzeme kaybına sebep oldukları söylenebilir [67].

Tablo 7.4: Aşınma testlerinde oluşan kütle kayıpları.

Malzeme	Sertlik [HV ₁]	Kütle kaybı [mg]
Perlitik-ferritik (döküm hali)	413	1,80
Temperli martenzit	614	1,20
Alt ösferrit	464	1,40
Üst ösferrit	494	1,30
800°C/3 saat borlanmış	1280	0,50
800°C/4,5 saat borlanmış	1321	0,60
800°C/6 saat borlanmış	1355	0,70
825°C/3 saat borlanmış	1306	0,80
825°C/4,5 saat borlanmış	1330	0,75
825°C/6 saat borlanmış	1387	0,70
850°C/3 saat borlanmış	1450	0,60
850°C/4,5 saat borlanmış	1618	0,40
850°C/6 saat borlanmış	1685	0,20

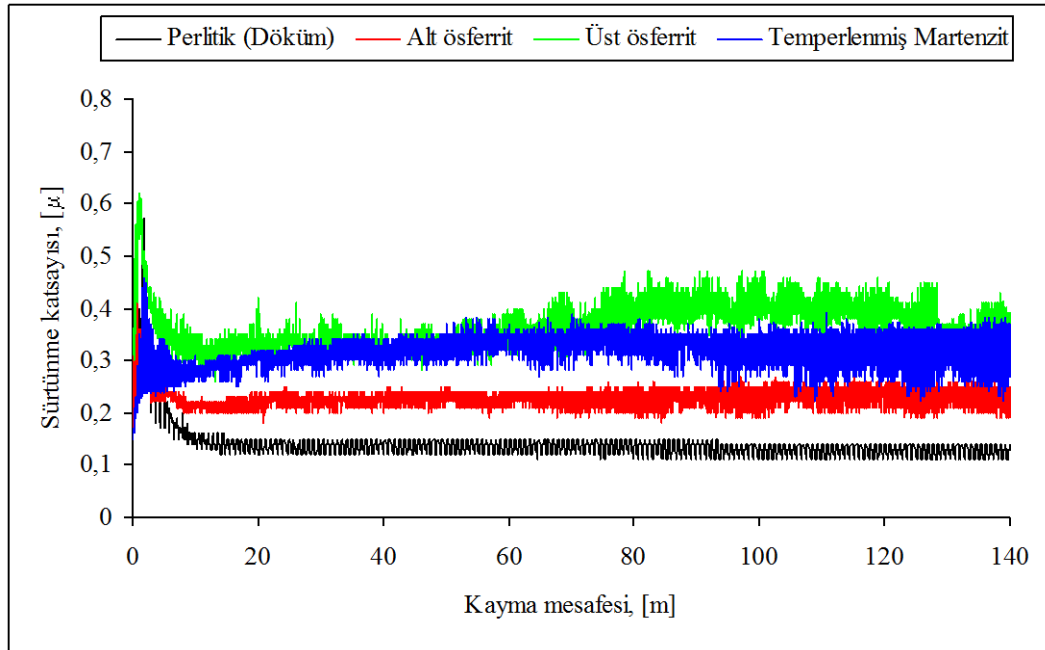


Şekil 7.12: Matriks yapıları ve borlanmış numunelerdeki yüzey sertlikleri ve kütle kayıpları.

Borlanan numuneler içinde en fazla yüzey sertliği ve kütle kaybı değişimi 850°C borlama sıcaklığında işlem gören numunelerde görülmüştür. En yüksek yüzey sertliği ve en az kütle kaybı 850°C’de 6 saat borlama şartında elde edilmiştir. Döküm(perlitik) yapıda elde edilen kütle kaybı (1.8 mg) bu borlama şartında elde edilenden (0.2 mg) 9 kat daha fazladır.

Matriks yapılarda meydana gelen kütle kayıpları incelendiğinde, en yüksek yüzey sertliğine sahip temperli martenzit yapıda en az kütle kaybı gözlenmiştir. Bu yapıdaki kütle kaybı döküm yapısındaki 2/3 ü kadardır.

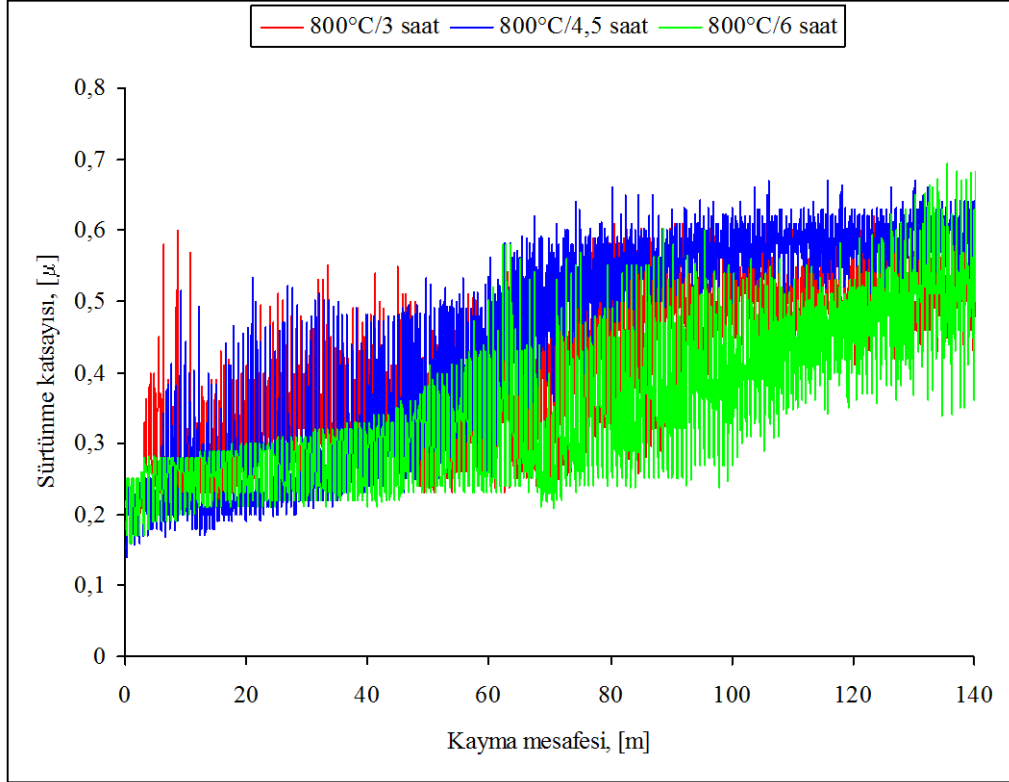
Aşınma deneyleri esnasında döküm (perlitik), temper martensitik, alt ve üst ösferritik matriksli dökme demirlerle yapılan deneylerde elde edilen sürtünme katsayıları Şekil 7.13’te verilmiştir. Döküm yapısındaki numunelerle yapılan deneylerde sürtünme katsayısı en az, üst ösferritik yapıda ise en fazla elde edilmiştir.



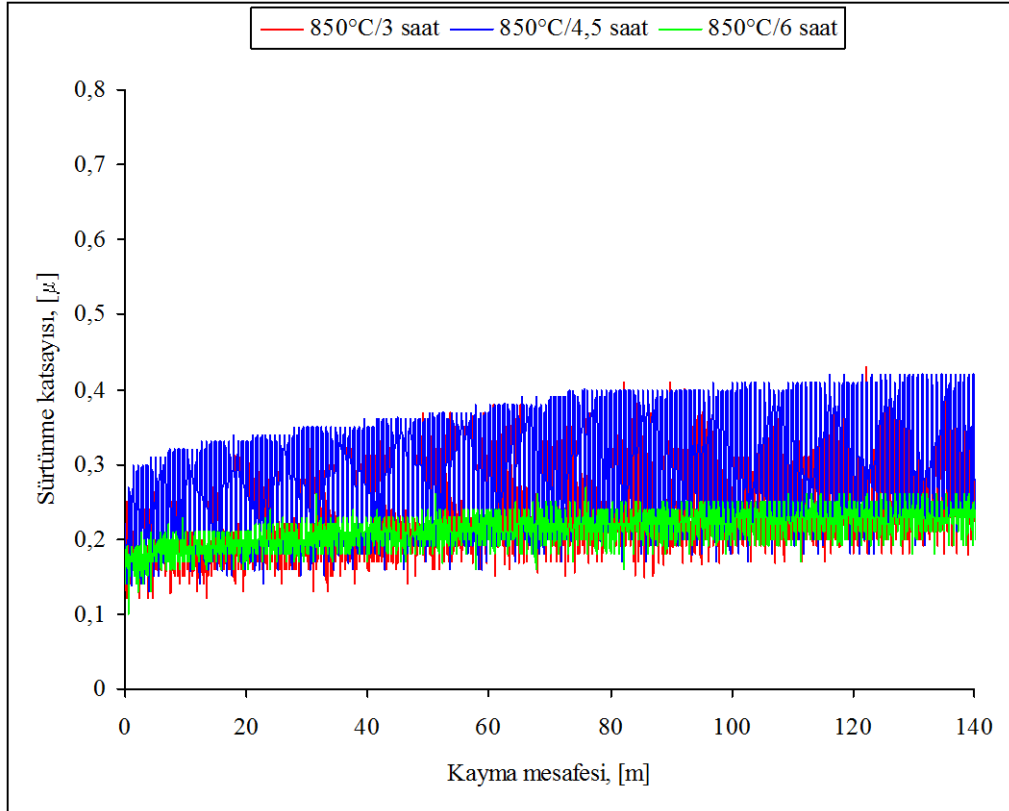
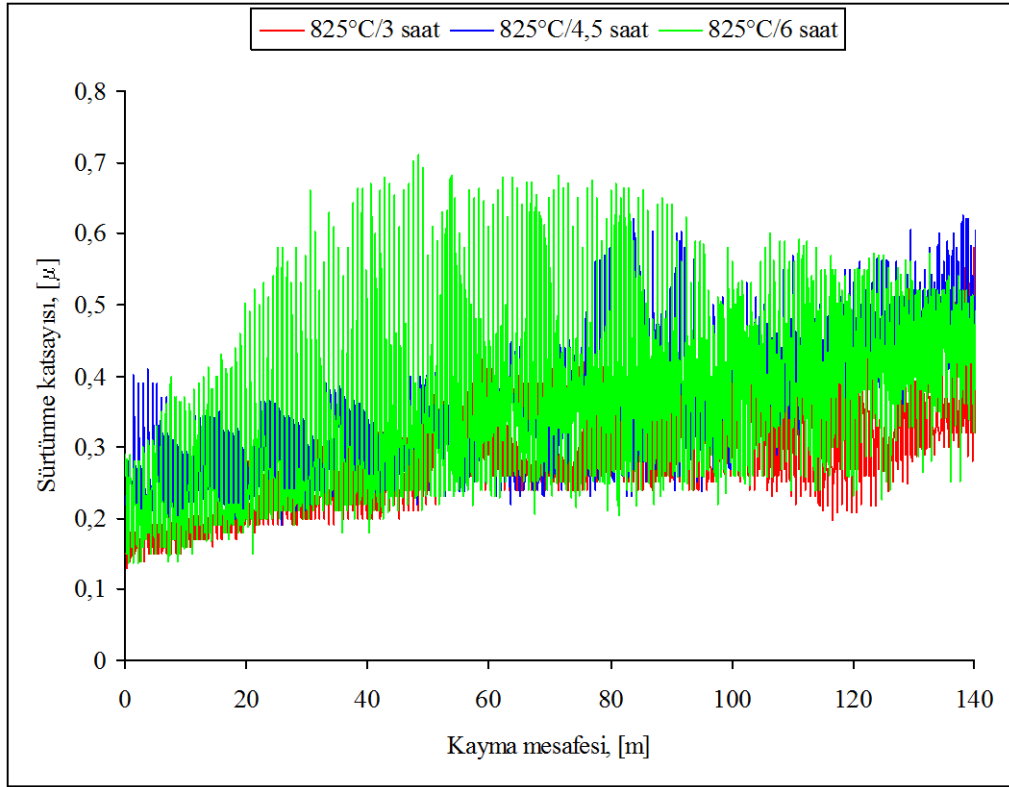
Şekil 7.13: Matriks yapılara ait sürtünme katsayıları.

800°C, 825°C ve 850°C derecede 3, 4,5, 6 saat borlanan numuneler için kayma mesafelerine bağlı olarak sürtünme katsayıları sırasıyla Şekil 7.14, Şekil 7.15 ve Şekil 7.16’da verilmiştir. Şekil 7.14 ve Şekil 7.15 incelendiğinde 800°C ve 825°C

sıcaklıklarında borlanan numunelerden elde edilen sürtünme katsayılarının 0.15-0.65 aralığında kararsız bir durum sergilediği gözlenmiştir. Bununla birlikte, 850°C’de borlanan numuneler için sürtünme katsayılarının 0.15-0.3 gibi daha dar bir aralıkta daha kararlı bir yapı sergilediği gözlenmiştir (Şekil 7.16).



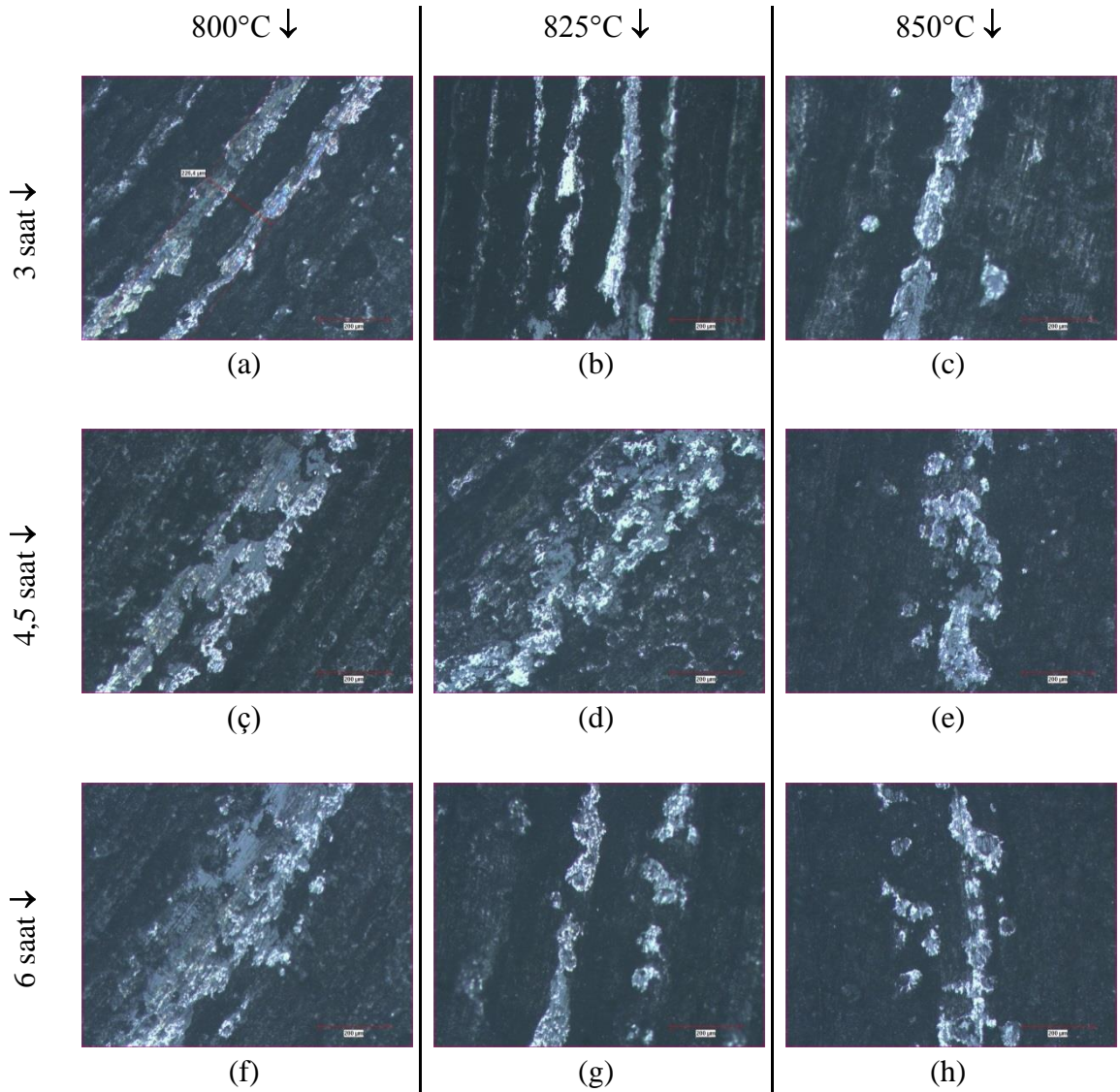
Şekil 7.14: 800 °C de borlanmış numunelere ait sürtünme katsayıları.



7.3.1 Aşınma İzleri Optik Mikroskop Görüntüleri

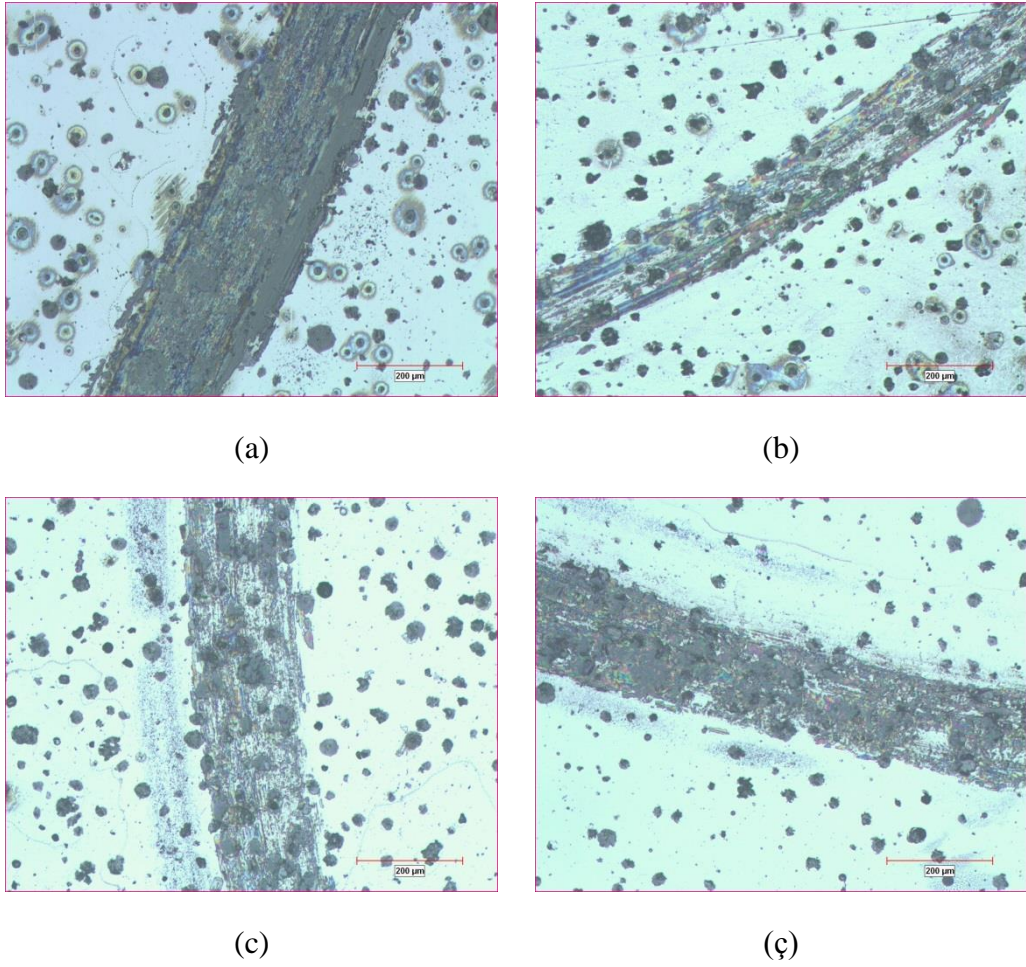
Borlanmış numunelerin aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri 100x büyütmede Şekil 7.17’de verilmiştir.

Şekil 7.17 incelendiğinde artan borlama sıcaklığı ve artan borlama süresine bağlı olarak artan yüzey sertliğinin aşındırıcı tungsten-karbür ucun yüzeyde bıraktığı izi giderek azalttığı, izin belli belirsiz, parçalı bir hal aldığı görülmektedir.



Şekil 7.17: Borlanmış numunelerin aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri.(100X). (a) 800 °C’de 3 saat, (b) 825 °C’de 3 saat, (c) 850’de °C 3 saat, (ç) 800 °C’de 4,5 saat, (d) 825 °C’de 4,5 saat, (e) 850 °C’de 4,5 saat, (f) 800 °C’de 6 saat, (g) 825 °C’de 6 saat, (a) 850 °C’de 6 saat.

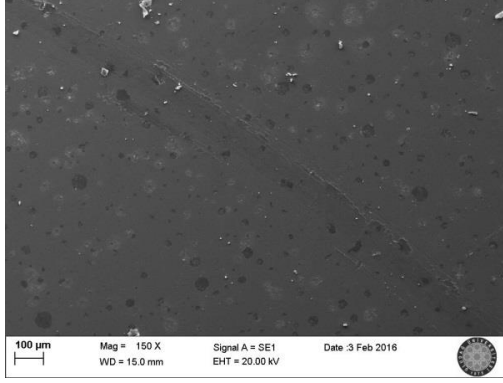
Borlanmamış numunelerin aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri 100x büyütmede Şekil 7.18 'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, numuneler içerisinde yüzey sertliği en düşük olan döküm hal için tungsten-karbür ucun bıraktığı izin diğerlerine göre bariz bir şekilde belirgin olduğu görülmektedir. Şekil 7.18, Şekil 7.17 ile mukayese edildiğinde sertlikleri daha fazla olan borlanmış numunelerde bırakılan izlere göre daha belirgin izlerin oluştuğu gözlemlenmiştir.



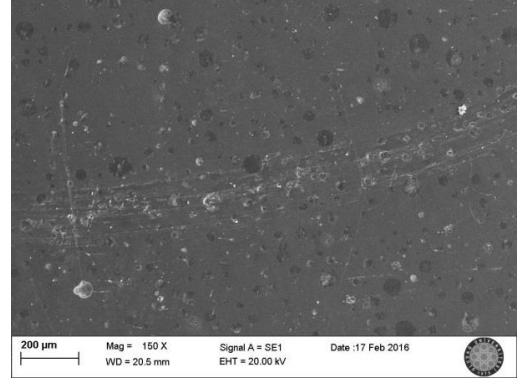
Şekil 7.18: Borlanmamış numunelerin aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri. (100X). (a) döküm, (b) temperli martenzit, (c) alt ösferrit, (ç) üst ösferrit.

7.3.2 Aşınma İzlerinin SEM Görüntüleri

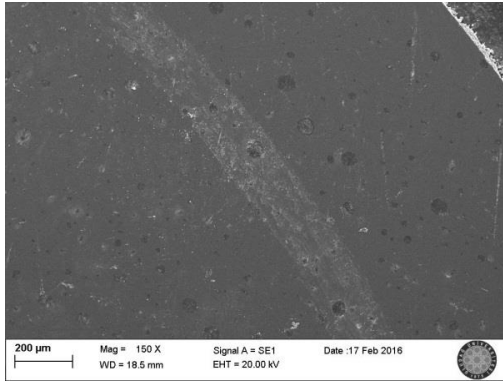
Şekil 7.19 ve Şekil 7.20’de matriks yapılı ve 800°C ile 850°C’lerde 3 ve 6 saat borlanan numuneler için aşınma izlerinin SEM görüntüleri sırasıyla 150X ve 2000X büyütmelerde verilmiştir.



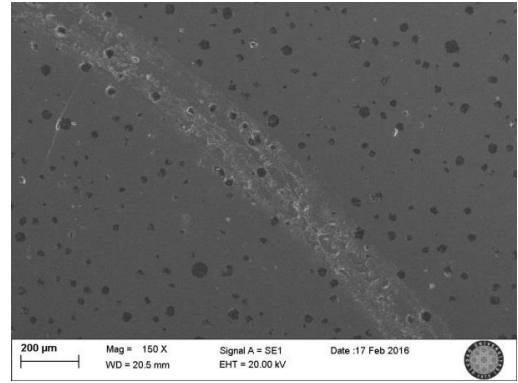
(a)



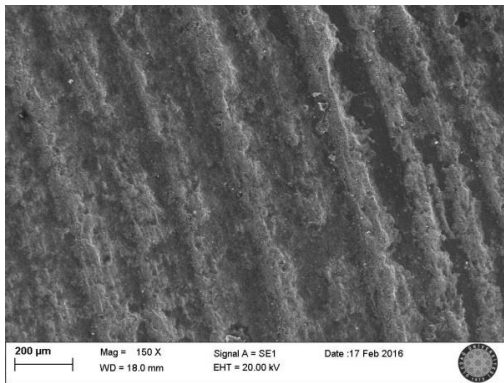
(b)



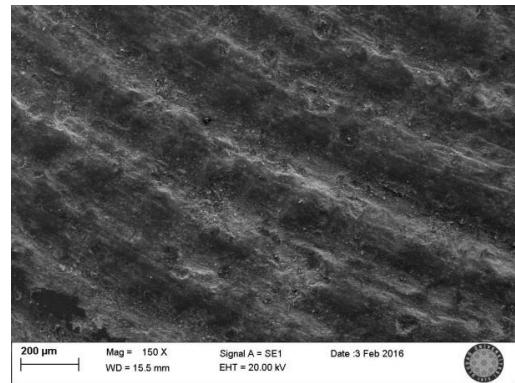
(c)



(ç)

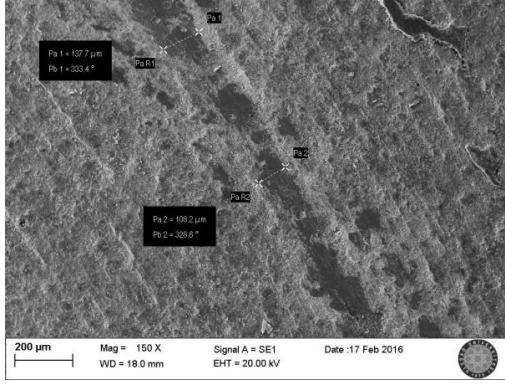


(d)

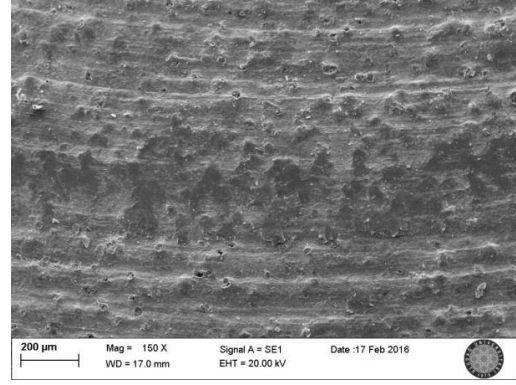


(e)

Şekil 7.19 : Aşınma yüzey izlerinin SEM görüntüleri (150X). (a) döküm, (b) temperli martenzit, (c) alt ösferrit, (ç) üst ösferrit, (d) 800 °C’de 3 saat, (e) 850 °C’de 3 saat, (f) 800 °C’de 6 saat, (g) 850 °C’de 6 saat.

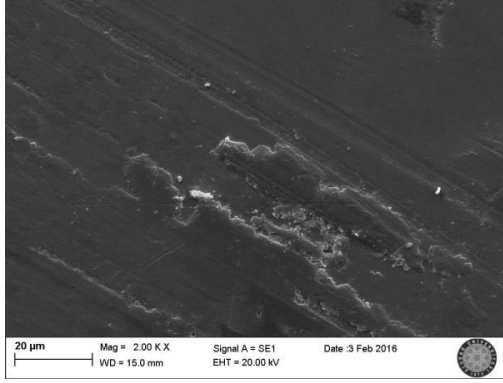


(f)

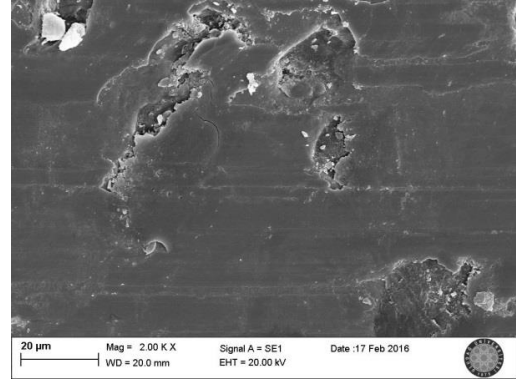


(g)

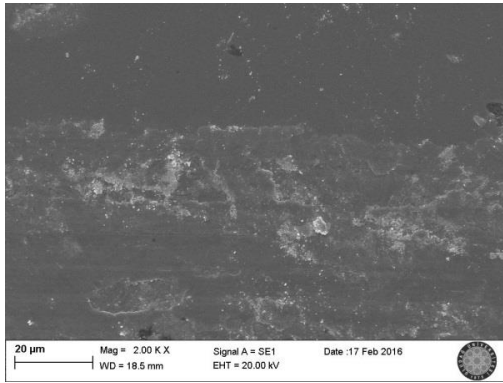
Şekil 7.19 (devam): Aşınma yüzey izlerinin SEM görüntüleri (150X). (a) döküm, (b) temperli martenzit, (c) alt ösferrit, (ç) üst ösferrit, (d) 800 °C’de 3 saat, (e) 850 °C’de 3 saat, (f) 800 °C’de 6 saat, (g) 850 °C’de 6 saat.



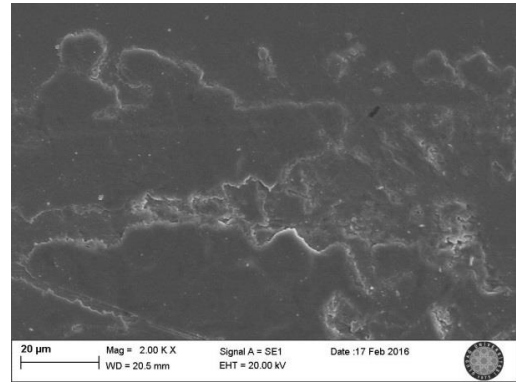
(a)



(b)

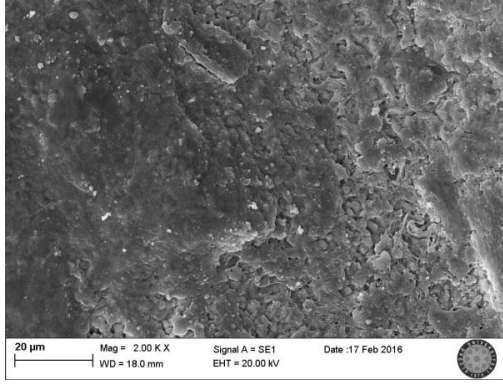


(c)

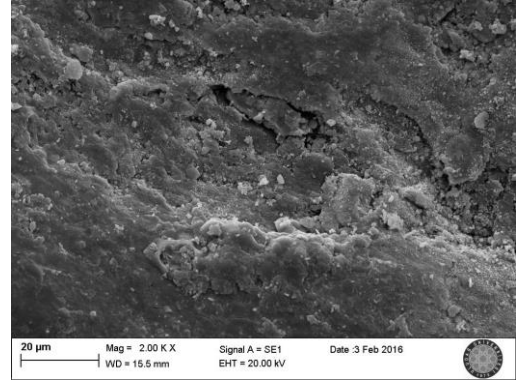


(ç)

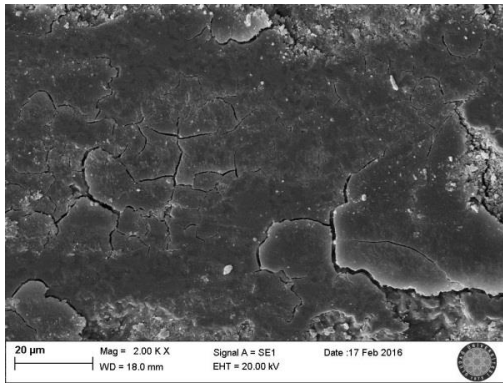
Şekil 7.20 Aşınma yüzey izlerinin SEM görüntüleri(2000X). (a) döküm, (b) temperli martenzit, (c) alt ösferrit, (ç) üst ösferrit, (d) 800 °C’de 3 saat, (e) 850 °C’de 3 saat, (f) 800 °C’de 6 saat, (g) 850 °C’de 6 saat.



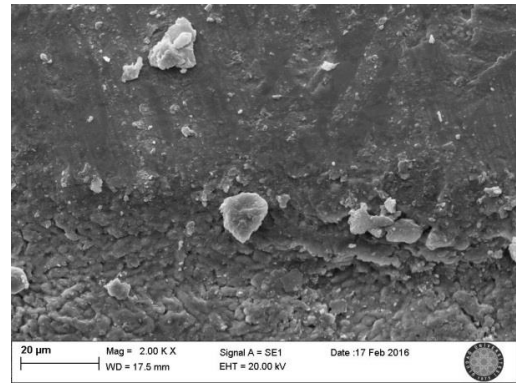
(d)



(e)



(f)



(g)

Şekil 7.20 (devam): Aşınma yüzey izlerinin SEM görüntüleri(2000X). (a) döküm, (b) temperli martenzit, (c) alt ösferrit, (ç) üst ösferrit, (d) 800 °C'de 3 saat, (e) 850 °C'de 3 saat, (f) 800 °C'de 6 saat, (g) 850 °C'de 6 saat.

7. GENEL SONUÇ

Döküm yapısı perlitik olan Cu, Ni ve Mo alaşımlı küresel grafitli dökme demir numuneler 800°C, 825°C ve 850°C’de 3, 4.5 ve 6 saat süreyle borlanmışlardır. Aynı bileşim ve döküm yapısına sahip önceki bir çalışmada uygulanan ısı işlemler ile elde edilen perlitik(döküm hali), temper martenzitik, alt ve üst ösferritik matriks yapılı malzemelerle yüzeyleri bu çalışmada borlanmış aynı döküm yapılı küresel grafitli dökme demir numunelerin mikro yapı incelemeleri, sertlik ve aşınma deneylerinden elde edilen bulgulara dayanılarak aşağıdaki genel sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Borlama işlemi neticesinde; bor tabakasında çoğunlukla Fe_2B bileşiğinin olduğu gözlemlenmiştir.
2. Farklı sıcaklık ve sürelerde yapılan borlama işlemleri sonucunda oluşan bor tabakası kalınlıkları borlama süresi ve borlama sıcaklığı ile artmıştır.
3. Borlanan yüzeylerin sertlik değerleri borlama sıcaklığı ve süresi ile artmıştır.
4. Borlanan numunelerin yüzey sertliklerinin, perlitik, temperlenmiş martenzitik, alt ve üst ösferritik matriksli numunelerin yüzey sertliklerinden yaklaşık 2-2.5 kat daha fazla olduğu görülmüştür.
5. Aşınma testleri incelendiğinde en fazla kütle kaybının ham döküm halde, en az kütle kaybının ise 850 °C de 6 saat borlanan numunede olduğu görülmüştür. Borlanmış tüm numunelerin aşınma deneyi sonucundaki kütle kayıpları borlanmayan numunelere göre daha azdır.
6. Matriks yapılı numunelerin aşınma deneylerinde sürtünme katsayılarının; aşınmanın ilk safhalarında bir dalgalanma yaşadığı, ardından kararlı olarak devam ettiği görülmüştür. Borlanmış numunelerde ise geniş aralıklarda dalgalanan ve hafif artış eğiliminde olan sürtünme katsayıları elde edilmiştir.

8. KAYNAKLAR

- [1] Khoee, S.M.M., "Ergimiş Boraks Banyosunda Çeliklere Vanadyum Karbür Kaplama" Doktora Tezi, *İ.T.U. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1992).
- [2] Özsoy, A., "Çeliğin Borlanması Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi", Doktora Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 101,(1991).
- [3] Karaman, Y., "Endüstriyel Borlama ve Tekstil Endüstrisinde Bir Uygulama", Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta*. 12,(2003).
- [4] Çelikyürek, İ., "Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması", *II.Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir*, (2004).
- [5] Varol, R., *Malzeme bilgisi ve muayenesi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, (2000).
- [6] Komisyon, "Bor stratejik bir madendir", *Bilim ve Ütopya Dergisi*, 94, (2002).
- [7] Çalık, A., "Türkiye'nin bor madenleri ve özellikleri", *Mühendis ve Makine*, 508, (2002).
- [8] Komisyon, "Bor raporu", *TMMOB Metalürji Mühendisleri Odası*, (2003).
- [9] Altun, F., "Bor", *Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü*, (2005).
- [10] Helvacı, C., "Türkiye borat yatakları: jeolojik konumu, ekonomik önemi ve bor politikası", 5. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, (2004).

- [11] Duman, İ. .”Bor madenleri ve stratejik bor ürünleri”, *Bilim ve Ütopya*, 114, 18-21, (2003).
- [12] Taşcı, A., “Borlanmış Çeliklerin Aşınma ve Korozyon Dayanımları”. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 45,(1993).
- [13] Delikanlı, K., Çalık, A., Uzun, H.A.”Sade karbonlu bir çeliğin borlama özelliklerinin incelenmesi”, *1.Uluslararası Bor Sempozyumu*,109113, (2002).
- [14] <http://www.periodensystem-online.de/> . (Son Erişim 05.07.2011).
- [15] Şahin, S., “Katı Borlama Yöntemi ile Ferrobor Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, (1999)
- [16] Ediz, N., Seyfettinoğlu, M. A., Özdağ, H., “Kil minerallerinin tügsaş-kütahya azot fabrikası baca gazlarının filtrasyonunda kullanımın araştırılması”, *8. Ulusal Kil Sempozyumu, Dumlupınar Üniversitesi*, 315-325, (1997).
- [17] Selçuk B., “Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, (1994).
- [18] Yünker U., ”Borlanmış Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 161, (2000).
- [19] Aydemir, T., Şen, U., ” Borlanmış Soğuk İş Takım Çeliklerinin Aşınma Davranışları.“, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 28-31,(2003).

- [20] Çalık, A., "Borlama ve endüstriyel uygulama alanları." *I. Ulusal Bor Çalıştayı*, Ankara, (2005).
- [21] Nair, F., Karamış, M.B. "Borlanmış çeliklerde malzeme bileşiminin mikrosertliğe etkileri." *7. Denizli Malzeme Sempozyumu*, Denizli, 354-360, (1997)
- [22] Akkurt, M., *Makine Elemanları Cilt II*, İstanbul: Birsen Kitabevi, 42-51, (1987).
- [23] Varol, R., Yılmaz, S., S., Tunay, R., F. "Borlamanın T/M çelik parçaların mikroyapı ve yüzey sertliğine etkisi", *III. International Powder Metallurgy Conference*, Ankara, (2002).
- [24] Körpe, N., Ö., Körpe, E., Baksan, B., Çelikyürek, İ., Gürler, R., "Fe₃Al (Fe₇₄Al₂₆) alaşımının borlanması" *II. Uluslararası Bor Sempozyumu*, (2004).
- [25] Bayça, S.U., Şahin, S., "Borlama", *Mühendis ve Makine*, (2004).
- [26] Çalık, A., "Makine ve Metalurji Sanayinde Bor Kullanımı", *2.Uluslararası Bor Sempozyumu*, Eskişehir, (2004).
- [27] Bozkurt, N., "Bor Yayınımıyla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme", Doktora Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1984).
- [28] Uzun, H. A., "Borlama İle Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları", Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, (2002).
- [29] Çetin M., "Borlanmış Hadfield Çeliklerinin Aşınma Dayanımını İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, (2003).

- [30] Matuschka, A.G.V., “Boronizing”, München, Wien, Hanser, (1980).
- [31] Tezcan, R., “ Borlama İşlemi ve Endüstriyel Uygulamaları”, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (1996).
- [32] Şen U., “Küresel Grafitli Dökme Demirin Borlanması ve Özellikleri”, Doktora Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1997).
- [33] Cabeo, E.R., Laudien, G., Biemer, S., Rie, K. T. and Hoppe, S., “Plasma-assisted boriding of industrial components in a pulsed D.C. glow discharge”, *Surface and Coating Technology*, 116-119, 229-233, (1999).
- [34] Özbek, I., “Borlama Yöntemi İle (AISI M50, AISI M2) Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (1999).
- [35] Küper, A., Qiao, X., Stock, H.R. and Mayr, P., “A novel approach to gas boronizing”, *Surface and Coating Technology*, 130, 87-94, (2000).
- [36] Kaestner, P., Olfe, J. and Rie, K.T., “Plasma-assisted boriding of pure titanium and TiAl6V4”, *Surface and Coating Technology*, 142-144, 248-252, (2001).
- [37] Özsoy A.; “Termal Çevrimli Borlama Uygulamaları”, Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (1988).
- [38] Yapar U., Başman G., Arısoy C.F., Şeşen M.K., “Çeliklerde borlama yoluyla yüzey sertleştirme”, *Metal Dünyası*, 115, 69 - 74, (2002).
- [39] Vipin J., Sundararajan G., “ Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel”, *Surface and Coatings Technology*, 149, 21 – 26, (2002).

- [40] Karakan, M., Alsarar, A., Çelik, A., “Plazma borlama”, *Mühendis ve Makine*, 512, (2002).
- [41] Karamış, M. B., Nair, F., Selçuk, B., “Borlanmış malzemelerin tribolojik özellikleri”, 6. *Denizli Malzeme Sempozyumu*, Denizli, (1995).
- [42] Bhushan, B. and Gupta, B.K., *Handbook of Tribology*, USA: McGraw-Hill, Inc., 1168, (1991).
- [43] Yoon, J.H., Jee, Y.K. and Lee, S.Y., “Plasma paste boronizing treatment of the stainless steel AISI 304”, *Surface and Coating Technology*, 112, 71-75, (1999).
- [44] Çalık, A., Delikanlı, K., Uzun A., “Ç 1035 çeliğin borlama özelliklerinin incelenmesi”, *II. Uluslararası Bor Sempozyumu*, Eskişehir, (2004).
- [45] Çeğil, Ö., Şen.Ş., “AISI 8620 Çeliğinin Bor-Vanadyumlanması ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Sakarya, 63, 113-117, (2002).
- [46] Özsoy, A., “Borlama ile ilgili genel bir değerlendirme”, *Endüstriyel Yüzey Teknolojileri*, 22, 10-13, (2001).
- [47] Çalık A., Özsoy A., “Termal çevirimli borlama işleminin ç1010 çeliğine etkileri”, 11. *Uluslararası Malzeme Sempozyumu*, İstanbul, (2002).
- [48] Yılmaz, A., “Her derde deva hazinemiz bor”, *Bilim ve Teknik*, 414, 38-48, (2002).
- [49] Bindal C., “Az Alaşımli ve Karbon Çeliklerinde Borlama ile Yüzeye Kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tespiti”, Doktora Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1991).

- [50] Lu, M., J., “Erhöhung der Lebensdauer von Bauteilen und Werkzeugen durch Boralitionen”, *HTM*, 37, 73-82, (1983).
- [51] Atik, E., “Çeliklerin borlanarak aşınma dayanımlarının arttırılması”, *Mühendis ve Makine*, 445, 17-20, (1997).
- [52] Selam M., “Borlanmış Gri Dökme Demirin Aşınma Davranışlarının Deneysel Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, (1996).
- [53] Şen, Ş., Bindal, C., “ AISI 5140 çeliğinin yüzeyinde oluşan borürlerin bazı özellikleri”, *Denizli Makina Mühendisleri Odası Bilim Günleri*, Denizli, 670-675, (1999).
- [54] Atik, E., “Farklı bir yüzey sertleştirme yöntemi: borlama”, *Makina & Metal*, 117, 86-90, (2001).
- [55] Er, Ü., Par, B., “Bor yayınımla yüzeyi sertleştirilmiş aısı 1030 ve aısı 1050 çeliklerinin abrazif aşınma dayanımlarının incelenmesi”, *Osman Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Eskişehir, 17, (2004).
- [56] Kayalı, Y., Taktak, S., Ulu, S., Yalçın, Y..“ Investigation of mechanical properties of boro-tempered ductile iron”, *Materials & Design*, 32, 1799-1803, (2010). Elsevier Ltd, doi:10.1016/j.matdes.2009.11.017.
- [57] Şehin, S., Meriç, C.. “Investigation of the effect of boronizing on cast iron”, *Materials Research Bulletin*, 37, 971-979, (2010). Elsevier Science Ltd, PII: S 0025-5408(02)00697-9.
- [58] Şen, U, Şen, S., Yılmaz, F, “Structural characterization of boride layer on boronized ductile irons”, *Surface and Coating Technology*, 176, 222-228, (2004), *Elsevier B.V.*, doi:10.1016/S0257-8972(03).00731-X.

- [59] Baydoğan, M, İzzet, S., “Successive boronizing and austempering for GGG-40 grade ductile iron”, *Journal of Iron and Steel Research. International*, 16, 50-54, (2009).
- [60] Şen, U, Şen, S., Yılmaz, F, “An evaluation of some properties of borides deposited on boronized ductile iron”, *Journal of Materials Processing Technology*, 148, 1-7, (2004), doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.01.015.
- [61] Şen, U, Şen, S., Köksal, S., Yılmaz, F, “Fracture toughness of borides formed on boronized ductile iron”, *Materials and Design*, 26, 175-179, doi:10.1016/j.matdes.2004.05.015, (2005).
- [62] Meric, C., Şahin, Ş., Backır, B., Köksal, N. S., “Investigation of the boronizing effect on the abrasive wear behavior in cast irons ”, *Materials and Design*, 27, 751-757, doi:10.1016/j.matdes.2005.01.018, (2006).
- [63] Şen, U., Şen, S., Yılmaz, F., “An Evaluation of some properties of borides deposited on boronized ductile iron”, *Journal of Materials Processing Technology* 148, 1-7,(2004).
- [64] Gül, F., “ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demirin adhesif aşınma dayanımı üzerinde borlama yüzey işleminin etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 25, No2, 389-395, (2010).
- [65] Casteletti, L.C., Lombardi, A.N., Totten, G.E., “Boriding”, *Encyclopedia of Tribology*, Wang, Q.J., Chung, Y.W., Springer, USA, 249-254, (2013).
- [66] Keddani, M., Azouani, O., Allaoui, O., Sehisseh, A., “Characterization and boriding kinetics of EN-GJS-400-15 cast iron”, *Journées Annuelles de la SF2M 2015*, Matériaux et conversion d'énergie, Posters, Paris, 26-28 Octobre 2015.

- [67] Abedi, H.R., Fareghi, A., Saghafian, H., Kheirandish, S.H., “Sliding wear behavior of a ferritic-pearlitic ductile cast iron with different nodule count”, *Wear* 268, 622-628, 2010.
- [68] Şen, U., Şen, S., Yılmaz, F., “Effect of copper on boride layer of boronized ductile cast irons”, *Vacuum* 72, 199-204, (2004).
- [69] Mu, D., Shen, B., “The kinetics and dry-sliding wear properties of boronized gray cast iron”, *Advances in Materials Science and Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/751971>, article ID 751971,7 pages, (2013).
- [70] Toktaş, G., ”Matriks Yapısının Küresel Grafitli Dökme Demirin Yorulma ve Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 61-64,(2004).
- [71] Özer, M., ”Üç Farklı Çeliğe Katı Borlama İşlemi Yapılmasının İyapı ve Sertlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (2011).