

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



**BORLANMIŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN KIRILMA
TOKLUĞUNUN VE KOROZYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

SELMAN KORKMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Gülcan TOKTAŞ (Tez Danışmanı)**
Prof. Dr. Sare ÇELİK
Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN

BALIKESİR, OCAK - 2020

KABUL VE ONAY SAYFASI

Selman KORKMAZ tarafından hazırlanan “**BORLANMIŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN KIRILMA TOKLUĞUNUN VE KOROZYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 16 Ocak 2020 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Doç. Dr. Gülcan TOKTAŞ
Balıkesir Üniversitesi

Üye

Prof. Dr. Sare ÇELİK
Balıkesir Üniversitesi

Üye


Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN
İstanbul Teknik Üniversitesi



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

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR



ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “Borlanmış Küresel Grafitli Dökme Demirin Kırılma Tokluğunun ve Korozyon Davranışının İncelenmesi” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Selman KORKMAZ

(imza)

ÖZET

**BORLANMIŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN KIRILMA
TOKLUĞUNUN VE KOROZYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**
YÜKSEK LİSANS TEZİ
SELMAN KORKMAZ
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. GÜLCAN TOKTAŞ)
BALIKESİR, OCAK - 2020

Bu çalışmada borlanmış küresel grafitli dökme demirin kırılma tokluğu ve korozyon davranışları incelenmiştir. Borlama, Ekabor 2 tozu kullanılarak 900°C ve 950°C sıcaklıklarda ve 2-4-6-8 saat sürelerde kutu borlama yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Optik incelemeler sonucu bor tabaka kalınlıklarında borlama süresi arttıkça artış gözlemlenmiştir. Sertlik ölçümleri mikrovickers cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Vickers indenter ile oluşturulan çatlakların yarı uzunlukları belirlendikten sonra kırılma toklukları hesaplanmıştır. Oda şartlarında, belirli bir süre sonunda ve belirli aralıklarla ölçümleri yapılarak, %10 luk Formik ve Nitrik asit çözeltisindeki borlanmış ve borlanmamış numunelerin korozyon davranışları karşılaştırılarak incelenmiştir. Karşılaştırma sonucu hesaplanan kütle kayıplarına istinaden borlamanın korozyon davranışının çok iyi olduğu gözlemlenmiştir. Numuneler XRD analiz, SEM ve optik mikroskopla değerlendirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Borlama, küresel grafitli dökme demir, sertlik, kırılma tokluğu, korozyon.

Bilim Kod / Kodları : 91421

Sayfa Sayısı : 85

ABSTRACT

**INVESTIGATION OF FRACTURE TOUGHNESS AND CORROSION
BEHAVIOUR OF BORONIZED DUCTILE CAST IRON
MSC THESIS
SELMAN KORKMAZ
BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. GÜLCAN TOKTAŞ)
BALIKESİR, JANUARY - 2020**

In this study, fracture toughness and corrosion behaviour of boronized ductile iron were investigated. Boronizing was released with pack boronizing method , at 900°C and 950°C temperatures and 2-4-6-8 hours, using Ekabor 2. In the result of optical studies, increasing were observed on thickness of boride layers when boronizing time increased. Hardness measurements were realized by microvickers device. Fracture toughness results were calculated after indicating half lengths of cracks which are created via Vickers intender. At room conditions, behaviours of boronized and unboronized samples in %10 Formic and Nitric acid solutions were observed , comparing and measuring periodically after a certain time. In result of comparing based on mass loss, it is observed that corrosion behaviour of boronizing was very good. Samples were verified by X-ray diffraction (XRD) analysis, SEM and optical microscope.

KEYWORDS: Boronizing, ductile iron, hardness, fracture toughness, corrosion.

Science Code / Codes : 91421

Page Number : 85

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	2
2.1 Bor Elementinin Özellikleri.....	3
2.2 Bor Elementinin Kullanım Alanları.....	5
3. BORLAMA YÖNTEMLERİ	6
3.1 Katı Ortamda Borlama.....	8
3.1.1 Toz Ortamda Borlama.....	9
3.1.2 Macun ile Borlama.....	10
3.2 Sıvı Ortamda Borlama.....	10
3.3 Gaz Ortamda Borlama.....	11
3.4 Plazma Borlama.....	12
3.5 Borlama İşleminin Avantajları ve Dezavantajları.....	13
3.5.1 Borlama İşleminin Avantajları.....	13
3.5.2 Borlama İşleminin Dezavantajları.....	14
4. BORÜR TABAKASININ ÖZELLİKLERİ	16
4.1 Borür Tabakası.....	16
4.2 Geçiş Bölgesi.....	20
4.3 Borürlü Tabakanın Yapı ve Bileşimine Alaşım Elemanlarının Etkisi.....	21
4.4 Borlu Tabakanın Mekanik Özellikleri.....	22
4.4.1 Sertlik.....	22
4.4.2 Korozyona Karşı Dayanıklılık.....	23
4.5 Borlu Tabakanın Kalınlığı.....	25
4.6 Bor Tabakası Çeşitleri.....	25
4.7 Borür Tabakasındaki Kalıntı Gerilmeler.....	26
4.8 Borlama İşlemi Sonrası Uygulanabilen Isıl İşlemler.....	26
4.9 Borlanabilen Malzemeler.....	28
5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	30
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	34
6.1 Deney Amacı.....	34
6.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	34
6.3 Deney Programı ve Numunelerin Kodlanması.....	34
6.4 Borlama İşlemi.....	35
6.5 Metalografik Çalışmalar.....	37
6.6 Sertlik ve Çatlak Yarı Uzunluklarının Ölçümü.....	39
6.7 XRD Analizi ve SEM Görüntüleme.....	41
6.8 Korozyon Direnci İncelemesi.....	42
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	44

7.1 Mikroyapı Görüntüleme ve Tabaka Kalınlığı Ölçümleri.....	44
7.2 Mikrosertlik İnceleme Sonuçları.....	55
7.3 XRD İnceleme Sonuçları.....	59
7.4 Kırılma Tokluğunun İnceleme Sonuçları.....	62
7.5 Korozyon Direnci İnceleme Sonuçları.....	64
7.5.1 Korozif Yüzeylerin İncelenmesi.....	71
8. GENELSONUÇLAR.....	77
9. KAYNAKLAR.....	79

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Siyah-Gri, beta Boru; 5 değişik bor yapısından sadece birisi.....	2
Şekil 3.1: Borlama işleminde, sertlik-yüzeyden mesafe ilişkisi.....	7
Şekil 3.2: Fe-B denge diyagramı.....	8
Şekil 3.3: Gaz ortamda borlama tertibatının şematik gösterimi.....	12
Şekil 3.4: Plazma borlama tesisat şeması.....	13
Şekil 4.1: Borlama sonrası alaşımsız çelikte FeB ve Fe ₂ B fazlarının içyapı görüntüsü.....	18
Şekil 4.2: Dış biçimli demirborür kristalleri (Fe ₂ B).....	19
Şekil 4.3: Borlanmış AISI 1020 çeliğinde yüzeyin makro yapısı.....	20
Şekil 4.4: Borlanmış AISI 4140 çeliğinde yüzeyin mikro yapısı.....	21
Şekil 4.5: Borlanmış alaşımlı ve alaşımsız çeliklerde eşit şartlarda borlama ile elde edilen borür tabaka kalınlıkları.....	21
Şekil 4.6: Borlu tabaka ile sementasyonlu tabakanın sertlik dağılımları kıyaslaması.....	23
Şekil 4.7: Borür tabakası çeşitleri.....	25
Şekil 4.8: Borlamadan sonra yapılabilen ısıl işlem örnekleri.....	27
Şekil 6.1: Borlama işleminin gerçekleştirildiği fırın ve borlama kutusu.....	35
Şekil 6.2: Borlama işlemi fırın rejim eğrisi.....	36
Şekil 6.3: Numune kesme cihazı.....	37
Şekil 6.4: Bakalite alma cihazı.....	38
Şekil 6.5: Zımparalama ve parlatma cihazı.....	38
Şekil 6.6: Optik mikroskop.....	39
Şekil 6.7: Mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı.....	40
Şekil 6.8: Vickers izi ve çatlak boyunun şematik gösterimi.....	41
Şekil 6.9: XRD Cihazı.....	41
Şekil 6.10: Taramalı Elektron Mikroskobu.....	42
Şekil 6.11: Korozyon ortamı.....	43
Şekil 6.12: Hassas terazi.....	43
Şekil 7.1: Ham malzemelerin içyapı görüntüleri (a ₁) GGG40-200x, (a ₂) GGG40-100x, (b ₁) GGG70-200x, (b ₂) GGG70-100x.....	44
Şekil 7.2: 900°C 2 saat borlanan GGG40 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	45
Şekil 7.3: 900°C 2 saat borlanan GGG70 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	45
Şekil 7.4: 900°C 4 saat borlanan GGG40 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	46
Şekil 7.5: 900°C 4 saat borlanan GGG70 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	46
Şekil 7.6: 900°C 6 saat borlanan GGG40 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	47
Şekil 7.7: 900°C 6 saat borlanan GGG70 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	47
Şekil 7.8: 900°C 8 saat borlanan GGG40 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	48
Şekil 7.9: 900°C 8 saat borlanan GGG70 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	48
Şekil 7.10: 900°C'de borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlıkları.....	49
Şekil 7.11: 950°C 2 saat borlanan GGG40 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	50
Şekil 7.12: 950°C 2 saat borlanan GGG70 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	50
Şekil 7.13: 950°C 4 saat borlanan GGG40 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	51
Şekil 7.14: 950°C 4 saat borlanan GGG70 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	51
Şekil 7.15: 950°C 6 saat borlanan GGG40 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	52
Şekil 7.16: 950°C 6 saat borlanan GGG70 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	52
Şekil 7.17: 950°C 8 saat borlanan GGG40 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	53
Şekil 7.18: 950°C 8 saat borlanan GGG70 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	53
Şekil 7.19: 950°C'de borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlıkları.....	54

Şekil 7.20: Bor sıcaklığının borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlıkları.....	55
Şekil 7.21: 900°C’de 2-8 saat arası borlanan GGG40 numunelerin sertlik dağılımları.....	56
Şekil 7.22: 900°C’de 2-8 saat arası borlanan GGG70 numunelerin sertlik dağılımları.....	57
Şekil 7.23: 950°C’de 2-8 saat arası borlanan GGG40 numunelerin sertlik dağılımları.....	57
Şekil 7.24: 950°C’de 2-8 saat arası borlanan GGG70 numunelerin sertlik dağılımları.....	58
Şekil 7.25: 900°C- 8 saat borlanan GGG40 malzemesinin XRD analiz grafiği.....	59
Şekil 7.26: 950°C- 8 saat borlanan GGG40 malzemesinin XRD analiz grafiği.....	59
Şekil 7.27: 900°C- 8 saat borlanan GGG70 malzemesinin XRD analiz grafiği.....	60
Şekil 7.28: 950°C- 8 saat borlanan GGG70 malzemesinin XRD analiz grafiği.....	60
Şekil 7.29: 950°C- 6 saat borlanan GGG70 malzemesinin XRD analiz grafiği.....	61
Şekil 7.30: Vickers yöntemiyle 718 nolu numunede oluşan çatlaklar.....	62
Şekil 7.31: Yüzeyleri borlanmış GGG40 numunelerin kırılma toklukları.....	63
Şekil 7.32: Yüzeyleri borlanmış GGG70 numunelerin kırılma toklukları.....	63
Şekil 7.33: Borlanmış ve borlanmamış numunelerin formik asitte oluşan kütle kayıpları (%).....	65
Şekil 7.34: Borlanmış ve borlanmamış numunelerin formik asitte oluşan kütle kayıpları (%).....	66
Şekil 7.35: Borlanmış ve borlanmamış numunelerin formik asitte oluşan kütle kayıpları (%).....	66
Şekil 7.36: Borlanmış ve borlanmamış numunelerin formik asitte oluşan kütle kayıpları (%).....	67
Şekil 7.37: Borlanmış ve borlanmamış numunelerin formik asitte oluşan kütle kayıpları (%).....	67
Şekil 7.38: Borlanmış ve borlanmamış numunelerin nitrik asitte kütle kayıpları (%).....	68
Şekil 7.39: Borlanmış ve borlanmamış numunelerin nitrik asitte kütle kayıpları (%).....	69
Şekil 7.40: Borlanmış ve borlanmamış numunelerin nitrik asitte kütle kayıpları (%).....	69
Şekil 7.41: Borlanmış ve borlanmamış numunelerin nitrik asitte kütle kayıpları (%).....	70
Şekil 7.42: Borlanmış ve borlanmamış numunelerin nitrik asitte kütle kayıpları (%).....	70
Şekil 7.43: Nitrik asitte korozyona uğrayan 950°C 6 saat borlanan GGG40 (a) ve GGG70 (b) SEM görüntüleri (500x).....	72
Şekil 7.44: Formik asitte korozyona uğrayan 950°C 2 saat borlanan GGG40 (a) ve GGG70 (b) SEM görüntüleri (500x).....	72
Şekil 7.45: Formik asitte korozyona uğrayan 900°C-950°C 2-8 saat borlanan GGG40 malzemesinin içyapı görüntüleri (200x).....	73
Şekil 7.46: Formik asitte korozyona uğrayan 900°C-950°C 2-8 saat borlanan GGG70 malzemesinin içyapı görüntüleri (200x).....	74
Şekil 7.47: Nitrik asitte korozyona uğrayan 900°C-950°C 2-4-6-8 saat borlanan GGG40 malzemesinin içyapı görüntüleri (200x).....	75
Şekil 7.48: Nitrik asitte korozyona uğrayan 900°C-950°C 2-4-6-8 saat borlanan GGG70 malzemesinin içyapı görüntüleri (200x).....	76

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Kristalin borun yapısı ve kafes parametreleri.....	3
Tablo 2.2: Bor ve bazı bileşiklerin sertlikleri.....	3
Tablo 2.3: Bor kullanım alanları.....	5
Tablo 3.1: Koruyucu gaz atmosferinin özellikleri.....	10
Tablo 3.2: Sıvı ortam borlanmasında kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri.....	11
Tablo 4.1: FeB ve Fe ₂ B fazlarının tipik özellikleri.....	17
Tablo 4.2: FeB ve Fe ₂ B fazlarının bazı özellikleri.....	19
Tablo 4.3: Çeşitli işlemlere tabi tutulmuş malzemelerin mikrosertlik değerleri.....	23
Tablo 4.4: 4 saat süreyle borlanmış ve borlanmamış “ 3 ” adet özel hazırlanan alaşımında 56 °C sıcaklıktaki % 10 H ₂ SO ₄ korozif ortamında ağırlık kayı testi ile elde edilen korozyon değerleri.....	24
Tablo 4.5: Sementasyon ve borlama ile elde edilen sertliklere ısı işlem sıcaklığının etkisi.....	28
Tablo 4.6: Borlanabilen bazı ferro malzemeler ve kullanım alanları.....	
Tablo 6.1: GGG 40 ve GGG 70 dökme demirlerin kimyasal bileşimi (% ağırlık).....	34
Tablo 6.2: Deney programı ve numunelerin kodları.....	35
Tablo 7.1: Tüm malzemelerin kütle kayıpları (%).....	63

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 nitür
C	: Karbon
Fe	: Demir
FeB	: Demir borür
Fe₂B	: Demirdiborür.
AISI	: American Iron and Steel Institute
µm	: Mikrometre
φ	: Çap
VSD	: Vickers Sertlik Değeri
daN	: Dekanewton

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sürecinde bana bilgi ve tecrübeleriyle destek olan değerli hocalarım Doç.Dr. Gülcan TOKTAŞ ve Dr. Öğr. Üyesi Alaaddin TOKTAŞ 'a çok içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam ile alakalı XRD analizleri için vermiş olduğu destekten dolayı İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesi'nde bulunan değerli hocam Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN' a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca her zaman yanımda olan ve beni destekleyip motive eden sevgili Eşim'e ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Balıkesir, 2020

Selman KORKMAZ

1. GİRİŞ

Endüstri uygulamalarında kullanılan malzemelerin aşınma korozyon ve sürtünme gibi tribolojik etkiler sonucunda azalan kullanım ömürlerinin arttırılması, ancak çalışmakta olan yüzey bölgelerini güçlendirerek mümkün olabilmektedir. Korozyon ve aşınmadan dolayı yıllık olarak malzeme açısından fazlaca kayıplar yaşanmaktadır. [1].

Makinayı oluşturan parçalarının tribolojik özellikleri ısıtma işlemleri ile de arttırılabilir. Bunlardan birisi de borlamadır. Borlama işleminin geçmişi eski olup 1895 yılında Moissan tarafından çelik malzemelerde borlama ile yüzey sertleştirme işlemi yapılmıştır. Şimdilerde borlama işlemi önemli bir yüzey sertleştirme metodu olup teknolojik açıdan da gelişmiştir [2].

850 - 1150 °C sıcaklıktaki demir türü malzemelerin iki ila sekiz saat sürelerde borlandığı zaman, difüzyon bölgesi oluşturur. Bu difüzyon bölgesi demir borür fazından oluşup 250 µm derinliğe ve 2500 HV_{0,06} sertliğine kadar sonuç verebilmektedir. Ham malzeme üzerinde oluşan bu tabakanın tutunma mukavemeti iyi olup bu difüzyon bölgesinin özellikleri borlama süresi sıcaklığı vs. gibi değişkenlere bağlı olarak farklılık gösterir [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. 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 alaşımlı çeliklerde en düşük miktarda tutulmaya çalışılır [5].

Bu çalışmada iki farklı küresel grafitli dökme demir (KGDD) tiplerine (alaşımsız; GGG 40 ve alaşımlı; GGG 70) farklı sıcaklık ve sürelerde borlama işlemi uygulanarak, borlama işlem parametrelerinin bor tabaka kalınlığına, sertlik dağılımına, kırılma tokluğuna, korozyon direnci özelliklerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

2. BOR ELEMENTİ

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 [6-9].

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, SusurlukSultansazlığı 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 [7, 10, 11].



Şekil 2.1: Siyah-Gri, beta Boru; 5 değişik bor yapısından sadece birisi [6-9].

Yaklaşık Atom Ölçüsü	: 10,811
Periyodik Atom Numarası	: 5
Ergime Noktası	: 2180°C
Kaynama Noktası	: 3650°C (Basınç altında)
Oksidasyon sayısı	: 3 Yoğunluk: 2,35 g/cm ³
Sertlik (Mohs)	: 9,3 Atom çapı: 85 pm
Elektron dağılımı	: [He]2s ² 2p ¹
Doğadaki izotopları	: B – 10 19,57% B – 11 80,43%

2.1 Bor Elementinin Özellikleri

Periyodik tabloda III. grubunda bulunan bor elementinin atom numarası 5, atom ağırlığı 10.81 birim, atom çapı 1.78 Å ve ergime noktası 2400°C dir. 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 sertlik değerleri ise Tablo 2.2’ de verilmiştir [12].

Tablo 2.1: Kristalin borun yapısı ve kafes parametreleri [12].

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

Tablo 2.2: Bor ve bazı bileşiklerin sertlikleri [12].

Malzeme	Mohs sertlik
Bor	9,3
Bor karbür	9,32
Bor nitrür	1,2
Elmas	10

α – orthorombal Bor (kırmızı, saydam)

β – orthorombal Bor (siyah, gri parlak)

α – tetragonal Bor (siyah)

β – tetragonal Bor (kırmızı)

Tüm kristal yapılarında birleşme yapısı 12 köşeli olarak meydana gelmektedir. Bu tür bir kristali 20 yüzeyle olarak da tanımlamak mümkündür. Borun en sağlam yapısı; Amorf bordan ya da yüksek derecede (1200 °C) β – hegzagonal bordan elde edilen α – orthorombal bordur [13].

Bor elementi, Elmas elementinden sonra dünyada bulunan en sert ikinci madendir. Bor elementi; ısıya dayanıklılığının iyi olmasının yanında kaynama ve ergime sıcaklığı da iyi bir elementtir. 20°C'den sonra ısındıkça elektrik iletkenliğide artmaktadır. Yaklaşık 600°C sıcaklıkta, bu katsayının 100 kat arttığı görülmektedir [14].

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].

2.2 Bor Elementinin Kullanım Alanları

Bor ürünlerinin kullanıldığı alanlar Tablo 2.3’de gösterilmiştir [8, 13].

Tablo 2.3: Bor kullanım alanları [8, 13].

Kullanım Alanı	Kullanım
Savunma	Zırh Plakalar, Seramik Plakalar, Ateşli Silah Namluları, Fişek vb
Cam Sanayi	Bor Silikat Camlar, Laboratuar Camları, Uçak Camları, Borcam, Pyrex, İzole Cam Elyafı, Tekstil Cam Elyafı, Optik Lifler, Cam Seramikleri, Şişe, diğer Düz Camlar, Otomotiv
Enerji Sektörü	Gaz türbinleri, Yüksek ısı transistörleri, Bor hidrür yakıtları(boranlar), Isı enerjisi depolayıcılar, Piller, Hidrojen depolayıcılar, Güneş Enerjisinin Depolanması
Kimya Sanayi	Bazı kimyasalların indirgenmesi, Elektrolitik işlemler, Flotasyon İlaçları, Banyo Çözeltileri, Katalistler, Atık Temizleme Amaçlı olarak, Petrol Boyaları, Yanmayan ve Erimeyen Boyalar, Tekstil Boyaları, Yapıştırıcılar, Soğutucu Kimyasallar, Korozyon Önleyiciler, Mürekkep, Pasta ve Cilalar, Kibrit, Kireçlenme Önleyicileri
Makine Sanayi	Manyetik Cihazlar, Zımpara ve Aşındırıcılar Kompozit Malzemeler, Titreşim söndürücü malzemeler, Sert malzemeler, Motorlar, Katı yağlayıcılar, Yüksek sıcaklık sızdırmazlık contaları, Yüksek performanslı motor yağları
Nükleer Sanayi	Nükleer atık depolama (kolemanit cam bloklar), Reaktör Aksamları, Nötron Emiciler, Reaktör Kontrol Çubukları, Nükleer Kazalarda Güvenlik Amaçlı ve Nükleer Atık Depolayıcı olarak, Nükleer teknolojide emniyet malzemeleri
Metalurji	Kaplama elemanları, Yüksek sıcaklık refrakterleri, Kaplama Sanayinde Elektrolit Olarak, Paslanmaz ve Alaşımli Çelik, Sürtünmeye-Aşınmaya Karşı Dayanıklı Malzemeler, Kaynak Elektrotları, Metalurjik Flaks, Briket Malzemeleri, Lehimleme, Döküm Malzemelerinde Katkı Maddesi olarak, Kesiciler, Kompozit Malzemeler
Uzay ve Havacılık Sanayi	Sürtünmeye-Aşınmaya ve Isıya Dayanıklı Malzemeler, Roket Yakıtı, Uydular, Uçaklar, Helikopterler, Zeplinler, Balonlar, Radar dalgası soğurucular
Otomotiv	Titreşim söndürücü malzemeler, Hava yastığı şişirme mekanizmaları, Bor hidrür yakıtları (boranlar), Isı enerjisi depolayıcılar, Hidrojen depolayıcılar, Hava Yastıklarında, Hidroliklerde, Plastik Aksamda, Yağlarda ve Metal Aksamlarda, Isı ve Ses Yalıtımı Sağlamak Amacıyla, Antifrizler

3. BORLAMA YÖNTEMLERİ

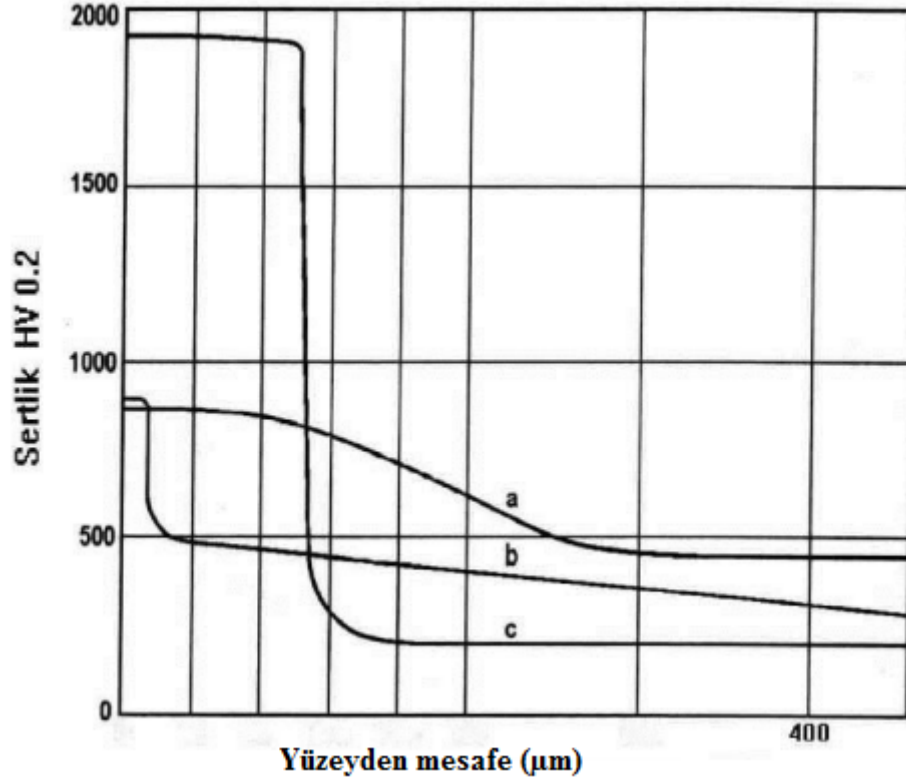
1895 yılında Mossion, çeliklerin borlanabileceğini söylemiş ve bu konuda çalışmalar yapmıştır. Ancak özellikle II. Dünya Savaşı'ndan sonra bu konudaki araştırma ve çalışmalar yoğunluk kazanmıştır [17].

Borlama, esas olarak yayınma 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 [18-20].

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].

2000 - 2500 VSD (Vickers Sertlik Değeri) değerlerine ulaşabilen borlanmış parçaların, korozyon direncine dayanımının iyi olması, sürtünme katsayısının düşük olması, diğer yüzey sertleştirme işlemlerine göre üstünlük gösterdiği özellikleriyle öne çıkmaktadır [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 ısı işlemler sonucu oluşan, sertlik yüzeyden mesafe ilişkileri Şekil 3.1 'de görülmektedir [3].

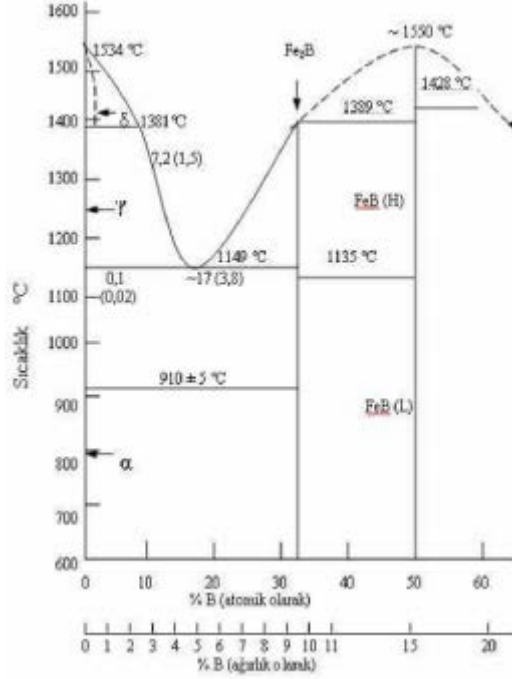


Şekil 3.1 : Borlama işleminde, sertlik-yüzeiden mesafe ilişkisi [3].

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

Bor , 850 - 1050 °C arasında demir yüzeyine yayılmaktadır. demir yüzeyine yayılan bölgede tek fazlı Fe₂B veya iki fazlı Fe₂B + FeB den oluşan ferrobör tabakası elde edilir. 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 ısı genleşme katsayısı ($23 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), Fe₂B nin genleşme katsayısından ($7,85 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) büyüktür. İki fazlı sistemde oluşan Fe₂B ve FeB fazları arasındaki ısı genleşme farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlaklar oluşur. Bu çatlakları önlemek FeB fazını azaltmak veya FeB fazının oluşmasını önlemek ile mümkündür [19, 20, 24, 25].

Şekil 3.2 'de Fe - B ikili denge diyagramı görülmektedir. Diyagramda da görüldüğü üzere borlanmış yüzeyin 1149°C sıcaklığına kadar etkilenmediği görülmektedir [2, 3, 26].



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

3.1 Katı Ortamda Borlama

Malzemenin, ısıya dayanıklı kutu içerisindeki bor tozunun içine gömülüp genellikle 850 - 1000 °C sıcaklıklarda 2 - 10 saat bekletilerek uygulanan işlemdir [27].

Bu tozlar 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 kaliteye sahiptir. Düşük alaşımlı çelikler için kullanılır.

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

Ekabor HM: Sert metallerin borlanması için özel olarak üretilmiştir.

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, ferrobör ve amorf bördür. Bor korbür diğerlerine göre ucuzdur. Amorf borun saf halinin çok pahalı oluşu ve saf ferrobörün eldesinin endüstriyel olarak çok zor olması bu metotların bırakılmasına neden olmuştur. Diğer bor verici toz ortam bor karbür ise amorf bor ve ferrobörden 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. Ferrobör 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 + % 49Ah03
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 ile Borlama

Bor tozları macun kıvamında olacak şekilde hazırlandıktan sonra malzemenin üzerine sürülür. Macunun 150°C sıcaklıkta kurutulması gerekmektedir. Daha sonrasında borlama sıcaklığına getirilen fırın içerisine macunlanmış parçalar konulup pişirilir. Belli bir süre borlama sıcaklığında tutulan parçalar dışarıya alınır ve soğumaya bırakılır. Malzeme üzerindeki macun kalıntıları temizlendikten sonra borlama işlemi tamamlanmış olur [28].

Borür tabakasının iyi olabilmesi için macunla borlama işlemi kesinlikle koruyucu gaz ortamında (Argon, Formier gazı, NH₃ ve saf azot) gerçekleştirilmelidir. Bu yöntemde kullanılan koruyucu gazlar ise Tablo 3.1 'te verilmiştir. Macun karışımı içerisinde Bor karbür, kriyolit ve etilsilikat maddeleri bulunmaktadır[17].

Tablo 3.1: Koruyucu gaz atmosferinin özellikleri [17].

Koruyucu Gaz Adı	Bileşimi
Argon	% 99.996 Ar
KalıpGazı (Fonnier Gazı)	% 5 - 30 H ₂ , geri kalanı N ₂
NH ₃ . Spalt gazı (Amonak)	%75 H ₂ , %25 N ₂
Saf Azot	% 99 N ₂ , %1 H ₂

3.2 Sıvı Ortamda Borlama

Borlama işlemi, 800 - 1000°C sıcaklıktaki bora sahip sıvı bir ortamda 2 - 6 saat sürelerinde bekletilerek yapılır.[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]. Sıvı ortam borlamasında kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir [30].

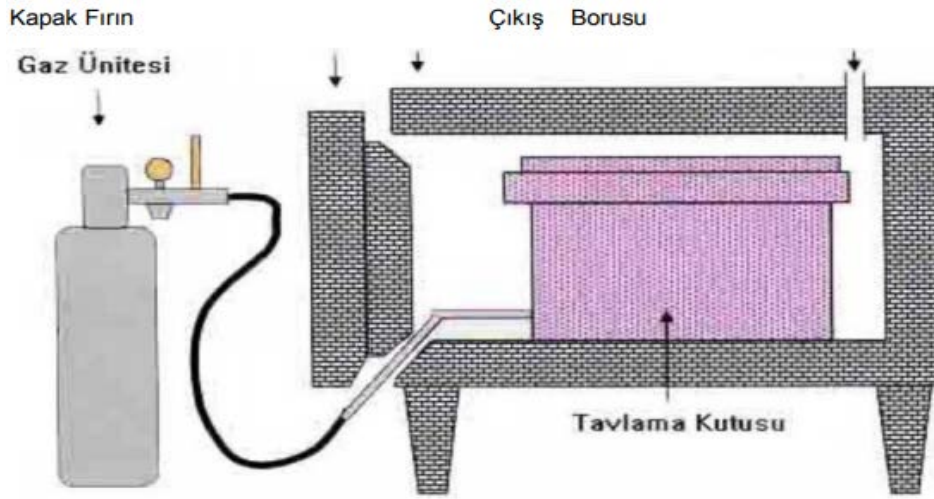
Tablo 3.2: Sıvı ortam borlanmasında kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri [30].

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 20°C de
Susuz Borax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	201.26	21.50	741°C	25,2 gr/lt H_2O çözüdür.
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 çözüdür.
Borkarbür	B_4C	55.29	7.28	2450°C	---

3.3 Gaz Ortamda Borlama

Bor halojenür, diboran ve organik borun kullanıldığı bu yöntemde gaz sirkülasyonu ile borun malzeme yüzeyine daha düzgün yayılması sonucu tek fazlı bir tabaka kalınlığı elde edilebilir [2].

Gaz ortamda borlama tertibatının şematik gösterimi Şekil 3.3’te verilmiştir.



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

3.4 Plazma Borlama

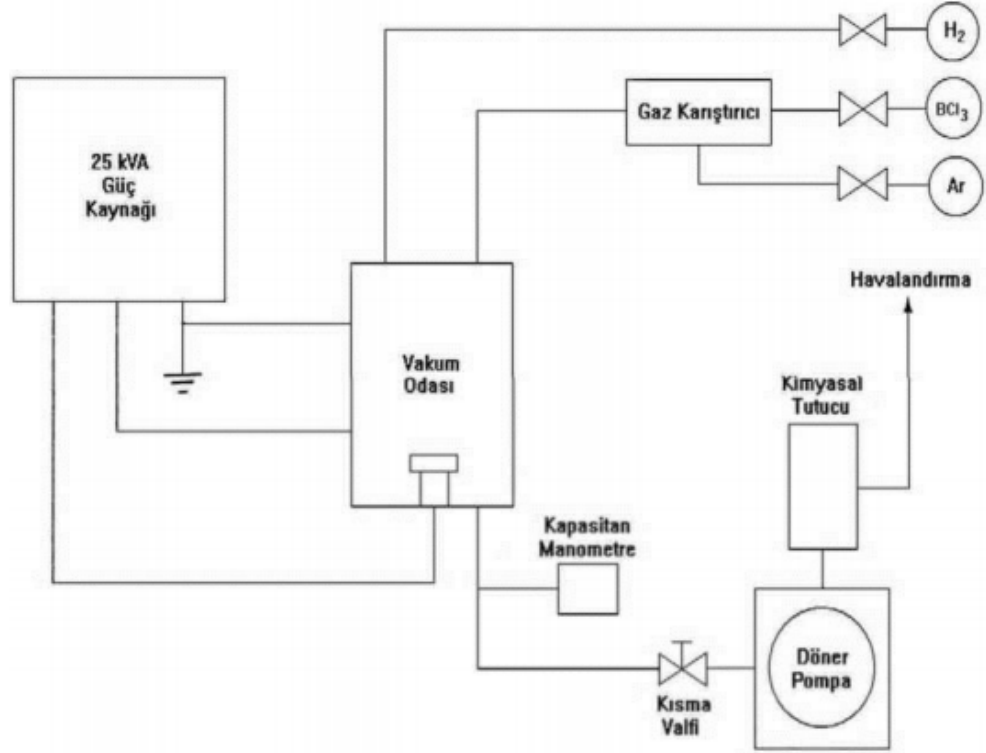
$B_2H_6-H_2$ ve BCl_3-H_2Ar 'un karışımları plazma borlama işleminde başarılı bir şekilde kullanılır. Bahsedilen $B_2H_6-H_2$ gaz karışımı bir paket veya sıvı ortam borlama prosesi ile mümkün olmayan $600\text{ }^\circ\text{C}$ gibi düşük sıcaklıklarda çeşitli çelikler üzerinde borlu tabaka üretmek için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

- Avantajlarından bir tanesi borlanmış yüzeyin sertliğinin diğer sertleştirme metodlarına göre yüksek olması (1450 - 5000 HV)ve ergime noktasının yüksek olmasıdır.
- Borlanmış yüzeylerin sertliğinin yüksek olması ve sürtünme katsayısının düşük olmasından dolayı malzemelerin aşınmaya karşı dayanımlarında önemli rol oynamaktadır.
- 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; kompleks parçalara da yüzey sertleştirme maksatlı uygulanabilir.
- Borlama, oksitleyici ve korozif ortamlarda parçanın yorulma ömrünü artırır.
- Borlama işlemi malzemelerin bazı asitlere karşı korozyon dayanımı artırmaktadır.
- Borlanmış yüzeyler, 850 °C dolaylarındaki yüksek sayılabilecek sıcaklıklarda orta seviyede oksidasyon 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 ısıtılacak 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

Borlama işlemi sonrası oluşan bor tabakalarının ana malzemeye yayılma şekilleri ya düz ya da zigzag olacak şekilde iki türdür. Bu durum borlamanın yöntemine, borlamada kullanılan malzemeye vs. bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. [37].

Bor tabakasının Fe_2B tek fazlı olması beklenir Çünkü $Fe_2B + FeB$ çift fazlı tabakada basma ve çekme gerilmeleri oluşturur. Bu durumda da tabaka da çatlamlar meydana gelmektedir [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. Yapılan deneyler sonucu tabakada Fe_2B fazı olan malzemelerin aşınma dayanımlarının yüksek olduğu görülmüştür [40].

Demir esaslı malzemelerde borlama sonucunda, Fe_2B fazının çok bulunduğu dış yapısına benzer kolonsal bir yapı oluşur. Çift fazlı $Fe_2B + FeB$ tabakası, vakum altında $800\text{ }^{\circ}C$ 'de uzun süreli ısıtılma 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 Fe₂B fazlarının tipik özellikleri [38].

Özellik	FeB	Fe ₂ B
Kristal Yapı	Ortorombik	Hacim merkezli tetragonal
Kafes Parametresi (Å)	A=4.053, b=5.495, c=2.946	a=5.078, c=4.28
Mikrosertlik	19 - 21	18 - 20
Elastisite Modülü	590	280 - 295
Bor içeriği (%ağırlıkça)	16.23	8.83
Yoğunluk (gr/cm ³)	6.75	7.43
Termal genleşme katsayısı Ppm/°C	23 (200 - 600°C)	7.65 (200 - 600°C) / 4.25 (100 - 800°C)
Ergime sıcaklığı (°C)	1540-1657	1389 - 1410
Termal iletkenlik (W/m.K)	12.0 (20°C80)	30.1 (20°C)
Elektriksel Direnç (10 ⁻⁶ cm)	80	38
Curie Noktası (°C)	325	742
Renk	Gri	Gri

Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertlikleri ve yüksek aşınma mukavemetleri ile tanınırlar. Eğer ortamda aşırı bor oranı mevcutsa ya da yüzeye geçişen bor oranı yüksekse, Fe₂B fazı (% 8,84 B) yanında, borca zengin FeB (%B) fazı da meydana gelebilir. Yüksek iç gerilmeye sahip olduğundan ve Fe₂B tabakasının üzerinden kavlanarak döküldüğünden dolayı FeB fazının oluşumu arzu edilmez [30, 41].

Borlama esnasında yüzeyde FeB fazıyla mevcut iken hemen altında Fe₂B fazları oluşur. Fakat bu iki fazın birlikte bulunmaları istenmeyen bir durumdur [42].

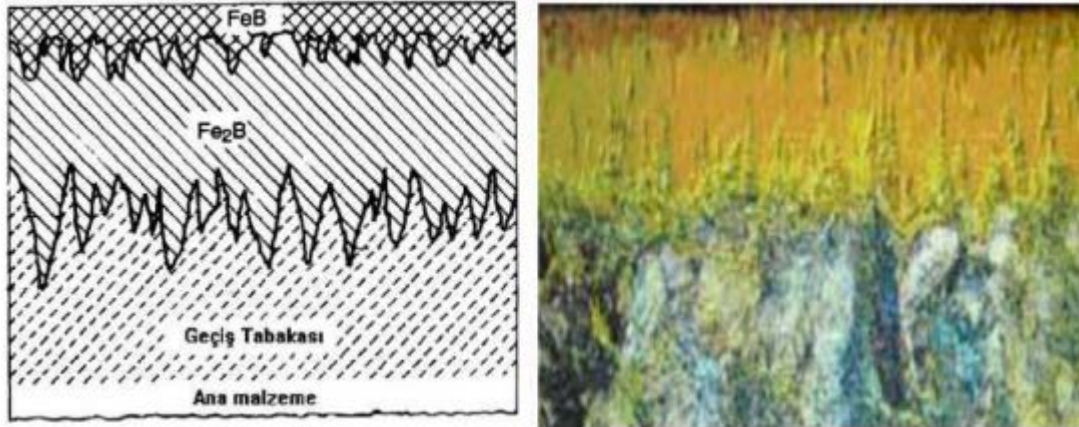
Paslanmaz çelik malzemeler üzerine yapılan borlamalarda, yüzey üzerinde nikelin az çözünürlük gösterdiği bir bor tabakası oluşur ve fazla nikel, bor tabakasının altında nikelce zengin tabaka oluşturacak şekilde malzeme içine doğru yayılır. Krom elementinin bir kısmı bor tabakasında çözünürken, geri kalan 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].

Alaşımsız 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].

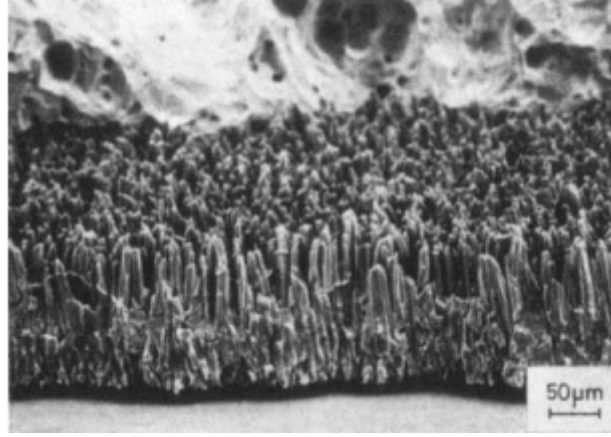
Şekil 4.1 'de FeB ve Fe₂B fazlarını barındıran alaşımsız bir çelikte oluşan tabaka görüntüsü verilmiştir. Borür tabakasının pürüzlülük derecesi, temel materyal ile söz konusu malzemenin ihtiva ettiği alaşım miktarına bağlıdır. Kuvvetli pürüzlülük karbonlu çelikler ve düşük alaşımlı dökme çeliklerde ortaya 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 , Fe₂B fazından daha koyu olmasından dolayı ayırt edilebilirler. Bu bileşenlerin aralarındaki yüzey yapısı kolonsal olup FeB, Fe₂B fazının üzerinde olduğundan daha fazla bor ihtiva etmektedir [45].

SEM görüntüsü alınan %18 HCl çözeltisinde çözünmüş 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 (Fe₂B) [3, 26].

Tablo 4.2: FeB ve Fe₂B fazlarının bazı özellikleri [27, 44].

Özellik	Ergime Noktası (°C)	Mikro sertlik (Vickers)	Uzama Katsayısı (1000°C)	Termal İletkenlik (1000°C)	Curie Noktası (°C)	Kristal Sistemi	Kafes Parametreleri (Å)	Yoğunluk (gr/cm ³)
Fe ₂ B	1390	1600-1800	8.0x10 ⁻⁶ K ⁻¹	0.2-0.3 W/cm°C	742	Tetragonal Hacim Merkezli	a: 5.075, b: 4.249	7.32
FeB	1550	1800-2400	10-160x10 ⁻⁶ K ⁻¹	0.1-0.2 W/cm°C	325	Ortorombik	a: 4.053, b: 5.495, c: 2.496	-

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

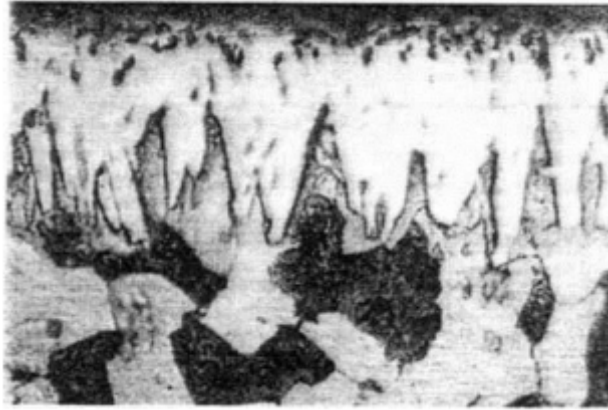
Geçiş bölgesi, borlanmış metalde borür tabakası ile ana metal arasındaki ara bölgeyi tanımlar. Borlama esnasında karbon borür tabaka içerisine giremediğinden malzeme içine doğru itilir ve geçiş bölgesinde karbonca zengin bir yapı oluşur [30].

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 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].

Borlama koşulları aynı olan AISI 1020, AISI 1040 malzemelerinin birbirlerinden farklı özelliklere sahip tabaka oluşturdukları incelenmiştir. Alaşımli ve alaşımsız çeliklerin borlama neticesindeki tabaka görüntüleri Şekil 4.3'te verilmiştir. Görüntüde dışta beyaz renkteki bor tabakası dişli şeklindedir [21].



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

Şekil 4.4'te görüldüğü üzere borlanmış alaşımlı AISI 4140 çeliğinin tabakası beyaz renkli olup dişli bir şekle sahiptir. [21].

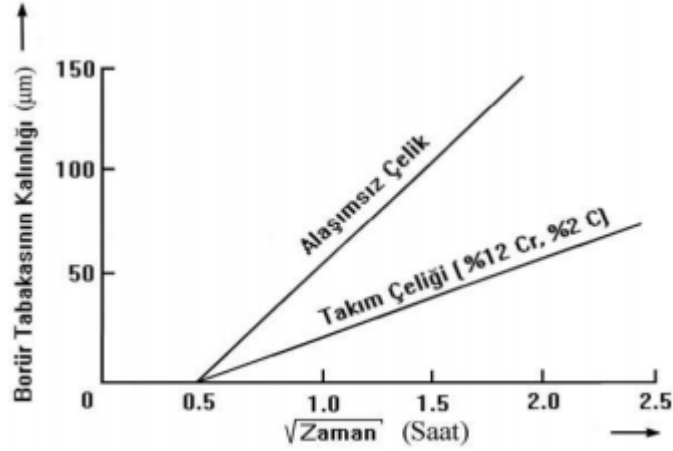


Şekil 4.4 : Borlanmış AISI 4140 çeliğinde yüzeyin mikro yapısı [21].

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].

Aynı koşullarda borlanan alaşımlı ve alaşımsız çeliklerin tabaka kalınlıkları Şekil 4.5'te verilmiştir [27].



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

Alaşımlı çelikler borlandığı zaman alaşım elementleri (Co, Ni, Mn) meydana gelen Fe₂B tabakasının deinliğini arttırdığı gözlemlenmiştir. Bor tabakasının karbon içermediği ve silisyum çözünürlüğü düşük olduğu incelenmiştir. [3].

Karbon, borür tabakasının sertliğinde artışa sebep olmakta ancak bu artış % 0.4 karbona kadar devam etmektedir [49]. Karbon, ötektoid üstü çeliklerde borun difüzyonuna kuvvetle engel olur ve esasen daha ince tabaka kalınlığına neden olur. Bu görünüm ostenit içinde karbonun çözünürlüğünün artması ile borun toplanması sayesinde ve böylece borür dışların büyüme frontunda sementitten ayrılmaya sebep olduğu izah edilmektedir. Ötektoid altı çeliklerde karbonun borlanabilirliğe etkisi farklı şekillerde yorumlanır. Artan karbon miktarı, borür tabakası kalınlığının açıkça azalmasına götürdüğü anlayışı kabul edilmektedir [50].

Alaşım elemanının ham malzemeye etkisiyle birlikte bu malzemeye uygulanan borlama işleminden sonra yüzeyde oluşan bor birleştiğinde önemli derecede farklar oluşturmaktadır. Borlanmış yüzeylerin sertliği borür cinsine ve miktarına bağlı olarak değişir. Yüzeyi borlanmış karbon çeliklerle alaşımlı çelikler arasındaki sertlik farkı alaşım elemanlarının varlığıyla alakalı bir durum olduğu gerçektir [49].

4.4 Borlu Tabakanın Mekanik Özellikleri

Borlama işlemi ile demir türü malzemelerin kopma ve akma dayanımlarını, yorulma dayanımlarını, korozyona karşı dayanımlarını arttırmasına rağmen plastisite özelliğini düşürür. Borlanmış malzemelere yönelik çalışmalar genellikle korozyon, sertlik vs. üzerindedir [18].

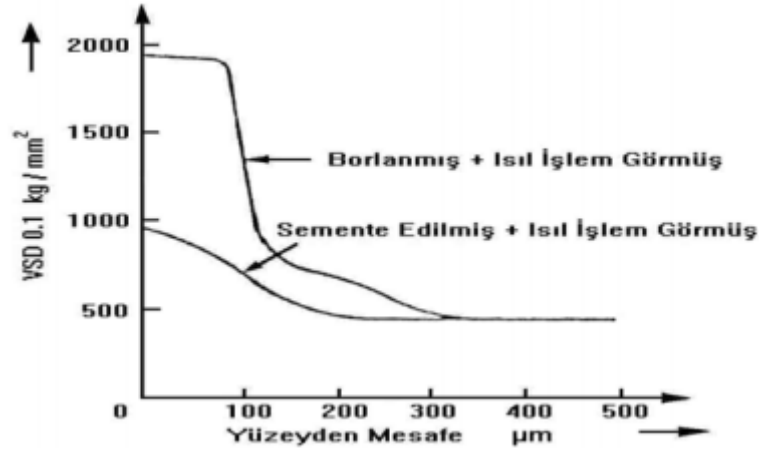
4.4.1 Sertlik

Borlamanın en büyük etkisi sertlik üzerine olup, ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak borür fazlarına bağlıdır. FeB fazı Fe₂B 'den daha sert ve gevrektr [51] . Tablo 4.3 'de ise borlama ve diğer işlemlerle elde edilmiş yüzeylerin sertlik kıyaslamaları yapılmıştır [18].

Şekil 4.6' da borlanmış ve sementasyonlu yüzeylerdeki sertlik dağılımlarının karşılaştırılması görülmektedir.

Tablo 4.3: Çeşitli işlemlere tabi tutulmuş malzemelerin mikrosertlik değerleri [18].

Malzeme	Mikrosertlik, HV
Borlanmış yumuşak çelik	160
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	60-700
Yüksek hız takım çeliği BM42	900-910
Nitrülenmiş çelik	650-1700
Karbürleşmiş düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
Sementit karbürler WC + CO	116-1820 (30 Kg)
Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ seramikler	1483 (30 Kg)
Al ₂ O ₃ + TiC + ZrO ₂	1730 (30 Kg)
Sialon seramikler	1768 (30 Kg)
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Elmas	S 10000



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

4.4.2 Korozyona Karşı Dayanıklılık

Metal malzemelerin çevre şartlarından dolayı (kimyasal ve elektrokimyasal) etkilenmesi sonucu oluşan hasara korozyon adı verilmektedir. Kimyasal bileşenlerin bulunduğu bir ortamda malzemenin girdiği etkileşim korozyon ve havayla teması sonucu oluşan etkileşim oksitlenmesi durumuna sebep olur [28]. Borlama işlemi ile düşük alaşımlı çeliklerin korozyon dayanımında önemli artışlar gözlenmiştir. [46]. Borlanan demir esaslı

malzemelerin bazı asitlere karşı korozyon dayanımı önemli derecede yüksektir [12]. Borlama işleminin herdaim yüksek alaşımlı malzemeler üzerinde korozyon dayanımını arttırdığı görülmeyebilir. Örneğin Cr fazla içeren çeliklerin borlanmasından sonra koruyuculuğu az olan krom borür bileşeni oluşur [28].

Yapılan bir çalışmada 3 saat süreyle borlanan 3 adet çeliğin % 10 H₂SO₄ içerisinde 56 °C 'deki borlanmış ve borlanmamış durumdaki ağırlık kıyaslamaları Tablo 4.4'de verilmiştir [49].

Tablo 4.4: 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].

Alaşı m No*	Malzeme Durumu	Korozyon süresi (saat)	İlk Ağırlık= P0 (gr)	Son Ağırlık= P1 (gr)	Ağırlık Farkı= P0- P1 (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

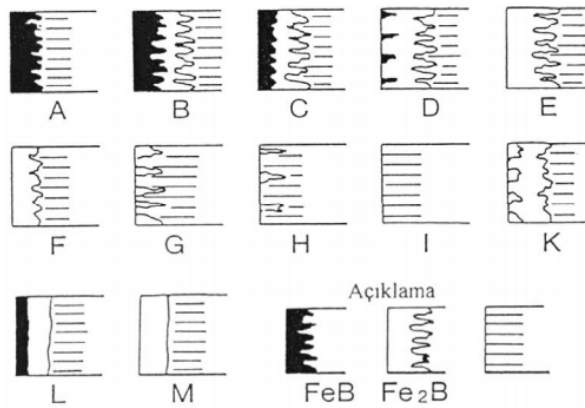
Tabaka kalınlığı, borlama süresine ve işlem sıcaklığına bağlı olarak artış gösterir. Fakat sıcaklığın, Fe - B denge diyagramındaki ötektik sıcaklığının (1149 °C) altında olmaması halinde malzeme yüzeyinin bozulmasına sebep olur. Maliyet açısından da borlama süresinin de makul seviyelerde olması gerekir. Tabaka kalınlığının artmasını engeleyen diğer bir durum olan kırılmalık, tabaka kalınlığı arttıkça artar [18].

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

4.6 Bor Tabakası Çeşitleri

Farklı borlama metodları uygulanmasıyla birlikte değişik şekillerde borür tabakaları oluşabilmektedir. Şekil 4.7' de Kunst ve Schaaber geliştirdikleri değişik yapıda borür tabakaları verilmiştir [30].



Şekil 4.7 : Borür tabakası çeşitleri [13].

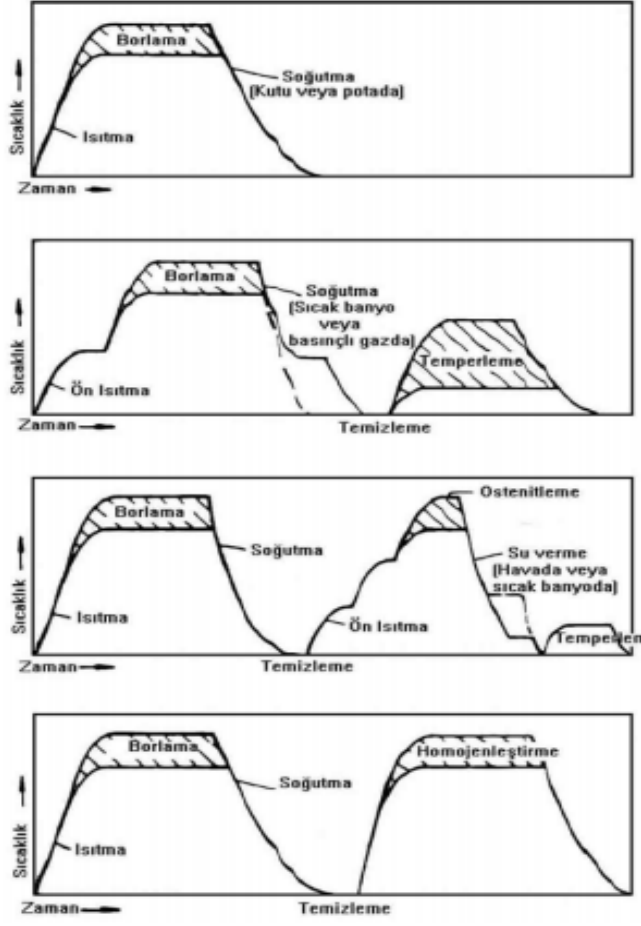
- A: Tek fazlı tabaka, sadece FeB.
- B: İki fazlı tabaka, Fe₂B ve FeB.
- C: İki fazlı tabaka, B'dekinden daha ince bir FeB.
- D: İki fazlı tabaka, yalnız FeB dişleri izole edilmiş.
- E: Tek fazlı tabaka, sadece Fe₂B, kuvvetli dişler.
- F: Tek fazlı tabaka, sadece Fe₂B, daha az kuvvetli dişler.
- G: Fe₂B 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

Borlama işlemi sırasında borlanan malzeme ile bor tabakası arasında oluşan yüzeyde iç gerilmeler meydana gelir. İç gerilmelerin tabakada oluşturacağı hasar, bor tabakasının faz yapısına ve bor tabakasının tipine bağlı olarak değişir. İstenen bor tabakası, tek fazlı Fe₂B ve tabakanın dişli biçimde olmasıdır. Fe₂B fazıyla (basma) beraber FeB fazının (çekme) da olması, farklı yönelmiş iç gerilmeler oluşturur. Bu durumdaki gerilmeler, tabakanın çatlayıp dökülmesine sebep olmaktadır [18].

4.8 Borlama İşlemi Sonrası Uygulanabilen Isıl İşlemler

Borlama işleminin en önemli üstünlüklerinden biri de, borlamadan sonra matriks malzemesine istenilen ısıl işlemin yapılabilmesidir. Matriks, 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 4.8 'daki gibi işlemler yapılabilir [54].



Şekil 4.8 : Borlamadan sonra yapılabilen ısı işleme örnekleri [54].

Borlanmış malzemelerde ana malzeme yumuşak yapıya sahipse lokal basınçlardan dolayı tabakanın dökülmesine sebep olabilmektedir. Bor tabakası oluşurken artan hacim tabakanın kalınlığına ve kullanılan malzemeye bağlıdır. Borür tabakasının genleşme katsayısı ile çelik tipi malzemelerin genleşmeleri yakın olduğundan dolayı tabakaya zarar görmeden bilinen yöntemlerle bu malzemelere ısı işleme yapılabilmektedir [27].

Farklı ısı işlemlere tabi tutulan 1010 çeliğinin farklı sıcaklıklardaki sertlik kıyaslaması Tablo 4.5 'da verilmiştir [31].

Tablo 4.5: Sementasyon ve borlama ile elde edilen sertliklere ısıtılma 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 ısıtılma, sementasyon tabakasını yumuşatırken, borlu tabaka sertliğini 900 °C 'lara kadar muhafaza etmektedir [27].

4.9 Borlanabilen Malzemeler

Borlama uygulanabilen bazı malzeme tipleri ve kullanım alanları Tablo 4.6 'da verilmiştir.

Tablo 4.6: 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, haddeme 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 (diş kalıpları), burçlar, pleytler, mandrenler
1.2210	115 CrV 3	C2	Sementasyonlu pimler ve saplamalar, kalıp zimbaları
1.2311	40 CrMnMo 7		Döküm levhalar, bükme çeneleri
1.2343	X 38 CrM oV51	H11	Delme takımları, Pistonlar, baskı silindirleri, ağızlıklar
1.2344	X 40 CrMoV 51	H13	(zivanalar), ingot (kütük) kalıpları
1.2365	X 32 CrMoV 33	H10	Enjeksiyon zimbaları, 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

Tablo 4.6 (devam)

Malzeme Numarası	DIN	AISI	Kullanım Alanları
1.4541	X 10 CrNiMo 8	321	Bağlama bilezikleri, besleme memeleri, dişli gövdeleri
1.6580	30 CrNiMo 8		Haddeme silindirleri
1.2601	X 165 CrMoV 12	D2	Çekme takımları, soğuk haddeme silindirleri
1.2714	56 NiCrMoV 7	L6	Civatalar, dövme kalıpları
1.2767	X 45 Ni Cr Mo 4	O2	Baskı aletleri, bükme kalıpları çeneleri, pres kalıpları, çekme
1.2842	90 MnCrV 8		kalıpları, delici zımbalar
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 9		Erkek kılavuzlar
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 1.7228	42 CrMo 4	4140	Pres matriksleri, ekstrüder sonsuz vidaları, helisel silindirleri,
	50 CrMo 4	4150	pistonlar, geri hareket mandalları
1.7707	30 CrMoV 9		Sonsuz dişliler, silindirler, enjektör meme plakları
	Gri pik döküm		Tekstil makinesi parçaları, bilezikler, kalıplar
	Örneğin: GG 20		

Tüm ferro alaşımlara her türlü metotla borlama yapılabilir. Aşınmaya dayanımı yüksek olan TiB₂ tabakası, Ti ve Ti alaşımlı malzemelere borlayarak elde edilir [27].

Borlama işlemi farklı yöntemlerle bakır ve alaşımlarına uygulanabilirken çinko ve alüminyuma aynı durum geçerli olamamaktadır [18].

Demir esaslı tüm malzemelere borlama uygulanabilir. Demir esaslı malzemelerin yanı sıra diğer elementler ve alaşımlara da, mesela sert metal, Wolfram, molibden, Titan vb. de borlanabilir. Ayrıca karbonlu çelikler, hafif ve düşük alaşımlı çelikler, yüksek alaşımlı çelikler de borlanmaya elverişli malzemelerdir [17].

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 bir çalışmada borotemperleme 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 HV_{0.05} 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. Çalışmalarında Ekabor 3 tozu ile 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 gözlemlenmiştir. 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 özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bahsedilen çalışmada borlama işlemi boraks, borik asit ve ferro silikon içeren tuz banyosunda 850-950 °C aralığında 2-8 saat süreyle 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 difraksiyonu 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 östempereleme 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].

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 süreyle yapılmıştır. Oluşan FeB ve Fe₂B fazları X ışını difraksiyonu (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 toklukları ise 2,19 ve 4,5 MPa m^{1/2} aralığında 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 sürtünen yüzeyler 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 tutulan gri dökme demirde 110 µm olarak ölçülmüştür. Mikro sertlik değeri küresel dökme demir ve kompakt dökme demirde 2685 HV_{0,04}, gri dökme demirde ise 2465 HV_{0,04} 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 gözlemlenmiştir [62].

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

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'ın yapmış olduğu bir çalışmada, borlama işlemi üzerine yapılmış çalışmalardan bir derleme yapılmıştır. Değişik borlama metodlarını 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 belirtmektedir. KGDD malzemeler yüksek seviyede silisyum içermektedir. Yapılan araştırma, KGDD malzemelerin bor kaplanmasında çelikler için önerilenlerden daha çok parametreler olduğu alaşimsız veya düşük seviyede alaşım elementi içeren KGDD malzemelerin yüzeyinde oluşturulan borür tabakası, kaplama - matriks 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 Fe_2B 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 çekilebildiğini ve KGDD 'lere önerilen bileşim ve işlem parametrelerine bağlı olarak, borlama endüstriyel boyutlarda uygulanabilirliğini belirtmiştir [32].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Deney Amacı

Bu çalışmanın amacı; farklı tipteki (alaşimsız ve Cu, Ni, Mo alaşımlı) küresel grafitli dökme demir malzemelere farklı sıcaklık ve sürelerde katı borlama işlemini uygulayarak malzemelerin bor tabakası kalınlıklarını, tabakalardaki sertlik dağılımlarını, kırılma tokluklarını ve korozyona karşı davranışlarını incelemektir. Bu amaç çerçevesinde deneysel çalışmada kullanılmak üzere GGG40, GGG70 tiplerinde küresel grafitli dökme demir malzemeler temin edilmiştir. Bu malzemelere 2 farklı sıcaklıkta 900-950°C ve 4 farklı sürelerde (2-4-6-8 saat) borlama işlemleri uygulanmıştır. Bor tabakası kalınlıkları, sertlik dağılımları, Vickers indentation yöntemi ile kırılma toklukları ve formik asit ve nitrik asit ortamındaki korozyon davranışları ölçümleri neticesinde elde edilen veriler çerçevesinde bulunan sonuçlar, birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

6.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler

Deneyde Ø15 mm çaplarında, 10 mm boylarında alaşimsız küresel grafitli dökme demir (GGG40) ve Ø16 mm çaplarında, 10 mm boylarında alaşımlı küresel dökme demir (GGG70) numuneleri kullanılmıştır. Her iki dökme demirin kimyasal bileşimi Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1: GGG 40 ve GGG 70 dökme demirlerin kimyasal bileşimi (% ağırlık).

	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Ni	Mo	Cr
GGG40	3,54	3,06	0,361	0,07	0,019	0,044	0,01	0,001	0,001	0,017
GGG70	3,73	2,55	0,30	0,045	0,023	0,044	1,03	1,25	0,18	0,032

6.3 Deney Programı ve Numunelerin Kodlanması

Çalışmanın bundan sonraki kısımlarında deney numunelerini ve uygulanan borlama işlemlerini daha kolay ve net açıklayabilmek için numunelere kodlama işlemi uygulanmıştır. Tablo 6.2’de gerçekleştirilen deney programı ve numune kodları gösterilmiştir.

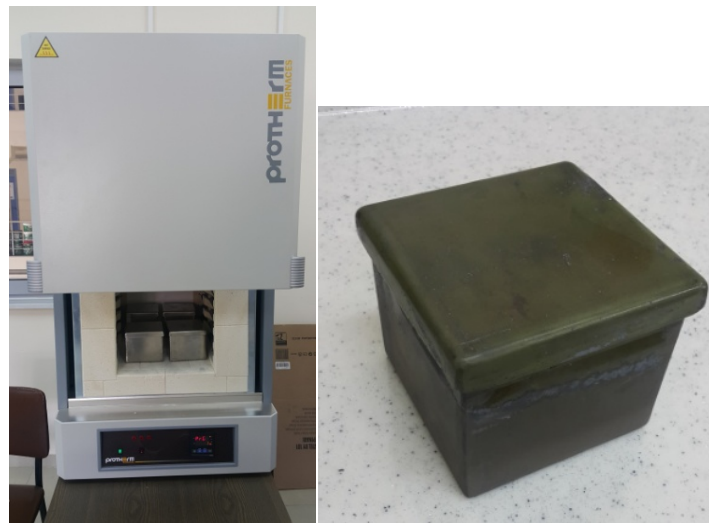
Tablo 6.2: Deney programı ve numunelerin kodları.

Numune Kodu	KGDD Tipi	Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)
712			2
714			4
716		900	6
718			8
722	GGG70		2
724			4
726		950	6
728			8
412			2
414			4
416		900	6
418			8
422	GGG40		2
424			4
426		950	6
428			8

6.4 Borlama İşlemi

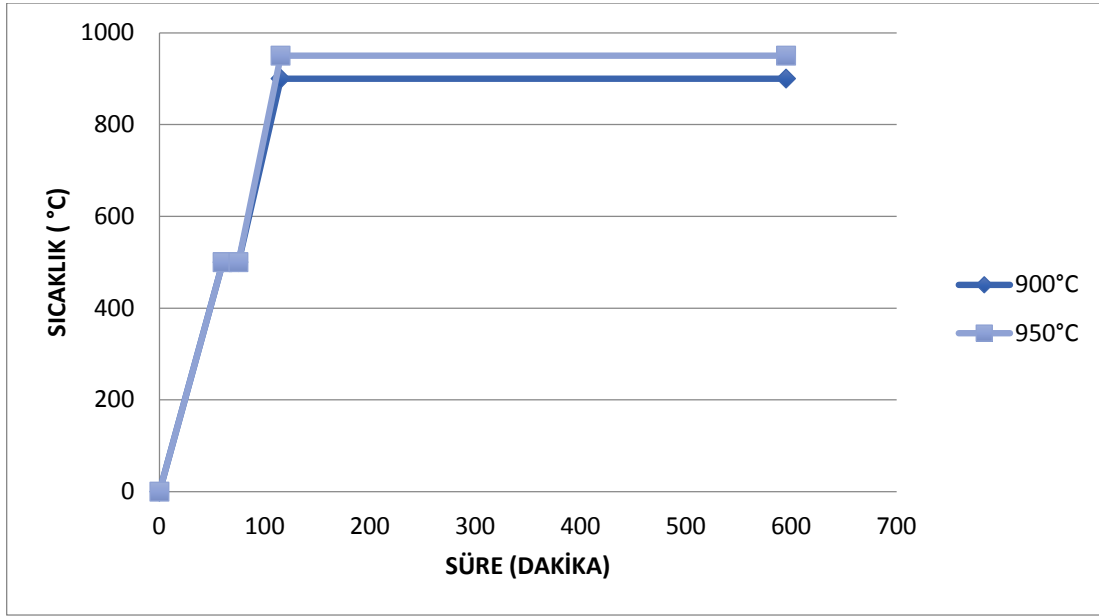
Borlama işleminden önce tüm numuneler eşit boylarda kesilmiştir. Daha sonrasında numuneler zımparalanarak yüzeyleri pürüzsüz olacak şekilde borlama işlemi için hazır hale getirilmiştir.

Borlama işlemi Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği Malzeme Laboratuvarında bulunan “Protherm Furnaces PLF 110/45” fırın içerisinde 5 mm kalınlığında paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiş kutularda gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1: Borlama işleminin gerçekleştirildiği fırın ve borlama kutusu.

Borlama işlemi katı ortamda gerçekleştirilmiştir. Kutuların içerisine ‘EKabor2’ bor tozu ile beraber toplam 8 adet numune konumlandırılmıştır. ‘EKabor2’ tozunun içeriği ; $B_4C - SiC - KBF_4$ şeklindedir ve bor tozu Vezneli A.Ş. / Manisa tarafından temin edilmiştir. Borlama kutusunu ve içerisindeki toza gömülü haldeki numuneleri eşdeğer bir sıcaklık çevrimi içerisinde tutmak için sıcaklık kademeli olarak borlama sıcaklığına getirilmiştir. Borlama süresi, sıcaklık istenilen sıcaklığa ulaştığı andan itibaren tutulmuştur. Borlama işleminde kullanılan fırın rejim eğrisi Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2: Borlama işlemi fırın rejim eğrisi.

Borlama sıcaklığı olarak 900°C - 950°C sıcaklık seviyeleri belirlenerek bu sıcaklıklarda 2-4-6-8 saat sürelerde borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kutu tabanından 2cm seviyesine kadar bor tozu doldurulduktan sonra üzerine numuneler yerleştirilmiştir. Numuneler kendi aralarında ve kutu kenarlarından en az 1cm mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Numuneler konumlandırıldıktan sonra üzerine 3cm ‘EKabor-2’ ilave edilmiştir. Bunun sebebi, normalde Ekabor-2’nin 2cm konulduktan sonra oksijen tutucu Ekrit tozu konulması gerekmektedir. Ancak ekrit tozunun birinci işlemde sonra bor tozu ile karışıp ayıklanması zor olduğundan ikinci kez yapılacak işlemlerde bor difüzyonunu zorlaştırılacağı göz önüne alınarak numune üstü Ekabor-2’nin kalınlığı artırılarak 3cm yapılmıştır. İşlem bittikten sonra, kapağın altındaki havanın Ekabor2’nin sadece 0.5cm’lik kısmını oksitlediği görülmüş olup sadece bu kalınlıkta sert bir tabaka meydana gelmiştir. Oksit numunelere ulaşmamış, böylece borlama işlemi sağlıklı bir şekilde sonuna kadar gerçekleştirilmiştir.

6.5 Metalografik İnceleme

Borlama işlemi sonrası fırından çıkartılan borlama kutusu havada soğutulduktan sonra numuneler alınmış ve temizlenerek metalografi işleminde incelenmek için kesime hazır hale getirilmiştir. Borlama işlemine tabi tutulan malzemeler Er & Mir Tekstil Ve Makina San. Tic. Ltd. Şti. de “metkon marka METACUT-M 250” cihazı ile kesilip, “metkon marka METAPRESS-M” cihazı ile bakalite alınıp ve “metkon marka FORCIPOL 2V” cihazı ile zımparalama ve parlatma işlemi yapıldıktan sonra iç yapı ve tabaka kalınlıklarını ortaya çıkarabilmek için %5 nital çözeltisi kullanılarak dağlanarak hazır hale getirilmiştir. Metalografik yüzey hazırlığı için kullanılan kesme, bakalite alma , zımparalama ve parlatma cihazları Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5’te sırasıyla verilmiştir.



Şekil 6.3: Numune kesme cihazı.

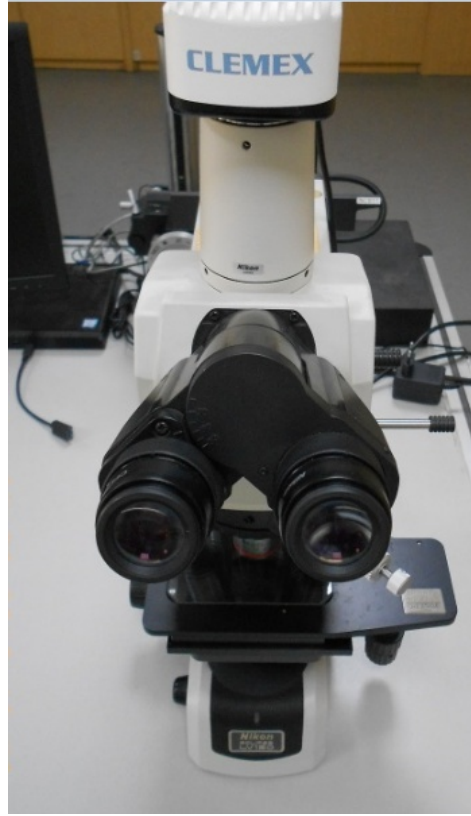


Şekil 6.4: Bakalite alma cihazı.



Şekil 6.5: Zımparalama ve parlatma cihazı.

Yüzeyleri hazırlanan numunelerin bor tabaka kalınlıkları ve bunun yanı sıra mikroyapı incelemeleri “Nikon marka Eclipse LV-150” cihazı yardımıyla incelenmiştir(Şekil 6.6).



Şekil 6.6: Optik mikroskop.

6.6 Sertlik ve Çatlak Yarı Uzunluklarının Ölçümü

Borlama tabakası kalınlıklarının sertlik dağılımları ve ölçümleri "Metkon MH-3" marka mikro sertlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 6.7). Sertlik ölçüm işlemi Vickers uç kullanarak 50g yük ve 10 saniye süre ile gerçekleştirilmiştir. Mikro sertlik ölçümleri her bir numune için bor tabakası üzerinden yüzeyden matrise doğru 20 µm aralıklarla 6 adet olacak şekilde 2 farklı noktadan toplamda 12 adet ölçüm alınıp bu değerlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

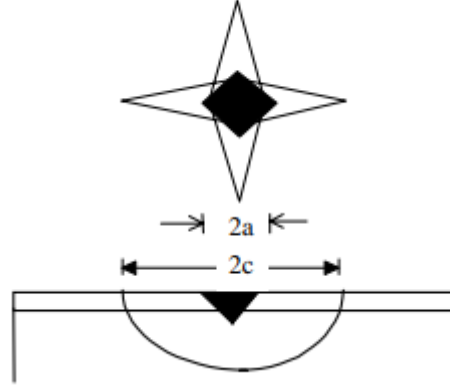


Şekil 6.7: Mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı.

Bor tabakası üzerinden Vickers cihazı "Metkon MH-3" ile Vickers indentation yöntemi kullanılarak 300 gr yük ile birkaç noktada (3-5 arası) çatlaklar oluşturulmuştur. Bu çatlakların ortalaması alınarak kırılma toklukları denklem 6.1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$K_c = 0,016 \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} \frac{P}{c^{3/2}} \quad (6.1)$$

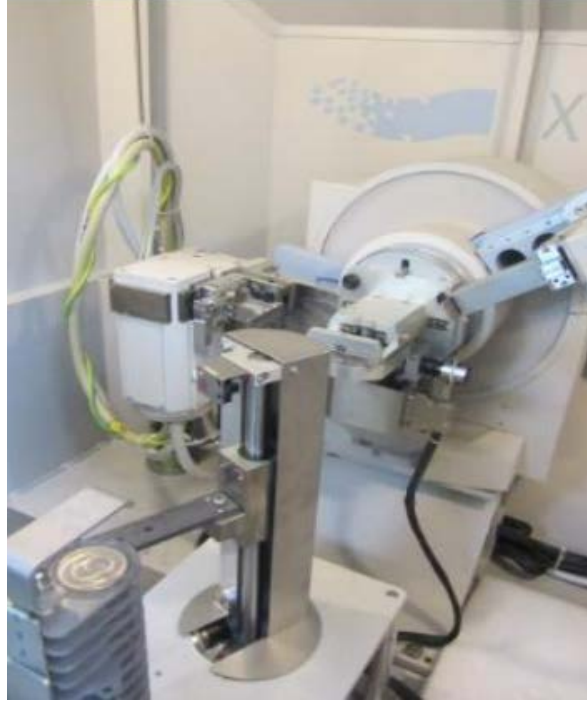
Denklemdaki E; elastisite modülünü, H; bor tabakası sertliğini, P; uygulanan yükü, c çatlak yarı uzunluğunu ifade etmektedir (Şekil 6.8). Hesaplarda elastisite modülü 29000 kg.mm^{-2} olarak alınmıştır [71].



Şekil 6.8: Vickers izi ve çatlak boyunun şematik gösterimi.

6.6 XRD Analizi ve SEM Görüntüleme

XRD (X Işını Difraksiyonu) analizi, bakır hedef elementten elde edilen X ışın demetinin analiz edilecek malzeme üzerine gönderilmesiyle gerçekleştirilmiştir. XRD analizi uygulanarak numunelerde ortaya çıkan fazlar belirlenmiştir. Çalışmada İstanbul Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Adnan Tekin Malzeme Uyg.-Ar. Merkezi laboratuvarında bulunan Panalytical X Pert Pro XRD cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.9). Analiz sırasında kullanılan radyasyon $\text{CuK}\alpha$ 'dır. $10^\circ - 90^\circ$ tarama yapılmış ve dakikada 2 derece olarak taranmıştır.



Şekil 6.9: XRD Cihazı.

SEM (Taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri için Şekil 6.10'da verilen Uludağ Üniversitesi Fizik Laboratuvarında bulunan Zeiss marka Evo40 model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Bu cihazla korozyon çalışması sonrasında alınan bazı numunelerin yüzeyleri incelenmiştir.



Şekil 6.10: Taramalı Elektron Mikroskobu.

6.7 Korozyon Direnci İncelemesi

Araştırmalarımız neticesinde küresel grafitli dökme demirlerin Formik ve Nitrik asitine karşı dirençlerinin düşük olmasından dolayı borlamanın küresel grafitli dökme demirlerin korozyon direncine etkisi incelenmiştir. Borlanmış numuneler ve herhangi bir işlem görmemiş ham haldeki numuneler %10 luk Formik (pH:2,2) ve Nitrik (pH<1) asit çözeltileri içerisine atılmıştır (Şekil 6.11). Sağlıklı ölçüm yapabilmek için numuneler önce etanol ile düzgünce temizlenip kurutma işlemlerinden geçtikten sonra 10^{-4} g hassasiyetindeki terazi ile tartılmıştır (Şekil 6.12). Bu çalışma 14 günlük olup, 2 günde bir temizleme ve kurutma işlemlerinden sonra numunelerin ağırlıkları ölçülmüştür. Böylece borlamanın korozyon üzerine etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



Şekil 6.11: Korozyon ortamı.



Şekil 6.12: Hassas terazi.

Borlanmış numunelerin korozyon hızları denklem 6.2 yardımıyla hesaplanmıştır [72].

$$R_{\text{cor}} = \left(\frac{K}{W}\right) \times (D \times A \times T) \quad (6.2)$$

Burada;

K= Katsayı ($8,76 \times 10^4$)

W= Ağırlık kaybı (gr)

D= Malzeme yoğunluğu (gr/cm^3)

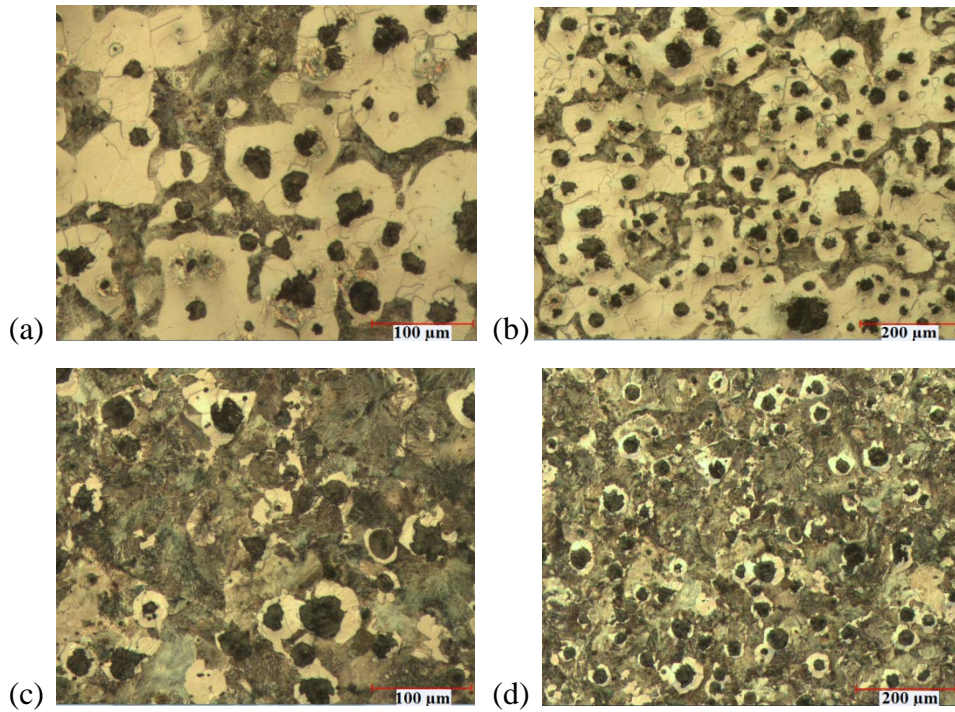
A= Malzemenin yüzey alanı (cm^2)

T= Test süresi (saat)

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

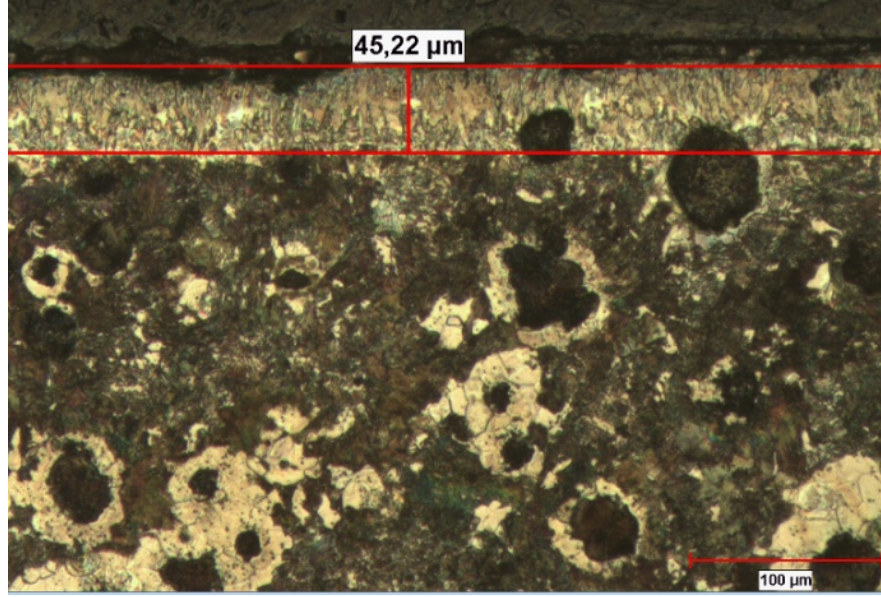
7.1 Mikroyapı Görüntüleme ve Tabaka Kalınlığı Ölçümleri

Ham haldeki KGDD malzemelerin içyapı görüntüleri Şekil 7.1'de 100x ve 200x büyütmelerde verilmiştir. GGG40'ın iç yapısında grafit küreleri, ferritik alanlar ve daha az miktarda perlitik bölgelerin olduğu görülmektedir (Şekil 7.1 a ve b). Cu, Ni ve Mo alaşımlı olan GGG70'in iç yapısında ise grafit küreleri, grafit kürelerini çevreleyen ferrit bölgeleri (bull's eye yapısı) ve geri kalanında daha fazla oranda perlitik bölgeler görülmektedir (Şekil 7.1c ve d). GGG70'in perlitik olmasının sebebi, kimyasal bileşiminde bulunan perlit yapıcı alaşım elemanlarının etkisinden kaynaklandığı söylenebilir.

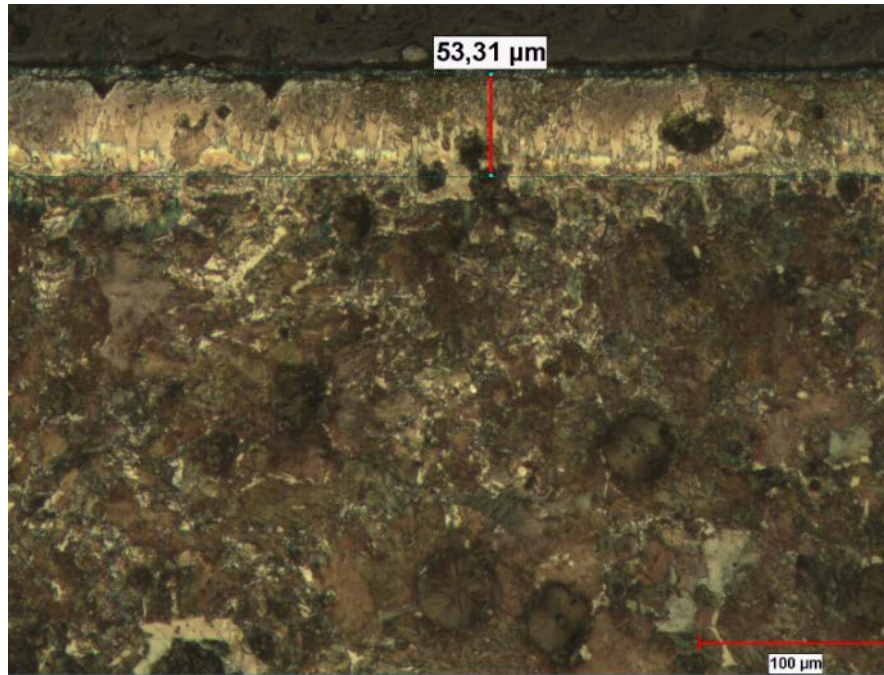


Şekil 7.1: Ham malzemelerin içyapı görüntüleri (a) GGG40-200x, (b) GGG40-100x, (c) GGG70-200x, (d) GGG70-100x.

900 °C’de 2 saat süresince borlanan GGG40 ve GGG70 malzemelerinin optik mikroyapı görüntüleri ve tabaka kalınlıkları sırasıyla Şekil 7.2 ve Şekil 7.3’de verilmiştir.

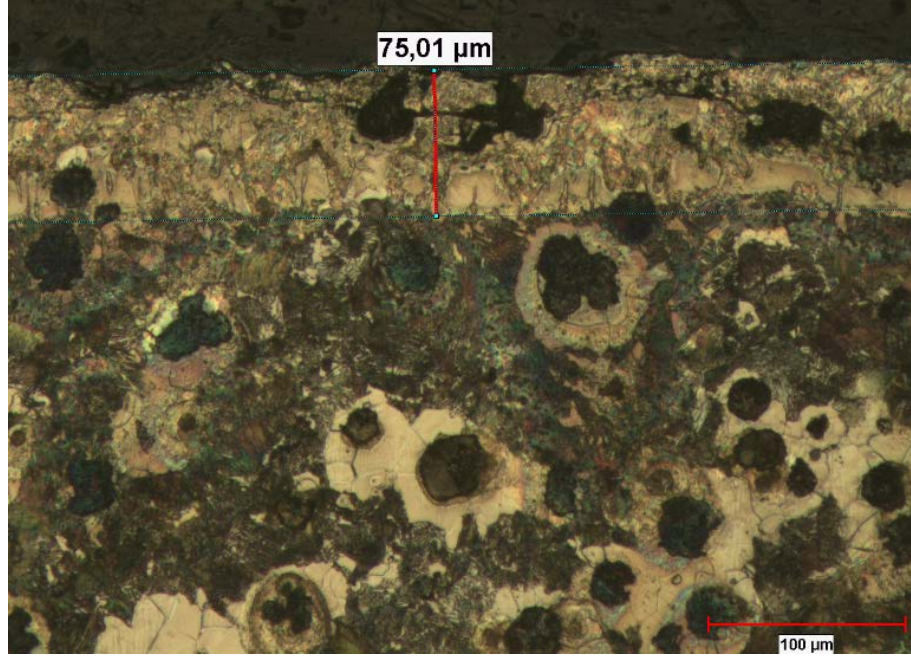


Şekil 7.2: 900°C 2 saat borlanan GGG40 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.

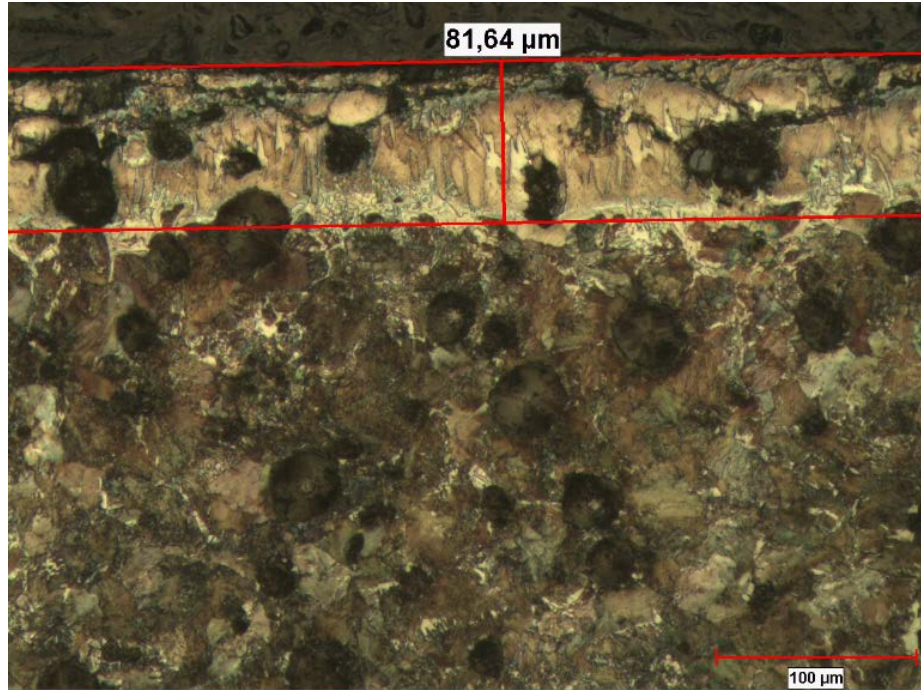


Şekil 7.3: 900°C 2 saat borlanan GGG70 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.

900 °C’de 4 saat süresince borlanan GGG40 ve GGG70 malzemelerin optik mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 7.4 ve Şekil 7.5’de verilmiştir.

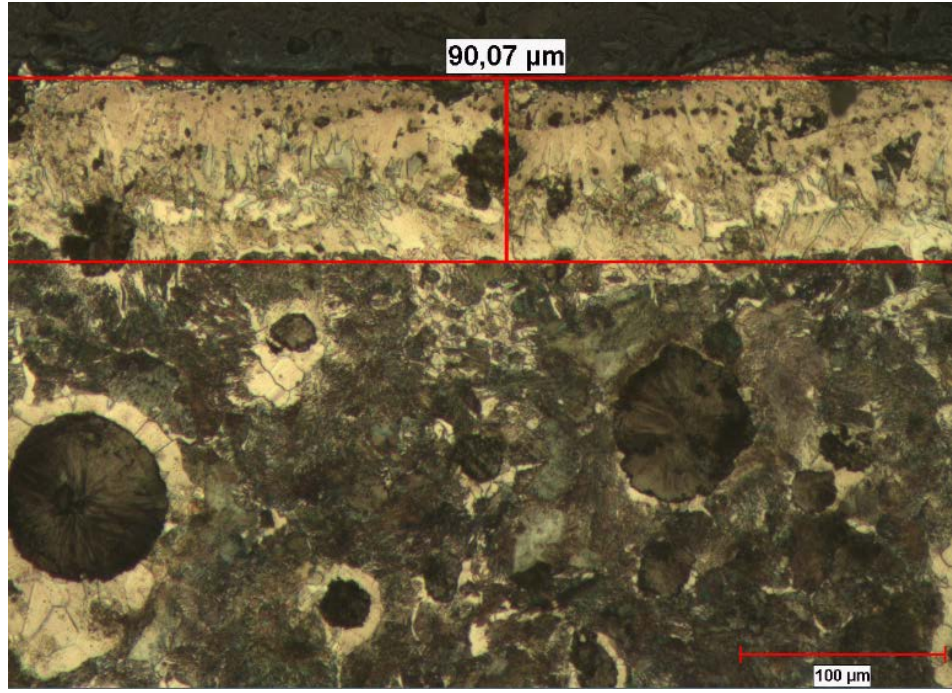


Şekil 7.4: 900°C 4 saat borlanan GGG40 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.

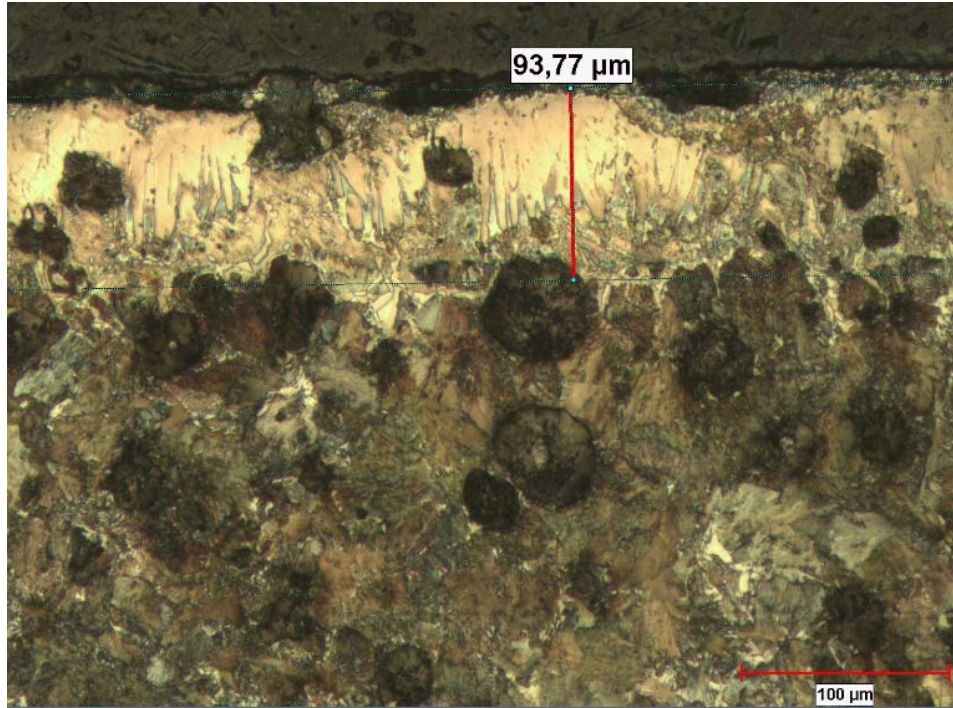


Şekil 7.5: 900°C 4 saat borlanan GGG70 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.

900 °C’de 6 saat süresince borlanan GGG40 ve GGG70 malzemelerin optik mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 7.6 ve Şekil 7.7’de verilmiştir.

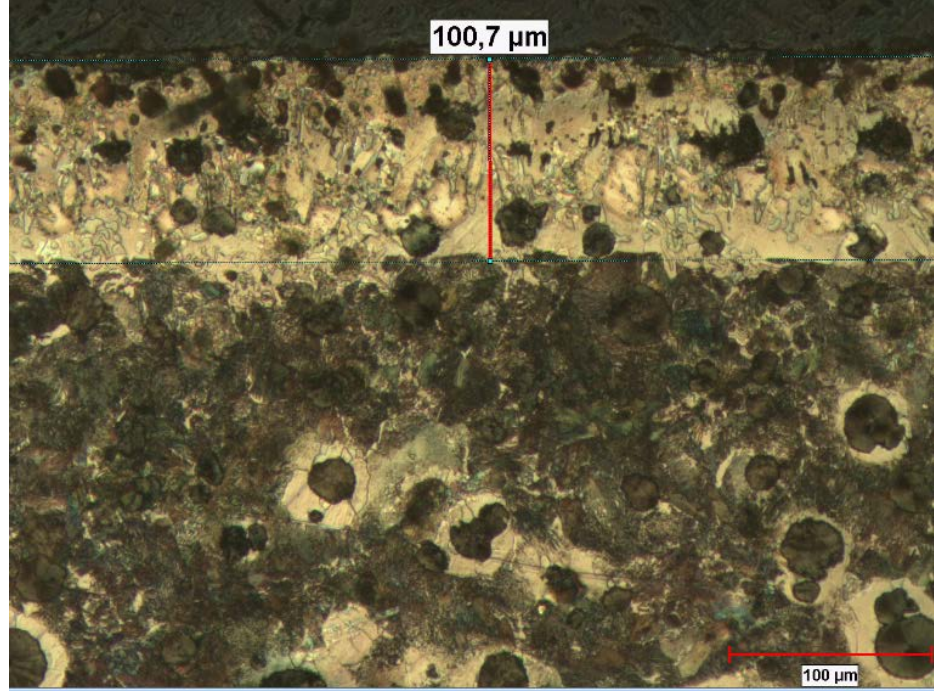


Şekil 7.6: 900°C 6 saat borlanan GGG40 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.

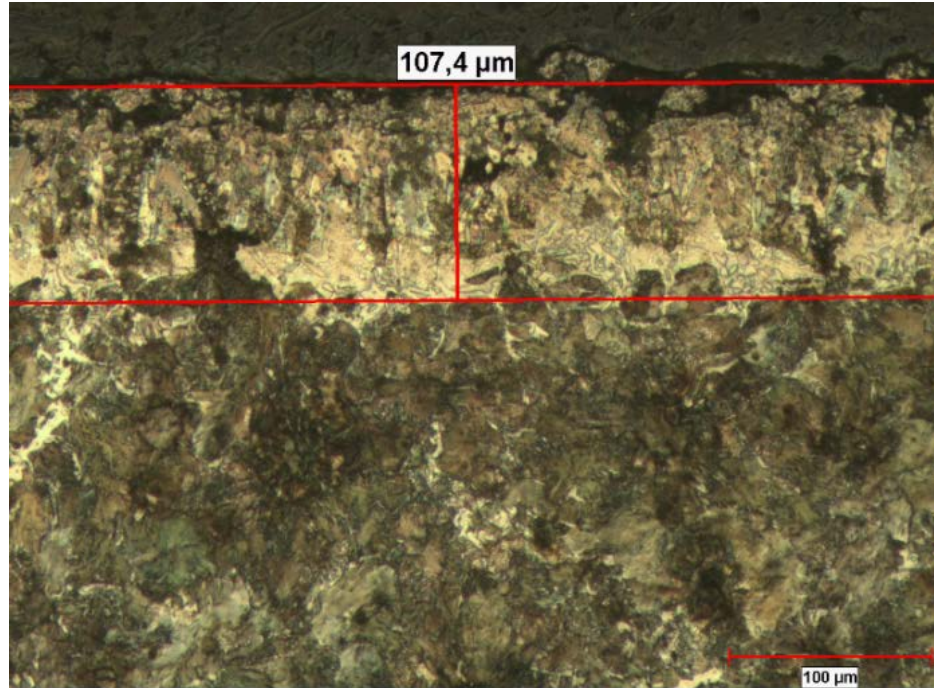


Şekil 7.7: 900°C 6 saat borlanan GGG70 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.

900 °C’de 8 saat süresince borlanan GGG40 ve GGG70 malzemelerin optik mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 7.8 ve Şekil 7.9’da verilmiştir.



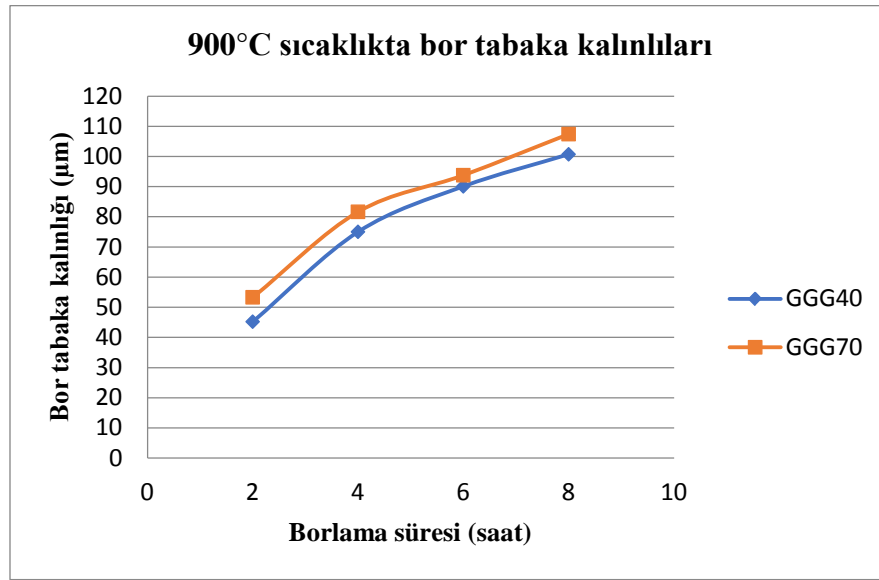
Şekil 7.8: 900°C 8 saat borlanan GGG40 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.



Şekil 7.9: 900°C 8 saat borlanan GGG70 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.

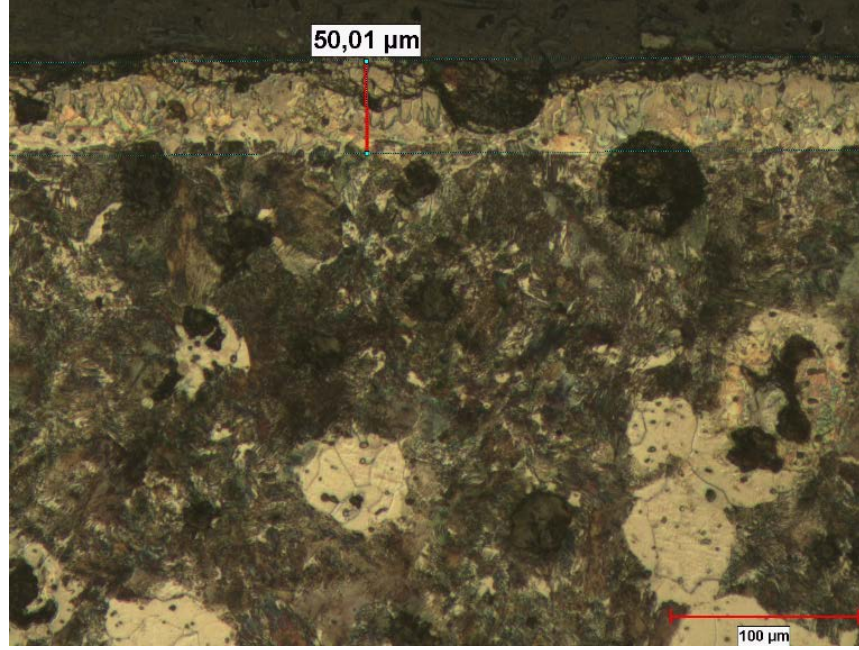
Şekil 7.2- 7.9 arası incelendiğinde, 900°C’de 2 ile 8 saat arasında borlama işlemiyle GGG 40 ve GGG 70 numune yüzeylerinin her ikisinde de bor tabaka kalınlıklarının borlama süresi ile birlikte arttığı gözlenmiştir. Bu sonuç literatür ile uygunluk göstermektedir. [74]

900°C’de borlama süresi ile meydana gelen tabaka kalınlıklarındaki bu artış her iki dökme demir için Şekil 7.10’da verilmiştir. 2 ve 8 saat arasında meydana gelen artış oranları GGG 40 ve GGG 70 için sırasıyla %122 ve %101 olarak bulunmuştur. Ayrıca 900°C’de aynı borlama sürelerinde GGG70’te elde edilen bor tabaka kalınlıklarının biraz daha fazla olduğu görülmüştür.

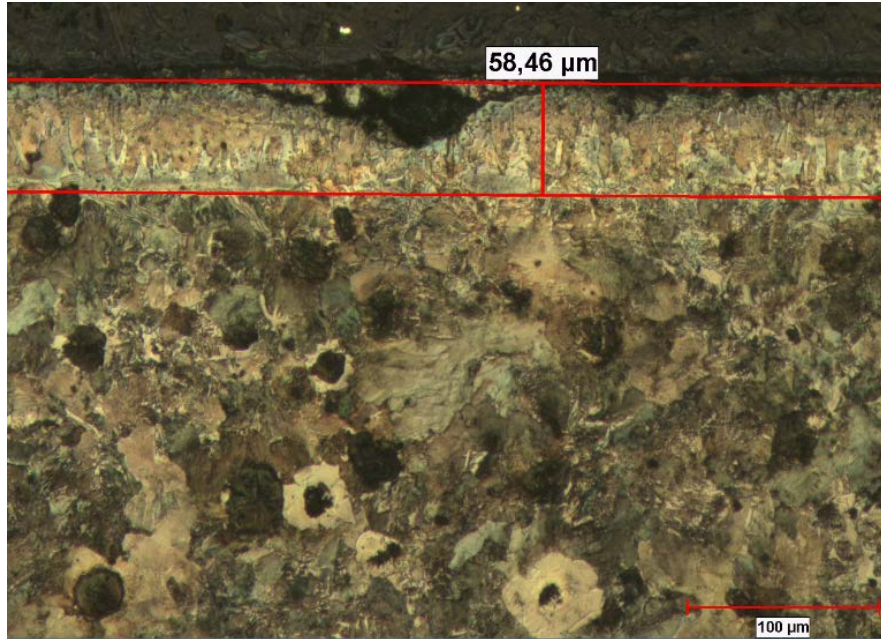


Şekil 7.10: 900°C’de borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlıkları.

950 °C’de 2 saat süresince GGG40 ve GGG70 borlanan malzemelerin optik mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 7.11 ve Şekil 7.12’de verilmiştir.

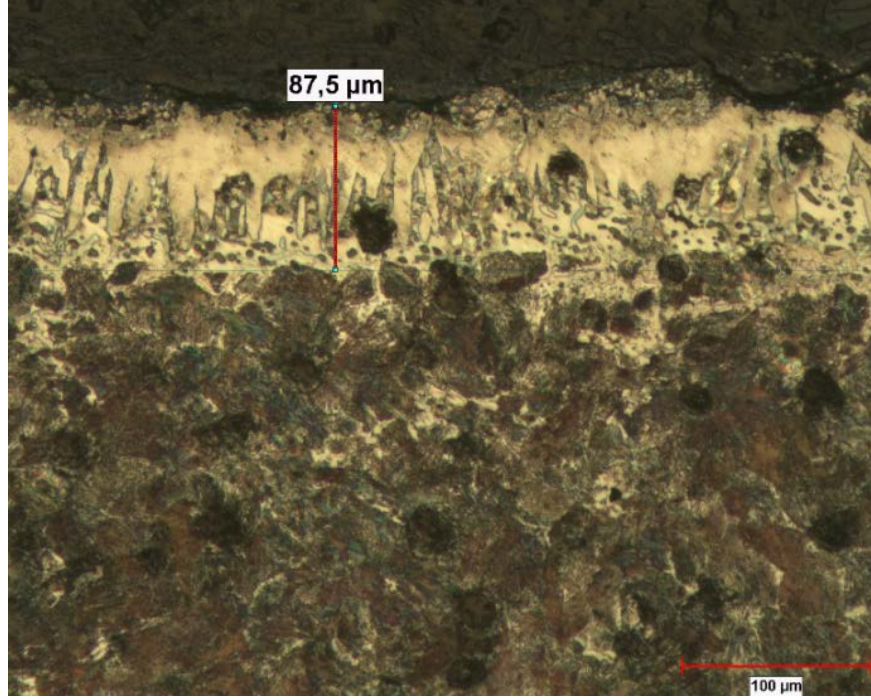


Şekil 7.11: 950°C 2 saat borlanan GGG40 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.

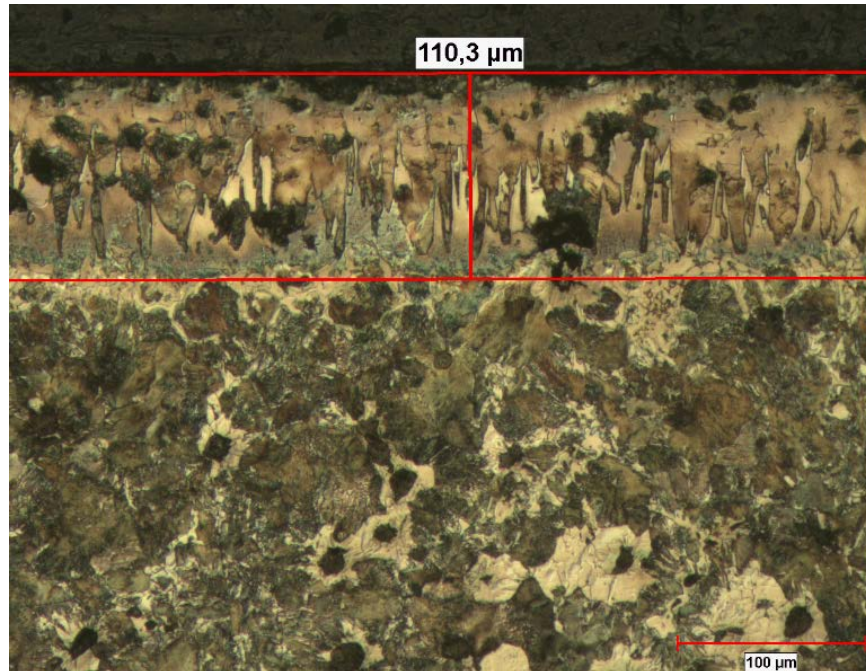


Şekil 7.12: 950°C 2 saat borlanan GGG70 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.

950 °C’de 4 saat süresince borlanan GGG40 ve GGG70 malzemelerin optik mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 7.13 ve Şekil 7.14’de verilmiştir.

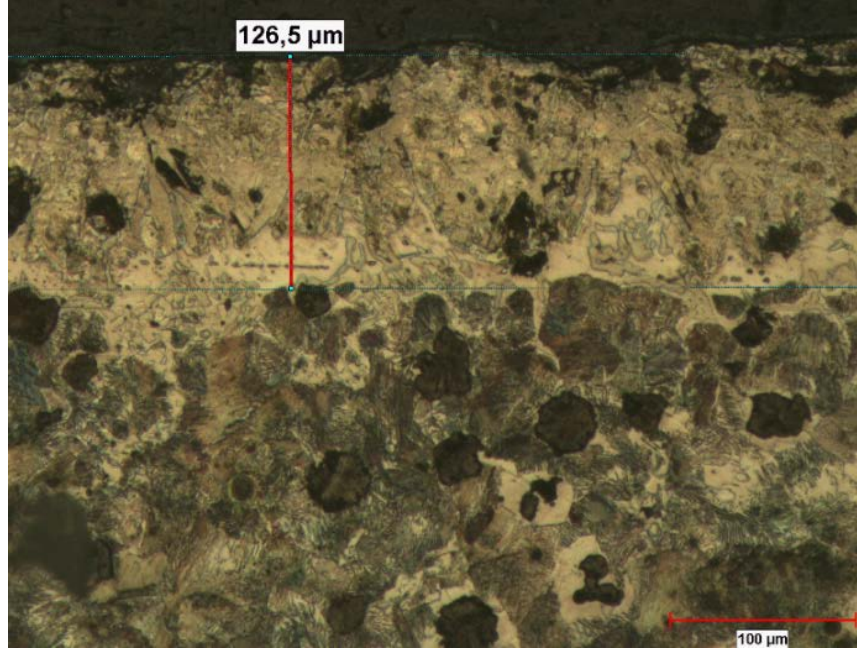


Şekil 7.13: 950°C 4 saat borlanan GGG40 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.

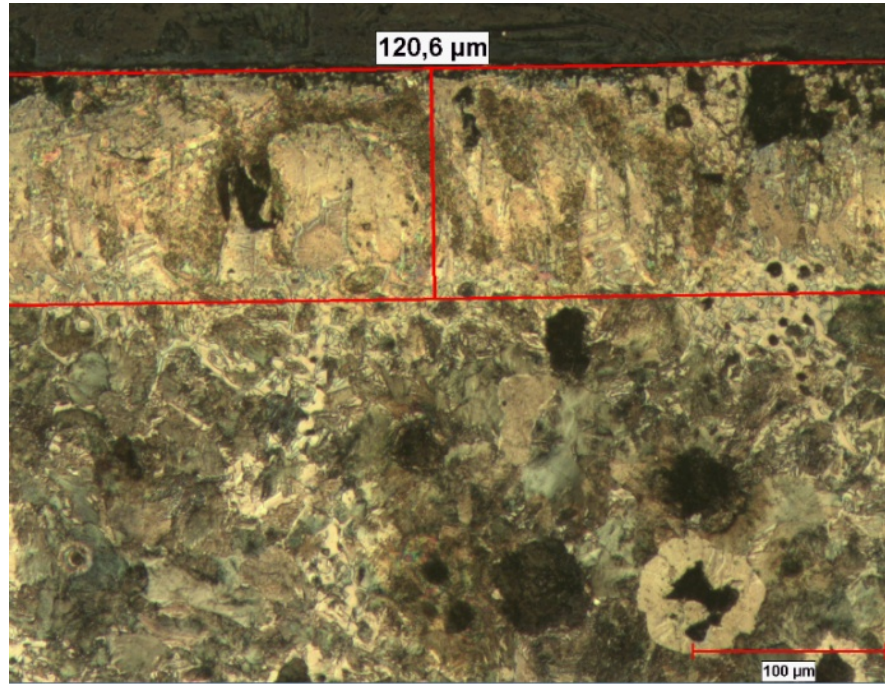


Şekil 7.14: 950°C 4 saat borlanan GGG70 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.

950 °C’de 6 saat süresince borlanan GGG40 ve GGG70 malzemelerin optik mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 7.15 ve Şekil 7.16’de verilmiştir.

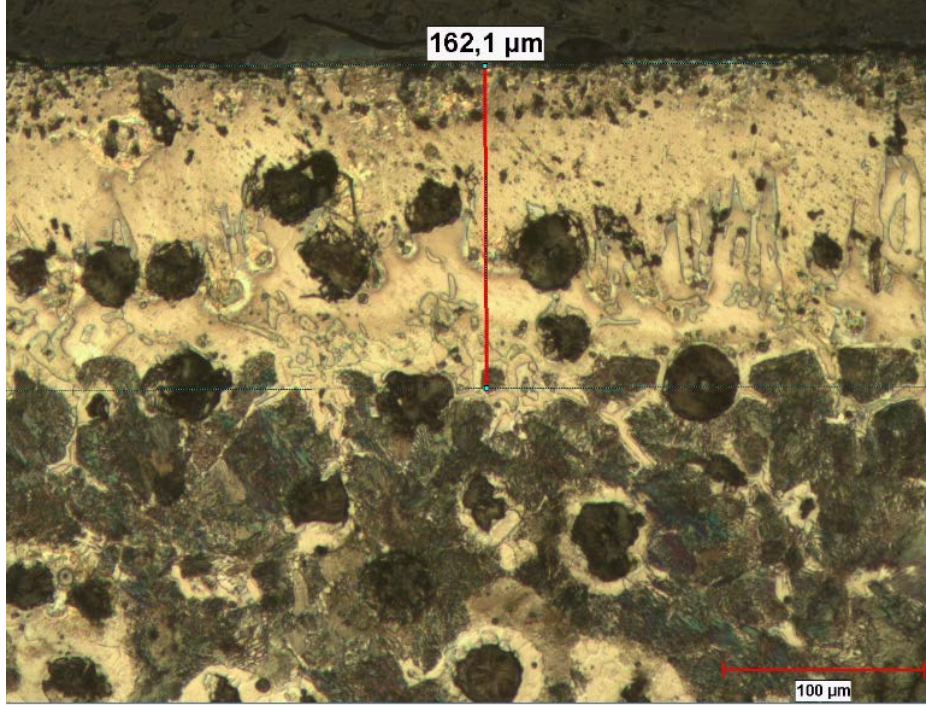


Şekil 7.15: 950°C 6 saat borlanan GGG40 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.

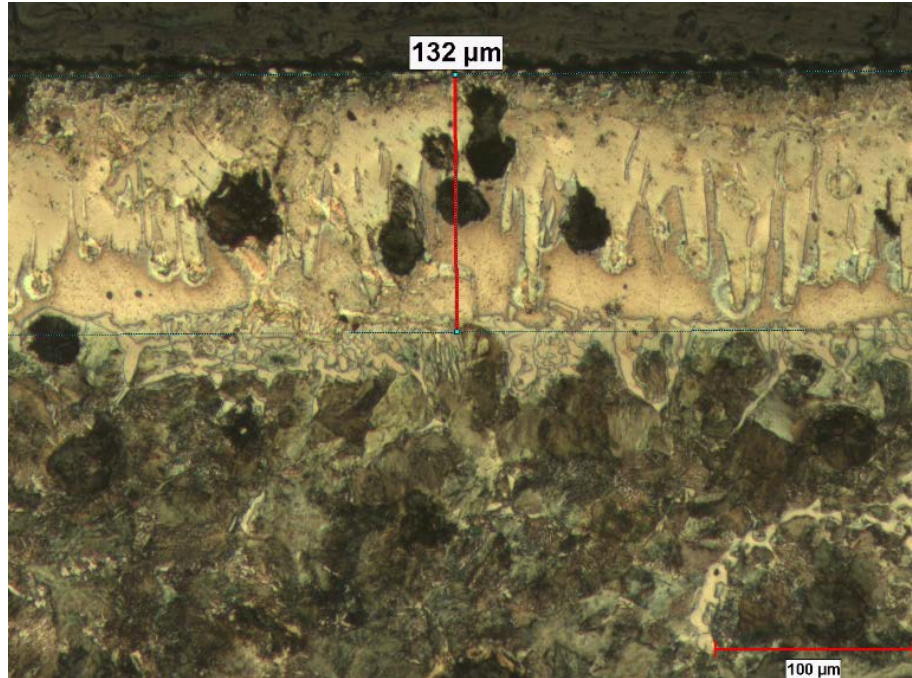


Şekil 7.16: 950°C 6 saat borlanan GGG70 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.

950 °C’de 8 saat süresince borlanan GGG40 ve GGG70 malzemelerin optik mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 7.17 ve Şekil 7.18’de verilmiştir.

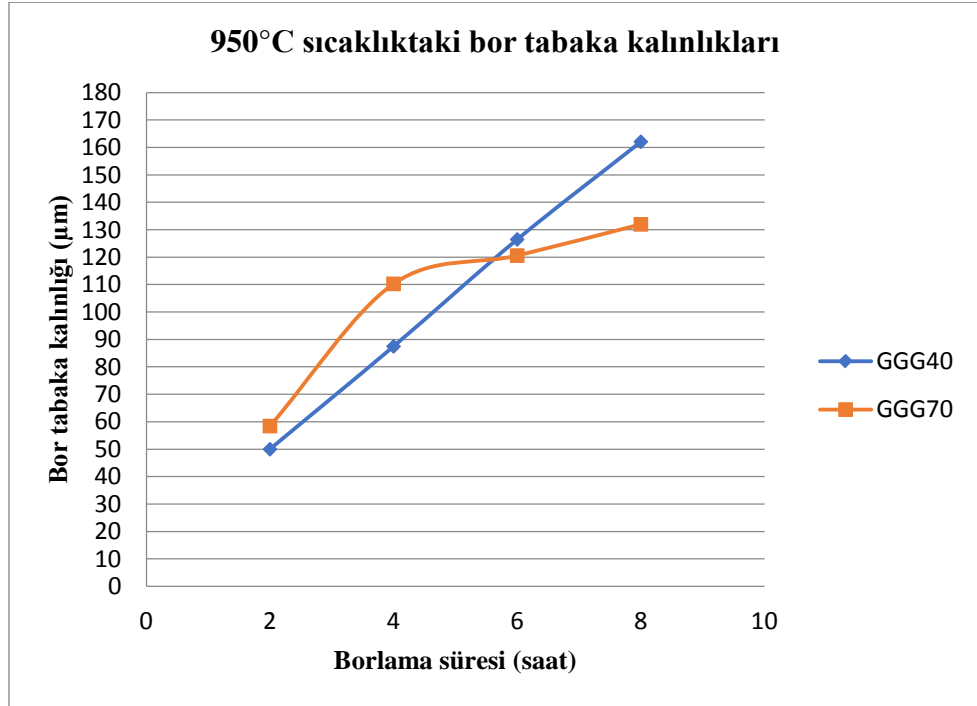


Şekil 7.17: 950°C 8 saat borlanan GGG40 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.



Şekil 7.18: 950°C 8 saat borlanan GGG70 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.

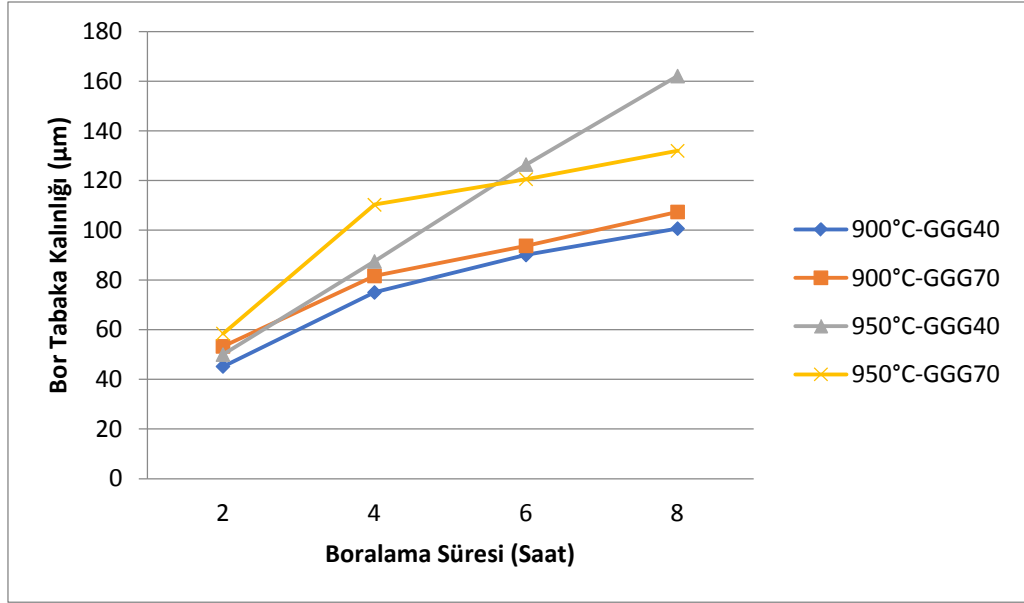
950°C’de 2-8 saat aralıklarında yapılan borlama işlemlerinde de 900°C’de olduğu gibi borlama süresi ile birlikte her iki dökme demir yüzeyinde bor tabaka kalınlıklarının arttığı görülmüştür (Şekil 7.11-7.18). 950°C’de bor tabaka kalınlıklarının artış oranları GGG 40 ve GGG 70 için sırasıyla %224 ve %127 olarak belirlenmiştir. 950°C’de borlama süresine bağlı olarak bor tabaka kalınlıklarının değişiminin verildiği Şekil 7.19’den da görüldüğü gibi borlama süresi ile GGG 40 malzemede tabaka kalınlığının artış oranı daha fazladır. Bunun sebebi GGG70’te bulunan alaşım elementlerinin (Cu, Ni, Mo) bu sıcaklıkta difüzyonu yavaşlatıcı etkisi olabilir.



Şekil 7.19: 950°C’de borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlıkları.

Şekil 7.10 ve Şekil 7.19 birlikte incelendiğinde 900°C’de tüm borlama zamanlarında GGG70’te daha kalın bor tabakaları oluştuğu gözlenirken, 950°C’de sadece uzun borlama sürelerinde (6 ve 8 saat) GGG40’ta bor tabaka kalınlıklarının daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, etkili difüzyon şartlarında (yüksek sıcaklık ve süre) GGG70’de bulunan alaşım elementlerinin daha fazla hareketlenerek B arayer elementi difüzyonuna engel olabileceği söylenebilir. Diğer bir deyişle, düşük difüzyon şartlarında B arayer elementinin yayımının daha kolay olduğu söylenebilir.

Yapılan borlama işleminde borlama sıcaklığının bor tabakası kalınlığına etkisini daha net görebilmek için Şekil 7.20 verilmiştir.

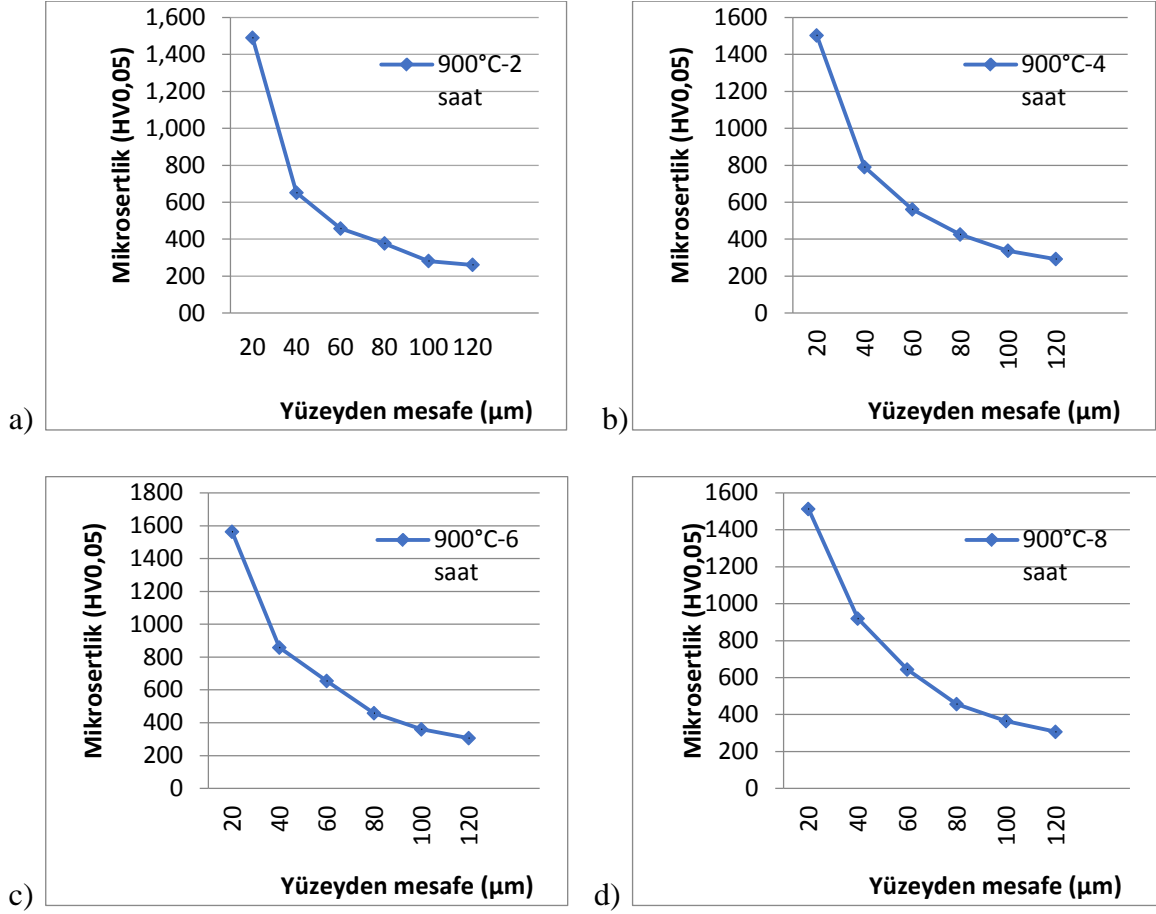


Şekil 7.20: Borlama sıcaklığının borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlıkları.

Sonuçlara göre tüm numunelerde borlama süresi ve sıcaklık arttıkça bor tabaka kalınlıklarında artış görülmektedir. Bunun yanısıra genel olarak bakıldığında iki sıcaklıkta da çalışan GGG70 malzemesinin, GGG40 malzemesine göre daha fazla bor tabaka kalınlığına sahip olduğu görülmektedir.

7.2 Mikro Sertlik İnceleme Sonuçları

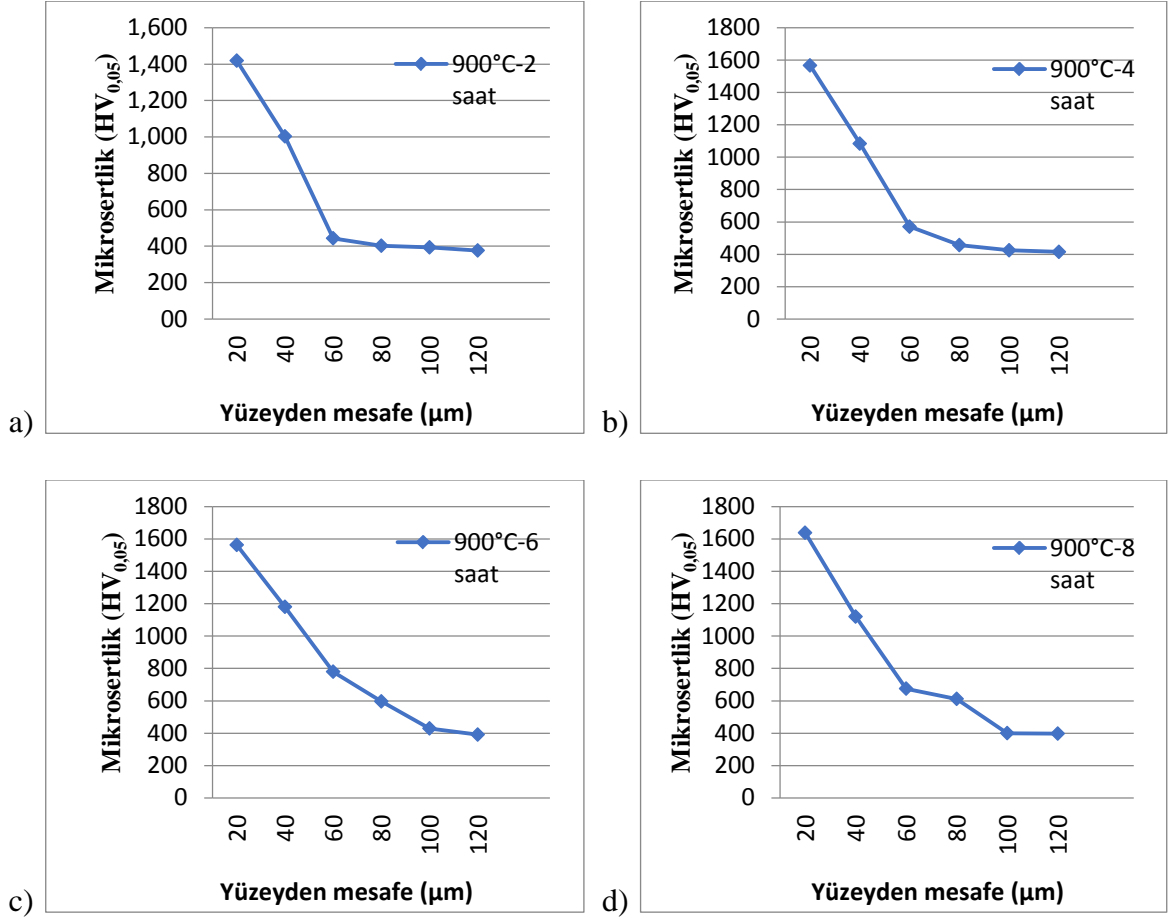
900 °C'de 2-8 saat sürelerinde yapılan borlama işlemleri ile GGG 40 numunelerin yüzeyden iç kısımlara doğru elde edilen sertlik dağılımları Şekil 7.21'de verilmiştir. Beklenildiği üzere iç kısımlara doğru gidildikçe sertliğin azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi, iç kısımlara doğru difüze olan B atomlarının daha az olması ve bor bileşiklerinin daha az olmasıdır. 900 °C'de borlama işlemi ile GGG 40 dökme demirin yüzey sertliğinde ham halinin sertliğine nazaran 6 kat civarında artış olduğu gözlenmiştir.



Şekil 7.21: 900°C’de borlanan GGG40 numunelerinin sertlik dağılımları

a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat d) 8 saat .

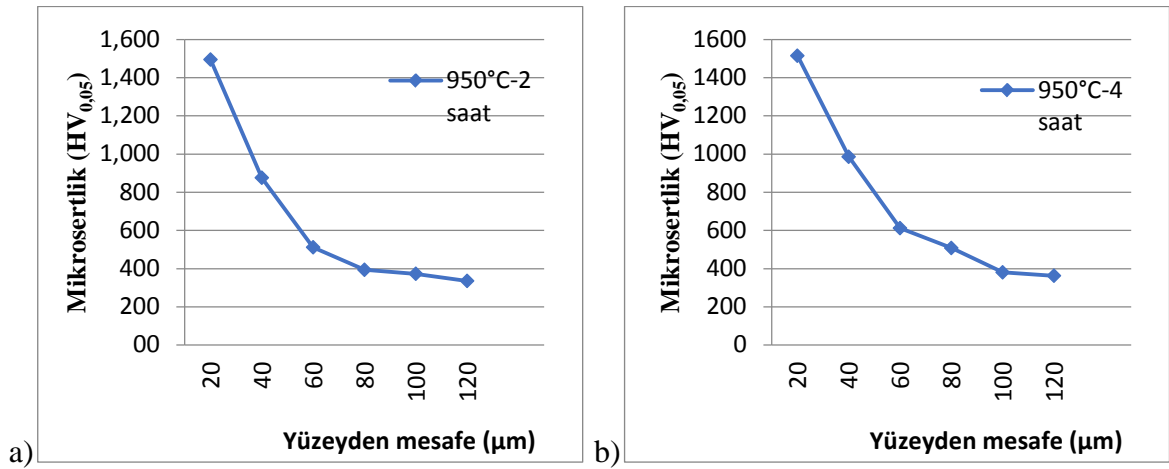
GGG 70 dökme demirlerin 900°C’de 2-8 saat arasında borlanması ile elde edilen, yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımları Şekil 7.22’de verilmiştir. Bu dökme demirde de GGG 40 dökme demirinde olduğu gibi iç kısımlara doğru sertlik değerlerinin azaldığı görülmüştür. 900°C’de borlama işlemi ile GGG 70’in sertliğinde yaklaşık olarak 5 kat artış elde edilmiştir [73].

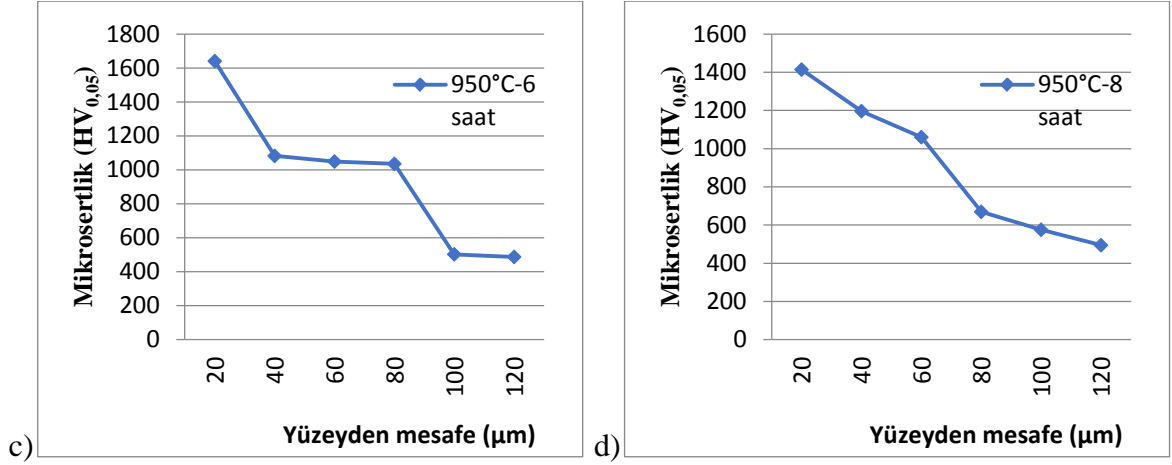


Şekil 7.22: 900°C’de borlanan GGG70 numunelerin sertlik dağılımları

a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat d) 8 saat .

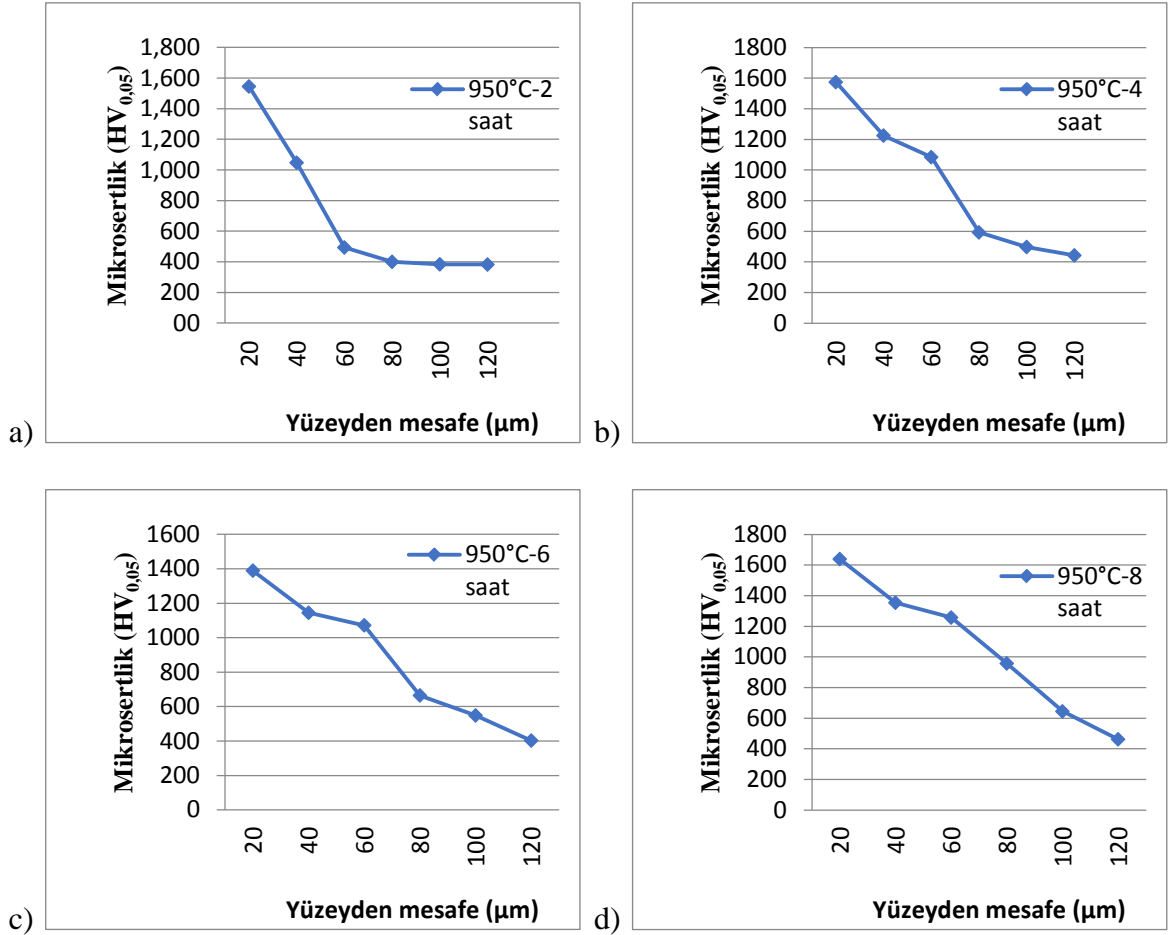
950°C’de 2-8 saat aralığında borlanmış GGG 40 ve GGG 70 dökme demirlerin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımları Şekil 7.23 ve Şekil 7.24’te verilmiştir.





Şekil 7.23: 950°C’de borlanan GGG40 numunelerin sertlik dağılımları

a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat d) 8 saat .



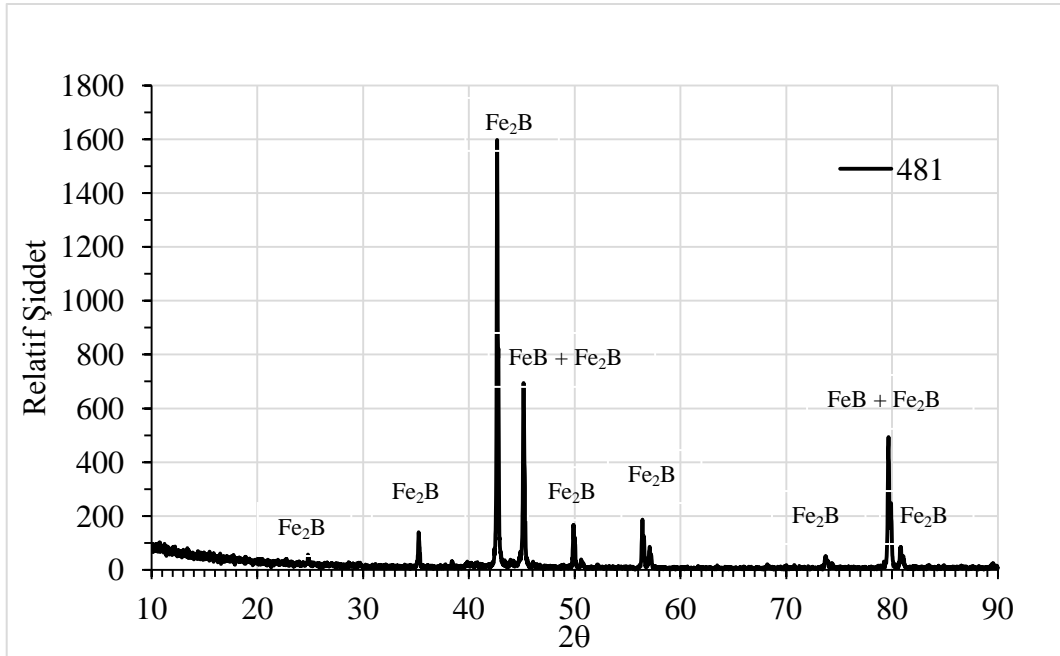
Şekil 7.24: 950°C’de borlanan GGG70 numunelerin sertlik dağılımları

a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat d) 8 saat .

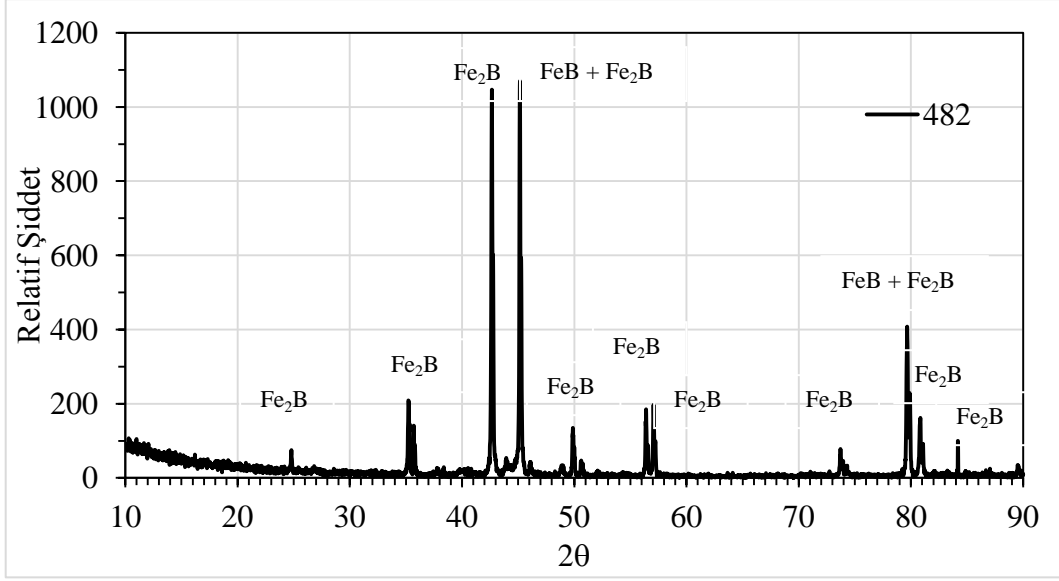
Şekil 7.21 – 7.24 arası toplu halde değerlendirildiğinde, her iki borlama sıcaklığında da genel olarak borlama süresi arttıkça yüzeyden içeriye doğru ölçülen sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir. Borlama işlemi ile 2 ve 8 saat borlama sürelerinde en fazla sertlik dağılım değişimi GGG 70 dökme demirin 950°C’de borlanması ile elde edilmiştir. Tüm borlama şartları birlikte değerlendirildiğinde borlama işlemleri ile GGG40 malzemede en düşük 5,45 ve en yüksek 6,69 kat aralığında yüzeyde sertlik artışı gözlenirken, bu değerler GGG70 için sırasıyla 4,29 -5,35 kat aralığında elde edilmiştir. GGG40’ta sertlik artış oranları daha yüksek bulunmuştur.

7.3 XRD İnceleme Sonuçları

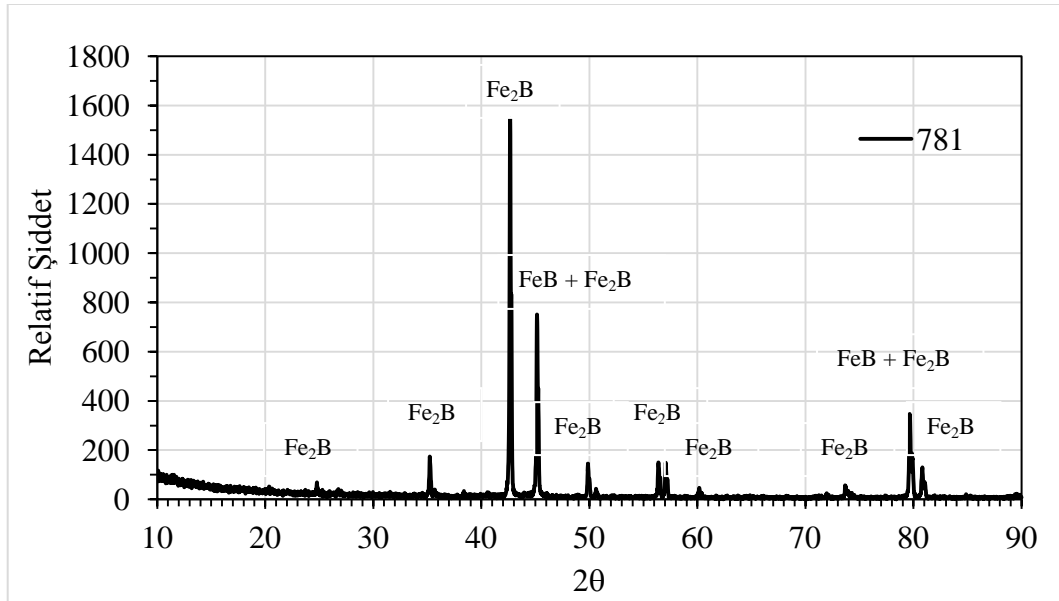
900°C ve 950°C sıcaklıklarda 8 saat borlanmış GGG 40 ve GGG 70 malzemelerin (418, 428, 718 ve 728) ve 950°C sıcaklıkta 6 saat borlanmış GGG70 malzemesinin (726) XRD analizlerine ait grafikleri Şekil 7.25-7.29 arasında verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere borlanan yüzeylerde çoğunlukla Fe₂B fazı olmak üzere FeB ve Fe₂B’den oluşan iki bileşikli yapılar oluşmuştur. Bor tabakası morfolojisinin testere dişi formunda oluştuğu gözlenmiştir.



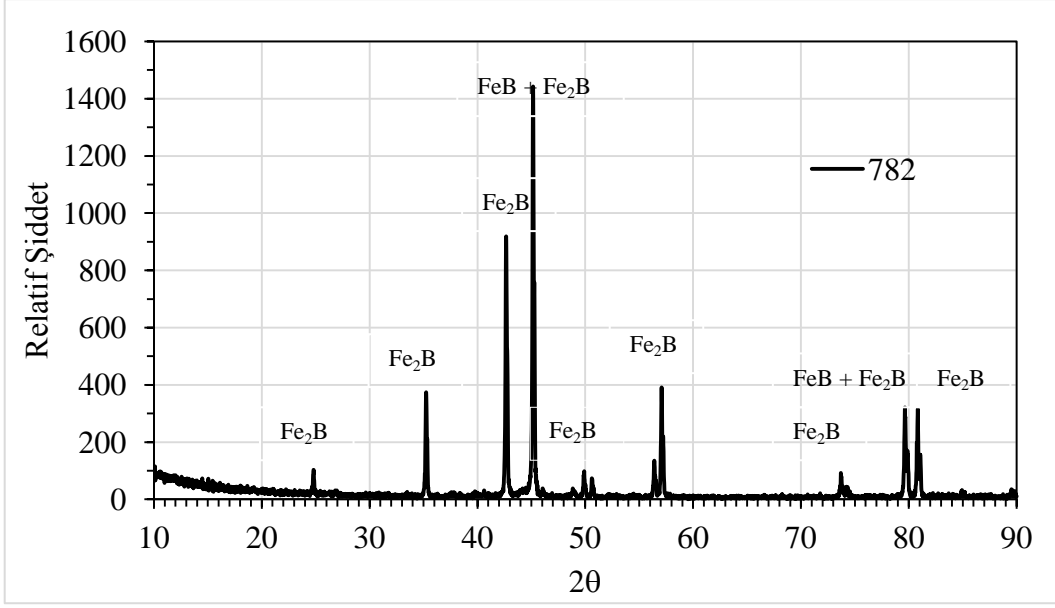
Şekil 7.25: 900°C- 8 saat borlanan GGG40 malzemesinin XRD analiz grafiği.



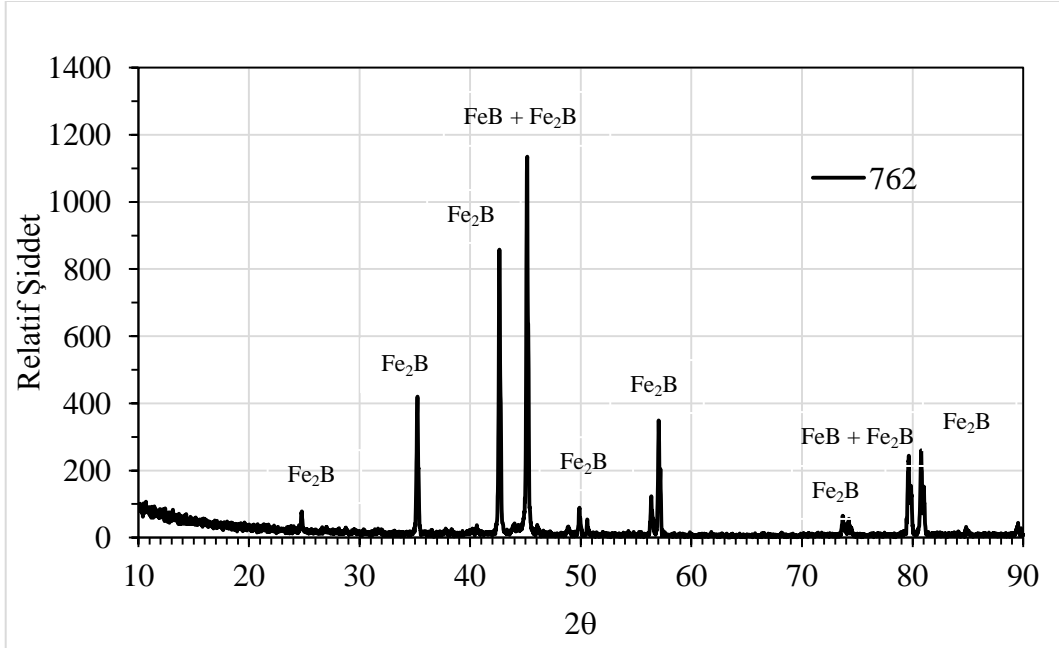
Şekil 7.26: 950°C- 8 saat borlanan GGG40 malzemesinin XRD analiz grafiği.



Şekil 7.27: 900°C- 8 saat borlanan GGG70 malzemesinin XRD analiz grafiği.



Şekil 7.28: 950°C- 8 saat borlanan GGG70 malzemesinin XRD analiz grafiği.

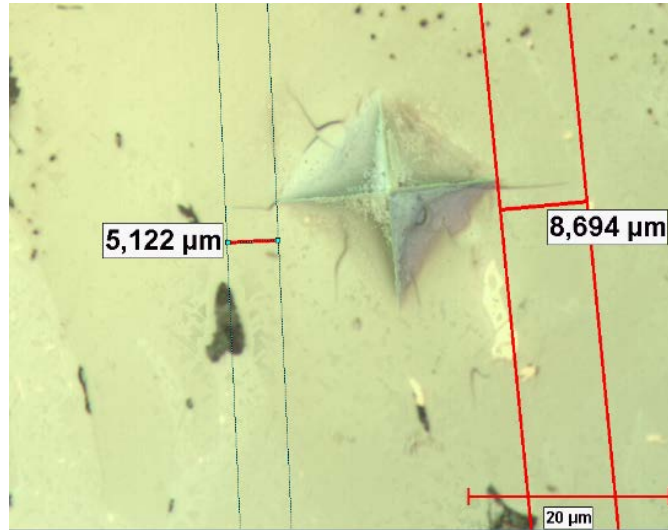


Şekil 7.29: 950°C- 6 saat borlanan GGG70 malzemesinin XRD analiz grafiği.

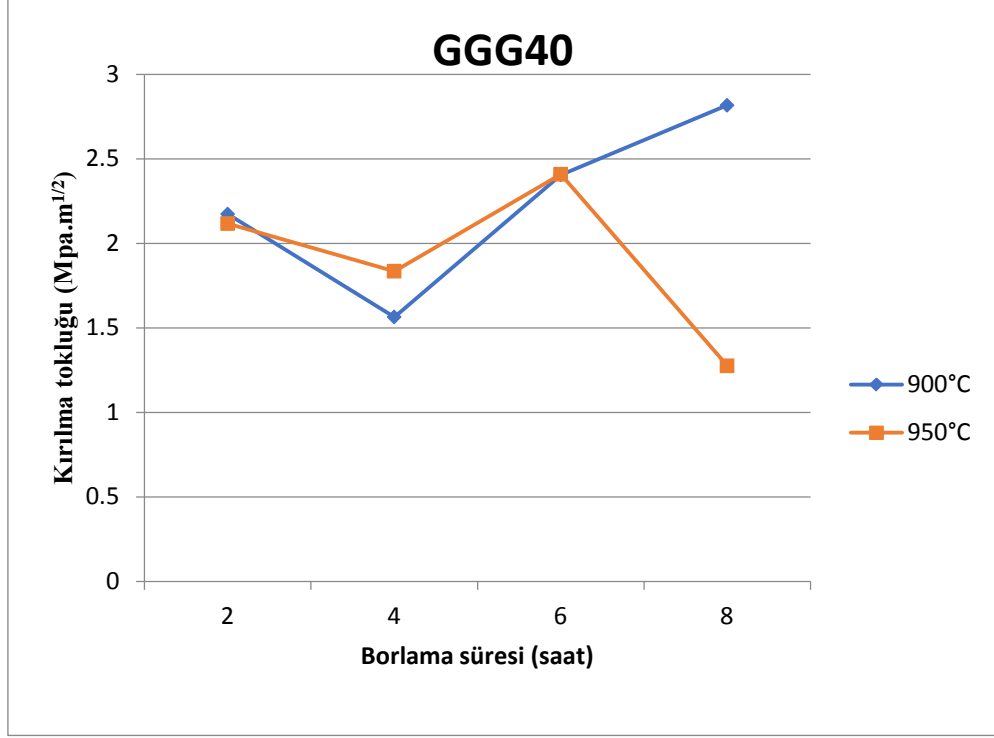
7.4 Kırılma Tokluğu Sonuçları

Yüzeyleri borlanan numunelerin kırılma tokluklarının hesabı denklem 6.1'de verilen bağıntı kullanılarak yapılmıştır. Literatür incelendiğinde yüzeyi borlanmış ve seramik hacimli sert yüzeylerin Vickers yöntemi ile kırılma tokluklarının hesabında pek çok bağıntıya rastlanmıştır. Toktaş, KGDD'in borlanmış yüzeylerinde Vickers yöntemi ile birkaç bağıntıya göre hesap yapmış ve denklem 6.1'in literatürle uygun sonuçlar alınan bağıntılar arasında olduğu sonucunu bulmuştur [71]. Bu nedenle bu çalışmada kırılma tokluklarının hesabında bahsi geçen denklem kullanılmıştır.

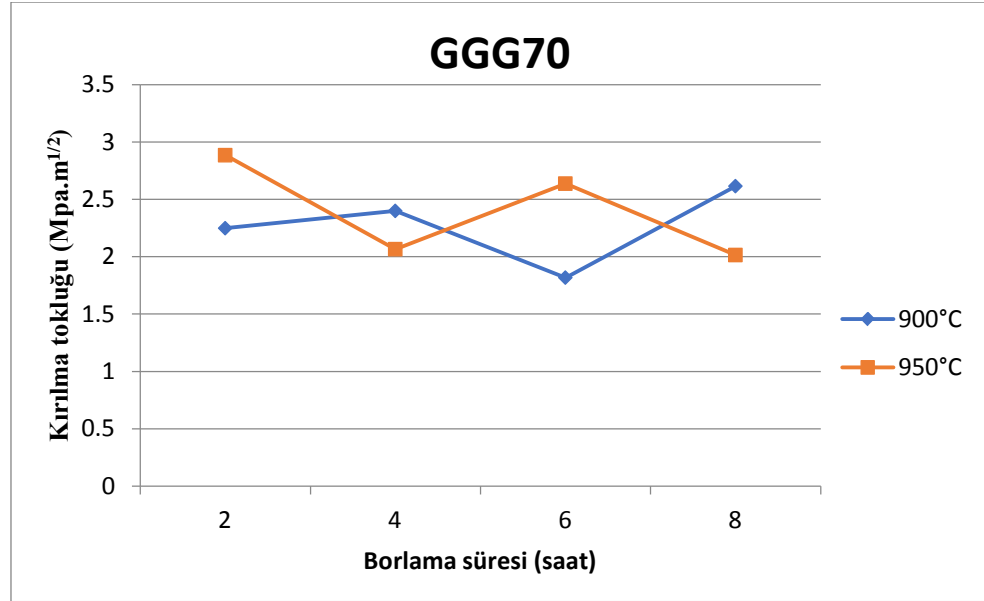
Vickers yöntemiyle 718 nolu numune yüzeyinde meydana getirilen çatlaklara bir örnek Şekil 7.30' da verilmiştir. Borlama süre ve sıcaklığına bağlı olarak kırılma tokluklarının değişimleri GGG 40 ve GGG 70 için sırasıyla Şekil 7.31 ve Şekil 7.32'de verilmiştir.



Şekil 7.30: Vickers yöntemiyle 718 nolu numunede oluşan çatlaklar.



Şekil 7.31: Yüzeyleri borlanmış GGG40 numunelerin kırılma toklukları.



Şekil 7.32: Yüzeyleri borlanmış GGG70 numunelerin kırılma toklukları.

Kırılma tokluğu grafikleri incelendiğinde, elde edilen kırılma tokluk değerlerinin literatürde, borlanmış KGDD için verilen değerlerle uygunluk gösterdiği gözlenmiştir [61].

Borlama süresi ile birlikte her iki dökme demirin kırılma toklukları dalgalı değişimler göstermiştir. Bununla birlikte, her iki grafikte de 900°C’de 2 ve 8 saat borlanan dökme demirlerin kırılma toklukları karşılaştırıldığında 8 saatte artış, 950°C’de aynı karşılaştırma yapıldığında ise tokluk değerlerinde azalma olduğu gözlenmiştir.

7.5 Korozyon Direnci İnceleme Sonuçları

Tablo 7.1' de GGG40 ve GGG70 malzemelerinin hem formik hem nitrik asit çözeltisi içerisindeki korozyon çalışmasının sonucunda oluşan % kütle kayıpları verilmiştir.

Tablo 7.1: Tüm malzemelerin kütle kayıpları (%).

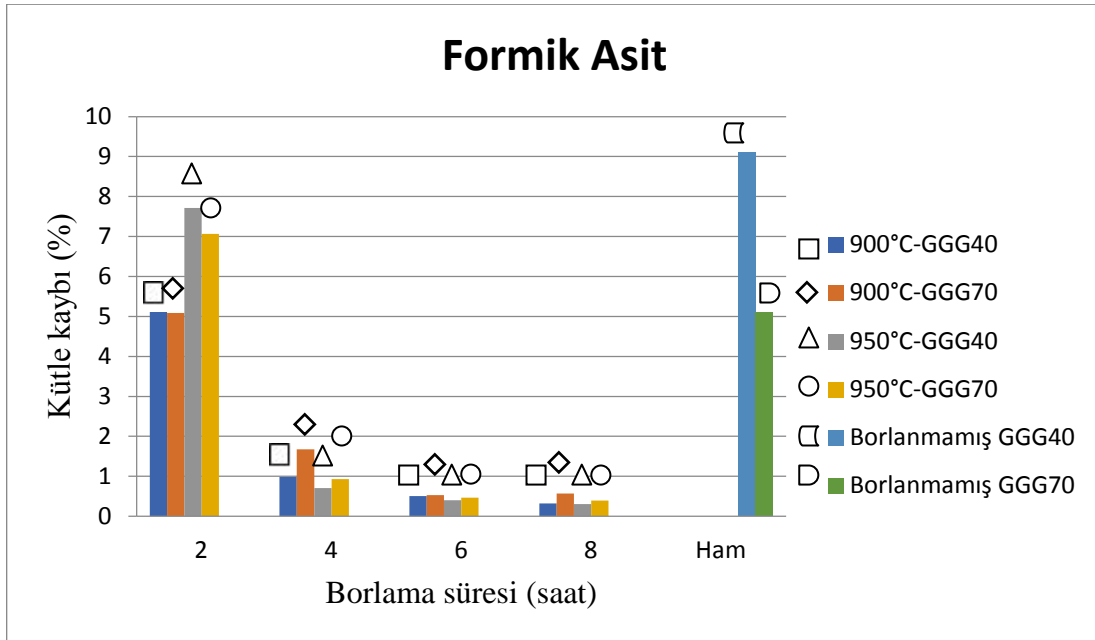
Sıcaklık/Süre	Formik Asit		Nitrik Asit	
	GGG40	GGG70	GGG40	GGG70
900°C-2 saat	5,110264	5,088864	22,17139	19,11256
900°C-4 saat	0,983315	1,675789	23,95745	19,08067
900°C-6 saat	0,509289	0,531087	20,6809	23,49272
900°C-8 saat	0,320691	0,571748	24,35165	26,55446
950°C-2 saat	7,712157	7,068423	18,7368	15,37859
950°C-4 saat	0,709548	0,929453	23,90028	24,87966
950°C-6 saat	0,403234	0,466331	14,43009	19,54778
950°C-8 saat	0,302360	0,391582	21,70826	17,15049
Borlanmamış	9,101791	5,096797	33,12053	17,99643

Yüzeyleri borlanan KGDD’lerin formik asit içerisinde korozyona uğraması sonucunda ölçülen kütle kayıpları ile borlama süreleri arasındaki ilişki Şekil 7.33’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde 2 saat borlamada diğer borlama sürelerine göre kütle kayıplarında belirgin bir artış olduğu gözlenmiştir. Borlama süresi arttıkça kütle kayıplarında azalmalar gözlenmiştir. 2 ve 4 saat borlama süreleri arasında kütle kayıplarında belirgin bir azalma gözlenmiştir. Bunun nedeninin her iki dökme demirde de 2 saat borlama süresinde bor tabaka kalınlığının az olması ve ince bor tabakasının asit ortamına daha az direnç göstermesi olduğu söylenebilir.

Borlama sıcaklığının kütle kayıplarına etkisi incelendiğinde 2 saat borlanan dökme demirler hariç 950°C’de borlanan dökme demirlerde kütle kayıplarının 900°C’dekilere nazaran daha düşük olduğu bulunmuştur. Borlama süresi arttıkça, 950°C ve 900°C’de borlanan dökme demirlerin kütle kayıpları arasındaki değişimin azaldığı gözlenmiştir (Şekil 7.33).

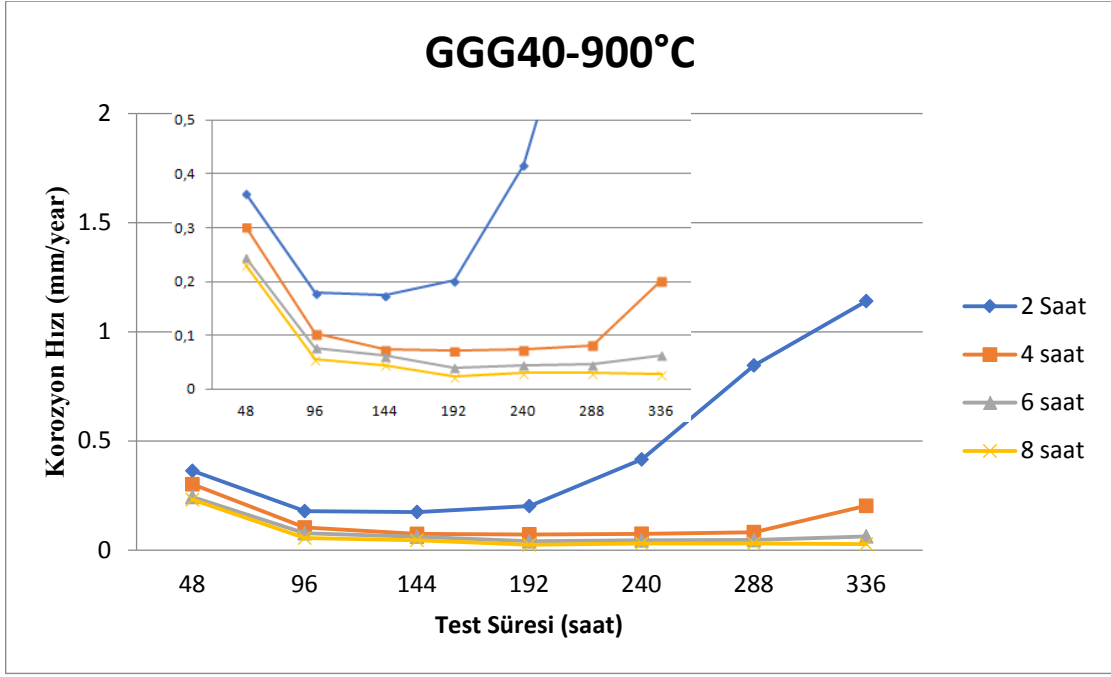
Formik asit içinde 14 gün sonunda en az kütle kaybı GGG 40'ın 950°C'de 8 saat süre borlandığı dökme demirde % 0,30236 olarak ölçülmüştür. En fazla kütle kaybı da yine aynı dökme demirin 950°C'de 2 saat borlandığı numunede % 7,712157 olarak bulunmuştur. Borlama süresi 8 saat olduğunda kütle kaybında yaklaşık 25,5 kat azalma meydana gelmiştir. Bu sonuç, borlama süresinin kütle kaybına etkisinin önemini göstermektedir.

2 saat borlama süresinde işlem gören numuneler hariç, aynı borlama şartlarında (borlama sıcaklığı ve süresinde) Cu, Ni ve Mo alaşımlı GGG 70 dökme demirinde alaşımsız olana (GGG 40) nazaran daha fazla kütle kayıplarının olduğu gözlenmiştir. Bu sonucun, ham haldeki dökme demirler arasında geçerli olmadığı görülmektedir. Tam tersine ham haldeki GGG 40 dökme demiri formik asidi çözeltisinde daha fazla kütle kaybı vermiştir.

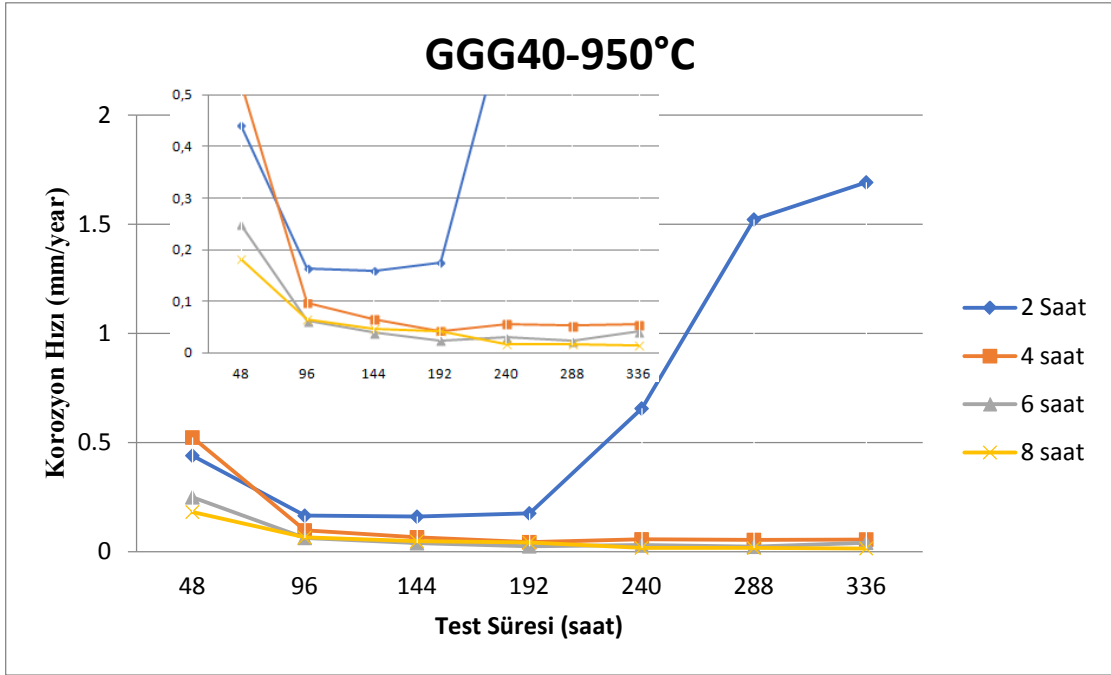


Şekil 7.33: Borlanmış ve borlanmamış numunelerin formik asitte oluşan kütle kayıpları (%).

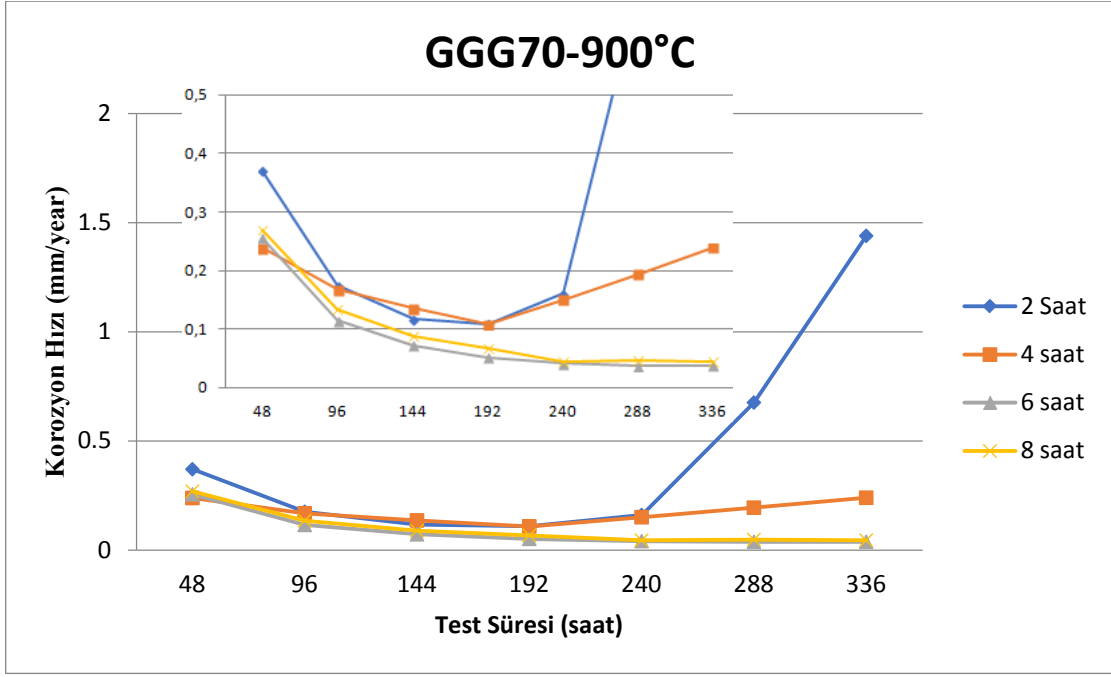
Denklem 6.2 yardımıyla kütle kayıplarına istinaden borlama süresine bağlı olarak korozyon hızları Şekil 7.34 -7.37 arasında verilmiştir.



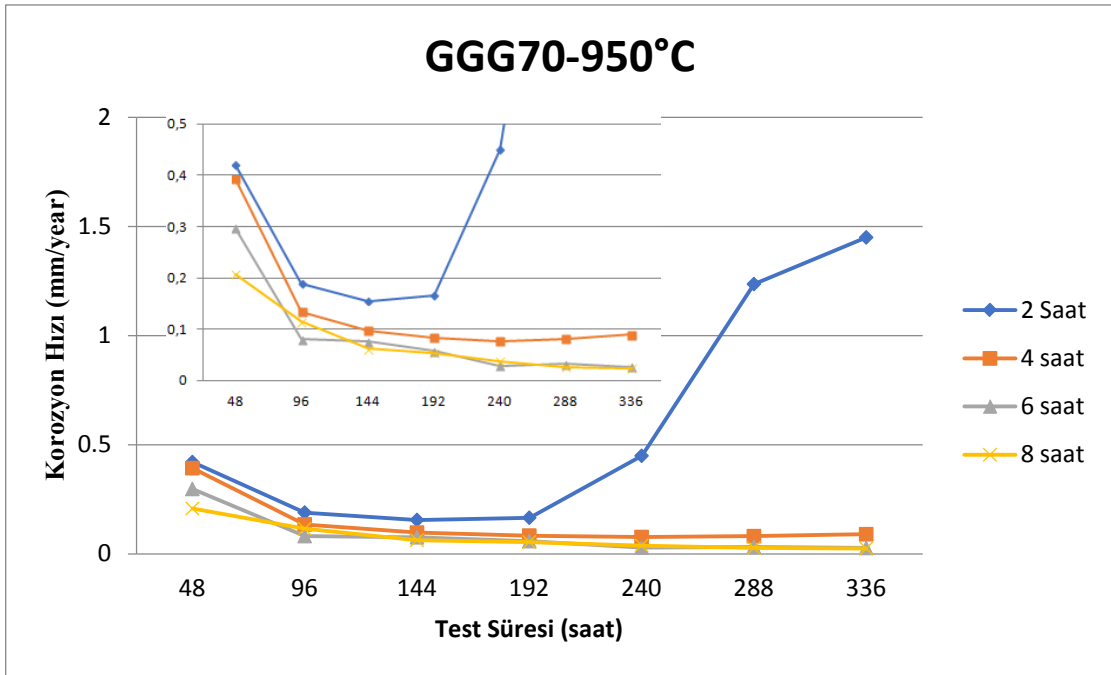
Şekil 7.34: 900°C'de borlanan GGG40 numunelerinin borlama sürelerine göre formik asit çözeltisindeki korozyon hızları.



Şekil 7.35: 950°C'de borlanan GGG40 numunelerinin borlama sürelerine göre formik asit çözeltisindeki korozyon hızları.

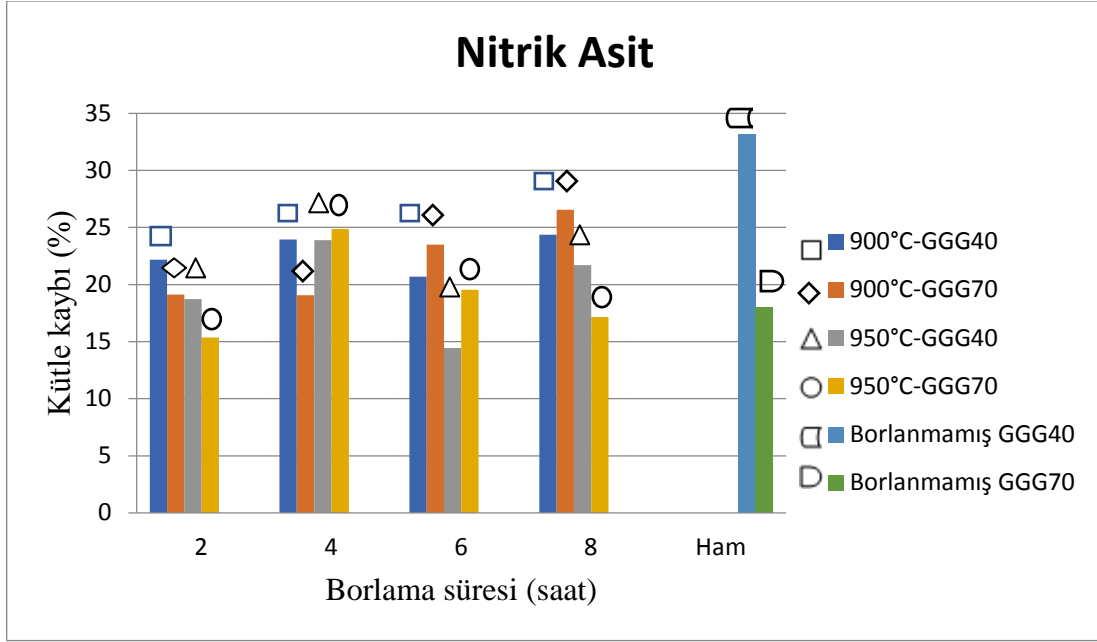


Şekil 7.36: 900°C'de borlanan GGG70 numunelerinin borlama sürelerine göre formik asit çözeltisindeki korozyon hızları.



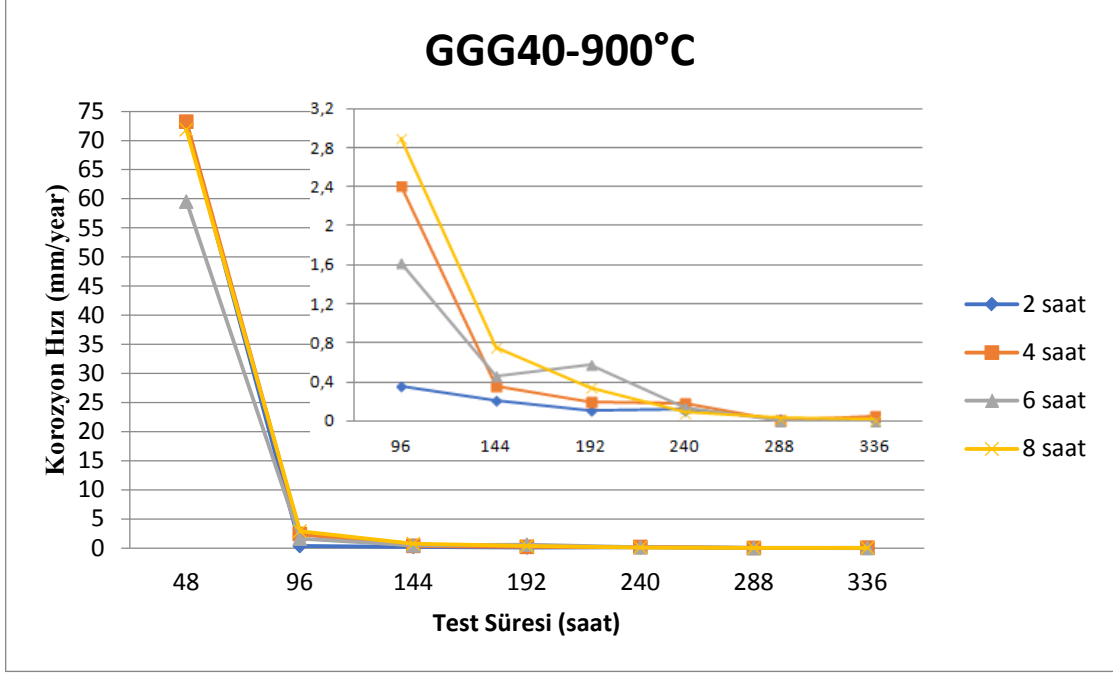
Şekil 7.37: 950°C'de borlanan GGG70 numunelerinin borlama sürelerine göre formik asit çözeltisindeki korozyon hızları.

Nitrik asit çözeltisi içinde 14 gün boyunca bekletilen borlanmış ve ham haldeki KGDD numunelerde meydana gelen kütle kayıpları Şekil 7.38’te toplu halde verilmiştir. Şekil incelendiğinde, ham haldeki GGG40 numunede % 33,12 değeri ile en fazla kütle kaybı gözlenmiştir. Ham haldeki GGG 70 numunede ise % 17,99 değeri ile GGG40’tan 1,2 kat daha az kütle kaybı olduğu görülmüştür. Bu sonuca göre KGDD’de alaşım elemanlarının (Cu, Ni ve Mo) korozyon direncine olumlu etkisi olduğu söylenebilir. Bu sonuç literatür ile uygunluk göstermektedir [75].

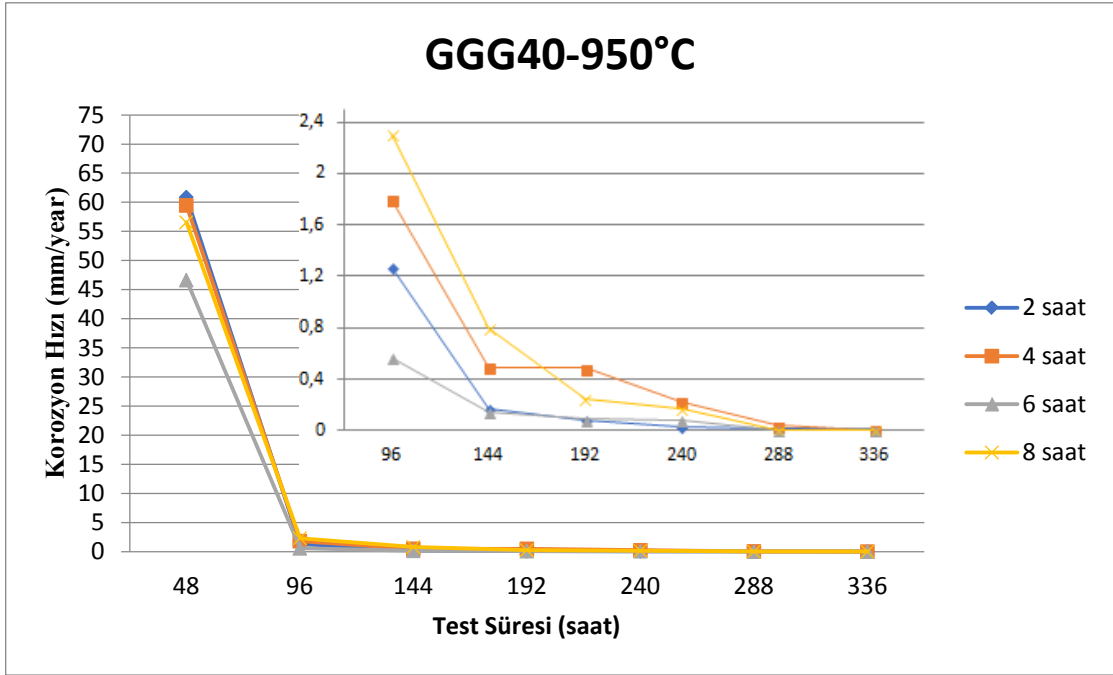


Şekil 7.38: Borlanmış ve borlanmamış numunelerin nitrik asit çözeltisindeki kütle kayıpları (%).

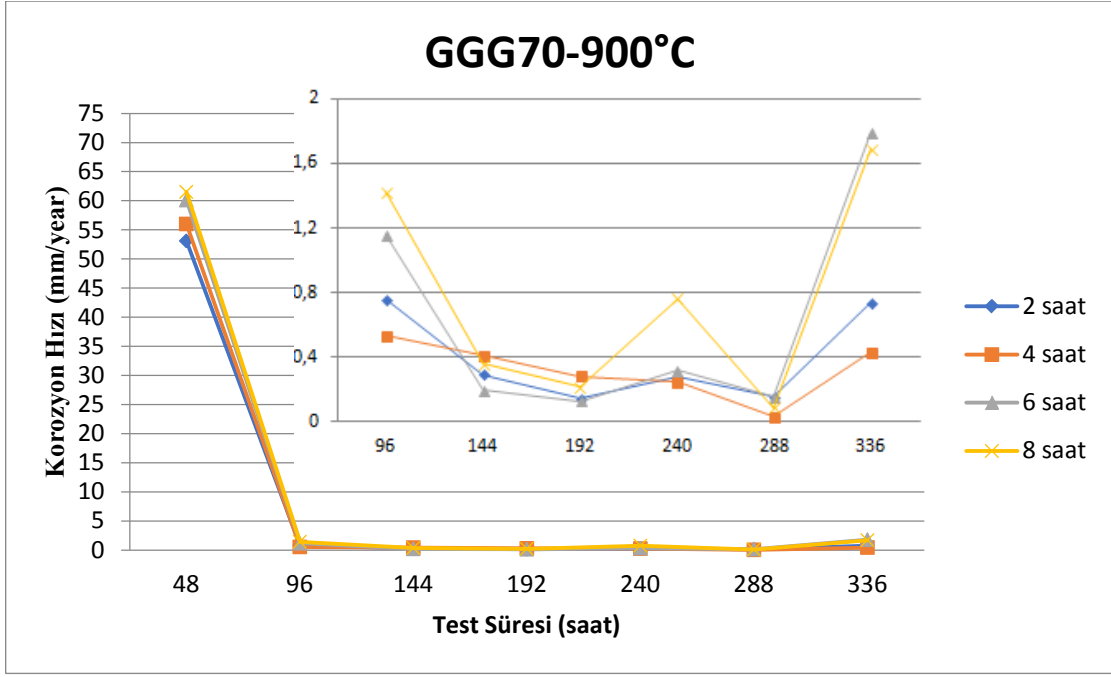
Denklem 6.2 yardımıyla kütle kayıplarına istinaden borlama süresine bağlı olarak korozyon oranları Şekil 7.39 - 7.42 arasında verilmiştir.



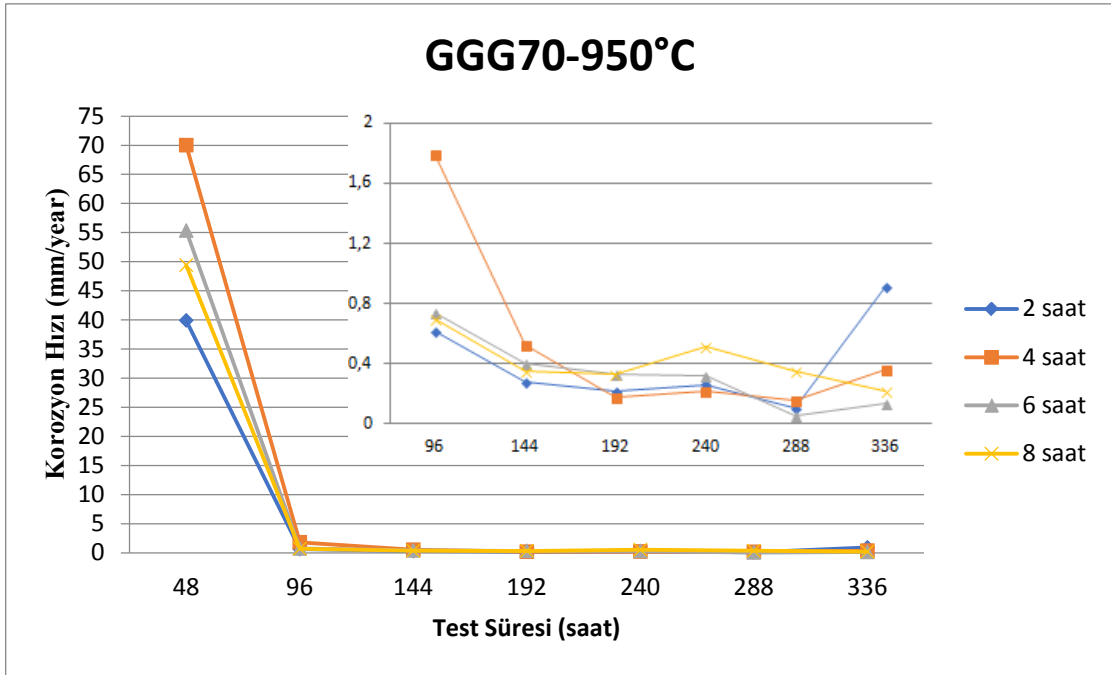
Şekil 7.39: 900°C'de borlanan GGG40 numunelerinin borlama sürelerine göre nitrik asit çözeltisindeki korozyon hızları.



Şekil 7.40: 950°C'de borlanan GGG40 numunelerinin borlama sürelerine göre nitrik asit çözeltisindeki korozyon hızları.



Şekil 7.41: 900°C'de borlanan GGG70 numunelerinin borlama sürelerine göre nitrik asit çözeltisindeki korozyon hızları.



Şekil 7.42: 950°C'de borlanan GGG70 numunelerinin borlama sürelerine göre nitrik asit çözeltisindeki korozyon hızları.

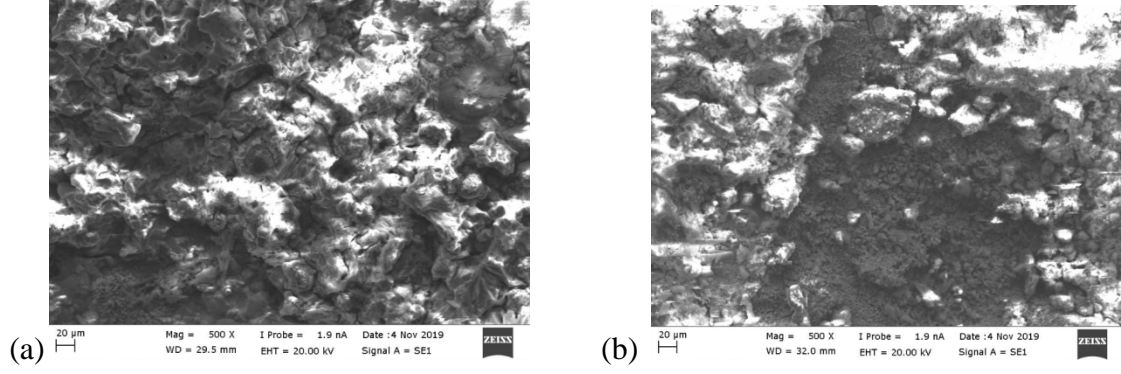
Borlanmamış GGG 70 için elde edilen kütle kaybı aynı malzemenin 950°C’de 2 ve 8 saat borlanan numunelerin kütle kayıpları dışında diğer şartlarda borlanan GGG 70 numunelerin kütle kayıplarından da daha az bulunmuştur. GGG 70’in 900°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerinde borlanması ile kütle kayıpları aynı malzemenin borlanmamış durumundan daha fazla elde edilmiştir. Buna göre, GGG 70 KGDD’de 900°C borlamanın nitrik asit çözeltisindeki korozyon direnci açısından uygun olmadığı söylenebilir.

Genel olarak tüm borlama süreleri için, 950°C’de borlanan GGG 40 dökme demirin kütle kayıpları aynı malzemenin 900°C’de borlanmış numunelerin kütle kayıplarından daha az bulunmuştur. Buna göre alaşımsız KGDD (GGG 40) yüksek sıcaklıkta (950°C) borlandığında, alaşımlı KGDD (GGG 70) ise düşük sıcaklıkta (900°C) borlandığında daha az kütle kaybı elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre alaşım elemanı ve borlama sıcaklığının korozyon özellikleri üzerine önemli etkisi olduğu söylenebilir [76].

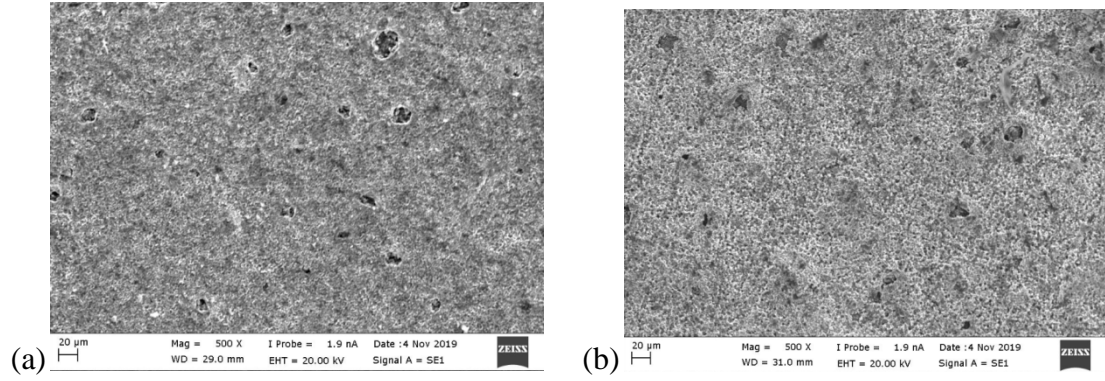
Şekil 7.33 ve 7.38’te verilen kütle kayıpları karşılaştırıldığında nitrik asit çözeltisinin korozif etkisinin formik asit çözeltisinkinden daha fazla olduğu görülmektedir. Ham halleri de olmak üzere tüm numunelerde formik asit çözeltisinde en düşük ve en yüksek kütle kayıpları sırasıyla % 0,302 ve % 9,101 iken, nitrik asit çözeltisinde bu değerler % 14,43 ve % 33,120 olarak bulunmuştur. Asit çözeltilerinin farklı pH değerleri (formik asit pH:2,2 , nitrik asit pH<1) kütle kayıplarında önemli değişikliklere neden olmuştur.

7.5.1 Korozif Yüzeylerin İncelenmesi

Nitrik asit çözeltisindeki korozif yüzeyler ise aynı büyütmeye SEM ile 950°C’de 6 saat borlanmış GGG 40 ve GGG 70 dökme demir numuneler için incelenmiştir (Şekil 7.43). Formik asit çözeltisinde korozyona maruz bırakılan 950°C’de 2 saat borlanmış GGG 40 ve GGG 70 dökme demirlerin yüzeylerinin 500X büyütmeye SEM görüntüleri Şekil 7.44’te verilmiştir.

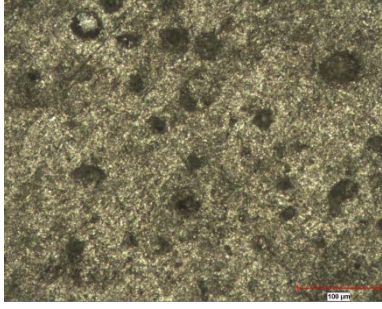
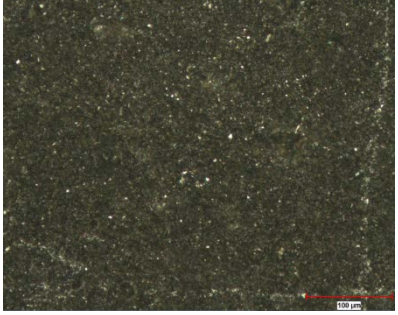
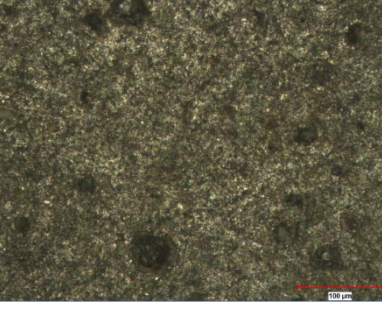
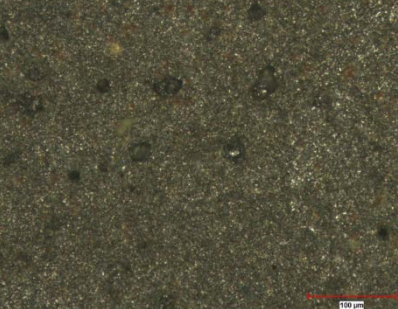
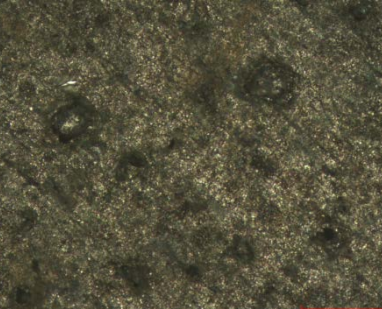
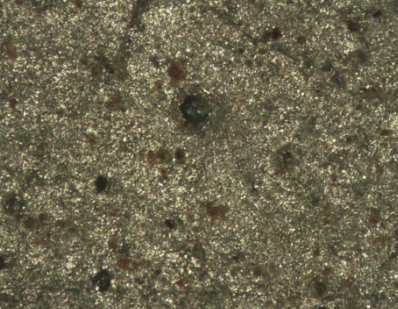

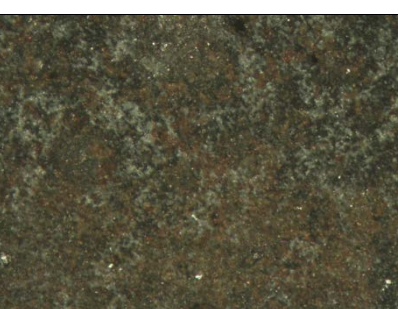


Şekil 7.43: Nitrik asitte korozyona uğrayan 950°C 6 saat borlanan GGG40 (a) ve GGG70 (b) SEM görüntüleri (500x).

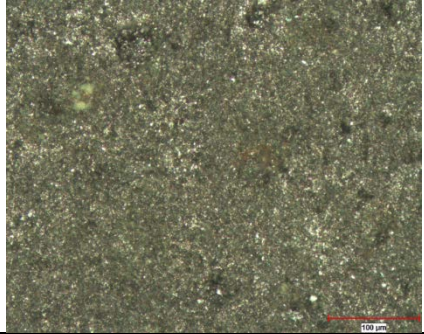

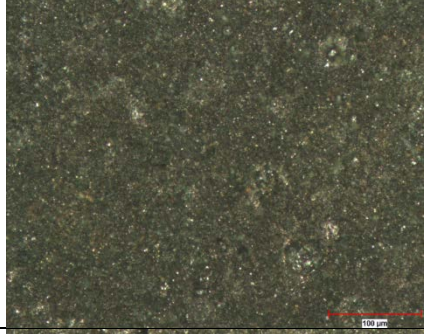
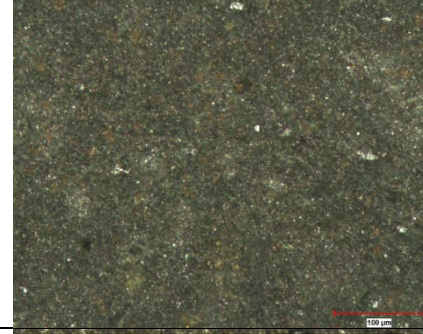
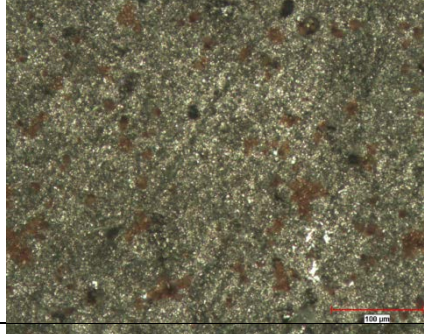
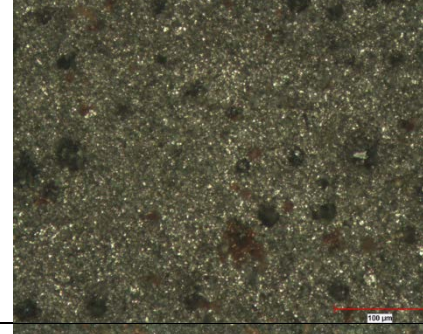




Şekil 7.44: Formik asitte korozyona uğrayan 950°C 2 saat borlanan GGG40 (a) ve GGG70 (b) SEM görüntüleri (500x).

Formik asit çözeltisinde korozyona maruz bırakılan borlanmış GGG 40 ve GGG 70 dökme demirlerin yüzeylerinin 200X büyütmedeki içyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 7.45 ve Şekil 7.46'de verilmiştir.

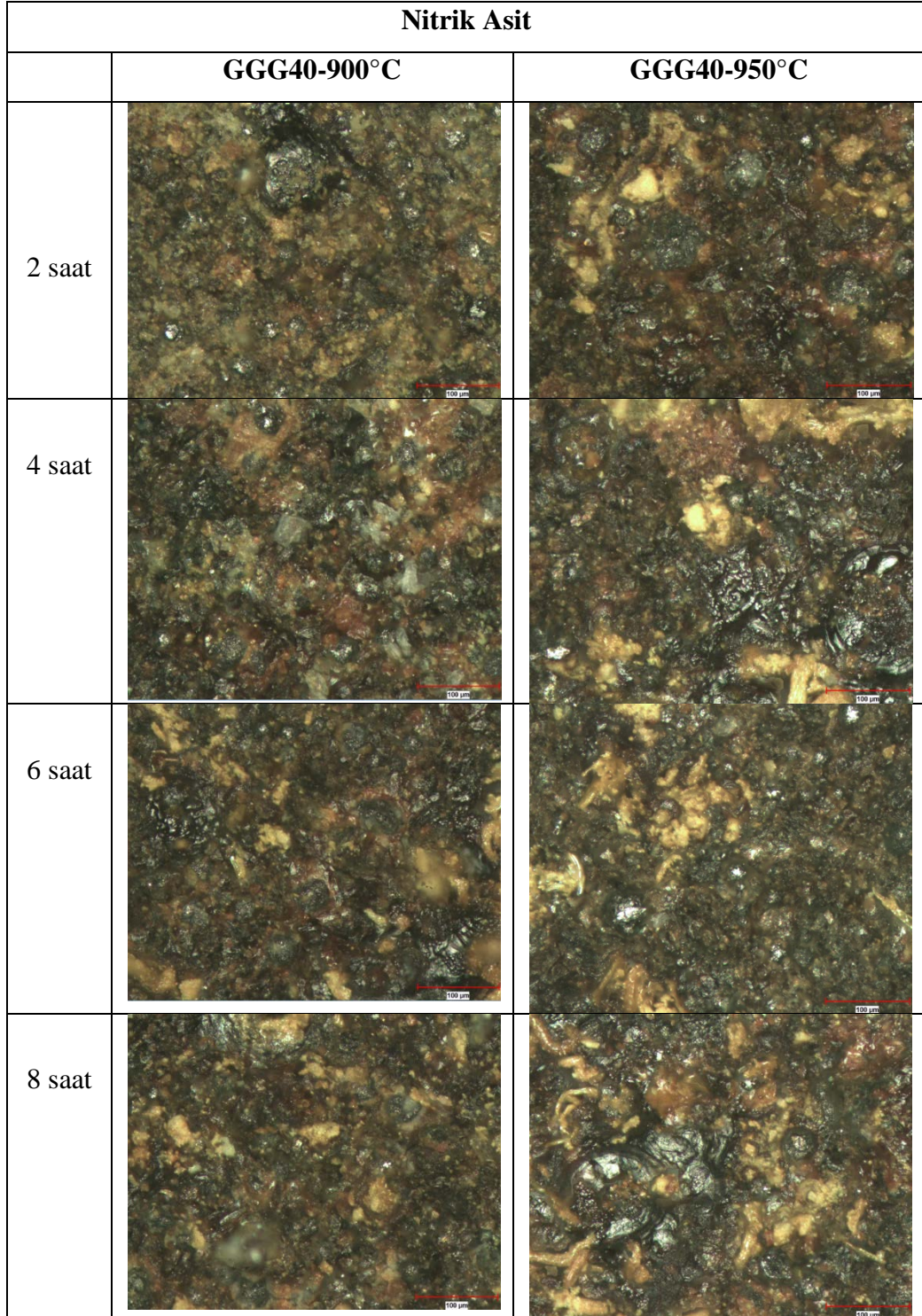
Formik Asit		
	GGG40-900°C	GGG40-950°C
2 saat		
4 saat		
6 saat		
8 saat		

Şekil 7.45: Formik asitte korozyona uğrayan 900°C-950°C 2-8 saat borlanan GGG40 malzemesinin içyapı görüntüleri (200x).

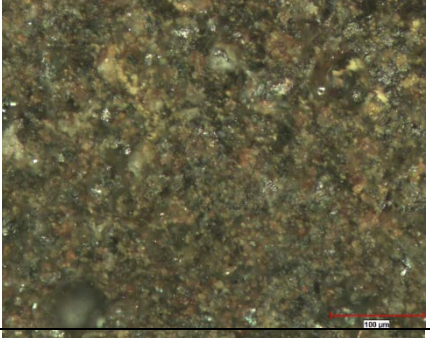

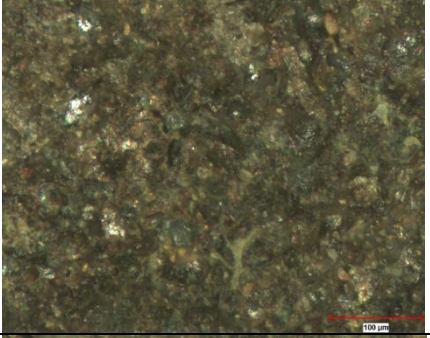
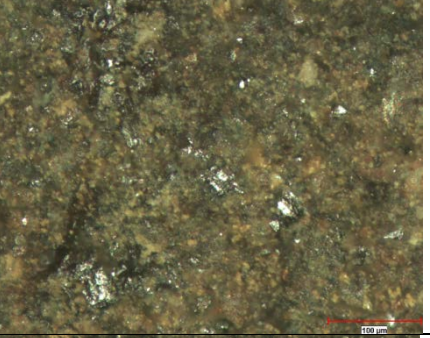
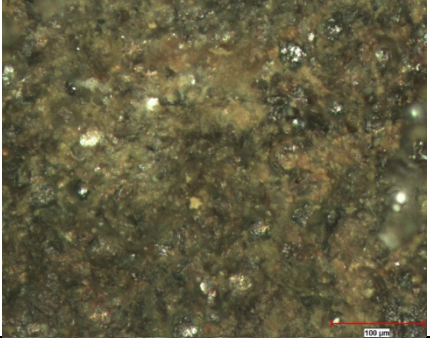
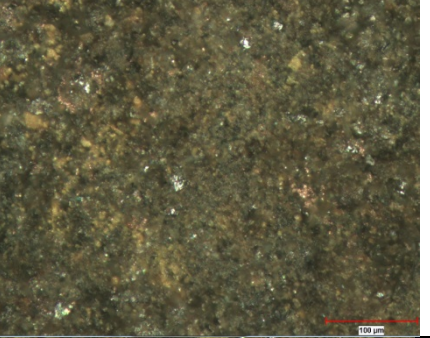
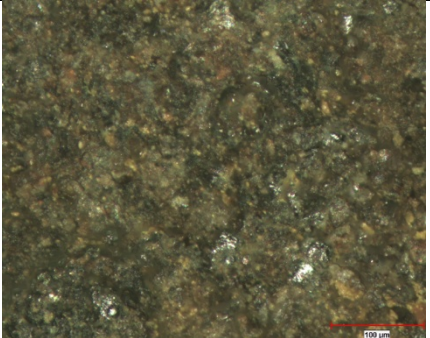
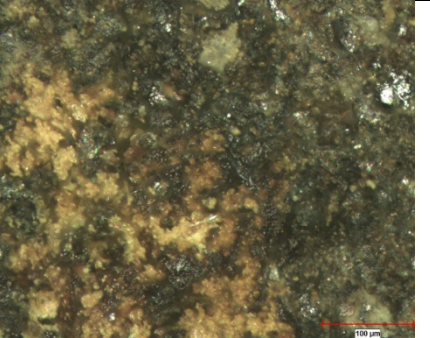
Formik Asit		
	GGG70-900°C	GGG70-950°C
2 saat		
4 saat		
6 saat		
8 saat		

Şekil 7.46: Formik asitte korozyona uğrayan 900°C-950°C 2-8 saat borlanan GGG70 malzemesinin içyapı görüntüleri (200x).

Nitrik asit çözeltilisindeki korozif yüzeyler ise aynı büyütmede Optik mikroskop ile borlanmış GGG 40 ve GGG 70 dökme demir numuneler için sırasıyla Şekil 7.47 ve Şekil 7.48' de incelenmiştir.



Şekil 7.47: Nitrik asitte korozyona uğrayan 900°C-950°C 2-4-6-8 saat borlanan GGG40 malzemesinin içyapı görüntüleri (200x).

Nitrik Asit		
	GGG70-900°C	GGG70-950°C
2 saat		
4 saat		
6 saat		
8 saat		

Şekil 7.48: Nitrik asitte korozyona uğrayan 900°C-950°C 2-4-6-8 saat borlanan GGG70 malzemesinin içyapı görüntüleri (200x).

8. GENEL SONUÇLAR

Döküm yapısı perlitik olan Cu, Ni ve Mo alaşımlı küresel grafitli dökme demir (GGG70) ve alaşımsız küresel grafitli dökme demir (GGG40) numuneler 900°C ve 950°C'de 2,4,6,8 saat süreyle borlanmışlardır. Borlama sonrasında mikro iç yapı, bor tabaka kalınlıkları, korozyon işlemi sonrası kütle kayıpları, sertlik dağılımları ve kırılma toklukları incelenmiş olup elde edilen bulgulara göre aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Borlama sıcaklık ve süresiyle her iki KGDD malzemedede de bor tabaka kalınlığı artmıştır. Genel olarak, aynı borlama şartlarında GGG 70'te daha kalın bor tabakaları elde edilmiştir.

2. 950°C borlama sıcaklığında 6 ve 8 saat borlama sonucu GGG 70'in bor tabaka kalınlığı GGG 40'ın tabaka kalınlığından daha az ölçülmüştür.

3. GGG 40'ta borlama işlemleri ile yüzey sertliklerinin artış oranları daha yüksek elde edilmiştir. Bu oran ham malzeme sertliğine nazaran GGG 40'ta 5,45-6,69 arasında iken, GGG 70'te 4,29-5,53 aralığında elde edilmiştir.

4. Her iki dökme demirde borlama işlemleri ile bor tabakalarında Fe₂B ve FeB bileşikleri gözlemlenmiştir.

5. Vickers yöntemiyle elde edilen kırılma toklukları değerleri tüm borlama şartları için literatürde verilen geleneksel yöntemlerle elde edilmiş kırılma toklukları ile uyumlu bulunmuştur. Kırılma tokluklarında borlama şartlarına bağlı olarak belirgin artış veya azalmalardan ziyade dalgalı değişimler elde edilmiştir.

6. Borlama süresi arttıkça her iki dökme demirin her iki borlama sıcaklığı için formik asit çözeltisindeki % kütle kayıpları azalmıştır.

7. Formik asit çözeltisinde bekletilen, 2 saat borlama süresinin dışındaki diğer sürelerde (4, 6 ve 8 saat) 950°C'de borlama işlemi yapılan GGG 40 ve GGG 70'te 900°C'ye göre daha az % kütle kayıpları meydana gelmiştir.

8. Formik asit çözeltisinde, 2 saat borlanan numuneler hariç, aynı borlama şartları için (borlama sıcaklığı ve süresi) Cu, Ni, Mo alaşımlı GGG 70'te alaşımsız GGG 40 malzemeye göre daha fazla kütle kaybı meydana gelmiştir.

9. Nitrik asit çözeltisinde ham haldeki alaşımlı GGG 70 malzemedede alaşımsız GGG 40 malzemeye göre % 45 daha az kütle kaybı meydana gelmiştir.

10. Alaşimsız GGG 40 yüksek sıcaklıkta (950°C) borlandığında, alaşımli GGG 70 ise düşük sıcaklıkta (900°C) borlandığında nitrik asit çözeltisinde daha az kütle kaybı elde edilmiştir.

11. Nitrik asit çözeltisinin korozif etkisi formik asit çözeltisine göre daha fazladır. Dökme demirlerin ham halleri de olmak üzere tüm numunelerde formik asit çözeltisinde en düşük ve en yüksek % kütle kayıpları sırasıyla % 0,302 ve % 9,101 iken; nitrik asit çözeltisinde bu değerler % 14,43 ve % 33,12 olarak ölçülmüştür.

9. KAYNAKLAR

- [1] S.M.M. Khoee, “Ergimiş boraks banyosunda çeliklere vanadyum karbür kaplama”, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniv., İstanbul, 1992.
- [2] U. Yapar, “Düşük ve orta karbonlu çeliklerin termokimyasal borlama ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesi”, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniv., İstanbul, 2003.
- [3] Y. Karaman, “Endüstriyel borlama ve tekstil endüstrisinde bir uygulama”, Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniv., Isparta, 2003.
- [4] İ. Çelikyürek, ”Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması”, II.Uluslararası Bor Sempozyumu, Ed., Eskişehir, Eyl. 2004, s. 231-235.
- [5] R. Varol, “Malzeme bilgisi ve muayenesi”, Süleyman Demirel Üniv., Isparta, 2000.
- [6] Komisyon, “Bor stratejik bir madendir”, Bilim ve Ütopya Dergisi, no. 94, Nis. 2002.
- [7] A. Çalık, “Türkiye'nin bor madenleri ve özellikleri”, Mühendis ve Makine, cilt 43, no. 508, 36-41, May. 2002.
- [8] Komisyon, “Bor raporu”, TMMOB Metalürji Mühendisleri Odası, Tem. 2003.
- [9] F. Altun, “Bor”, Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, Ankara, 2005.
- [10] C. Helvacı, “Türkiye borat yatakları: jeolojik konumu, ekonomik önemi ve bor politikası”, 5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, Ed., İzmir, May. 2004, s. 11-27.
- [11] İ. Duman, ”Bor madenleri ve stratejik bor ürünleri”, Bilim ve Ütopya, no. 114, 18-21, Ara. 2003.
[Online] Erişim adresi: <https://e-dergi.bilimveutopya.com.tr/e-arsiv/2003>
- [12] A. Taşcı, “Borlanmış çeliklerin aşınma ve korozyon dayanımları” Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniv., İstanbul, 1993.
- [13] M. Özer, ”Üç farklı çeliğe katı borlama işlemi yapılmasının içyapı ve sertlik üzerine etkisinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniv., Balıkesir, 2011.
- [14] <http://www.periodensystem-online.de/> . Erişim tarihi: 05.07.2011.
- [15] S. Şahin, “Katı borlama yöntemi ile ferrobör üretimi ve özelliklerinin belirlenmesi”, Doktora tezi, Celal Bayar Üniv., Manisa, 1999.

- [16] N. Ediz, M. A. Seyfettinođlu ve H. Özdađ, “Kil minerallerinin TÜGSAŞ-Kütahya azot fabrikası baca gazlarının filitasyonunda kullanımın araştırılması”, 8. Ulusal Kil Sempozyumu, Dumlupınar Üniversitesi, Ed., Kütahya, Eyl. 1997, s. 315-325.
- [17] B. Selçuk, “Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 çeliklerinin sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi”, Doktora tezi, Erciyes Üniv., Kayseri, 1994.
- [18] U. Yünker, ”Borlanmış çeliklerin aşınma davranışlarının belirlenmesi”, Yüksek lisans tezi, Celal Bayar Üniv., Manisa, 2000.
- [19] T. Aydemir ve U. Şen, ”Borlanmış soğuk iş takım çeliklerinin aşınma davranışları”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, cilt 7, no. 3, 28-31, Sakarya, Eyl. 2003.
- [Online] Erişim adresi: <http://www.saujs.sakarya.edu.tr/en/issue/20693/281704>
- [20] A. Çalık, ”Borlama ve endüstriyel uygulama alanları” I. Ulusal Bor Çalıştayı, Ankara, Nis. 2005.
- [21] F. Nair, M.B. Karamış, “Borlanmış çeliklerde malzeme bileşiminin mikrosertliğe etkileri” 7. Denizli Malzeme Sempozyumu, Ed., Denizli, Nis. 1997, s. 354-360.
- [22] M. Akkurt, Makine Elemanları Cilt II, İstanbul: Birsen Kitabevi, 42-51, 1987.
- [23] R. Varol, S. Yılmaz, S., Tunay, R., F. “Borlamanın T/M çelik parçaların mikroyapı ve yüzey sertliğine etkisi”, III. International Powder Metallurgy Conference, Ed., Ankara, Eyl. 2002, s. 1039-1047.
- [24] N. Körpe, E. Körpe, B. Baksan, İ. Çelikyürek ve R. Gürler, “Fe₃Al (Fe₇₄Al₂₆) alaşımının borlanması” II. Uluslararası Bor Sempozyumu, Ed., Eskişehir, Eyl. 2004, s. 243-247.
- [25] S.U. Bayça ve S. Şahin, “ Borlama”, Mühendis ve Makine, 2004.
- [26] A. Çalık, “Makine ve metalurji sanayinde bor kullanımı”, 2.Uluslararası Bor Sempozyumu, Ed., Eskişehir, Eyl. 2004, s. 249-257.
- [27] N. Bozkurt, “Bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme”, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniv., İstanbul, 1984.
- [28] H. A. Uzun, “Borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları”, Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniv., Isparta, 2002.

- [29] M. Çetin, “Borlanmış hadfield çeliklerinin aşınma dayanımını incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniv., Kütahya, 2003.
- [30] A.G.V. Matuschka, “Boronizing”, München, Wien, Hanser, 1980.
- [31] R. Tezcan, “Borlama işlemi ve endüstriyel uygulamaları”, Yüksek lisans tezi, Osmangazi Üniv., Eskişehir, 1996.
- [32] U. Şen, “Küresel grafitli dökme demirin borlanması ve özellikleri”, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniv., İstanbul, 1997.
- [33] E.R. Cabeo, G. Laudien, S. Biemer, K. T. Rie and S. Hoppe, “Plasma-assisted boriding of industrial components in a pulsed D.C. glow discharge”, Surface and Coating Technology, vol. 116, pp. 229-233, Sep. 1999, doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00116-4
- [34] I. Özbek, “Borlama yöntemi ile (AISI M50, AISI M2) yüksek hız çeliklerinin ve AISI W1 çeliğinin yüzey performanslarının geliştirilmesi”, Doktora tezi, Sakarya Üniv., Sakarya, 1999.
- [35] A. Küper, X. Qiao, H.R. Stock and P. Mayr, “A novel approach to gas boronizing”, Surface and Coating Technology, vol. 130, no.1, pp. 87-94, Aug. 2000, doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00682-4
- [36] P. Kaestner, J. Olfe and K.T. Rie, “Plasma-assisted boriding of pure titanium and TiAl6V4”, Surface and Coating Technology, vol. 142, pp. 248-252, Jul. 2001, doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01244-0
- [37] A. Özsoy, “Termal çevrimli borlama uygulamaları”, Doktora tezi, Ankara Üniv., Eskişehir, 1988.
- [38] U. Yapar, G.Başman, C.F. Arısoy ve M.K. Şeşen, “Çeliklerde borlama yoluyla yüzey sertleştirme”, Metal Dünyası, no. 115, 69-74, Ara. 2002.
- [39] J. Vipin and G. Sundararajan “ Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel”, Surface and Coatings Technology, vol. 149, no. 1, pp. 21–26, Jan. 2002, doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01385-8
- [40] M. Karakan, A. Alsaran ve A. Çelik, “Plazma borlama”, Mühendis ve Makine, cilt 43, no. 512, 51-54, Eyl. 2002.
- [41] M. B. Karamış ve F. Nair, B. Selçuk, “Borlanmış malzemelerin tribolojik özellikleri”, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, Ed., Denizli, Ekim 1995, s. 446-454.
- [42] B. Bhushan and B.K. Gupta, Handbook of Tribology,USA: McGraw-Hill, Inc., 1168, 1991.

- [43] J.H. Yoon, Y.K. Jee, and S.Y. Lee, "Plasma paste boronizing treatment of the stainless steel AISI 304", Surface and Coating Technology, vol. 112, pp. 71-75, Feb. 1999, doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00743-9
- [44] A. Çalık, K. Delikanlı ve A. Uzun, "Ç 1035 çeliğın borlama özelliklerinin incelenmesi", II. Uluslararası Bor Sempozyumu, Ed., Eskişehir, Eyl. 2004, s. 237-242.
- [45] Ö. Çeğil ve Ş. Şen, "AISI 8620 çeliğının bor-vanadyumlanması ve yüzey özelliklerinin incelenmesi", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, cilt 6, no. 3, 113-117, Eyl. 2002.
- [46] A. Özsoy, "Borlama ile ilgili genel bir değerlendirme", Endüstriyel Yüzey Teknolojileri, no. 22, 10-13, 2001.
- [47] A. Çalık ve A. Özsoy, "Termal çevirimli borlama işleminin ç1010 çeliğine etkileri", 11. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Ed., İstanbul, Haz. 2002, s. 1281- 1288.
- [48] A. Yılmaz, "Her derde deva hazinemiz bor", Bilim ve Teknik, no. 414, 38-48, May. 2002.
- [49] C. Bindal, "Az alaşımlı ve karbon çeliklerinde borlama ile yüzeye kaplanan borürlerin bazı özelliklerinin tespiti", Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniv., İstanbul, 1991.
- [50] M., J. Lu, "Erhöhung der lebensdauer von bauteilen und werkzeugen durch boralitieren", HTM, no. 37, 73-82, 1983.
- [51] E. Atik, "Çeliklerin borlanarak aşınma dayanımlarının artırılması", Mühendis ve Makine, no. 445, 17-20, 1997.
- [52] M. Selam, "Borlanmış gri dökme demirin aşınma davranışlarının deneysel araştırılması", Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniv., Kayseri, 1996.
- [53] Ş. Şen ve C. Bindal, "AISI 5140 çeliğının yüzeyinde oluşan borürlerin bazı özellikleri", Denizli Makina Mühendisleri Odası Bilim Günleri, Denizli, 670-675, 1999.
- [54] E. Atik, "Farklı bir yüzey sertleştirme yöntemi: borlama", Makina & Metal, no. 117, 86-90, Eyl. 2001.
- [55] Ü. Er ve B. Par, "Bor yayınımla yüzeyi sertleştirilmiş AISI 1030 ve AISI 1050 çeliklerinin abrazif aşınma dayanımlarının incelenmesi", Osman Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, cilt 17, no. 1, 2004.

- [56] Y. Kayalı, S. Taktak, S. Ulu and Y. Yalçın, “ Investigation of mechanical properties of boro-tempered ductile iron”, *Materials & Design*, vol. 31, no. 4, pp. 1799-1803, Apr. 2010, doi:10.1016/j.matdes.2009.11.017.
- [57] S. Şehin and C. Meriç, “Investigation of the effect of boronizing on cast iron”, *Materials Research Bulletin*, vol. 37, no. 5, pp. 971-979, May. 2002, doi.org/10.1016/S0025-5408(02)00697-9
- [58] U. Şen, S. Şen and F. Yılmaz, “Structural characterization of boride layer on boronized ductile irons”, *Surface and Coating Technology*, vol. 176, no. 2, pp. 222-228, Jan. 2004, doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00731-X
- [59] M. Baydoğan and S. İzzet, “Successive boronizing and austempering for GGG40 grade ductile iron”, *Journal of Iron and Steel Research. International*, vol. 16, no. 2, pp. 50-54, Mar. 2009, doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60027-3
- [60] U. Şen, S. Şen and F. Yılmaz, “An evaluation of some properties of borides deposited on boronized ductile iron”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 148, no. 1, pp. 1-7, May. 2004, doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.01.015
- [61] U. Şen, S. Şen, S. Köksal and F. Yılmaz, “Fracture toughness of borides formed on boronized ductile iron”, *Materials and Design*, vol. 26, no. 2, pp. 175-179, Apr. 2005, doi.org/10.1016/j.matdes.2004.05.015
- [62] C. Meric, Ş. Şahin, B. Backır and N. S. Köksal, “Investigation of the boronizing effect on the abrasive wear behavior in cast irons”, *Materials and Design*, vol. 27, no. 9, pp. 751-757, Dec. 2006, doi.org/10.1016/j.matdes.2005.01.018
- [63] U. Şen, S. Şen and F. Yılmaz, “An evaluation of some properties of borides deposited on boronized ductile iron”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 148, no. 1, pp. 1-7, May. 2004, doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.01.015
- [64] F. Gül, “ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demirin adhesif aşınma dayanımı üzerinde borlama yüzey işleminin etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 25, no. 2, 389-395, 2010.
- [65] L.C. Casteletti, A.N. Lombardi and G.E. Totten, “Boriding”, *Encyclopedia of Tribology*, Wang, Q.J., Chung, Y.W., Springer, USA, pp. 249-254, 2013.

- [66] M. Keddani, O. Azouani, O. Allaoui and A. Sehisseh, "Characterization and boriding kinetics of EN-GJS-400-15 cast iron", Journées Annuelles de la SF2M 2015, Matériaux et conversion d'énergie, Posters, Paris, Oct. 2015.
- [67] H.R. Abedi, A. Fareghi, H. Saghafian and S.H. Kheirandish, "Sliding wear behavior of a ferritic-pearlitic ductile cast iron with different nodule count", Wear, vol. 268, pp. 622-628, Feb. 2010, doi.org/10.1016/j.wear.2009.10.010
- [68] U. Şen, S. Şen and F. Yılmaz, "Effect of copper on boride layer of boronized ductile cast irons", Vacuum, vol. 72, no. 2, pp. 199-204, Oct 2003, doi.org/10.1016/S0042-207X(03)00127-1
- [69] D. Mu and B. Shen, "The kinetics and dry-sliding wear properties of boronized gray cast iron", Advances in Materials Science and Engineering, vol. 13, pp. 1-7, Aug. 2013, doi.org/10.1155/2013/751971
- [70] G. Toktaş, "Matriks yapısının küresel grafitli dökme demirin yorulma ve mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi", Doktora tezi, Balıkesir Üniv., Balıkesir, 2004.
- [71] A. Toktaş, "Determination of vickers indentation fracture toughness of boronized alloyed ductile iron", The International Journal of Surface Engineering and Coatings, vol. 97, no. 5, pp. 271-276, Aug. 2019, doi.org/10.1080/00202967.2019.1646458
- [72] Standard practice for preparing, cleaning and evaluation corrosion test specimens, ASTM G1, Jan. 1999.
- [73] K. Gülsün, "Yüzey borlanmış ve farklı matriks yapıları küresel grafitli dökme demirin aşınma özelliklerinin incelenmesi", Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniv., Balıkesir, 2016.
- [74] Ö. Fırtına, "Küresel grafitli dökme demirlerin borik asit esaslı alternatif borlama karışımı ile borlanması ve karakterizasyonu", Yüksek lisans tezi, Celal Bayar Üniv., Manisa, 2019.
- [75] F. Kalan, "Alüminyum alaşımları ile kaplanan yapı çeliklerinin korozyon davranışlarının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 2019.
- [76] M.H. Boztepe, "Effect of boronizing temperature and time on abrasion and corrosion resistance of AISI 1050 steel", Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2014.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Selman KORKMAZ

Doğum tarihi ve yeri : 16.03.1990 / Batman

e-posta : selman_korkmazz@hotmail.com

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Makine Mühendisliği	2
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Makine Mühendisliği	4
Lise	Bursa Erkek Lisesi	4