

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AISI 316 L TİPİ PASLANMAZ ÇELİĞİN TERMOKİMYASAL
DİFÜZYON YÖNTEMİ İLE BORLANMASINDA, BORLAMA BANYOSU
BİLEŞENLERİNİN BORÜR TABAKASI ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**DOKTORA TEZİ
Gökhan BAŞMAN**

Anabilim Dalı : Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Programı : Malzeme

ŞUBAT 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AISI 316 L TİPİ PASLANMAZ ÇELİĞİN TERMOKİMYASAL
DİFÜZYON YÖNTEMİ İLE BORLANMASINDA, BORLAMA BANYOSU
BİLEŞENLERİNİN BORÜR TABAKASI ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**DOKTORA TEZİ
Gökhan BAŞMAN
(506982012)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Kasım 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Şubat 2010

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. M. Kelami ŞEŞEN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. E. Sabri KAYALI (İTÜ)
Prof. Dr. M. Ercan AÇMA (İTÜ)
Prof. Dr. Mehmet KOZ (MÜ)
Prof. Dr. İrfan YÜKLER (MÜ)**

ŞUBAT 2010

Sevgili Eşim Seval'e ve Sevgili Oğlum Buğrahan'a,

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince öneri ve yardımlarını esirgemeyen, desteğiyle her zaman yanımda olan tez danışmanım değerli büyüğüm değerli hocam Prof. Dr. M. Kelami Şeşen'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Tez izleme komitesinde yer alarak değerli fikir ve önerileri ile tezimin şekillendirilmesinde katkılarda bulunan değerli hocalarım Prof. Dr. E. Sabri Kayalı ve Prof. Dr. Mehmet Koz'a teşekkür ederim. Ayrıca, tez süresince gülen yüzüyle ilgilenen değerli hocalarım Prof. Dr. Niyazi Eruslu ve Prof. Dr. Ercan Açma'ya teşekkür ederim.

Taramalı Elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışınları (XRD) çalışmalarındaki yardım ve desteklerinden dolayı değerli hocalarım Prof. Dr. Mustafa Ürgen'e, Prof. Dr. M. Lütfi Öveçoğlu'na, Prof. Dr. Gültekin Göller'e, Teknisyen Hüseyin Sezer'e, Teknisyen Sevgin Türkeli'ye, Elektron probe mikro analizör (EPMA) çalışmalarındaki yardım ve desteklerinden dolayı değerli hocam Prof. Dr. Onuralp Yücel'e, Yük. Müh. Murat Alkan ve Teknisyen Hasan Dinçer'e teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalarım sırasında laboratuvar imkânları konusunda yardımlarından dolayı Uzel Otomotiv Sistemleri A.Ş. Kalite Yönetiminde ki yönetici ve çalışan arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca, tezim süresince desteğini hissettiğim Temsa Ar-Ge ve Teknoloji A.Ş.'deki Genel Müdürümüz Timuçin Bayraktara, Yöneticilerime ve Arge Kalite Bölümünün değerli personeline teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında katkılarını gördüğüm Dr. İsmail Er ve Yük. Müh. Alp Ersöz ve yeğenim Ercan Kössen'e çok teşekkür ederim. Ayrıca, değerli arkadaşlarım Yrd. Doç. Dr. C. Fahir Arısoy'a, Yrd. Doç. Dr. Tahsin Boyraz'a, Dr. Alper Yeşilçubuk, Müh. Yusuf Doğan, Yük. Müh. Altan Erdoğan, Yük. Müh. Erdem Şeşen ve tüm İ.T.Ü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü üyelerine teşekkür ederim.

Öğrenim yaşamım boyunca maddi ve manevi her türlü desteği veren **değerli Aileme** teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, ilgisiyle, güler yüzüyle ve tez çalışmam süresince büyük sabır gösterip desteğini esirgemeyen **sevgili eşim Seval'e ve sevgili oğlum Buğrahan'a** sonsuz teşekkür ederim.

Kasım 2009

Gökhan Başman

(Metalurji&Malzeme Yük. Müh.)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	V
İÇİNDEKİLER.....	VII
KISALTMALAR.....	XI
ÇİZELGE LİSTESİ.....	XIII
ŞEKİL LİSTESİ.....	XIX
SEMBOL LİSTESİ.....	XXVII
ÖZET.....	XXIX
SUMMARY.....	XXXIII
1. GİRİŞ.....	1
2. PASLANMAZ ÇELİKLER.....	7
2.1 Giriş.....	7
2.2 Paslanmaz Çelik Sınıfları.....	7
2.2.1 Ferritik paslanmaz çelikler	7
2.2.2 Martensitik paslanmaz çelikler	8
2.2.3 Çökelme ile sertleşen (PH) paslanmaz çelikler	8
2.2.4 Ostenitik paslanmaz çelikler	8
3. TERMOKİMYASAL BORLAMA VE BORLAMA PROSESLERİ.....	11
3.1 Giriş.....	11
3.2 Borlama İşlemi.....	14
3.2.1 Borlama işleminin avantajları	14
3.2.2 Borlama işleminin dezavantajları	16
3.3 Borlama Yöntemleri.....	17
3.3.1 Kutu borlama.....	18
3.3.2 Pasta borlama.....	19
3.3.3 Sıvı borlama.....	20
3.3.4 Elektrolitik sıvı borlama	20
3.3.4.1 Elektrolizle sıvı borlama	20
3.3.5 Gaz borlama	21
3.4 Borlanabilen Malzemeler Ve Borürlerin Özellikleri.....	22
3.4.1 Demir dışı metallerin borlanması	22
3.4.1.1 Alaşım elementlerinin etkisi	26
3.4.2 Borürlerin özellikleri	26
3.4.3 Demir esaslı malzemelerin borlanması	28
3.4.3.1 Demir-bor denge diyagramı	29
3.4.3.2 Fe ₂ B Ve FeB Fazlarının Özellikleri	30
3.5 Çok Fazlı Borlama.....	31
3.6 Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulamaları.....	32
4. BORÜR TABAKASININ BÜYÜME MEKANİZMASI.....	37
4.1 Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği.....	37
4.2 Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması	41
4.3 Borür Tabakası Çeşitleri Ve Borür Tabakası Kalınlığı.....	45
4.4 Alaşım Elementlerinin Borür Tabakasının Büyüme Kinetiğine	

Etkisi.....	47
4.5 Borlama Sonrası Uygulanabilecek Isıl İşlemler Ve Termal Çevrimli Borlama.....	55
5. BORÜR TABAKASININ MEKANİK ZELLİKLERİ	59
5.1 Giriş.....	59
5.2 Sertlik.....	59
5.3 Kalıntı Gerilmeler.....	61
5.4 Kırılma Tokluğu.....	63
6. BORÜR TABAKALARININ AŞINMA DAVRANIŞLARI.....	67
6.1 Aşınma Davranışları Hakkında Genel Bilgi.....	67
6.2 Eroziyon Aşınma Davranışları Hakkında Teorik Bilgi.....	71
6.3 Borlama İşleminin Aşınma Davranışına Etkisi.....	81
6.3.1 Borlama işleminin abrazyon aşınma davranışına etkisi.....	84
6.3.2 Borlama işleminin adhesiyon aşınma davranışına etkisi.....	86
6.3.3 Borlama işleminin kavitasyon-erozyon aşınma davranışına etkisi.....	87
6.3.4 Borlama işleminin eroziv aşınma davranışına etkisi.....	88
7. BORÜR TABAKALARININ KOROZYON DAVRANIŞLARI.....	89
7.1 Borür Tabakalarının Korozyon Davranışları Hakkında Genel Bilgi.....	89
8. BORÜR TABAKALARININ YORULMA DAVRANIŞLARI.....	91
8.1 Yorulma Davranışları Hakkında Genel Bilgi.....	91
8.2 Borür Tabakasının Yorulma Davranışına Etkisi.....	92
9. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	93
9.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....	94
9.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar.....	95
9.3 Deneylerin Yapılışı.....	97
9.3.1 Borlama banyosunun hazırlanması.....	97
9.3.2 Borlama işlemlerinin yapılması.....	98
9.3.3 Borür tabakaların karakterizasyon deneyleri.....	100
9.3.4 Mekanik deneyler.....	102
9.3.5 Performans deneyleri.....	104
9.3.5.1 Düzlemsel eğmeli yorulma deneyi.....	104
10. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEMELER.....	105
10.1 Borür Tabakasının Yüzey Karakterizasyon Deney Sonuçları.....	105
10.1.1 Metalografik incelemelerin sonuçları.....	105
10.1.1.1 Farklı banyo bileşimlerinin borür tabakası kalınlığına etkisi.....	105
10.1.1.2 Borür tabakası oluşumunun termodinamiği.....	110
10.1.1.3 Borür tabakası kalınlığının borlama banyosu bileşenlerinin stokiometrik oranlarıyla irdelenmesi.....	113
10.1.1.4 Borlama banyosu bileşiminin ve sıcaklığın borür tabakasının mikroyapısına etkileri.....	117
10.1.1.5 Borür tabaka kalınlığının kinetik açıdan incelenmesi.....	125
10.1.2 X-ışınları difraksiyon analizi sonuçları.....	127
10.1.3 Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları	129
10.1.4 Borür tabakalarının EPMA ve SEM ile karakterizasyon sonuçları.....	129
10.2 Mekanik Deney Sonuçları.....	133
10.2.1 Çekme deneyleri sonuçları.....	133
10.2.2 Kalıntı gerilme ölçüm sonuçları.....	134

10.2.3 Borür tabakasının mekanik özelliklerinin belirlenmesi (Rockwell C testi).....	134
10.2.4 Borür tabakasının sertlik ölçüm sonuçları.....	137
10.2.5 Borür tabakasının kırılma tokluğu deneyi sonuçları.....	141
10.3 Performans Deney Sonuçları.....	144
10.3.1 Düzlemsel eğmeli yorulma deneyleri sonuçları.....	144
10.3.1.1 Yorulma kırık yüzeylerin SEM ve SM ile incelemeleri	149
11. GENEL İRDELEME.....	151
12. SONUÇLAR	163
KAYNAKLAR.....	165
EKLER.....	173
ÖZGEÇMİŞ.....	237

KISALTMALAR

FeSi	: Ferrosilis
FeTi	: Ferrotitanyum
SiC	: Silisyumkarbür
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
XRD	: X-ışınları difraksiyon
EPMA	: Elektron probe mikro analizör
OM	: Işık Mikroskobu
SM	: Stereo Mikroskobu
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
SE	: İkincil elektron
BSE	: Geri saçılan elektron

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 : Çeşitli mühendislik uygulamalarında metalik malzemelerde.....	2
Çizelge 1.2 : Hava taşıtı parçalarında hasar nedenlerinin istatistiksel dağılımı.....	2
Çizelge 3.1 : Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması	15
Çizelge 3.2 : Kutu borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri.....	19
Çizelge 3.3 : Sıvı borlamada kullanılan çeşitli bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri.....	21
Çizelge 3.4 : Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri...	22
Çizelge 3.5 : Çeşitli altlık malzemelerin borlanması sırasında oluşan farklı borür fazlarının ergime sıcaklıkları ve mikrosertlik değerleri...	24
Çizelge 3.6 : Borlanmış sementit karbür malzemelerde oluşan üç farklı bölgedeki fazlar.....	25
Çizelge 3.7 : Çeşitli metal borürlerin bazı özellikleri.....	27
Çizelge 3.8 : Fe ₂ B ve FeB fazlarının tipik özellikleri.....	31
Çizelge 3.9 : Borlama işlemine tabi tutulmuş çeşitli demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları.....	33
Çizelge 4.1 : FeB ve Fe ₂ B fazları içerisinde borun difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjileri.....	41
Çizelge 4.2 : %0,45 C’lu çelikte, borlama sonrası uygulanan ısıtma işlemleriyle matris malzeme özgül hacminin değişimi.....	56
Çizelge 5.1 : Borür tabakaları ve ana malzemenin ısıtma genleşme katsayıları..	61
Çizelge 5.2 : AISI W4 çeliğinde borlama süresine bağlı olarak kırılma tokluğundaki değişim.....	65
Çizelge 6.1 : Aşınma kontrolü için genel malzeme seçim rehberi.....	68
Çizelge 6.2 : Metaller polimerler ve seramiklerin erozyon aşınma dayanımları açısından karşılaştırılmaları.....	80
Çizelge 6.3 : Kromlama ve Borlama uygulanmış çeliklerin sürtünme katsayıları.....	82
Çizelge 6.4 : Borlanmış ve borlanmamış malzemelerin statik sürtünme katsayıları.....	83
Çizelge 9.1 : Deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 316L çelik malzemenin kimyasal bileşimi.....	94
Çizelge 9.2 : Borlama işlemlerinin programları.....	99
Çizelge 10.1 : 316 L tipi paslanmaz çeliğin 950 °C’de 6 saat süreyle farklı borlama banyolarında borlanmasıyla elde edilen borür tabaka kalınlıkları.....	106
Çizelge 10.2 : Borlama banyosunu oluşturan bileşenlerin oranlarına bağlı olarak reaksiyon ürünlerinin hesaplanmış molları ve oranları...	114

Çizelge 10.3	: %5,3 FeSi katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.....	119
Çizelge 10.4	: %25 FeSi katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.....	120
Çizelge 10.5	: %42,9 FeSi katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.....	122
Çizelge 10.6	: Ticari ekabor 2 banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.....	124
Çizelge 10.7	: Farklı borlama teknikleri ile yapılan bazı borlama çalışmalarının aktivasyon enerjisi sonuçları.....	127
Çizelge 10.8	: %5,3, %25 ve %42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkı banyolarla ve Ekabor 2 banyosuyla 1050°C’de 6 saat süre ile borlanan numunelerin borür tabakalarının kesitlerinin orta bölgelerindeki B ve Ti oranları (yarı kantitatif).....	132
Çizelge 10.9	: Borlanmamış ve banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkılarının (%25 FeSi, %25 FeTi ve %25 SiC) ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile Borlanmış 316 L paslanmaz çelik numunelerin çekme deney sonuçları....	133
Çizelge 10.10	: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle ve Ekabor 2 banyosuyla 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakasındaki basma yönündeki kalıntı gerilme miktarları.....	134
Çizelge 10.11	: Banyo bileşimine %5,3 oranında FeSi ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları	138
Çizelge 10.12	: Banyo bileşimine %5,3 oranında FeTi ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	139
Çizelge 10.13	: Banyo bileşimine %5,3 oranında SiC ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	139
Çizelge 10.14	: Ekabor 2 ile 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	140
Çizelge 10.15	: Borlanmış malzemelerin ve literatürde yapılan çalışmalara ait sertlik değerleri.....	140
Çizelge 10.16	: Literatürde yapılan çalışmalara ait kırılma tokluğu değerleri...	143
Çizelge 10.17	: Borlanmamış, banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin Gerilme genliği (σ_a MPa) ile çevrim sayısı (N_f) değerleri.....	145
Çizelge 10.18	: Test edilen koşullar için Basquin bağıntısını içeren parametreler.....	147
Çizelge 11.1	: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle ve Ekabor 2 banyosuyla 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış ve borlanmamış numunelerin test edilen özelliklerinin kıyaslanması.....	161

Çizelge B. 1	: 316 L tipi paslanmaz çeliğin 950 °C’de 6 saat süreyle farklı borlama banyolarında borlanmasıyla elde edilen borür tabaka kalınlıkları.....	211
Çizelge B. 2	: 316 L tipi paslanmaz çeliğin 950 °C’de 6 saat süreyle farklı borlama banyolarında borlanmasıyla elde edilen borür tabaka kalınlıkları.....	212
Çizelge B. 3	: Borlama banyosunu oluşturan bileşenlerin oranlarına bağlı olarak reaksiyon ürünlerinin hesaplanmış molları ve oranları...	213
Çizelge B. 4	: Borlama banyosunu oluşturan bileşenlerin oranlarına bağlı olarak reaksiyon ürünlerinin hesaplanmış molları ve oranları...	214
Çizelge B. 5	: %5,3 FeTi katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.....	215
Çizelge B. 6	: %5,3 SiC katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.....	215
Çizelge B. 7	: %25 FeTi katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.....	216
Çizelge B. 8	: %25 SiC katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.....	216
Çizelge B. 9	: %42,9 FeTi katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.....	217
Çizelge B. 10	: %42,9 SiC katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.....	217
Çizelge B. 11	: Banyoya yapılan FeSi katkılarına ve sıcaklığa bağlı olarak borlama işleminde bor difüzyon katsayıları.....	218
Çizelge B. 12	: Banyoya yapılan FeTi katkılarına ve sıcaklığa bağlı olarak borlama işleminde bor difüzyon katsayıları.....	218
Çizelge B. 13	: Banyoya yapılan SiC katkılarına ve sıcaklığa bağlı olarak borlama işleminde bor difüzyon katsayıları.....	218
Çizelge B. 14	: Ticari Ekabor 2 ile yapılan borlamada sıcaklığa bağlı olarak bor difüzyon katsayıları.....	219
Çizelge B. 15	: Banyoya yapılan %5,3 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle borür tabakasının aktivasyon enerjileri (Q) ve frekans faktörü (Do) değerleri.....	219
Çizelge B. 16	: Banyoya yapılan %25 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle borür tabakasının aktivasyon enerjileri (Q) ve frekans faktörü (Do) değerleri.....	219
Çizelge B. 17	: Banyoya yapılan %42,9 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle borür tabakasının aktivasyon enerjileri (Q) ve frekans faktörü (Do) değerleri.....	220
Çizelge B. 18	: Ekabor 2 banyosuyla oluşmuş borür tabakasının aktivasyon enerjileri (Q) ve frekans faktörü (Do) değerleri.....	220
Çizelge B. 19	: Banyoya yapılan %5,3 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle borlanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.....	220

Çizelge B. 20	: Banyoya yapılan %25 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle borlanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.....	221
Çizelge B. 21	: Banyoya yapılan %42,9 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle borlanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.....	221
Çizelge B. 22	: Ticari ekabor 2 ile borlanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.....	222
Çizelge B. 23	: Banyo bileşimine %5,3 oranında FeSi ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	223
Çizelge B. 24	: Banyo bileşimine %5,3 oranında FeSi ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	223
Çizelge B. 25	: Banyo bileşimine %5,3 oranında FeTi ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	224
Çizelge B. 26	: Banyo bileşimine %5,3 oranında FeTi ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	224
Çizelge B. 27	: Banyo bileşimine %5,3 oranında SiC ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	225
Çizelge B. 28	: Banyo bileşimine %5,3 oranında SiC ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	225
Çizelge B. 29	: Ekabor 2 ile 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	226
Çizelge B. 30	: Ekabor 2 ile 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	226
Çizelge B. 31	: Banyo bileşimine %25 oranında FeSi ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları..	227
Çizelge B. 32	: Banyo bileşimine %25 oranında FeSi ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları..	227
Çizelge B. 33	: Banyo bileşimine %25 oranında FeSi ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	228
Çizelge B. 34	: Banyo bileşimine %25 oranında FeTi ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları..	228
Çizelge B. 35	: Banyo bileşimine %25 oranında FeTi ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları..	229
Çizelge B. 36	: Banyo bileşimine %25 oranında FeTi ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	229
Çizelge B. 37	: Banyo bileşimine %25 oranında SiC ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları..	230
Çizelge B. 38	: Banyo bileşimine %25 oranında SiC ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları..	230
Çizelge B. 39	: Banyo bileşimine %25 oranında SiC ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik	

	dağılımları.....	231
Çizelge B. 40	: Banyo bileşimine %42,9 oranında FeSi ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	231
Çizelge B. 41	: Banyo bileşimine %42,9 oranında FeSi ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	232
Çizelge B. 42	: Banyo bileşimine %42,9 oranında FeSi ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	232
Çizelge B. 43	: Banyo bileşimine %42,9 oranında FeTi ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	233
Çizelge B. 44	: Banyo bileşimine %42,9 oranında FeTi ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	233
Çizelge B. 45	: Banyo bileşimine %42,9 oranında FeTi ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	234
Çizelge B. 46	: Banyo bileşimine %42,9 oranında SiC ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	234
Çizelge B. 47	: Banyo bileşimine %42,9 oranında SiC ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	235
Çizelge B. 48	: Banyo bileşimine %42,9 oranında SiC ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.....	235
Çizelge B. 49	: 1050°C’de 2,4,6 ve 8 saat’de farklı katkılarla ve farklı oranlarda borlanmış numunelerin kırılma tokluk değerleri.....	236

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Bazı termokimyasal ve ileri teknoloji yüzey sertleştirme işlemlerinin karşılaştırılması.....	3
Şekil 3.1 : Demir- bor denge diyagramı.....	30
Şekil 4.1 : Bor konsantrasyonunun yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak değişimi.....	38
Şekil 4.2 : <001> Düzleminde FeB projeksiyonu.....	39
Şekil 4.3 : Fe ₂ B için <001> Düzlemine dik olarak borun atomik sıçraması sırasında, birbirlerine en yakın anda bir B ve Fe atomlarının konfigürasyonları.....	40
Şekil 4.4 : Konvansiyonel borlama sırasında borür tabakasının oluşum mekanizması (a) Çekirdeklenme aşaması (b) ve (c) <001> oryantasyonunda büyüme aşaması.....	42
Şekil 4.5 : FeB ve Fe ₂ B tabakalarında, demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan kolonsal büyümenin şematik gösterimi.....	43
Şekil 4.6 : Fe ₂ B ve geçiş bölgesi kalınlığının borlama süresi ile değişimi..	45
Şekil 4.7 : Borlama sonrası oluşabilecek borür tipleri.....	46
Şekil 4.8 : Borür tabakası kalınlığının tanımlanması.....	46
Şekil 4.9 : Borür tabakasındaki FeB ve Fe ₂ B fazlarının sertliğinin karbon miktarı ile değişimi.....	48
Şekil 4.10 : (a) FeB ve (b) Fe ₂ B fazlarının Cr miktarının artışına bağlı olarak sertliğindeki değişim. (O) Saf borür, (□) Çelik, (Δ) (Fe, Cr) ₂ B.....	50
Şekil 4.11 : Nikel miktarının artışına bağlı olarak, borür tabakasının sertliğindeki değişim.....	51
Şekil 4.12 : C15 çeliğinin yüzeyinde oluşturulan borür tabakasında B, Fe elementlerinin dağılımı.....	52
Şekil 4.13 : 37HS çeliğinin yüzeyinde oluşturulan borür tabakasında B, Si, Fe, Mn ve Cr elementlerinin dağılımı.....	53
Şekil 4.14 : Çeliklerde borür tabakası boyunca elementlerin şematik olarak dağılımı.....	54
Şekil 4.15 : Çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi.....	54
Şekil 5.1 : Borlanmış AISI 304 çeliğinde sertlik değerinin, borlanan yüzeyden mesafe ile ilişkisi.....	60
Şekil 5.2 : C45 çeliğinde borür tabakasının ve çelik malzemenin sertlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	60
Şekil 5.3 : Tek ve çift fazlı borür tabakalarında kalıntı gerilmelerin dağılımı.....	62
Şekil 5.4 : AISI 1045 Çeliğinde, soğutma hızının iç gerilme dağılımına etkisi a) Borlama Sonrası Soğuma Hızının, Kalıntı Gerilme Dağılımına Etkisi, b) Temperleme Sıcaklığının, Borür	

	Tabakasındaki Kalıntı Gerilme Dağılımına Etkisi.....	62
Şekil 5.5	: Borlama süresine bağlı olarak borür tabakasının kırılma tokluğunun değişimi.....	64
Şekil 6.1	: Çalışma koşulları ve aşınma türü arasındaki ilişkiyi belirten akış çizelgesi.....	69
Şekil 6.2	: Bilinen erozif aşınma mekanizmaları.....	72
Şekil 6.3	: Çarpma açısı ve hızı.....	72
Şekil 6.4	: Sünük ve kırılğan malzemeler için parçacık çarpma açısı ile aşınma hızının ilişkisi.....	74
Şekil 6.5	: 127µm SiC parçacıkları ile 152ms ⁻¹ hızda aşındırılmış 1100-0 alüminyum ve de alüminanın karşılaştırılması.....	74
Şekil 6.6	: Farklı malzemeler için küçük ve büyük parçacık kullanımına ve açığa bağlı olarak erozif aşınma hızları.....	76
Şekil 6.7	: Malzeme sertliğinin bir fonksiyonu olarak, 15° ve 90° için farklı sertlikteki değişik metallerin erozif aşınma dirençleri....	78
Şekil 6.8	: Çok sert ve çok elastik malzemelerin zıt aşınma koruma mekanizmaları.....	79
Şekil 6.9	: Orta karbonlu bir çelikte aşınma direncinin ısıt işlemsiz(●), B-C nitrasyon uygulanmış(▼) ve geleneksel borlanmış(▽) hallerinin karşılaştırılması.....	85
Şekil 6.10	: 1020 ve 5115 çeliklerinde uygulanan yüke karşılık, sürtünme kuvveti profili.....	86
Şekil 7.1	: Borür tabakalı paslanmaz çeliklerin düşük asitliğe sahip su içerisindeki korozyon davranışları.....	90
Şekil 9.1	: Borlanmış yüzeylerin karakterizasyonunda, sertlik deneylerinde ve kırılma tokluğu deneylerinde kullanılan numunelerinin şekli ve boyutları.....	95
Şekil 9.2	: ASTM E 8M standartına göre hazırlanmış çekme deney numunesinin şekli ve boyutları.....	95
Şekil 9.3	: Yorulma deneyi numunesinin şekli ve boyutları.....	95
Şekil 9.4	: Borlama deneyinde kullanılan AISI 304 paslanmaz çelik potanın geometrik şekli ve boyutları.....	96
Şekil 9.5	: EPMA cihazı.....	101
Şekil 9.6	: Zwick 400N marka çekme-basma cihazı.....	102
Şekil 9.7	: XSTRESS 3000 G2/G2R X-ray stress analyzer cihazı.....	102
Şekil 9.8	: Vickers ucu ile oluşturulan izin şematik gösterimi.....	104
Şekil 9.9	: Yorulma deneylerinin yapıldığı yorulma cihazı.....	104
Şekil 10.1	: AISI 316L paslanmaz çelik numunenin mikroyapısı.....	105
Şekil 10.2	: Borlama banyosuna değişik oranlarda yapılan katkıların borür tabakası kalınlığına etkisi (a) FeSi, (b) FeTi, (c) SiC.....	107
Şekil 10.3	: Borlama banyosuna aynı oranlardaki katkıların borür tabakası kalınlığına etkisi (Oranlar: a: %5,3, b: %25, c: %42,9).....	108
Şekil 10.4	: Kalsine borik asitin borür tabakasının kalınlığına etkisi (a) FeSi, (b) FeTi, (c) SiC.....	109
Şekil 10.5	: Borlama reaksiyonlarının Sıcaklıkla serbest enerji değişim grafiği.....	112
Şekil 10.6	: Borlama prosesinde izlenen reaksiyon ürünlerinin sıcaklıkla serbest enerji değişim grafiği.....	112
Şekil 10.7	: 950 °C de 6 saat de yapılan borlama işleminde (1/3Si)/(1/2B ₂ O ₃), (1/3Ti)/(1/2B ₂ O ₃) ve (1/3SiC)/(1/4B ₂ O ₃)	

	oranları ile borür tabakası kalınlığının değişimleri. (a) FeSi, (b) FeTi, (c) SiC.....	115
Şekil 10.8	: 850, 950 ve 1050 °C’de 6 saat süre ile yapılan borlama işlemlerinde katkıların stokiometrik oranlarına bağlı olarak sıcaklığın tabaka kalınlığına etkisi. (a) FeSi, (b) FeTi, (c) SiC..	116
Şekil 10.9	: 950 °C’de 6 saat süreyle borlanan AISI 316L tipi paslanmaz çelik numunelerin farklı banyo bileşimleri ile borlanmasıyla elde edilen bor tabakasının metalografik olarak hazırlanan kesitlerinin mikroyapı fotoğrafları.....	117
Şekil 10.10	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %5,3 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 850°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüsü.....	119
Şekil 10.11	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %5,3 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 850 °C – 950°C ve 1050°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin sıcaklığa bağlı olarak tabaka kalınlıklarındaki değişimi.....	120
Şekil 10.12	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %25 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 850°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüsü.....	121
Şekil 10.13	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %25 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 850 °C – 950°C ve 1050°C’de 2-4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin sıcaklığa bağlı olarak tabaka kalınlıklarındaki değişimi.....	121
Şekil 10.14	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 850°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüsü.....	122
Şekil 10.15	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 850 °C – 950°C ve 1050°C’de 2-4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin sıcaklığa bağlı olarak tabaka kalınlıklarındaki değişimi	123
Şekil 10.16	: Banyo bileşimindeki Ticari ekabor 2 ilavesiyle 850°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüsü.....	123
Şekil 10.17	: Ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış 316 L paslanmaz çelik numunelerin 2, 4 ve 6 saatte sıcaklığa (850 °C – 950°C ve 1050° C) bağlı olarak tabaka kalınlıklarındaki değişimi	124
Şekil 10.18	: Banyoya yapılan %5,3 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakasının X-ışınları difraksiyon paternleri.....	128
Şekil 10.19	: Farklı katkılarla (%25 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC) hazırlanan banyolarla 1050 °C’de 6 saat süre ile yapılan borlamada numune yüzeylerinde oluşan borür tabakasının SEM görüntüleri.....	130

Şekil 10.20	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%5,3 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) ilavesiyle 1050 °C’de 6 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulan AISI 316L paslanmaz çelik numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının görüntüleri.....	131
Şekil 10.21	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%5,3 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) ilavesiyle 1050 °C’de 6 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulan AISI 316L paslanmaz çelik numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının yüzeyindeki elementlerin X-ışını haritalamasının görüntüleri.....	132
Şekil 10.22	: Banyoya yapılan %5,3 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarının indentasyon ile oluşturulan izlerinin farklı büyütmelelerdeki OM görüntüleri.....	135
Şekil 10.23	: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle ve Ekabor 2 banyosuyla 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarının indentasyon ile oluşturulan izlerinin farklı büyütmelelerdeki OM görüntüleri.....	136
Şekil 10.24	: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarının indentasyon ile oluşturulan izlerinin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri.....	137
Şekil 10.25	: Rockweel C testi ile belirlenen tabaka özelliği sınıflandırma kriteri	137
Şekil 10.26	: Borlanmamış, banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin Gerilme genliği (σ_a MPa) ile kırılınca kadarki çevrim sayısı (N_f) grafiği.....	146
Şekil 10.27	: Borlanmamış, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin Yorulma Dayanım Sınır (YDS) değerleri.....	146
Şekil 10.28	: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin Borlanmamış numunelere göre yorulma ömründeki % Azalma - Gerilme genliği (σ_a MPa) grafiği.....	148
Şekil 10.29	: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle borlanmış numunelerin ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelere göre yorulma ömründeki % Artma - Gerilme genliği (σ_a , MPa) grafiği.....	148
Şekil A. 1	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %5,3 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 1050°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüsü.....	174
Şekil A. 2	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %25 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 1050°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüsü.....	174

Şekil A. 3	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 1050°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüsü.....	175
Şekil A. 4	: Banyo bileşimindeki Ticari Ekabor 2 ilavesiyle 1050°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüsü.....	175
Şekil A. 5	: Banyoya yapılan %5,3 oranındaki katkılara ve sıcaklığa bağlı olarak borlamada oluşan borür tabakası kalınlığının karesinin süre ile değişimi ($d^2 - t$ değişimi).....	176
Şekil A. 6	: Banyoya yapılan %25 oranındaki katkılara ve sıcaklığa bağlı olarak borlamada oluşan borür tabakası kalınlığının karesinin süre ile değişimi ($d^2 - t$ değişimi).....	177
Şekil A. 7	: Banyoya yapılan %42,9 oranındaki katkılara ve sıcaklığa bağlı olarak borlamada oluşan borür tabakası kalınlığının karesinin süre ile değişimi ($d^2 - t$ değişimi).....	179
Şekil A. 8	: Ekabor 2 ilavesiyle sıcaklığa bağlı olarak borlamada oluşan borür tabakası kalınlığının karesinin süre ile değişimi ($d^2 - t$ değişimi).....	180
Şekil A. 9	: Banyoya yapılan %25 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakasının X-ışınları difraksiyon paternleri.....	181
Şekil A. 10	: Banyoya yapılan %42,9 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakasının X-ışınları difraksiyon paternleri.....	182
Şekil A. 11	: Borlama banyosundaki ticari ekabor 2 ile 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin X-ışınları difraksiyon paterni..	183
Şekil A. 12	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%25 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) ilavesiyle 1050 °C’de 6 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulan AISI 316L paslanmaz çelik numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının görüntüleri.....	183
Şekil A. 13	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) ilavesiyle 1050 °C’de 6 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulan AISI 316L paslanmaz çelik numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının görüntüleri.....	184
Şekil A. 14	: Ticari ekabor 2 ile 1050 °C’de 6 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulan AISI 316L paslanmaz çelik numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının görüntüleri.....	184
Şekil A. 15	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%25 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) ilavesiyle 1050 °C’de 6 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulan AISI 316L paslanmaz çelik numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının yüzeyindeki elementlerin X-ışını haritalamasının görüntüleri.....	185
Şekil A. 16	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) ilavesiyle 1050 °C’de 6 saat süre ile borlama	

	işlemine tabi tutulan AISI 316L paslanmaz çelik numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının yüzeyindeki elementlerin X-ışını haritalamasının görüntüleri.....	185
Şekil A. 17	: Ekabor 2 banyosuyla 1050°C’de 6 saat süre ile Borlanmış 316 L paslanmaz çelik numunelerin yüzeyindeki elementlerin X ışını haritalamasının görüntüleri.....	186
Şekil A. 18	: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi katkıların ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarının kesitlerindeki çizgisel EDS analizi.....	187
Şekil A. 19	: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeTi katkıların ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarının kesitlerindeki çizgisel EDS analizi.....	188
Şekil A. 20	: Banyoya yapılan %25 oranındaki SiC katkıların ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarının kesitlerindeki çizgisel EDS analizi.....	189
Şekil A. 21	: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarının indentasyon ile oluşturulan izlerinin farklı büyütmelelerdeki OM görüntüleri.....	190
Şekil A. 22	: Banyoya yapılan %42,9 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarının indentasyon ile oluşturulan izlerinin farklı büyütmelelerdeki OM görüntüleri.....	190
Şekil A. 23	: Ticari ekabor 2 ile 1050°C’de 6 saat süre ile Borlanmış 316 L paslanmaz çelik numunenin indentasyon ile yapışma deneyi sonrası OM görüntüleri.....	191
Şekil A. 24	: Banyo bileşimine %5,3 oranında FeSi ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) ’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları...	192
Şekil A. 25	: Banyo bileşimine %5,3 oranında FeTi ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) ’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları...	193
Şekil A. 26	: Banyo bileşimine %5,3 oranında SiC ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) ’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.....	194
Şekil A. 27	: Banyo bileşimine %25 oranında FeSi ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) ’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları...	195
Şekil A. 28	: Banyo bileşimine %25 oranında FeTi ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) ’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları...	196
Şekil A. 29	: Banyo bileşimine %25 oranında SiC ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) ’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.....	197
Şekil A. 30	: Banyo bileşimine %42,9 oranında FeSi ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) ’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları...	198
Şekil A. 31	: Banyo bileşimine %42,9 oranında FeTi ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) ’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları...	199

Şekil A. 32	: Banyo bileşimine %42,9 oranında SiC ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) 'de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları...	200
Şekil A. 33	: Ticari ekabor 2 ile 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) 'de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.....	201
Şekil A. 34	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%5,3, %25 ve %42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) ilavesiyle 850 (a), 950 (b) ve 1050 °C'de 2, 4, 6, 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzey sertlik değerleri.....	202
Şekil A. 35	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%5,3, %25 ve %42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) ilavesiyle 850, 950 ve 1050 °C'de 2 (a), 4 (b), 6 (c) ve 8 (d) saat süre ile borlanmış numunelerin yüzey sertlik değerleri.....	203
Şekil A. 36	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%5,3, %25 ve %42,9 oranlarında FeSi (a), FeTi (b) ve SiC (c) katkıları ile) değişiminin kırılma tokluğu ile ilişkisi.....	204
Şekil A. 37	: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%5,3, %25 ve %42,9 oranlarında FeSi (a), FeTi ve SiC katkıları ile) değişiminin ve ekabor 2 banyo bileşiminin kırılma tokluğu ve yüzey sertlik değerleri ile ilişkisi.....	205
Şekil A. 38	: ASTM E739'a göre çizilen Borlanmamış numunelerin, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerle Gerilme genliği (σ_a MPa) ile kırılmacaya kadarki çevrim sayısı (Nf) grafiği (a) Borlanmamış, (b) FeSi Katkısıyla borlanmış, (c) FeTi katkısıyla borlanmış, (d) SiC katkısıyla borlanmış, (e) Ekabor 2 ile borlanmış.....	206
Şekil A. 39	: Borlanmamış numunelerin, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin iki farklı Gerilme genliğinde (σ_a MPa) stereo mikroskop ile yorulma kırık yüzey görüntüsü.....	208
Şekil A. 40	: Borlanmamış numunelerin, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin 796 MPa Gerilme genliğinde (σ_a MPa) taramalı elektron mikroskop ile yorulma kırık yüzey görüntüsü.....	209
Şekil A. 41	: Borlanmamış numunelerin, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin 887 MPa Gerilme genliğinde (σ_a MPa) taramalı elektron mikroskop ile yorulma kırık yüzey görüntüsü.....	210

SEMBOL LİSTESİ

R_a	: Yüzey pürüzlülük değeri
R_c	: Yapışma özelliklerinin belirlenmesi, Rockwell C Testi
K_{ic}	: Kırılma tokluğu
δ	: Sertlik ölçüm ucuna bağlı değişen geometrik faktör
σ_r	: Kalıntı gerilme
S'_f	: Yorulma dayanım katsayı sabiti
b	: Yorulma dayanım üssü
P	: Yük
c	: Radyal yarı çatlak boyu,
A	: $0,028(E/H)^{1/2}$
E	: Elastisite Modülü
H	: Borür tabakasının sertliği, VSD, kg/mm ²
h	: Borlama süresi
m	: Aşınmış parçanın ağırlığı, kg
t	: İşlem süresi, s
k	: Deneysel sabit
v	: Çarpma hızı, m/s
n	: Hız üstü
d	: Tabaka Kalınlığı, cm
D	: Difüzyon Katsayısı, cm ² /sn
Do	: Frekans Faktörü, cm ² /sn
Q	: Aktivasyon Enerjisi, kJ/mol
R	: Gaz Sabiti, 8,30566 J/mol.°K
T	: Sıcaklık, °K
M	: Eğme momenti, N.m
σ	: Eğme gerilmesi, MPa
D	: Numune çapı, mm
R	: Gerilme Oranı

AISI 316 L TİPİ PASLANMAZ ÇELİĞİN TERMOKİMYASAL DİFÜZYON YÖNTEMİ İLE BORLANMASINDA, BORLAMA BANYOSU BİLEŞENLERİNİN BORÜR TABAKASI ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

ÖZET

Malzeme konusundaki bilimsel ve teknik ilerleme eğilimlerinin biri, endüstri için yeni malzemelerin yaratılması ve var olan malzemelerin kalitelerinin artırılmasıdır. Amaç; yeni malzemelerin ağırlıklarını düşürerek ve işlenebilirliğini artırarak, makina ve mekanizmalara daha yüksek emniyet sağlamaktır. Söz konusu problemlerin çözümü endüstriyel parçaların pürüzlülük, sertlik, sertleştirilebilirlik, aşınma ve yorulma dayanımları gibi yüzey özellikleriyle ilgilidir. Endüstriyel parçaların emniyeti yüksek oranda yüzey özellikleriyle ilgilidir. Parça yüzeyi tribolojik, mekanik ve çevrimsel özellikleri korurken, parçalarda kullanılan malzemeler mukavemet ve direngenlik sağlar. Kütle azaldıkça sürtünmeye karşı aşınma direnci artar. Endüstriyel parçaların servis ömürleri ve emniyetlerinin artırılması kaynak ve enerji tasarrufu sağlar, bu nedenle modern teknolojiler açısından yüzey özelliklerinin geliştirilmesi çok önemlidir.

Östenitik paslanmaz çelik yüksek sıcaklık dayanımı ve korozyon ortam direnci açısından malzemeler arasında önemli bir yer tutar. Mekanik özellikler yumuşak çeliklerle kıyaslanabilse de atmosferik korozyon direnci ve birçok sulu ortamdaki ve oksitleyici asitlere karşı dayanımı mükemmeldir. Bilhassa 316 L tipi çeliğe molibden ilavesi fosforik asit, asetik asit ve klor çözeltilerindeki çukurcuk korozyonuna karşı dayanımını en az sülfürik asit çözeltileri kadar artırır. Ayrıca, genel olarak paslanmaz çelikler düşük aşınma dayanımlarıyla karakterize edilir. Bu durum yüzey performansını korozyon özelliklerini etkilemeden artırmak için, iyon implantasyonu ile nitrürleme, plazma nitrürleme ve borlama gibi birçok yüzey işleminin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca özellikle daha yumuşak malzemelerden yapılmış parçaların yüzeylerine korozyon ve aşınmaya karşı oksit, nitrür ve karbür gibi sert film kaplayarak, birçok parçanın servis ömrünün artırılabilirdiği bilinmektedir. Bununla birlikte birçok parça, kullanımı sırasında tekrarlı yüklere maruz kalmaktadır, bu tür sert kaplamaların malzemelerin yorulma davranışı üzerine etkilerini belirlemek son yıllarda önem kazanmış bir konudur. AISI 316 L tipi çelikler temel olarak, biyomedikal uygulamalarda, otomotiv ve gemi endüstrisinde, ısıtma, soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde ve basınç kapları sistemlerinde kullanılmaktadır.

Metallere genellikle farklı sertleştirme işlemleri uygulanmaktadır. Ancak bunlar istenilen mekanik özellikler kadar metalin orjinal kimyasal kompozisyonu ile sınırlıdır. Yüzeyde bölgesel iyileştirme sağlayan termokimyasal yöntemler ile ana metalden farklı mikroyapı ve mekanik özellikler elde edilir.

Bilinen iki yöntem vardır;

- Birincisi, küçük atomların metal yüzeyine difüzyonu ile arayer katı çözeltisi oluşumu.
- İkincisi, ana metal ile difüze olan atomlar arasında kimyasal reaksiyon ile yüzeyde yeni bir kimyasal kompozisyon oluşumudur. Örnek olarak, borlama verilebilir.

Borlama farklı malzemelere (demir, demir dışı ve sermet) uygulanabilen termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Borlama işlemi gaz borlama, tuz banyosunda elektrolizle veya elektrolizsiz olarak ve kutu borlamayı içeren farklı şekillerde gerçekleştirilebilir. Elde edilen tabakalar malzeme yüzeyine oldukça yüksek sertlik, gelişmiş yüzey özellikleri ve korozyona karşı dayanım sağlar. Borlama işlemi 800 ve 1100 °C sıcaklıkları arasında yapılmaktadır yüzeye difüze olan bor atomları ile yüzeyde 1600–2000 HV sertlik elde edilmektedir. Borlama işlemi sürtünme ve aşınma özellikleriyle ilgili yüzey işlemleri arasında iyi bir seçimdir. Termokimyasal bir yüzey işlemi olan borlama karbon çelikleri, düşük alaşımlı çelikler, takım çelikleri ve paslanmaz çelikleri içeren geniş ölçüdeki çelik alaşımlarına uygulanabilmektedir. Ayrıca, nikel, kobalt, molibden ve titanyum alaşımları yüzeyde yüksek sertlik ve aşınma dayanımı elde etmek için de borlanabilmektedir. Birçok geçiş metalinin diborürlerindeki güçlü kovalent bağ, yüksek ergime noktası, mekanik mukavemet, elastisite modülü, sertlik değeri ve kimyasal inertlik sağlamaktadır. Borürler genellikle birçok durumda mükemmel kimyasal ve termal dayanım sağlayan düşük serbest enerjisiye sahiptirler. Borürler oksit olmayan seramiklerdir ve kırılgan yapıya sahiptirler. Bor atomlarının malzeme yüzeyine difüzyonu ile gerçekleşen borlama işleminde demir bor denge diyagramına göre demir kristal kafesine difüze olan bor iki tip demir borür oluşturmaktadır (FeB ve Fe₂B). FeB fazının daha kırılgan olması ve aralarındaki termal genleşme katsayısı farkının yüksek olması nedeniyle genellikle tek fazlı Fe₂B borür tabakası tercih edilmektedir. Tek fazlı Fe₂B tabakası endüstriyel uygulamalarda da FeB içeren çift fazlı tabakadan daha çok tercih edilmektedir. Tek fazlı Fe₂B tabakası iyi derecede aşınma direnci ve mekanik özelliklere sahiptir. Borür tabakası büyüme kinetiği borlama süresi ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak FeB ve Fe₂B tabakaları derinliğinin ölçülmesi ile belirlenir. Yüzey ve ara yüzey morfolojisi arasında basit bir ilişki yoktur. Malzeme ara yüzeyindeki Fe₂B kolonsal yapısı uçtan büyüme mekanizması ile açıklanır. Fe₂B sünek malzeme içerisinde ilerlerken, FeB, sert Fe₂B matrisi içinde büyür ve bunun sonucunda farklı bölgesel gerilmeler ve ara yüzeyde bozulmalar oluşur. Borürler oksit olmayan seramiklerdir ve çoğu kez kırılgandır. Genellikle, borür çelik ara yüzeyi düşük ve orta karbonlu çelikler için kolonsal yapıdayken, yüksek alaşımlı çeliklerde düz bir yapıya sahiptir.

Yapılan çalışmalarda, malzemelerin yüzey özelliklerinin termokimyasal borlama yöntemi ile geliştirilebileceği bulunmuştur. Ancak, malzemelerin yorulma ve aşınma özelliklerine borür tabakasının etkisi hakkında çok az bilgi bulunmaktadır. Ayrıca, tuz banyosundaki boraks ve borik aside farklı oranlarda ferroalaşım (ferrosilis ve ferrotitanyum) ve silisyum karbür ilavesinin borür tabakası kalınlığı ve kinetiği üzerindeki etkileri hakkında bilgi bulunmamaktadır. Bu çalışmada, AISI 316 L tipi paslanmaz çeliklerin termokimyasal difüzyon yöntemiyle borlanması, banyo bileşenlerinin borür tabakasının oluşum mekanizmasına ve borür tabakası özelliklerine etkileri incelenmiştir. Termokimyasal borlama işlemi için gerekli bor

içerikli maddeler (boraks ve borik asit), ferroalaşımlar (ferrosilis ve ferrotitanyum) ve silisyum karbür ile belli oranlarda karıştırılarak, borlama için farklı banyo bileşimleri oluşturulmuştur. Çalışmalarda ticari Ekabor 2 bor banyosu da mevcut banyolarla kıyaslanmak için kullanılmıştır. Değişik borlama banyoları ile farklı sıcaklık ve sürelerde borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemleri sonrasında borür tabakasının özelliklerini belirlemek amacıyla çeşitli deneyler yapılmıştır:

Borür tabakasının yüzey karakterizasyon deneyleri:

- Işık mikroskobu ile borür tabaka yüzeylerinin karakterinin mikroskobik olarak gözlenmesi ve kaplama kalınlıklarının ölçülmesi,
- X-ışınları difraksiyon tekniği ile oluşan fazların belirlenmesi,
- Yüzey pürüzlülüklerinin belirlenmesi,
- Elektron probe mikro analizör (EPMA) ile borür tabakanın karakterizasyonunun belirlenmesi ve yüzeydeki borür tabakasının kalitatif olarak miktarlarının belirlenmesi,
- Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EPMA ile borür tabaka morfolojisinin incelenmesi,

Mekanik deneyler:

- Çekme deneyi ile mekanik özelliklerin belirlenmesi,
- Kalıntı gerilme ölçümlerinin belirlenmesi,
- Borür tabakalarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi (Rockwell C Testi),
- Borlanan yüzeyin sertlik profilinin çıkarılması,
- Sertlik yöntemi ile borlanmış yüzeyin kırılma tokluğunun belirlenmesi,

Performans deneyleri:

- Düzlemsel eğmeli yorulma deneyi,
- Taramalı elektron mikroskobu yorulma yüzeylerinin incelenmesi

Deneyisel çalışmaların sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Borlama işleminde oluşan borür tabakasının kalınlığı sıcaklık, süre ve FeSi, FeTi ve SiC katkıların oranının artmasıyla artmaktadır. En büyük tabaka kalınlığına düşük oranlardaki katkılarda FeTi ile, yüksek oranlardaki katkılarda, kalsine borik asit / boraks oranı düşük iken FeTi ile, yüksek iken FeSi ile sağlanmaktadır.
- Banyodaki borik asit oranının artması borür tabakasının kalınlığını ve banyonun akışkanlığını arttırmaktadır. Katkılarının oranlarının artmasıyla banyo akışkanlığı azalmaktadır.
- Borlama işleminde borür tabakasındaki artışta sıcaklığın etkisi yüksek orandaki katkılarla daha belirgindir. Ti en büyük etkiye sahiptir.
- Numunelerin yüzeyinde oluşan borür tabakaları sürekli ve homojendir. FeTi katkılı banyo ile oluşan borür tabakasının yüzeyi en homojen ve en yoğun, FeSi katkılı banyo ile oluşan borür tabakasının yüzeyi en kaba tanelidir.
- Borlanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri borlama sıcaklığının ve banyoya yapılan katkıların oranlarının artmasıyla artmaktadır. Borlama

süresinin ve katkı maddeleri cinslerinin pürüzlülüğe etkisinde ise ilişki bulunmamaktadır. Ancak, 1050 °C’ de yapılan borlama ile elde edilen numunelerden %25 FeTi ilavesiyle borlanmış numunenin yüzey pürüzlülük değeri, diğer katkılarla borlananlara göre düşüktür.

- Tüm banyo bileşimlerinde borlama ile oluşan borür tabakasında temel faz Fe₂B fazıdır. FeTi ve SiC katkılı banyolarla borlamada FeB fazı oluşmazken, FeSi katkılı ve Ekabor 2 ile banyolarla borlamada FeB fazı oluşmuştur.
- Borlama işlemi malzemenin akma mukavemetini arttırmıştır. En yüksek değeri FeSi katkılı banyo ile borlanan numune vermiştir. Borlanan numunelerin çekme deneyindeki uzama oranları, orjinal numunelere göre daha düşüktür.
- Borür tabakasının basma yönündeki kalıntı gerilme miktarları sıcaklığın artmasıyla artmaktadır. Sıcaklığın 850 °C’den 1050 °C’ye yükselmesi kalıntı gerilme miktarını, %25 oranındaki FeSi, FeTi, SiC katkılarla ve Ekabor 2 ile, sırayla, 1,1 kat, 3 kat, 3 kat ve 2,5 kat arttırmıştır.
- Borür tabakasında batıcı uçla oluşturulan deformasyonda çevresel çatlaklar meydana gelmekte, uygulanan yük noktasına dik çatlaklar oluşmamaktadır. Borür tabakalarının özellik sınıflandırılması HF1-HF2 seviyesindedir.
- Borlanmış malzemelerin yüzey sertlik değerleri, borlama işleminin sıcaklığına ve süresine bağlı olarak artmaktadır. Borlanmış malzemelerin yüzey sertlik değerleri borlanmamış AISI 316 L paslanmaz çelik malzemeye göre 9 – 12 kat daha yüksektir.
- Borlama süresinin ve katkı oranlarının artması ile borür tabakasının kalınlığı ve sertliği artmakta, kırılma tokluğu düşmektedir. En düşük kırılma tokluğu FeTi katkılı banyosuyla oluşan borür tabakasında, en yüksek kırılma tokluğu da ekabor 2 banyosuyla oluşan borür tabakasında elde edilmiştir.
- Borlanmamış ve banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin yorulma dayanım sınırları sırasıyla 749, 614, 749, 658 ve 591 MPa’dır. FeSi, SiC katkılı banyolarla ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin yorulma dayanım sınırları borlanmamış numunelere göre azalmıştır. FeTi katkısıyla borlanmış numunelerin yorulma dayanım sınırları borlanmamışlarla aynı değerlerdedir. Ticari ekabor 2 ile borlanmış numuneler en düşük yorulma dayanım sınırına sahiptir.
- FeSi, FeTi ve SiC katkılı banyo ile ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerde yorulma dayanımı; borlanmamış numunelere göre gerilme genliğinin artması ile azalmıştır.

THE EFFECTS OF BORONIZING BATH COMPOSITIONS ON THE BORONIZING BY THERMOCHEMICAL DIFFUSION TECHNIQUE OF AISI 316 L TYPE STAINLESS STEEL ON THE BORIDE LAYER PROPERTIES

SUMMARY

One of the trends in scientific and technical progress on the subject of material is the creation of new materials for industry, further, quality improvement of existing materials. The aim is to provide higher reliability of machines and mechanisms, reducing their weight per unit of power, improving processability of new materials. Solution of the mentioned problems is concerned with the following surface layer characteristics of industrial parts: roughness, hardness and hardening depth, wear and cyclic fatigue resistance. Operational reliability of industrial parts highly depends on their surface. Material of the parts assures their strength and rigidity, while the surface secures necessary tribological, mechanical and cyclic characteristics. Therefore, wear resistance of friction units increases, while their mass gets smaller. Lifetime and reliability increase of the industrial parts provide savings of resources and energy, so various methods of surface treatment are very important for modern technologies.

Austenitic stainless steels represent an important class of material which possesses excellent cryogenic properties and good high-temperature strength. Their mechanical properties are comparable to those of mild steels but offer an excellent general corrosion resistance in the atmosphere, in many aqueous media and oxidizing acids. Particularly, the addition of molybdenum in type 316L provides pitting resistance in phosphoric and acetic acids and chloride solutions, as well as corrosion resistance in sulphurous acid. However, in general, stainless steels are described as having relatively poor wear resistance. This fact has led to the development of a number of surface treatments in order to improve their tribological performance without compromising their corrosion resistance, such as nitriding by ion implantation, pulsed plasma nitriding and plasma immersion ion implantation, boronizing. Also, it has been well documented that it is possible to extend the service life of many different parts and components, made of relatively soft substrates which are subjected to corrosion and wear, by means of the use of thin hard films such as oxides, nitrides and carbides applied onto their surfaces. However, since such parts could also be subjected to cyclic loading during service, it is also of importance to evaluate the effect of such hard films on the fatigue properties of the coated substrate, an area which became an important research topic in the past few years. Mainly, AISI 316 L type steels are used in biomedical applications, automotive industry, ship industry, HVAC (heat ventilation air condition climate) systems and pressure vessel systems.

Different superficial hardening processes are commonly applied to metals. Those are generally limited by the metal's original chemical composition as well as the required mechanical properties. Thermo chemical methods, for which the superficial

composition is locally modified, can cause microstructures and mechanical properties that are completely different from those of the basic metal.

Two methods for that are known:

- In the first one, diffusing small atoms in the metal surface leads to the formation of an interstitial solid solution,
- In the second, a chemical reaction between the diffused atoms and those of the basic metal leads to the formation of new compounds in the superficial layer. An example of this process is given by the boronizing treatment.

Boriding or boronizing is a thermochemical surface hardening technique used for boride-type coating that can be applied to a large range of materials (ferrous metals, non-ferrous metals and cermets). Boriding can be performed in numerous ways, including gas boriding, molten salt boriding (with and without electrolysis) and pack boriding. The produced layers provide an extremely high hardness, good tribological properties and anti-corrosion resistance of the treated surfaces. It is a surface treatment process in which boron atoms are diffused into the material surface between 800 and 1100 °C. A boride layer having hardness (HV) of 1600–2000 is formed by penetrating and diffusing boron to the surface. Boronizing is a prominent choice for a wide range of tribological applications where the control of friction and wear is of primary concern. Boronizing being a thermochemical diffusion treatment can be applied to a wide range of steel alloys including carbon steel, low alloy steel, tool steel and stainless steel. In addition, materials such as nickel base alloys, cobalt base alloys, molybdenum and titanium can be boronized to obtain very high hardness and wear resistance on their surfaces. The strong covalent bonding in most transition metal diborides is largely responsible for their high melting points, high mechanical strength, elastic module, hardness values and chemical inertness. Borides generally have high negative free energies of formation, which gives them excellent chemical and thermal stability under many conditions. Borides are non-oxide ceramics and could be very brittle. They are formed by introducing boron atoms by diffusion onto a substrate surface. According to the Iron–Boron equilibrium diagram, diffusing boron into the iron crystalline lattice leads to the formation of two kinds of iron borides (FeB and Fe₂B). Generally, a single-phase layer of Fe₂B boride is preferred to the double-phase layer for two main reasons: the important brittleness of the FeB phase and the large difference between the expansion coefficients of the two kinds of borides. The formation of a monophase (Fe₂B) is more desirable than a double phase layer composed of FeB and Fe₂B for industrial applications. A single Fe₂B layer produces superior wear resistance and mechanical properties. The growth kinetics of the boride layer is analyzed by measuring the depth of the layer FeB and Fe₂B as a function of the boriding time within a temperature range. There is no simple relation between texture and interface morphology. The columnar morphology of Fe₂B on the substrate interface is explained by a tip-enhanced growth mechanism. The FeB is a hard phase growing in a hard Fe₂B matrix, whereas Fe₂B grows in the ductile substrate matrix and results in different local stresses and distortion at the interface. Borides are non-oxide ceramics and are often brittle. Generally, the boride-steel interface tends to be columnar in low or medium carbon steels, and flat in high alloy steels.

In the researches done, it has been found that surface properties of the material surface coated with boride layers by thermochemical diffusion technique are improved, but so far there is very little information available about the effect of boron layer on the fatigue behavior and erosive wear of metals. Also, there is no information available about the effect of boride layer thickness and kinetics on mixture of the ferroalloys (ferrosilicon and ferrotitanium) and silicon carbide at different ratios, borax and boric acid in the salt bath.

In this study, the effects of boronizing bath compositions on the boride layer properties and the formation mechanism of the boride layer during boronizing of AISI 316 L type stainless steel by thermo-chemical diffusion technique are investigated. Boronizing bath consists of a mixture of ferroalloys (ferrosilicon and ferrotitanium) and silicon carbide at different ratios, also borax and boric acid. Also, Ekabor 2 in salt bath is used for comparison with the existing bath. Boronizing process is performed at different temperatures and durations with various boronizing bath compositions. After the boronizing process, various tests (the surface characterization tests, mechanical tests and performance test) to determine the properties of boride layer are done.

The following tests are performed for designing the properties of the boride layer.

The surface characterization tests:

- The inspection of the characteristic of the surfaces of the boride layer with the optical microscope and kinetic studies
- The determination of boride layer phases with X-ray diffraction,
- The determination of surface roughness on the boronized sample,
- The characterization of boride layer with EPMA (Electron probe micro analyzer) and the quantity determination of the boron elements of boride layers on the surface as a qualitative analysis,
- The inspection of boride layer morphology with SEM (scanning electron microscope) and EPMA

Mechanical Tests:

- The determination of mechanical properties with the tensile test,
- The determination of residual stress analysis on the boronized samples,
- The determination of mechanical properties of the boride layer with Rockwell C tests,
- The inspection of the surface hardness profile of the boronized samples with micro hardness tester,
- The determination of the fracture toughness of boronized surface with micro hardness tester

Performance Tests:

- Fatigue tests of boronized samples,
- Fatigue fracture surface inspections with the scanning electron microscope

The results of this investigation can be summarized as follows,

- Thickness of boride layer that has occurred with boronizing technique increased with increasing of the temperature, time and ratio of additives (FeSi, FeTi and SiC). The largest boride layer thickness was obtained with FeTi at the low ratio. Also, the largest boride layer thickness acquire with FeTi (when the calcinated boric acid and borax ratio was low) and FeSi (when the calcinated boric acid and borax ratio was high).
- The increasing of boric acid ratios at the bath increases both the thickness of the boride layer and the fluidity of the boronizing bath. The increasing of the ratio of FeSi, FeTi and SiC additives decreases bath fluidity.
- The effect of temperature on the thickness of the boride layers is significantly higher in case of boronizing bath with additives at higher ratios. Ti has the greatest effect.
- The boride layers of the boronized samples show continuity along the surface. The surface structure of boride layer is more homogeneous and denser in case of FeTi additive, while the boride layer possesses coarse grains in case of FeSi additive.
- The surface roughness values of the boronized samples have been increased by both increasing the additive ratio and increasing the boronizing temperature. There is no proof about the effect of the boronizing time and the type of the additives on the roughness. However, the surface roughness values of the sample that has been boronized with 25 % FeTi additive at 1050 °C temperature is lower than that of the samples boronized with the other additives.
- The basic phase in the boride layer occurred by boronizing technique in case of all bath compositions has been Fe₂B. The FeB phase has not occurred in case of the boronizing bath doped with FeTi and SiC. Also, FeB phase occurred in case of boronizing by bath doped with FeSi and ekabor 2.
- Yield strength of the material increases as a result of the boronizing process. The sample boronized with the bath having FeSi additive gives much greater values as compared to the other baths. The elongation ratio of the boronized samples is low compared to the unboronized samples. Also, they present discrepancy among themselves.
- The residual stress of boride layer increases with increasing temperature. When the temperature increases from 850 °C to 1050 °C, the residual stresses are 1.1 times higher with FeSi, 3 times higher with FeTi, 3 times higher with SiC and 2.5 times higher with Ekabor 2 additions.
- The cracks as a environment in the deformation formed with Rockwel C trace in the boride layer and cracks perpendicular to the applied force occurred. The feature classification of boride layer is HF1-HF2.
- The surface hardness values of the boronized materials increase depending on the temperature and the duration of the boronizing process. Surface hardness values of the boronized materials are 9-12 times higher than that of the boronized materials.
- The thickness and the hardness of boride layer increase with increasing of the boronizing duration and the contribution ratio, but the fracture toughness decreases. The lowest fracture toughness has been obtained with the boride

layer occurred by bath composition doped with FeTi. Also, the highest fracture toughness has been acquired with the boride layer occurred by bath composition with ekabor 2

- The fatigue endurance limit of the unboronized and the boronized samples by bath composition doped with FeSi FeTi, SiC and ekabor 2 are respectively 749, 614, 749, 658 and 591 MPa. The fatigue endurance limit of the boronized samples by bath composition doped with FeSi, SiC and ekabor 2 decreases compared with the unboronized samples. But, the fatigue endurance limit of the boronized samples by bath composition doped with FeTi has been about the same value with the fatigue endurance limit of the unboronized samples. The boronized samples with ekabor 2 have the lowest fatigue endurance limit.
- The fatigue strength of the samples boronized by bath composition doped with FeSi FeTi, SiC and ekabor 2 have been decreased with increasing of stress amplitude compared with that of the unboronized samples.

1. GİRİŞ

Malzemelerin kütsel ve yüzey özellikleri arasındaki ilişki uzun yıllardan beri araştırma konusu olmaktadır. Bir malzemedan beklenen performans, kütsel ve yüzeyssel özelliğe bağıdır. Malzemenin yüzey özelliğindeki herhangi bir değışim, malzeme fonksiyonlarını büyük ölçüde etkilemektedir. Son yıllarda malzeme yüzey özelliklerinin rolü, birçok çalışmanın ilgisini oluşturmıştır. Yüzey enerjisi, yüzey gerilmesi, yüzeyin aktivitesi ve yüzeyle ilgili problemler bilimsel alanda büyük önem kazanmıştır [1].

Malzemeler bulundukları çevrede, çevre-yüzey etkileşimi sonunda bozulmalara uğrayabilirler. Malzeme ile çevre arasında fiziksel ve kimyasal açıdan herhangi bir reaksiyon oluşması, malzemenin hasarına neden olabilmektedir. Üstün özelliklere sahip malzemeler elde etmek için, yüzey bilimi ve teknolojisi, gelişmiş ölkelerde büyük önem kazanmıştır. Yüzey işlemleri, en yaygın kullanım alanını demir ve demir esaslı ürünler arasında bulmuştur. Yüzey işlemlerini, kaplama ve yüzey dönüşüm işlemleri olarak iki sınıfa ayırmak mümkündür. Kapsama metal yüzeyine bir element veya bileşiğin biriktirilerek bir kabuk oluşturulması işlemidir. Yüzey dönüşüm işlemlerinde ise, yüzeyin iç yapısı ve/veya kimyasal yapısının değıştirilmesi söz konusudur [1,2].

Yüzey işlemleri; malzemenin sertlik, süneklik, yorulma, aşınma, korozyon, ısısal ve darbesel şok gibi mekanik ve tribolojik özelliklerinin bir veya birkaçını geliştirmek ve üretim maliyetini düşürmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu özellikler arasında, parçanın aşınma, yorulma ve korozyona karşı direncinin arttırılması önem açısından ilk sırada yer almakta ve sanayide uygulanan işlemlerin büyük çoğunluğunun amacını oluşturmaktadır. Aşınma, yorulma ve korozyon, dünyada her yıl önemli maddi kayıplara neden olmaktadır. Çizelge 1.1 ve Çizelge 1.2’de verilen hasar mekanizmaları ile ilgili istatistiksel verilere bakıldığında, malzemenin aşınma, yorulma ve korozyon gibi hasarların büyük bir payı olduğu görölmektedir. [3].

Çizelge 1.1: Çeşitli mühendislik uygulamalarında metalik malzemelerde meydana gelen hasar [3].

NEDENİ	%
Korozyon	29
Yorulma	25
Gevrek Kırılma	16
Aşırı Yükleme	11
Yüksek Sıcaklık Korozyonu	7
Gerilmeli Korozyon Çatlaması / Korozyonlu Yorulma / Hidrojen Gevrekliği	6
Sürünme	3
Aşınma, erozyon	3

Bu nedenle, son yıllarda yaygın olarak çalışılan konular arasında üretilen parçanın çevre şartlarında bozulmasını önleyecek kaplamaların gerçekleştirilmesi üzerine olmaktadır. Bu amaçla yüzeyleri oksit, karbür, nitrür ve borürlerle kaplanan malzemeler büyük ilgi uyandırmaktadır [4].

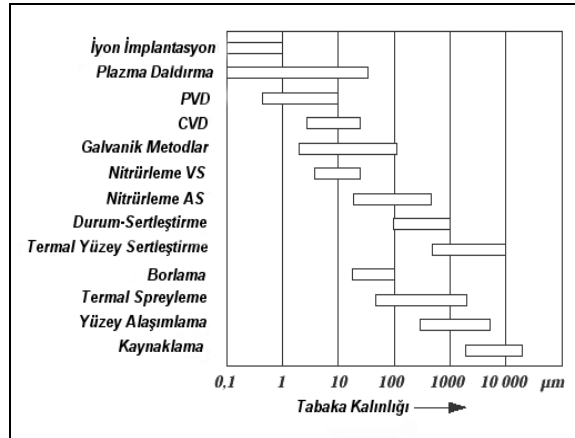
Çizelge 1.2: Hava taşıtı parçalarında hasar nedenlerinin istatistiksel dağılımı [3].

NEDENİ	%
Yorulma	61
Aşırı Yükleme	18
Gerilmeli Korozyon Çatlaması	8
Aşırı Aşınma	7
Korozyon	3
Yüksek Sıcaklık Oksidasyonu	2
Gerilme Kopması	1

Fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), spreyleme ve difüzyon esaslı kaplama teknikleri, aşınma, korozyon ve oksidasyona karşı dirençli karbür, nitrür ve borür kaplamaların gerçekleştirilmesinde uygulanmaktadır. Malzeme yüzeyinde istenilen özelliklere ulaşıldığı taktirde, hem pratik hem de ekonomik olması sebebiyle, tuz banyosunda sıvı borlama malzeme yüzeyinin seramik kaplanması büyük avantajlar sağlamaktadır [5].

Endüstride makine üretiminde kullanılan malzemelerin seçimi kadar bu malzemelere uygulanan yüzey işlemleri de büyük önem taşımaktadır. Türkiye'nin sahip olduğu en

önemli yer altı kaynaklarından biri bor rezervleridir. Bor ve türevlerinin endüstride kullanım alanları oldukça geniştir. Bor ve bor bileşiklerin kullanım alanlarına en uygun en iyi örnekler borlama gibi termokimyasal difüzyon işlemleridir. Termokimyasal difüzyon prosesi ile yapılan bir yüzey işlemi olan “Borlama” (Boronizing), malzeme yüzeyinde istenen yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısıyla yüksek aşınma direnci, yüksek korozyon direnci ve iyi oksidasyon direnci sağlayan en elverişli yüzey sertleştirme işlemlerinden biridir. Günümüzde geleneksel borlama tekniklerinin yanında ark plazma sinterleme, iyon implantasyon, kimyasal buhar biriktirme, fiziksel buhar biriktirme gibi ileri teknoloji gerektiren yüzey işlemleri ile de borlama yapılabilmektedir. Ayrıca yüzey işlemleri olarak farklı amaçlarla çeşitli uygulamalar da yapılmaktadır. Çeşitli tekniklerle yapılan bu yüzey işlemleri Şekil 1.1 ’de karşılaştırmalı olarak verilmektedir[5].



Şekil 1.1: Bazı termokimyasal ve ileri teknoloji yüzey sertleştirme işlemlerinin karşılaştırılması [5].

Türkiye’nin çok zengin “Bor” rezervine sahip olduğu ve bor bileşiklerinin üstün özellikleri göz önüne alındığı takdirde bazı malzemelerin bor ve bor bileşikleri ile kaplanmasının matrisin, muhtemel, vazgeçilemeyecek özellikleri yanında bor bileşiklerinin aşınma, korozyon mukavemeti ile kaplama tabakasındaki bileşiğin cinsine göre üstün mekanik özelliklerinden aynı anda faydalanmak mümkün olacaktır [6].

Çelik endüstrisinde büyük yer tuttuğu bilinen ”Bor” elementi ilaç sanayiine kadar uzanan kullanım alanı yanında, Ti, Zr, Cr ve Fe ile yaptığı bileşiklerin yüksek ergime sıcaklığı, yüksek sertlik, üstün korozyon ve aşınma direncine sahip olduğu bilinmektedir. Ayrıca bor elementinin oksitlenmesinin sürtünme katsayısını

düşürerek yağlama tesiri yaptığı bulunmuştur. Bor bileşiklerinin sertlikleri yanında korozyon ve aşınma mukavemetlerinin yüksek oluşu “Borlama” yoluyla katı malzemelerin yüzeylerini kaplayarak bu bileşiklerin üstün özelliklerinden faydalanma imkanına yol açmaktadır. Uygun şartlarda metalik ve bazı metalik olmayan malzemelerde borlama uygulaması mümkün olabilir [1].

Çelik ve alaşımlarının sertlikleri ile agresif ortamda aşınma ve kimyasal hasara karşı mukavemetlerinin sınırlı olması, bu alaşımların pratik özelliklerine üstün yüzey özellikleri ilavesinin avantajları, akademik, teknolojik araştırma ve gelişmeleri teşvik etmektedir. Borlama banyosunun kaplanacak malzeme ile reaksiyonu sonucu ortaya çıkan tabakaların ve arayüzeylerin özelliklerinin incelenmesi, akademik öneme sahip olduğu gibi elde edilebilecek üstün özellikler, teknoloji transferini mümkün kılabilir [2].

AISI 316 L tipi paslanmaz çelik malzemeler aşınmaya, yorulmaya ve korozyona dayanıklı yerlerde özellikle; tarımsal, endüstriyel ve konutsal sektörde su sirkülasyonlarında, agresif olmayan kimyasal sıvılarda, basınçlı su sistemlerinde, büyük ölçekli sulama sistemlerinde, endüstriyel yıkama sistemlerinde, ısıtma ve soğutma sistemlerinde, otomotiv endüstrisinde (Katalitik konvertörün gövdesi ve turbo besleme gövde), gemi endüstrisinde (filtre ızgarası, boru hatları, filtreler) ve tıp alanında (implant malzeme olarak) kullanılmaktadır.

Kuvvetli aşındırıcı koşullarda aşınmaya dirençli olan östenitik paslanmaz çeliklerin, daha yumuşak aşındırıcı koşullarda aşınmaya direnci düşüktür. Paslanmaz çelikler ilaç, gıda ve yem endüstrisindeki dozajlama sistemlerinde zayıf aşındırma koşullarında ve sarsıntılı olarak çalışırlar. Gemi endüstrisinde paslanmaz çeliklerden yapılan şaftlar da dinamik çalışmanın yanında, denizel ortamının korozif ve erozif aşınma etkilerine maruzdurlar. İnsan vücudunda kullanılan paslanmaz çeliklerden yapılan implant ürünler de, vücut ortamının korozif etkisi altında sürekli hareket halindedirler.

Bu ve bunun gibi endüstri dallarında kullanılan paslanmaz çeliklerin aşınmaya ve korozyona dirençli hale getirilmesi için yüzeylerinin geliştirilmesi başvuru alan uygulamalardır. Borlama bu yüzey işlemlerinden biridir.

Borlanmış yüzeylerin korozyon ve aşınma özellikleri konusunda yoğun çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda, borlama ile çeliklerin aşınma ve korozyon dirençlerinin önemli oranlarda arttırıldığı belirtilmektedir. Ancak, borlamanın paslanmaz çeliklerin yorulma özelliklerine etkileri konusunda herhangi bir çalışma yoktur.

Bu çalışmada, AISI 316 L paslanmaz çeliğe çeşitli koşullarda borlama işlemi uygulanmıştır. Borlama işlemlerinin mekanizması tartışılmış, borlama işlemi ile oluşan borür tabakaları çeşitli yönlerden karakterize edilmiş ve özellikleri ortaya konmuştur. Borlanan parçaların yorulma deneyleri yapılarak, borlamanın paslanmaz çeliklerin yorulma özelliklerine etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

Deneyisel çalışmada, termokimyasal borlama işlemi için gerekli bor içerikli maddeler (boraks ve borik asit) ve ferroalaşımlar (ferrosilis (FeSi) ve ferrotitanyum (FeTi)) ve silisyum karbür (SiC) belli oranlarda karıştırılarak optimum bir banyo bileşimleri tespit edilerek ve Ticari Ekabor 2 bor banyosu da mevcut banyolarla kıyaslanmak için kullanılarak AISI 316 L tipi paslanmaz çeliklerin yüzeylerine bor içerikli kaplama yapılmıştır.

Borür tabakalarının yüzey karakterizasyonunu belirlemek için Işık mikroskobu (OM) ile borür tabaka yüzeylerinin karakterinin mikroskobik olarak gözlenmesi ve kaplama kalınlıklarının ölçülmesi, X-ışınları difraksiyon tekniği (XRD) ile oluşan fazların belirlenmesi, Yüzey pürüzlülüklerinin belirlenmesi (R_a), Elektron probe mikro analizör (EPMA) ile borür tabakanın karakterizasyonunun belirlenmesi ve yüzeydeki borür tabakasının kalitatif olarak miktarlarının belirlenmesi, Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EPMA ile borür tabaka morfolojisinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

Borür tabakaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme deneyleri, kalıntı gerilme (σ_r) ölçümlerinin belirlenmesi, borür tabakalarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi (Rockwell C Testi) (R_c), borlanan yüzeyin sertliği ile sertlik profilinin çıkarılması için sertlik deneyleri ve sertlik yöntemi ile borlanmış yüzeyin kırılma tokluğu (K_{ic}) deneyleri yapılmıştır.

Düzlemsel eğmeli yorulma deneyleri yapılarak borür tabaka ile kaplanmış numunelerin performansları araştırılmıştır.

2. PASLANMAZ ÇELİKLER

2.1 Giriş

Paslanmaz çelikler, % 12'den daha yüksek oranda krom içeren ve bir çok ortamda üstün korozyon direnci gösteren çelik türüdür. Klasik teoriye göre, bileşiminde bulunan krom, yüzeyde ince oksit tabakası oluşturarak çeliği korozyondan korumaktadır. Kristal yapıya ve sertleştirme mekanizmasına bağlı olarak paslanmaz çelikleri; ferritik paslanmaz çelikler, martensitik paslanmaz çelikler, Ostenitik paslanmaz çelikler ve çökelme ile sertleşen paslanmaz çelikler olmak üzere dört gruba ayırmak mümkündür [7].

2.2 Paslanmaz Çelik Sınıfları

Kristal yapıya ve sertleştirme mekanizmasına bağlı olarak paslanmaz çelikleri;

- 1-Ferritik paslanmaz çelikler,
- 2- Martensitik paslanmaz çelikler,
- 3- Çökelme ile sertleşen paslanmaz çelikler ve
- 4- Ostenitik paslanmaz çelikler

olmak üzere dört gruba ayırmak mümkündür [7].

2.2.1 Ferritik paslanmaz çelikler

% 12 – 30 arasında krom ve % 0,12'den daha az karbon içeren bu çelikler, ferritik (HMK, α -demiri) mikroyapıya sahiptir. Üstün korozyon direncine ve orta derecede şekillenebilme kabiliyetine sahip olup, yapısında nikel bulunmamasından dolayı nisbeten ucuzdur [7].

2.2.2 Martensitik paslanmaz çelikler

% 12 – 17 krom ve % 0,15 – 1,0 oranında karbon içeren paslanmaz çelik türüdür. Bu çeliklere ostenit sahasından havada su verilerek martensitik mikroyapı kazandırılabilir. Uygulanan ısıtma işlemi, esas olarak alaşımsız ve az alaşımlı çeliklere uygulanan ısıtma işlemiyle aynı olup, su verme sonrasında tokluğu artırma amacıyla temperleme işlemine tabi tutulur. Martensitik paslanmaz çelikler ferritik ve ostenitik paslanmaz çeliklere nazaran daha düşük korozyon direncine sahiptirler [7].

2.2.3 Çökelme ile sertleşen (PH) paslanmaz çelikler

Bu çeliklerin kimyasal bileşimi, alüminyum, niyobyum veya tantalum içermeleri dışında ostenitik paslanmaz çeliklerle hemen hemen aynıdır. Çökelme sertleşmesi uygulanabilen paslanmaz çeliklerden düşük karbon içeriklerinde bile üstün mekanik özellikler elde edilebilir. Tipik 17-7 PH kalite paslanmaz çeliğin ısıtma işlemi; 760 – 955 °C’de ostenitleme, su verme ve 500-600 °C’de yaşlandırma olmak üzere üç kademede gerçekleştirilir. Yaşlandırma, ostenit bölgesinden su verilerek elde edilen martensitik yapıda Ni_3Al ve diğer metallerarası bileşiklerin çökmesini sağlar. Düşük yaşlandırma sıcaklıklarında daha yüksek mukavemet elde edilir [7].

2.2.4 Ostenitik paslanmaz çelikler

Bu çelikler esas itibarı ile Demir-Krom-Nikel üçlü alaşımıdır. Bölüm 1’de de sözü edildiği gibi nikel, Fe-C alaşımlarında ostenit sahasını genişleterek ostenitin kararlılığını arttıran alaşım elementidir. Ostenitik paslanmaz çeliklerin bileşiminde % 16 – 25 krom ve % 7 – 20 nikel bulunur. Karbon içeriği % 0,03’den az ise, yapıda karbür çökmesi olmaz ve mikroyapı tamamen ostenitten (YMK, γ -demiri) oluşur. Ferritik ve martensitik paslanmaz çeliklere nazaran korozyon direnci daha yüksektir. Üstün süneklik ve şekil değiştirme kabiliyetine de sahip olan ostenitik paslanmaz çeliklerin düşük sıcaklıklarda darbe direnci de yüksektir. Yüksek oranda nikel içermeleri bu çeliklerin pahalı olmasına neden olur [7]. Ostenitik paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklıktaki mekanik özellikleri yüksektir.

Ostenitik paslanmaz çelik sınıflarından AISI 316 L tipi paslanmaz çelikler fosforik asit, asetik asit, klorür asiti ve sülfürik asit ortamında oyuklanma direnci yüksektir. AISI 316L tipi paslanmaz çelikler, ostenitik yapısından dolayı ve korozif

ortamlarda, dinamik yüklemelerin olduğu ortamlarda ve aşınmaya maruz kalan ortamlarda servis ömürlerini arttırmak için nitrasyon, plazma nitrasyon, borlama, sert seramik filmle kaplama işlemleri yapılmaktadır [3,8].

AISI 316 L tipi paslanmaz çelik malzemeler aşınmaya, yorulmaya ve korozyona dayanıklı yerlerde özellikle; tarımsal, endüstriyel ve konutsal sektörde su sirkülasyonlarında, agresif olmayan kimyasal sıvılarda, basınçlı su sistemlerinde, büyük ölçekli sulama sistemlerinde, endüstriyel yıkama sistemlerinde, ısıtma ve soğutma sistemlerinde, otomotiv endüstrisinde (Katalitik konvertörün gövdesi ve turbo besleme gövde), gemi endüstrisinde (filtre ızgarası, boru hatları, filtreler) ve tıp alanında (implant malzeme olarak) kullanılmaktadır.

3. TERMOKİMYASAL BORLAMA İŞLEMİ VE BORLAMA PROSESLERİ

3.1 Giriş

Son yıllarda, çelik malzemeler üzerine çok geniş bir çeşitlilikte kaplama prosesleri uygulanmaktadır. Endüstriyel uygulamalar yanında akademik çalışmalarda da yüzey işlemleri konusunda çok büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Çelik malzemelerin yüzeylerine uygulanabilen kaplama yöntemleri arasında; PVD, CVD, termokimyasal uygulamalar, plazma sprey, iyon implantasyon yer alır. Bu proseslerin yanında borlama termokimyasal prosesi; geniş yelpazede endüstriyel uygulama alanı bulması ve teknik olarak gelişmiş bir proses olmasıyla en önemli yüzey sertleştirme uygulamalarından biridir.

Bor, ilk defa 1808 yılında Gay-Lussc ve Jacques Thenard ile Sir. Humphry Davy tarafından Bor oksitin potasyum ile ısıtılmasıyla elde edilmiştir. Periyodik Çizelgede B simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 gram, ergime noktası 076-2300°C, buharlaşma sıcaklığı 2550°C, sertliği 49000 HV, yoğunluğu 2,3 gr/cm³ (amorf) ve 2,31 gr/cm³ (tetragonal), 2,35 gr/cm³ (â-rombohedral), 2,46 gr/cm³ (a-rombohedral), 2,99 gr/cm³ (sıvı fazda), 2,13 gr/cm³ (katı fazda), elektron yapısı ise 1s²2s²p¹ olup, geçiş elementidir. 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 (B₂O₃), aynı koşullarda nitrojen ile Bor Nitrit (BN) oluşturular. Bor tabiatta serbest halde bulunmaz. Doğada yaklaşık 230 çeşit bor minerali olduğu bilinmektedir. Çeşitli metal veya ametal elementlerle yaptığı bileşiklerin gösterdiği farklı özellikler, endüstride birçok bor bileşiğinin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bor, bileşiklerin elektrik iletkenliği azdır, ancak, farklı olarak saf bor, karbon iletkenidir. Kristalize bor görünüm ve optik özellikleri açısından elmasa benzer ve neredeyse elmas kadar serttir [9,10].

Bor amorf ve kristal olmak üzere iki şekilde bulunmaktadır; kristalik bor ortorombik (FeB) ve hacim merkezli tetragonal (Fe₂B) sistemlerde kristalleşir [4]. Bor mineralleri ve bileşikleri çeşitli endüstri dallarında çok farklı malzeme ve ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır.

Bor ve ürünlerinin kullanım alanları şöyle özetlenebilir [10]:

- Cam Sanayi: Borsilikat Camları, İzole Cam Elyafı, Tekstil Cam Elyafı,Optik
- Lifler,Cam Seramikleri, Şişe ve Diğer Düz Camlar,
- Seramik Sanayi: Emaye ve Sır Porselen Boyaları vb.
- Nükleer Sanayi: Reaktör Kontrol Çubukları, Nükleer Kazalarda Güvenlik
- Amaçlı ve Nükleer Atık Depolayıcı olarak,
- Uzay ve Havacılık Sanayi: Sürtünmeye-Aşınmaya ve Isıya Dayanıklı Malzemeler, Roket Yakıtı
- Askeri ve Zırhlı Araçlar: Zırh Plakalar vb.
- Elektronik – Elektrik ve Bilgisayar Sanayiinde: Bilgisayarların Mikro chiplerinde, CD-Sürücülerinde,Bilgisayar Ağlarında; Isıya ve Aşınmaya Dayanıklı Fiber Optik Kablolar, Yarı İletkenler, Vakum Tüpler, Dielektrik Malzemeler, Elektrik Kondansatörleri, Gecikmeli Sigortalar, vb.
- İletişim Araçlarında: Cep Telefonları, Modemler, Televizyonlar vb.
- İnşaat Çimento Sektöründe: Mukavemet Artırıcı ve İzolasyon Amaçlı olarak,
- Metalurji: Paslanmaz ve Alaşımlı Çelik, Sürtünmeye-Aşınmaya Karşı Dayanıklı Malzemeler, Metalurjik Flaks, Refrakterler, Briket Malzemeleri, Lehimleme, Döküm Malzemelerinde Katkı Maddesi olarak, Kesiciler vb.
- Enerji Sektörü: Güneş Enerjisinin Depolanması, Güneş Pillerinde Koruyucu olarak vb.
- Otomobil Sanayi: Hava Yastıklarında, Hidroliklerde, Plastik Aksamda, Yağlarda ve Metal Aksamlarda, Isı ve Yalıtımı Sağlamak Amacıyla Antifrizler vb.
- Tekstil Sektörü: Isıya Dayanıklı Kumaşlar, Yanmayı Geciktirici ve Önleyici Selülozik Malzemeler, Yalıtım Malzemeleri, Tekstil Boyaları Deri Renklendiricileri, Suni İpek Parlatma Malzemeleri, vb.
- İlaç ve Kozmetik Sanayi: Dezenfekte Ediciler, Antiseptikler, Diş Macunları, vb.

- Tıp: Ostrepoz Tedavilerinde, Alerjik Hastalıklarda, Psikiyatride, Kemik Gelişiminde ve Artiretti, Menopoz Tedavisinde Beyin Kanserlerinin Tedavisinde vb.
- Kimya Sanayi: Bazı Kimyasalların İndirgenmesi, Elektrolitik İşlemler, Flatasyon İlaçları, Banyo Çözeltileri, Katalizörler, Atık Temizleme Amaçlı olarak, Petrol Boyaları, Yanmayan ve Erimeyen Boyalar, Tekstil Boyaları vb.
- Temizleme ve Beyazlatma Sanayi: Toz Deterjanlar, Toz Beyazlatıcılar, Parlaticılar vb.
- Tarım Sektörü: Gübreler Böcek-Bitki Öldürücüler, vb.
- Kağıt Sanayi: Beyazlatıcı olarak,
- Kauçuk ve Plastik Sanayi: Naylon vb. , Plastik Malzemeler vb.
- Koruyucu: Ahşap Malzemeler ve Ağaçlarda Koruyucu olarak Boya ve vernik Kurutucularında vb.
- Patlayıcı Maddeler: Fişek vb.
- Fotoğrafçılık
- Zımpara ve Aşındırıcılar
- Yapıştırıcılar
- Kompozit malzemeler
- Spor Malzemeleri
- Manyetik Cihazlar

Ayrıca, Bor, bazı metaller ile Magnezyum Borit (Mg_3B_2) ve Titanyum Diborit (TiB_2) gibi endüstride kullanılan bileşikler oluşturabilmektedir. Metal borürlerin üretimi için bilinen beş yöntem vardır:

1. Metalik bor tozu ile istenen metal veya metal hidrür tozunun karışımının $1100-2000^{\circ}C$ 'de elektrik ark fırınında ergitilmesi,
2. Borik asit ve metal oksit karışımının inert atmosferde alüminyum, silis, magnezyum, karbon ile indirgenmesi sonucu,
3. Alkali veya toprak alkali boratları ile istenen metali içeren ergimiş tuz elektrolizi ortamında yaklaşık $1000^{\circ}C$ 'de metal borür sentezleme,
4. Grafit veya refrakter metal yüzeyinde buhar karışımlarından katı alaşım çöktürme,

Metal borürler yüksek mukavemete, yüksek sertliğe, yüksek aşınma dayanımına, yüksek ergime noktasına ve kimyasallara karşı yüksek dirence sahiptirler. Özellikle, ısınmaksızın yüksek akım geçirebilen iletkenler, elektrik arkı oluşturmada elektron emitterleri, sensörler, güneş pilleri, nükleer reaksiyonlarda radyasyon zırhlayıcılar, uçak sanayi ve otomotiv için hafif zırhlar, süper iletkenler, yarı iletkenler, titreşim söndürücü malzemelerde kullanılırlar [10].

3.2 Borlama İşlemi

Borlama işlemi, yüksek sıcaklıkta ana metalin yüzeyinde bor atomlarının difüzyonuyla borür tabakası oluşturulmasıdır [4]. Borlama işlemi, günümüzde yalnızca metallere değil, sermet ve seramik malzemelere de uygulanmaktadır. Borlama, yüzeyde bileşik oluşturacak şekilde bor atomlarının difüzyonu olarak da bilinmektedir. Borlama işlemi, yüzeyi iyi temizlenmiş malzemelere 800-1100°C sıcaklık aralığında, 1-10 saat sürelerde katı, pasta, sıvı veya gaz gibi çeşitli ortamlarda uygulanabilmektedir. Teknolojik gelişmelerle birlikte gaz ortamında termo-kimyasal borlama metodlarının dışında, plazma borlama ve akışkan yataкта borlama gibi yeni olan teknikler de kullanılmaktadır. Ayrıca termo-kimyasal olmayan fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey ve iyon biriktirme yöntemleri de borlama amacıyla kullanılan yöntemlerdir [4,11].

Borlama işlemiyle, metal ve alaşımların yüzeylerinde sertlik, aşınma direnci ve korozyon direncini artırırken, aynı zamanda bu özellikleri yüksek sıcaklıklarda korumak ve erozyon direncini de arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Borlama işlemi, endüstriyel olarak daha çok demir esaslı alaşımlara uygulanmaktadır [4,10,13].

3.2.1 Borlama işleminin avantajları

Borlama işleminde karakterisitik özelliklerin sayısı oldukça azdır. En önemli özellik, borür tabakasının yüksek sertlik (1450-5000HV) ve yüksek ergime sıcaklığına sahip olmasıdır. Demir esaslı malzemelerde kaplama tabakasının sertliği alt kritik sıcaklığa kadar (650°C) kalıcıdır [14]. Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği diğer geleneksel sertleştirme teknikleri olan sementasyon ve

nitrasyonu göre çok daha yüksektir. Borlama işlemi ile sertleştirilmiş takım çeliklerinin yüzey sertlikleri, elektrolitik sert krom kaplamaların ve tungsten karbürün sertlik değerlerine ulaşabilmektedir. Bor kaplanmış çeliklerin tipik yüzey sertlikleri ve diğer sert metaller ile karşılaştırılması Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1: Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması [12].

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

Borür tabakasının yüksek sertlik değeri ve düşük sürtünme katsayısı değerine sahip olması, aşınma direncinin oldukça yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu özellikler, kalıp imalatında ana malzemenin işlenmesi sırasında kolaylık, maliyetinde ucuzluk ve orjinal yapıya göre mekanik özellikler açısından çok daha üstün özellikler sağlamaktadır. Borür tabakasının bazı avantajları aşağıda verilmektedir [2,4,12].

- Borür tabakasının sertliği yüksek sıcaklıklarda (550-650°C) bile sabit kalmaktadır [4,11].
- Borlama, özellikle sertleşebilir bir çok çelik grubuyla kıyaslanabilir yüzey özelliklerinin elde edilebildiği bir işlemdir[4,11].
- Borlama işlemi demir esaslı malzemelerin seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerin erozyon dirençlerini arttırmaktadır. Borlama işlemi ile düşük alaşımlı çeliklerin, H₂SO₄, H₃PO₄ ve HCl gibi asitlere karşı direncini arttırmak mümkündür [4,11].

- Borlanmış çeliklerin yüksek sıcaklıklardaki (850°C) oksidasyon direnci ve sıcak metal korozyonuna direnci yüksektir [4,11].
- Borlanmış parçaların yorulma ömrüleri özellikle korozyif ortamlarda %25 oranında arttırılabilir [4,11].
- Borlama işlemi, yağlayıcı kullanımını azaltmakta, soğuk kaynaklanma eğilimini ve sürtünme katsayısını düşürmektedir[1,4,11].

3.2.2 Borlama işleminin dezavantajları

Borlama işlemi, birçok avantajının yanında bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir. Bunlar sıralanacak olursa;

- Borlama tekniği, esnek değildir ve gaz ortamında sementasyon ve plazma nitrasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre maliyeti yüksektir. Gaz karbürizasyonu ve plazma nitrasyonu daha esnek tekniklerdir. Bu teknikler, daha az işçilik ve daha düşük maliyet gerektirir. Ayrıca, bu işlemlerin kısa sürede ve daha kolay gerçekleşmesi borlamaya göre avantajlar sağlamaktadır. Bu sebeple, yüksek sertlik, dış ortamlara karşı yüksek aşınma direnci ve yüksek direncinin arzu edildiği durumlarda borlama işlemi tercih edilmektedir [4,11].
- Borlamaya tabi tutulan malzemelerde bor tabaka kalınlığının %5-20'si oranında boyutsal olarak artış gözlenmektedir. Örneğin, 25µm'lik bir tabaka kalınlığı, 1,25 - 6,25µm'lik bir büyümeye neden olmaktadır [2, 4, 11]. Bu kalınlık artışı borlanan malzemenin cinsine ve borlama şartlarına bağlıdır.
- Çok hassas toleranslarla çalışmak gerektiği zaman, elmas takımlarla kaplama işlenmesi mümkündür, fakat yüzeyin geleneksel tekniklerle işlenmesi kaplama tabakasında kırılmalara neden olmaktadır. Bu da kaplama kalitesinde bozulmalara ve çatlamalara yol açmaktadır.
- Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde (2000N) sementasyon ve nitrasyonla kıyaslandığı zaman, çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği sebebiyle, dişli üretiminde bir sınırlama söz konusudur [4, 11].

- Takımlar borlandıktan sonra çoğu zaman bir sertleştirmeye ve temperlemeye tabi tutulmaktadır. Bu işlemlerde, bor tabakasının özelliklerinin korunması için inert atmosfer veya vakum gerekmektedir.

3.3 Borlama Yöntemleri

Bor yayını ile yüzey sertleştirme işlemi için, karbürleme ve nitrürleme işlemlerinde olduğu gibi çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Rus ve arkadaşları [15], borür tabakaların oluşumu için uygulanan yöntemleri, kimyasal yöntemler (katı, sıvı ve gaz ortamda borlama) ve fiziksel yöntemler (bor iyon aşılama, fiziksel vakum biriktirme, saçılma ve iyon kaplama) şeklinde sınıflandırmışlardır. Batı Avrupa’da, özellikle Almanya’da katı ortamda borlama işlemi tercih edilmekte ve yaygın olarak kullanılmakta iken, doğu Avrupa ülkelerinde, özellikle de Rusya’ da sıvı ortamda borlama kullanılmaktadır. Gaz reaktif ortamda borlama ticari alanda çok nadir olarak kullanılmaktadır. Bu konu üzerinde oldukça geniş kapsamlı araştırmalar sürdürülmektedir. Hegewaldt ve arkadaşları [16], alaşımsız çelikleri 650°C’ de gaz ortamında borladıklarını ve olumlu sonuç aldıklarını bildirmektedirler.

Borlama işlemi esnasında bor kaynağı ve bor sağlayıcı bileşikler katı, sıvı veya gaz fazında olabilirler. Borür tabakalarının oluşumu için uygulanan yöntemleri aşağıdaki şekilde sınıflandırabiliriz:

- a) Termo-kimyasal yöntemler (kutu borlama, pasta borlama, sıvı borlama ve gaz borlama)
- b) Termo-kimyasal olmayan yöntemler (fiziksel buhar biriktirme(PVD), kimyasal buhar biriktirme(CVD), plazma sprey kaplama ve iyon biriktirme).

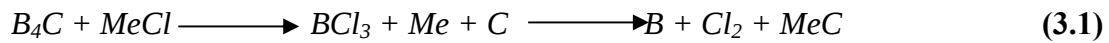
Bu teknikler içersinde en çok kullanılanları, termo-kimyasal yöntemlerdir. Termo-kimyasal bor kaplama işlemi sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak bor atomunun metale difüzyonuna dayanan bir kaplama yöntemidir. Termo-kimyasal bor kaplama yöntemleri dört ana grup altında toplanmaktadır [4, 6, 12].

3.3.1 Kutu borlama

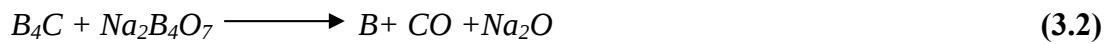
Kutu borlama işlemi, elle kolayca gerçekleştirilmesi, emniyetli olması, faz bileşimlerinin değişiminin çok az olması ve bu yöntemde çok az ekipmana gerek duyulması nedeniyle çok kullanılan bir tekniktir. Proses kutulamayı, ısıtmayı ve temizlemeyi içermektedir. Kaplanacak malzeme 3-5 mm kalınlıkta toz karışımı ile çevrelenerek borlama yapılmaktadır. Kaba yüzeylerde bu kalınlık 10-20 mm olabilmektedir. Kutu borlamada, çok farklı borlama bileşenleri kullanılabilmektedir. Bu bileşenler, katı bor sağlayıcılar, akışkanlık sağlayıcılar ve aktivatörlerdir [2,4].

Yaygın olarak kullanılan bor sağlayıcılar; bor karbür(B_4C), ferrobor($Fe-B$) ve amorf bordur(B). Ferrobor ve amorf bor çok iyi bor kaynaklarıdır ve kalın borür tabakaları oluştururlar, ayrıca bor karbürden çok daha pahalıdır. Katı ortamda bor sağlayıcıların bazı özellikleri Çizelge 3.2.'de verilmektedir.

SiC ve Al_2O_3 reaksiyonda yer almaz ve akışkanlık sağlayarak, dolgu malzemesi olarak kullanılır. Ayrıca SiC , bor miktarını kontrol eder ve borlama ajanlarının kaybını önler. $NaBF_4$, KBF_4 , $(NH_4)_3BF_4$, NH_4Cl , Na_2CO_3 , BaF_2 ve $Na_2B_4O_7$ borlama aktivatörleri olarak kullanılmaktadır. Bunların haricinde bazı ticari bor sağlayıcılar da borlama amacıyla kullanılmaktadır (Örneğin Ekabor tozu) [2,4]. Amorf bor ve Al_2O_3 ile yapılan borlamalarda tabaka kalınlığı düşük fakat her tarafta homojen olmaktadır. Bor karbür kullanılması durumunda, borkarbürle birlikte kalsiyum klorür, baryum klorür, borik asit ilave edildiği zaman kaplama elde edilememekte, sodyum klorür, HCl , amonyum klorür ve özellikle boraks kullanıldığı zaman kaplama gerçekleştirilebilmektedir[11]. Klor içeren ilaveler miktarlarına bağlı olarak aktif bor atomlarını serbest hale geçirmektedirler (Eşitlik 3.1).



Boraks içeren katı bor bileşenlerinde ise serbest bor Eşitlik 2.2'deki gibi gerçekleşmektedir.



Araştırmalar sonucunda %16 boraksın optimum değerleri sağladığı görülmüştür.

Çizelge 3.2: Kutu borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri [14,17].

İsim	Formül	Molekül Ağırlığı (gr)	Teorik Bor Miktarı (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Amorf Bor	B	10,82	95-97	2050
Ferro-Bor	-	-	17-19	-
Bor Karbür	B ₄ C	55,29	77,28	2450

Kutu borlamada kullanılan pota, borlama işlemi boyunca bor kaynağının kaybını önlemek için kurşunla kaplanarak tüm malzemeler doldurulduktan sonra ağız kısmı demir curufu veya beton ile kapatılmaktadır. Pota veya kutu, yüksek iç gerilmeler, çatlaklar veya kalkmalara sebebiyet vermemesi ve yeniden toz ilavesi (%20-50) borlamaya devam edilmesi için fırın hacminin %60'ını geçmemelidir[4].

Goeuriot ve arkadaşları [18], “Boridif” olarak isimlendirdikleri özel bir borlama yöntemi geliştirmişler ve aktivatör olarak KBF₄ yerine BF₃ ve SiC’ ün kullanılmasını önermişlerdir. Böylece daha az kırılğan ve borlama sonrası ısıl işlemlere uygun olan tez fazlı borür (Fe₂B) tabakasının elde edilmesi kolaylaşmaktadır. Katı ortamda borlamanın yeni bir versiyonu da “ akışkan yatak tekniği “ kullanılarak yapılan borlamadır. Bu yöntemde, akıcı ortam olarak özel tozu kullanılır.

3.3.2 Pasta borlama

Pasta borlama, kutu borlamanın zor ve pahalı geldiği durumlarda veya fazla zaman kaybının olduğu durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, %45 B₄C, (200-400 mesh tane boyutu) ve %55 kriyolit (Na₃AlF₆ flaks ilaveli) kullanılırken yada iyi bir bağlama ajanı içinde (bütil asetat içinde çözünmüş nitro selüloz) geleneksel borlama tozu karışımı (B₄C-SiC-KBF₄) kullanılır.

Bu yöntemle borlayıcı karışım malzemenin yüzeyine püskürtülerek veya spreylenerek oluşturulur ve kurutmadan sonra 1-2 mm kalınlığında bir tabaka elde edilir. Sonraki aşamada demirli malzeme 900°C’ ye indüksiyonla yada 800-1000°C lik bir fırında 5 saat süreyle ısıtılır. Bu proseste koruyucu atmosfer olarak argon,

NH₃, N₂ gereklidir. 50µm'yi geçen bir katman 1000°C ve 20dak. sonra elde edilir. Bu proses büyük parçalar ve kısmi borlama gerektirecek parçalar için idealdir [2,4].

3.3.3 Sıvı borlama

Bu yöntemde borlama banyosu sıvı haldedir. Borlama 670-1000°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. Sıvı ortamda borlama iki ana grupta toplanır; elektrolitik sıvı borlama ve elektrolizle sıvı borlama. Bu yöntemlerin bazı dezavantajları vardır. Bunlar; tuz kalıntılarının malzeme üzerinde kalması ve ortamda reaksiyona girmeyen borun varlığı zaman ve para kaybına yol açar. Borlamanın verimliliği için banyo viskozitesinin artmasına izin verilmez, buda banyonun sürekli değiştirilmesiyle yapılır. Bu da ek maliyet getirir. Bazı durumlarda korozyonumandan koruma gerekebilir [4,11].

3.3.4 Elektrolitik sıvı borlama

Demir esaslı malzemelere içinde boraks bazlı ergiyik içeren banyo içersinde (900-950°C) yapılır. %30 B₄C banyoya ilave edilir. Borlama işlemi %20'ye kadar B₄C'ün ferro alüminyum ile değiştirilmesi ile geliştirilebilir. Çünkü çok etkili bir indirgeyicidir. Fakat %55 boraks, %40-50 ferroboron ve %4-5 ferro alüminyum içeren banyo ile en üstün sonuçlar elde edilir. Ayrıca %75 KBF₄ ve %25 KF tuz banyosu ile 670°C altındaki sıcaklıklarda nikel alaşımlarının borlanması kullanılır [4,12]. Yüksek sıcaklıklarda demir alaşımlarında istenilen borür tabakası kalınlığını elde etmede kullanılır. %55 boraks ve %45 B₄C karışımı 1:1 oranında NaCl ve BaCl₂ kullanılarak çok yüksek tabaka kalınlıkları elde edilmektedir. Sıvı borlama ayrıca, boraks, ferro-silis, borik asit ve sodyum sülfat (NaSO₄) esaslı tuz banyolarında da gerçekleştirilmektedir [4].

3.3.4.1 Elektrolizle sıvı borlama

Elektrolizle tuz banyosunda borlama işleminde katod olarak, borlanacak demir esaslı malzeme ve anod olarak grafit elektrot kullanılmaktadır. Elektrolit olarak ise boraks kullanılmaktadır. Borlama işlemi, 900-950°C sıcaklık aralığında 4-6 saat süre ile, 0,15-0,20 A/cm² akım yoğunluğu altında gerçekleştirilmektedir [4,17]. Parçanın her tarafında homojen bir kaplama tabaka kalınlığı elde edebilmek için elektroliz

sırasında parça döndürülmektedir. Düşük alaşımlı çeliklerde çok ince kaplamaların eldesinde, yüksek akım yoğunluğu kullanılarak çok kısa sürelerde borlama yeterli olmaktadır. Alaşımlı çeliklerde ise kalın kaplama tabakalarının elde edilebilmesi için düşük akım yoğunluğu ve uzun borlama süresi gerekmektedir [2,17]. Sıvı borlamada kullanılan çeşitli bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3: Sıvı borlamada kullanılan çeşitli bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri [14].

Bor Sağlayıcılar	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı (gr)	Teorik Bor Miktarı (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	381,42	11,35	-
Susuz Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	201,26	21,50	741
Metabor Asidi	HBO_2	43,83	24,69	-
Sodyum Bor Florür	NaBF_4	109,81	9,85	-
Bor Oksit	B_2O_3	69,64	31,07	450
Bor Karbür	B_4C	55,29	78,28	2450
Potasyum Bor Florür	KBF_4	69,67	15,52	-

3.3.5 Gaz borlama

BCl_3 , H_2 ve N_2 gaz karışımı atmosferinde yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen borlama prosesidir.

Borür tabakasının morfolojisi demir esaslı malzemeler için;

(a) Dış tabakalarda ortorombik FeB fazı

(b) İç tabakalarda hacim merkezli tetragonal Fe_2B fazı teşekkül eder.

Alaşımlı çelik malzemelerde alaşım elementleri borür oluşumunu inhibe eder ve alaşım miktarıyla birlikte oluşan FeB oranı artar. Paslanmaz çelikler borlama işlemleri için nispeten daha az elverişlidir [4,19].

Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri Çizelge 3.4.’de verilmektedir [14].

Çizelge 3.4: Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri [14].

Gazlar	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı(gr.)	Teorik Bor Miktarı(%)	Donma Noktası(°C)
Bor Tri Florid	BF ₃	67,82	15,95	-128,8
Bor Tri Klorid	BCl ₃	117,9	9,23	-107,3
Bor Tri Bromit	BBr ₃	250,57	4,32	-46,0
Di-Boran	B ₂ O ₃	26,29	39,08	-165,5
Bor Tri Metil	(CH ₃) ₃ B	55,92	19,35	-161,5
Bor Tri Etil	(C ₂ H ₅) ₃ B	98,01	11,04	-94,0

3.4 Borlanabilen Malzemeler ve Borürlerin Özellikleri

Borlama işlemi, sade karbonlu çelikler, düşük alaşımlı çelikler, takım çelikleri ve paslanmaz çelikler gibi bir çok çelik grubuna ve dökme demirlere uygulanabilmektedir. Buna ilaveten, nikel, kobalt, molibden ve titanyum esaslı alaşımlara da uygulanmaktadır. Ayrıca, sinterlenmiş karbürlerin yüzeyleri borlanarak, aşınma dirençleri artırılabilir. Yumuşak kobalt ve nikel bağlayıcıların yüzeylerinde borür fazları oluşturmak mümkün olup, son yıllarda seramiklere de bor kaplamalar uygulanmaktadır[1,4].

Kırılgan borür fazları oluşturmaları sebebiyle, alüminyum, silisyum ve azotlu yatak çelikleri, borlama için uygun malzemeler değildir. Aynı şekilde, içerdikleri kükürt ve kurşun gibi alaşım elementlerinin borür tabakasının kalkmasına ve çatlamasına sebep olması nedeniyle bu çeliklerin borlanması tavsiye edilmemektedir [2,4].

3.4.1 Demir dışı metallerin borlanması

Sementit karbürler, nikel, kobalt gibi refrakter metaller ve alaşımları borlanabilen malzemelerdir. Özellikle nikel alaşımları, titanyum ve titanyum alaşımları borlama işlemi için elverişlidir. Nikel plakaların borlanması, gaz ortamında BCl₃-H₂-Ar karışımında 500-1000°C sıcaklıkları arasında gerçekleştirilmektedir [2].

Bakır, bor atomlarının difüzyonuna engel olması sebebi ile kaplanamaz. Bor, bakır tabakasıyla herhangi bir reaksiyona giremez. Eğer herhangi bir metal bakır

kaplanmış ve kaplama yoğun çatlak ve porozite içermiyorsa, bor atomları bakır tabakasını aşarak ana metale ulaşamaz. Örneğin, 0,15 mm kalınlığındaki bakır tabakası bor atomlarının difüzyonuna engel olmaktadır. Borlama sırasında işlem görmesi istenmeyen yüzeylerde bölgesel koruma amacıyla, gerekli kalitede bakır kaplama uygulanmaktadır. Ayrıca, bronz ve pirinç kaplamalarda da bu özellik görülmektedir [2,11].

Refrakter metallerin borlanması sonucunda, yüzeyinde değişik kompozisyonlarda çok farklı teknolojik özelliklere sahip kaplama sağlanabilmektedir. Bu teknolojik özellikler içerisinde, yüksek sertlik, bir çok inorganik asitin etkisine karşı ve oldukça yüksek sıcaklıklarda havanın oksidasyonuna karşı direnç sağlamaları sayılabilmektedir. Çizelge 3.5.'de bazı demir esaslı ve demir dışı metallerin borlanması sırasında oluşan borür fazları, borür tabakasının sertlik değeri ve ergime sıcaklıkları verilmektedir [2,4,11].

Titanyum, neobyum, tantalyum, molibden ve tungsten, amorf bor ve %3 NH_4Cl karışımı ile borlandığı zaman, tek bir faz yapısının oluştuğu gözlenmiştir ve bunlar sırasıyla, TiB_2 , NbB_2 , TaB_2 , Mo_2B ve W_2B şeklindedir. Bu araştırmaların sonuçlarına bağlı olarak, titanyum kaplandığı zaman poröz bir kaplama tabakası oluşmaktadır ve ana malzemeden pul pul ayrılmaktadır. Ayrıca Ti ile TiB_2 arasında dikkate değer ölçülerde bir hacimsel farklılık ortaya çıkması da muhtemeldir. Aynı şekilde, neobyum borür tabakası, yoğun, uniform ve ana metale kuvvetlice bağlanmıştır. Tantalyum, molibden ve tungsten borür tabakaları, çok kesin yorumlarla ana metale uyumsuz bulunmuştur ve molibden borür tabakası da fazla porozite içermektedir[20].

Titanyum, niobyum, tungsten, molibden ve nikel esaslı malzemelerde oluşan borürler titanyuma benzer şekilde kolonsal bir borür tabakası yapısı sergilemezler. WC-Co tel çekme kalıpları gibi sementit karbürler, %40 B_4C +%45 SiC ve %5 KBF_4 içeren bir karışımla borlandığı zaman, 3 farklı kaplama bölgesi ortaya çıkar[4,11]. Bu bölgelerin her biri farklı borür ve karbür faz dağılımları gösterirler. Bu faz dağılımları sırasıyla Çizelge 3.6.'da görülmektedir[4].

Çizelge 3.5: Çeşitli altlık malzemelerin borlanması sırasında oluşan farklı borür fazlarının ergime sıcaklıkları ve mikrosertlik değerleri [12].

Matris Malzemesi	Borür Tabakasındaki Sürekli Faz	Borür Tabakasının Sertliği (HV veya g/mm ²)	Ergime Sıcaklığı, (°C)
Fe	FeB	1900-2100	1390
	Fe ₂ B	1800-2000	
Co-27,5Cr	CoB	2200(100 gr)	
	Co ₂ B	~1550(100 gr)	
	Co ₄ B	700-800	
Ni	Ni ₄ B ₄	1600	
	Ni ₂ B	1500	
	Ni ₃ B	900	
Mo	Mo ₂ B	1660	2000
	MoB ₂	2330	~2100
	Mo ₂ B ₅	2400-2700	2100
Ti	TiB	2500	~1900
	TiB ₂	3370	2980
Ti-6Al-4V	TiB		
	TiB ₂	3000(100 gr)	
Nb	NbB ₂	2200	3050
	NbB ₄		

Molibden, tungsten, niobyum, zirkonyum, tantalyum ve reniumun borlanması, yüksek sıcaklıklarda oluşan boşluklar ve kırılgenlik sebebiyle 1100-1500°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir.

Borür tabakasının kalınlığının artması ile kaplamanın kırılgenliği, porozitesi ve çatlak sayısının artış göstermesinin yanı sıra, yapışma mukavemeti de zayıflamaktadır. Genellikle, 100µm'nin altında kalınlığa sahip olan kaplamalar, oldukça yoğundur ve matris metale iyi bir şekilde bağlanmaktadır. Borlama işlemi

üzerinde yapılan kinetik çalışmalar, difüzyon tabakasının ve numunenin ağırlığının parabolik bir şekilde arttığını göstermektedir. Metal yüzeyinde yeni fazın oluşması, latis boyunca bor atomlarının difüzyonu ve difüzyon tabakasının yoğunluğu kinetik çalışmalarla karakterize edilmektedir[20].

Çizelge 3.6: Borlanmış sementit karbür malzemelerde oluşan üç farklı bölgedeki fazlar [4].

Bölge	Oluşan Borür ve Karbürler
I.Dış bölge	CoB, W ₂ B ₆ , WC
II.Orta Bölge	W ₂ CoB ₂ , WCoB, WC, Co ₂ B
III.İç bölge	W ₂ Co ₂ B ₆ , WC, Co, Co ₄ B

Periyodik Çizelgenun IV-VI grup geçiş elementlerinde ametal bir atomun difüzyon olması durumunda, metal atomunun dolmamış olan d-seviyesi, difüze olan elementin valans elektronları ile doldurulmaktadır. Aynı zamanda, bu işlem d-seviyesinin az sayıda elektron içermesi(n) durumunda, düşük aktivasyon enerjisiyle daha kolay bir şekilde gerçekleşmektedir[20]. Bu da, d-seviyesindeki elektron sayısının ne kadar fazla miktarda eksik olursa, aktivasyon enerjisinin o derece düşük olacağını göstermektedir. Yani atomdaki elektron sayısı (n) ne kadar düşük olursa ve atomun ana kuantum sayısı(N) ne kadar düşük olursa, işlem o denli kolay gerçekleşmektedir.

İşlem sayısal olarak $1/N.n$ oranı şeklinde ifade edilebilmekte ve bu orana d-elektron seviyesinin kabullenme kapasitesi denilmektedir. N ve n değerlerinin küçük olması durumunda geçiş elementlerinde, metalik olmayan atomların difüzyonu sırasında elektron yörüngesini tamamen doldurarak kimyasal bir bileşik meydana getirmeleri kolay ve aktivasyon enerjileri düşük olacaktır. Bu veriler doğrultusunda yapılan çalışmalarda, aktivasyon enerjisinin, $1/N.n$ oranının artmasına bağlı olarak düştüğü görülmektedir. Titanyum için; 0,67, neobyum için; 0,63, molibden ve tungsten için; 0,05'dir. Burada ilginç bir durum olarak, molibden içerisinde bor ve karbonun difüzyonunun, $1/N.n$ oranının tungsten ile aynı değerde (0,05) olmasına rağmen, tungstenden daha düşük aktivasyon enerjisine gerek duyacak şekilde gerçekleşmesidir. Tungsten, 5d-seviyesinde 4 elektron bulundururken, molibden 4d-seviyesinde 5 elektron bulundurmaktadır. Genellikle enerji seviyesi, N ve n

değerlerine bağlı olarak gerçekleşmekte ve bu seviyedeki elektron eksiklikleri ile karakterize edilmektedir [2].

3.4.1.1 Alaşım elementlerinin etkisi

Çeliklerde olduğu gibi, demir dışı alaşımlarda da, alaşım elementleri borür tabakasının sertliğini artırmaktadır. Bunun başlıca sebebi, katı çözelti borürlerinin oluşmasıdır. Nikel, kobalt ve titanyum gibi alaşım elementlerinin ilavesi, borür tabakasının büyümesini yavaşlatmakta ve çok fazlı yapıların oluşmasıyla yüksek bor konsantrasyonuna sahip borür tabakası oluşturarak, kaplama özelliklerini iyileştirmektedir (Örneğin titanyumda TiB_2 fazı oluşumu gibi). Kobalt ve titanyum borür kaplama tabakasının kolonsal yapısı alaşım elementleri ile engellenebilmekte ve tabaka çok uniform bir hale getirilebilmektedir[4,21].

3.4.2 Borürlerin özellikleri

Bor, periyodik Çizelgede bir çok elementle bileşik oluşturmaktadır. Borürlerin çoğu, kuvvetli kovalent bağ yapısına sahiptir ve oldukça yüksek ergime sıcaklığı, elastisite modülü ve sertlik değerleri sergilemektedir [2].

Seramikler içerisinde borürlerin termal genişleme katsayıları orta seviyelerdedir. Genelde borürlerin ısı iletkenlik katsayıları ve termal şok dirençleri oldukça yüksektir. Borürler diğer seramiklerle kıyaslandığı zaman, son yıllarda yapılan çalışmalarda, yüksek sertlik ve mukavemet değerleri sergilemelerine rağmen gerçekte orta derecede mukavemet ve tokluk değerlerine sahiptirler. Birçok borür, 5-80 $\mu\Omega\text{-cm}$ aralığında elektriksel dirence sahiptir ve seramikler arasında iyi iletkenlik gösterir. Borürlerin manyetik özellikleri incelendiğinde, diamanyetik özellikten kuvvetli ferromanyetik özelliğe değiştiği fakat, bir çok borürün oda sıcaklığında zayıf paramanyetik özellik gösterdiği görülmektedir. Borürlerin kimyasal dirençleri, bir çok seramik malzemeye nazaran oldukça yüksektir[2].

Borürlerin oluşumu, büyük ölçüde bileşik yaptığı atomla arasındaki atomik boyut faktörüne ve elektrokimyasal etkiye bağlıdır. Bir borürün oluşması sırasında, dış yörünge elektronları, dağınık sp^2 ve sp^3 elektron konfigürasyonlarında yerleşebilmektedir. Bu durum, kuvvetli kovalent bağ yapısının oluşumunda önemli

bir karakteristiktir. sp^2 ve sp^3 yapılarındaki değişimin rolü, bor ile reaksiyona giren atomların elektron verme kabiliyetlerine bağlıdır. Çeşitli borür yapılarının oluşumu, s^2p , sp , sp^2 ve sp^3 elektron konfigürasyonlarının kombinasyonlarındaki değişimle açıklanmaktadır [22]. Samsanov [20], bütün borürleri üç ana grupta toplamıştır. (1) dış yörüngede bulunan s seviyesindeki elektronlara sahip olan elementlerin yapmış oldukları borürler. Bu grupta yer alan elementler, alkali (I-A) ve toprak alkali (II-A) elementleridir. (2) d iç yörüngelerine sahip olan elementlerin oluşturduğu borürler. Bu elementler, geçiş metalleri (III-B ile VIII-B arasındaki gruplar), lantanitler (nadir toprak elementleri) ve aktinitlerdir. (3) s, p valans elektronlarına sahip elementler tarafından oluşturulan borürler (BN ve BP). Benzer kristal yapıları ve latis parametrelerinde olan borürler katı çözelti oluşturmaktadır. Çizelge 3.7.'de çeşitli metal borürlerin bazı özellikleri verilmektedir [11].

Çizelge 3.7: Çeşitli metal borürlerin bazı özellikleri [2,11].

Borür	Kristal Yapı	Ergime Sıcaklığı	Termal Genleşme	Termal İletkenlik	Sertlik (GPa)	Elastisite Modülü
Cr₂B	Ortog.	1870	14,2 (27-1027°C)	10,9(20°C)	13,2	...
CrB	Tetra.	...	12,3 (27-1027°C)	20,1(20°C)	11,8	...
Fe₂B	Tetra.	1410	...	17,4	13,1-17,7	284
FeB	Ortor.	1650	12 (400-1000°C)	12 (20°C°)	16,2-18,6	343
Mn₂B	Tetra.	1580	...	6,6	17,7	...
MnB	Ortog.	1890	...	7,7	20,1	...
Mo₂B	Tetra.	2280	5 (25-500°C)	...	24,5	...
MoB₂	Hegza.	2375	7,7 (300-900°C)	...	11,8	...
Mo₂B₅	Ortog.	2140	8,6 (20-1027°)	50 (20°C)	23	672
NiB	Ortog.	1590	...	21,9	15,2	...
Ni₂B	Tetra.	1225	...	54,8	14	...
TiB	Ortog.	2190	...	...	22,7	...
TiB₂	Hegza.	3225	...	64,4(27°C)	33-25,5	551

Bağlardaki kovalentlik derecesi arttığı zaman, borürlerin ergime sıcaklığı, elastik modülü ve sertliği artmaktadır. Çoğu metal borürler Çizelge 3.7’de görüldüğü gibi yüksek ergime sıcaklıklarına sahiptir. Monoborürler ve diborürlerde stokiometrik olmama, bor zincirleriyle veya latis boşluklarıyla artmakta, ancak metal boşluklarından etkilenmemektedir [22].

Alternatif olarak borürler, kristalo-kimyasal olarak iki grupta sınıflandırılmaktadır; (1) düşük bor kontrasyonuna sahip borürler (M_4B , M_3B , M_2B , M_3B_2 , MB ve M_3B_4 gibi. M = metal), (2) yüksek bor kontrasyonuna sahip borürler (MB_2 , MB_4 , MB_6 , MB_{12} , MB_{49} , MB_{60-100} gibi).

Düşük bor kontrasyonuna sahip borürlerin yapıları latis parametreleriyle belirlenirken, yüksek bor kontrasyonuna sahip borürlerin yapıları ihtiva ettikleri B-B bağ yapısındaki bor elementlerine bağlıdır[2].

3.4.3 Demir esaslı malzemelerin borlanması

Borlama işlemiyle demir esaslı malzemenin yüzeylerin sertleştirilmesi konusunda ilk çalışmalar, Moissan tarafından 1895 yılında yapılmış ve daha sonra devam etmiştir. Hızla gelişme gösteren borlama işlemi günümüzde aşınmaya dirençli yüzey oluşturmak için oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [14].

Endüstriyel olarak borlama işlemi, alüminyum ve silisyum içeren yatak çelikleri haricinde yüzeyi sertleştirilmiş, temperlenmiş, takım ve paslanmaz çelikler gibi yapısal çeliklere, Armco (ticari saflıkta) demire, gri ve küresel grafitli dökme demire, sinterlenmiş demir ve çeliklere uygulanabilmektedir. Borlama işleminin ostenit fazında gerçekleşmesi sebebiyle havada sertleşen çelikler borlama sonrasında anında sertlik kazanırlar. Suda sertleşen parçalar borür tabakasının termal şoka maruz kalması sebebiyle su verilmesi gerekli olduğu durumlarda borlanmazlar. Kurşunlanmış ve sülfürlü çelikler yüzeyde çatlak oluşturma ihtimaline karşı nitrürlenmiş çelikler ise çatlak hassasiyetleri sebebiyle borlama işlemine tabi tutulmamalıdır [2].

Borlama işleminden hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın, karbon çeliklerinde yüzeyde iki çeşit borür fazı oluşabilmektedir. Bunlar en yüzeyde FeB fazı ve FeB

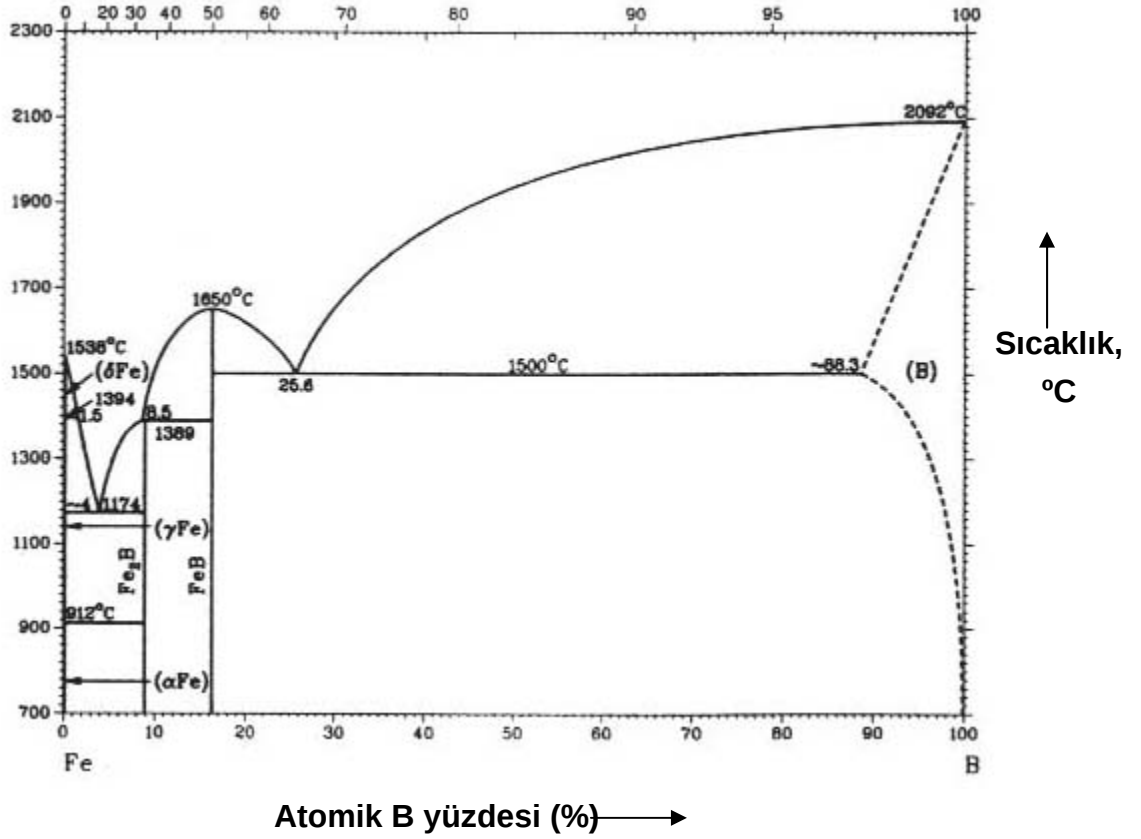
fazı ile matris arasında oluşan Fe_2B fazı şeklindedir. Borlama sırasında oluşabilecek fazları Fe-B denge diyagramında inceleyerek görmek mümkündür [2].

3.4.3.1 Demir-bor denge diyagramı

Alaşımlarda, alaşım elementlerinin yer alan katı eriyiği veya arayer katı eriyiği olarak davranacakları Hume-Rothery kuralları çerçevesinde belirlenebilmektedir. Bu kurallar içersinde en önemli olanı, atomik boyut faktörüdür. Fe-B sisteminde borun atom çapı, demire kıyasla %27 daha küçük olması sebebiyle, bu elementle katı eriyik yapabilmektedir (Şekil 3.1). Demir alaşımlarında bor elementinin yer alan veya arayer katı çözelti yapabilecekleri iç sürtünme deneyleri ile belirlenebilmektedir [23].

Bor elementinin demirde çözünürlüğü, $\alpha\text{-Fe}$ ve $\gamma\text{-Fe}$ 'de %0,5B (a/o) oranındadır. Fe-B ikili denge diyagramının $\alpha\text{-Fe}$ fazına yakın bölgesi, son 50 yıl içesinde birçok kez değişikliğe uğramış, fakat yapılan son çalışmalarda, borun $\alpha\text{-Fe}$ ve $\gamma\text{-Fe}$ fazları içersinde % 0,5 B (a/o) kadar çözündüğü saptanmıştır. Ancak, $\gamma\text{-Fe}$ fazı içersindeki çözünürlüğü tam olarak tesbit edilememiştir. Ayrıca ilk çalışmalarda $\alpha\text{-Fe}$ ile Fe_2B arasında bir peritektik reaksiyonun varlığından bahsedilirken son çalışmalarda bu reaksiyonun olmadığı görülmüştür[4,24].

Fe-B ikili denge diyagramında, % 7,2 B (a/o) konsantrasyonuna kadar 1394°C 'de $\gamma\text{-Fe}$ 'den γ +sıvıya dönüşen bir metatektik reaksiyon yer alırken, 911°C 'de $\gamma\text{-Fe}+\text{Fe}_2\text{B}$ 'den $\alpha\text{-Fe}_2\text{B}$ 'e dönüşen bir reaksiyon yer almaktadır. Fe-B denge diyagramı incelenecek olursa (Şekil 2.1), yaklaşık olarak % 17 B (a/o) bileşiminde $\alpha\text{-Fe}$ ile Fe_2B arasında 1174°C 'de bir ötektik reaksiyon, 1389°C 'de sıvı+FeB arsında bir peritektik reaksiyon ve % 33,3 B (a/o) bileşiminde Fe_2B intermetalik bileşiğinin yer aldığı görülmektedir. Ayrıca, diyagramda görülmeyen dengesiz Fe_3B ve FeB_2 gibi intermetalik bileşiklerin de oluşabildiğine bir çok makalede rastlanmaktadır. İncelenen birçok makalede, Fe_2B fazının ergime sıcaklığının $1389\text{-}1410^\circ\text{C}$ arasında ve FeB fazının ise $1540\text{-}1657^\circ\text{C}$ arasında yer aldığı görülmektedir [2].



Şekil 3.1: Demir- bor denge diyagramı [24].

3.4.3.2 Fe₂B ve FeB fazlarının özellikleri

Difüzyon yönüne bağlı olarak, kolonsal yapı sergileyen tek fazlı Fe₂B fazı, çift fazlı Fe₂B+FeB fazlarına göre daha çok tercih edilmektedir. Gerçekte FeB ve Fe₂B fazları birbirlerine basma ve çekme gerilmeleri uygulamakta ve çoğu zaman bu gerilmeler sebebiyle, iki faz arasında çatlaklar oluşmaktadır[4]. Bu etki mekanik zorlamalar altında borür tabakasının tabakaların kalkmasına neden olmaktadır. Termal şok veya mekanik etkiler altında ayrılmalar ve tabaka halinde kalkmalar meydana gelmektedir. Bu sebeple, minimum FeB içeriğine sahip kaplama tabakaları elde edilmeye çalışılmaktadır[4]. Genellikle, borür tabakalarının tribolojik özelliklerinin belirlenmesinde mikroyapıya bağlı olarak açıklamalar yapılmaktadır. Çift fazlı FeB+Fe₂B tabakası, tek fazlı Fe₂B tabakasına göre iyi özelliklere sahip değildir. Çift fazlı tabakalarda yüzeyin hemen altında porozite oluşumu mümkün olmaktadır. Bor kaplamalarda, borür tabakasının ince olması durumunda, porozite oluşumu ve tabakanın kalkma riskinin az olduğu düşünülmektedir[4]. Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucunda, Fe₂B fazının hakim olduğu dış yapısına benzer kolonsal bir

yapının oluşması da tercih edilmektedir. Çift fazlı $\text{Fe}_2\text{B}+\text{FeB}$ tabakası, vakum veya tuz banyosunda 800°C sıcaklık civarında uzun süre ısıtılma tabi tutulduğu takdirde, tek fazlı Fe_2B fazı elde edilebilmektedir. Fe_2B ve FeB fazlarının tipik özellikleri Çizelge 3.8.'de verilmektedir [2,6,11]. Fe_2B ve FeB fazlarının Çizelge 3.8'de verilen özellikleri bir çok makalede farklı değerler almaktadır. Bu Çizelgede, daha çok belirli makalelerden değerler alınmış olup, yayınlanan diğer makalelerden bazıları referans olarak verilmiştir.

Çizelge 3.8: Fe_2B ve FeB fazlarının tipik özellikleri [2,6,11]

Özellik	Fe_2B	FeB
Kristal Yapı	Hacim Merkezli Tetragonal	Ortorombik
Latis Parametresi ($\text{\AA}$)	$A=5,078$, $c=4,28$	$A=4,053$, $b=5,495$, $c=2,946$
Mikrosertlik (GPa)	18-20	19-21
Elastite Modülü (GPa)	280-295	590
Bor İçeriği (%Ağırlıkça)	8,83	16,23
Yoğunluk (gr/cm^3)	7,43	6,75
Termal Genleşme Katsayısı ($\text{ppm/}^\circ\text{C}$)	7,65 ($200-600^\circ\text{C}$) 4,25 ($100-800^\circ\text{C}$)	23 ($200-600^\circ\text{C}$)
Ergime Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	1389-1410	1540-1657
Termal İletkenlik ($\text{W/m.}^\circ\text{K}$)	30,1 (20°C)	12,0 (20°C)
Elektriksel Direnç ($10^6 \Omega.\text{cm}$)	38	80

3.5 Çok Fazlı Borlama İşlemi

Çok fazlı borlama; alüminyum, krom, silisyum, vanadyum ve titanyum gibi elementleri borür tabakası bünyesinde bulunduran termo-kimyasal bir işlemdir. Borlama iki kademeli bir işlem olup, $850-1050^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. 1.kademede, geleneksel yöntemlerden biriyle borlama işlemi yapılmaktadır ve daha çok kutu borlama tercih edilmektedir[4]. FeB fazının oluşumu iyi sonuçlar vermekte ve $30 \mu\text{m}$ civarındaki kaplamalar yeterli olmaktadır. 2.kademede, elementin difüzyonu gerçekleştirilmektedir.

Boraks esaslı eriyik veya toz karışımı yardımıyla metalik elementin borlanmış yüzeye difüzyonu sağlanmaktadır. Eğer kutu borlama yöntemi kullanılırsa, ortamdan Ar veya H₂ gazı geçirilerek reaksiyon sırasında sinterleme oluşumuna engel olunabilmektedir. Altı çeşit çok bileşenli borlama türü mevcut olup bunlar, bor-aluminyumlama, bor-silisyumlama, bor-kromlama, bor-krom-titanyumlama, bor-krom-vanadyumlama ve bor-vanadyumlama[2,4] şeklinde sınıflandırılabilir :

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

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

Bor-Krom-Titanyumlama: Yapısal alaşımlı çeliklere uygulandığı zaman 5000 kg/mm² (15 gr yük) sertlik değerine ulaşarak, çok yüksek abrasiv aşınma ve korozyon direnci sağlamaktadır. Oluşan tabakanın en dış kısmında 5000 kg/mm² sertlik değerine sahip titanyum borür tabakası bulunmakta, daha iç kısımda ise demir-krom borür tabakası yer almaktadır.

Bor-Vanadyumlama ve Bor-Krom-Vanadyumlama: Bu işlemlerde 3000 kg/mm² sertlik değerine ulaşılmasına rağmen, oldukça sünek bir yapı elde edilmektedir. Darbeli yüklemeler karşısında tabakanın kalkması söz konusu olmadığından, bu tür kaplamalar darbeli yükler altındaki uygulamalar için kullanılabilir.

3.6 Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulama Alanları

Borlanmış malzemeler, göstermiş oldukları üstün özellikler sebebiyle çok geniş bir endüstriyel kullanım alanına sahiptir [4]. Borlama işlemine tabi tutulmuş çeşitli demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları Çizelge 3.9’da özetlenmektedir.

Çizelge 3.9: Borlama işlemine tabi tutulmuş çeşitli demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları [12].

Borlanan Malzeme			Uygulama Alanları
AISI	BSI	EN TS	
		S235	Kovanlar, sürgüler, nozüller, taşıma tüpleri, taban plakaları, besleyiciler Bıçaklar ve yardımcı elemanlar
1020		C15, C15E	Dişli sürücüler, pompa şaftları
1043		C45	Pinler, yardımcı kavrayıcılar, aşındırıcı diskler ve sürgüler
		E295	Döküm akıtcılar, nozüller, kollar
1138		45S20	Şaft koruma parçaları, mandreller
1042		C45E	Girdaplı akış elemanları, nozüller (petro yakıtlar için) merdaneler, sürgüler ve kovanlar
		CmW3	Giriş plakaları
W1		C60W1	Kavrama aynası, yardımcı baralar
D3		X210Cr12	Kovanlar, basma aletleri, plakalar mandreller, çekiçler, kalıplar
C2		115CrV3	Çekme kalıpları, enjektörler, yataklar, giriş pinleri
		40CrMnMo7	Giriş plakaları, bükme kalıpları
H11	BH11	X38CrMoV51	Vanalar, enjeksiyon silindirleri, çıkıcılar
H13		X40CrMoV51	Ağızlar, ingot kalıpları, sıcak dövme için alt ve üst kalıplar, matrisler ve diskler
H10		X32CrMoV33	Enjeksiyon kalıplama kalıpları, besleyiciler sıcak şekillendirme için alt ve üst kalıplar
D2		X155CrVMo121	Çekme kalıpları, soğuk haddeleme için merdaneler
		105WCr6	Kalibreli merdaneler
D6		X210CrW12	Sıkıştırma merdaneleri
S1	-BS1	60WCrV7	Basma ve çekme matrisleri, mandrelleri, doğrultucuları, kalıpları ve kavrama ringleri
D2		X165CrVMo121	Çekme kalıpları, soğuk hadde için merdaneler

Çizelge 3.9: (Devam) Borlama işlemine tabi tutulmuş çeşitli demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları [12].

Borlanan Malzeme			Uygulama Alanları
AISI	BSI	EN TS	
L6	BS224	56NiCrMo4	Ektrüzyon kalıpları, kovanları, döküm ileticiler, dövme kalıpları ve serbest dövme elemanları
		X45NiCrMo4	Kalibreli kalıplar, basınç pedleri ve kalıpları
O2	-BO2	90MnCrV8	Kalıplar, bükme kalıpları, basınç takımları, kalibreli merdaneler, kovanlar, çekme kalıpları, yardımcı baralar, diskler, delik açan çekiçler
E52100		100Cr6	Toplar, yardımcı baralar, merdaneler ve yardımcı elemanlar
		Ni36	Demir dışı metal döküm parçaları
		X50CrMnNiV229	Magnetize edilemeyen takımların parçaları (ısıl işlem yapılabilir)
4140	708A42(En19C)	42CrMo4	Basma takım kalıpları, geri dönüşsüz valfler
4150	708A42 (CDS-15)	50CrMo4	Taban plakalarının nozülleri
4317		17CrNiMo4	Konik dişliler, vida ve silindir dişliler, şaftlar, zincir bileşenleri
5115		16MnCr5	Helisel yatak tekerlekleri, yardımcı baralar, yatak kolonları
302	302S25(En58A)	X12CrNi188	Vida yuvaları ve kovanlar
6152	-	50CrV4	Güvenlik plakaları, sürücü parçalar, valf yayları, yay yuvaları
316	- 316S16(EN538)	X5CrNiMo1810	Plastik ve kauçuk endüstrisinde kullanılan delinmiş ve fatura açılmış yuvalar
	-	G-10CrNiMo188	Valf açıcıları, tekstil ve kimya endüstrisi için parçalar
410	410S21(EN56A)	X10Cr13	Valf bileşenleri ve besleyiciler
420	420S45(EN56D)	X40Cr13	Valf besleyicileri, dalıcı rotlar, besleyiciler, yardımcı ekipmanlar, kimyasal işlerde kullanılan parçalar
	-	X35CrMo17	Şaftlar, valfler, ringler
KGDD	-	-	Tekstil makineleri için parçalar, mandreller, kalıplar, kollar.

Özellikle adhesiv ve abrasiv aşınma şartlarında bir çok kullanım alanı mevcut olup, bunlar;

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

Abrasiv aşınmaya dirençli malzemeler olarak, vidalı sürücüler ve kovanlar, delinmiş veya dar ve küçük açılmış faturalar, makaralar, valf elemanları, şaftlar, tamamlayıcılar, paslanmaz çelik malzemelerden üretilmekte ve ayrıca helikopter turbin kanatçıkları borlanmış Ti-6Al-4V malzemeden üretilmektedir. Bu katagori ile ilgili diğer uygulama alanları şu şekilde sıralanmaktadır [4].

- Doldurma elemanlarının nozülleri,
- Ekstrüzyon sürücüler, kovanları, nozülleri, plastik üretim makinalarının dönüşümlü akım blokları (ekstrüzyon veya enjeksiyon kalıplı makinalar),
- Plastik endüstrisinde, mineral takviyeli plastik granüllerin yükleme elemanları için kontrol plakaları ve bentleri, dövme kalıpları (arabalar için aksesuar parçaların performanslı olarak üretilmeleri için), basma ve sürme matrisleri, kavrama halkaları (takım çelikleri),
- Pres kalıpları, kesme şablonları, döverek kesme plaka muhafazaları (DIN St 37 çeliği),
- Vida ve silindirik dişliler, konik dişliler (AISI 4317 çeliği),
- Seramik tuğla ve kapların kalıplanmasında kullanılan kalıplar, ekstrüzyon kovanları, iticileri ve ringleri (AISI 4140 çeliği),

- Ekstrüzyon tipleri, geri dönüşümsüz valfler ve silindirler (abrasiv minerallerin ekstrüzyonu veya fiber glas takviyeli plastiklerin ekstrüzyonu için)(AISI 4150 çeliği),
- Demir dışı metallerin döküm besleyicileri (AISI H11 çeliği),
- Linyit kömür briketlerin taşıma levhaları.

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

Aynı şekilde bu parçalar, Al, Zn ve Sn alaşımları gibi metallerin sıvı eriyiklerinin taşınmasında da kullanılmaktadır (DIN St 37). Korozyon dirençli taşıma boru sistemleri, örneğin vinil klorür monomerleri, öğütme diskleri (Ck 45) ve basınçlı döküm sistemleri, hava akımlı erozif aşınma gömlekleri, veri yazıcı elemanları (manyetik başlar, tel yazıcılar) bunlara örnek olarak verilebilir [2].

Borlanmış permalaşımlar manyetik kafalarda kullanılmaktadır. Borlanmış sementit karbürler, tel çekme kalıplarında, yardımcı parçalarda, ve boyutsal ölçüm parçalarında kullanılmaktadır.

Çok bileşenli borlamaların kullanım alanlarına örnek olarak, bor-kromlama işleminin ostenitik paslanmaz çeliklerin, bor-krom-titanyumlama ise plastik makinalarının parçalarında aşınma direncini arttırması söylenebilir.

4. BORÜR TABAKASININ BÜYÜME MEKANİZMASI

4.1 Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği

Metallere uygulanan yüzey işlemlerinin çoğu, alaşım elementinin malzemenin yüzeyine yayınma esasına dayanmaktadır. Genel olarak difüzyon işleminin gerçekleşebilmesi için iki temel kavram önem kazanmaktadır. Bunlar; difüzyonlanabilme ve difüzyon için gerekli olan itici güçtür. Borür tabakasında ki bu özellik, sadece ana metalin yapısına bağlı değil, aynı zamanda borür tabakasının yapısına da bağlı olmaktadır.

Bu temel karakteristikler difüzyonla metal tabaka oluşturma işlemlerinde, kaplama kinetiğinin temelinin teşkil etmektedir. Dislokasyonlar, tane sınırları, yüzeyler ve arayüzeyler malzemelerin başlıca yapı hatalarıdır. Potansiyel gradyan ve bu yapı hatalarının kombinasyonları çeşitlilik arzeder ve difüzyon olayını karmaşıktırır. Matris malzeme, tane sınırları ve dislokasyonlar boyunca kütle taşınımının hızlı olduğu literatürde geniş bir şekilde yer almaktadır[1,2,24].

Difüzyon yoluyla çeliğin yüzeyine sert tabakanın oluşturulması işleminde, difüzyon hacimsel yayınma ile kontrol edilmektedir. Çeliğin iki klasik yüzey sertleştirme işlemi olan sementasyon ve nitrasyon, matris malzeme içerisinde C ve N'un yayınma esasına dayanmaktadır[6,11]. Benzer şekilde bor difüzyonu da kütle taşıyım ile gerçekleşmektedir. Bunun yanında matris metalin içerdği alaşım elementlerinin bor difüzyonuna tek tek ya da birlikte etkileri de mevcuttur.

Demir ve demir esaslı malzemeler borlama işlemine tabi tutuldukları zaman, malzeme yüzeyi üzerinde borür fazı başlangıçta çekirdek halinde büyümektedir. Borür tabakada, en dış yüzeyde (Fe, M)B ve daha iç kısımda yani matrisin hemen üzerinde (Fe, M)₂B fazlarını içeren iki farklı borür tabakasından meydana gelmektedir. Borür tabakasının büyümesi yüzeydeki hakim fazlar olan Fe₂B ve FeB fazlarının içerisinde difüzyon kontrollü olarak gerçekleşmektedir[25].

Brakman ve arkadaşları [25], borlama işlemi sırasında bor konsantrasyonlarının yüzey ile arayüzey boyunca değişiklik göstermediklerini kabul ederek aşağıdaki bağıntıları geliştirmişlerdir.

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

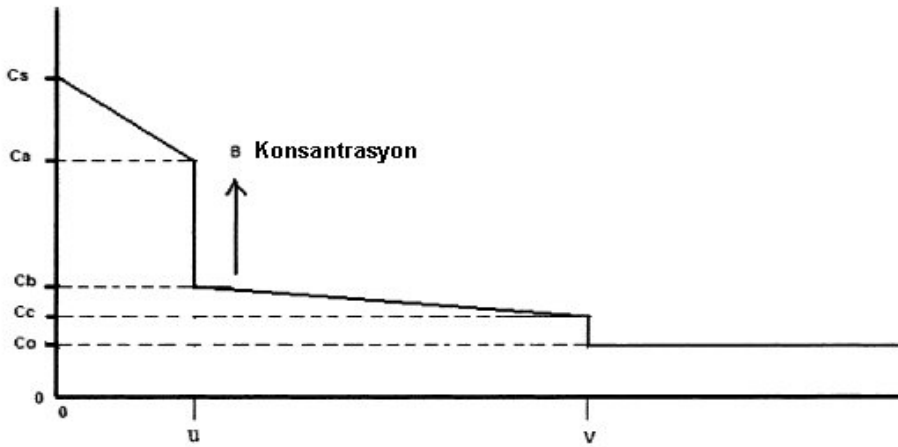
$$C_{FeB} = D_{FeB} (C_s - C_a) \quad (4.1)$$

$$C_{Fe2B} = D_{Fe2B} (C_b - C_c) \quad (4.2)$$

Konsantrasyonun yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak değişimi Şekil 4.1’de verilmektedir.

$C_s - C_a$ ve $C_b - C_c$ sıcaklığa önemli ölçüde bağlı değildir. C_{FeB} ve C_{Fe2B} ’nin sıcaklığa bağımlılığı D_{FeB} ve D_{Fe2B} difüzyon katsayılarından kaynaklanmaktadır.

Bundan dolayı,



Şekil 4.1: Bor konsantrasyonunun yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak değişimi[26].

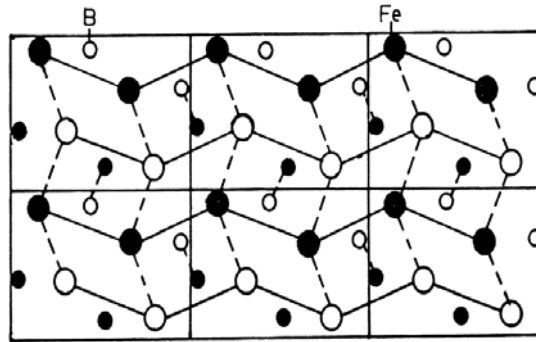
$$C_{FeB} = K_{FeB} \exp(-Q_{FeB}/RT) \quad (4.3)$$

$$C_{Fe2B} = K_{Fe2B} \exp(-Q_{Fe2B}/RT) \quad (4.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, K_{FeB} ve K_{Fe2B} sabit değerlerdir.

Sonuç olarak, FeB ve Fe₂B fazlarında bor difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi Q ve ön eksponansiyel K faktörü değerleri, sıcaklığın tersi (1/T) ile $\ln C_{FeB}$ ve $\ln C_{Fe_2B}$ ile arasında çizilen eğriler yardımıyla ordinatı kesim noktasından ve eğiminden bulunabilmektedir. Her iki tabaka birbirine bağlı olarak büyümektedir. Bu yüzden, Fe₂B ve FeB fazlarının büyümesi ile ilgili kinetik parametrelerin belirlenmesinde her iki tabaka için verilerin bulunması gerekmektedir. Bu, yukarıda verilen aktivasyon enerjisinin belirlenmesinde kullanılan ifadeler örneklenmiştir [25].

Borun Fe₂B fazı içerisinde difüzyonu, <001> düzlemine dik ve <001> yönünde zincir oluşturarak, FeB fazında ise <001> yönünde bir zigzag çizerek mümkün olmaktadır(Şekil 3.2). Kristallografik veriler doğrultusunda, B atomunun Fe₂B fazı içerisinde <001> düzlemine dik bir yol boyunca difüzyonu sırasında, demir ve bor atomları arasında katedilen en kısa mesafe yaklaşık olarak $\approx 0,191$ nm olarak tesbit edilmiştir. Bu durumda, B atomu 4 adet demir atomu ile çevrili durumdadır (Şekil 4.3) [1].



Şekil 4.2: <001> Düzleminde FeB projeksiyonu [1].

FeB içerisinde borun zigzag şeklindeki difüzyonu için her bir atomun sıçrama yolu şöyle verilmektedir [1]

$$h = (1 - 4u)/a^2 \quad (4.5)$$

$$k = 1/b^2 \quad (4.6)$$

$$l = (-16uv + 4u + 4v - 2)/c^2 \quad (4.7)$$

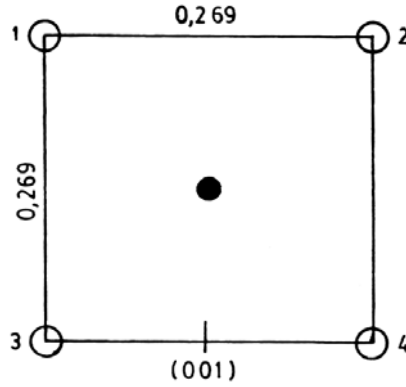
burada $u = 0,125$, $v = 0,18$ değerine sahiptir. Borun atomik sıçraması, 2° 'lik bir sapma ile düzleme dik olarak meydana gelmektedir. Burada $\langle hkl \rangle$ düzlemi,

$$h = 2/(4v - 1) \quad (4.8)$$

$$k = h/(1 - 4u) \quad (4.9)$$

$$k+1 = 2 \quad (4.10)$$

şeklinde. Borun FeB fazı içerisindeki difüzyon sırasında, demir ve bor atomları arasındaki en kısa mesafe belirtilen sıçramada meydana gelmektedir ve $\approx 0,197$ nm'ye eşittir. Bu sırada, belirtilen düzlemde 4 demir atomu ile çevrili durumdadır. Fe ve B atomları arasında en kısa mesafe $\approx 0,125$ nm'dir (Şekil 4.3) [1].



Şekil 4.3: Fe₂B için $\langle 001 \rangle$ Düzlemine dik olarak borun atomik sıçraması sırasında, birbirlerine en yakın anda bir B ve Fe atomlarının konfigürasyonları [1].

Araştırmacılar tarafından FeB ve Fe₂B fazı içerisinde bor difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjisinin aynı değere sahip olacağı ileri sürülmektedir. FeB ve Fe₂B fazı içerisinde bor difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjileri arasında çok az bir fark vardır (Çizelge 4.1). Bu fark, B ile Fe atomları arasındaki bağlanma farklılığından kaynaklanmaktadır. Fe-B arasındaki en kısa mesafe Fe₂B fazına nazaran FeB fazında daha küçük olduğundan (0,215 nm'ye karşılık 0,218 nm), Fe-B bağının kovalent karakteri ve dolayısıyla mukavemeti FeB fazı için daha büyük olabilir.

Ayrıca FeB fazı içerisinde en kısa B-B mesafesi B atomunun kovalent yarıçapının yaklaşık 2 katıdır. Buna karşılık aynı değer Fe₂B fazı içerisinde belirgin olarak daha büyüktür (0,180 nm'ye karşılık 0,212 nm). Ayrıca, bor atomlarının en yakın komşu

bor atomları ile arasındaki bağı kırmamanın FeB fazı içerisinde Fe₂B fazına nazaran daha zor olduğu söylenmektedir [1,2].

Çizelge 4.1: FeB ve Fe₂B fazları içerisinde borun difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjileri [25].

	QFeB kj/mol	QFe ₂ B kj/mol	QFeB/QFe ₂ B
Fe	175	157	1,11
Fe-0,8C	176	154	1,14
Fe-0,5Cr	177	155	1,14
Fe-4 Cr	289	210	1,38
Fe-4Ni	311	178	1,75
Fe-10Ni	286	157	1,82

Difüzyon katsayısı atomik sıçrama mesafesinin karesi ve sıçrama frekansı ile orantılıdır. Burada, sıçrama frekansı olarak belirtilen faktör, aktivasyon enerjisi ile eksponansiyel sıcaklık bağımlılığını da içermektedir.

Borun Fe₂B fazı içerisinde <001> boyunca bir atomik sıçrama mesafesi, $c/2 = 0,212$ nm iken FeB fazı içerisinde zikzag yol boyunca $c/2 = 0,148$ nm'dir. Bu yüzden sadece zincir boyunca oluşan atomik sıçramalar göz önüne alındığında (zikzag veya düz) Fe₂B ve FeB fazları içerisinde <001> boyunca difüzyon için geçerli olan bor difüzyon katsayılarının eksponansiyel öncesi faktörlerinin oranı $(0,148)^2/(0,212)^2 \approx 0,5$ olarak tahmin edilmektedir.

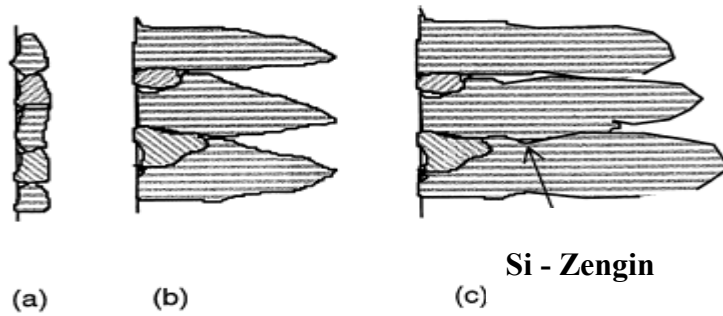
4.2 Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması

Demir borürler, seramiklerin yüksek sertlik ve metallerin termal ve elektriksel iletkenlik gibi genel özelliklerini bir arada bulunduran bileşiklerdir[22].

Genellikle sade karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin termokimyasal yöntemlerle borlanması sırasında oluşan borürlerin, kolonsal kümecikler halinde büyüdüğü görülmektedir. Oluşan borür tabakasında en dış yüzeyde FeB fazı, matrise doğru Fe₂B fazı ve iç kısımda geçiş bölgesi yer almaktadır. FeB fazı ile Fe₂B ve Fe₂B ile matris arayüzeyindeki yapının kolonsal olduğu bilinmektedir. Ancak, yüksek

alaşımli çeliklerde arayüzey yapısının kolonsal yerine düz bir çizgi halinde olduğu belirtilmektedir[27].

Borlama işlemi sonucunda oluşan borür fazları, borlama ortamının aktif bor konsantrasyonuna bağlı olarak, yüzey çizikleri ve pürüzlülükleri gibi makro hataların, tane sınırları ve dislokasyonlar[27] gibi mikro hataların bulunduğu bölgelerde başlamaktadır. Özellikle düşük aktif bor konsantrasyonunun bulunduğu ortamlarda, bu bölgeler borür fazının oluşabildiği yegane yerlerdir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4: Konvansiyonel borlama sırasında borür tabakasının oluşum mekanizması (a) Çekirdeklenme (b) ve (c) <001> oryantasyonunda büyüme [31].

Yapılan araştırmalarda ilk oluşan borür fazının Fe_2B olduğu, fakat Mössbauer elektron spektroskopu yapılan ölçümlerde ilk oluşan borür fazının Fe_2B fazı üzerinde FeB fazının bulunduğu ve en dış yüzeyde ise FeB_{1+x} fazının yer aldığı görülmektedir[28].

Araştırmacı ilk çalışmalarında, en dış yüzeyde bulunan fazın FeB_x olduğunu, ancak daha sonra yapmış olduğu çalışmalarda, bu fazın FeB_{1+x} şeklinde ve buradaki x katsayısının 1'den büyük olduğunu (muhtemelen $x=2$) belirtmektedir[29,30].

Bu durumda, bor difüzyonunun Fe_2B ile matris ve FeB ile Fe_2B arasında gerçekleştiği görülmektedir. Borür tabaka yüzeyinden iç kısımlara doğru gidildikçe Fe_2B fazının ağırlık kazandığı düşünülmektedir. Bu konuyla ilgili olarak yapılan çalışmada, yüzeyden belirli oranlarda tabakalar kaldırılarak yapılan x-ışınları analizinde bu durum kanıtlanmaktadır[28].

Yapılan araştırmalarda, borür tabakasının oluşumu konusunda genel olarak savunulan nokta, işlemin difüzyon kontrollü olmasıdır. Bu sebeple, bazen

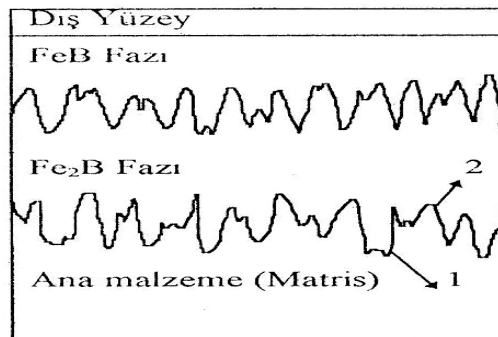
termokimyasal terimi yerine termodifüzyon kelimesi de kullanılmaktadır. Fakat borlama ile ilgili farklı büyüme mekanizmaları da öne sürülmektedir[4, 32, 33].

Difüzyon kanalı büyüme mekanizmasına göre; ortagonal prizma, bor atomlarının yayınmasını kolaylaştıracak en büyük ara kesite sahiptir ve Fe_2B kristalinde, $\langle 001 \rangle$ doğrultusunda, bor atomları bir yayınma kanalı oluşturur. Bor tabakasından borür ve esas metal arayüzeyine sürekli olarak yayınan bor atomları, borlama tabakası yüzeyine dik doğrultuda Fe_2B kristalleri oluşturur ve bu kristaller kolonsal şekilde içeriye doğru büyür[24].

Difüzyon kanallı büyüme mekanizmasında, Fe_2B 'un kuvvetli bir tercihli yönlenmeye sahip olmasına rağmen, $\text{Fe}_2\text{B}/\text{Fe}$ arayüzeyinde düşük ve ihmal edilebilir bir kolonlaşma göstererek büyümesini veya kristallografik bir tekstürün olmadığı durumda arayüzeydeki kolonlaşmayı açıklamada yetersiz kalmaktadır. Bu konuda, uçtan büyüme mekanizmasının daha geçerli olduğu ileri sürülmektedir[24,27].

Uçtan büyüme mekanizmasına göre; ana malzemenin bileşimine ve işlem şartlarına bağlı olarak başlangıçta oluşan Fe_2B çekirdeği iğnesel bir şekilde büyür ve bor gradyanı boyunca yönlenir[24].

Bu durumda Fe_2B çekirdeğinin ucu civarında oluşan bölgesel yüksek gerilim alanları ve kafes distorsiyonları tabakanın kolonsal olarak büyümesini sağlar. Uçtan büyüme mekanizmasında, Şekil 4.5'de görüldüğü gibi demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan tabaka ile malzeme ara yüzeyindeki kolonsallık 1 noktasında 2 noktasına göre daha yüksektir.

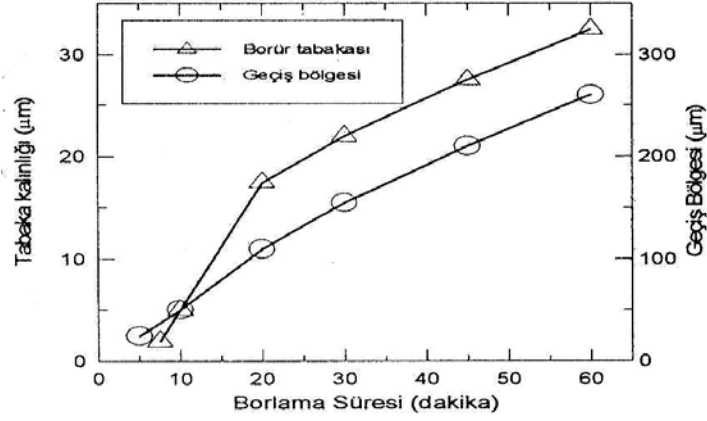


Şekil 4.5: FeB ve Fe_2B tabakalarında, demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan kolonsal büyümenin şematik gösterimi [2].

Çok fazlı borür tabakaları oluşumunda, FeB'nin büyüme mekanizması, ana malzeme üzerindeki Fe₂B'nin büyüme mekanizmasına (uçtan büyüme) benzeyebilir. Aynı tabaka için FeB/Fe₂B ara yüzeyindeki kolonsallığın Fe₂B/matris ara yüzeyindekinden daha az olması oldukça dikkat çekicidir. Bu durum, mevcut fazların mekanik özelliklerindeki farklılıklarla ilişkili olabilir. Fe₂B, nisbeten sünek olan ana malzemede büyüyen bir faz iken FeB, Fe₂B üzerinde yani daha sert bir yapıda büyüyen bir fazdır[2,6]. Buradan FeB'nin, Fe₂B'den daha sert olabileceği sonucu çıkarılabilir. Bu farklılıklar, bölgesel gerilim oluşumlarına ve/veya ara yüzeylerde kafes distorsiyonlarına sebep olabilir[2,6]. Borür büyümesinin bir dahili sonuç olduğu göz önüne alındığında, yani tepkimelerin tek fazlı tabakalarda Fe₂B/matris ve çok fazlı tabakalarda FeB/Fe₂B ara yüzeylerinde gerçekleştiği düşünüldüğünde, oluşan bileşiklerin dış yüzeylerinin kristal yapılarının düzensiz ve mekanik açıdan zayıf olması muhtemeldir[2,24].

Borlama işlemi esnasında çelik bileşiminde bulunan elementlerin yeniden dağıldıkları ve bu arada FeB ve Fe₂B tabakalarının, karbon ve silisyumu çözündürme yeteneği olmamasından dolayı, bor yayını esnasında C ve Si'un borür tabakasından içeriye doğru itildikleri ve bunun sonucu olarak borür tabakası ile borlanan metal matris arasında "geçiş bölgesi" olarak isimlendirilen bir yapının meydana geldiği bilinmektedir[6].

Geçiş bölgesi, mikroyapı itibarı ile esas malzeme yapısından farklı bir görünüme sahiptir ve borür tabakasına göre daha kalındır. Borür tabakası tarafından karbonun içeriye doğru itilmesi sonucunda geçiş bölgesinde, esas malzemeye göre daha fazla perlit bulunacağı, çeşitli araştırmacılar tarafından ileri sürülmektedir. Bu bölgedeki bor dağılımını otoradyografi yöntemi ile inceleyen Berzina ve arkadaşları[34], geçiş bölgesi kalınlığının, normal metalografik yöntemle belirlenene göre daha büyük olduğunu belirlemişlerdir. Lu [35], Ck 15 çeliğinde, borlama süresine bağlı olarak borür tabakası ve geçiş bölgesi kalınlıklarının farklı tarzlarda arttığını belirtmektedir (Şekil 4.6).



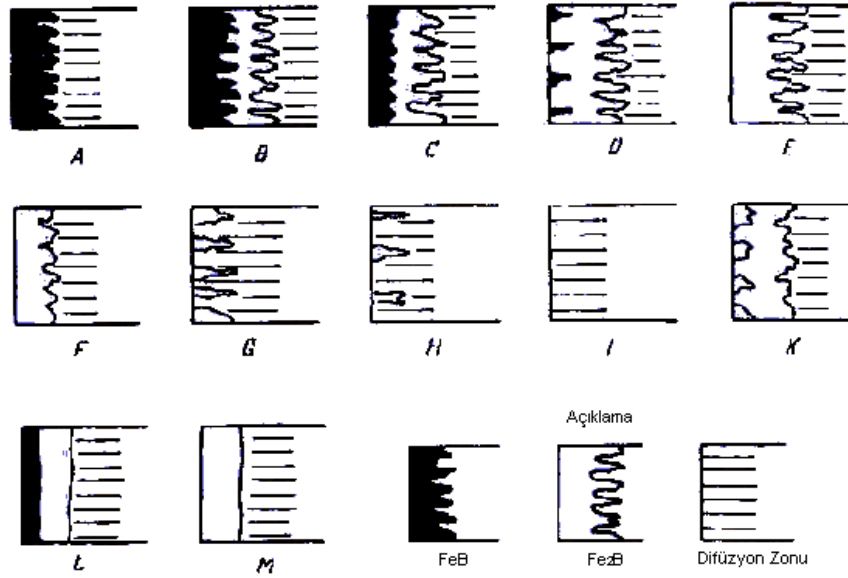
Şekil 4.6: Fe₂B ve geçiş bölgesi kalınlığının borlama süresi ile değişimi[35].

Aynı yöntemi kullanan Bozkurt[6], geçiş bölgesinin, borür tabakasından 10-15 kat kadar fazla bir kalınlığa sahip olduğunu tesbit etmiştir. Genel olarak, geçiş bölgesindeki tane boyutu, ana malzeme tane boyutuna göre daha büyük olduğu halde, sinterlenmiş Fe-C alaşımlarında bu bölgede tane büyümesine rastlanmadığı ileri sürülmektedir.

4.3 Borür Tabakası Çeşitleri Ve Borür Tabakası Kalınlığı

Çeşitli borlama yöntemleri ile 14 farklı yapıda borür tabakası elde edilebilmektedir. Kunst ve Schaaber tarafından geliştirilerek düzenlenen sistematik sınıflandırma Şekil 4.7’de gösterilmiştir[11]. Borür tabakalarının yapısı; borlama yöntemine, borlanan malzemenin bileşimine, borlama ortamına ve işlem şartlarına bağlı olarak; ya düz bir formda veya parmaklı formda olabilir. Tabaka tiplerinden hareketle bazı tabaka özelliklerinin belirlenebileceğini söylemek mümkündür. Endüstride Şekil 4.7’de verilen E ve F tipi yani tek fazlı borür tabakası (Fe₂B) tercih edilmektedir. Bu tabakalar, düşük kırılma değeri sahiptir. Ana malzemeye, borlu tabakanın özelliklerini olumsuz yönde etkilemeden; borlama sonrası işlemler uygulanabilir[11]. Teorik olarak, adeziv aşınmayı önlemek için 5 µm’lik tabaka kalınlığı yeterlidir. Ancak, alaşımsız ve az alaşımlı çeliklerde olduğu gibi tabaka geometrisinin parmaklı olduğu durumlarda, bu kalınlıkta bir tabaka elde etmek mümkün değildir. Yüksek alaşımlı çeliklerde 15-20 µm kalınlık uygundur. Takım çeliklerinde, tabaka kalınlığının 75-100 µm’yi geçmemesi önerilir. Tabaka kalınlığı arttıkça tabakanın gevrekliği de artacağı için, özellikle çift fazlı (Fe₂B+FeB)

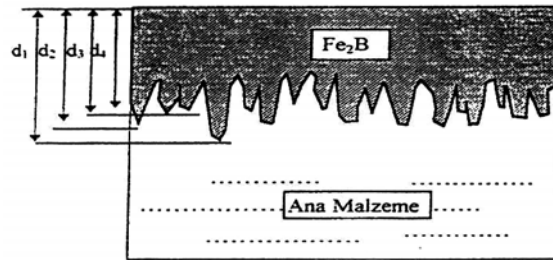
tabakalarda, tabakanın çok kalın olmamasına dikkat edilmelidir. Alaşım elementlerinin oranı arttıkça çelik içerisine bor yayılımı güçleşmektedir [36]. Ayrıca, yüksek alaşımlı çeliklerde oluşan borür dişleri daha yoğun, daha uniform ve kapalıdır.



Şekil 4.7: Borlama sonrası oluşabilecek borür tipleri[4].

(A: Özellikle FeB yoğun tek fazlı tabaka, B: Fe_2B ve FeB fazlı iki tabaka, C: İki fazlı tabaka, tabaka B'den daha ince FeB tabakası, D: İki fazlı tabaka, sadece izole FeB diş şeklindeki tabaka, E: Tek fazlı tabaka, özellikle Fe_2B ağırlıklı, F: Özellikle Fe_2B yoğun tek fazlı tabaka, G: Fe_2B diş yapısı, H: Çok izole Fe_2B diş yapısı, I: Difüzyon bölgesi, K: Dejenere olmuş tabaka, L: Çift fazlı FeB ve Fe_2B tabakası, M: Tek fazlı FeB ve Fe_2B tabakası)

Borür tabakaları iğnesel ve değişken bir formda olduklarından, tabaka kalınlığının tanımlanmasında güçlükler çıkmakta ve farklı tanımlamalar yapılmaktadır. Literatürde[4] tabaka kalınlığı, genellikle tabakanın diş yapısı, düz bir düzlemle karşılaştırılarak ve bor dişlerinin bu düzleme göre ortalama değeri alınarak (Şekil 4.8) belirtilmektedir



Şekil 4.8: Borür tabakası kalınlığının tanımlanması [24].

4.4 Alaşım Elementlerinin Borür Tabakasının Büyüme Kinetiğine Etkisi

Saf demir ve düşük karbonlu çeliklerde borür tabakası kolonsal bir yapı teşkil etmektedir[27]. Ayrıca, saf demirde kaplama kalınlığı, alaşımlı çelikdekenden daha yüksektir. Alaşım elementleri, bor difüzyonunu düşürmekte, matris ve kaplamanın özelliklerini değiştirmektedir. Bununla birlikte, Borür tabakasının kolonsallığı matris içerisindeki alaşım elementlerinin miktarına bağlıdır. Örneğin, bu alaşım elementlerinden kromun artışına bağlı olarak borür tabakası, <002> oryantasyonuna sahip olarak büyüme yönünde bir eğilim göstermektedir. Krom ve nikel elementleri, kaplama matris arayüzeyinin düzgün bir hat halinde olmasına da neden olmaktadır [37].

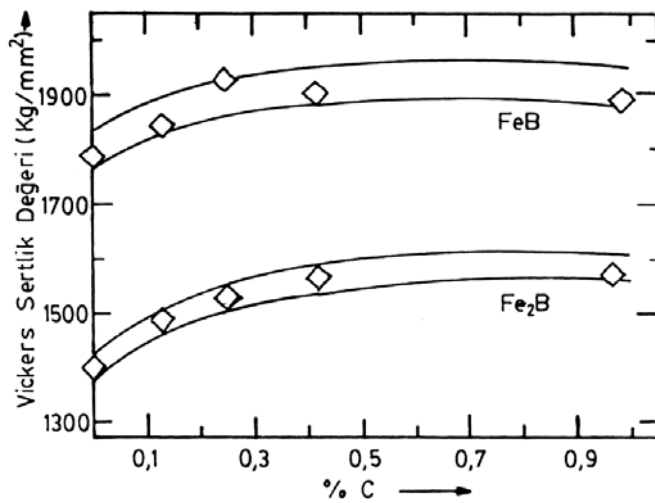
Karbon : Karbon elementinin, kaplama tabaka yapısı ve kaplama/matris arayüzey morfolojisi üzerine etkisi bir çok araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Karbon çeliklerinde, bilinen borlama yöntemleri ile hemen her zaman tek fazlı Fe₂B borür yapısı elde edilebilmektedir. Araştırmalar sonucunda düşük ve orta karbonlu çeliklerde kolonsal yapılı borür tabakaları elde edilirken, yüksek karbonlu çeliklerde kaplama/matris arayüzeyinin düzgün ve <002> düzleminde büyüme oryantasyonuna sahip olduğu görölmektedir[38].

Düşük ve orta karbonlu çelikler üzerinde yapılan çalışmalarda, 10 µm civarında siyah renkte kaplamalar sağlanarak, bu tabakalarda ince rastgele yönlenmiş iki tabakalı yapılar görölmektedir. %1 ve %2 C içeren çeliklerde kaplama tabakası nispeten düzdür ve %2 C içeren çeliklerde <002> Fe₂B oryantasyonuna sahip olan borür fazı oluşmaktadır[38]. Bu noktadan hareketle çeliklerde karbon miktarının artışına bağlı olarak, borür tabakasındaki Fe₂B fazının kararlılığının arttığı sonucuna varılmaktadır[38,39].

Ayrıca kaplama tabakasının hemen altında, tamamen perlitik bir faz oluşmaktadır. Karbon elementinin kaplama tabakası içerisinde çözünmeyip, matrise doğru difüze olduğu ve kaplama tabakasının hemen altında Fe₃C, Cr₂₃C₆, Fe₆C₃ gibi karbürlerin biriktiği belirtilmektedir[38]. Bu durum, borür tabaka yapısına önemli ölçüde etki etmektedir.

Ayrıca, karbon miktarındaki artışın, Fe_2B fazının kararlılığını FeB fazına göre arttırdığı da belirtilmektedir. Karbon miktarının artışına bağlı olarak, tabaka kalınlığında bir azalmanın olduğu ve bu azalmaya FeB fazının kararlılığının azalmasının neden olduğu belirtilmektedir [38,39].

Çeliklerde, karbon yüzdesinin artışına bağlı olarak borür tabakasında oluşan FeB , Fe_2B fazlarının sertlikleri Şekil 4.9’da görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi karbon konsantrasyonunun artışına bağlı olarak, kaplama tabakasının sertliğinde bir artış gözlenmektedir[1].



Şekil 4.9: Borür tabakasındaki FeB ve Fe_2B fazlarının sertliğinin karbon miktarı ile değişimi[1].

Şekil 4.9’da % 0,4 karbon miktarına kadar sertlik değeri artış göstermekte ve bu değerin üzerinde, sırasıyla FeB ve Fe_2B fazları için sabit kalmaktadır. FeB , Fe_2B , $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Ni})\text{B}$, $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Ni})_2\text{B}$ bileşiklerinde daha fazla karbon çözünürlüğünün zor olması, yukarıda bahsedilen karbürlerin matris yakınındaki alanlarda birikmesinden dolayı, borlama mekanizmasının etkilendiği ve söz konusu borür tabakasının daha sıkı ve sert yapılı olduğu düşünülmektedir[2,40].

Krom: Krom, çeliklerde borür tabakasının hem morfolojisine hem de derinliğine etki etmektedir. %4 Cr içeren çeliklerde 65-95 μm kalınlıkta kolonsal yapılı borür tabakaları elde edilirken, %12 Cr içeren çeliklerde borür tabakası/matris arayüzeyi düz olan ve 65 μm kalınlıkta kaplamalar elde edilebilmektedir. %26 Cr ihtiva eden çeliklerde ise borür tabaka kalınlığı 5 μm civarındadır.

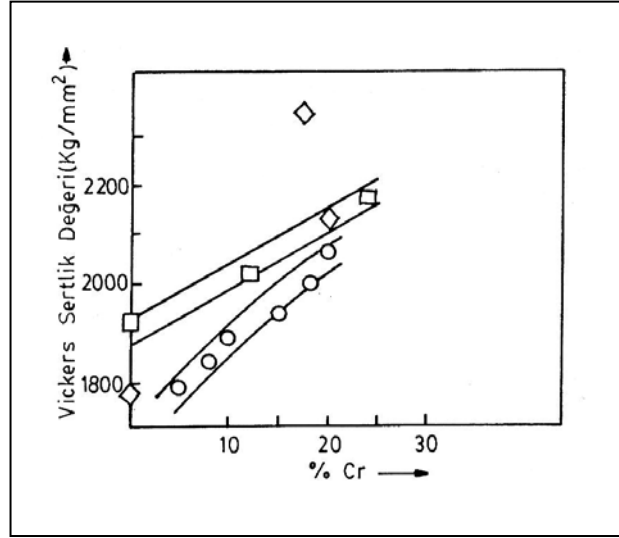
Bu çelikler içerisinde, CrB fazına yalnızca %26 Cr içeren çeliklerde yüzeyde 5-10 µm civarında FeB tabakası, iç kısımda ise 50-55 µm civarında Fe₂B tabakası görülmektedir [2]. %4 Cr içeren çeliklerde bir kaç mikron mertebesinde FeB tabakası görülmektedir. Bindal [1], düşük krom yüzdellerinde dahi krom borür fazlarının bulunduğunu belirtmektedir.

Cr elementi borlama işlemi sırasında, borür tabakasında bulunmakta ve (Fe, Cr)₂B bileşiklerini oluşturmaktadır. FeB fazı kromu kabul etmemektedir. Bu durum, Cr₂B ve Fe₂B birbirinin izomorfı iken, FeB ve CrB fazının birbirinin izomorfı olmamasından ileri gelmektedir [39,40]. Bindal [1] düşük alaşımlı çeliklerde, CrB ve Cr₂B fazlarının mevcut olduğunu tespit etmiştir.

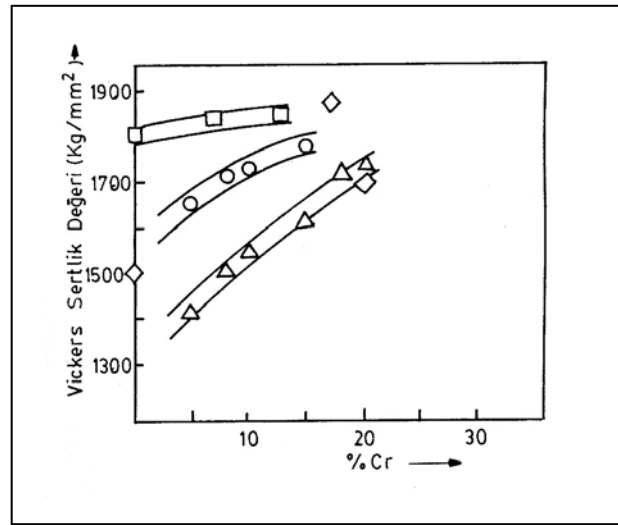
Aynı şekilde krom, çeliklerde borür tabakasının düzleşmesine neden olmaktadır. Bunun sebebi olarak; alaşım elementinin borür tabakası içerisinde demir atomlarının yerini alması ile açıklanabilir[37]. Yapılan araştırmalarda, ağırlıkça %5.65 Cr ihtiva eden bir çelik borlama işlemine tabi tutulduktan sonra FeB/Fe₂B ve Fe₂B/matris arayüzeyinde <002> kristallografik oryantasyonları tercih görmektedir [37,38,40]. Araştırmalar sırasında, kaplamanın alt kısımlarında Fe₂B, bunun üzerinde FeB ve en üst kısımda FeB_x (x>1) fazlarının varlığı bulunmuştur. Krom miktarının artışına bağlı olarak, Fe₂B fazına nazaran borca zengin reaksiyon ürünü olan tabakaların kalınlığı (FeB) artış göstermektedir. Bunun yanında FeB/FeB_x oranı da artmaktadır. En dış yüzeyde krom ihtiva eden (B,Fe)₂ katı eriyiği görülmektedir. Yapılan incelemelerde, krom miktarının artışı FeB fazının kararlılığını arttırmakta ve kaplama tabakasının dış kısmı iç kısmına göre daha az yoğun olmaktadır. Buna karşılık, Fe₂B fazının miktarını da azaltmaktadır[4]. Kromlu alaşımların borlanması borür tabakasının sertlik ve kırılabilirliğinin arttığı (Şekil 4.10)[40], buna karşılık, borür tabaka kalınlığının alaşımsız çeliklere göre belirgin bir değişme göstermediği, ancak krom miktarının artışına bağlı olarak azaldığı belirtilmektedir. Borür tabakası boyunca krom yüzdesi, tabaka yüzeyinden matrise doğru artış göstermektedir. Yani krom konsantrasyonu, Fe₂B fazına nazaran, FeB fazında daha düşüktür[24, 40].

FeB fazında krom 1000°C'de atomik olarak %40 oranında demirin yerini alabilmektedir ve tabaka içerisinde Fe_{0,6}Cr_{0,4}B ve Cr_{0,75}Fe_{0,75}B bileşikleri bulunmaktadır[2, 24, 40]. Oluşan ε-(Cr-Fe)B faz dağılımı borür tabaka sertliğinin artmasına neden olmaktadır[41]. 1000°C sıcaklıkla yapılan borlama işleminde Fe₂B

fazında atomik olarak %17 oranında Cr çözünebilmektedir. Cr elementi, borür tabakasında $(\text{Cr-Fe})_2\text{B}$ ve $\gamma\text{-(Cr-Fe)}_2\text{B}$ fazları şeklinde yer almaktadır. $\gamma\text{-(Cr-Fe)}_2\text{B}$ fazı Cr-B sistemindeki $\gamma\text{-Cr}_2\text{B}$ (ortorombik) fazının dönüşmesi sonucu elde edilmektedir [2,41].



(a)

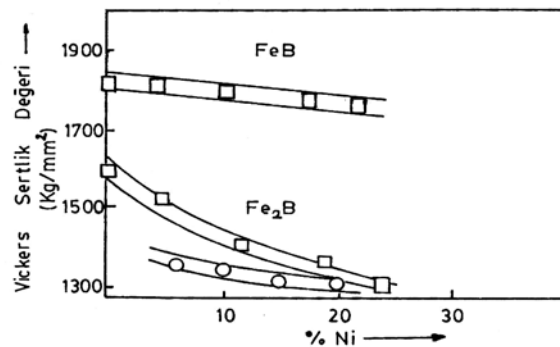


(b)

Şekil 4.10: (a) FeB ve (b) Fe₂B fazlarının Cr miktarının artışına bağlı olarak sertliğindeki değişim. (O) Saf borür, (□) Çelik, (Δ) (Fe, Cr)₂B [41].

Nikel: Nikel elementinin borür tabakasına etkisi yüksek konsantrasyon değerlerinde ortaya çıkmaktadır. %4 Ni içeren çeliklerde 90 µm borür tabaka kalınlığı elde edilirken, %14 Ni içeren çeliklerde bu değer 60 µm olmaktadır [2] Çok yüksek Ni konsantrasyonlarında borür tabakasının kolonsal yapıda oluşma ihtimali düşmekte ve

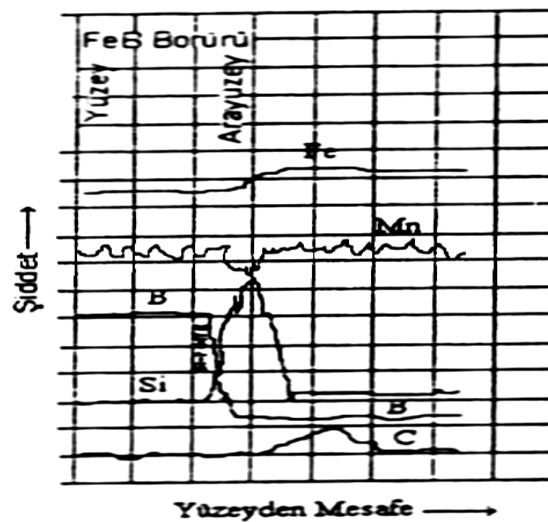
meydana gelen borür fazının yüksek derecede porozite içerdiği görülmektedir. Fe-Ni alaşımlarında borür tabakaları FeB ve Fe₂B fazlarında görülmektedir [2]. Nikel, Fe₂B tabakasına karşılık gelen alt tabakadan yüzeye doğru segrege olmaktadır ve yüksek nikel konsantrasyonlarında bu etki, Fe₂B fazında nikel konsantrasyonunun düşmesi ile açık bir şekilde görülmektedir. Ostenitik paslanmaz çeliklerin yüzeyinde oluşturulan borür tabakasında yüzeyde FeB ile birlikte muhtemelen çözünmesi zor olan Ni₃B fazı bulunmaktadır. Yüzeyin altındaki tabakada ise büyüme yönüne paralel olacak şekilde <002> tekstürüne sahip Fe₂B fazı gözlenmektedir. Sonuçta krom ve nikel birbirlerine göre zıt bir davranış gösterirken, nikel, borür tabakasının yüzeyinde, krom ise iç kısımlarında yoğunlaşmaktadır. Araştırmalar borlama ortamında bor aktiviteleri ile oynanarak tek fazlı Fe₂B fazı elde edilebildiğini ve borür tabakası boyunca krom ve nikelin homojen olarak dağıldığını göstermektedir. Nikel ve krom, kaplama/matris ara yüzeyinde düzleşmeye neden olmaktadır ancak, kromun etkisi nikel'e göre çok daha fazladır. Krom, demirden daha düşük atom numarasına sahip bir element olması sebebiyle, borca zengin (Fe, M)B en dış tabakasında nisbeten yüksek oranda düşme meydana gelmektedir[2]. Bunun sonucunda, atom numarası demirden yüksek olan nikelin iki fazlı borür tabakasında, borca zengin fazdan fakir faza doğru yayındığı düşüncesi ortaya çıkmaktadır. Borür tabakasında nikel miktarının artması, kolonsal yapının azalmasına ve porozitenin artmasına neden olurken, kaplamanın mekanik özelliklerini de kötüleştirir. Çeliklerde nikel konsantrasyonunu artması, (FeNi)₂B fazının sertliğini azaltırken (FeNi)B fazında herhangi bir azalmaya sebep olmamaktadır[2]. Artan nikel miktarına bağlı olarak borür tabakasının sertliğindeki değişim Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.11: Nikel miktarının artışına bağlı olarak, borür tabakasının sertliğindeki değişim[24].

Manganez: Manganez, kroma benzer şekilde tercihli olarak borür tabakasına girerek, yüzeye doğru yayılmaktadır. Tsipas ve Rus[29] çözünmenin genellikle iç kısımdaki Fe₂B fazında olduğunu iddia etmektedirler. Manganez, borür tabakasının kalınlığını düşürmektedir. Özsoy[42] artan mangan oranı ile kaplama/matris arayüzeyinin düzleştiğini söylerken Carbucicchio ve arkadaşları[37] kolonsallığın daha da arttığını ileri sürmektedir.

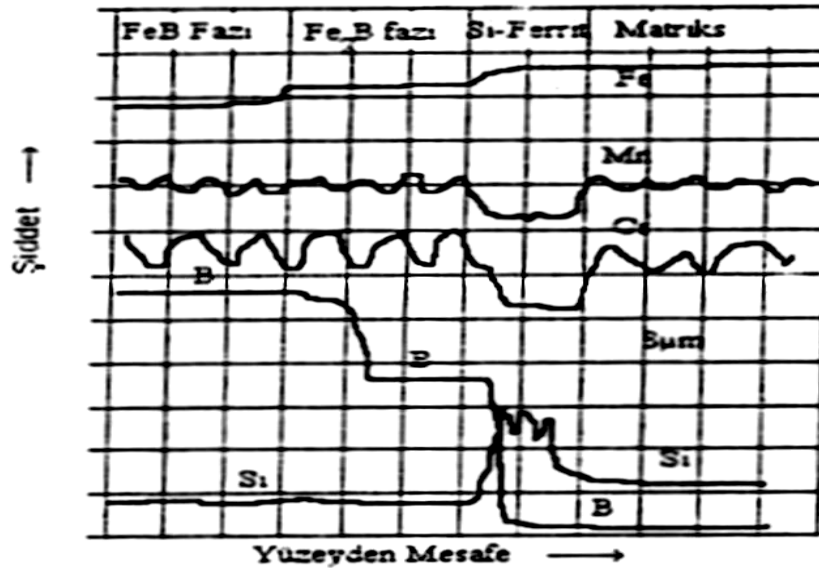
Silisyum ve Alüminyum: Silisyum, genellikle difüzyon bölgesinde bulunarak ferrit fazı meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bu yüzden, borür tabakasının mekanik özelliklerine olumsuz yönde etki yapmaktadır[2,43]. Alüminyum ve silisyum, karbona benzer şekilde borür tabakası içerisinde çözünmemektedir ve borlama işlemi sırasında çeliğin iç kısımlarına doğru itilerek, borür tabakası ile metal arayüzeyinde FeSi_{0.4}B_{0.6} ve Fe₄SiB₂ bileşiklerinin oluşmasına neden olmaktadır. Borür tabakasının aşınma direncini azaltması sebebiyle ferrit oluşturu bu elementleri fazla miktarda içeren çelikler, pek kullanılmamaktadır. Galibois ve arkadaşları [30], yapmış oldukları çalışmada, silisyum ve alüminyumun farklı ortamlarda borlama işlemi yapılmasına rağmen, benzer davranışlar göstererek kaplama tabakasının alt kısımlarında belirli oranlarda yoğunlaştıklarını belirtmektedir. Kastner ve arkadaşlarının[2] yapmış olduğu çalışmalarda, %0.28 oranında silisyum ihtiva eden C15 çeliğinin borlanması sonucunda, alaşım elementlerinin borür tabakası içerisinde dağılımları Şekil 4.12’de ve 37HS çeliğinin ki ise Şekil 4.13’de verilmektedir.



Şekil 4.12: C15 çeliğinin yüzeyinde oluşturulan borür tabakasında B, Fe elementlerinin dağılımı [2].

Şekil 4.12’den görüldüğü gibi C15 çeliğinde oluşan borür tabakasının Fe_2B fazından meydana geldiği ve bor konsantrasyonunun kaplama tabakası boyunca belirli bir oranda bulunduğu, ayrıca kaplama boyunca Fe, Mn, Si ve C elementlerinin homojen konsantrasyon değerine sahip olduğu görülmektedir. Aynı şekilde, kaplama/matris arayüzeyinde Si elementinin belirgin olarak yoğunlaştığı ve Mn elementinin konsantrasyonunun düştüğü görülmektedir [2].

37HS çeliğinde ise borür tabakasında FeB ve Fe_2B fazının birlikte bulunduğu, Mn ve Cr’un belirli artış ve azalışlarla birlikte yaklaşık olarak sabit konsantrasyon değerine sahip olduğu görülmektedir. Aynı şekilde, silisyumun kaplama tabakası boyunca çok düşük miktarlarda ve sabit konsantrasyona sahip olduğu, ancak tabakanın altında yoğunlaşarak Si-ferrit fazının oluşturduğu görülmektedir. Burada Si-ferrit bölgesinde Si konsantrasyonu belirgin bir şekilde artış göstermektedir.



Şekil 4.13: 37HS çeliğinin yüzeyinde oluşturulan borür tabakasında B, Si, Fe, Mn ve Cr elementlerinin dağılımı [2].

Şekil 4.14’de çeliklerin borlanması sonucunda, borür tabakası boyunca alaşım elementlerinin dağılımları şematik olarak verilmektedir [2].

4.5 Borlama Sonrası Uygulanabilecek Isıl İşlemler Ve Termal Çevrimli Borlama

Borlama sonrası özelliklerin geliştirilmesi; borür tabakası, geçiş bölgesi ve matris malzeme özelliklerinin birlikte düşünülmesi ile sağlanabilir. Yüksek yüzey basınçlarına (Hertz basıncı) maruz kalan borlanmış makina elemanları, borlama sonrasında borür tabakasının kalitesini ve aşınma direncini düşürmeden, merkez sertliklerini arttırmak, dolayısıyla tabaka çökmesi ve dökülmesini önlemek için sertleştirilip temperlenirler. Uygun işlem yapıldığında 120-150 μm 'ye kadar kalınlıktaki borür tabakalarının temperlenmesi, tabakada çatlak oluşumuna sebep olmaz. Dikey çatlaklar, genellikle ana malzemesinin hacimsel değişiminin uygun olmamasından kaynaklanmaktadır.

Tek fazlı Fe_2B tabakasının ısı genleşme katsayısı, demir esaslı malzemelerin ortalama ısısal genleşme katsayılarına yakın olduğundan, bu özelliklere sahip parçalara hasar vermeden, borlama sonrası iyileştirici ısı işlemler uygulanabilir. Ötektoid dönüşüm sıcaklığı 1174°C olduğundan, en yüksek sertleştirme sıcaklığı 1050°C olabilir. Östenitleme sıcaklığı 1149°C 'ın üzerinde olmamalıdır. Borlanmış parçaların ısı işlemlerinde aşağıdaki noktalara dikkat edilmelidir [42].

Sertleştirme ve temperleme nötr atmosferde, koruyucu gaz, vakum veya nötr tuz banyolarında yapılmalıdır. 700°C civarındaki sıcaklıklarda, oksijen içeren ortamlarda borlu tabakalar oksitlenir. Sertleştirme ortamı olarak sıcak yağ uygundur. Bunun yanında, malzemelerin sertleşebilme kabiliyetine göre, sıcak tuz banyolarında veya havada sertleştirme, yüzey gerilimlerini en aza indirir. 600°C sıcaklıkta demir bordan önce demir nitrüre dönüşüm olacağından, amonyaklı ortamlardan kaçınılmalıdır. FeB 400°C sıcaklığa, Fe_2B 325°C sıcaklığa kadar amonyak içeren atmosfere karşı dayanıklıdır [11,14].

Borür tabakasının gevrekliği ve bunun sonucu olarak da servis özellikleri, borür tabakasındaki kalıntı gerilmelerin dağılımı ile doğrudan ilgilidir. Bu dağılım, bitişik fazların ısı genleşme katsayıları arasındaki farka bağlı olduğu kadar, tabaka ile matris malzemenin özgül hacimleri arasındaki farka da bağlıdır. Dolayısıyla, borür tabakasının özellikleri, borlama sonrası uygun ısı işlemler uygulanarak tabaka ile matris malzeme özgül hacimleri arasındaki farkın azaltılmasıyla geliştirilebilir.

Liliental[44] borlamadan sonra, Normalizasyon + Sertleştirme + .Temperleme (200°C) işleminin uygulandığı numunelerde, ana malzeme ile Fe₂B tabakası özgül hacimleri arasındaki farkın en düşük seviyede olduğunu (Çizelge 4.2), bunun sonucu olarak; borür tabakasındaki kalıntı gerilmeler ve gevrekliğin en düşük, aşınma direncinin ise en yüksek değerde olduğunu ileri sürmektedir. Yine borür tabakalarının özelliklerini iyileştirmek ve yayınmayı hızlandırmak için termal çevrimli borlama işlemleri uygulanmaktadır.

Termal çevrim, malzemeye, sıcaklık farkına, sıcaklığın değişim hızına ve çevrim sayısına bağlı olarak malzemenin mikroyapı ve özelliklerini iyileştirmek için iş parçasının belirli sıcaklıklar arasında ısıtılıp soğutulması işleminin birçok kez tekrarlanmasıdır. Termal çevrim sonunda yayınma hızının arttığı, östenit tane boyutunun küçüldüğü ve üniform bir yapı olduğu dolayısıyla fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerin iyileştiği belirtilmektedir.

Çizelge 4.2: %0,45 C’lu çelikte, borlama sonrası uygulanan ısıl işlemlerle matris malzeme özgül hacminin değişimi [44].

Borlama Sonrası uygulanan ısıl işlemler	Özgül Hacim	
	Matris	Fe ₂ B
Yok	0,1276	0,1367
Normalleştirme, 900°C/h	0,1278	
Normalleştirme + Sertleştirme +Temperleme, 200°C	0,1279	
Normalleştirme + Sertleştirme +Temperleme, 450°C	0,1286	
Normalleştirme + Sertleştirme +Temperleme, 650°C	0,1280	

Pratikte termal çevrimle yayınmanın hızlandırılması; ya yayınma işleminden önce bir ön ısıl işlem olarak veya işlem esnasında termal çevrimin uygulanmasıyla sağlanmaktadır. Çelik, genellikle Ac1 sıcaklığının 30-50°C üzerine ısıtılır ve Ar1 sıcaklığının 50-199°C altına soğutulur [42] Çevrim sayısı 100’e kadar çıkabilir.

Kristhal ve Kenis, klasik yöntemler göre, 60 dakikalık karbürleme sonucunda yayınma katsayısının 2,5-3 kat arttığı ve tabakanın sertlik, darbe tokluğu ve aşınma direnci gibi özelliklerin iyileştiği iddia etmişlerdir[24]. Yayınma katsayısındaki artış; tane incelmesi, faz yeniden kristalleşmesi, iç gerilmelerin oluşması ve gevşemesi ile boşluk yoğunluğundaki artışa bağlıdır. Sabit sıcaklıkta borlama işleminde işlem süresi arttıkça tane boyutuda artar ve bazı taneler diğerlerini yok edebilir [24].

Özsoy[42] sabit sıcaklıkta 125-200 μm 'ye çıkan tane boyutunun, termal çevrimli borlamada 30-40 μm olduğunu ve geçiş bölgesi/borür tabakası oranının azaldığını belirtmektedir.

Demir borürde, borun demire göre daha hızlı yayılımı dolayısı ile tabakada porozite oluşmaktadır. Uygun termal çevrimli borlama sonucu, daha uniform ve daha az poroziteli borür tabakaların elde edilmesinin yanında, bölgeler arasındaki özgül hacim farkları azalmakta, tabakanın aşınma gibi servis özellikleri iyi yönde etkilenmekte ve gevreklik azalmaktadır. Sabit sıcaklıkta ve termal çevrimli şartlarda borlanan numunelerin yüzey sertlikleri arasında bir fark olmadığı, ancak borür iğneleri yönünde artış olduğu belirtilmektedir.

Lu [35], borlama işlemi esnasında çelik bileşiminde bulunan elementlerin yeniden dağıldıkları ve bu arada FeB ve Fe₂B tabakalarının, karbon ve silisyumu çözündürme yeteneği olmamasından dolayı, bor yayılımı esnasında C ve Si' ün borür tabakasından içeriye doğru itildikleri ve bunun sonucu olarak borür tabakası ile borlanan metal matriks arasında "geçiş bölgesi" olarak isimlendirilen bir yapının meydana geldiğini ve Ck 15 çeliğinde, borlama süresine bağlı olarak borür tabakası ve geçiş bölgesi kalınlıklarının farklı tarzlarda arttığını belirtmektedir. Bu bölgedeki bor dağılımını otoradyografi yöntemi ile inceleyen Berzina [35], geçiş bölgesi kalınlığının, normal metalografik yöntemde belirlenenden çok daha büyük olduğunu belirlemiştir.

Aynı yöntemi kullanan Bozkurt [6], geçiş bölgesinin, borür tabakasından 10-15 kat kadar fazla bir kalınlığa sahip olduğunu tespit etmiştir. Borür tabakasının özellikleri, borlama sonrası uygun ısıtma işlemleri uygulanarak tabaka ile matriks malzeme özgül hacimleri arasındaki farkın azaltılmasıyla geliştirilebilir.

Liliental ve Tacikowski [44], borlamadan sonra, Normalizasyon +Sertleştirme + Temperleme işleminin ana malzeme ile Fe₂B tabakası özgül hacimleri arasındaki farkı düşürdüğünü, bunun sonucu olarak; borür tabakasındaki kalıntı gerilmeler ve gevrekliğin en düşük, aşınma direncinin ise en yüksek değerde olduğunu belirtmektedir. Borür tabakalarının özelliklerini iyileştirmek ve yayınlamayı hızlandırmak için termal çevrimli borlama işlemleri uygulanmaktadır.

Özsoy [42], termal çevrimli borlamayla tane boyutunun düştüğünü ve geçiş bölgesi/borür tabakası oranının azaldığını ayrıca bölgeler arasındaki özgül hacim farklarının azaldığını, aşınma gibi servis özelliklerin iyi yönde etkilendiğini ve gevrekliğin azaldığını belirtmektedir. Makine elemanlarının aşınma dayanımlarını artırmanın en önemli yöntemlerinden birisi de, bor yayını ile yüzeylerinin sertleştirmesidir.

Eyre [45], karbürleme ve borlama işlemi uygulanmış malzemelerin aşınma davranışlarını karşılaştırmış ve borlamanın karbürlemeye göre özellikle geçiş bölgesi üzerindeki yüklemelerde adhezif aşınma dayanımı açısından çok daha iyi sonuçlar verdiğini ve bu özelliği yüksek sıcaklıklarda dahi muhafaza ettiğini belirlemişlerdir.

Budinski [46], değişik test teknikleri kullanarak yaptığı aşınma çalışmaları sonucunda, vanadyum karbür ve titanyum karbür yayındırılmış yüzeylerin adhezif ve abrazif aşınma dayanımlarının, diğer yayınma yöntemleri uygulanmış yüzeylerden daha yüksek olduğunu; kinetik katsayısı bakımından ise borlu-borlu ve VC-VC' lü çiftlerin en iyi sonuçları verdiğini belirtmektedir.

5. BORÜR TABAKASININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ

5.1 Giriş

Borlanmış malzemelerde mekanik özellikleri belirleyen en önemli fiziksel özellikler sertlik, kırılma tokluğu, darbe direnci olarak sayılabilir. Burada borlanmış malzemenin ve yüzeyin mekanik özellikleri temel olarak proses sıcaklığına, altlık malzemenin bileşimine, kullanılan borlama ortamının bor potansiyeline, borlama süresine bağlıdır [1].

5.2 Sertlik

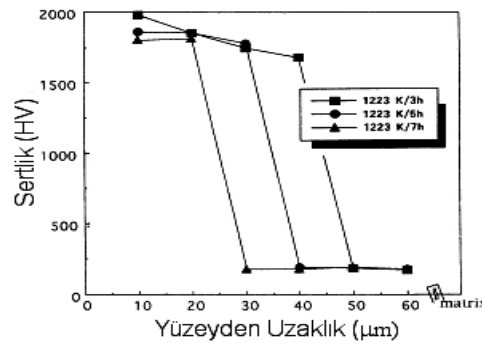
Borlanan yüzeyin en önemli özelliklerinden biri sertliktir. Borlama ile çok yüksek ergime sıcaklıklı faz yapısından oluşan 1450-5000 HV aralığında mikro sertlik içeren borür tabakaları oluşmaktadır. Borlama sonrası oluşan FeB tabakası Fe_2B tabakasından daha sert ancak daha gevrek yapıdadır. Borlanmış malzemelere sertlik testleri Vickers ve Knoop sertlik ölçme yöntemleri ile yapılır. Sertlik ölçümleri, tabaka kalınlığı ve faz yapısına bağlı olarak 25-200 gr yüklerle gerçekleştirilmektedir.

Geouriot ve arkadaşları [38] borür tabakasının sertliğini belirlemek için iki ayrı yöntem önermektedirler. Bunlar sırasıyla, sertlik deneylerinin malzeme yüzeyine dik yada büyüme yönünde artan yükler kullanılarak gerçekleştirilmesi ve sabit yük kullanılarak gerçekleştirilmesidir. Ölçümlerde, sabit yük olarak, 100 gr kullanıldığı belirtilmektedir.

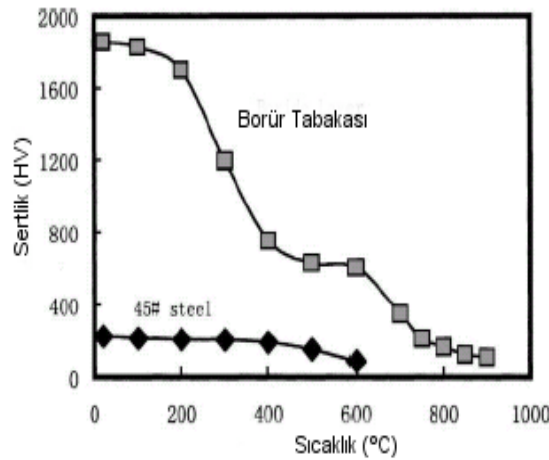
Borlanmış malzemelerde mikrosertlik ölçümleri tabaka boyunca yapılır. Yüzeyden ana malzemeye doğru sertlikte düşme görülür. Bunun nedeni borun ancak difüzyon zonuna kadar gelebilmesi ve bu bölgelerde sert bileşikler oluşturmasıdır[11, 47].

Çeliklerde borür tabakasının sertliğinin 2000 kg/mm^2 vickers değerine ulaştığı hatta bunun üzerine çıktığı bilinmektedir. Ancak sertlik ölçümlerinin metalografik olarak çok iyi hazırlanmış numuneler üzerinde yapılması gerektiği önem arz etmektedir. Borür tabakasının bir özelliği de, borlama sonrasında ısıtma işlem görmesi durumunda sertliğini 900°C sıcaklığa kadar muhafaza edebilmesidir[11].

J.H.Yoon ve Y.K.Lee yaptıkları çalışmalarda, 1223°K sabit sıcaklıkta farklı sürelerde borlanmış malzemenin yüzey sertliğinin yüzeyden matrise doğru azaldığını göstermişlerdir. Bu ilişki Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Benzer ilişkiler borlama ile ilgili tüm çalışmalarda da yer almaktadır. P.X.Yang yapmış olduğu çalışmada sıcaklığın artışıyla borlanmış tabakanın sertlik değerinde düşme olduğunu göstermiştir. C45 çeliğinde yapılan bu çalışmanın sonuçları Şekil 5.2’de gösterilmiştir [47].



Şekil 5.1: Borlanmış AISI 304 çeliğinde sertlik değerinin, borlanan yüzeyden mesafe ile ilişkisi [48].



Şekil 5.2: C45 çeliğinde borür tabakasının ve çelik malzemenin sertlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi [5].

5.3 Kalıntı Gerilmeler

Borlama işlemi sonucunda sonucuda borür tabakaları ve alt bölgeler arasında, Çizelge 5.1’de verilen ısı genleşme katsayıları ve özgül hacim farklılıklarından dolayı kalıntı gerilmeler oluşur. Bunların dağılımı ve şiddeti çeliğin kimyasal bileşimine, borlama ortamına, borlayıcının bileşimine ve borlama sonrası uygulanan ısı işlemlere bağlı olarak değişmektedir. Bu tür gerilmeler tabakanın çatlayarak dökülmesine, aşınma dayanımı yanında diğer mekanik özelliklerin de kötü yönde etkilenmesine ve yüzeyin bozulmasına sebep olmaktadır [32].

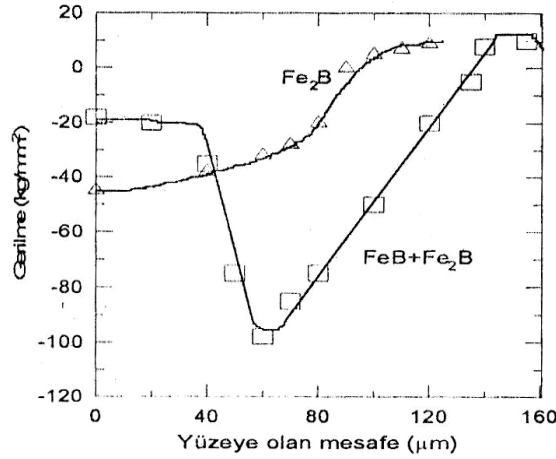
Çizelge 5.1: Borür tabakaları ve ana malzemenin ısı genleşme katsayıları [2, 32].

Malzeme	Isıl genleşme katsayısı ($10^{-6}/^{\circ}\text{K}$)		
FeB	11,53	23	10-16
Fe ₂ B	8,7	7,85	8
Çelik	12	-	
Saf Demir	-	15,6	(1000 °C için)

Genleşme katsayılarının farklı olması, borlama sonucu soğuma esnasında FeB’de çekme, Fe₂B’de basma gerilmelerinin oluşmasına sebep olur (Şekil 5.3).

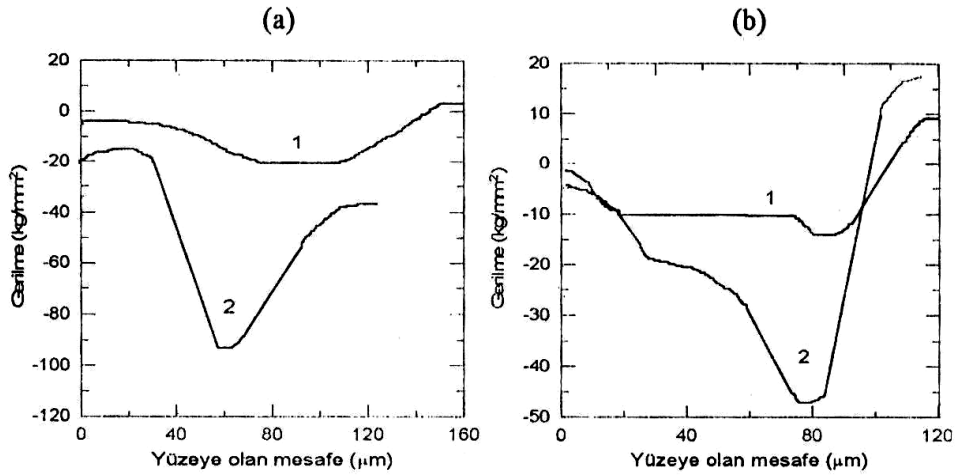
Borlama işlemi sonucunda çift fazlı yapı oluşursa, en fazla kalıntı gerilme Fe₂B’de oluşur. Borür tabakasından içeri doğru basma gerilmeleri azalır ve iğne uçlarında çekme gerilmelerine dönüşür. Fe₂B ve FeB arasında -90 kg/mm²’ye kadar ulaşan basma gerilmeleri oluşabilmektedir.

Kalıntı gerilmeler açısından en uygun dağılım, tek fazlı (Fe₂B) ve gerilmelerinin daha geniş bir alana yayılma imkanı bulunduğu iğnemsî geometriye sahip borür tabakaları ile elde edilir. Yapılan çalışmalar sonucunda, kalıntı gerilmelerinin azaltılması için borlama sıcaklığının düşük tutulması ve ısı işlem sonrası soğutmanın hızlı yapılmasının olumlu sonuçlar verdiği belirtilmektedir.



Şekil 5.3: Tek ve çift fazlı borür tabakalarında kalıntı gerilmelerin dağılımı [24].

Şekil 5.4’de soğutma hızının iç gerilme dağılımına etkisi görülmektedir[49]. Şekil 5.4’de borlama sonrası soğuma hızının, kalıntı gerilme dağılımına etkisinden (a) (Soğutma koşulları: 1) 840°C Sıcaklıktan, Suda Soğutulmuş, 2) Borlama Sonrası Fırında Soğutulmuş) ve temperleme sıcaklığının, borür tabakasındaki kalıntı gerilme dağılımına etkisinden (b) (1) Suda Soğuma, 2) 400°C Sıcaklıkta 2 Saat Temperleme) bahsedilmektedir.



Şekil 5.4: AISI 1045 Çeliğinde, soğutma hızının iç gerilme dağılımına etkisi
a) Borlama Sonrası Soğuma Hızının, Kalıntı Gerilme Dağılımına Etkisi, b) Temperleme Sıcaklığının, Borür Tabakasındaki Kalıntı Gerilme Dağılımına Etkisi [24].

Yayınma yönüne bağlı olarak, kolonsal bir yapı sergileyen tek fazlı Fe_2B fazı, çift fazlı $\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$ fazlarına göre daha çok tercih edilir. Çünkü oluşum sırasında FeB ve Fe_2B fazları birbirlerine basma ve çekme gerilmeleri uygulamakta ve çoğu zaman

bu gerilmeler nedeniyle iki faz arasında çatlaklar oluşmaktadır (FeB: Çekme gerilmesi, Fe₂B: Basma gerilmesi oluşturmaktadır). Dış etkenler, örneğin termal şok ve mekanik zorlamalar, bu yapıların zamanla ayrılmasına ve yüzeyden kopmalarına neden olur. Bu nedenle minimum FeB fazı içeren tabakalar elde edilmeye çalışılmalıdır. Çünkü, tek Fe₂B fazı çift fazlı yapıdan çok daha yüksek aşınma direnci ve mekanik özellikler gösterir. İki fazın spesifik hacim ve termal genleşme katsayısının çeliğe oranla farklı olması, ikinci fazın kopmasına ve yüzeyden ayrılmasına neden olur [24].

Borür tabakalarının çatlaması konusunda yapılan araştırmalar sonucunda, FeB ve Fe₂B fazlarının farklı ısı genleşme katsayılarına sahip olması sebebiyle çatlak oluşumuna neden oldukları görülmektedir. Bu iki faz arasında yüzeye paralel çatlakların yanında yüzeye dik olarak ilerleyen çatlaklar da yer almaktadır [11].

Bunun haricinde takım çeliklerine uygulanan borlama işlemi sonrasında çok kalın tek fazlı kaplamalarda da darbeli gerilmeler altında çalışması durumunda çatlaklar oluşmaktadır. Çalışmalar sonucunda FeB ve Fe₂B arayüzeyinde, FeB fazının çekme gerilmelerine Fe₂B fazının ise basma gerilmelerine maruz kaldığı görülmektedir [11].

5.4 Kırılma Tokluğu

Klasik kırılma tokluğu deneyleri, boyut bakımından uygun malzemelere uygulanabilmektedir. Özellikle, numunenin kalınlığı ve plastik bölgenin boyutu kırılma tokluğu deneylerinde oldukça önemli parametrelerdir. Ayrıca bu deneye tabi tutulan malzemelerin gevrek olmamaları gerekmektedir.

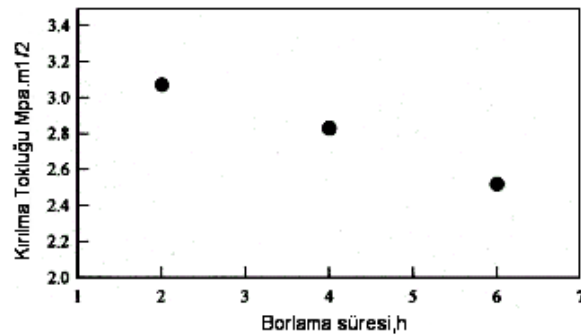
Bu durumda, gevrek ve kütleli olarak küçük malzemelere klasik kırılma tokluğu deneylerinin uygulanması mümkün olmadığından, “indentasyon” esaslı bir metod geliştirilmiştir. Bir malzemenin kırılma tokluğu, uygulanan yüke, çatlak boyuna ve numunenin geometrisine büyük ölçüde bağlıdır [1,50].

Borlanmış malzemelere, cam ve seramik gibi gevrek malzemelere uygulanan “Vickers Indentasyon Kırılma Tokluğu” deneyi yapılır. Kırılma tokluğu değerlerini hesaplamada yapılan literatür araştırmalarında $Kc = A.P/c^{3/2}$ denklemi kullanılmaktadır [1]. Burada; P= Yük, c= Radyal yarı çatlak boyu, A bir sabit olup

$0,028(E/H)^{1/2}$ şeklinde ifade edilir. Burada; E=Elastisite Modülünü, H=Borür tabakasının sertliğini (VSD, kg/mm²) ifade etmektedir.

İndentasyon tekniği ile kırılma tokluğu tayin etmenin temel prensibi, belirli yükler altında oluşturulan izlerle, bu izlerin köşegenleri boyunca meydana getirilen radyal çatlakların boylarının belirlenmesi esasına dayanır. Borür tabakaları yüksek sertliklerinden dolayı kırılğan bir yapıya sahiptirler. Özellikle FeB tabakası oldukça gevrek bir fazdır. Bu yüzden ticari uygulamalarda, borür tabakalarının bu özelliği dikkate alınarak; elde edilmesindeki bir çok güçlüğe rağmen, daha az gevrek olan, tek fazlı Fe₂B tabakası tercih edilmektedir. Kırılma tokluğunu etkileyen en önemli faktörlerden birisi, demir borürlerde borun, demire göre daha hızlı yayınmasından kaynaklanan, yine iki fazlı yapının tek fazlı yapıya dönüşümü için yapısal işlemler sonucunda ortaya çıkan, porozite oluşumudur. Düşük sıcaklıkta ve uygun borlayıcı ile yapılan borlama sonucunda porozite en aza indirilebilir [11].

Malzemelerin kırılma tokluğu mekanik uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır. Genel olarak borlanmış malzemelerin kırılma tokluğu değerleri malzemenin alaşım elementi içeriği, yani malzemenin bileşimi ile ilgilidir. Çünkü oluşacak borür tipi ve borlama uygulamasının süresi kırılma tokluğunu direkt olarak etkiler. Borlama sonrası oluşan FeB fazının sertliği Fe₂B fazından daha yüksek olduğu için genellikle Fe₂B fazının kırılma tokluğu çok daha yüksek çıkar. Burada önemli olan bir nokta, borür fazlarının elastisite modülü değerleridir. ($E_{FeB}=284$ GPa, $E_{Fe_2B}=343$ GPa) [2]. Şekil 5.5’de borlama süresinin kırılma tokluğuna etkisi gösterilmektedir. Çizelge 5.2’de borlanmış AISI W4 çeliği üzerindeki kırılma tokluğu hesaplamaları ve bulunan değerler yer almaktadır [50].



Şekil 5.5: Borlama süresine bağlı olarak borür tabakasının kırılma tokluğunun değişimi [51].

Borür tabakaları yüksek sertlik ve gevrek karaktere sahiptir. Özellikle FeB tabakasının sertliği Fe₂B'ye nazaran daha sert ve daha gevrektrir. Ayrıca borür tabakasında iki fazlı yapının oluşması durumunda ortaya çıkan basma ve çekme gerilmeleri sonucu oluşan çatlak hassastır. Bu yüzden, genellikle tek fazlı borür tabakası tercih edilmektedir [53].

Ancak, tek fazlı tabaka elde etmek için uygulanan ısıt işlem porozite oluşturarak, tabakanın kırılma tokluğu değerlerini etkilemektedir. Bunun yanında kırılma tokluğu, alaşım elementlerine bağlı olarak kaplama tabakası içerisinde (Fe, M)₂B ve (Fe, M)B dağılımları ile değişmektedir.

Çizelge 5.2: AISI W4 çeliğinde borlama süresine bağlı olarak kırılma tokluğundaki değişim [52].

Borlama süresi (h)	Kc (MPa m ^{1/2})	
	FeB	Fe ₂ B
6	1,50	5,24
8	1,39	6,40

Çeliklere Mn ilavesi kırılma tokluğunda bir miktar artışa neden olurken, Cr ilavesi bir miktar düşüşe neden olmaktadır. Aynı zamanda borlama süresi de kırılma tokluğu üzerinde etkilidir [54]. Bindal, borlama sonucunda elde edilen kaplamaların, bir çok gelişmiş seramikle rekabet edebilecek seviyede olduğunu belirtmiştir [1].

Gianoglio ve Badini [55], Ni' in, Badini ve arkadaşları [40], C, Cr ve Ni' in, Carburicchio ve arkadaşları [37], Cr' un etkilerini araştırmışlardır. Bindal [1], borlama süresi ve krom miktarına bağlı olarak, krom borürler tesbit etmiştir ve kromun çok fazla olmasa bile, kırılma tokluğunu düşürdüğünü belirlemiştir.

Uygun termal çevrimli borlama sonucunda daha uniform ve daha az poroziteli borür tabakaların elde edilmesi, tabakanın aşınma gibi servis özelliklerini de iyi yönde etkilemektedir. Kırılma tokluğu açısından alaşımsız orta karbonlu çelikler olumlu sonuç vermektedir. Ayrıca ana malzeme ile borür tabakalarının özgül hacimleri arasındaki fark ile kırılma tokluğu arasında ters orantı mevcuttur [2].

6. BORÜR TABAKALARININ AŞINMA DAVRANIŞLARI

6.1 Aşınma Davranışları Hakkında Genel Bilgi

Aşınma sürtünerek çalışan bütün sistemlerde görülür ve bir malzeme problemi olmayıp pek çok değişkene bağlı bir sistem problemidir. Sistemin özelliğine göre çeşitli mekanizmalarda ortaya çıkar. Genellikle bu mekanizmalar sistemin aşınma davranışını belirlemede temel çıkış noktası olmasına rağmen, aynı anda oluşan aşınma mekanizmaların birbirini etkilemesi sonucu konu oldukça karışık bir durum gösterir [56].

Birbirine temas eden mühendislik malzemelerinin, birbirlerine sürtünmesi neticesinde meydana gelen aşınma, çeşitli makine ve teçhizatın kullanımı sırasında büyük ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Aşınma, bir yüzeyden diğer bir yüzeye malzeme transferi veya aşınma parçalarının oluşumu neticesinde ortaya çıkan malzeme kaybıdır. DIN 50320’de aşınma; “kullanılan malzeme yüzeylerinden mekanik sebeplerle ufak parçaların ayrılması suretiyle meydana gelen değişiklik” olarak tanımlanmaktadır [57]. ASTM G40-02 standardına göre aşınma: katı bir yüzeyde, yüzey ile temas eden parça veya parçacıklar arasındaki bağıl harekete bağlı olarak oluşan, genellikle sürekli malzeme kaybını içeren hasardır [58]. Aşınmada kullanılan bilimsel ölçü hacim kaybıdır [59].

Bir aşınma sisteminde; ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük ve hareket aşınmanın temel unsurunu oluşturur. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem teknikte “Tribolojik Sistem” olarak isimlendirilir.

Aşınma temel olarak dört ana kategoriye ayrılabilir. Bunlar abrazif aşınma, erozif aşınma, adhezif aşınma ve de yüzey yorulması ile meydana gelen aşınmadır [60]. Bu kategoriler de kendi içlerinde farklı türlere ayrılırlar.

Çalışma koşullarına göre meydana gelmesi beklenen aşınma türünü gösteren bir şema Şekil 6.1’de verilmiştir. Beklenen aşınma türüne göre, uygun bir malzeme seçmek konusunda yardımcı olabilecek bir rehber de Çizelge 6.1’de verilmiştir.

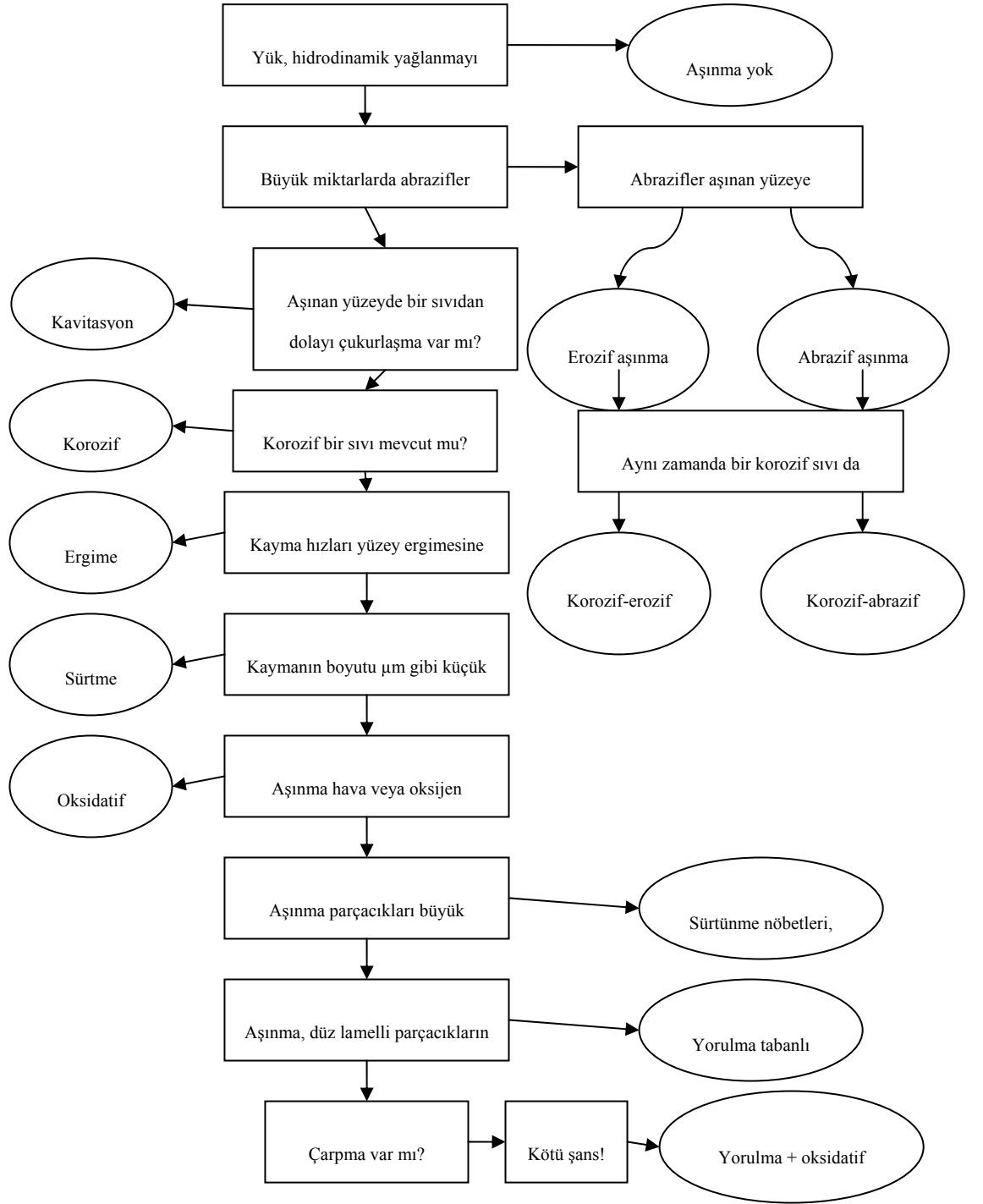
Çizelge 6.1: Aşınma kontrolü için genel malzeme seçim rehberi [61].

Malzeme	Aşınma mekanizması							
özelligi	Abrazif	Erozif	Kavitasyon	Korozif	Sürtme	Adhezif	Ergime	Yorulma
Sertlik	●	●	○	○	○	●	○	○
Tokluk	○	●	●	○	○	○	○	●
Yorulma	●	●	●	○	●	○	○	●
direnci								
İnertlik	○	○	○	●	● ¹	○	○	○
Yüksek ergime	○	○	○	○	○	●	●	○
sıcaklığı								
Heterojen	●	○	○	x ²	○	●	○	○
mikroyapı								
Metal dışı	○	○	○	●	○	●	○	○
karakter								
●	Önemli							
○	Önemsiz							
x	İstenmez							
¹	Metaller için havada sürtme							
²	Homojen mikroyapı elektrokimyasal korozyonu ve buna bağlı olarak birçok korozif aşınma şeklini engeller							

Farklı tasarım parametreleri aşınma hızını değişik yönlerde etkilerler. Aşınma hızını azaltmak için dört temel yöntem vardır. Bunlar:

- Yüzeyi geliştirerek aşınmaya daha dirençli yapmak,
- Aşınmaya daha dirençli malzeme kullanmak,
- Yüzeyler arasındaki mesafeyi arttırmak,
- Temasın şiddetini azaltmak,

olarak maddelenebilir [59].



Şekil 6.1: Çalışma koşulları ve aşınma türü arasındaki ilişkiyi belirten akış çizelgesi [61].

Abrazif aşınma, ASTM'nin tanımına göre, sert parçacıkların veya çıkıntıların, katı bir yüzeye bastırılıp ilerlemeleri sonucu oluşur. Aşınma, yüzey ile temasta bulunan cisim veya cisimler arasındaki bağıl hareketlere bağlı olarak, genellikle ilerleyen malzeme kaybını içeren katı yüzey hasarıdır [62]. Abrazif aşınma, katı bir objeye,

kendisi ile eşit veya daha yüksek sertliğe sahip malzemeler tarafından kuvvet uygulanması durumunda oluşur [61].

Erozyon, veya erozif aşınma, Katı parçacık erozyonu, küçük, katı parçacıkların tekrarlı darbeleri sonucu oluşan malzeme kaybıdır [58]. Kimi uygulamalarda katı parçacık erozyonu faydalı bir durumdur, kumlama ve hızlı abrazif sujeti kesimi gibi. Fakat bir çok mühendislik sisteminde önemli bir problemdir. Bunlara buhar ve jet türbinleri, parçacıklı maddeler taşıyan boru hatları-valfler ve akışkan yatak yanma sistemleri örnek verilebilir [62].

Kavitasyon, sıvı mekanikçileri ve fizikçiler tarafından, bir sıvı içinde kavitelerin veya kabarcıkların tekrarlanan çekirdeklenme, büyüme ve şiddetli çarpmaları olarak tanımlanır. Kavitasyon erozyonu ise, sıvılardaki kabarcıklar yüzünden malzemelerin mekanik olarak bozulmasıdır. Kabarcıkların yüzeyde veya yüzeye yakın yerlerde patlamaları sayesinde, katı yüzeyde mekanik bir yük oluşur. Bu patlamalar direk olarak yüzeye yönelmiş sıvı mikrojettlere sebep olur. Mekanik yükler tamamen yereldir ve küçük kabarcıkların konsantre bir şekilde patlamalarından dolayı fazlasıyla şiddetlidirler, dolayısıyla yüzeyde deformasyona neden olurlar. Tekrarlı yükleme ise, yüzeyden malzeme kaybına, yani erozyona yol açar [62].

Korozif aşınma, malzemelerin hem korozyon hem de aşınma mekanizmalarını içeren bir sistemle bozulmaya uğramasıdır. Aşınma ve korozyonun birleşmiş etkileri, iki prosesin etkilerinin tek başlarına toplanmasından çok daha yüksektir. Bu da iki proses arasında bir sinerjiyi belirtir. Korozyon ve aşınma, madencilik, mineral işleme, kimyasal işleme ve enerji üretimi gibi sanayilerde birleşerek yüksek hasara sebep olurlar [62].

Sürtme, temas eden yüzeylerin arasında oluşan düşük şiddetli titreşimli hareketlerdir [58]. Bu hareketin normal atmosferik koşullarında olmasının ani bir sonucu, oksit tabakalarının oluşumudur, bu yüzden sürtme aşınması teriminin yanında sürtme korozyonu da kullanılır. Sürtme hareketinin en temel nedenlerinden biri titreşim olduğu için, sürtme daha çok hareketli makinelerde görülür [62].

Adhezif aşınma, temas eden iki katı gövdenin yerel yapışmalarından dolayı ortaya çıkan, iki yüzey arasında malzeme transferi veya malzeme kaybına neden olan bir aşınma türüdür [58]. Eğer hiçbir abrazif parça mevcut değilse, kaymanın büyüklüğü

sürtmeden daha büyükse ve de malzeme kaybı hızı oksidasyon prensipleri tarafından kontrol edilmiyorsa, adhezif aşınmanın oluştuğu söylenir [62].

Yorulma aşınması, malzemedeki yorulma sonucu oluşan kırılmaya bağlı gelişen aşınmadır [58]. Bu aşınma türünde çatlak oluşumu, çatlak ilerlemesi ve kırılma görülür. Malzemeye tekrarlı olarak etki eden yüksek gerilmeler, yorulmanın oluşmasında etkilidir. Temel olarak, kayma, yuvarlanma ve darbe hareketlerine bağlı olarak malzemedeki yorulma aşınması görülebilir [61].

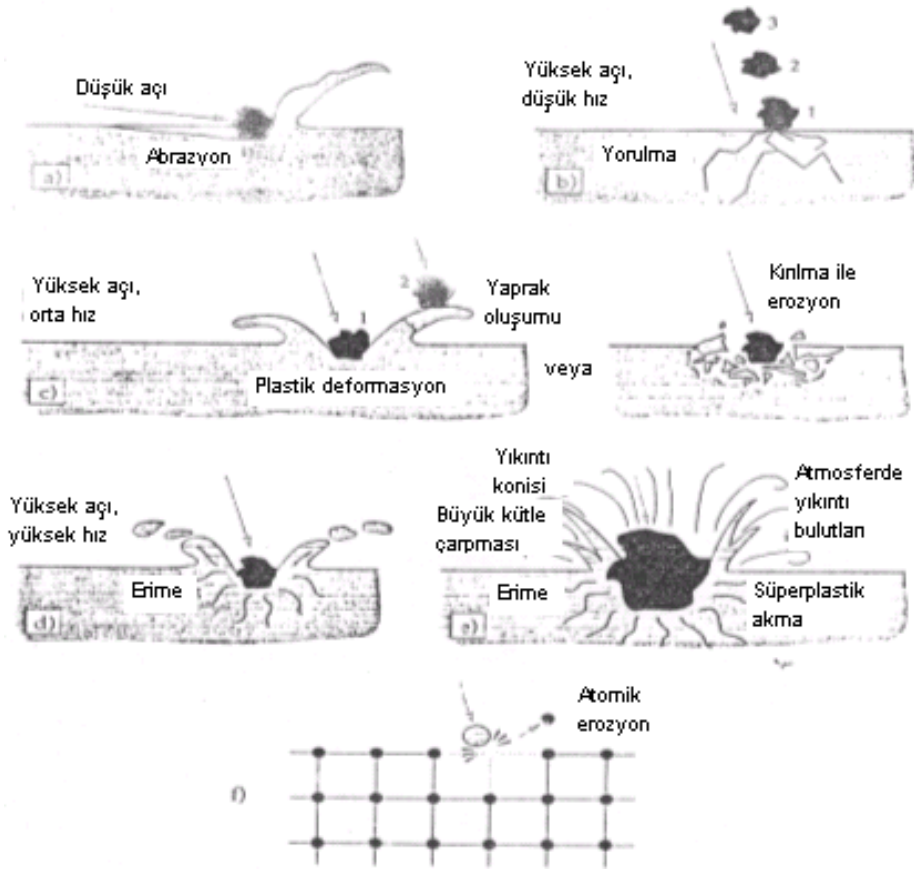
6.2 Eroziyon Aşınma Davranışları Hakkında Teorik Bilgi

Erozyon, veya eroziyon aşınma, bir katının, katı parçacıklar taşıyan bir akışkan ile teması sırasında bağlı hareketlere bağlı olarak yüzeyinde oluşan malzeme kaybıdır [63].

Eroziyon aşınma çok çeşitli makinelerde görülür ve tipik örnekleri toz bulutundan geçen bir uçağın pervanelerindeki hasar ve mineral çamurları işleme sistemlerindeki pompa pervanelerindeki aşınmadır. Diğer aşınma şekillerinde de olduğu gibi, mekanik dayanım aşınma direncini garantilemez. Aşınmayı minimize etmek için detaylı bir malzeme karakteristiği çalışması gereklidir. Aşındırıcı parçacıkların da özellikleri önemlidir ve bu tip aşınmanın kontrolünde, artan bir şekilde, ilgili parametre olarak kabul edilmektedir [61].

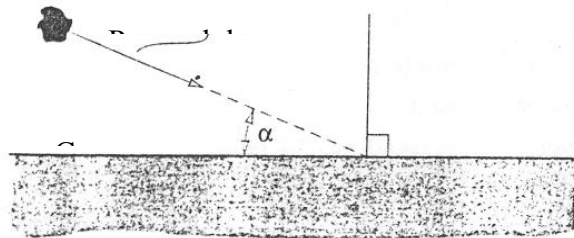
Eroziyon aşınma, parçacık malzemesi, çarpma açısı, çarpma hızı ve parçacık boyutu kontrollü birçok aşınma mekanizması içerir. Parçacık sert ve katı ise, abrazyon aşınmaya benzer bir davranış gözükür. Aşındırıcı parçacıklar sıvı olduğunda, abrazyon gözükmez ve aşınma mekanizmaları, darbe sonucu oluşan tekrarlı gerilmelerle ilgilidir [62].

“Eroziyon aşınma” terimi, küçük parçacıkların mekanik parçalara darbesi sonunca oluşan birçok mekanizmayı kapsar. Bu tanım, doğası gereği deneyseldir ve temel aşınma bilgileri yerine daha çok pratikteki incelemelere bağlıdır. Bilinen eroziyon aşınma mekanizmaları Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2: Bilinen erozif aşınma mekanizmaları [61].

Çarpma açısı, Şekil 6.3’de gözüktüğü gibi, aşınan yüzey ve parçacığın çarpma öncesi geliş doğrultusu arasındaki açıdır. Düşük bir çarpma açısı, abrazif aşınmaya benzer bir davranış gösterir çünkü çarpma sonrası parçacıklar yüzey boyunca ilerlemeye devam ederler. Yüksek bir çarpma açısı ile tipik erozyon diyebileceğimiz aşınma mekanizmaları gösterir.

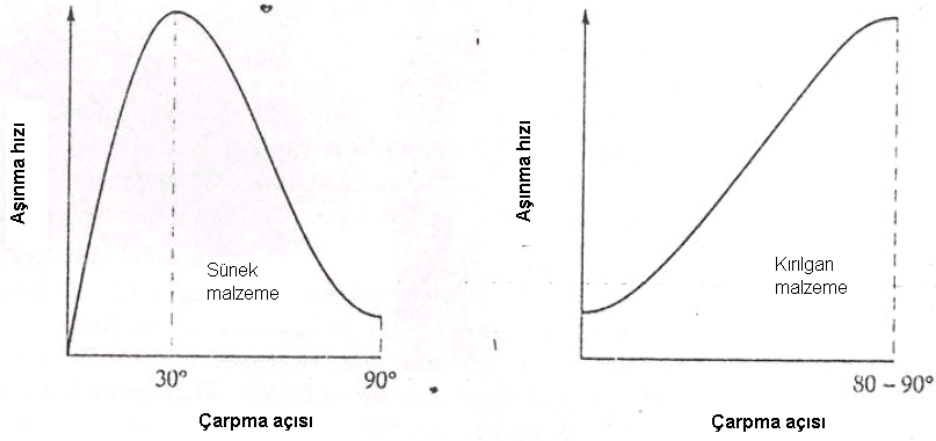


Şekil 6.3: Çarpma açısı ve hızı [4].

Erozif parçacığının hızı, aşınma prosesinde çok büyük bir etkiye sahiptir. Hız çok düşükse, darbe sırasındaki gerilimler, plastik deformasyon oluşturmaya yetmez ve aşınma, yüzey yorulması şeklinde oluşur. Hız örneğin 20 m/s'ye çıkartıldığında, parçacık darbesi sonucu, malzeme yüzeyinde plastik deformasyon meydana gelebilir. Çoğu mühendislik malzemesinde gözüken bu sistemde aşınma, tekrarlanan plastik deformasyonlar şeklinde olur. Eğer parçacıklar yuvarlak uçlu ve küreselse, aşırı plastik deformasyon sonucu, aşınmış yüzey üzerinde, aşınan malzeme ince tabakalar oluşturur. Parçacıklar keskin ise, kesme veya kırılma parçalanma gözükür. Kırılma malzemeler yüzey altı kırılma ile aşınır. Çok yüksek parçacık hızlarında, darbeye uğrayan yüzeyin erimesi bile gözükabilir.

Parçacık boyutu da önemli bir etkidir ve erozif aşınma problemlerinin çoğu 5 – 500 µm arası boyutlarda parçacıkları kapsar, ama aşındırıcı boyutunun bu arada olmasını gerektiren bir temel neden yoktur. Alçak yörüngeli bir uydu, çok çok küçük parçacıklarla erozif aşınmaya güzel bir örnek verir. Uydu, dış atmosferdeki oksijen ve azot atomlarının darbesiyle erozyona maruz kalır ve bu, uydu gövdesinde hasara neden olur. Uzayda ayrıca sayısız meteorit vardır ve bunlar kendilerinden büyük tüm asteroid veya gezegen uydusunu darbe ile erozyona uğratır. Her iki malzeme bozulmasında da, aşındırıcı parçacıkların çarpma hızları çok yüksektir ve spesifik aşınma mekanizmaları, normalde “erozif aşınma” olarak tanımlanandan daha farklıdır. Atmosferik atomların darbeleri sırasında, bombardımana uğrayan malzemenin kristal latisinde bozulma olarak aşınma yüzeyi oluşur. Meteorit çarpmasında ise, büyük boyut ve büyük hız sonucu makroskobik hasar oluşur ve çarpma alanı etrafındaki atmosferin bozulması bile gözükabilir.

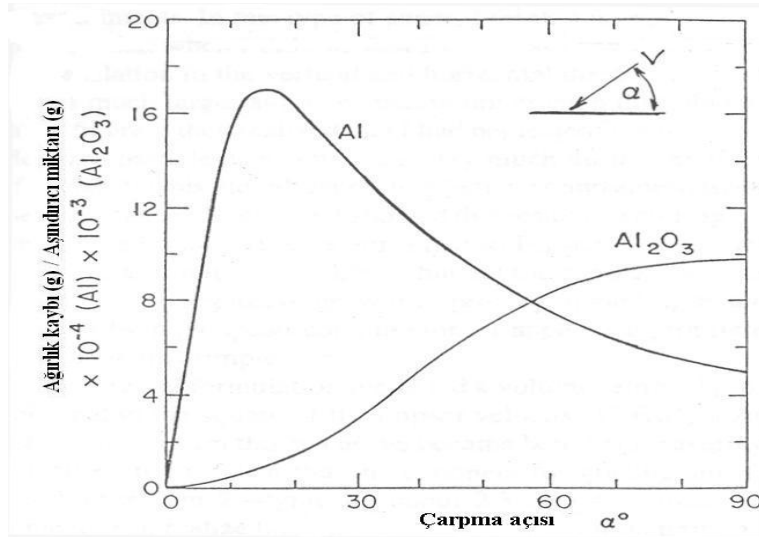
Çarpma açıları 0° ile 90° arasında olabilir. Sıfır derecedeki aşınma ihmal edilebilir çünkü aşındırıcı parçacık yüzeye çarpmaz. Fakat oldukça düşük sayılabilecek 20° gibi bir açıda, eğer parçacık sert ve yüzey yumuşaksa, çok ciddi aşınma meydana gelebilir. Bu koşullarda, abrazif aşınmaya benzer bir aşınma geçerlidir. Eğer yüzey kırılansa, en yüksek hıza 90°'ye yakın açılarda sahip olan yüzey parçalanması şeklinde şiddetli aşınma görülür. Aşınma hızı ile çarpma açısı arasındaki bağlantı, sünek ve kırılma malzemeler için ayrı ayrı Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4: Sünek ve kırılgan malzemeler için parçacık çarpma açısı ile aşınma hızının ilişkisi [61].

Düşük çarpma açılarında erozyonun maksimum gözüktüğü durumlarda, “sünek erozif aşınma modu” geçerlidir. Tersine, maksimum aşınma yüksek açılarda gözükiyorsa, “kırılgan erozif aşınma modu” geçerlidir.

Sünek-kırılgan erozif aşınma farkı ile ilgili yapılan bir çalışmada, alüminyum metali ile alümina seramiğinin erozif aşınma davranışları karşılaştırılmış ve de Şekil 6.5’de açığa bağli olarak erozif aşınmanın miktarları gösterilmiştir [64].



Şekil 6.5: 127µm SiC parçacıkları ile 152ms⁻¹ hızda aşındırılmış 1100-0 alüminyum ve de alüminanın karşılaştırılması [64].

Parçacıkların çarpma hızı, aşınma hızında çok büyük etkiye sahiptir. Genellikle, altındaki hızlarda aşınmanın ihmal edilecek kadar düşük olduğu bir alt hız değeri

vardır. Orta ve yüksek hızdaki bir çok problemi kapsayan, aşınma hızı ve çarpma hızı arasındaki ilişkiyi gösteren bir kuvvet kanunu yazmak mümkündür:

$$-dm / dt = kv^n \quad (6.1)$$

m: :aşınmış parçanın ağırlığı (aşınma ağırlık kaybına yol açtığı için negatiftir)
[kg]

t :işlem süresi [s]

k :deneysel sabit

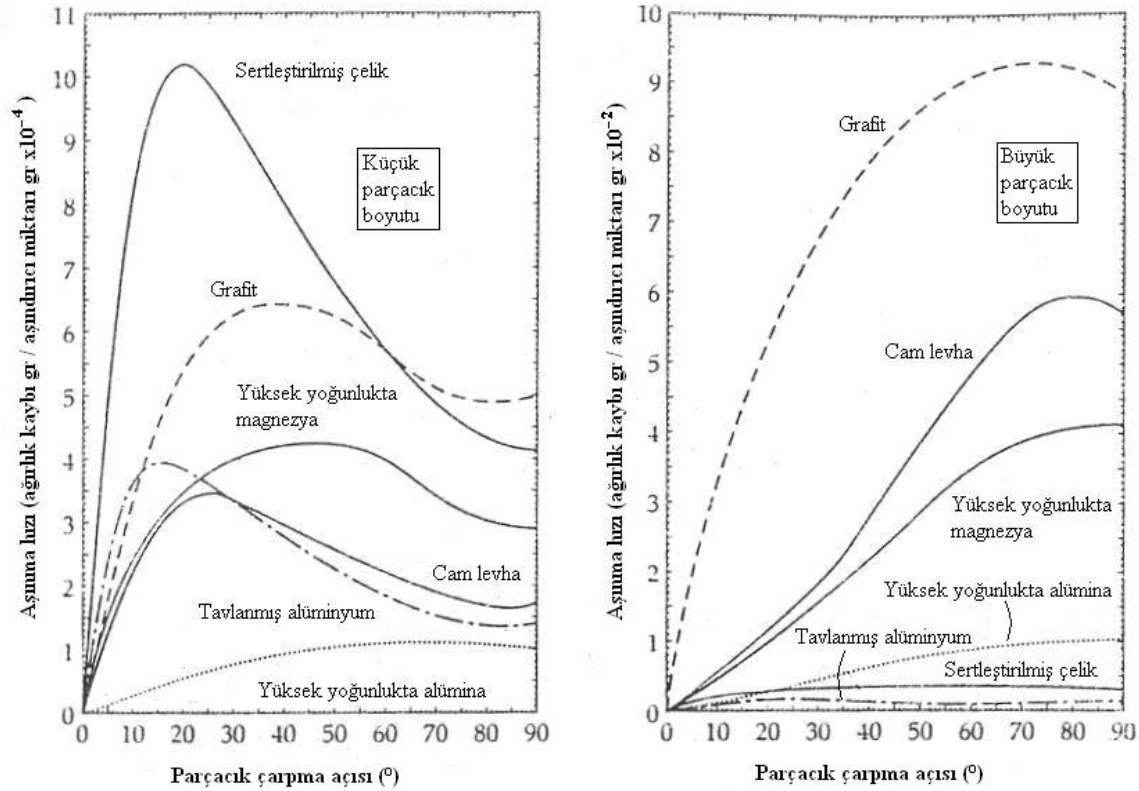
v :çarpma hızı [m/s]

n :hız üstü

Üst n'in değeri genellikle katı parçacıklar için 2 – 3 arasındadır, bu değer parçacıkların kinetik enerjileri temel alınarak yapılan tahminlerin çok üstündedir. Bu eşitlik (6.1) kapsamlı değildir çünkü k değeri parçacık yoğunluğu ve şekli gibi analitik dataya sahip olmayan diğer parametreler tarafından kontrol edilmektedir. Bu, çarpma hızının aşınma hızına olan etkisini gösteren en eski eşitliklerdendir, örneğin çarpma hızı 10 kat arttığı zaman aşınma hızı 100 – 1000 kat artabilir [61]. Parçacık hızının artması ile erozif aşınma hızı artar fakat, aşınma hızının çarpma açısına olan bağlılığını değiştirmez [65]. Parçacık karakteristikleri, erozyon problemlerinin önemli fakat nispeten az araştırılmış konularıdır. Sert parçacıkların yumuşak parçacıklara göre daha yüksek aşınma hızına sebep oldukları bilinmektedir. Parçacığın keskinliğinin de erozif aşınmayı arttırdığı bilinmektedir. Bu iki parametre de erozif aşınmanın sayısal modellerine eklenmişlerdir. Parçacık sertliğinin, aşınan malzemenin sertliğine oranı kontrol parametresi olarak gözükmemektedir. Parçacık sertliğinin önemi, alümina gibi kimi aşındırıcıların sertliğinin, yumuşak çeliklerle karşılaştırılması durumunda daha artar. Bu durumda parçacığın malzemeye sertlik oranı 10 civarındadır. Parçacık sertliğinin aşınmadaki etkisi, meydana gelen erozif aşınma moduna (sünek veya kırılğan) bağlıdır. Kırılğan modda parçacık sertliği sünek moda göre daha önemlidir [61].

Aşındırıcı parçacığın, malzemeye göre sertliği, erozif aşınmada çok önemli bir faktördür. Abrasif aşınmada da görüldüğü gibi, parçacık sertliği, malzemenin

sertliğinin altına düştüğünde aşınma hızı oldukça düşmektedir. Çeliklere yapılan ısıt işlemlerin, erozif aşınma davranışına çok fazla etkisinin olmadığı söylenmesi, yapılan çalışmalarda, sertlikleri çeliğin çok üzerinde olan SiC ve Al_2O_3 gibi parçacıklar kullanılmasına bağlıdır [62]. Sertliği, parçacığın şekli gibi diğer özelliklerden tamamen izole etmek mümkün değildir. Parçacık sert fakat nispeten yuvarlak olduğunda şiddetli erozif aşınma oluşturmaz. Yuvarlağımsı bir parça genelde küresele yakın kıvrımlı yüzeylere sahipken, keskin parçacıklar, düz alanların küçük yarıçaplı köşelerle birleşmesinden oluşan kritik erozif aşındırıcı şekillere sahiptirler [61]. Parçacık boyutundaki farklılıklar, değişik mühendislik uygulamalarında erozyon mekanizmalarında temel değişikliklere yol açabilirler. Cam, çelik, grafit ve seramikler üzerinde yapılan bir araştırma göstermiştir ki, parçacık boyutunun $8.75 \mu m$ 'den $127 \mu m$ 'ye yükselmesiyle birlikte erozyon modu sünekten kırılığa dönmüştür. Bu da erozif aşınma pikinin 30° 'den 80° civarına taşınmasına ve aşınma hızında, Şekil 6.6'dan görüldüğü gibi çok yüksek bir artışa neden olmuştur. İki durumda da $152 m/s$ çarpma hızlı silisyum karbür parçacık aşındırıcı olarak kullanılmıştır.

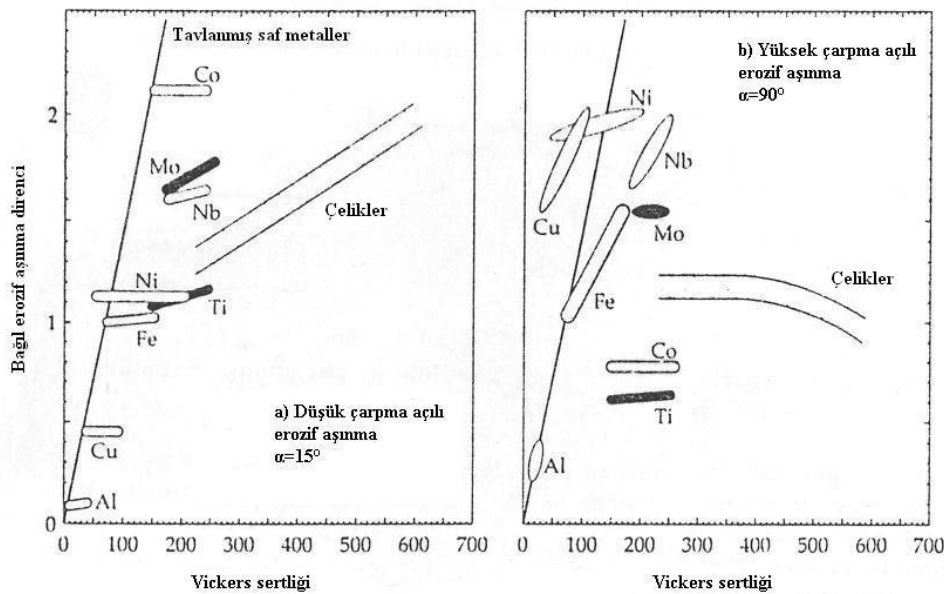


Şekil 6.6: Farklı malzemeler için küçük ve büyük parçacık kullanımına ve açığa bağlı olarak erozif aşınma hızları [61].

Şekil 6.6'dan da görülmektedir ki parçacık boyutu sadece aşınma hızını değil, aynı zamanda malzemelerin aşınma dayanımı açısından sıralanmalarını da değiştirir. Aşındırıcı olarak küçük parçacıklar kullanıldığında, malzemelerin aşınma dayanımına göre sıralanmaları şu şekildedir: yüksek yoğunlukta alümina > tavlanmış alüminyum > cam levha > yüksek yoğunlukta magnezya > grafit > sertleştirilmiş çelik. Bu durumda, tavlanmış alüminyum göz ardı edilirse, erozif aşınma hızı malzemenin sertliğine bağlıdır. Alüminyumun deformasyon sertleşmesi kabiliyeti de istisnai durumu açıklayabilir. Diğer taraftan erozif aşındırıcı olarak büyük parçacıklar kullanıldığında sıralama şöyle oldu: tavlanmış alüminyum > sertleştirilmiş çelik > yüksek yoğunlukta alümina > yüksek yoğunlukta magnezya > cam levha > grafit. Yani bu durumda malzemenin tokluğu önemli olmuştur. Ne tok ne de sert olan malzemeler, grafit gibi, kötü erozif aşınma dayanımı gösterirler [61]. Sünek malzemeler için, aşındırıcı parçacıkların boyutları, 100µm'nin üzerinde olduğu sürece aşınma hızında pek etkili değildir. Fakat parçacık boyutu 100 µm'nin altına indiğinde aşınma hızı, ciddi olarak düşer. Boyut etkisi olarak bilinen bu etki, abrazyon aşınmada da gözükür [62]. Aşınma modellerindeki değişim, katı içindeki delik veya kırık gibi hataların birbirlerine ortalama uzaklıkları sonucu oluşur. Eğer çarpan parçacıklar çok küçük ise, çarpma alanlarının çok azı hatalı bölgeleri barındıracaktır. Çarpma alanı, parçacığın çarptığı yerin tam altı ve parçacık boyutuna yakın, bir hayli yüksek gerilimdeki malzemenin oluşturduğu alandır. Hataların olmadığı yerlerde plastik deformasyon oluşur ve bu, küçük parçacıklar için temel malzeme kaybı modudur. Malzeme kaybı için tekrarlı plastik deformasyonlara ihtiyaç duyulmasından dolayı, bu tip aşınma nispeten yavaştır. Büyük aşındırıcı parçacıklar için, genelde her çarpma alanında bir hata mevcuttur ve bu yüzden malzeme kaybı kırılma şeklinde olur. Çatlak oluşumu çok hızlı olduğu için, kırılma erozyon çok şiddetli bir aşınma türüdür. Parçacık akı değeri veya birim alana çarpan parçacıkların kütlesi ve zaman da erozif aşınma hızını kontrol eden bir başka parametredir. Erozif aşınma hızı, belirli bir limit aşınma değerine kadar akı değeriyle doğru orantılıdır. Bu limit bir çok çalışmada görülmüştür ve de geri seken parçalar ile yeni gelmekte olan parçacıkların etkileşiminden dolayı oluştuğuna inanılmaktadır. Limit parçacık akı değeri oldukça değişkendir, kauçuklar için 100 kg/m²s gibi düşük değerlerden, metallerin büyük ve hızlı parçalarla aşınması durumunda 10,000 kg/m²s gibi yüksek değerlere kadar çıkabilir. Limit akı değeri geçildiğinde aşınma hızının azalması mümkündür. Erozif aşınmanın kuluçka dönemi, erozyonun başlangıcından,

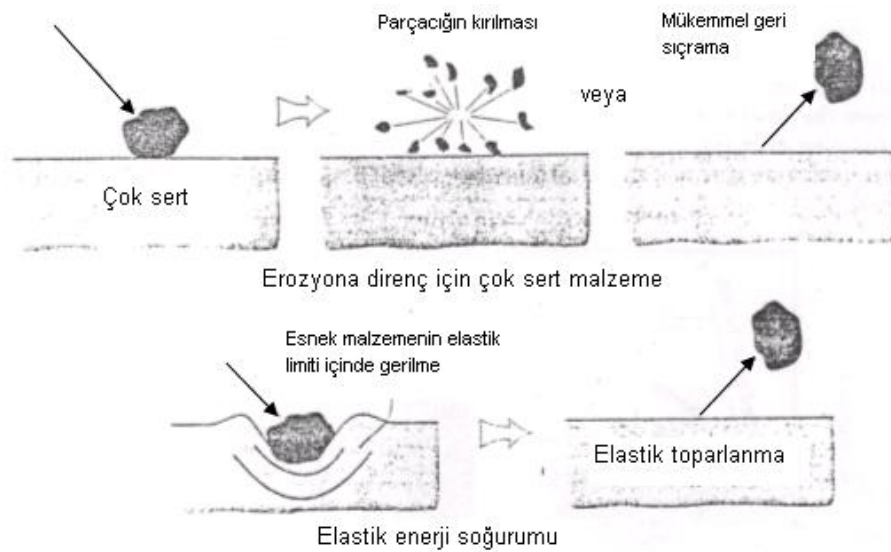
ölçülebilir ilk pozitif aşınmanın başına kadar olan zamandır periyodudur. Kuluçka döneminde aşınma ya ihmal edilebilir ya da negatif olabilir. Negatif olabilmesi, aşındırıcı parçacıkların aşınan malzeme üzerinde yapışarak kalmalarından mümkün olabilir. Kuluçka periyodu, yüzey altındaki hasarların birikmesine bağlıdır, örneğin kırıklar ve gerginleşmiş malzeme gibi aşınma parçacıkları kaybının öncülerine. Kuluçka dönemi geçtikten sonra aşınma genelde sabit hızla ilerler [61].

Malzemelerin Eroziv Aşınma Dirençleri: Malzeme özelliklerinin eroziv aşınma üzerinde çok büyük etkileri vardır ve bunların üzerine yoğun olarak çalışmalar yapılmıştır. Abrasif aşınmada da görüldüğü gibi, mekanik özelliklerdeki gelişmeler, her zaman daha iyi bir eroziv aşınma dayanımına neden olmaz. Örneğin bir malzeme kasıtlı olarak sertleştirildiğinde eroziv aşınma hızı artabilir. Aşınmanın azalması için malzeme optimizasyonundaki zorluk, aşınma hızını hem eroziv aşınma mekanizmasının karakteristikleri hem de malzeme karakteristiklerinin kontrol ediyor olmasıdır. Bu kuralın bir canlandırması, metallerin bağıl erozyon dirençlerinin çarpma açısının bir fonksiyonu olarak gösterilmesi ile sağlanabilir. Çarpma açısının düşük olduğu durumda, sertleştirilmiş çelik, yumuşak çelikten daha az aşınır. Yüksek çarpma açıları ise bu durumun tam tersi geçerlidir. Şekil 6.7’de 15° ve 90° için farklı sertlikteki değişik metallerin eroziv aşınma dirençleri malzeme sertliğinin bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Kullanılan abrasif 1 mm çapında, 30 m/sn hızında silisyum karbürdür.



Şekil 6.7: Malzeme sertliğinin bir fonksiyonu olarak, 15° ve 90° için farklı sertlikteki değişik metallerin eroziv aşınma dirençleri [61].

Düşük açılarda, malzeme sertliği ve deformasyon sertleşmesi özelliği, aşınmayı durdurucu etki yapar. Bu durumda, malzemeler sertlik sırasına göre derecelendirilebilir. Şekil 6.7’den görülmektedir ki 15°lik çarpma açısında aşınmaya en dayanıklı metal kobalt iken, en kötülerin ikincisi bakırdır. Çarpma açısı 90° olduğunda ise, malzemelerin sıralaması önemli ölçüde değişir ve bakır ikinci en iyi metal iken, kobalt sondan üçüncü olur. Sertlik arttırmak için çeliğe yapılan ısıtıl işlem, düşük açılarda direnci artırırken, yüksek açılarda azaltır. Özetle, malzeme özelliklerindeki ufak farklılıklar, sertlik veya benzer metaller arasındaki alaşım farkları, erozif aşınmanın toplam sistem karakteristiklerinin dışında tutulamaz. Bir malzemenin erozif aşınma direncini tanımlamak için, sadece çok geniş malzeme sınıflarından bahsetmek yararlıdır, ör: polimerler, seramikler ve metaller gibi çok büyük farklılıkların gözüktüğü ve bu farklılıkların hız ve çarpma açısı ile değişmediği gruplar. Çok yüksek erozif aşınma direnci için genel bir reçete yoktur. Mevcut olabilecek iki farklı erozif aşınma önleme mekanizmasından dolayı, yüksek aşınma direnci birden fazla tür malzeme ile sağlanabilir. Kimi durumlarda malzeme çok sert ve tok olabilir, böylece çarpan malzeme yüzeyde bir iz yapamaz. Metalik veya seramik, erozyona dayanıklı malzeme geliştirilirken yapılan yaklaşım budur. Alternatif olarak, malzeme tok ve çok düşük elastik modüle sahip olabilir, bu durumda parçacıkların kinetik enerjisi zararsız bir şekilde emilir. Bu zıt aşınma koruma mekanizmaları Şekil 6.8’de gösterilmiştir.



Şekil 6.8: Çok sert ve çok elastik malzemelerin zıt aşınma koruma mekanizmaları [61].

Deneyisel olarak gösterilmemiş olmasına, parçacık enerjilerini elastik olarak absorbe ettiği için kauçuğun iyi erozyon direnci gösterdiğine inanılır. İlk parçacık çarpmasının hiçbir görünür hasar göstermediği ve aşınmanın yavaş yorulma proseslerine dayandığı görülmüştür. Doldurulmamış kauçuk iyi erozif aşınma direnci gösterirken, şaşırtıcı bir şekilde abrazif aşınmaya dayanıklılığı yoktur.

Erozyona dirençli malzeme seçimi, çalışma sıcaklığı veya malzeme geçirgenliği gibi farklı durumlar da göz önüne alınır. 200°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda polimerler seçenek olmaktan çıkar, ama özel bir uygulama için geçirgen bir malzeme gerektiği zamanda da metaller kullanışlı olmaz. Örneğin, hava taşıtlarının ön camları, geçirgen olmaları gerekliliğinin yanı sıra, kum, toz ve yağmur tarafından oluşan yüksek hızda erozyona da dayanıklı olmalıdırlar. Polimetilmetakrilatın bu uygulama için yüksek tokluğu ve erozyon hasarına bağlı olarak minimum geçirgenlik kaybından dolayı en iyi aday olduğu bulunmuştur. Erozif aşınmaya dayanıklı malzeme olarak metaller, polimerler ve seramiklerin bağıl faydaları ve zararları Çizelge 6.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 6.2: Metaller polimerler ve seramiklerin erozif aşınma dayanımları açısından karşılaştırılmaları [61].

Malzeme	Erozif aşınmayı etkileyen bağıl özellikler
Metaller	Geniş bir tokluk ve sertlik değer aralığı sayesinde her parçacık türü veya çarpma açısına uyabilir. Yüksek sıcaklıkta korozyon ve yumuşama etkilerine açık; korozif ortamlar ayrıca zararlı.
Seramikler	Yüksek sertliğe ve gittikçe artan tokluk değerlerine sahip. Yüksek sıcaklık ve korozif ortamlara dayanıklı. Kırılgan modda düşük erozif aşınma direnci.
Polimerler	Sert polimerler ve kauçuklar korozif ortamda bile iyi erozyon direnci sağlarlar. Ama düşük sıcaklık sınırı yüzünden kullanımları sınırlanmıştır.

Çeliklerin Erozif Aşınma Dirençleri: Çelik mikroyapısının erozif aşınmaya etkisi ile ilgili literatür, sünek bir çeliğin aşınmaya daha çok dayanıklı olduğunu önerir. Çeliğin sertleştirilip martenzit oluşturulması, sadece çok düşük açılarda biraz iyileşme sağlarken, kütsel veya lamelli karbür oluşumu erozif aşınma direncini düşürür. Erozif aşınmayı düşürmek için çelik seçimi bu bakımdan abrazif aşınma durumundan farklıdır. Az alaşımlı karbon çelikleri için, ferritik faz ile, mukavemet arttıran yeterli miktarda küresel karbür inklüzyonları erozif aşınmaya karşı çok etkilidir. Perlitik çelikler, küreselleştirilmiş çeliklerden daha kötü aşınma dayanımı sergilerler. Görülmüştür ki çeliğin erozif aşınması klasik sünek erozyon karakteristikleri gösterir, örneğin en yüksek aşınma hızı 30°lik düşük açıda, yüzey

altı ve yüzey kırılmaları ile gözüktür. Bu da çeliğin erozif aşınma dayanımının süneklilik eksikliği ile sınırlandığını gösterir [61].

Mikroyapı, çeliklerin erozif aşınma dirençlerinde önemli bir rol oynar. Levy'nin bir çalışmasında [66], 1020 ve 1075 çelikleri, farklı ısıtma işlemlere tabi tutularak mikroyapı bakımından değiştirilmiş ve de erozif aşınmaya maruz bırakılmışlardır. 1075 çeliği kaba perlitik, ince perlitik ve küreselleştirilmiş şekillerde, 1020 çeliği de üç farklı küreselleştirilmiş şekilde incelenmiştir. Tüm test edilen çeliklerde, erozif aşınma hızı, alaşımdaki sert, kırılkan ve yumuşak, sünek fazların dağılımına doğrudan bağlıdır. Limitler dahilinde, sünek matris çoğaldıkça, erozif aşınma hızı da düşmüştür. Fakat, sünek matris yapıya hakim faz olup çeliğin mukavemeti buna bağlı olarak fazlaıyla düşünce, erozyondaki etkin faktör süneklilik yerine mukavemet olur. 1075 çeliğinde, sünek ferrit matrisi içinde, kırılkan karbür parçalarının küresel yapının arasına serpiştirildiği küresel yapı, karbürlerin pıhtı şeklinde olup, sünek ferrit fazının alanlarını ince bölümlere ayırdığı perlitik yapıdan daha az aşınmıştır. Üç 1020 çeliğinden ikisinde, karbür kürecikleri arasındaki mesafe arttıkça, aşınma miktarı azalmıştır. Fakat, parçacıklar arası mesafe çok uzadığı zaman, aşınma hızı, ferrit matrisinin düşük mukavemetinden dolayı artmıştır.

Kömür gibi çok yumuşak erozif parçacıklar için, karbür inklüzyonları aşınma direncini biraz artırır. Çelik veya dökme demirleri alaşımlayıp belirli miktarda yapıda tutulmuş ostenit bırakmak erozif aşınmayı azaltmada etkili bir yöntemdir. Ağırlıkça %0,7 karbonlu çeliğe, %2,5 silisyum eklemek veya %2,54 karbonlu dökme demire %0,45 silisyum eklemek çok iyi erozif aşınma direncine yol açar. Bu çelik ve dökme demirin optimum ısıtma işlemi, tüm martenzitin dağılıp sadece tutulmuş ostenit ve beyritik ferritin mevcut olacağı, uzun ostemperleme süreli bir ısıtma işlemidir. Genel bir kural olarak, çelikler için erozif aşınma dayanımını arttırmak için sertlikten ziyade sünekliliğin geliştirilmesi gereklidir [61].

6.3 Borlama İşleminin Aşınma Davranışına Etkisi

Borun oksijene karşı afinitesi fazla olduğundan yüzeyde koruyucu ince bir oksit filmi oluşturmakta ve bu oksit filmi yüzeyde yağlayıcı vazifesi görerek sürtünmeli aşınma esnasında sürtünme katsayısını düşürürken yüzeylerin birbirine kaynamasını

önlemektedir. Kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı sementle edilmiş tabakanın yumuşamasına neden olurken borlu tabakaya etki etmemektedir.

Borlamanın diğer yüzey sertleştirme işlemlerine göre en önemli üstünlüğü yüzey tabakasının çok sert olması sürtünme katsayısının düşük olması ve borlamadan sonra ek bir ısıl işleme gerek duyulmamasıdır. Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertlikleri ve yüksek aşınma dirençleriyle karakterize edilirler. Bundan dolayı özellikle yüksek mertebede abrasiv ve adhesiv aşınmaya ve erozyona maruz makine parçalarının ve sistem elemanlarının borlanması teknik ömrün uzatılmasında önemli katkılar sağlar.

Borlamanın sürtünme katsayısına etkilerini araştıran araştırmacıların hemen hepsi, borlamanın sürtünme katsayısını düşürdüğü sonucuna varmışlardır. Geoeuriot ve arkadaşları [67], borlanmış ve kromlanmış (Çizelge 6.3), Linial ve arkadaşları [24], borlanmış ve borlanmamış malzemelerin sürtünme katsayılarını (Çizelge 6.4) belirlemişlerdir [24].

Çizelge 6.3: Kromlama ve Borlama uygulanmış çeliklerin sürtünme katsayıları [67].

Çelik	İşlemi Uyguladıktan sonraki sürtünme katsayıları	
	Borlanmış	Kromlanmış
XC10	0,57	0,64
XC38	0,55	0,74
Z200C12	0,54	0,75
Z6CN18-10	0,50	0,63

Borlanmış yüzeylerin aşınma açısından diğer bir üstünlüğü, gerek çalışma ortamından kaynaklanan, gerekse kayma sürtünmesi sonucu ortaya çıkan ısının, borlu tabakaların sertliklerinde ve aşınma dayanımlarında büyük bir düşüşe neden olmamasıdır [45].

Subrahmanyam [78], değişik fazlara sahip borür tabakasının aşınma davranışlarını incelemiş ve homojen olmayan mikro yapılarından iki fazlı tabakaların aşınma dayanımlarının, daha kötü olduğunu ve yine yüzey tabakalarına bağlı olarak aşınma mekanizmalarının farklılık gösterdiğini belirlemiştir.

Uetz ve Wlassow [79], borür tabakalarında oluşan aşınma mekanizmalarını incelemiş ve Fe₂B tabakasındaki aşınmanın yorulma sonucunda oluştuğunu belirtmişlerdir.

Çizelge 6.4: Borlanmış ve borlanmamış malzemelerin statik sürtünme katsayıları [24].

MALZEME	İŞLEM	YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ (μm), Ra	SÜRTÜNME KATSAYISI
01 Takım Çeliği	Borlanmış	0,076	0,07-0,09
	Borlanmamış	0,076	0,22-0,24
1018 Karbon Çeliği	Borlanmış	0,076	0,14-0,15
	Borlanmamış	0,076	0,19-0,24
302 Paslanmaz Çelik	Borlanmış	4,572	0,16-0,18
	Borlanmamış	0,076	0,19-0,22
Tungsten	Borlanmış	0,076	0,12-0,14
	Borlanmamış	0,076	0,45
Molibden	Borlanmış	6,858	0,16-0,17
	Borlanmamış	0,076	0,38
Nikel	Borlanmış	0,076	0,13-0,14
	Borlanmamış	0,076	0,42

Takeuchi ve arkadaşları[80] , FeB, Fe₂B tabakalarının benzer aşınma özellikleri gösterdiğini ve borlanmış çeliklerin aşınma davranışlarını etkileyen en önemli faktörün, yüzeyde oluşan koruyucu oksit filmleri olduğunu ileri sürmektedirler. Formanek ve arkadaşları [81], plazma-sprey yoluyla borür tabakaları oluşturmuş ve bu tabakaların mikro-yapı aşınma ve erozyon testlerini yapmıştır.

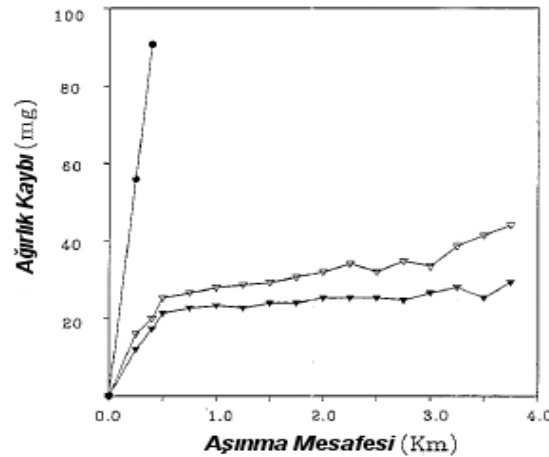
Borlama işlemi akademik çalışmalara paralel olarak, endüstride geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Çelikten yapılan kahve öğütme diskleri, borlandığında ömürleri beş kattan fazla artmaktadır. Dökme demirden yapılmış, tekstil makinesi parçalarının borlanması çok iyi sonuçlar vermektedir. Demiryolu yük vagonlarının sönümleme parçaları, genellikle 100000 km' den sonra aşınmaktadır. Bu parçalar borlandığında ömürleri, 200000 km.' ye çıkmaktadır. Volkswagen Golf otomobillerinin dizel motorlarının yağ pompası dişlileri, borlanarak ömürleri arttırılmaktadır [82].

6.3.1 Borlama işleminin abrazif aşınma davranışına etkisi

Borlama sonucu oldukça yüksek sertliğe sahip bir yüzey tabakası elde edilir. Her ne kadar sertlik ve aşınma dayanımı arasında doğrudan doğruya bir bağıntı yoksa da; borlama sonucu yüzey sertliğinin ve akma direncinin artması sürtünen yüzeyler arasındaki temas yüzeyini azaltarak aşınma hızını düşürür. Abrasiv aşınma genel olarak sürtünen yüzeyde sertliği ile orantılıdır [68]. Borlanmış çelikler yüksek sertliklerinden dolayı abrasiv aşınmaya karşı son derece dirençlidirler. Borür tabakasının kalınlığı işlem şartlarına bağlı olarak 20 µm – 300 µm arasında değişir ve teknik ömürdeki artış birkaç kattır. Abrasiv aşınmanın azaltılması için borlanmış malzemelerin kullanıldığı uygulama örnekleri arasında : Pnomatik taşıma sistemleri, plastik enjeksiyon makine parçaları, değirmen pompa ve valf parçaları vb. bulunmaktadır. Sert SiC zımpara kağıdının abrasiv olarak kullanıldığı zımpara aparatında yapılan iki cisimle abrasiv aşınma deneylerinde borlanmış 42 Cr, Mo4 numunelerin; nitrülenmiş ve sertleştirilmiş numunelere kıyasla çok üstün bir abrasiv aşınma direnci sergilediği görülmüştür [69]. Borlanmış çelikteki alaşım elemanlarının aşınma özelliklerine etkisi vardır. Bu etki aynı olmayıp aşınma mekanizmasına bağlı olarak değişmektedir. Borlanmış alaşımlı çeliklerin abrasiv aşınma dirençlerinin alaşımsız olanlara göre daha fazla olduğu ve borlanmış çeliklerde Cr, Mo, V ve de hepsinden öte VC' ün varlığının abrasiv aşınma direncini iyileştirdiği yapılan çalışmalarda ifade edilmektedir. Alaşımlı bir çelik borlandığında bazı alaşım elementleri borür tabakası içerisinde erirken, bazıları da tabakanın altında yoğunlaşarak tabakanın büyüme eğilimini ve faz kompozisyonunu etkiler. Borlanmış 145V33 çeliği en düşük abrasivaşınma göstermiştir. Buna borür tabakası içerisindeki, SiC tanecikleri tarafından kesilemeyen sert VC taneciklerinin sebep olduğu belirtilmektedir [70]. Aynı konuda yapılan başka bir çalışmada X210Cr12 soğuk iş takımı çeliği 900°C / 5 saat şartlarında borlanılarak 1650 HV tabaka sertliği elde edilmiştir. Bu numuneler sulu abrozyon şartlarında SiC zımpara ile abrasiv aşınmaya tabi tutulmuş ve borlanmış numunelerin borlanmamışlarına kıyasla aşınma direncinde 8-10 katlık bir artış sağlanmıştır [68].

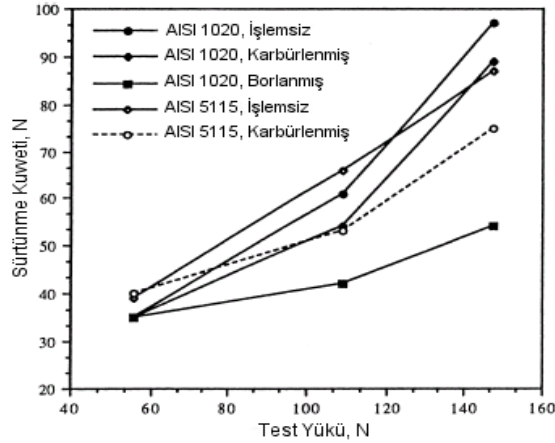
Sürtünmeye maruz kalan yüzeylerde aşınma dayanımı oldukça önemlidir. Borlama termo kimyasal işlemi; oldukça sert, aşınmaya dirençli ve düşük sürtünme katsayılı yüzeyler oluşturulmasını sağlayan çok önemli bir prosestir. Borlanmış çelik malzemeler yüksek yüzey sertliklerinden ve düşük sürtünme katsayılı yüzeylerinden

dolayı oldukça yüksek abrasiv direnç gösterirler. Borlanmış malzemelerin diğer bir özelliği de düşük soğuk kaynaklanma eğilimi göstermeleridir. Bu özellik yüzeyin adhesiv aşınma eğilimini azaltmaktadır. Bu sayede yüzeyi borlanmış malzemeler soğuk metal işleme şartlarında çalışabilmektedirler. Bunun dışında nitrasyon ve karbürizasyon ile borlanan malzemeler karşılaştırıldığında, borlanan malzemelerin aşınma dayanımları daha yüksek çıkmaktadır [71]. Çeliklerin borlanmasında, adhesiv, abrasiv ve kaymalı aşınma değerlerinde büyük gelişmeler görülmektedir. Bu açıdan borlama düşük alaşımlı, krom-molibden bazlı çeliklerde oldukça etkilidir. Borlama ile abrasif aşınma dirençlerinde %400-500 seviyelerinde gelişme sağlanabilmektedir. Tribolojik uygulamalarda en çok kullanılan kaplamalar, demir borür ve titanyum diborür kaplamalardır. Demir borür kaplamalar, çok düşük aşınma ve yüksek sürtünme direnci sağladığından fren sistemlerinde kullanılmaktadırlar. Habig ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda [2], CVD yöntemiyle kaplanmış FeB, TiN, TiC ve CrC'lerin birbirleri üzerinde kaymaları yöntemiyle tribolojik özellikleri kıyaslanmış ve FeB'lerin TiN ve TiC'e göre bir kat, CrC'e göre iki kat daha düşük aşınma hızına sahip olduklarını görmüşlerdir. P.X.Yan ve Y.C.Su yaptıkları çalışmalarda[72], farklı yüzey işlemleri uygulanmış orta karbonlu bir çeliğin aşınma özelliklerini incelemişler ve orta karbonlu çeliğe uygulanan borlama işlemlerinin ısılsız işlemsiz malzemeye kıyasla çok daha iyi aşınma direnci sağladığını görmüşlerdir (Şekil 6.9).



Şekil 6.9: Orta karbonlu bir çelikte aşınma direncinin ısılsız işlemsiz(●), B-C nitrasyon uygulanmış(▼) ve geleneksel borlanmış(▽) hallerinin karşılaştırılması [72].

B. Selcuk ve arkadaşları [73] yaptıkları çalışmalarda yüzeylerine farklı tipte ısıtıl işlem yapılmış malzemelerde, belirli bir test yüküne karşılık en düşük sürtünme kuvveti değerlerinin en iyi borlanmış malzemede ortaya çıktığını göstermişlerdir (Şekil 6.10). Moore [74], abrazif aşınma direnci ile sertlik arasında doğrusal bir ilişki olduğunu, ancak malzeme mikroyapısının aşınma dayanımında sertlikten daha fazla bir etkiye sahip olduğunu belirtmektedir.



Şekil 6.10: 1020 ve 5115 çeliklerinde uygulanan yüke karşılık, sürtünme kuvveti profili [73].

6.3.2 Borlama işleminin adhesiv aşınma davranışına etkisi

Vakum altında yapılan aşınma deneylerinde borlanmış çeliklerin nitrürlenmiş ve sertleştirilmiş olanlara kıyasla daha fazla adhesiv aşınmaya maruz kaldıkları gözlenmiştir. Bu deneylerde borlanmış 42CrMo4 çeliği en fazla aşınırken, 145V33 borlandığında aşınma direncinde çok az bir iyileşme gözlenmiştir. Diğer taraftan; X20Cr13 ve molibden'li çelikler daha az bir aşınma göstermişlerdir. Bu durumun borlanmış tabaka içerisinde çözünmüş Cr ve Mo'in adhezyon kuvvetlerini azaltmasından kaynaklandığı ifade edilmektedir. Aşınma deneyleri atmosferik şartlarda yağlamasız yapıldığında; sürtünen yüzeyler arasında triooksidasyon ürünlerinin oluşturduğu bir reaksiyon tabakası gözlenmiştir. Bu tabaka borlanmış tabakaları korurken, nitrürlenmiş tabakaları tahrip etmektedir. Borun oksijene karşı ilgisi yüksek olduğundan borür tabakası üzerinde ince bir oksit filmi oluşur. Bu tabaka metal-metal temasını geciktirir, katı yağlayıcı görevi yaparak sürtünme katsayısını düşürür. Yüzeyin kimyasal bileşimi ve sürtünen yüzeylerin kimyasal kararlılığı eleman çifti arasındaki yüzey çekim kuvvetini azaltır ve dolayısıyla aşınma dayanımını artırır. Borlu tabakaların soğuk kaynak eğilimi düşüktür, ayrıca aşınmayı

önlemek için yağlanmasına gerek yoktur. Bu durum özellikle adhesiv aşınmayı önlemede büyük yarar sağlar. Sürtünme sırasında açığa çıkan ısı yüzeyin yumuşamasına ve termal kararlılığa etki eder. Borlanmış yüzeylerde ise demir-borür fazının ötektik noktası $\approx 1149^{\circ}\text{C}$ olduğunda sertliklerini 1000°C 'ye kadar koruyabilmektedirler. Borlanmış yüzeyde 1000°C 'de 1560 HV sertlik değeri elde edilmiştir. Bu nedenlerle borlanmış yüzeylerde; yüksek parlama sıcaklığına sebep olan yüksek kayma hızlarında dahi adhezyonun artmadığı gözlenmiştir [75]. Eyre [45], karbürleme ve borlama işlemi uygulanmış malzemelerin aşınma davranışlarını karşılaştırmıştır (Şekil 3.10 sayfa 56). Sementasyon işlemi uygulanmış çelikteki (800HV) adhezif aşınma direncinin normalize edilmiş (220HV) EN1A çeliğinden daha iyi olmadığını, dolayısıyla sertlikle adhezif aşınma arasında doğrudan bir ilişki kurulamayacağını, adhezif aşınmanın yüzeyler arasındaki kimyasal uyumsuzlukla ilgili olduğunu belirtmektedir. Eyre [45], borlamanın karbürlemeye özellikle geçiş bölgesi üzerindeki yüklemelerde adhezif aşınma dayanımı açısından çok daha iyi sonuçlar verdiğini ve bu özelliği yüksek sıcaklıklarda dahi muhafaza ettiğini belirtmektedir.

6.3.3 Borlama işleminin kavitasyon-erozyon aşınma davranışına etkisi

Borlanmış X165CrMoV12 çeliğinin kavitasyon direncini belirlemek için yapılan deneylerde borlanmış 2000-2100 HV0,02 yüzey sertliğine sahip numuneler, borlanmamış numunelerle aynı şartlarda titreşimli kavitasyon deneyine tabi tutulmuşlardır. Yapılan deneyler neticesinde; tarif edilen kavitasyon sistemi için 1700 saatlik bir kavitasyon zorlamasına kadar borlanmış numunelerin borlanmamışlara kıyasla yaklaşık 4 kat daha fazla kavitasyon direncine sahip olduğu gözlenmiş olup bu artışın kısa süreli kavitasyon zorlamaları için geçerli olduğu ifade edilmektedir. Uzun süreli bir kavitasyon etkisinde ise yüzey bölgesinden sert borür parçacıklarının mikrojet ve yüksek frekanslı basınç dalgasının etkisi ile mikrobloklar halinde koparılmaya başlaması sonucu kavitasyon direncinin hızla düşmeye başladığı ifade edilmektedir [76]. Hidrolik makinaların klavuzları, klavuz kanatları, halkalı salmastraları, türbin çarkları, pelton nozl ve mızrakları giriş suyu tarafından taşınan her metreküp suda 0,5-5 kg taşınan sert parçaların etkisiyle abrasiv aşınmaya maruz kalırlar. Bu problemin çözümü için, hidrolik türbin parçaları değiştirilir yada nitrürleme, termal püskürtme, borlama gibi yüzey işlemlerine tabi tutulur. Borlama

ile özellikle düşük alaşımlı çeliklerde, Cr-Mo' lı çeliklerde ve Co esaslı alaşımlarda çok etkin bir şekilde aşınmaya dayanıklı yüzeyler elde edilmekte olup, abrasiv aşınmada %400-500'e varan iyileşmeler kaydedilmiştir. Buhar türbin nozüllerinde kullanılan %12 Cr' lu çelik borlandığında aşınmaya karşı diğer bütün kaplama yöntemlerinin üzerinde bir performans sergiler. Malzemelerin kavitasyon direnci; şekil değiştirme derecesine, elastiklik ve sertlik gibi mekanik özelliklere önemli ölçüde bağlıdır. Martenzitik Cr-Ni' li dökme paslanmaz çeliği (13Cr-4Ni) hidrolik türbinlerde pompalarda ve kompresörlerde geniş bir uygulama sahasına sahiptir. Borlu tabakaların kavitasyon direncini tespit etmek amacıyla yapılan deneyde 13Cr-4Ni çeliği 900°C / 6 saat şartlarında borlanılarak 700-750 HV0,01 sertlik değeri ve 30-40 µm tabaka kalınlığını elde edilmiştir. Borlanmış numunelerde borlanmamış numunelere kıyasla 2,5 kat sertlik artışı sağlanmıştır. Döner disk aparatıyla yapılan kavitasyon deneylerinde borlanmış 13Cr-4Ni çeliğinin kötü kavitasyon direnci sergilediği gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak borlanmış yüzeylerin son derece gevrekleşmesi ayrıca yüzeyde genleşme oranının ve de şekil değiştirme enerjisinin son derece azalması gösterilmiştir. Borlamadan sonra sonra 600°C' de 6 saat süreyle yapılan temperleme işlemi, mekanik özellikleri iyileşmenin yanı sıra kavitasyon direncinde de az da olsa iyileşme sağlanmıştır. Ancak sertlik azalmasına sebep olduğu için abrazyum direncinde bir miktar azalma görülmüştür [71].

6.3.4 Borlama işleminin eroziv aşınma davranışına etkisi

Sıcak iş takım çeliği H13 numuneler, 1050°C' de ısıtılarak havada soğutulmuş ve 590°C' de temperlendikten sonra 850°C 'de 2 saat süreyle borlanmıştır. Bu numuneler 20, 200 ve 400°C' de 300 µm tane boyutunda SiC parçacıkları tarafından hava akımında erosiv aşınmaya tabi tutulmuştur. Deney sonucunda borlanmış numunelerin bütün sıcaklıklarda aynı şartlarda deneye tabi tutulan nitrürlenmiş ve Ni-P kaplanmış numunelere nazaran en yüksek erosiv aşınma direnci sergilediği görülmüştür [77]. Bor karbür (B₄C) çeliklerin borlanarak sertleştirilmesinde kullanıldığı gibi sinterlenerek de kullanılabilir. Sinterlenmiş B₄C çok sert olup (35GPa<) yüksek aşınma gerektiren kritik uygulamalarda kullanılmaktadır. Sinterlenmiş B₄C parçalar, SiC parçacıklarından oluşan katı parçacık erozyonu karşısında çok yüksek bir aşınma direnci sergilemektedir.

7. BORÜR TABAKALARININ KOROZYON DAVRANIŞLARI

7.1 Borür Tabakalarının Korozyon Davranışları Hakkında Genel Bilgi

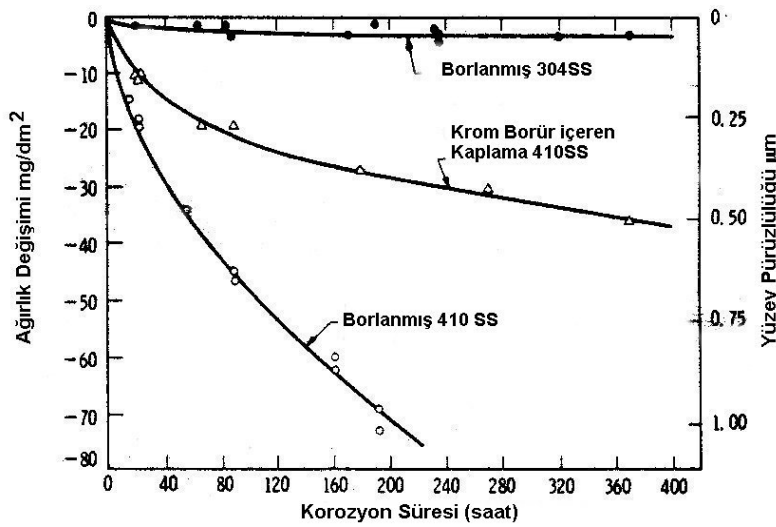
Çevrenin kimyasal ve elektrokimyasal etkilerinden dolayı metalik malzemelerde meydana gelen hasara korozyon denir. Aslında malzemelerin rutubetin veya başka kimyasal bileşenlerin bulunduğu bir ortamla reaksiyona girmeleri korozyon olayını ve kuru hava ile reaksiyona girmelerini oksidasyon olayını meydana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

Demir esaslı malzemelerin borlanması bu malzemelere yüksek korozyon dayanımları sağlamaktadır. Borlama işlemi ile metallere özellikle asidik sıvılar, deniz suyu ve yüksek sıcaklık ortamlarına karşı büyük dayanıklılık sağlanır. Özellikle düşük alaşımlı çeliklerin borlanması HCl, H₃PO₄, H₂SO₄ gibi asitlere karşı oldukça yüksek korozyon direnci sağladığı belirtilmektedir [83].

Yüksek Cr' lu çeliklerde borlama ile koruyucu krom oksit yerine daha az koruyucu olan Cr-borür meydana gelmektedir. Bu bakımdan yüksek alaşımlı malzemelerin borlanmasıyla daha iyi korozyon özelliği her zaman elde edilmeyebilir [1].

S. C. Singhal borlanmış çeliklerin korozyon dirençleri üzerine yaptığı çalışmalarda [32], borlamanın korozyon direncini artırdığı yönünde sonuçlar bulmuştur. 410 ve 203 tipi paslanmaz çelikler üzerinde yaptığı çalışmalarda, malzemelerini 95 °C sıcaklıkta, düşük asitliğe sahip suda bekletmiş, deney sırasında sisteme saf argon gazı göndermiştir. Belli aralıklarla, su oda sıcaklığına soğutulmuş ve örnek çıkartılarak ağırlığı tartılmıştır. Korozyon testinden sonra yapılan metalografik incelemeler göstermiştir ki, kaplama yüzeyinde oluşan porozite ve çatlaklar suyun içeri penetre olmasına neden olmuştur. Bu da ana malzemenin hızlı korozyonuna neden olmuştur. 410 ve 304 tipi paslanmaz çeliklerle yapılan korozyon deneylerinde ise korozyon hızının yavaşladığı ve daha düşük ağırlık kaybının meydana geldiği görülmüştür. 410 çeliğinin 20 saatlik korozyon deneyi sonrası, kaplamada deney sırasında mikro çatlaklar oluşmasından dolayı, ürün olarak kırmızı demir oluşmuştur. Borür

tabakasında Cr miktarı arttıkça korozyon hızında düşme meydana gelmektedir. 304 çeliğinde ağırlık kaybı oldukça az olmuş ve 2500 saatlik deney sonrası malzemede herhangi bir korozyon ürününe rastlanmamıştır. Bunun nedeni 304 çeliğinin korozyona son derece dirençli %18 Cr içeren bir malzeme olmasına dayandırılmıştır[11,32]. Borlanmış malzemelerde oluşturulan borlu tabakanın esas fonksiyonu oldukça sert yüzeyler ile malzemeyi korozyondan korumaktır. Borür tabakalı paslanmaz çeliklerin düşük asitliğe sahip su içersindeki korozyon davranışları Şekil 7.1’de verilmiştir.



Şekil 7.1: Borür tabakalı paslanmaz çeliklerin düşük asitliğe sahip su içersindeki korozyon davranışları [32].

8. BORÜR TABAKALARININ YORULMA DAVRANIŞLARI

8.1 Yorulma Davranışları Hakkında Genel Bilgi

Endüstride kullanılan makina parçaları ve yapı elemanlarından çoğu tekrarlı değişken yüklere ve titreşimlere maruz kalmaktadır. Bu koşullar altında çalışan metalik malzemelerden yapılmış parçalarda, gerilmeler malzemenin akma mukavemetinden küçük olsa dahi, belirli bir titreşim sayısından sonra, yüzeyde bir çatlak oluşur. Çatlağın ilerlemesiyle parçalar kırılır. Meydana gelen bu olay “yorulma” olarak isimlendirilir [3].

Bir malzeme tasarlanırken, malzemenin ekonomik olarak kullanılması da gözönünde bulundurulmalıdır. Bu amaçla, tasarımda düşük güvenlik katsayılarının kullanılması istenir. Bu durumda malzemenin yorulma mekanizmasının bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Çünkü yorulmaya etki eden faktörlerin fazla olması ve uygulamada statik yüklemeye nadir rastlanması nedeniyle, günümüzde meydana gelen hasarların önemli bir kısmı yorulmadan kaynaklanmaktadır. Tablo 1.1 ve Tablo 1.2’de verilen hasar mekanizmaları ile ilgili istatistiksel verilere bakıldığında, malzemenin hasarında yorulmanın büyük bir payı olduğu görülmektedir. Bu nedenle yorulma hasarını önlemeye yönelik çalışmalar yapılagelmektedir [3].

Bilindiği gibi yorulma olayında, çatlak oluşumu genellikle yüzeyde başlar. Yüzeyde başlayan yorulma çatlağı çentik etkisi gösterir. Bu da gerilme konsantrasyonuna ve sonunda çatlağın hızla ilerlemesine yol açar. Bu nedenle malzemenin yorulma dayanımı yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ile artırılır. Yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ile de yüzey çatlaklarının oluşumu engellenmiş olur [3].

Kullanılan malzemenin yüzeyinde yorulma dayanımını artırıcı yüzey tabakasını oluşturmak, temelde iki farklı yolla sağlanabilir. Bunlardan birincisi, malzeme yüzeyindeki mikroyapının ve kompozisyonun, kimyasal, termokimyasal, ısıl işlem ve

mekanik işlemle değiştirilmesi, ikincisi ise yüzeyin farklı bir malzeme ile kaplanmasıdır. Fiziksel buhar biriktirme(PVD), kimyasal buhar biriktirme(CVD), spreyleme ve difüzyon esaslı teknikler bu yöntemlerden sadece bir kaçıdır. Son yıllarda, difüzyon esaslı tekniklerle malzeme yüzeylerine nitrasyon uygulanarak malzemelerin yorulmaya karşı dirençlerinin artırılmasına çalışılmıştır [5].

8.2 Borür Tabakasının Yorulma Davranışına Etkisi

Difüzyon esaslı tekniklerden termokimyasal borlama işlemi ile ilgili bilgiler olmasına rağmen, borlama ile oluşan borür tabakalarının malzemelerin yorulma davranışına etkileri hakkında sınırlı sayıda makale bulunmaktadır.

M. A. Golozar [86], az karbonlu çelikler ile düşük alaşımlı Cr-Mo çeliklerinin yorulma davranışına borlamanın etkisini incelemiştir. Borlamayı kutu borlama yöntemiyle gerçekleştirmiştir. Borlama ortamı olarak %40 borik asit, %6 keriolite, %6 saf alüminyum tozu ve %48 Alümina tozu kullanmıştır. Yorulma deneylerini dönel eğmeli yorulma tipinde gerçekleştirmiştir. Yorulma deneyleri sonucunda, borlanmış az karbonlu çelikler, işlem görmemiş hallerine göre yorulma dayanımları %50 artmasına rağmen, borlanmış düşük alaşımlı Cr-Mo çeliklerinin işlem görmemiş ilk hallerine kıyasla yorulma dayanımları %26 azalmaktadır. Ayrıca, borlanmış tüm numunelerin sertleştirilip temperlendikten sonraki yorulma dayanımları, işlem görmemiş ilk hallerine göre azalma kaydetmiştir.

S.S. Yılmaz [87], borlama ve bilyalı dövmenin demir esaslı T/M malzemelerde yorulma davranışına etkisini incelemiştir. Borlanmış ve bilyalı dövme işleminden sonra borlanmış numunelerin, borlanmamış numunelere kıyasla yorulma dayanımları, sırasıyla, 98, 92 ve 76 MPa olarak gerçekleştiğini bildirmiştir.

9. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çelik malzemelerin yüzeylerinin sertleştirilmesi uygulamaları içerisinde geleneksel nitrasyon, karbonitrasyon prosesleri yanında ileri teknoloji kaplama tekniklerinden CVD, PVD, ark plazma, iyon implantasyon gibi yöntemleri de bulunmaktadır. Borlama termokimyasal işlemi bu prosesler içerisinde önemli yer tutmaktadır. Bu çalışmalar borca dünyanın en zengin ülkesi Türkiye’de bu kaynağın kullanımını yaygınlaştıracaktır. Ülkemizde bu konuda yapılmış çalışmalar olmasına rağmen borlamaya değişik oranlarda banyo katkılarının etkisi üzerine, mekanik ve yorulma özellikleri üzerine kapsamlı çalışmalar bulunmamaktadır. Dünya literatüründe ise daha çok ileri teknoloji yöntemleri ile borlama yapılsa da yeterince önem verilmemiştir. Bu çalışmayla konu ile ilgili bilgi açığı giderilmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmada, AISI 316 L paslanmaz çeliğe çeşitli koşullarda borlama işlemi uygulanmıştır. Borlama işlemlerinin mekanizması tartışılmış, borlama işlemi ile oluşan borür tabakaları çeşitli yönlerden karakterize edilmiş ve özellikleri ortaya konmuştur. Son olarak, borlanan parçaların yorulma deneyleri yapılarak, borlamanın paslanmaz çeliklerin yorulma özelliklerine etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

Termokimyasal borlama işlemi için gerekli bor içerikli maddeler (boraks ve borik asit) ve ferroalaşımlar (ferrosilis ve ferrotitanyum) ve silisyum karbür belli oranlarda karıştırılarak optimum bir banyo bileşimleri tespit edilerek ve ticari ekabor 2 bor banyosu da mevcut banyolarla kıyaslanmak için kullanılarak AISI 316 L tipi paslanmaz çeliklerin yüzeylerine bor içerikli kaplama yapılmıştır. Belirlenen bor içerikli kaplamalar için aşağıda sıralanan deneyler yapılmıştır :

1. Borür tabakasının yüzey karakterizasyon deneyleri :

- a) Işık mikroskobu ile borür tabaka yüzeylerinin karakterinin mikroskobik olarak gözlenmesi ve borür tabaka kalınlıklarının ölçülmesi,
- b) X-ışınları difraksiyon tekniği ile oluşan fazların belirlenmesi,

- c) Yüzey pürüzlülüklerinin belirlenmesi,
- d) Elektron probe mikro analizör (EPMA) ve Taramalı elektron mikroskobu (SEM) çizgi analizi ile borür tabakanın karakterizasyonunun belirlenmesi ve yüzeydeki borür tabakasının kalitatif olarak miktarlarının belirlenmesi,
- e) SEM ve EPMA ile borür tabaka morfolojisinin incelenmesi,

2. Mekanik deneyler:

- a) Çekme deneyi ile mekanik özelliklerin belirlenmesi,
- b) Kalıntı gerilme ölçümlerinin belirlenmesi,
- c) Borür tabakalarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi (Rockwell C Testi),
- d) Borlanan yüzeyin sertlik profilinin çıkarılması,
- e) Sertlik yöntemi ile borlanmış yüzeyin kırılma tokluğunun belirlenmesi,

3. Performans deneyi:

- a) Düzlemsel eğmeli yorulma deneyi,

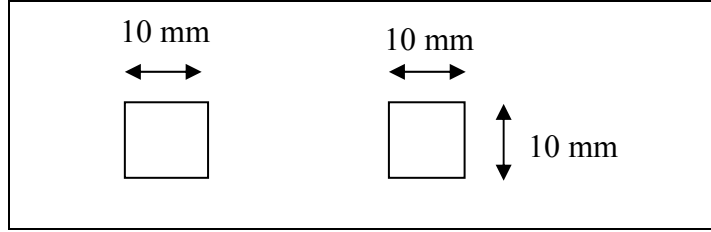
9.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Borlama deneylerinde, sıcak haddelenmiş ve tavlanmış AISI 316 L östenitik paslanmaz çelik kullanılmıştır. Çeliğin bileşimi Çizelge 9.1.'de verilmiştir. Deneyler için, bu paslanmaz çelik lamadan deneysel çalışmalara uygun numuneler çıkarılmıştır. Çalışmalar da kullanılan numunelerin şekli ve boyutları Şekil 9.1, Şekil 9.2 ve Şekil 9.3'de verilmiştir.

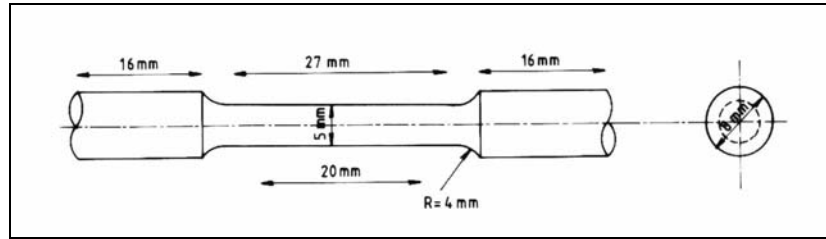
Çizelge 9.1: Deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 316L çelik malzemenin kimyasal bileşimi.

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
% Ağırlık	0,015	0,45	1,5	0,026	0,028	16,98	10,20	2,07	0,07

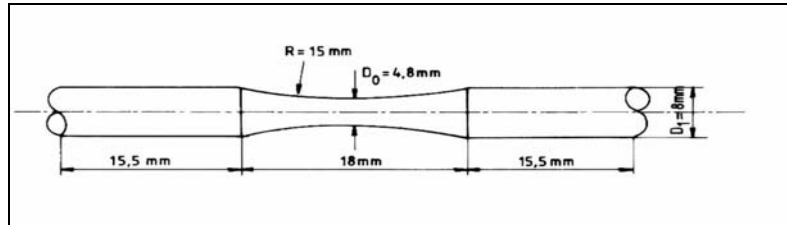
Borlama deneylerinde kullanılan borlama banyolarının hazırlanmasında sulu boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), sulu borik asit (H_3BO_3), ferro-silisyum (%68,05'lik Silisyum), ferro-titanyum (%70,95'lik Titanyum) ve silisyum karbür (%89,9'luk SiC) kullanılmıştır. Ayrıca kıyaslama yapmak amacıyla ticari ekabor 2'de kullanılmıştır.



Şekil 9.1: Borlanmış yüzeylerin karakterizasyonunda, sertlik deneylerinde ve kırılma tokluğu deneylerinde kullanılan numunelerin şekli ve boyutları.



Şekil 9.2: ASTM E 8M standartına göre hazırlanmış çekme deney numunesinin şekli ve boyutları.



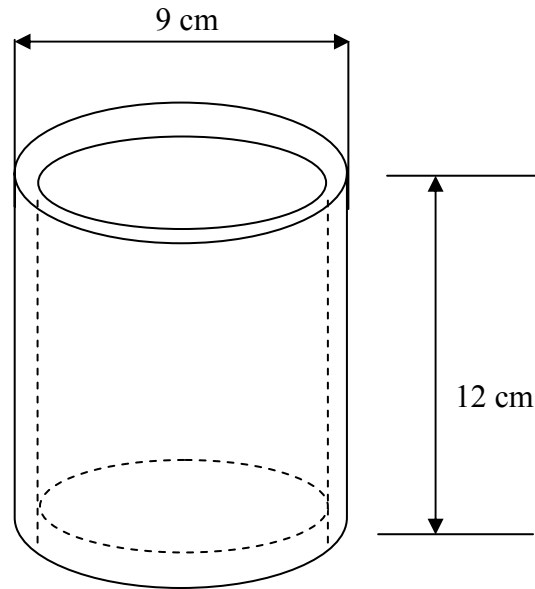
Şekil 9.3: Yorulma deneyi numunesinin şekli ve boyutları.

9.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Borlama işlemlerinde atmofer kontrollü Heraeus marka elektrik direnç fırını kullanılmıştır. Fırının sıcaklık hassasiyeti ± 5 °C'dir. Deneyler argon gazı atmosferinde yapılmıştır. Borlama işleminde, pota olarak AISI 304 paslanmaz çelik potalar kullanılmıştır. Kullanılan potanın boyutları Şekil 9.4'de verilmiştir.

Örneklerin incelenmesinde clemex image analiz programına sahip bilgisayar kontrollü Nikon Epiphot 200 marka ışık mikroskobu (OM) kullanılmıştır. X-ışınları

analizleri PHILIPS PW 3710 marka x-ışınları difraktometresi ve JADE Materials Data XRD Pattern Processing V5.0.2195(2) Service Pack 2 ve ICDD veri tabanı ile çalışılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü Mitutoyo Corporation SurfTest SJ Series 201 yüzey profilometre cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Kalıntı gerilme analizleri XSTRESS 3000 X-ray stres analyzer cihazı ile yapılmıştır. Borür tabakalarının özelliklerinin incelenmesi için Wolpert testor Amsler tipi Rockwell C sertlik deney cihazı, Nikon SMZ 1000 stereo mikroskop (SM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Elektron probe mikro analizör (EPMA) cihazı ile İkincil elektron (SE, Secondary Electron) ve Geri saçılan elektron (BSE, Back Scattered Electron, görüntüleri, X-ışınları haritalaması ve borür tabakasının kimyasal kompozisyonunun belirlenmesi çalışmaları yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu çalışmaları (SEM) ve elementel yayınma spektrometrik (EDS) analizleri; JEOL JSM T-330 scanning electron microscope ve JOEL-JSM5410 scanning electron microscope cihazında yapılmıştır. Çekme deneyleri, Zwick 400N marka çekme cihazında yapılmıştır. Mikrosertlik ve kırılma tokluğu ölçümleri Future Tech FM 700 marka mikrosertlik cihazında Vickers ucu kullanılarak yük altında gerçekleştirilmiştir. Yorulma deneyleri 15,1 Hz frekans' da, -1 gerilme oranında, düzlemsel eğme gerilmesi uygulanarak yorulma deneyi cihazında yapılmıştır.



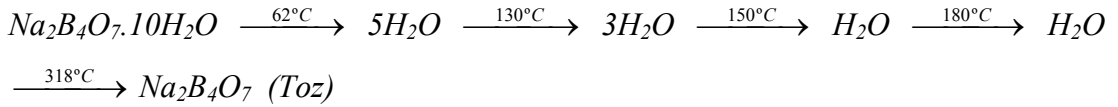
Şekil 9.4: Borlama deneyinde kullanılan AISI 304 paslanmaz çelik potanın geometrik şekli ve boyutları.

9.3 Deneylerin Yapılışı

9.3.1 Borlama banyosunun hazırlanması

Bu çalışmada klasik borlama banyosu olarak farklı oranlarda kalsine boraks ve borik asit karışımları düşünülmüştür. Borlama çalışmaları, bu banyoya farklı oranlarda FeSi, FeTi ve SiC ilaveler yapılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kıyaslama yapmak amacıyla ticari ekabor 2’de borlama banyosu olarak kullanılmıştır.

BORAKS ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) : Etibank’ın Bandırma Boraks Fabrikalarından temin edilen ticari saflıktaki sulu boraksın 250 °C sıcaklıkta bir saat bekletilmesinden sonra, 550 °C’de 4 saat tutularak kristal suyu uçurulmuştur. Kristal suyu uçurulan boraks, borlama banyosu hazırlama işlemleri öncesi etüvde 100 °C’de 12 saat kurutularak kullanılmıştır. Oda sıcaklığında stabil olan boraks, kuru ortamda sürekli su kaybeder ve mat bir renk alır. Boraksın ısıtılması esnasında dehidratasyon aşağıdaki gibi olmaktadır[1].



Boraksın ergime noktası 741 °C’dir. Kimyasal formülü $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ olan boraks, teorik olarak % 36,52 B_2O_3 , %16,25 Na_2O ve %47,23 H_2O içermektedir. Yoğunluğu 1,73 gr/cm³’tür.

BORİK ASİT (H_3BO_3): Borik asit teorik olarak %56,3 B_2O_3 içermektedir. Yoğunluğu, 1,51 gr/cm³’tür. Deneysel çalışmalarda kullanılan kalsine borik asit 75 °C’de 2 saat bekletilmesinin ardından 300 °C’ye yavaş şekilde ısıtılması ile elde edilmiş ve bu sıcaklıkta 1 saat bekletilmiştir. Daha sonra 450 °C civarındaki sıcaklıkta ergitildikten sonra aniden havada soğutularak camsı borik asit haline getirilmiştir.

FERRO-SİLİSYUM : Ticari saflıkta olan ferro-silisyum kimyasal bileşimi %68,05 Si, %0,20 C, %1,18 Al, %0,026 P, %0,023 S ve gerisi demirden ibarettir.

FERRO-TİTANYUM: Ticari saflıkta olan ferro-titanyum kimyasal bileşimi %70,95 Ti, %0,126 C, %3,69 Al, %0,008 P, %0,004 S ve gerisi demirden ibarettir.

SİLİSYUM KARBÜR: Ticari saflıkta olan silisyum karbürün kimyasal bileşimi %80,9 SiC, %2,34 C, %0,8 Fe₂O₃, %6,4 SiO₂+Si, %0,23 Al₂O₃, %0,04 CaO ve gerisi demirden ibarettir.

Kalsine boraks, kalsine borik asit ve ilave edilen katkı (FeSi, FeTi ve SiC) öğütülerek 100 mesh elek altı tane boyutuna getirilmiştir. Daha sonra kalsine boraks, kalsine borik asit ve ilave edilen katkı (FeSi, FeTi veya SiC) tozları homojen olarak karıştırılmıştır. Böylece homojen bir karışım için ergitme işlemi sırasında yapılması gereken karıştırma işlemine gerek kalmamıştır. Ticari ekabor 2 ise toz olarak olduğu gibi kullanılmıştır.

9.3.2 Borlama işlemlerinin yapılması

Deneylerde kullanılan çeliklerden hazırlanan numuneler, 1000 grid'lik zımpara ile yüzeyleri zımparalanmış, alümina ile parlatılmış ve borlama öncesi alkolle temizlenmiştir. Bu numuneler, farklı borlama banyolarını oluşturan tozları bulunduran borlama potalarına yerleştirilmiştir.

950 °C işlem sıcaklığına getirilen atmosfer kontrollü fırına borlama banyosu ve numuneler bulunduran bu potalar yerleştirilmiştir. Deneyler 6 saat sonunda tamamlanmıştır. Bu borlama işlemleri, bazı numuneler için 850 ve 1050°C işlem sıcaklıklarında da yapılmıştır.

Ayrıca, seçilmiş banyo bileşimleri ile bazı numuneler 850-950 ve 1050°C'de 2-4-6 ve 8 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Çizelge 9.2'de borlama işlemlerinin programı verilmiştir.

Borlama işlemi sonrasında numuneler oda sıcaklığına kadar havada soğutulmuştur. Borlama sonrası numune yüzeyinde kalan kalıntılar kaynayan sıcak suda bekletilerek çıkarılmışlardır. Daha sonra numuneler alkol içerisinde 15 dakika süre ile ultrasonik olarak temizleme işlemine tabi tutulmuşlardır.

Çizelge 9.2: Borlama işlemlerinin programları.

Borlama Deney Grubu	% Borlama Banyosunun Bileşenleri			Borlama Koşulları		Borlanmış Numunelere Uygulanan Testler
	Kalsine Boraks, gr	Kalsine Borik Asit, gr	Katkılar, (FeSi, FeTi, SiC), gr	Sıcaklık, °C	Süre, Saat	
1	95	0	5	950	6	*
2	90	5	5	950	6	*
3	85	10	5	950	6	*
4	80	15	5	950	6	*
5	75	20	5	950	6	*
6	70	25	5	850, 950, 1050	2, 4, 6, 8	**
7	65	30	5	950	6	*
8	80	0	20	850, 950, 1050	6	*
9	75	5	20	850, 950, 1050	6	*
10	70	10	20	850, 950, 1050	6	*
11	65	15	20	850, 950, 1050	6	*
12	60	20	20	850, 950, 1050	2, 4, 6, 8	**
13	55	25	20	850, 950, 1050	6	*
14	50	30	20	850, 950, 1050	6	*
15	70	0	30	850, 950, 1050	6	*
16	65	5	30	850, 950, 1050	6	*
17	60	10	30	850, 950, 1050	6	*
18	55	15	30	850, 950, 1050	2, 4, 6, 8	**
19	50	20	30	850, 950, 1050	6	*
20	45	25	30	850, 950, 1050	6	*
21	40	30	30	850, 950, 1050	6	*

* Tabaka kalınlığı ölçümleri, sertlik ölçümleri

** Tabaka kalınlığı ölçümleri, faz analizi, yüzey pürüzlülüğü, kalıntı gerilme, yapışma özellikleri, EPMA incelemeleri, SEM incelemeleri, çekme deneyleri, yüzey sertliği ve sertlik profilinin çıkarılması, sertlik yöntemiyle kırılma tokluğu deneyleri, kinetik çalışmalar, yorulma deneyleri

9.3.3 Borür tabakaların karakterizasyon deneyleri

Borlama işlemine tabi tutulan numunelerden metalografik inceleme için hazırlanmış olan numuneler dikdörtgen kesite sahip yüzeyleri görünecek şekilde bakalite alınmıştır. Öncelikle bu yüzeyle 60 grid'lik SiC zımpara ile belli bir derinliğe kadar aşındırılmışlardır. Daha sonra 80, 120, 180, 240, 320, 600, 800, 1000 ve 1200 grid'lik zımparalama işleminden sonra önce alümina pasta sonra 1 µm elmas pasta ile parlatma işlemine tabi tutulmuşlardır. Metalografik olarak parlatılmış yüzeyler Kalling tipinde dağlayıcı ile dağlanarak mikroyapılar ortaya çıkarılmıştır. Bunun yanında borlanmamış paslanmaz çelik altlığın fotoğrafı çekilmiştir. Borlama deneyi sonrası, metalografik olarak hazırlanmış numunelerin kaplama yüzeylerinin karakterinin mikroskopik olarak gözlenmesi ve kaplama kalınlıklarının ölçülmesi için clemex image analiz programına sahip bilgisayar kontrollü Nikon Epiphot 200 marka optik mikroskobu kullanılmıştır. Borür tabaka kalınlığı, borlama için geliştirilmiş tabaka kalınlığı belirleme yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Tabaka kalınlığı olarak en dış yüzeyden uç kısmına kadar olan bölge seçilmiş ve tabaka kalınlıkları 10 ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir. Borür tabaka kalınlığının kinetik açıdan incelenmesi sırasında, borun borür yapısı içindeki difüzyon katsayısının hesaplanması için ilk olarak Brakman [25] tarafından geliştirilen ve Fick kanunun özel bir çözümü olan Eşitlik 9.1'den faydalanılmıştır. Burada atomların yer değiştirme eğilimi için bir ölçü olan yayınma katsayısı (D) ile sıcaklık arasında üstel bir ilişki mevcuttur. Yayınma katsayısı malzemeye özgü bir değer olup yayınmanın hızını da belirleyen faktördür.

$$d^2 = D \cdot t \quad (9.1)$$

Burada ; d = Tabaka Kalınlığı (cm), D = Difüzyon Katsayısı (cm²/sn), t = süre (sn)

Kaplama tabakasının oluşumu için gerekli Aktivasyon Enerjisi (Q) ve Frekans Faktörü değerleri (Do) ARRHENIUS bağıntısından bulunmuştur (Eşitlik 9.2).

$$D = D_o e^{(-Q/RT)} \quad (9.2)$$

D = Difüzyon Katsayısı (cm²/sn), Do = Frekans Faktörü (cm²/sn), Q = Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol), R = Gaz Sabiti (8,30566 j/mol °K) , T = Sıcaklık (°K)

Hesaplamalar sonucunda Banyo bileşiminde (Boraks ve Borik asit) farklı oranlardaki katkılarla (%5,3, %25 ve %42,9 FeSi, %5,3, %25 ve %42,9 FeTi, %5,3, %25 ve %42,9 SiC) ve ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin borür tabaka kalınlığına bağlı olarak borür tabakası oluşumu için gerekli olan aktivasyon enerjisi değerleri ve borun difüzyon katsayısı değerleri bulunmuştur.

Borlama işlemi uygulanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan fazların tayininde X-ışınları difraksiyon analizi (XRD) tekniği kullanılacaktır. PHILIPS PW 3710 marka x-ışınları difraktometresi ve JADE Materials Data XRD Pattern Processing V5.0.2195(2) Service Pack 2 ve ICDD veri tabanı ile çalışılmıştır. Analiz sırasında Co K α ($\lambda = 1,79021 \text{ \AA}$) ışın demeti ve 2θ ($10-90^\circ$) açıları kullanılmıştır.

Yaklaşık olarak $R_a \approx 0,09 \text{ \mu m}$ yüzey pürüzlülüğüne sahip numunelerin borlanmasının ardından borlanmış yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü değişimini gözlemek amacıyla, “Mitutoyo Corporation SurfTest SJ Series 201” yüzey profilometre cihazı kullanılarak, borlanmış yüzeylerin R_a pürüzlülük değerleri ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Ortalama pürüzlülük değerini veren R_a ; pürüzlülük profil alanının aritmetik ortalaması olarak tanımlanmaktadır (DIN 4762, DIN 4768 ve ISO 4287/1). R_a değeri yüzey profilinin şekli açısından herhangi bir bilgi vermemesine rağmen yüzey pürüzlülüğünün gerçek büyüklüğünü belirlemek için en çok kullanılan yüzey parametresidir. Elektron probe mikro analizör (EPMA) cihazı (Şekil 9.5) ile borür tabakasının SE (Secondary Electron) ve BSE (Back Scattered Electron) görüntüleri, borür tabakasının X-ışınları haritası ve borür tabakasının yarı kantitatif kimyasal kompozisyonu (EDS analizi) belirlenmiştir. SEM incelemelerinde borlanmış numunelerden geri saçılan elektron görüntüleri ve ikincil elektron görüntüleri çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 9.5: EPMA cihazının görünümü.

9.3.4 Mekanik deneyler

Borlanmış tabakaların Mekanik deneylerinden Çekme deneyleri, Şekil 9.2’de görülen ASTM E8M standardına uygun boyutlarda hazırlanmış numuneler kullanılarak, Şekil 9.6’da görülen Zwick 400N marka çekme cihazında yapılmıştır. Borlanmış ve borlanmamış numune üzerinde $L_0 = 5d_0$ olacak şekilde ilk ölçü uzunluğu alınmıştır. Her koşul için en az 4 deney yapılmıştır.



Şekil 9.6: Zwick 400N marka çekme-basma cihazının görünümü.

Borlama işlemi uygulanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan kalıntı gerilmelerin tayininde X-ışınları difraksiyon analizi (XRD) tekniği kullanılmıştır. XSTRESS 3000 G2/G2R X-ray stress analyzer cihazı ve software user’s guide X3000 V1,22a veri tabanı ile çalışılmıştır (Şekil 9.7). Analiz sırasında $\text{CrK}\alpha$ ($\lambda = 0,22897 \text{ \AA}$) ışın demeti ve 2θ ($156,4^\circ / 211^\circ$) açıları kullanılmıştır.



Şekil 9.7: XSTRESS 3000 G2/G2R X-ray stress analyzer cihazının görünümü.

Tabakanın mekanik özelliklerinin saptanmasında Rockwell C sertlik izi testi uygulanır. Endüstride yaygın olarak kullanılan indentasyon deneyleriyle tabakanın

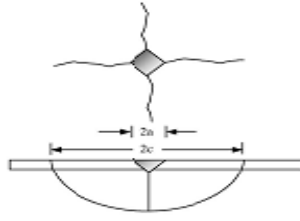
mekanik özellikleri hakkında hızlı ve güvenilir biçimde bilgi sahibi olunur. Bu yöntemde, Wolpert testör Amsler tipi Rockwell C sertlik deney cihazı kullanılarak oluşturulan iz kenarlarındaki yüzey hasarı görüntü analiz sistemli Nikon Epiphot 200 marka OM, Nikon SMZ 1000 SM’da ve SEM’den faydalanılarak icra edilmiştir. Bu incelemenin yanısıra taramalı elektron mikroskobu ile Rockwell C izleri ve etrafındaki çatlaklar ve borür tabakasında meydana gelen plastik deformasyon izleri incelenmiştir.

Borlanmış numunelerin borür tabakalarının ve matrisin sertlik dağılımları Future Tech FM 700 marka mikrosertlik cihazında Vickers ucu kullanılarak 10 gr yük altında gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçme işlemleri yüzeyden itibaren matrise kadar belirli mesafelerde yapılmıştır. Bu şekilde yüzeyden itibaren matrise kadar, sertlikteki değişim kullanılan banyo bileşimlerine, borlama sıcaklığına ve süreye bağlı olarak tespit edilmiştir. Sertlik taramaları, tüm sıcaklık ve süre için yapılmıştır.

Kırılma tokluğu ölçümlerinde, Future Tech FM 700 marka mikrosertlik cihazında Vickers ucu kullanılarak 50 – 300 gr. yük altında gerçekleştirilmiştir. Klasik kırılma tokluğu deneyleri, oldukça büyük olan ve plastik davranış gösteren malzemelere uygulanmaktadır. Bu amaçla özellikle camlar ve seramikler gibi gevrek karakterli malzemelerin kırılma toklukları “İndentasyon Kırılma Tokluğu” deneyleri ile tespit edilir. Bir malzemenin kırılma tokluğu; uygulanan yüke, çatlak boyuna ve numunenin geometrisine bağlıdır [84]. İndentasyon deneyi metodu ilk olarak 1957 yılında Palmquist tarafından WC+Co gibi sermet malzemelere uygulanmıştır. Bu yöntem daha sonraları Lawn ve arkadaşları tarafından daha da geliştirilmiştir [1]. Bu çalışmada aşağıdaki ampirik formül (Eşitlik 9.3) kullanılarak “İndentasyon Tekniği” ile kırılma tokluğu tayin edilmiştir. İndentasyon tekniği ile kırılma tokluğunu belirlenmesinin prensibi, belirli yükler altında oluşturulan izle, bu izlerin köşegenleri boyunca meydana gelen çatlakların boylarının belirlenmesi esasına dayanır [84] (Şekil 9.8).

$$Kc = \delta (E/H)^{1/2} (P/c^{3/2}) \quad (9.3)$$

Burada; E : Borlanmış Tabakanın Elastisite Modülü (kg/mm²), H : Tabakanın Sertliği (HV), P : Uygulanan Yük (N), c : Çatlak yarı boyu (mm), δ : Geometrik faktörü ifade etmektedir. Kırılma tokluğu hesaplamalarında geometrik faktör, Anstis bağıntısına göre $0,016 \pm 0,004$ olarak alınmıştır [118].



Şekil 9.8: Vickers ucu ile oluşturulan izin şematik gösterimi [84].

9.3.5 Performans deneyi

9.3.5.1 Düzlemsel eğmeli yorulma deneyi

Yorulma deneyleri Şekil 9.9’ da görülen yorulma deneyi cihazında yapılmıştır. Cihazın sabit deney frekansı 15,1 Hz’dir. Yorulma deneylerinde numunelere eğme gerilmesi uygulanmıştır. İstenen gerilme değerini elde etmek için numuneye uygulanması gereken moment;

$$\sigma = (32.M) / (\pi.D^3) \quad (9.4)$$

eşitliği hesaplanmaktadır. Burada; M= Eğme momenti (N.m), σ = Eğme gerilmesi (MPa), D = Numune çapı (mm) olarak tanımlanmıştır. Deneylerde gerilme oranı $R= -1$ ($|\sigma_{\min}|/|\sigma_{\max}|$) olarak seçilmiş ve tüm borlanmamış ve banyo bileşimine (kalsine boraks ve kalsine borik asit) katkıların (%25 FeSi, %25 FeTi ve %25 SiC) ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış 316 L paslanmaz çelik numuneler için sabit tutulmuştur. Değişik gerilme seviyelerinde deneyler yapılmış ve numunelerin kırılıncaya kadarki çevrim sayısı kaydedilmiştir. Deney sonrasında numunelerin kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir.



Şekil 9.9: Yorulma deneylerinin yapıldığı yorulma cihazının görünümü.

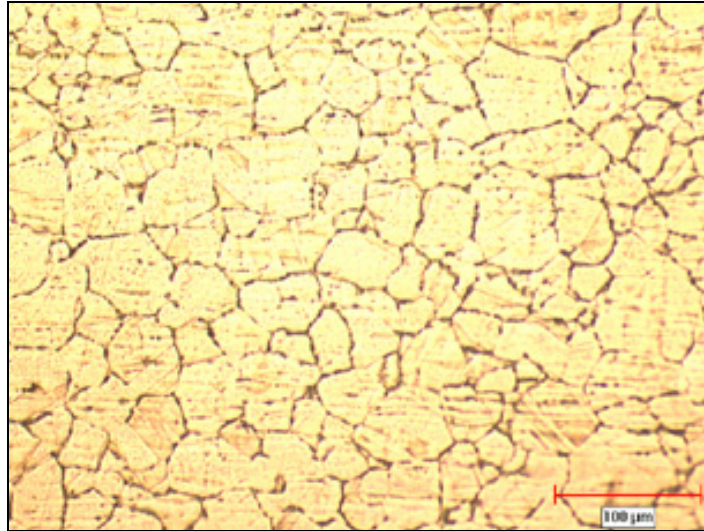
10. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEMELER

10.1 Borür Tabakasının Yüzey Karakterizasyon Deney Sonuçları

10.1.1 Metalografik incelemelerin sonuçları

10.1.1.1 Farklı banyo bileşimlerinin borür tabakası kalınlığına etkisi

Borlama işlemlerinde kullanılan AISI 316 L tipi paslanmaz çelik numenin mikroyapısı Şekil 10.1’de verilmiştir. Bu çeliğin üç farklı tipteki borlama banyosu ile 950 °C işlem sıcaklığında atmosfer kontrollü fırında 6 saat süre ile borlanması işlemi sonrasında oluşan borür tabakalarının kalınlıkları Çizelge 10.1, B.10.1 ve B.10.2’de verilmiştir.

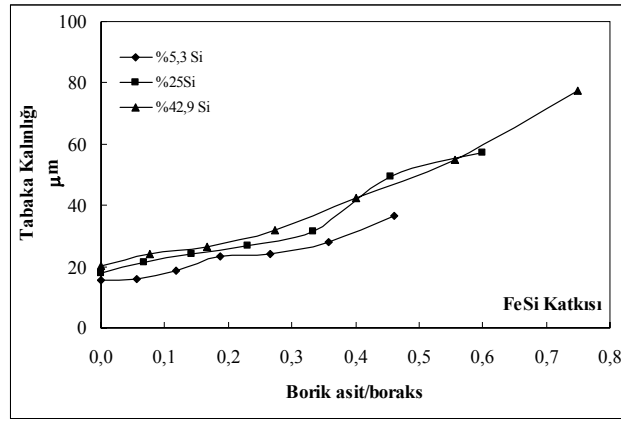


Şekil 10.1: AISI 316L paslanmaz çelik numunenin mikroyapısı.

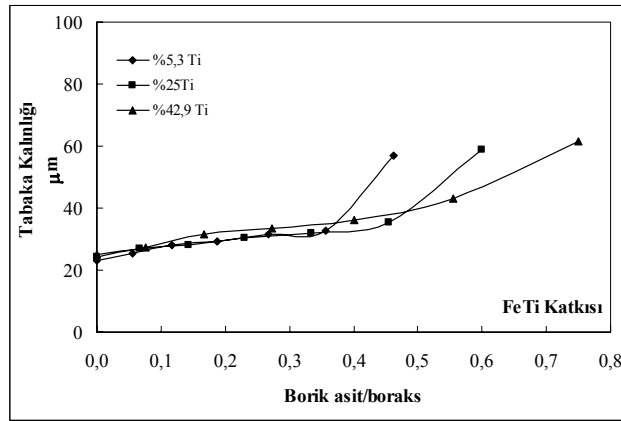
Çizelge 10.1: 316 L tipi paslanmaz çeliğin 950 °C’de 6 saat süreyle farklı borlama banyolarında borlanmasıyla elde edilen borür tabaka kalınlıkları.

Banyo No	% Banyo Bileşenleri				Bileşenler Oranı		Tabaka Kalınlığı, μm
	Kalsine Boraks, gr	Kalsine Borik Asit, gr	FeSi, gr	Boraks ve Borik Asit banyosuna FeSi katkısının oranı, %	FeSi / Kalsine Boraks	Kalsine Borik Asit / Kalsine Boraks	
1-1	95	0	5	5,3	0,1	0,0	15,50
1-2	90	5	5	5,3	0,1	0,1	16,14
1-3	85	10	5	5,3	0,1	0,1	18,71
1-4	80	15	5	5,3	0,1	0,2	23,52
1-5	75	20	5	5,3	0,1	0,3	24,13
1-6	70	25	5	5,3	0,1	0,4	27,87
1-7	65	30	5	5,3	0,1	0,5	36,75
1-8	80	0	20	25	0,3	0,0	18,08
1-9	75	5	20	25	0,3	0,1	21,55
1-10	70	10	20	25	0,3	0,1	24,13
1-11	65	15	20	25	0,3	0,2	27,04
1-12	60	20	20	25	0,3	0,3	31,58
1-13	55	25	20	25	0,4	0,5	49,37
1-14	50	30	20	25	0,4	0,6	57,22
1-15	70	0	30	42,9	0,4	0,0	20,26
1-16	65	5	30	42,9	0,5	0,1	24,12
1-17	60	10	30	42,9	0,5	0,2	26,43
1-18	55	15	30	42,9	0,5	0,3	31,73
1-19	50	20	30	42,9	0,6	0,4	42,36
1-20	45	25	30	42,9	0,7	0,6	55,03
1-21	40	30	30	42,9	0,8	0,8	77,55

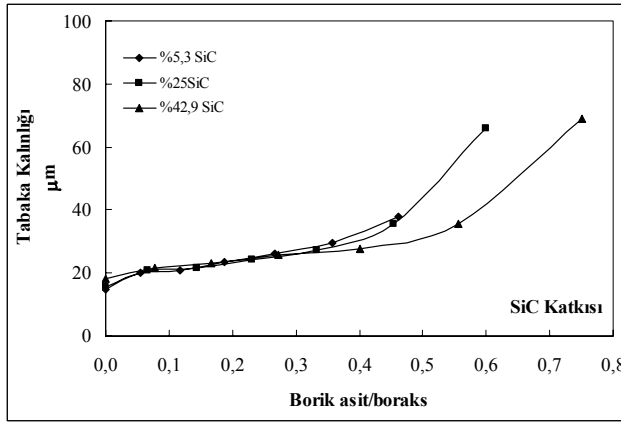
Şekil 10.2’de borlama ile oluşan borür tabakası kalınlığının borik asit / boraks oranı ile değişimine banyoya yapılan çeşitli katkıların etkileri verilmiştir. Şekil 10.2’den görüldüğü gibi borlama banyosuna yapılan katkıların (FeSi, FeTi ve SiC) oranının artmasıyla borür tabakasının kalınlığı artmaktadır. Ancak, katkılarının oranının artmasıyla banyo akışkanlığında azalma gözlenmiştir. Özellikle, katkıların oranı %25’i geçtiğinde çalışma şartları zorlanmakta, numuneye yapışmalar artmaktadır. Kalsine borik asit / boraks oranının artmasıyla borür tabakasının kalınlığının arttığı Şekil 10.2 ve 10.3’de verilmiştir.



(a)



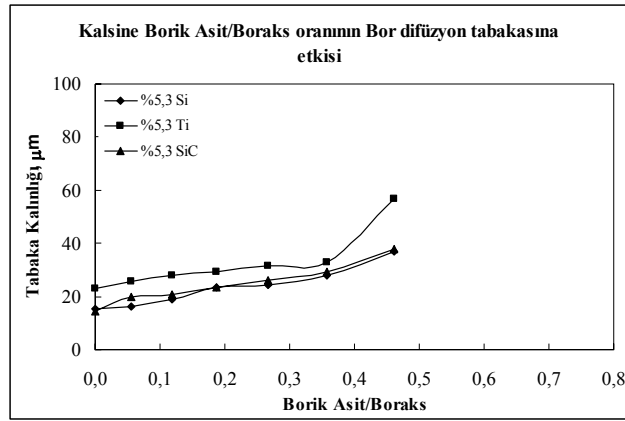
(b)



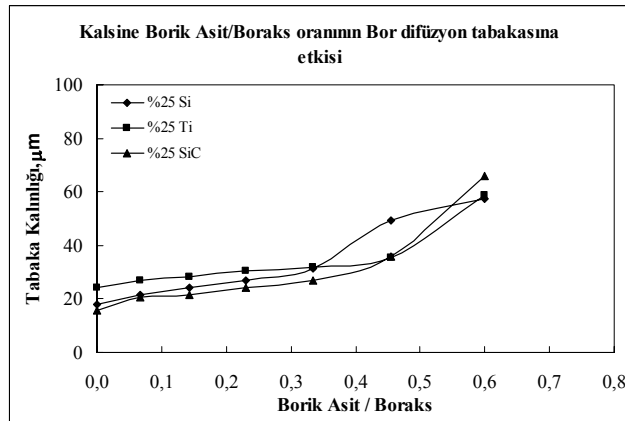
(c)

Şekil 10.2: Borlama banyosuna değişik oranlarda yapılan katkıların borür tabakası kalınlığına etkisi (a) FeSi, (b) FeTi, (c) SiC.

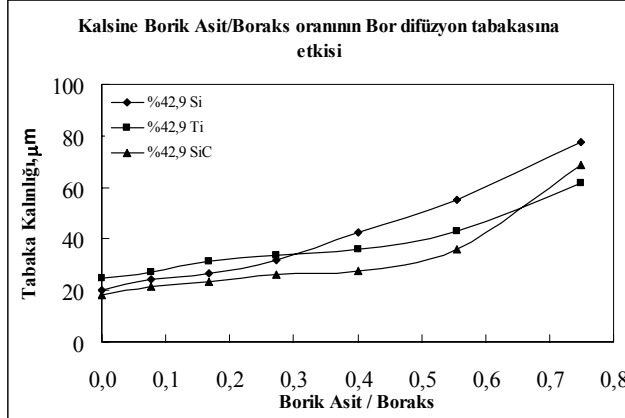
Borür tabaka kalınlığının artışı, banyoya yapılan katkıların etkisinde, borlama banyosundaki kalsine borik asit oranının etkisinin görülebilmesi için, her üç katkı ile hazırlanan borlama banyosu ile yapılan borlama ile elde edilen borür tabakasının kalınlığının borik asit oranıyla değişimine ilişkin olarak hazırlanan grafikler Şekil 10.4' de verilmiştir.



(a)



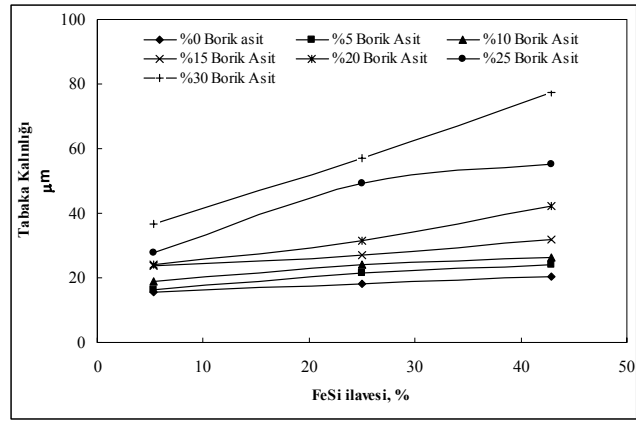
(b)



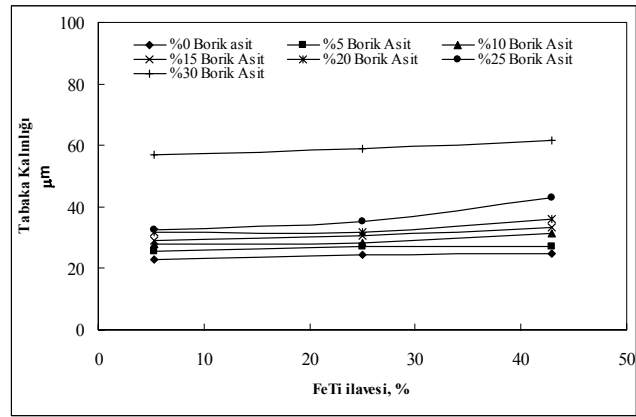
(c)

Şekil 10.3: Borlama banyosuna aynı oranlardaki katkıların borür tabakası kalınlığına etkisi (Oranlar: a: %5,3; b: %25; c: %42,9).

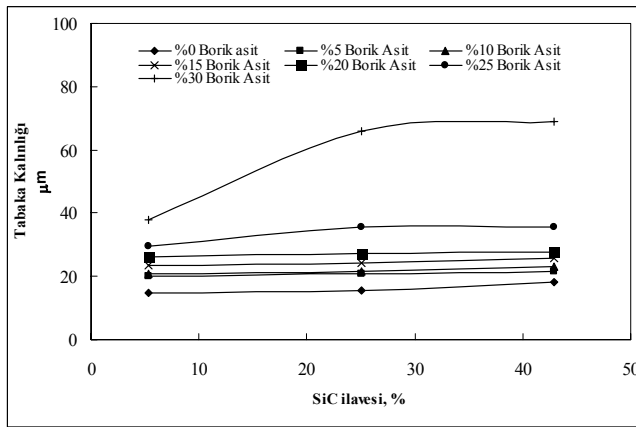
Şekil 10.4'den görüldüğü gibi kalsine borik asit oranının artması, katkıların artışıyla artan borür tabaka kalınlıklarını arttırmaktadır. Deneysel çalışmada, sistemdeki kalsine borik asit ilavesinin banyonun akışkanlığına olumlu katkıda bulunduğu gözlenmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 10.4: Kalsine borik asitin borür tabakasının kalınlığına etkisi (a) FeSi, (b) FeTi, (c) SiC.

Borlama banyosundaki kalsine borik asit oranının %0'dan %30'a artmasıyla, elde edilen borür tabaka kalınlıkları;

%5,3 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarında sıra ile 2,37, 2,48 ve 2,58 kat

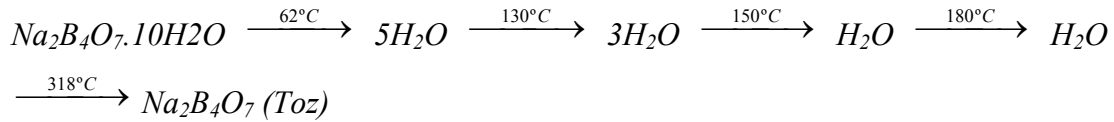
%25 oranlarında yapılan katkılarla tabaka kalınlıkları aynı sıra ile 3,17, 2,42 ve 4,23 kat

%42,9 oranlarında yapılan katkılarla tabaka kalınlıkları aynı sıra ile 3,83, 2,48 ve 3,79 kat artmaktadır.

Borik asit oranının artışıyla borür tabakası kalınlığındaki artış; akışkanlığın artması ile borlanan numune yüzeyi – bor banyosu arayüzeyindeki konsantrasyon farkının azalmasından meydana gelmektedir.

10.1.1.2. Borür tabakası oluşumunun termodinamiği

Borlama banyosundaki ortamın esas bileşeni susuz borakstır. Kalsine boraks; ticari saflıktaki sulu boraksın 250 °C sıcaklıkta bir saat bekletilmesinden sonra, 550 °C’de 4 saat tutularak kristal suyu uçurulmuş halidir. Kristal suyu uçurulan boraks, borlama banyosu hazırlama işlemleri öncesi etüvde 100 °C’de 12 saat kurutularak kullanılmıştır. Boraksın ısıtılması sırasında dehidratasyon gerçekleşir [1].



Borlama, sıvı ortamda gerçekleştirilmektedir. Boraksın ergime sıcaklığı 741 °C’dir. Deneysel çalışmada, borlama işlemi, 850, 950 ve 1050 °C’de 2, 4, 6, 8 saat süre ile gerçekleşmiştir.

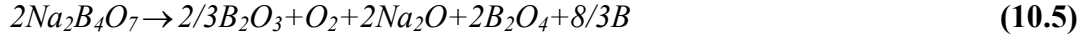
Na₂B₄O₇ ürünü sıcaklık etkisiyle ;



Parçalanma reaksiyonları ve devamında da



reaksiyonları gerçekleşmektedir [89]. Bu reaksiyonlar sonunda (B⁺¹) amorf yapıda bor iyonu oluşur. Ancak, toplam reaksiyonlar sonunda, Na₂O ile birlikte metalik hale gelmemiş bor oksitler de kalır.



Banyodaki amorf yapıda bor konsantrasyonunu artırmak için kalan bu bor oksitlerin redüklenmesi ve ortamın redükleyici yapılması gerekir. Çalışmamızda bu amaçla, redükleyiciler olarak FeSi, FeTi ve SiC kullanılmıştır. Bu katkılarla oluşturulan banyolarda gerçekleşen temel reaksiyonlar aşağıdaki gibidir [90, 113].

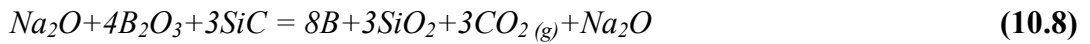
Boraks+Borik Asit ve FeSi:



Boraks+Borik Asit ve FeTi:



Boraks+Borik Asit ve SiC:

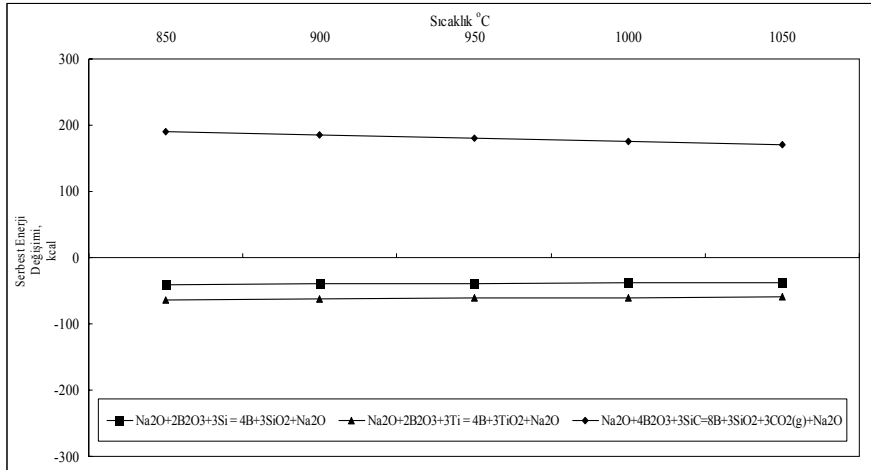


S. Şen [113], Tuz banyosunda aktif bor atomlarının (10.6, 10.7, 10.8) taban malzemedeki temel metal atomlarıyla reaksiyona girdiğinde 10.9 ve 10.10 'daki denklemlerin oluştuğunu bildirmiştir.

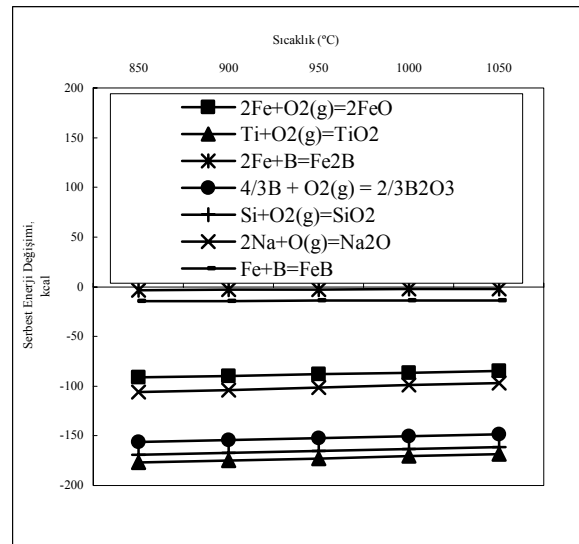


Borlama banyosuna yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkıları; oranlarına ve sıcaklığa bağlı olarak borür tabakası kalınlıklarında benzer etkiler göstermektedirler. Oranlar arttığında ve sıcaklık yükseldiğinde borlama işleminde oluşan borür tabakası kalınlıkları artmaktadır. Borür tabakasının kalınlığı banyoda reaksiyonlar sonucu oluşan serbest B miktarı ile ilişkilidir. En büyük kalınlık artışını banyodaki FeTi sağlamıştır. Bunun nedeni; tartışılan borlama reaksiyonları arasında Ti ile gerçekleşen reaksiyonun en düşük serbest enerjiye sahip olmasıdır. Si ve SiC ile gerçekleşen reaksiyonların serbest enerjileri daha yüksektir. Serbest enerjideki bu farklılıkları gösteren HSC3 programı kullanılarak reaksiyonların grafiği Şekil 10.5 ve 10.6'da verilmiştir.

Termodinamik analizler, banyodaki bileşenlere göre, ancak oksijensiz ortamlarda oluşan reaksiyonlarla demir borür tabakasının oluşabileceğini göstermektedir. Sistemde oksijen varsa metalik B, öncelikle B_2O_3 şeklinde oksitlenir. Sistemdeki oksijen, sistemde bulunan sırayla Ti, Si, Na ve Fe ile tercihli olarak reaksiyon verir. Sistemde metalik Ti ve Si var iken B'nin oksijenle B_2O_3 oluşturması termodinamik olarak daha zordur.



Şekil 10.5: Borlama reaksiyonlarının sıcaklıkla serbest enerji değişim grafiği.



Şekil 10.6: Borlama prosesinde izlenen reaksiyon ürünlerinin sıcaklıkla serbest enerji değişim grafiği.

Borür tabakaları, Fe_2B ve / veya FeB şeklinde oluşabilir. Bu iki fazın oluşum serbest enerjileri sıfır (0)'a yakın değerlerdedir ve FeB 'nin oluşum serbest enerjisi daha büyük negatif değerdedir. Çelik yüzeyindeki serbest bor, çeliğe difüze olarak demir

borür tabakasını oluşturur ve zamanla bu tabaka büyür. Serbest Bor'un yoğun olduğu çelik yüzeyinde, FeB tabakası oluşur. Borür tabakasının gelişmesi, borun yüzeyde oluşan FeB tabakasından geçerek daha düşük bor konsantrasyonlu Fe₂B oluşturmaya devam eder. Bor konsantrasyonu %9 civarında, Fe₂B fazı oluşur. Fe₂B tabakasındaki bor konsantrasyonu yaklaşık %16 oranına ulaştığında FeB oluşur ve Fe₂B tabakası üzerinde büyüyerek iki fazlı demir borür tabakası oluşur. Yüzeyde oluşan borür tabakasının devamında bor konsantrasyonun düşük olduğu difüzyon tabakası oluşur [91].

10.1.1.3. Borür tabakası kalınlığının borlama banyosu bileşenlerinin stokiometrik oranlarıyla irdelenmesi

Bu bölümde borlama banyosunu oluşturan bileşenlerin borlama prosesindeki reaksiyonların stokiometrik oranlarının borlamada oluşan borür tabakası kalınlığı ile ilişkisi irdelenmiştir. Boraks+Borik asit ile ilave edilen FeSi, FeTi veya SiC'ün borlama prosesindeki reaksiyonlarının aşağıdaki şekilde gerçekleştiği düşünülmektedir.

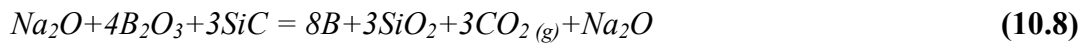
Boraks+Borik Asit ve FeSi:



Boraks+Borik Asit ve FeTi:



Boraks+Borik Asit ve SiC:



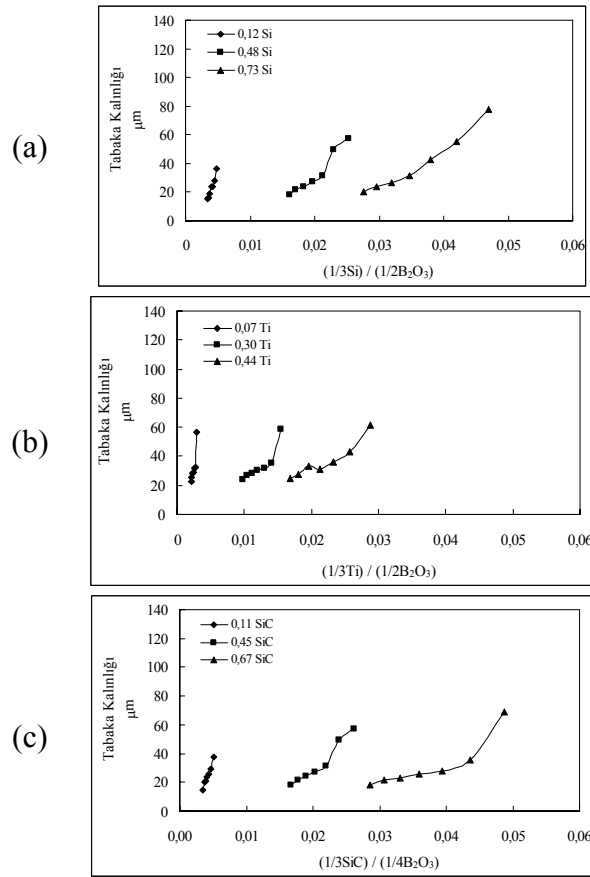
Reaksiyonlar incelendiğinde serbest borun oluşumunda, Si, Ti ve SiC 'in etkili olduğu görülür. Banyo bileşenindeki boraks ve borik asit oranlarının yüksek olması nedeniyle, bor kaynağı (B₂O₃) kritik değildir. Bu nedenle serbest borun oluşumunda banyo bileşenindeki Si, Ti ve SiC'ün miktarları ve B₂O₃ ile oranları, yani reaksiyonların stokiometrilere (1/3Si)/(1/2B₂O₃), (1/3Ti)/(1/2B₂O₃) ve (1/3SiC)/(1/4B₂O₃) oranları anlamlıdır. Borlama banyosunu oluşturan bileşenlerin oranlarına bağlı olarak reaksiyon ürünlerinin yukarıdaki reaksiyonlara göre

hesaplanmış molları ve Si, Ti ve SiC'ün B_2O_3 ile oranları Çizelge 10.2, Çizelge B.10.3 ve Çizelge B.10.4'de , Çizelgedeki bu $(1/3Si)/(1/2B_2O_3)$, $(1/3Ti)/(1/2B_2O_3)$ ve $(1/3SiC)/(1/4B_2O_3)$ oranlarla borür tabakası kalınlığının değişimleri de Şekil 10.7 ve Şekil 10.8'de verilmiştir.

Çizelge 10.2: Borlama banyosunu oluşturan bileşenlerin oranlarına bağlı olarak reaksiyon ürünlerinin hesaplanmış molları ve oranları.

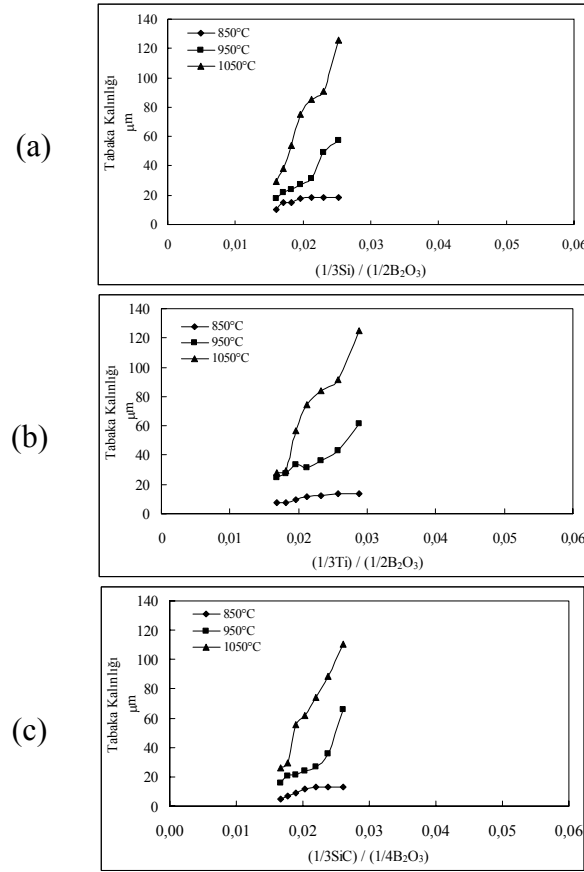
Borlama Banyosunun Bileşenleri, %			Mol			Toplam B_2O_3	$(1/3Si) /$ $(1/2B_2O_3)$
Kalsine Boraks	Kalsine Borik Asit	FeSi	Boraks içindeki B_2O_3	Borik Asitteki B_2O_3	Si		
95	0	5	24,003006	0	0,121085	24,003006	0,0033798777
90	5	5	22,739690	0,040445	0,121085	22,780135	0,0035613144
85	10	5	21,476374	0,080891	0,121085	21,557265	0,0037633357
80	15	5	20,213058	0,121336	0,121085	20,334394	0,0039896554
75	20	5	18,949742	0,161782	0,121085	19,111523	0,0042449376
70	25	5	17,686425	0,202227	0,121085	17,888652	0,0045351222
65	30	5	16,423109	0,242672	0,121085	16,665782	0,0048678919
80	0	20	20,213058	0	0,484342	20,213058	0,0160544190
75	5	20	18,949742	0,040445	0,484342	18,990187	0,0170882413
70	10	20	17,686425	0,080891	0,484342	17,767316	0,0182643733
65	15	20	16,423109	0,121336	0,484342	16,544446	0,0196143712
60	20	20	15,159793	0,161782	0,484342	15,321575	0,0211798656
55	25	20	13,896477	0,202227	0,484342	14,098704	0,0230169307
50	30	20	12,633161	0,242672	0,484342	12,875833	0,0252029430
70	0	30	17,686425	0	0,726512	17,686425	0,0275218611
65	5	30	16,423109	0,040445	0,726512	16,463555	0,0295661145
60	10	30	15,159793	0,080891	0,726512	15,240684	0,0319384185
55	15	30	13,896477	0,121336	0,726512	14,017813	0,0347246274
50	20	30	12,633161	0,161782	0,726512	12,794943	0,0380434175
45	25	30	11,369845	0,202227	0,726512	11,572072	0,0420636294
40	30	30	10,106529	0,242672	0,726512	10,349201	0,0470339047

950 °C de 6 saat süre ile yapılan borlama deneylerinin sonuçlarını veren Şekil 10.7 incelendiğinde, borür tabakasının kalınlığının reaksiyonun stokiometresine göre banyo bileşimindeki $(1/3\text{Si})/(1/2\text{B}_2\text{O}_3)$ ve $(1/3\text{SiC})/(1/4\text{B}_2\text{O}_3)$ oranlarının artması ile etkili şekilde arttığı görülmektedir. Ancak borlama banyosunda titanyumun etkisi farklı olmuştur. FeTi katkısı yapılan borlama banyosunda $(1/3\text{Ti})/(1/2\text{B}_2\text{O}_3)$ oranının düşük değerlerinde FeSi ve SiC katkılı borlama banyoları ile ulaşılan borür tabakasından daha kalın tabaka elde edilmiştir. Ancak tabaka kalınlığı $(1/3\text{Ti})/(1/2\text{B}_2\text{O}_3)$ oranının artışı ile değişmemiştir. Ulaşılan borür tabakası kalınlıkları 0,48 FeSi ile 57,22 μm , 0,44 FeTi ile 61,48 μm ve 0,45 SiC ile 57,22 μm olmuştur.



Şekil 10.7: 950 °C de 6 saat de yapılan borlama işleminde $(1/3\text{Si})/(1/2\text{B}_2\text{O}_3)$, $(1/3\text{Ti})/(1/2\text{B}_2\text{O}_3)$ ve $(1/3\text{SiC})/(1/4\text{B}_2\text{O}_3)$ oranları ile borür tabakası kalınlığının değişimleri. (a) FeSi, (b) FeTi, (c) SiC.

Üç farklı borlama sıcaklığı olarak 850, 950 ve 1050 °C 'de 6 saat süre ile yapılan borlama işlemlerinde, katkıların aynı stokiometrik oranlarının borür tabakası kalınlığına etkileri Şekil 10.8'de verilmiştir.



Şekil 10.8: 850, 950 ve 1050 °C’de 6 saat süre ile yapılan borlama işlemlerinde katkıların stokiometrik oranlarına bağlı olarak sıcaklığın tabaka kalınlığına etkisi. (a) FeSi, (b) FeTi, (c) SiC.

Genel olarak sıcaklığın 850 °C ‘den 1050°C ’ye yükselmesi borür tabakasının kalınlığını, özellikle artan katkı oranlarında, misli ile artırmıştır. Düşük $(1/3\text{Si})/(1/2\text{B}_2\text{O}_3)$ ve $(1/3\text{SiC})/(1/4\text{B}_2\text{O}_3)$ oranlarında sıcaklığın artışı, oluşan tabaka kalınlığında çok büyük farklılıklar meydana getirmemiştir. Yüksek stokiometrik oranlarında, tabaka kalınlığında en yüksek artışlar; sıcaklığın 850 °C’den 950 °C’ye yükselmesi $(1/3\text{SiC})/(1/4\text{B}_2\text{O}_3)$ oranlarında borlanan numunelerde, Sıcaklığın 950 °C’den 1050 °C’ye yükselmesi ile, $(1/3\text{Si})/(1/2\text{B}_2\text{O}_3)$ ve $(1/3\text{Ti})/(1/2\text{B}_2\text{O}_3)$ oranlarında borlanan numunelerde meydana gelmiştir. Sonuç olarak, borlama banyosuna yapılan katkıların sıcaklığa bağlı olarak tabaka kalınlıklarında benzer etkiler gösterdiği belirlenmiştir.

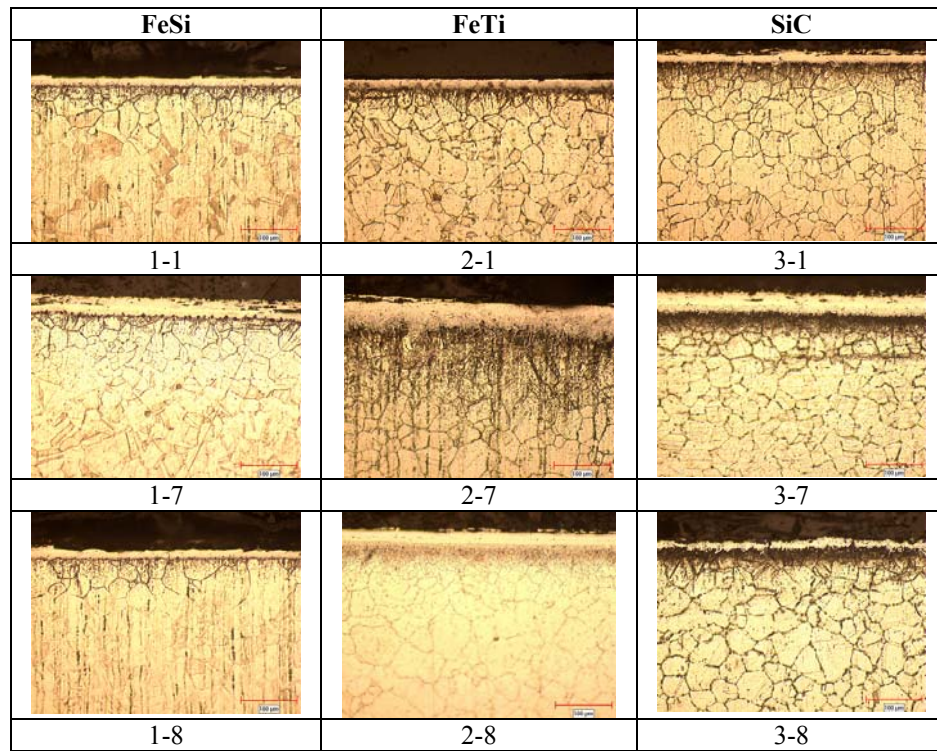
Bu sonuçlar, katkı oranlarına ve sıcaklığa bağlı olarak, borlama işlemi ile ulaşılabilecek tabaka kalınlığının belirlenebileceğini göstermektedir.

10.1.1.4. Borlama banyosu bileşiminin ve sıcaklığın borür tabakasının mikroyapısına etkileri

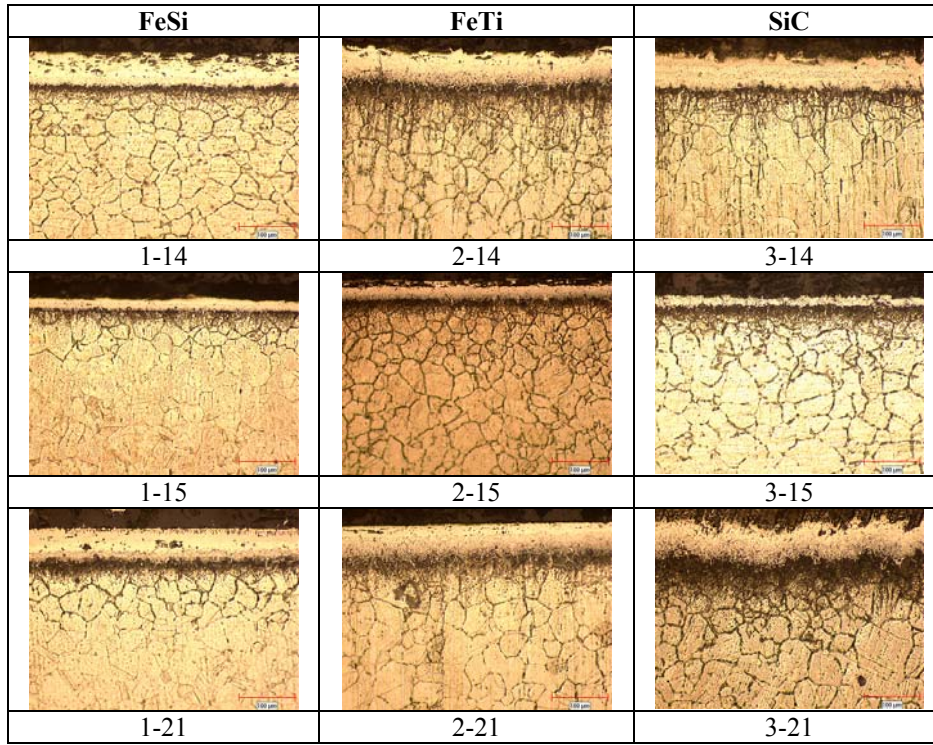
- 950 °C’de 6 Saat Borlama İle Oluşan Borür Tabakalarının Mikroyapısal İncelemeleri:

950 °C’de 6 saat süreyle Çizelge 10.1, B. 10.1 ve B. 10. 2’de verilen banyo bileşimleri ile borlanan AISI 316L tipi paslanmaz çelik numunelerin borür tabakalarının, metalografik olarak hazırlanan kesitlerinin mikroyapı fotoğrafları Şekil 10.9’da verilmiştir.

Farklı FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile 950 °C’de 6 saat yapılan borlama işlemi ile elde edilen borür tabakasının kalınlığı stokiometrik oran arttıkça artmaktadır. Metalografik olarak hazırlanan kesitler incelendiğinde borür tabakası ile malzemenin orijinal yapısı arasında bir geçiş (difüzyon) bölgesinin varlığı görülmektedir.



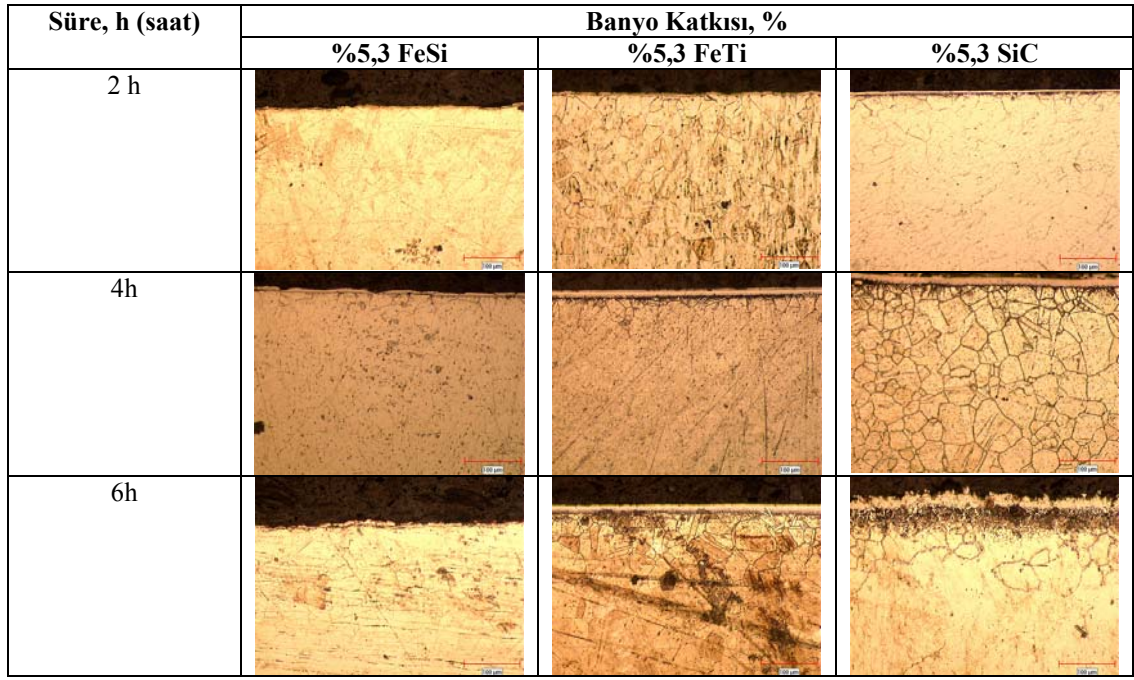
Şekil 10.9: 950 °C’de 6 saat süreyle borlanan AISI 316L tipi paslanmaz çelik numunelerin farklı banyo bileşimleri ile borlanmasıyla elde edilen bor tabakasının metalografik olarak hazırlanan kesitlerinin mikroyapı fotoğrafları.



Şekil 10.9: (Devam) 950 °C’de 6 saat süreyle borlanan AISI 316L tipi paslanmaz çelik numunelerin farklı banyo bileşimleri ile borlanmasıyla elde edilen bor tabakasının metalografik olarak hazırlanan kesitlerinin mikroyapı fotoğrafları.

- Farklı Sıcaklık ve Sürelerde Yapılan Borlama İle Oluşan Borür Tabakalarının Mikroyapısal İncelemeleri:

850 ve 1050 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat süre ile borlanan numunelerin borür tabakalarının metalografik olarak hazırlanan kesitlerinin ışık mikroskobu belirlenen mikroyapı fotoğrafları Şekil 10.10, Şekil 10.12, Şekil 10.14, Şekil 10.16, Şekil A. 10.1’de, Şekil A. 10.2, Şekil A. 10.3 ve Şekil A. 10.4’de verilmiştir. 850, 950 ve 1050°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat süre ile borlanan numunelerin borür tabaka kalınlıklarının süreye bağlı olarak değişimleri Çizelge 10.3, Çizelge 10.4, Çizelge 10.5, Çizelge 10.6, Çizelge B. 10. 5, Çizelge B. 10.6, Çizelge B. 10.7; Çizelge B. 10.8, Çizelge B. 10.9 ve Çizelge B. 10.10’da verilmiştir. Bu sonuçlarla, borür tabaka kalınlıklarının sıcaklığa (850 °C – 950 °C ve 1050 °C) göre farklı sürelerdeki değişimleri Şekil 10.11-10.13-10.15 ve 10.17’de verilmiştir.

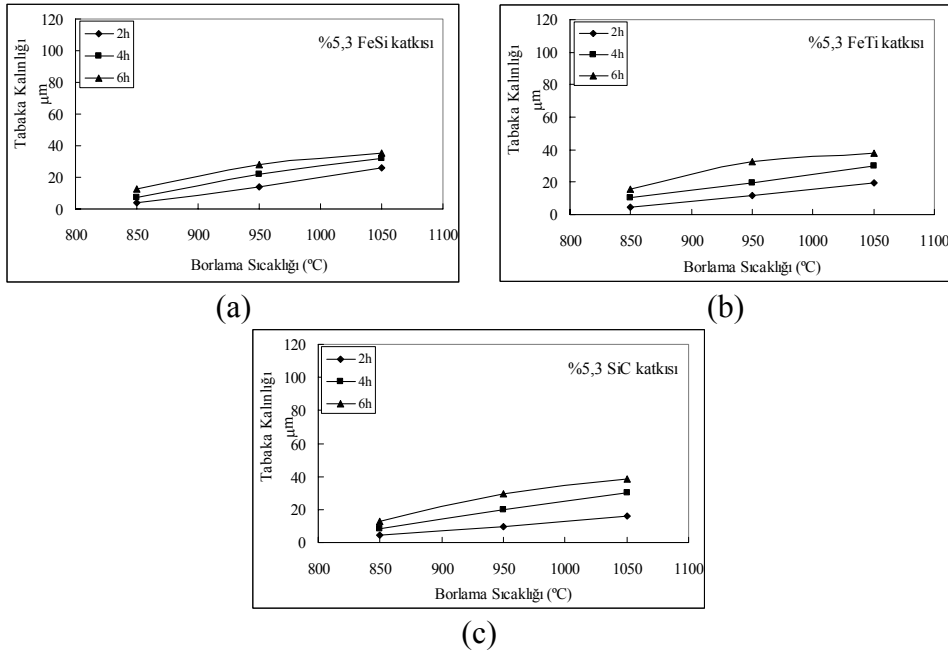


Şekil 10.10: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %5,3 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 850°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüsü.

%5,3 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile 850 °C 2, 4 ve 6 saat süre ile borlanan borür tabakalarının metalografik olarak hazırlanan kesitlerinin Şekil 10.10’da verilen mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde sürenin artmasıyla borür tabaka kalınlıklarının arttığı, bu artışta FeTi ve SiC katkılarının FeSi katkısından daha etkili olduğu görülmektedir.

Çizelge 10.3: %5,3 FeSi katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Tabaka Kalınlığı (µm)
850	2	4,24
	4	7,20
	6	12,90
950	2	14,00
	4	22,15
	6	27,87
1050	2	25,79
	4	31,80
	6	35,40



Şekil 10.11: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %5,3 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 850 °C – 950°C ve 1050°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin sıcaklığa bağlı olarak tabaka kalınlıklarındaki değişimi.

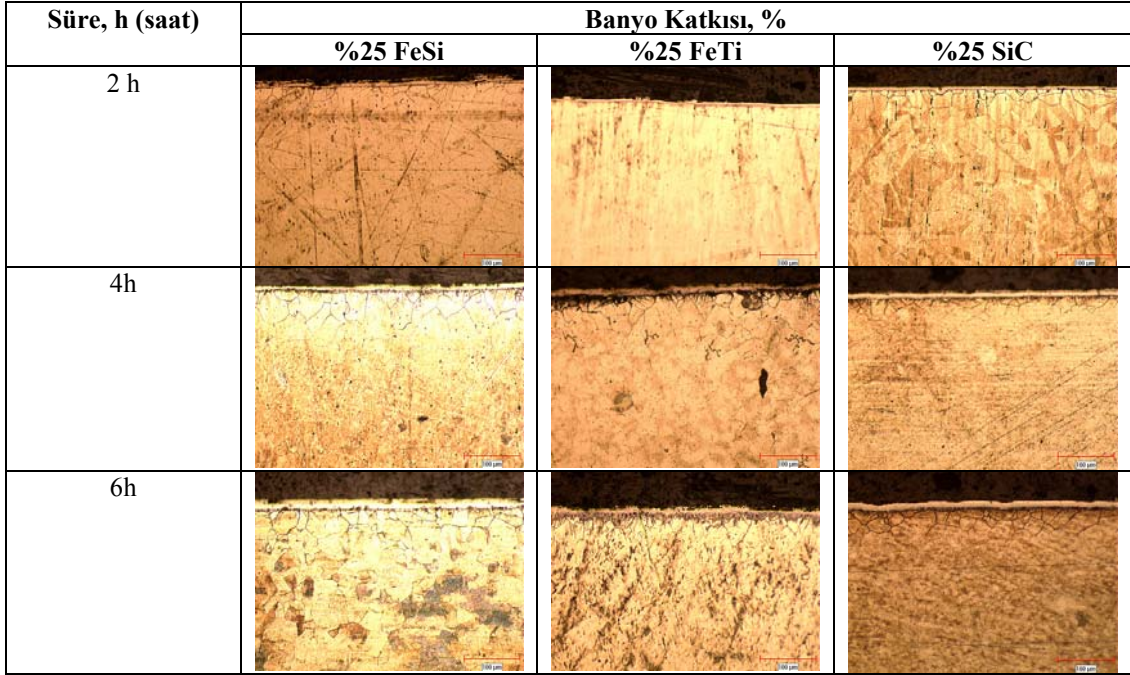
1050 °C 2, 4 ve 6 saat süre ile borlanan borür tabakalarının metalografik olarak hazırlanan kesitlerinin Şekil A. 10.1’de verilen mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde sürenin artmasıyla borür tabaka kalınlıklarının arttığı görülmektedir. FeSi katkısındaki artış, FeTi ve SiC katkılarındaki artışa göre daha azdır.

Çizelge 10.4: %25 FeSi katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.

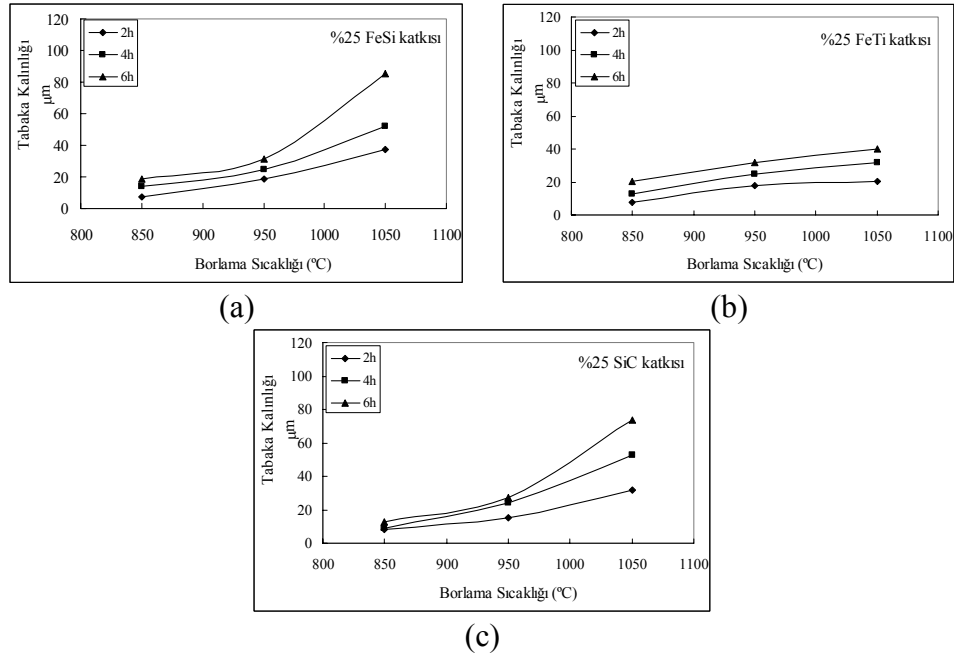
Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Tabaka Kalınlığı (µm)
850	2	7,12
	4	13,77
	6	18,35
950	2	18,91
	4	24,45
	6	31,58
1050	2	37,55
	4	52,21
	6	85,07

%25 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile 850 °C 2, 4 ve 6 saat süre ile borlanan borür tabakalarının metalografik olarak hazırlanan kesitlerinin Şekil 10.12’de verilen mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde sürenin artmasıyla borür tabaka kalınlıklarının arttığı, bu artışta FeSi ve FeTi katkılarının SiC katkısından daha etkili olduğu görülmektedir. 1050 °C 2, 4 ve 6 saat süre ile borlanan borür tabakalarının metalografik olarak hazırlanan kesitlerinin Şekil A. 10.2’de verilen mikroyapı

fotoğrafları incelendiğinde sürenin artmasıyla borür tabaka kalınlıklarının arttığı görülmektedir. FeTi katkısındaki artış, FeSi ve SiC katkılarındaki artışa göre daha azdır.



Şekil 10.12: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %25 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 850°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüsü.

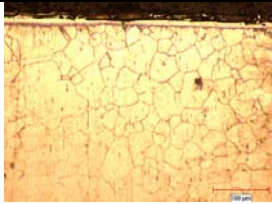
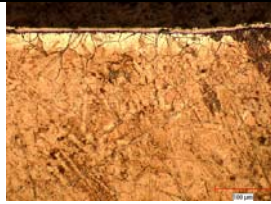
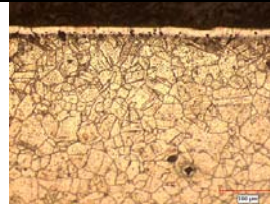
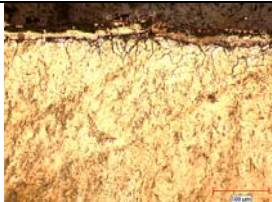
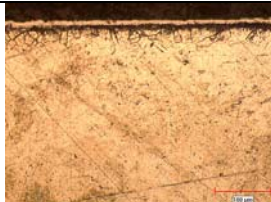
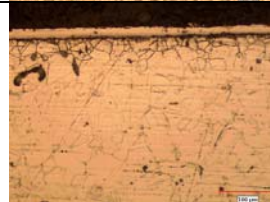
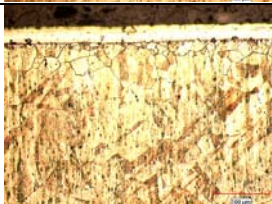
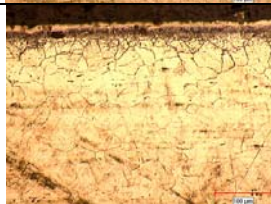
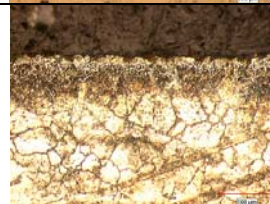


Şekil 10.13: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %25 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 850 °C – 950°C ve 1050°C’de 2-4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin sıcaklığa bağlı olarak tabaka kalınlıklarındaki değişimi.

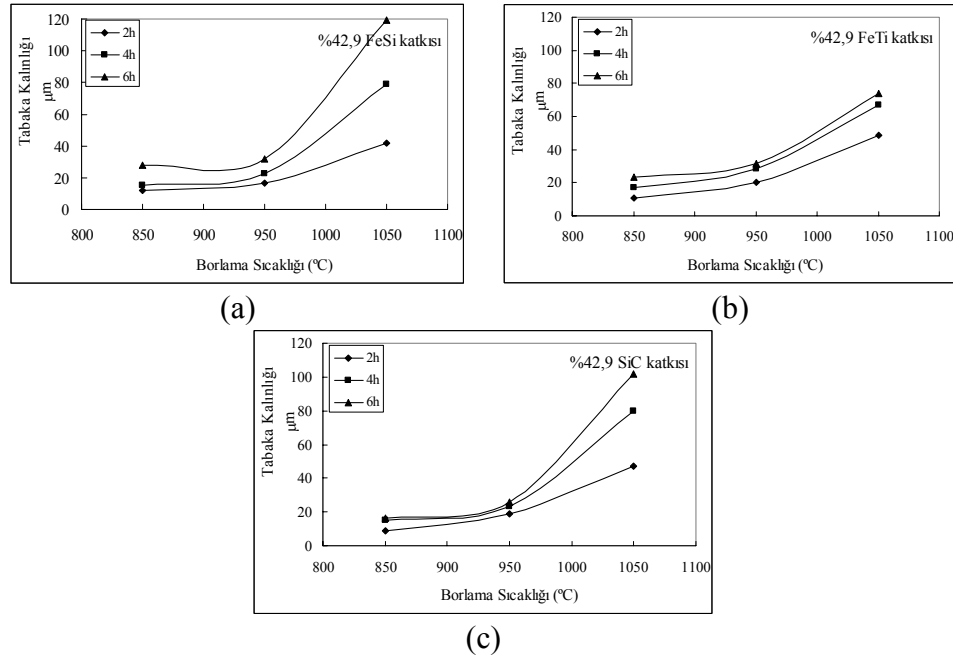
%42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile 850 °C 2, 4 ve 6 saat süre ile borlanan borür tabakalarının metalografik olarak hazırlanan kesitlerinin Şekil 10.14’de verilen mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde sürenin artmasıyla borür tabaka kalınlıklarının arttığı görülmektedir. FeTi katkısına göre borür tabakası kalınlığındaki artış, FeSi ve SiC katkılarına göre azdır.

Çizelge 10.5: %42,9 FeSi katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Tabaka Kalınlığı (µm)
850	2	12,14
	4	15,25
	6	27,88
950	2	16,70
	4	22,23
	6	31,73
1050	2	41,90
	4	78,80
	6	119,30

Süre, h (saat)	Banyo Katkısı, %		
	%42,9 FeSi	%42,9 FeTi	%42,9 SiC
2 h			
4h			
6h			

Şekil 10.14: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 850°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüsü.

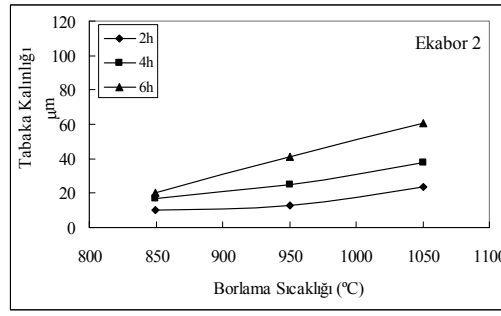


Şekil 10.15: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 850°C – 950°C ve 1050°C’de 2-4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin sıcaklığa bağlı olarak tabaka kalınlıklarındaki değişimi.

1050 °C 2, 4 ve 6 saat süre ile borlanan borür tabakalarının metalografik olarak hazırlanan kesitlerinin Şekil A. 10.3’de verilen mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde sürenin artmasıyla borür tabaka kalınlıklarının arttığı görülmektedir. FeSi katkısındaki artış, FeTi ve SiC katkılarındaki artışa göre daha fazladır.

Süre, h (saat)	Ekabor 2
2 h	
4h	
6h	

Şekil 10.16: Banyo bileşimindeki Ticari ekabor 2 ilavesiyle 850°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüsü.



Şekil 10.17: Ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış 316 L paslanmaz çelik numunelerin 2, 4 ve 6 saatte sıcaklığa (850°C–950°C ve 1050°C) bağlı olarak tabaka kalınlıklarındaki değişimi.

Ticari Ekabor 2 ilavesiyle 850 °C 2, 4 ve 6 saat süre ile borlanan borür tabakalarının metalografik olarak hazırlanan kesitlerinin Şekil 10.16’da verilen mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde sürenin artmasıyla borür tabaka kalınlıklarının arttığı görülmektedir.

Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, borlamada genel olarak borür tabaka kalınlıklarının, kullanılan bor banyosuna yapılan katkıların artışı ve sıcaklık ve sürenin artışı ile arttığı tespit edilmiştir. Sonuçlar ayrıca, bor banyosuna yapılan katkıların etki oranlarının farklı olduğunu göstermiştir.

Çizelge 10.6: Ticari ekabor 2 banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Tabaka Kalınlığı (µm)
850	2	9,81
	4	16,86
	6	20,13
950	2	12,70
	4	24,91
	6	41,38
1050	2	23,27
	4	38,05
	6	60,88

Teorik olarak, büyüme reaksiyon kinetiğinde iki faktör bulunmaktadır. Bunlar; reaksiyon arayüzeyine difüze olan reaksiyon ürünleri (difüzyon kontrollü) ve reaksiyon ara yüzeyinde reaksiyona giren maddelerin taşınması için kimyasal bir bariyeldir (reaksiyon kontrollü).

Eğer, proses reaksiyon kontrollü ise tabaka zamanla orantılı olarak büyümekte, difüzyon kontrollü mekanizma ise tabaka reaksiyon zamanının karekökü şeklinde orantılı olarak büyümektedir. Borlama işlemi difüzyon kontrollü bir proses

olduğundan süre ve sıcaklığa bağlı olarak, tabaka kalınlığının artması beklenen bir sonuçtur.

Yapılan borlama işleminde borür tabaka kalınlıkları numunenin her tarafında homojen olarak oluşmasına rağmen borür kolonlarının boylarında farklılıkları göstermektedir. Bunun sebebi borca zenginleşen yüzeyden ana matrise doğru bir bor gradyanının oluşmasıdır [1,2].

10.1.1.5. Borür tabaka kalınlığının kinetik açıdan incelenmesi

Farklı katkılarla yapılan borlama işleminde, borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak, borür tabakası kalınlıklarının değişimine ilişkin grafiklerden (Şekil 10.14-17) yararlanılarak, Brakman tarafından geliştirilen ve Eşitlik 9.1’de verilen (9.2) bağıntısıyla borun difüzyon katsayıları hesaplanmıştır. Difüzyon katsayıları, Şekil A. 10.5, Şekil A. 10.6 ve Şekil A. 10.7 ve Şekil A. 10.8’de gösterilen $d^2 - t$ eğrilerinin eğiminden bulunmuştur. Çizelge B. 10.11, B. 10.12, B. 10.13 ve 10.14’de hesaplanan difüzyon katsayısı değerleri verilmiştir.

Bu hesaplamalarla bulunan difüzyon katsayıları kullanılarak, Arrhenius bağıntısına göre çizilen $\ln D - 1/T$ eğrilerinden borür tabakası oluşumunun aktivasyon enerjileri bulunmuştur. Bu hesaplamalar, ticari Ekabor 2 için de yapılmıştır (Çizelge B. 10.15, B. 10.16, B.10.17 ve Çizelge B. 10.18). Atomların yer değiştirme eğilimi için bir ölçü olan yayınma katsayısı (D) ile sıcaklık arasında üstel bir ilişki mevcuttur. Yayınma katsayısı malzemeye özgü bir değer olup yayınmanın hızını da belirleyen faktördür. Yayınma katsayısı ve dolayısıyla yayınma hızı arttıkça aktivasyon enerjisi düşer. Elde edilen bu kinetik verilerden sonra (D, Q, Do) pratik açıdan bir sıcaklık ve süre için istenilen tabaka kalınlıkları önceden belirlenebilmektedir. Bu çalışmada bulunan kinetik verilerden difüzyon katsayısının hesaplanması için aşağıdaki pratik denklemler çıkartılmıştır (Eşitlik 10.11-10.20).

%5,3 FeSi banyo katkılı borlanmış 316 L çelik numune için bor difüzyon katsayısı

$$D = 1,47.10^{-6} \cdot \exp (-10,555/T) \quad (10.11)$$

%25 FeSi banyo katkılı borlanmış 316 L çelik numune için bor difüzyon katsayısı

$$D = 1,35.10^{-14} \cdot \exp (-21,880/T) \quad (10.12)$$

%42,9 FeSi banyo katkılı borlanmış 316 L çelik numune için bor difüzyon katsayısı

$$D = 3,80.10^{-4} \cdot \text{Exp} (-22,295/T) \quad (10.13)$$

%5,3 FeTi banyo katkılı borlanmış 316 L çelik numune için bor difüzyon katsayısı

$$D = 1,05.10^{-6} \cdot \text{Exp} (-9,476/T) \quad (10.14)$$

%25 FeTi banyo katkılı borlanmış 316 L çelik numune için bor difüzyon katsayısı

$$D = 2,15.10^{-6} \cdot \text{Exp} (-10,366/T) \quad (10.15)$$

%42,9 FeTi banyo katkılı borlanmış 316 L çelik numune için bor difüzyon katsayısı

$$D = 9,39.10^{-5} \cdot \text{Exp} (-14,482/T) \quad (10.16)$$

%5,3 SiC banyo katkılı borlanmış 316 L çelik numune için bor difüzyon katsayısı

$$D = 1,05.10^{-6} \cdot \text{Exp} (-15,643/T) \quad (10.17)$$

%25 SiC banyo katkılı borlanmış 316 L çelik numune için bor difüzyon katsayısı

$$D = 3,66 \cdot \text{Exp} (-27,919/T) \quad (10.18)$$

% 42,9 SiC banyo katkılı borlanmış 316 L çelik numune için bor difüzyon katsayısı

$$D = 1,53.10^{-1} \cdot \text{Exp} (-29,431/T) \quad (10.19)$$

Ekabor 2 banyosuyla borlanmış 316 L çelik numune için bor difüzyon katsayısı

$$D = 1,96.10^{-5} \cdot \text{Exp} (-17,978/T) \quad (10.20)$$

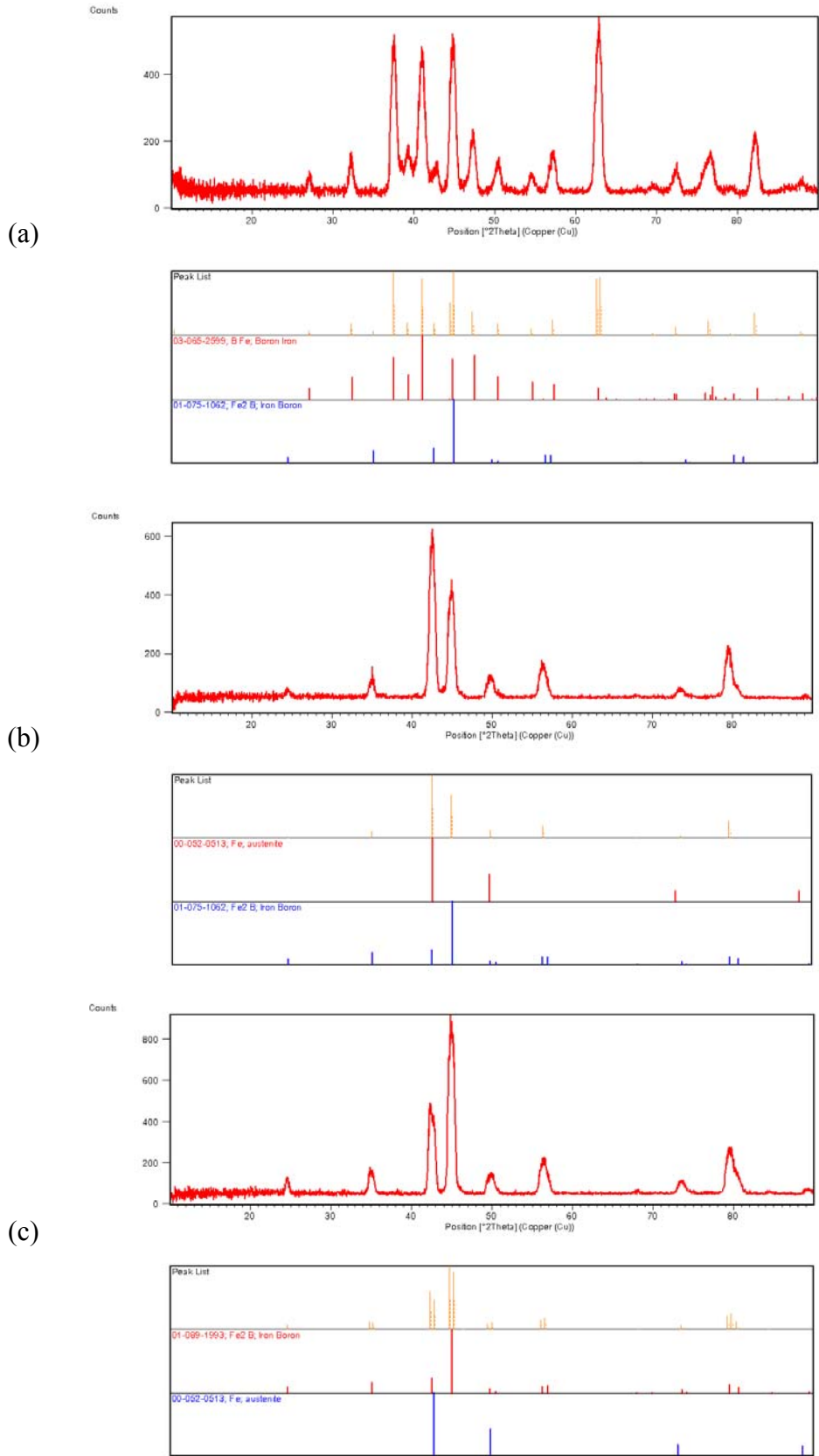
Yapılan kinetik çalışmada, kullanılan çelik malzemeler ve banyo bileşimleri bulunan difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi değerleri üzerinde etkili olmaktadır. Bozkurt ve Sundararajan [6,2] çelikler üzerinde yapmış oldukları kinetik çalışmalarda borlama ortamının ve malzeme bileşiminin bulunan kinetik değerler üzerinde etkisi belirtilmektedir. Bu deneyde kullanılan borlama ortamı ve borlama sıcaklıkları tüm malzemeler için sabit tutulmuş ancak kullanılan banyo katkısının içeriğinden dolayı bulunan kinetik değerler de farklılıklar göstermiştir. Çizelge 10.7’de farklı borlama teknikleri ile yapılan bazı borlama çalışmalarının aktivasyon enerjisi sonuçları verilmiştir. Tuz banyosunda yapılan borlama çalışmalarında, Çizelge 10.7’den görüleceği gibi, borür tabakalarının oluşumunun ve büyümesinin aktivasyon enerjileri literatürle uyum içerisinde [92-94, 97].

Çizelge 10.7: Farklı borlama teknikleri ile yapılan bazı borlama çalışmalarının aktivasyon enerjisi sonuçları.

Borlama Yöntemi	Malzeme	Koşullar	Aktivasyon Enerjisi, (kJ/mol)	Referans
Tuz Banyosu, Ekabor 2	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C'de 2, 4 ve 6 saatte	149,319	-
Tuz banyosu, %5.3 FeSi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C'de 2, 4 ve 6 saatte	87,666	-
Tuz banyosu, %25 FeSi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C'de 2, 4 ve 6 saatte	181,728	-
Tuz banyosu, %42.9 FeSi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C'de 2, 4 ve 6 saatte	185,175	-
Tuz banyosu, %5.3 FeTi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C'de 2, 4 ve 6 saatte	78,704	-
Tuz banyosu, %25 FeTi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C'de 2, 4 ve 6 saatte	86,096	-
Tuz banyosu, %42.9 FeTi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C'de 2, 4 ve 6 saatte	120,283	-
Tuz banyosu, %5.3 SiC, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C'de 2, 4 ve 6 saatte	129,925	-
Tuz banyosu, %25 SiC, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C'de 2, 4 ve 6 saatte	231,886	-
Tuz banyosu, %42.9 SiC, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C'de 2, 4 ve 6 saatte	244,444	-
Tuz Banyosu, Ekabor Banyosu	AISI 316	800, 875, 950°C'de 2,4,6 ve 8 saatte	199	[97]
Tuz Banyosu, %65 Boraks, %15 Borik Asit, %20 FeSi	AISI 4140	1123-1173-1223 K; 2, 4, 6, 8 saat	215	[92]
Tuz Banyosu, Boraks, Borik Asit, FeSi	AISI 5140	1123-1173-1223 K; 2,4, 6,8 saat	223,539	[93]
Tuz Banyosu, Boraks, Borik Asit, FeSi	AISI 4340	1123-1173-1223 K; 2,4, 6,8 saat	233,664	[93]
Vakum Borlama Boron Tozu (%98.3 B, %0.04 C, %1.6 O, %0.01>Si-Cu-Mg, 0.001>Fe), Aktivatör KBF ₄	Fe-%10 Cr	850-900-950°C; 1-12 saat	147,5 (156,4 Fe ₂ B)	[94]

10.1.2 X-ışınları difraksiyon analizi sonuçları

1050°C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanan numunelerin borür tabakalarında oluşan fazların x-ışınları difraksiyon analiz sonuçları Şekil 10.18, Şekil A. 10.9 – A. 10.11'de verilmiştir. X-ışınları difraksiyon analiz grafiklerinden; FeSi katkılı banyolarda borlanan numunelerde oluşan tabakada, Fe₂B fazının yanısıra BFe, Fe₃B ve γFe faz piklerinin, FeTi katkılı banyolarda borlanan numunelerde oluşan tabakada, Fe₂B fazının yanısıra γFe faz piklerinin, SiC katkılı banyolarda borlanan numunelerde oluşan tabakada, Fe₂B fazının yanısıra Fe₃B ve γFe faz piklerinin, Ekabor 2 banyosu ile borlanan numunelerde oluşan tabakada, Fe₂B fazının yanısıra FeB faz piklerinin olduğu görülmektedir. γFe pikleri taban malzemesi olan östenitik paslanmaz çeliğe aittir.



Şekil 10.18: Banyoya yapılan %5,3 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakasının X-ışınları difraksiyon paternleri.

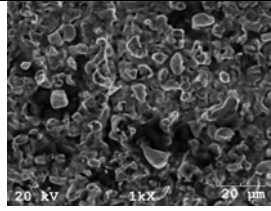
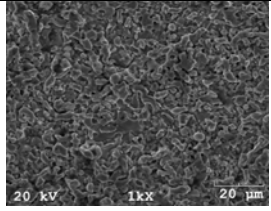
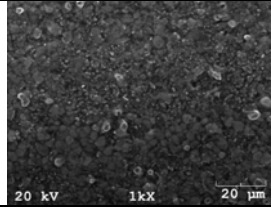
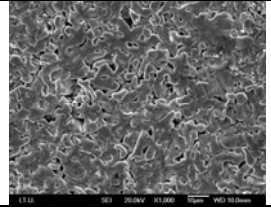
10.1.3 Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları

850, 950 ve 1050 °C sıcaklıklarda 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri; Ra pürüzlülük değeri, olarak ölçülmüş ve birbirleriyle kıyaslanmıştır. Benzer işlemler ticari Ekabor 2 ile borlanmış numunelere de yapılmıştır. Numunelere ait yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge B. 10.19, Çizelge B. 10.20 – B. 10.21 ve B. 10.22’de verilmiştir. Çizelgelardan görüleceği gibi %25 ilaveli borlama banyosunda, 850 ve 950 °C’ de yapılan borlama işlemleri ile elde edilen numunelerin pürüzlülük değerlerinde, borlama süresi ve katkı maddeleri cinsleri ile ilişki bulunmamaktadır. Ancak, 1050 °C’de yapılan borlama ile elde edilen numunelerden %25 FeTi ilavesiyle borlanmış numunenin yüzey pürüzlülük değeri, diğer katkılarla borlananlara göre daha düşüktür.

Daha düşük yüzey pürüzlülük değeri veren bu numunenin yüzeyinin, diğerlerine göre daha homojen ve daha yoğun olduğu Şekil 10.19’da görülmektedir. Ancak, yapılan çalışmanın tüm koşulları değerlendirildiğinde genel olarak, borlama sıcaklığının ve banyoya yapılan katkıların oranlarının artmasıyla pürüzlülük değerlerinin arttığı, buna karşılık borlama süresinin ve katkı maddeleri cinslerinin pürüzlülüğe etkisinde bir ilişki bulunmadığı görülmüştür

10.1.4 Borür tabakalarının EPMA ve SEM ile karakterizasyon sonuçları

Metal yüzeyinde elde edilen borür tabakası taban malzemeden daha düşük yoğunluğa ve yeni fazlar oluştuğu için daha büyük bir hacime sahiptir. Yüzeyde oluşan fazlar hacmi arttırdığı için yüzey gerilimi üretirler. Yapı, yüksek sıcaklıkta yüzeye doğru kristal düzlemlerde hareket eder. Artan hacim, borür tabakasındaki fazlarla ve miktarıyla ilgilidir. Tüm parametreler borür yüzeyi ve yüzey özelliklerini etkiler. Yüzeydeki artan hacim kristalin oluşumda gelişir. Borür yüzeyindeki gelişim, banyoya yapılan %25 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakasının ve ticari ekabor 2 ile borlanmış numunenin SEM görüntüleri Şekil 10.19’da verilmiştir.

BORLAMA BANYOLARI	SEM GÖRÜNTÜLERİ	BORLAMA BANYOLARI	SEM GÖRÜNTÜLERİ
%25 FeSi Katkılı Banyo		%25 SiC Katkılı Banyo	
%25 FeTi Katkılı Banyo		Ekabor 2 Banyosu	

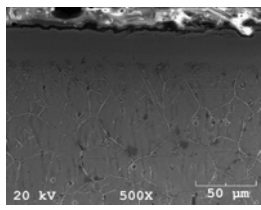
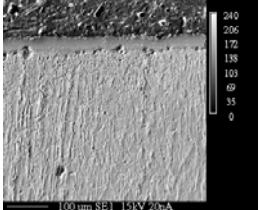
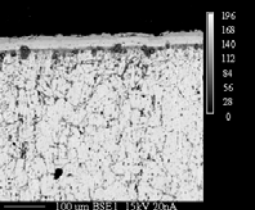
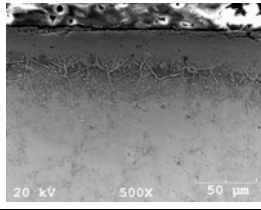
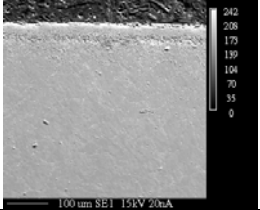
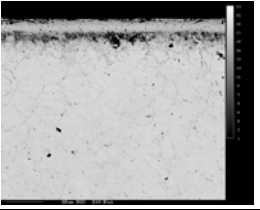
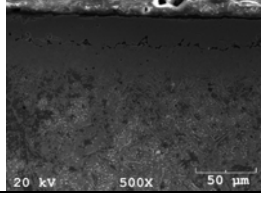
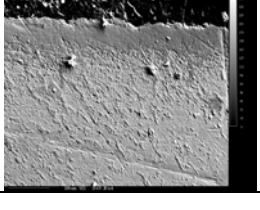
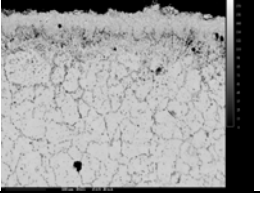
Şekil 10.19: Farklı katkılarla (%25 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC) hazırlanan banyolarla 1050 °C’de 6 saat süre ile yapılan borlamada numune yüzeylerinde oluşan borür tabakasının SEM görüntüleri.

Borlanan tüm numunelerde borür tabakası yüzeyde süreklilik göstermektedir. Şekil 10.19’da farklı katkılarla (%25 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC) hazırlanan banyolarla 1050 °C’de 6 saat süre ile yapılan borlamada oluşan borür tabakasının dış yüzeyinin SEM görüntüleri verilmiştir. FeTi katkılı banyo ile borlamada oluşan borür tabakasının yüzey yapısı, FeSi, SiC katkılı banyo ve ekabor 2 ile borlamada oluşan borür tabakalarından, daha homojen ve daha yoğundur. FeSi katkılı banyo ile borlamada oluşan borür tabakasının yüzey yapısında, diğer katkılı banyolarla borlamada oluşan borür tabakalarının yüzey yapısına göre daha kaba taneli yapı hakimdir.

Borlanan numunelerin borür tabakalarının EPMA ve SEM incelemelerinde elde edilen SE ve BSE görüntülerin fotoğrafları Şekil 10.20 ve Şekil A10.12, A. 10.13 ve A. 10.14’de, x-ışınları haritalaması ile elde edilen elementel dağılımların görünüşleri Şekil 10.21, Şekil A. 10.15-10.16 ve 10.17’de verilmiştir.

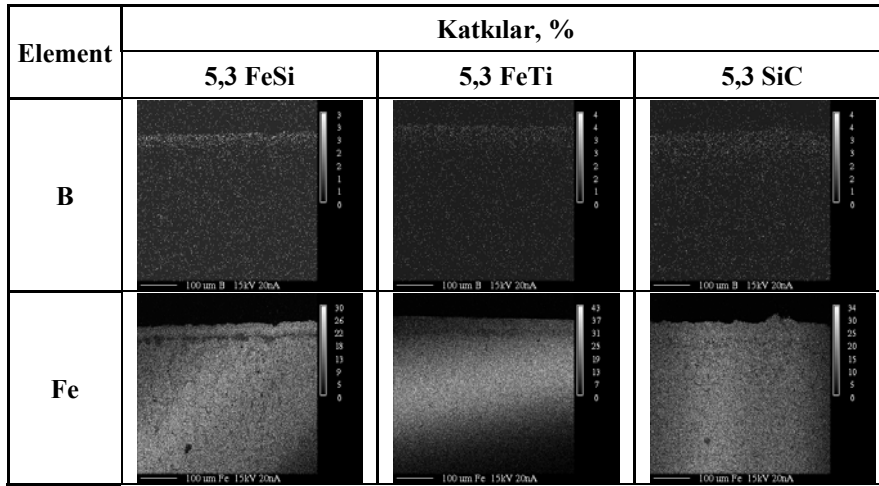
Şekil 10.20 ve Şekil A10.12, A. 10.13 ve A. 10.14’den görüldüğü gibi borür tabaka kalınlıkları numunenin her tarafında yaklaşık aynıdır, yani borür tabakası yüzeyde homojen olarak oluşmuştur. Ancak, borür kolonlarının boylarında farklılıklar olduğu izlenmektedir. Kolonların boylarındaki farklılıklar, borca zenginleşen yüzey ile ana matris arasındaki bor gradyanından (konsantrasyon farkından) kaynaklanmaktadır [1,2]. SEM ve EPMA ile yapılan borlanmış numunelerin borür

tabakakalarının morfolojilerinin incelenmesinde, numunelerin borür tabakaları, tabaka-matris geçiş bölgesi ve matris açık şekilde izlenmektedir. Borlama işlemi sonrasında, borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak; i) Kompakt ve düz bir tabaka şeklindeki ve bileşiminde borür fazları bulunan metalik olmayan seramik bölge, ii) Borür tabakası ile matris arasındaki, borca yüzeyden daha az zengin ve homojen olmayan, bor konsantrasyonu yüzeyden uzaklaştıkça azalan metalik geçiş bölgesi, iii) Borlamadan etkilenmemiş, orijinal malzeme yapısındaki matris şeklinde yapılar gözlenmiştir.

Katkılar, %	SEM ve EPMA Kesit Görüntü Fotoğrafları		
	SEM	EPMA-SEI	EPMA-BSEI
5,3 FeSi			
5,3 FeTi			
5,3 SiC			

Şekil 10.20: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%5,3 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) ilavesiyle 1050 °C’de 6 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulan AISI 316L paslanmaz çelik numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının görüntüleri.

Borür yapısı, paslanmaz çeliğin kimyasal içeriğindeki Cr, Ni ve Mo elementlerine bağlı olarak, düz bir tabaka şeklinde olduğu gözlenmiştir. Saf demir ve sade karbon çeliklerde borür tabakası diş şekilli yapıda oluşmaktadır [27]. Alaşımli çeliklerde ise alaşım elementine bağlı olarak oluşan borür tabakası, diş şekilli yapıdan ziyade düzlemselleşmiş yapıdadır [37]. Çalışılan AISI 316 L paslanmaz çelikteki alaşım elementleri de borlama ile oluşan borür tabakasını düzlemsel kılmıştır.



Şekil 10.21: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%5,3 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) ilavesiyle 1050 °C’de 6 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulan AISI 316L paslanmaz çelik numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının yüzeyindeki B ve Fe’in X-ışını haritalamasının görüntüleri.

Borlanan numunelerin borür tabakalarının kesitlerinin yüzeylerinden başlayarak içeriye doğru yarı kantitatif analizle belirlenen B oranları Çizelge 10.8’de ve %25 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkı banyolarla 1050°C’de 6 saat süre ile borlanan numunelerin borür tabakalarının kesitlerindeki çizgisel EDS analizi görünümüleri Şekil A.18-20’de verilmiştir.

Yarı kantitatif analiz yöntemi ile belirlenen, Çizelge 10.8’de verilen değerler incelendiğinde, her üç katkıdaki borlama banyosu ile borlamada oluşan borür tabakalarındaki B oranları, katkı oranlarının artmasıyla artmaktadır. Ancak, artış oranları doğrusal değildir. En yüksek bor konsantrasyonu, her üç oranda ki FeTi katkılı banyo ile borlanan numunenin borür tabakasında tespit edilmiştir.

Çizelge 10.8: %5,3, %25 ve %42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkı banyolarla ve Ekabor 2 banyosuyla 1050°C’de 6 saat süre ile borlanan numunelerin borür tabakalarının kesitlerinin orta bölgelerindeki B oranları (yarı kantitatif).

Katkı Oranları, %	Borür Tabakasındaki % B Ağırlığı		
	FeSi Katkılı	FeTi Katkılı	SiC Katkılı
5,3	2,008	6,774	2,442
25	2,810	7,426	6,668
42,9	4,413	13,591	8,998
* Ekabor 2 borlama banyosunda B= 2,085			

10.2 Mekanik Deney Sonuçları

10.2.1 Çekme deneyleri sonuçları

Borlanmamış ve farklı katkılarla (%25 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC) hazırlanan banyolarla 1050 °C’de 6 saat süre ile borlanmış 316 L paslanmaz çelik numunelerin çekme deneyi sonuçları Çizelge 10.9’da verilmiştir. Her koşul için 4 deney yapılmıştır. Deney sonuçları akma mukavemetleri açısından ele alındığında, borlanmış numunelerden en yüksek değeri %25 FeSi katkılı banyo ile borlanan numune vermiştir. Bunu sıra ile FeTi, SiC ve Ekabor 2 katkılı banyo ile borlanan numuneler izlemiştir.

Borlanmamış numunenin akma mukavemeti FeSi ve FeTi katkılı banyo ile borlanan numunelere göre düşük, ancak SiC katkılı ve Ekabor 2 banyo ile borlanan numunelerden yüksektir.

Deneylerden elde edilen çekme mukavemetleri; 573,7±4 ile 641,7±3 MPa aralığında saçılmıştır. Ekabor 2 ile borlanan numunelerin çekme mukavemeti en küçük değer olarak 573,7±4 Mpa ‘dır. Borlanan numunelerin çekme deneyindeki uzama oranları, orijinal numunelere göre daha düşüktür. Kendi aralarında da farklılıklar göstermiştir.

Borlanan numunelerin uzama oranlarının düşük olmasına, borlama işleminin 1050°C’de 6 saat gibi yüksek sıcaklık ve uzun sürelerde yapılmasından kaynaklanan tane irileşmesi ve bazı fazların oluşması neden olabilir. Ayrıca, yüzeydeki borür tabakasının sert ve gevrek bölgenin çeliğin deformasyonuna katılamamasından ve yüzeyde çentikler oluşturmamasından kaynaklanmış olabilir.

Çizelge 10.9: Borlanmamış ve banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkılarının (%25 FeSi, %25 FeTi ve %25 SiC) ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile Borlanmış 316 L paslanmaz çelik numunelerin çekme deney sonuçları.

Mekanik Özellikler	BULUNAN DEĞERLER				
	Borlanmamış	%25 FeSi	%25 FeTi	%25 SiC	Ekabor 2
Çekme Mukavemeti, (σ_c , MPa)	628,6±3	607,8±3	641,7±3	609,2±3	573,7±4
Orantı sınırı, (σ_a , MPa)	352,3±2	444,2±3	380,4±3	347,3±2	323,7±1
Kopma uzaması, ($L_o = 5D_o$)(e_k , %)	59,4±4	44,2±5	49,9±4	54,1±4	53,8±4
Kesit daralması (r , %)	19,3±2	18,6±1	18,5±1	19,4±1	19,6±1

10.2.2 Kalıntı gerilme ölçüm sonuçları

Banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari Ekabor 2 banyosuyla 850, 950 ve 1050°C’de 6 saat süre ile borlanan numunelerin borür tabakalarındaki kalıntı gerilme miktarları tespit edilmiştir. Numunelere ait kalıntı gerilme miktarları Çizelge 10.10’da verilmiştir.

Borür tabakasının basma yönündeki kalıntı gerilme miktarları sıcaklığın artmasıyla artmaktadır. Sıcaklığın 850 °C’den 1050 °C’ye yükselmesiyle borür tabakasının basma yönündeki kalıntı gerilme miktarları, %25 oranında yapılan FeSi, FeTi, SiC katkılı banyolarla ve Ekabor 2 banyosu ile yapılan borlamalarda, sırayla, 1,1 kat, 3 kat, 3 kat ve 2,5 kat artmıştır (Çizelge 10.9). Borür tabakalarının basma yönündeki kalıntı gerilme miktarlarındaki artışlar, borlanmış numunelerin yorulma dayanımını ve yorulma dayanım sınırlarının artmasına etki eder.

Çizelge 10.10: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle ve Ekabor 2 banyosuyla 850, 950 ve 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakasındaki basma yönündeki kalıntı gerilme miktarları.

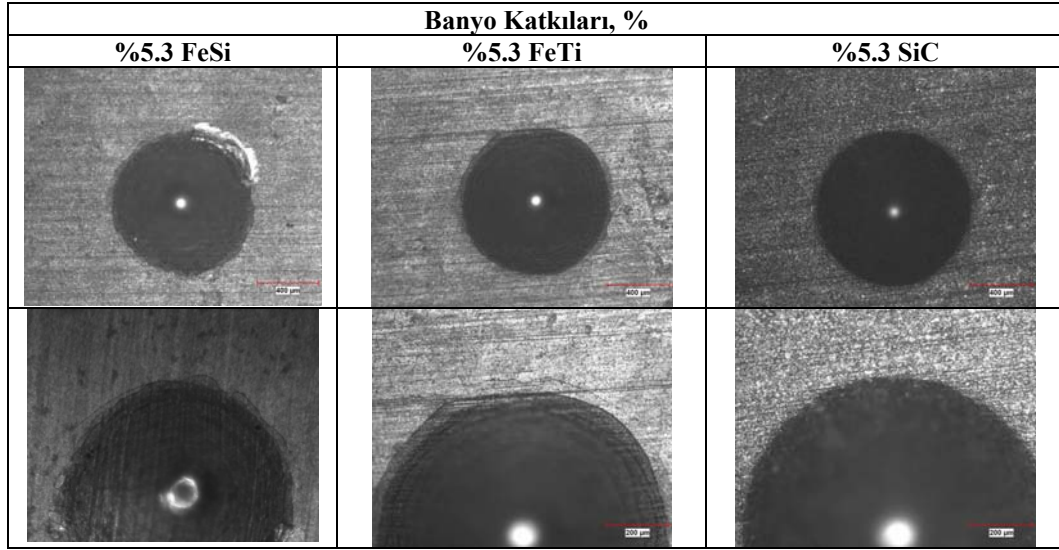
Borlama Süresi (saat)	Borlama Sıcaklığı (°C)	Kalıntı Gerilme, MPa			
		%25 FeSi	%25 FeTi	%25 SiC	Ekabor 2
6	850	-1279,5	-641,8	-405,2	-107,5
	950	-1287,8	-1366,4	-865,6	-111,9
	1050	-1424,6	-1953,6	-1241,2	-269,6

10.2.3 Borür tabakasının mekanik özelliklerinin belirlenmesi (Rockwell C)

Borlanmış numunelerin borür tabakalarının Rockwell C sertlik deney cihazı kullanılarak oluşturulan iz kenarlarındaki yüzey hasarının OM ve SEM görüntülerinin fotoğrafları Şekil 10.22 – 10.24, Şekil A. 10.18 - A.10.20’de verilmiştir.

Tabakanın mekanik özelliklerinin saptanmasında kullanılan bu test tekniğinde, iz kenarlarındaki yüzey hasarlarının büyüklüğü ve özelliği tabakanın özelliği konusunda fikir verir. Şekil 10.22, Şekil A. 10.21, A.10.22, A.10.23’den görüldüğü gibi, %5,3 SiC ve %42,9 FeSi ve SiC katkılı banyo ile 1050°C’de 6 saat süre ile

borlanmış numunelerin borür tabakalarına uygulanan Rockweel C testinde, borür tabakasında çatlamlar ve dökülmeler gözlenmemiştir.



Şekil 10.22: Banyoya yapılan %5,3 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarının indentasyon ile oluşturulan izlerinin farklı büyütmelelerdeki OM görüntüleri.

%5,3 FeSi ve FeTi ve %25 FeSi, FeTi ve SiC’da, %42,9 FeTi katkıli banyo ile 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarına uygulanan Rockweel C testinde ise, test izi etrafında çok küçük çatlamlar gözlenmiş, ancak iz etrafında dökülmeler gözlenmemiştir.

Şekil 10.23’de görüldüğü gibi %25 FeSi, SiC katkıli banyolar ile ve Ekabor 2 banyosu ile 1050°C’de 2 saat süre ile, %25 FeSi katkıli banyo ile, Ekabor 2 banyosu ile 1050°C’de 4 saat süre ile, Ekabor 2 banyosu ile 1050°C’de 6 saat süre ile %25 FeSi katkıli banyo ile, Ekabor 2 banyosu ile 1050°C’de 8 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarına uygulanan Rockweel C testinde, borür tabakasında çatlamlar ve dökülmeler gözlenmemiştir.

%25 FeTi katkıli banyo ile 1050°C’de 2 saat süre ile, %25FeTi ve SiC katkıli banyo ile 1050°C’de 4 saat süre ile, %25 FeSi, FeTi ve SiC katkıli banyo ile 1050°C’de 6 saat süre ile ve %25 FeTi ve SiC katkıli banyo ile 1050°C’de 8 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarına uygulanan Rockweel C testinde ise, test izi etrafında çok küçük çatlamlar gözlenmiştir.

Sonuç olarak, ışık mikroskobundaki Rockweel C izi görüntülerinden, farklı banyo bileşimlerinde ve farklı sıcaklık ve sürelerde yapılan borlamada oluşan borür tabakalarının özellik sınıflandırılmasının HF1 ve HF2 seviyesinde olduğu anlaşılmaktadır.

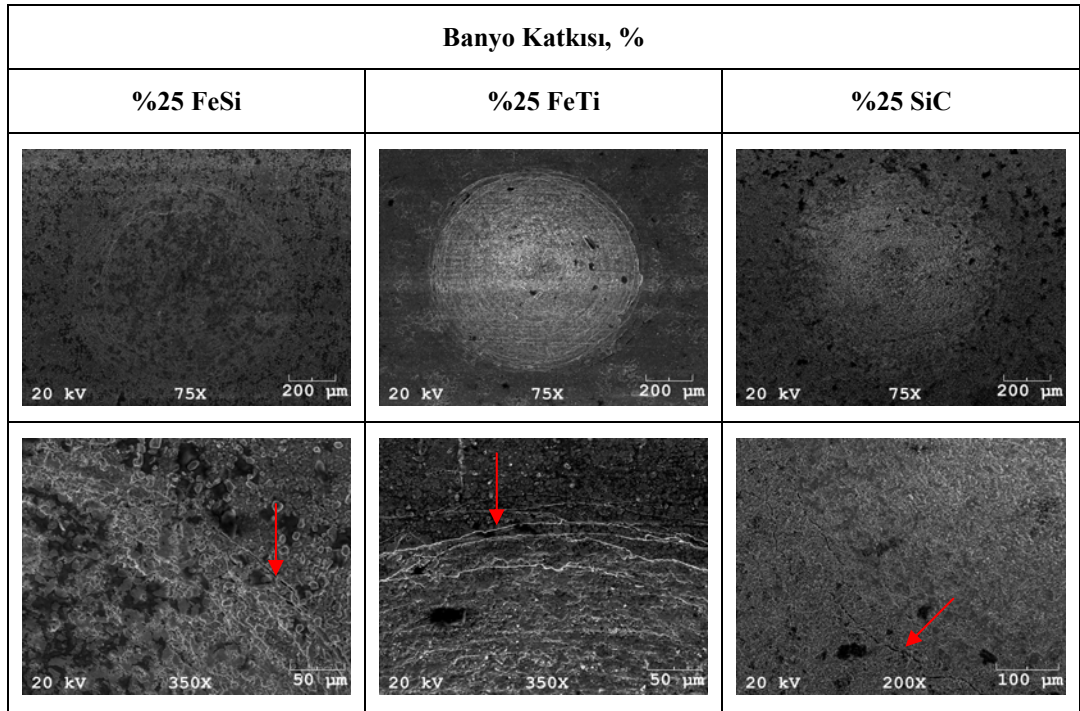
Borlama Süresi (saat)	Banyo Katkısı, %			
	%25 FeSi	%25 FeTi	%25 SiC	Ekabor 2
2				
4				
6				
8				

Şekil 10.23: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle ve Ekabor 2 banyosuyla 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarının indentasyon ile oluşturulan izlerinin farklı büyütmelerdeki OM görüntüleri.

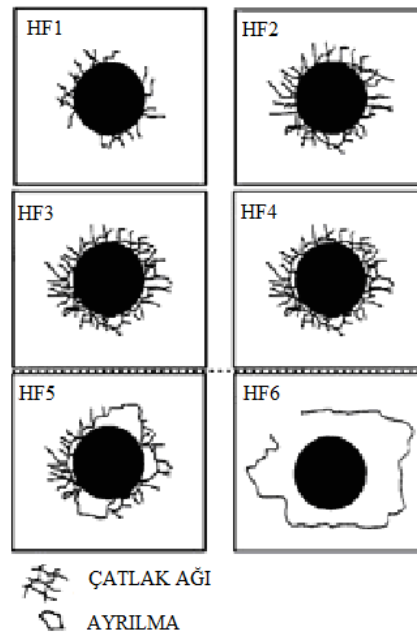
Rockweel C izlerinin SEM incelemelerinde, borür tabakalarındaki izin batıcı uçla uygulanan kuvvet sonucunda deformasyonla olduğu, bu deformasyonla çevresel çatlakların meydana geldiği, ancak deformasyonun ize dik çatlaklar oluşturmadığı görülmektedir (Şekil 10.24). SEM görüntüleri de borür tabakalarının özellik sınıflandırılmasının HF1-HF2 seviyesinde olduğunu doğrulamaktadır.

Rockwell C izinin oluşturulması sırasında izin etrafındaki tabakada yüzeye paralel basma yönünde çok şiddetli gerilmeler oluşur. Bu gerilmeler özellikle tabakanın üst bölümünde tabana yakın bölgelere göre daha şiddetlidir. İzin vurulduğu bölgede ise tabaka yüzeyinde çok şiddetli basınç oluşmasının yanısıra oluşan plastik deformasyondan dolayı yüzeye paralel çekme yönünde gerilmeler meydana gelmektedir. Bu koşullar, iz etrafında tabakaların hasarına neden olurlar.

İz etrafında ize dairesel veya dik çatlakların oluşması tabakaların mekanik özelliklerine bağlı olarak değişir ve dolayısıyla tabakaların mekanik özellikleri konusunda fikir verir.



Şekil 10.24: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarının indentasyon ile oluşturulan izlerinin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri.



Şekil 10.25: Rockweel C testi ile belirlenen tabaka özelliği sınıflandırma kriteri.

10.2.4 Borür Tabakasının Sertlik Ölçüm Sonuçları

Sertlik ölçme işlemleri yüzeyden itibaren matrise kadar, belirli mesafelerde yapılmıştır. Bu şekilde yüzeyden itibaren matrise kadar, sertlikteki değişim farklı

katkılarla ve farklı oranlarda yapılan borlama işlemine, borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak tespit edilmiştir. Sertlik taramaları, tüm sıcaklık ve süre koşulları için uygulanmıştır.

Çizelge 10.10-10.13’de banyoya yapılan %5,3 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle ve Ekabor 2 banyosuyla 850 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saatte borlanmış malzemelerin sertlik dağılımları verilmektedir.

Banyoya yapılan %5,3 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle ve Ekabor 2 banyosuyla 950 – 1050 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saatte borlanmış malzemelerin ve banyoya yapılan %25, %42,9 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle ve Ekabor 2 banyosuyla 850 – 950 – 1050 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saatte borlanmış malzemelerin sertlik dağılımları ilgili çizelge ve şekiller Çizelge B.23 – 48’de ve Şekil A.23 -33’de yüzey sertlik değerleri ise Şekil A.34 ve A.35’de verilmektedir.

Çizelge 10.11: Banyo bileşimine %5,3 oranında FeSi ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 Saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (µm)	Sertlik (HV _{0.01})			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1656	1671	1714	1832
20	1567	1656	1678	1682
30	990	1250	1456	1540
40	897	960	1067	1081
60	743	878	990	1011
80	679	786	890	911
100	499	654	785	798
120	440	614	712	723
140	378	571	679	685
160	320	490	645	666
180	301	412	598	633
200	289	390	578	598
220	256	318	556	587
240	234	278	489	534

850°C’de 2-8 saat ile banyoya yapılan %5,3 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle ve Ekabor 2 banyosuyla borlanmış malzemelerde Çizelge 10.11-10.14’den de görüleceği gibi yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak sertlik değerleri giderek düşmektedir. En yüksek sertlik yüzeye yakın yer olan ve borca en zengin bölge olan yerde edilmiştir. Sürenin artmasıyla birlikte sertlik değerleride artmıştır.

Çizelge 10.12: Banyo bileşimine %5,3 oranında FeTi ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1613,2	1648	1698	1811
20	1102	1478	1698	1811
30	897	982	1698	1810
40	578	652	1671	1810
60	522	567	1451	1781
80	511	566	1255	1651
100	433	467	989	1452
120	412	445	780	1212
140	389	412	778	967
160	378	398	678	765
180	335	357	623	654
200	287	298	611	624
220	267	285	451	612
240	223	244	245	498

Borlanmış malzemelerin yüzey sertlik değerleri, sıcaklık ve süreye bağlı olarak artmaktadır (Şekil A.34 ve Şekil A.35). Borlanmamış AISI 316 L paslanmaz çelik numunenin sertliği 170 HV’dir. Borlanmış malzemelerin yüzey sertlik değerleri borlanmamış çelik malzemeye kıyasla, sıcaklık ve süreye bağlı olarak 9.1 – 12 kat daha yüksektir. Borür tabakalarında ölçülen sertlik değerlerinin, borür tabakalarındaki bor konsantrasyonları farkı ve yüzeydeki borür tabakasının yoğunluğu arasında herhangi bir ilişkisi bulunmamaktadır.

Çizelge 10.13: Banyo bileşimine %5,3 oranında SiC ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1576,1	1595	1671,4	1795,3
20	1235	1572	1671,4	1795,3
30	1102	1210	1592	1795,3
40	988	981	1472	1582
60	891	893	1231	1472
80	856	819	1101	1341
100	718	716	899	1132
120	667	698	845	1101
140	611	656	782	990
160	541	613	771	915
180	512	576	699	891
200	456	524	657	768
220	442	498	632	711
240	389	454	561	691

Ş. Taktak [96], AISI 304 paslanmaz çeliğin borlanması sonucunda yüzey sertlik değerlerinin, borlanmamış çelik malzemeye kıyasla, sıcaklık ve süreye bağlı olarak 7.4 – 11 kat daha yüksek olduğunu bulmuştur.

Çizelge 10.14: Ekabor 2 ile 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (µm)	Sertlik (HV _{0.01})			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1542,5	1584,9	1651,7	1757,7
20	890	1284,9	1651,7	1757,7
30	879	984,9	1196	1757,7
40	702	868,6	1001,1	1320,2
60	665	700,1	976,4	1154,1
80	612,8	654,3	675,9	701,1
100	598,8	602,1	612,1	654,3
120	557,4	584,8	594,3	623,1
140	545,5	543,7	547,9	556,3
160	468	479,1	493	529,1
180	396,4	409,9	421	449,9
200	352,8	403,1	429,7	423,1
220	284	375,2	384	391,9
240	236,8	240,5	256,7	280,5

Çizelge 10.15’de, banyoya yapılan %5,3, %25 ve %42,9 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle ve Ekabor 2 banyosuyla 850, 950 ve 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saatte borlanmış malzemelerin yüzey sertlik değerleri ve literatürde yapılan çalışmalara ait sertlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 10.15: Borlanmış malzemelerin ve literatürde yapılan çalışmalara ait sertlik değerleri.

Borlama Yöntemi	Malzeme	Koşullar	Sertlik	Referans
Tuz Banyosu, Ekabor 2	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C’de 2,4,6 ve 8 saatte	1542,5-1795,3 HV	-
Tuz banyosu, %5,3 FeSi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 1050°C’ de 2,4,6 ve 8 saatte	1656-1965,7 HV	-
Tuz banyosu, %25 FeSi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C’de 2,4,6 ve 8 saatte	1696,7-1997,8 HV	-
Tuz banyosu, %42,9 FeSi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C’de 2,4,6 ve 8 saatte	1714,2- 1998,9 HV	-
Tuz banyosu, %5,3 FeTi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C’de 2,4,6 ve 8 saatte	1613,2-1972 HV	-
Tuz banyosu, %25 FeTi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C’de 2,4,6 ve 8 saatte	1692,8-2035,6 HV	-

Çizelge 10.15: (Devam) Borlanmış malzemelerin ve literatürde yapılan çalışmalara ait sertlik değerleri.

Borlama Yöntemi	Malzeme	Koşullar	Sertlik	Referans
Tuz banyosu, %42,9 FeTi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C'de 2,4,6 ve 8 saatte	1701,8-2041,6 HV	-
Tuz banyosu, %5,3 SiC, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C'de 2,4,6 ve 8 saatte	1576,1-1951,4 HV	-
Tuz banyosu, %25 SiC, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C'de 2,4,6 ve 8 saatte	1642,8-1994,1 HV	-
Tuz banyosu, %42,9 SiC, boraks ve borik asit	AISI 316 L	850, 950 ve 1050°C'de 2,4,6 ve 8 saatte	1662,8-1996,3 HV	-
Tuz Banyosu, Ekabor Banyosu	AISI 316	800, 875, 950°C'de 2,4,6 ve 8 saatte	1700 HV	[97]
Tuz Banyosu, %65 Boraks, %15 Borik Asit, %20 FeSi	AISI 4140	1123-1173-1223 K; 2,4, 6,8 saat	1446-1739 HV	[92]
Tuz Banyosu, Boraks, Borik Asit, FeSi	AISI 5140	1123-1173-1223 K; 2,4, 6,8 saat	1198-1739 HV	[93]
Tuz Banyosu, Boraks, Borik Asit, FeSi	AISI 4340	1123-1173-1223 K; 2,4, 6,8 saat	1077-1632 HV	[93]
Vakum Borlama Boron Tozu (%98.3 B, %0.04 C, %1.6 O, %0.01>Si-Cu-Mg, 0.001>Fe), Aktivatör KBF ₄	Fe-%10 Cr	850-900-950°C; 1-12 saat	1180-1300 HV	[94]
Tuz Banyosu; Ekabor 2 (%90 SiC, %5 B ₄ C, %5 KBF ₄)	AISI 440C	950°C; 2 h	2160 HV	[95]
Tuz Banyosu, %60 Boraks, %20 Borik Asit, %20 FeSi	AISI 304	800-950°C; 3-5-7h	2150 HV	[96]

10.2.5 Borür tabakasının kırılma tokluğu deneyi sonuçları

Kullanılan AISI 316 L malzemesinin farklı katkılarla ve farklı oranlarda borlanması sonucunda oluşan borür tabakasının kırılma tokluğu değerleri, seramik ve gevrek malzemelerin kırılma tokluklarının tayininde kullanılan “İndentasyon Tekniği” ile belirlenmiştir. Kırılma tokluğu ölçümleri homojen Fe₂B fazının bulunduğu alanda 1050°C'de 2, 4, 6 ve 8 saat borlanmış numunelere yapılmış ve kırılma tokluğunun farklı katkılarla ve farklı oranların miktarına ve sertliğe bağlı olarak değişimi incelenmiştir.

Kırılma tokluğunun hesaplanmasında Fe₂B fazının elastik modülü (E=29000Pa), Sinha [4] çalışmalarından alınmıştır. Kırılma tokluğunun ölçümleri için her numunede en az üç ölçüm yapılmış ve ortalaması alınmıştır.

Çizelge B. 49'da 1050°C'de 2, 4, 6 ve 8 saat'de banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkıları (%5,3, %25 ve %42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) ile borlanmış numunelerin kırılma tokluğu değerleri, Şekil A.36'da kırılma tokluğunun banyo bileşimindeki farklı katkı miktarına göre değişimi, Şekil A.37'de ise banyo bileşimindeki farklı katkı miktarı ile ekabor 2 banyosunun kırılma tokluğu ve yüzey sertlik değerleri arasındaki ilişki verilmektedir. Şekil A.36'da borlama süresinin artmasıyla kırılma tokluğunun düştüğü, Şekil A.37'den de görüldüğü üzere sertliğin artması ile kırılma tokluğu değeri düşmektedir. Bu sonuç, banyo katkı oranlarının artmasının borür tabakalarındaki bor oranlarını arttırması ile uyumludur (Şekil A.36-Çizelge 10.7).

Borlama süresinin artması ile tüm borlama banyolarında kırılma tokluğu değerleri borür tabakasındaki sertliğin artmasıyla düşmektedir. Bu sonuçlar literatürle uyum içindedir [54,112,114,115]. Çizelge 10.16'da literatürde yapılan çalışmalara ait kırılma tokluğu değerleri verilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre borlama süresinin artışı ile kırılma tokluğu değerleri düşmektedir. 1050°C'de 2 saatte ekabor 2 banyosu ile borlanmış AISI 316 L malzemesinde en yüksek kırılma tokluğu değeri 3,33 olarak bulunmuştur. Borlama süresinin artması ile tüm borlama banyolarında kırılma tokluğu değerleri borür tabakasındaki sertliğin artmasıyla düşmektedir. Bunun yanında banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%5,3, %25 ve %42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) da etkisi incelenmiştir. Banyo katkısı oranlarının artmasıyla kırılma tokluğu da düşmektedir.

1050°C'de banyo bileşimindeki farklı banyo katkılarıyla borlanan malzemeleride en düşük kırılma tokluğu değerlerine tüm borlama sürelerinde FeTi katkılı banyolar sahiptir. Bu sonuç, FeTi katkısı ile banyoda borlanan borür tabakasındaki bor oranlarının yüksek olması ile uyumlu olabilir (Şekil A.36-Çizelge 10.8).

P.H. Kobrin ve arkadaşı [110], taban malzemedeki çekme mukavemetinin yüksek olmasının, borür tabakasının kırılma tokluğunu azaltacağını bildirmiştir. Tez çalışmasındaki deney sonuçlarıyla benzer özellik taşımaktadır.

Elde edilen yüzey kırılma tokluğu değerleri bir çok seramik malzeme ile rekabet edecek düzeydedir. Örneğin, pyrex camı (2,7-4,2 MPa m^{1/2}), cam seramikler

(2,4 MPa m^{1/2}), TiO₂ (2,5 MPa m^{1/2}), Saf Alümina (2,7-4,2 MPa m^{1/2}), TiB₂ (6-8 MPa m^{1/2}), Sinter Karbür (5-18 MPa m^{1/2}) [52].

Çizelge 10.16: Literatürde yapılan çalışmalara ait kırılma tokluğu değerleri.

Borlama Yöntemi	Malzeme	Koşullar	Kırılma Tokluğu (K _{IC}) (MPa.m ^{1/2})	Referans
Tuz Banyosu, Ekabor 2	AISI 316 L	1050°C'de 2,4,6 ve 8 saatte	3,22, 3,11, 3,07, 2,76	-
Tuz banyosu, %5,3 FeSi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	1050°C'de 2,4,6 ve 8 saatte	2,91, 2,70, 2,46, 2,34	-
Tuz banyosu, %25 FeSi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	1050°C'de 2,4,6 ve 8 saatte	2,89, 2,67, 2,11, 1,86	-
Tuz banyosu, %42,9 FeSi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	1050°C'de 2,4,6 ve 8 saatte	2,79, 2,66, 2,01, 1,81	-
Tuz banyosu, %5,3 FeTi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	1050°C'de 2,4,6 ve 8 saatte	2,83, 2,63, 2,41, 2,26	-
Tuz banyosu, %25 FeTi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	1050°C'de 2,4,6 ve 8 saatte	2,75, 2,61, 1,73, 1,58	-
Tuz banyosu, %42,9 FeTi, boraks ve borik asit	AISI 316 L	1050°C'de 2,4,6 ve 8 saatte	2,73, 2,51, 1,65, 1,51	-
Tuz banyosu, %5,3 SiC, boraks ve borik asit	AISI 316 L	1050°C'de 2,4,6 ve 8 saatte	3,01, 2,72, 2,54, 2,37	-
Tuz banyosu, %25 SiC, boraks ve borik asit	AISI 316 L	1050°C'de 2,4,6 ve 8 saatte	2,94, 2,71, 2,16, 2,06	-
Tuz banyosu, %42,9 SiC, boraks ve borik asit	AISI 316 L	1050°C'de 2,4,6 ve 8 saatte	2,85, 2,68, 2,11, 1,93	-
Tuz Banyosu, %60 Boraks, %20 Borik Asit, %20 FeSi	AISI 304	800-950°C; 3-5-7h	4,46 (900°C 5h), 3,96 (900°C 7h), 3,54 (950°C 5h), 3,12 (950°C 7h),	[96]

10.3 Performans Deney Sonucu

10.3.1 Düzlemsel eğmeli yorulma deneyleri sonuçları

Borlanmamış, banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari Ekabor 2 banyosuyla 1050 °C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanan numunelerin yorulma deneyleri, $R = |\sigma_{\min}|/|\sigma_{\max}| = -1$ gerilme oranında ($|\sigma_{\min}| = |\sigma_{\max}|$), oda sıcaklığında, 15,1 Hz frekansta, düzlemsel eğmeli olarak yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda yorulma dayanım sınırı (YDS), ASTM E 468 [102] standartına göre, her bir koşul için en az 10 numune test edilerek, 5×10^6 çevrim sonunda numunelerin kırılmadığı gerilme genliği değeri alınmıştır. Borlanmamış ve FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari Ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin yorulma dayanımlarının değerlendirilmesi ASTM E 739 [103] standartına göre gerçekleştirilmiştir.

Borlanmamış ve FeTi katkısıyla borlanmış numuneleri 773-887 MPa gerilme genliğinde test edilirken, FeSi katkısıyla borlanmış numuneler, 635-887 MPa gerilme genliğinde, SiC katkısıyla borlanmış numuneler, 670-887 MPa gerilme genliğinde, Ekabor 2 ile borlanmış numuneler 614-887 MPa gerilme genliğinde test edilmiştir.

Borlanmamış, banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin gerilme genliği ile çevrim sayısı (N_f) toplu değerleri Çizelge 10.17’de, toplu grafiği ise Şekil 10.26’da verilmiştir. Borlanmamış, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin yorulma dayanım sınırları sırasıyla 749, 614, 749, 658 ve 591 MPa’dır (Şekil 10.27).

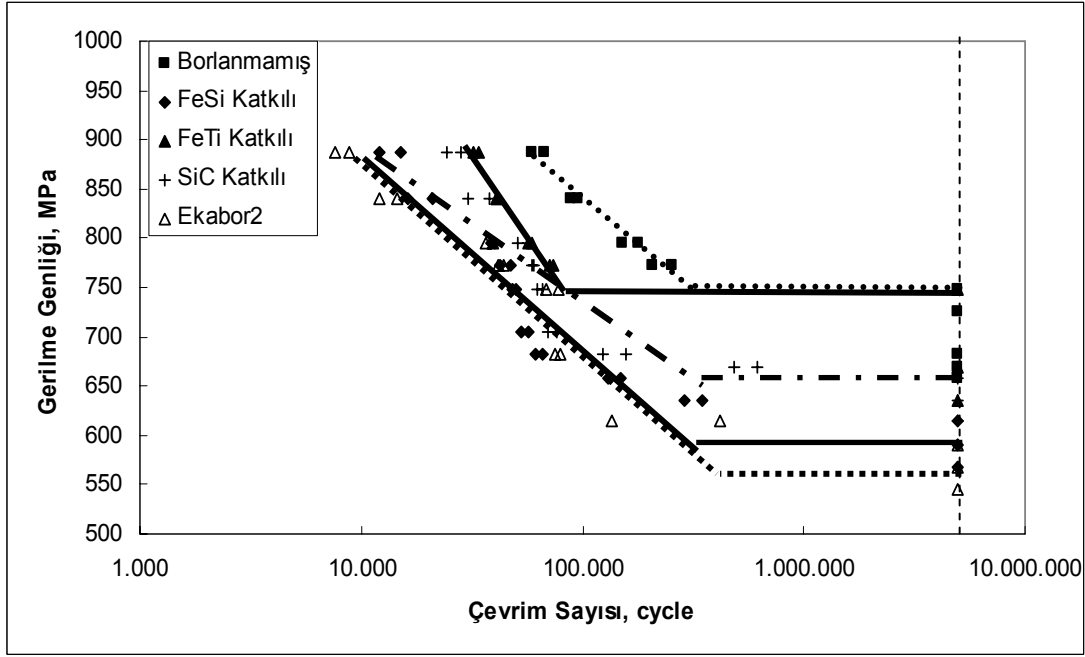
Çizelge 10.17, Şekil 10.26-10.27’den, yorulma dayanım sınırları banyoya yapılan FeSi, SiC katkısıyla ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin borlanmamış numunelerle kıyaslandığında, sırasıyla %18, %12,1 ve %21,1 oranında azaldığı, FeTi katkısıyla borlanmış numunelerde ise değişmediği görülmektedir. FeSi, FeTi ve SiC katkısıyla borlanmış numunelerin ticari ekabor 2 ile borlanmış numunelerle kıyaslandığında ise YDS sırasıyla %3,9, %26,7 ve %11,3 oranında arttığı görülmektedir. Borlamanın yorulma ömrünü azaltmasına, Şekil A.2 ve

A.12'den de görüldüğü gibi borür tabakalarında oluşan çatlakların ve boşlukların neden olduğu düşünülmektedir.

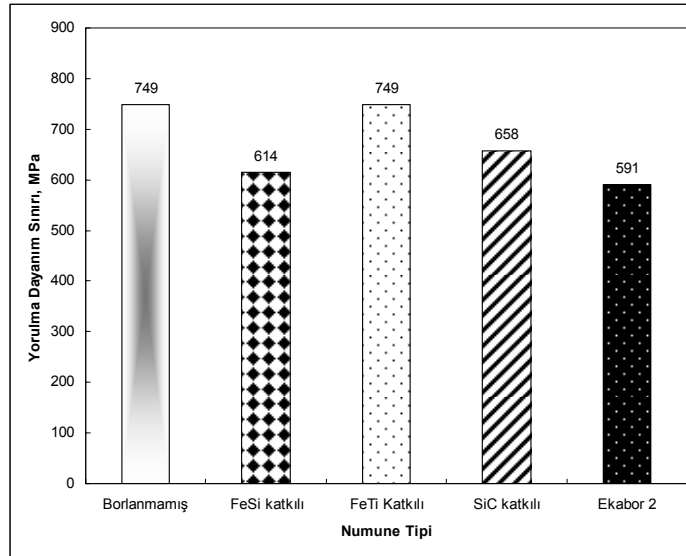
Numunelere uygulanan gerilme genliğine bağlı olarak yorulma ömründeki artışları incelemek için her bir koşulda gerilme – ömür arasındaki ilişkiyi belirlemek gerekmektedir. Şekil 10.26'dan da görüldüğü gibi gerilme ile ömür arasındaki ilişki düz bir çizgi yardımıyla tanımlanabilir.

Çizelge 10.17: Borlanmamış, banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin Gerilme genliği (σ_a MPa) ile çevrim sayısı (N_f) değerleri.

Gerilme Genliği, MPa	Çevrim Sayısı, cycle				
	Borlanmamış	FeSi Katkılı	FeTi Katkılı	SiC Katkılı	Ekabor 2
545	-	-	-	-	5.000.000
567	5.000.000	5.000.000	-	-	5.000.000
591	-	5.000.000	-	-	5.000.000
614	5.000.000	5.000.000	-	5.000.000	420.243
	-	-	-	-	134.966
635	-	350.000	5.000.000	5.000.000	-
	-	289.815	-	-	-
658	5.000.000	129.686	-	5.000.000	-
	-	147.865	-	-	-
670	5.000.000	-	5.000.000	612.302	-
	-	-	-	485.901	-
682	5.000.000	61.230	-	124.489	80.114
	-	66.296	-	156.229	75.012
705	-	53.301	-	69.891	-
	-	56.489	-	75.922	-
726	5.000.000	-	-	-	-
749	5.000.000	48.393	5.000.000	62.087	77.310
	-	50.011	-	65.493	67.898
773	252.201	47.133	73.613	60.358	44.103
	209.055	42.118	70.515	59.176	41.345
796	179.300	38.418	57.144	56.616	39.087
	151.532	40.343	59.531	50.843	36.778
840	87.964	16.124	40.856	30.198	14.553
	95.347	21.001	41.085	37.621	12.098
887	59.089	14.994	33.737	24.397	8.796
	67.613	12.102	32.195	28.336	7.651



Şekil 10.26: Borlanmamış, banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin Gerilme genliği (σ_a MPa) ile kırılıncaya kadarki çevrim sayısı (N_f) grafiği.



Şekil 10.27: Borlanmamış, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin Yorulma Dayanım Sınırı (YDS) değerleri.

Gerilme genliği ile çevrim sayısı arasındaki ilişki Basquin [104] tarafından önerilen ifadelerden oluşan basit parametrik ilişkinin değeri aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$S_a = S'_f (2N_f)^b \quad (10.20)$$

Basquin bağıntısındaki S'_f sabiti yorulma dayanım katsayısını , b ise yorulma dayanım üssünü ifade etmektedir. Her iki sabit, malzeme özelliklerine ve test koşullarına bağlıdır. Çizelge 10.18’de çelik numunelerin yüzey özelliklerini geliştirmek için banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkısıyla, ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerden herhangi bir komponentin yüksek çevrimli yorulma altında dizayn amaçlarının ve yorulma ömrünün değerlendirilmesinde, test edilen tüm koşullar için bu iki sabit değerler ile borlanmamış çelik numuneye ait değerler verilmiştir.

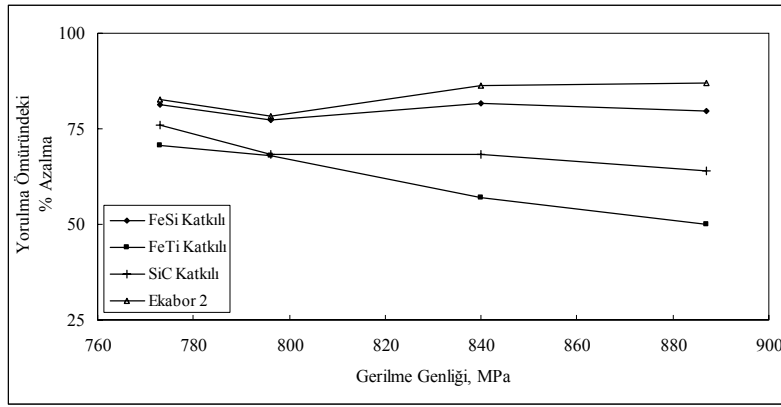
Çizelge 10.18: Test edilen koşullar için Basquin bağıntısını içeren parametreler.

Numune Tipi	S'_f, MPa	b
Borlanmamış	1374	-0,1020
FeSi Katkılı	1169	-0,0993
FeTi Katkılı	2714	-0,1713
SiC Katkılı	2463	-0,1484
Ekabor-2	1031	-0,0735

Çizelge 10.18’den görüldüğü üzere yorulma dayanım katsayı sabiti (S'_f) ile yorulma dayanım üssü’nün (b) büyümesi ile sırasıyla FeTi, SiC, FeSi ve ticari ekabor 2 ile borlanmış numunelerin yorulma dayanım sınırları ve yorulma ömürleri yükselmektedir. b değeri birçok metal için -0,05 ila -0,12 değerleri arasındadır [104,105]. Yorulma ömründeki artış veya azalış aşağıdaki gibi formülize edilebilir. Her bir koşul için farklı gerilme genliklerinde yorulma dayanımına karşılık gelen çevrim sayısı Çizelge 10.17’de verilen değerlerin gerçekleştiği 10.21 eşitliğinden hesaplanmaktadır. Test edilen numunelerde Yorulma ömründeki artış veya azalışı kıyaslamak için 773 – 887 MPa gerilme genlikleri kıyaslanmıştır.

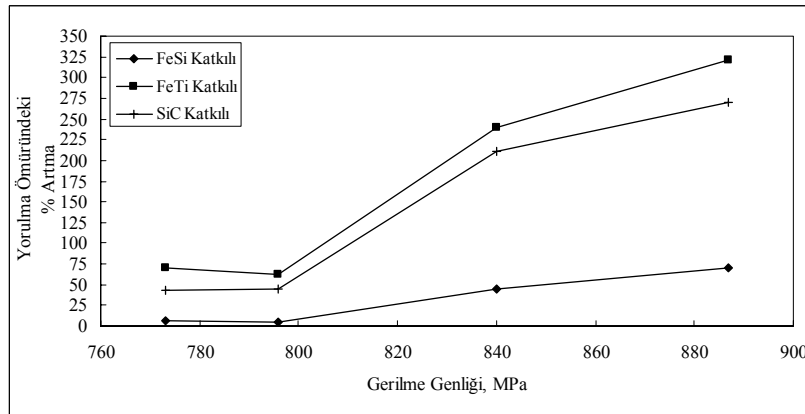
$$Yorulma \text{ Ömründeki } \% \text{ Artış veya Azalış} = \frac{[N_f^{Borlanmış} - N_f^{Borlanmamış}]}{N_f^{Borlanmamış}} \times 100 \quad (10.21)$$

Şekil 10.28’de aynı gerilme genliklerinde banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin borlanmamışlara göre yorulma ömründeki % azalmalar, Şekil 10.29’da ise aynı gerilme genliklerinde banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle borlanan numunelerin ekabor 2’ye göre yorulma ömründeki % artışlar görülmektedir.



Şekil 10.28: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin borlanmamış numunelere göre yorulma ömründeki % Azalma - Gerilme genliği (σ_a MPa) grafiği.

Borlanmış numunelerin borlanmamış numunelerle kıyaslandığında, yorulma ömrü, 773 MPa gerilme genliklerinde, FeTi katkısında % 70,81, SiC katkısında %76,07, FeSi katkısında %81,31, ticari ekabor 2’de ise %82,51 oranında, 887 MPa gerilme genliğinde ise sırasıyla %50,10, %63,92, %79,52 ve % 87,05 oranında azalmıştır.



Şekil 10.29: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle borlanmış numunelerin ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelere göre yorulma ömründeki % Artma - Gerilme genliği (σ_a , MPa) grafiği.

Sonuç olarak, FeTi, SiC ve FeSi katkısıyla borlanmış numunelerde borlanmamış numunelerle kıyaslandığında, gerilme genliğinin 773 MPa’dan 887 MPa’a yükseldiğinde yorulma ömründeki azalma daha düşük olurken, Ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerde ise azalma daha yüksektir (Şekil 10.28). FeSi, FeTi ve SiC katkısıyla borlanmış numunelerin ticari ekabor 2 ile borlanan numunelerle kıyaslandığında ise 773 MPa gerilme genliklerinde FeTi katkısında

%70,55, SiC katkısında %43,13, FeSi katkısında ise %6,87 oranında yorulma ömründe artış olurken, 887 MPa gerilme genliğinde sırasıyla %320,79, %270,36 ve %70,46 oranında yorulma ömründe artış olmaktadır. Sonuç olarak, FeTi, SiC ve FeSi katkısıyla borlanmış numunelerde ticari ekabor 2 ile kıyaslandığında gerilme genliğinin 773 MPa'dan 887 MPa'a yükseldiğinde yorulma ömründe artışlar olmaktadır (Şekil 10.29).

Şekil A.38'de ASTM E739'a göre çizilen Borlanmamış numunelerin, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerle Gerilme genliği (σ_a MPa) ile çevrim sayısı (N_f) grafiği verilmiştir. Deney sonuçları, borlanmamış, FeSi katkısıyla ve ticari ekabor 2 ile borlanmış numunelerin FeTi ve SiC katkısıyla borlanmış numunelere kıyasla %95'lik emniyet bandında büyük bir dağılım göstermektedir. FeTi ve SiC katkısıyla borlanmış numunelerde ise %95'lik emniyet bandı son derece küçüktür.

10.3.1.1. Yorulma kırık yüzeylerin SEM ve SM ile incelemeleri

Borlanmamış numunelerin, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin 796 ve 887 MPa olmak üzere iki farklı gerilme genliğinde stereo mikroskop ile yorulma kırık yüzey görüntüsü Şekil A.39'da verilmiştir. Yorulma kırık yüzeyleri incelendiğinde her iki gerilme genliğinde de birden fazla çatlak başlangıç bölgesi, yorulma çatlağının ilerlediği bölge oldukça düzdür ve yorulma izleri bulunmakta ve son kırılma yüzeyinde ise kademe söz konusudur.

Borlanmamış numunelerin, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin 796 ve 887 MPa olmak üzere iki farklı Gerilme genliğinde taramalı elektron mikroskop ile yorulma kırık yüzey görüntüsü Şekil A.40-41'de verilmektedir. Kırılma yüzeylerinde çatlak başlangıcını karakterize edilmesi ve numunenin kırılma işleminde borür tabakasının rolü incelenmiştir. Numunelerin kenarındaki çatlak başlangıç bölgeleri Şekil A.40-41'den de görüldüğü üzere kırılma izlerinden bulunmuştur. Çatlak, kırılma yüzeyi boyunca dalgalı şekilde ilerlemektedir. Ayrıca yorulma kırık yüzeylerinde ince yorulma çizgileri görülmektedir. Numunelerin yorulma kırık yüzeyleri

incelendiğinde, çatlak başlangıcı ve çatlak ilerlemesindeki bölgelerde sünek kırılma karakteristliği görülmektedir.

Şekil A.40-41'den de görüldüğü üzere yorulma kırık yüzeyleri her bir koşul için aşağıda özetlenmiştir;

- Borlanmamış numunelerde 887 MPa gerilme genliğinde çatlak başlangıcı görülürken, 796 MPa gerilme genliğinde ikinci çatlaklar görülmüştür. Her iki gerilme genliğinde ince yorulma izleri görülmüştür.
- FeSi katkısıyla borlanmış numunelerde çatlak başlangıcı her iki gerilme genliğinde de borür tabaka kalınlığından başlayarak taban malzemeye ilerlemiştir. Her iki gerilme genliğinde ince yorulma izleri görülmüştür.
- FeTi katkısıyla borlanmış numunelerde çatlak başlangıcı her iki gerilme genliğinde de borür tabaka kalınlığından başlamamış, taban malzemeden başlayarak ilerlemiştir. Ayrıca, kırık yüzeylerde ikincil çatlaklar da görülmüştür. Her iki gerilme genliğinde ince yorulma izleri görülmüştür.
- SiC katkısıyla borlanmış numunelerde çatlak başlangıcı her iki gerilme genliğinde de borür tabaka kalınlığından başlayarak taban malzemeye ilerlemiştir. Ayrıca, kırık yüzeylerde ikincil çatlaklar da görülmüştür. Her iki gerilme genliğinde ince yorulma izleri görülmüştür.
- Ekabor 2 ile borlanmış numunelerde çatlak başlangıcı borür tabaka kalınlığından başlayarak taban malzemeye ilerlemiştir. Ayrıca, kırık yüzeylerde ikincil çatlaklar da görülmüştür. Her iki gerilme genliğinde ince yorulma izleri görülmüştür.

11. GENEL İRDELEME

FeSi, FeTi ve SiC'nin farklı oranlardaki katkıları ile oluşturulan borlama banyosu ile borlamada AISI 316 L paslanmaz çelik numune yüzeyinde oluşan borür tabakasının kalınlığı; artan sıcaklık, artan süre ve katkıların artan oranlarıyla artmıştır. Borür tabakasının oluşumu ve büyümesi, difüzyon prosesi ile yürüyen bir olaydır. Sıcaklığa ve süreye göre borür tabakasının kalınlığının artması beklenen bir sonuçtur. Borlamada oluşan borür tabakasının kalınlığında, banyoya yapılan katkıların oranlarının yanında tipleri de etkili olmuştur.

Borür tabakasının kalınlığı borlama banyosunu oluşturan bileşenlere göre değişiklik göstermiştir. 950 °C de 6 saat süre ile çeşitli oranlardaki kalsine borik asit - boraks banyosuna yapılan %5,3 oranında FeTi katkısı ile, diğer katkılı banyolarla sağlanan tabaka kalınlığından daha büyük tabaka kalınlığına ulaşılmıştır. %25 ve %42,9 oranındaki katkıların tabaka kalınlığına etkisi incelendiğinde, kalsine borik asit / boraks oranının 0,3'ün altında olan banyo bileşimlerinde en yüksek tabaka kalınlığı FeTi katkısı ile sağlanmaktadır. Bu oranının 0,3'ün üzerinde olduğu banyo bileşimlerinde en yüksek tabaka kalınlığı FeSi, sonra da SiC katkısı ile sağlanmaktadır (Şekil 10.3). Bu sonuç, FeTi'un borlama banyosunda elementel B oluşturmada diğer katkılara göre daha etkili olduğunu, ancak borlama banyosundaki bor kaynağının artması ile FeSi'un borür oluşturma için gerekli (B^{+1}) amorf yapıda bor iyonu sağlamada etkili duruma geldiğini göstermektedir.

950 °C de 6 saat süre ile yapılan borlama işlemlerinde yapılan katkıların (FeSi, FeTi ve SiC) oranının artmasıyla borür tabakasının kalınlığı artmıştır. Ancak, katkıların oranının artmasıyla banyo akışkanlığında azalma gözlenmiştir. Özellikle, katkıların oranı %25'i geçtiğinde çalışma şartları zorlanmakta, numuneye yapışmalar artmaktadır. Borlama banyosundaki kalsine borik asit ilavesinin banyonun akışkanlığına olumlu katkıda bulunduğu gözlenmiştir. Borlama banyosundaki kalsine borik asit oranının %0'dan %30'a artmasıyla, elde edilen borür tabaka kalınlıkları,

%5,3 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarında sıra ile 2,37, 2,48 ve 2,58 kat artmaktadır. %25 oranlarında yapılan katkılarla tabaka kalınlıkları aynı sıra ile 3,17, 2,42 ve 4,23 kat ve yine %42,9 oranlarında yapılan katkılarla tabaka kalınlıkları aynı sıra ile 3,83, 2,48 ve 3,79 kat artmaktadır. Borik asit oranının artışıyla borür tabakası kalınlığındaki artış; akışkanlığın artması ile borlanan numune yüzeyi – bor banyosu arayüzeyindeki konsantrasyon farkının azalmasından meydana gelmektedir.

Boraks ve borik asit ile ilave edilen katkıların borlama prosesindeki reaksiyonları incelendiğinde serbest borun oluşumunda, Si, Ti ve SiC ‘in etkili olduğu görülmektedir. Bu nedenle serbest borun oluşumunda banyo bileşenindeki Si, Ti ve SiC ‘ün miktarları ve B₂O₃ ile oranları, yani reaksiyonların stokiometrilere (1/3Si)/(1/2B₂O₃), (1/3Ti)/(1/2B₂O₃) ve (1/3SiC)/(1/4B₂O₃) oranları anlamlıdır. 950°C ‘de 6 saat süre ile yapılan borlama işlemlerinde, borür tabakasının kalınlığının reaksiyonun stokiometresine göre banyo bileşimindeki (1/3Si)/(1/2B₂O₃) ve (1/3SiC)/(1/4B₂O₃) oranlarının artması ile etkili şekilde arttığı görülmektedir. Ancak borlama banyosunda titanyumun etkisi farklı olmuştur. FeTi katkısı yapılan borlama banyosunda (1/3Ti)/(1/2B₂O₃) oranının düşük değerlerinde FeSi ve SiC katkılı borlama banyoları ile ulaşılan borür tabakasından daha kalın tabaka elde edilmiştir. Ancak tabaka kalınlığı (1/3Ti)/(1/2B₂O₃) oranının artışı ile değişmemiştir. Ulaşılan borür tabakası kalınlıkları 0,48 FeSi ile 57,22 µm, 0,44 FeTi ile 61,48 µm ve 0,45 SiC ile 57,22 µm olmuştur.

Genel olarak sıcaklığın 850 °C ‘den 1050°C ‘ye yükselmesi borür tabakasının kalınlığını, özellikle artan katkı oranlarında, misli ile artırmıştır. Düşük (1/3Si)/(1/2B₂O₃) ve (1/3SiC)/(1/4B₂O₃) oranlarında sıcaklığın artışı, oluşan tabaka kalınlığında çok büyük farklılıklar meydana getirmemiştir. FeTi katkılı borlama banyosu ile düşük (1/3Ti)/(1/2B₂O₃) oranlarında 850°C ‘de elde edilen borür tabakasının kalınlığı ile 950 ve 1050 °C sıcaklıklarda elde edilen borür tabakası kalınlıkları arasındaki fark büyüktür. Sıcaklıkla tabaka kalınlığındaki en yüksek artışlar, sıra ile, yüksek (1/3Si)/(1/2B₂O₃) ve (1/3Ti)/(1/2B₂O₃) oranlarında, sıcaklığın 950°C ‘den 1050°C ‘ye yükselmesi ile meydana gelmiştir. SiC katkılı borlama banyosu ile en yüksek (1/3SiC)/(1/4B₂O₃) oranlarında yapılan borlamada, sıcaklığın 850°C ‘den 950 °C ‘ye yükselmesi ile tabaka kalınlığında en yüksek artış meydana gelmiştir.

Bu sonuçlar, katkı oranlarına ve sıcaklığa bağlı olarak, borlama işlemi ile ulaşılabilecek tabaka kalınlığının tahmin edilebileceğini göstermektedir.

Bu sonuçlar, borlamada genel olarak borür tabaka kalınlıklarının, kullanılan bor banyosuna yapılan katkıların artışı ve sıcaklık ve sürenin artışı ile arttığını ve ayrıca, bor banyosuna yapılan katkıların etki oranlarının farklı olduğunu göstermektedir.

Borlanan tüm numunelerde borür tabakası yüzeyde süreklilik göstermektedir. %25 oranlarında (FeSi, FeTi ve SiC) hazırlanan banyolarla 1050 °C’de 6 saat süre ile yapılan borlamada oluşan borür tabakasının dış yüzeyinde, FeTi katkılı banyo ile borlamada oluşan borür tabakasının yüzey yapısı, FeSi ve SiC katkılı banyo ile borlamada oluşan borür tabakalarından, daha homojen ve daha yoğundur. FeSi katkılı banyo ile borlamada oluşan borür tabakasının yüzey yapısında, diğer katkılı banyolarla borlamada oluşan borür tabakalarının yüzey yapısına göre daha kaba taneli yapı hakimdir.

Borlama işlemine tabi tutulan bütün numunelerde oluşan borür tabaka kalınlıkları numunenin her tarafında yaklaşık aynıdır, yani borür tabakası yüzeyde homojen olarak oluşmuştur. Ancak, borür kolonlarının boylarında farklılıkların olduğu izlenmektedir. Kolonların boylarındaki farklılıklar, borca zenginleşen yüzey ile ana matris arasındaki bor gradyanından (konsantrasyon farkından) kaynaklanmaktadır [1,2].

Metalografik incelemeler sonucunda, OM, SEM ve EPMA fotoğrafları ile oluşan borür tabakalarının morfolojilerinin incelenmesinde, numunelerin borür tabakaları, tabaka-matris geçiş bölgesi ve matris açık şekilde izlenmektedir. Borlama işlemi sonrasında, borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak aşağıdaki yapılar gözlenmiştir.

- i) Kompakt ve düz bir tabaka şeklindeki ve bileşiminde borür fazları bulunan metalik olmayan seramik bölge,
- ii) Borür tabakası ile matris arasındaki, borca yüzeyden daha az zengin ve homojen olmayan, bor konsantrasyonu yüzeyden uzaklaştıkça azalan metalik geçiş bölgesi,
- iii) Borlamadan etkilenmemiş, orijinal malzeme yapısındaki matris.

Borür yapısı, paslanmaz çeliğin kimyasal içeriğindeki Cr, Ni ve Mo elementlerine bağlı olarak, düz bir tabaka şeklinde oluştuğu gözlenmiştir. Saf demir ve sade karbon çeliklerde borür tabakası dış şekilli yapıda oluşmaktadır [27]. Alaşımlı çeliklerde ise alaşım elementine bağlı olarak oluşan borür tabakası, dış şekilli yapıdan ziyade düzlemselleşmiş yapıdadır [37]. Çalışılan AISI 316 L paslanmaz çelikteki alaşım elementleri de borlama ile oluşan borür tabakasını düzlemsel kılmıştır.

Borlanan numunelerinin borür tabakalarının kesitlerinin orta bölgelerindeki yarı kantitatif analizle her üç katkıdaki borlama banyosu ile borlamada oluşan borür tabakalarındaki B oranları, katkı oranlarının artmasıyla artmaktadır. Ancak, artış oranları doğrusal değildir. En yüksek bor konsantrasyonu, her üç oranda ki FeTi katkılı banyo ile borlanan numunenin borür tabakasında tespit edilmiştir.

Tüm banyo bileşimlerinde borlama ile oluşan borür tabakasında temel faz Fe_2B fazıdır. FeTi ve SiC katkılı banyolarla borlamada FeB fazı oluşmazken, FeSi katkılı ve Ekabor 2 ile banyolarla borlamada FeB fazı oluşmuştur.

Yapılan kinetik çalışmalarla, deneylerde kullanılan tüm numuneler için sıcaklığa bağlı olarak difüzyon katsayıları ve aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, banyo katkı oranlarının (%5,3, %25 ve %42,9) artmasıyla aktivasyon enerjileri artmaktadır. Banyo katkıları içerisinde aktivasyon enerjisi, FeTi katkılı banyolarda, katkı oranlarının artmasıyla dahil olmak üzere en düşüktür.

Banyo katkılarının aktivasyon enerjileri Ticari Ekabor 2 bor banyosu ile kıyaslandığında FeTi katkılı banyolar, tüm katkı oranlarında en düşüktür. FeSi ve SiC katkılı banyolar ise sadece %5,3 oranında en düşüktür, diğer katkı oranlarında en yüksektir.

Yapılan kinetik çalışmaların sonuçları, borlama banyosu bileşiminin difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi değerleri üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Bozkurt ve Sundararajan [2, 6] çeliklerin borlanması konusunda yapmış oldukları kinetik çalışmalarda, borlama ortamının ve malzeme bileşiminin, bulunan kinetik değerler üzerinde etkisinin olduğu belirtmişlerdir. Bu çalışma kapsamındaki deneylerde kullanılan borlama ortamı ve borlama sıcaklıkları tüm malzemeler için sabit tutulmuş ancak kullanılan banyo katkısının içeriğinden dolayı bulunan kinetik değerler de farklılıklar göstermiştir.

850, 950 ve 1050 °C sıcaklıklarda 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri borlama sıcaklığının ve banyoya yapılan katkılarının oranlarının artmasıyla artmaktadır. Borlama süresinin ve katkı maddeleri cinslerinin pürüzlülüğe etkisinde ise ilişki bulunmamaktadır. Ş. Taktak [96], borlanmış çeliklerin yüzey pürüzlülüğü değerinin, sıcaklık ve süreye bağlı olarak arttığını belirtmiştir. Böylelikle, borür tabaka kalınlığının artması, yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir. Birçok kaplama metodları, yüzey pürüzlülüğü ve kalınlık arasında ilişki olduğunu ortaya koymaktadır [98].

1050 °C’de yapılan borlama ile elde edilen numunelerden %25 FeTi ilavesiyle borlanmış numunenin yüzey pürüzlülük değeri, diğer katkılarla borlananlara göre daha düşüktür. Daha düşük yüzey pürüzlülük değeri veren bu numunenin yüzeyinin, diğerlerine göre daha homojen ve daha yoğun olduğu görülmektedir (Şekil 10.19). Genel olarak, borlama sıcaklığının ve banyoya yapılan katkılarının oranlarının artmasıyla pürüzlülük değerlerinin arttığı, buna karşılık borlama süresinin ve katkı maddeleri cinslerinin pürüzlülüğe etkisinde bir ilişki bulunmadığı görülmüştür.

Çekme deneyi sonuçları akma mukavemetleri açısından ele alındığında, borlanmış numunelerden en yüksek değeri %25 FeSi katkılı banyo ile borlanan numune vermiştir. Bunu sıra ile FeTi, SiC ve Ekabor 2 katkılı banyo ile borlanan numuneler izlemiştir. Borlanmamış numunenin akma mukavemeti FeSi ve FeTi katkılı banyo ile borlanan numunelere göre düşük, ancak SiC katkılı ve Ekabor 2 banyo ile borlanan numunelerden yüksektir. Borlanmış numunelerin çekme mukavemetleri; 573,7±4 ile 641,7±3 MPa aralığında saçılmıştır. Ekabor 2 ile borlanan numunelerin çekme mukavemeti en küçük değer olarak 573,7±4 MPa ‘dır.

Borlanan numunelerin çekme deneyindeki uzama oranları, orijinal numunelere göre daha düşüktür. Kendi aralarında da farklılıklar göstermiştir. Borlanan numunelerin uzama oranlarının düşük olmasına, borlama işleminin 1050°C’de 6 saat gibi yüksek sıcaklık ve uzun sürelerde yapılmasından kaynaklanan tane irileşmesi ve bazı fazların oluşması neden olabilir. C. M. Suh ve arkadaşları [111], borlanan SS41 çeliğinin çekme mukavemetinin borlanmamışa göre hafif olarak azaldığını, akma mukavemetinin ise dramatik şekilde azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca, borlanan SUS304 paslanmaz çeliğinde akma mukavemetinin dramatik bir şekilde değişmediğini, sünekliğin ise arttığını bildirmiştir.

%25 FeSi katkılı banyo ile borlanan numunede, borür tabaka kalınlığı 85,07 μm 'dır ve homojen yapıya sahiptir. Basma yönündeki kalıntı gerilme miktarı -1424,6 MPa'dır. %25 FeTi katkılı banyo ile borlanan numunede, borür tabaka kalınlığı 40,01 μm 'dır ve homojen yapıya sahiptir. Ancak, yapıda gözenekler mevcuttur. Basma yönündeki kalıntı gerilme miktarı -1953,6 MPa'dır. FeTi katkılı banyo ile borlanan numunelerin tabaka kalınlığı, basma yönündeki kalıntı gerilme miktarları ve mevcut fazların sertliği yüksek olmasına rağmen, yapıdaki gözeneklilikten dolayı, FeSi katkılı banyo ile borlanan numunelerin akma mukavemetleri daha yüksektir. Ancak, tabaka kalınlığı ve yüzeydeki basma yönündeki kalıntı gerilme miktarının ve sertlik değerlerinin yüksek olması yüzünden, en yüksek çekme dayanımına karşın düşük uzama değerleri vermektedir. Ticari ekabor 2 ile kıyaslandığında %25 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkılı banyolarla borlanan numunelerin akma ve çekme mukavemetleri daha yüksektir. Borlanmamış numunelerle kıyaslandığında ise %25 katkılı FeTi banyo ile borlanmış numunelerin akma ve çekme mukavemetleri yüksektir.

Sıcaklığın 850 °C'den 1050 °C'ye yükselmesiyle borür tabakasının basma yönündeki kalıntı gerilme miktarları, %25 oranında yapılan FeSi, FeTi, SiC katkılı banyolarla ve Ekabor 2 banyosu ile yapılan borlamalarda, sırayla, 1,1 kat, 3 kat, 3 kat ve 2,5 kat artmıştır. Borür tabakalarının basma yönündeki kalıntı gerilme miktarlarındaki artışlar, borlanmış numunelerin yorulma dayanımını ve yorulma dayanım sınırlarının artmasına etki eder.

%5,3 SiC ve %42,9 FeSi ve SiC katkılı banyo ile 1050°C'de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarına uygulanan Rockweel C testinde, borür tabakasında çatlamlar ve dökülmeler gözlenmemiştir. %5,3 FeSi ve FeTi ve %25 FeSi, FeTi ve SiC'da, %42,9 FeTi katkılı banyo ile 1050°C'de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarına uygulanan Rockweel C testinde ise, test izi etrafında çok küçük çatlamlar gözlenmiş, ancak iz etrafında dökülmeler gözlenmemiştir.

%25 FeSi ve SiC katkılı banyolar ile ve Ekabor 2 banyosu ile 1050°C'de 2 saat süre ile, %25 FeSi katkılı banyo ile, Ekabor 2 banyosu ile 1050°C'de 4 saat süre ile, Ekabor 2 banyosu ile 1050°C'de 6 saat süre ile %25 FeSi katkılı banyo ile, Ekabor 2 banyosu ile 1050°C'de 8 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarına uygulanan Rockweel C testinde, borür tabakasında çatlamlar ve dökülmeler

gözlenmemiştir. %25 FeTi katkılı banyo ile 1050°C’de 2 saat süre ile, %25FeTi ve SiC katkılı banyo ile 1050°C’de 4 saat süre ile, %25 FeSi, FeTi ve SiC katkılı banyo ile 1050°C’de 6 saat süre ile ve %25 FeTi ve SiC katkılı banyo ile 1050°C’de 8 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarına uygulanan Rockweel C testinde ise, test izi etrafında çok küçük çatlamlar gözlenmiştir.

Sonuç olarak, yukarıda verilen açıklamalardan, ışık mikroskobundaki Rockweel C izi görüntülerinden, farklı banyo bileşimlerinde ve farklı sıcaklık ve sürelerde yapılan borlamada oluşan borür tabakalarının özellik sınıflandırılmasının HF1 ve HF2 seviyesinde olduğu anlaşılmaktadır.

Rockweel C izlerinin SEM incelemelerinde, borür tabakalarındaki izin batıcı uçla uygulanan kuvvet sonucunda deformasyonla oluştuğu, bu deformasyonla çevresel çatlakların meydana geldiği, ancak deformasyonun ize dik çatlaklar oluşturmadığı görülmektedir. SEM görüntüleri de borür tabakalarının özellik sınıflandırılmasının HF1-HF2 seviyesinde olduğunu doğrulamaktadır.

Borlanmış malzemelerin yüzey sertlik değerleri, sıcaklık ve süreye bağlı olarak artmaktadır. Borlanmamış AISI 316 L paslanmaz çelik numunenin sertliği 170 HV’dır. Borlanmış malzemelerin yüzey sertlik değerleri borlanmamış çelik malzemeye kıyasla, sıcaklık ve süreye bağlı olarak 9,1 – 12 kat daha yüksektir. Ş. Taktak [96], AISI 304 paslanmaz çeliğin borlanması sonucunda yüzey sertlik değerlerinin, borlanmamış çelik malzemeye kıyasla, sıcaklık ve süreye bağlı olarak 7,4 – 11 kat daha yüksek olduğunu bulmuştur.

1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saatte %5,3, 25 ve 42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilaveli kalsine boraks ve kalsine borik asit banyosu ile borlanmış numunelerin kırılma tokluğu değerleri, borlama süresinin ve dolayısıyla borür tabaka sertliğinin artmasıyla düşmektedir. Bu sonuçlar literatürle uyum içindedir [54, 112, 114, 115]. Bunun yanında banyo bileşimine yapılan katkıların kırılma tokluğuna etkisi de incelenmiştir. Banyoya yapılan katkıların oranlarının artmasıyla kırılma tokluğu düşmektedir. 1050°C’de banyo bileşimine farklı katkılarla borlanan malzemelerde en düşük kırılma tokluğu değerlerine, tüm borlama sürelerinde FeTi katkılı banyolarla borlanan numuneler sahiptir.

1050°C’de 2 saatte ekabor 2 banyosu ile borlanmış AISI 316 L malzemesinde en yüksek kırılma tokluğu değeri 3,33 olarak bulunmuştur. Borlama süresinin artması ile tüm borlama banyolarında kırılma tokluğu değerleri borür tabakasındaki sertliğin artmasıyla düşmektedir. P.H. Kobrin ve arkadaşı [110], taban malzemedeki çekme mukavemetinin yüksek olmasının, borür tabakasının kırılma tokluğunu azaltacağını bildirmiştir. Tez çalışmasındaki deney sonuçlarıyla benzer özellik taşımaktadır.

Elde edilen yüzey kırılma tokluğu değerleri bir çok seramik malzeme ile rekabet edecek düzeydedir. Örneğin Pyrex camı (2,7-4,2 MPa m^{1/2}), Cam seramikler (2,4 MPa m^{1/2}), TiO₂ (2,5 MPa m^{1/2}), Saf Alümina (2,7-4,2 MPa m^{1/2}), TiB₂ (6-8 MPa m^{1/2}), Sinter Karbür (5-18 MPa m^{1/2})[52].

Borür tabakasının kırılma tokluğu, taban malzemedeki alaşım elementlerinin mevcudiyetine bağlıdır. Taban malzemedeki Cr elementi, borür tabakasının kırılma tokluğu üzerinde negatif etkiye sahiptir [109]. Ş. Taktak [96], AISI 304 paslanmaz çeliğin borlanması sonucunda kırılma tokluk değerlerinin azalmasında, sıcaklık ve zamanın önemli derecede bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir.

Borlanmamış, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin yorulma dayanım sınırları sırasıyla 749, 614, 749, 658 ve 591 MPa’dır (Şekil 10.27).

Yorulma dayanım sınırları banyoya yapılan FeSi, SiC katkısıyla ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin borlanmamış numunelerle kıyaslandığında YDS sırasıyla %18, %12,1 ve %21,1 oranında azaldığı, FeTi katkısıyla borlanmış numunelerde ise değişmediği görülmektedir. FeSi, FeTi ve SiC katkısıyla borlanmış numunelerin ticari ekabor 2 ile borlanmış numunelerle kıyaslandığında ise YDS sırasıyla %3,9, %26,7 ve %11,3 oranında arttığı görülmektedir (Tablo 10.17, Şekil 10.26-10.27 ve Şekil A.43-A.44). Borür tabakalarında oluşan çatlakların ve boşlukların yorulma ömrünü azalttığı düşünülmektedir (Şekil A.2 ve A.12).

M. A. Golozar [86], az karbonlu çelikler ile düşük alaşımlı Cr-Mo çeliklerinin yorulma davranışına borlamanın etkisini incelemiştir. Yorulma deneyleri sonucunda, borlanmış az karbonlu çelikler, işlem görmemiş hallerine göre yorulma dayanımları % 50 artmasına rağmen, borlanmış düşük alaşımlı Cr-Mo çeliklerinin işlem görmemiş ilk hallerine kıyasla yorulma dayanımları %26 azalmaktadır. Ayrıca,

borlanmış tüm numunelerin sertleştirilip temperlendikten sonraki yorulma dayanımları, işlem görmemiş ilk hallerine göre azalma kaydetmiştir. Bunun sebebi, çeliğin yapısında bulunan Cr ve Mo elementleridir. Cr ve Mo, borür tabaka kalınlığını azaltmaktadır. Cr, tane sınırları boyunca da dahil olmak üzere borür tabakasının altında Cr ve/veya Cr_xB_y şeklinde dağınık adacıklar oluşturmaktadır. Mikroyapıdaki bu özellikler yorulma dayanımını azaltır. Borür tabakasında bu elementlerin varlığı nedeniyle mikroyapısal çatlaklar oluşmakta, oluşan mikroyapısal çatlaklar da yorulma ömrünü azaltmaktadır.

S. S. Yılmaz [87], borlama ve bilyalı dövmenin demir esaslı T/M malzemelerde yorulma davranışına etkisini incelemiştir. Borlanmış ve bilyalı dövme işleminden sonra borlanmış numunelerin, borlanmamış numunelere kıyasla yorulma dayanımları, sırasıyla 98, 92 ve 76 MPa olarak gerçekleştiğini bildirmiştir.

Gerilme genliği ile çevrim sayısı arasındaki ilişki Basquin [104] tarafından önerilen ifadelerden oluşan basit parametrik ilişkiyle ifade edilir. Basquin bağıntısındaki S'_f sabiti yorulma dayanım katsayısını, b ise yorulma dayanım üssünü ifade etmektedir. Her iki sabit, malzeme özelliklerine ve test koşullarına bağlıdır.

Çelik numunelerin yüzey özelliklerini geliştirmek için banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkısıyla, ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerden herhangi bir komponentin yüksek çevrimli yorulma altında dizayn amaçlarının ve yorulma ömrünün değerlendirilmesinde test edilen tüm koşullar için bu iki sabit değerler ile borlanmamış çelik numuneye ait değerler Tablo 10.18 verilmiştir. Yorulma dayanım katsayı sabiti (S'_f) ile yorulma dayanım üssü'nün (b) büyümesi ile sırasıyla FeTi, SiC, FeSi ve ticari ekabor 2 ile borlanmış numunelerin yorulma dayanım sınırları ve yorulma ömürleri yükselmektedir. b değeri birçok metal için -0,05 ila -0,12 değerleri arasındadır [104,105].

Borlanmış numuneler borlanmamış numunelerle kıyaslandığında, 773 MPa gerilme genliklerinde FeTi katkısında %70,81, SiC katkısında %76,07, FeSi katkısında %81,31, ticari ekabor 2'de ise %82,51 oranında yorulma ömründe azalma olurken, 887 MPa gerilme genliğinde sırasıyla %50,10, %63,92, %79,52 ve % 87,05 oranında yorulma ömründe azalma olmaktadır. Sonuç olarak, FeTi, SiC ve FeSi katkısıyla borlanmış numunelerde borlanmamış numunelerle kıyaslandığında gerilme

genliğinin 773 MPa'dan 887 MPa'a yükseldiğinde yorulma ömründe azalma olurken, Ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerde ise yorulma ömründeki azalmada artış olmaktadır (Şekil 10.28).

FeSi, FeTi ve SiC katkısıyla borlanmış numunelerin ticari ekabor 2 ile borlanan numunelerle kıyaslandığında ise 773 MPa gerilme genliklerinde FeTi katkısında %70,55, SiC katkısında %43,13, FeSi katkısında ise %6,87 oranında yorulma ömründe artış olurken, 887 MPa gerilme genliğinde sırasıyla %320,79, %270,36 ve %70,46 oranında yorulma ömründe artış olmaktadır. Sonuç olarak, FeTi, SiC ve FeSi katkısıyla borlanmış numunelerde ticari ekabor 2 ile kıyaslandığında gerilme genliğinin 773 MPa'dan 887 MPa'a yükseldiğinde yorulma ömründe artışlar olmaktadır (Şekil 10.29).

ASTM E739'a göre çizilen grafiklerde, borlanmamış, FeSi katkısıyla ve ticari ekabor 2 ile borlanmış numunelerin FeTi ve SiC katkısıyla borlanmış numunelere kıyasla %95'lik emniyet bandında büyük bir dağılım göstermektedir. FeTi ve SiC katkısıyla borlanmış numunelerde ise %95'lik emniyet bandı son derece küçüktür (Şekil A.38).

Borlanmamış numunelerin, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin 796 ve 887 MPa olmak üzere iki farklı gerilme genliğinde stereo mikroskop ile yorulma kırık yüzey görüntüsü incelendiğinde her iki gerilme genliğinde de birden fazla çatlak başlangıç bölgesi, yorulma çatlağının ilerlediği bölge oldukça düzdür ve yorulma izleri bulunmakta ve son kırılma yüzeyinde ise kademe söz konusudur (Şekil A.46).

Borlanmamış numunelerin, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin 796 ve 887 MPa olmak üzere iki farklı Gerilme genliğinde taramalı elektron mikroskop ile yorulma kırık yüzey görüntüsü incelendiğinde, numunelerin kenarındaki çatlak başlangıç bölgeleri kırılma izlerinden bulunmuştur. Çatlak, kırılma yüzeyi boyunca dalgalı şekilde ilerlemektedir. Ayrıca yorulma kırık yüzeylerinde ince yorulma çizgileri görülmektedir. Numunelerin yorulma kırık yüzeyleri incelendiğinde, çatlak başlangıcı ve çatlak ilerlemesindeki bölgelerde sünek kırılma karakteristiği görülmektedir (Şekil A.40-41).

Genel sonuç olarak, FeTi katkılı banyolarla borlanan numunelerin özellikleri, FeSi, SiC katkılı banyolarla, Ekabor 2 banyosuyla borlanan ve borlanmamış numunelerle kıyaslandığında (Çizelge 11.1); Sertlik değerinin, çekme mukavemeti değerinin, kalıntı gerilme değerinin yüksek, Kırılma tokluk değeri ve Yüzey pürüzlülük değeri düşüktür. Bu özelliklerin YDS'ına olumlu etkisi nedeniyle FeTi katkılı banyolarla borlanan numuneler en yüksek değer vermiştir. FeTi katkılı banyo ile borlanmış numunelerin yorulma özellikleri borlanmamış numunelere yakındır.

Çizelge 11.1: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle ve Ekabor 2 banyosuyla 1050°C'de 6 saat süre ile borlanmış ve borlanmamış numunelerin test edilen özelliklerinin kıyaslanması.

Özellikler	BULUNAN DEĞERLER				
	Borlanmamış	%25 FeSi	%25 FeTi	%25 SiC	Ekabor 2
Çekme Mukavemeti, (s_c, MPa)	628,6	607,8	641,7	609,3	573,7
Orantı sınırı, (s_a, MPa)	352,3	444,2	380,4	347,3	323,7
YDS, MPa	749	614	749	658	591
Kalıntı Gerilme, MPa	-	1424,6	1953,6	1241,2	269,6
Sertlik, HV	170	1992	2011,7	1989	1718,1
Kırılma Tokluğu,	-	2,11	1,73	2,16	3,07
YDS/Çekme Mukavemeti	1,19	1,01	1,17	1,08	1,03
YDS/Akma Mukavemeti	2,13	1,38	1,97	1,89	1,83
S'_f	1374	1360	2714	1148	1485
b	-0,102	-0,1112	-0,1713	-0,0911	-0,1017
Yüzey Pürüzlülük (µm)	0,15	1,15	0,8	1,1	1,6

Yayınlanmış çalışmalarda, borlanmış çeliklerde Cr ve Mo elementlerinin yorulma dayanım sınırını azalttığı belirtilmektedir. Bu çalışmalarda; çeliğin yapısında bulunan Cr ve Mo elementlerinin, borür tabakasının kalınlığını azalttığı, kromun, tane sınırları boyunca da dahil olmak üzere borür tabakasının altında Cr ve / veya Cr_xB_y

şeklinde dağınık adacıklar oluşturduğu ve mikroyapıdaki bu özelliklerin yorulma dayanımını azalttığı rapor edilmektedir. Borür tabakasında Cr, Mo elementlerinin varlığı nedeniyle açıklandığı gibi mikroyapısal çatlaklar oluşmakta, oluşan mikroyapısal çatlaklar da yorulma ömrünü azaltmaktadır.

Yaptığımız çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, literatürde belirtilen Cr ve Mo'nin bu olumsuz etkisine rağmen, FeTi ile yapılan borlama da homojen ve yoğun yüzeyli borür tabakalı numunelerin yorulma dayanım sınırları borlanmamışlarla aynı değerlerde olmuştur.

Ceschini ve Minak [106] düşük sıcaklıkta karbürleme ile AISI 316L ostenitik paslanmaz çelik yüzeyinde 30 µm kalınlığında demir ve krom karbür çökmesi olmaksızın karbonca aşırı doymuş ostenit fazı oluşturdukları ve bu işlemin dönel eğmeli yorulma dayanımına etkisini inceledikleri çalışmalarında düşük sıcaklıkta karbürlenmiş numunelerin dönel eğmeli yorulma testi sırasında numunelerde maksimum 600 °C'ye varan bir sıcaklık artışı meydana geldiğini ve numunelerin eğilmek suretiyle deformasyon gösterdiğini belirlemişlerdir. Aynı zamanda gerilmenin artmasıyla birlikte bu maksimum sıcaklık değerine ulaşmak için daha düşük çevrim sayısına ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir. Yorulma deneyi sırasında meydana gelen bu sıcaklık artışının yüzeyi sertleştirilmiş tabakanın hemen altında malzemenin çevrimsel plastik şartları ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Karbürleme ile sağlanan yüksek malzeme dayanımı ve yüzeydeki yüksek basma kalıntı gerilmelerinin, test gerilme seviyelerinin statik akma gerilmesi seviyelerine (hatta üstüne) yükselmesine izin verdiğini, bununla birlikte bu kalıntı gerilmelerin sertleştirilmiş tabakanın hemen altındaki çekme gerilmeleri ile dengelenmekte olduğunu, bunun da yüksek seviyede çevrimsel plastikliğe ve enerji harcanmasına yol açtığını vurgulamışlardır.

12. SONUÇLAR

AISI 316 L tipi paslanmaz çelik malzemelerin yüzeylerinin FeSi, FeTi, SiC içeren boraks+borik asit ve ticari ekabor 2 banyosunda borlanması ile ilgili yapılan çalışmalarla aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Borlama işleminde oluşan borür tabakasının kalınlığı sıcaklık, süre ve FeSi, FeTi ve SiC katkıların oranının artmasıyla artmaktadır. En büyük tabaka kalınlığına düşük oranlardaki katkılarda FeTi ile, yüksek oranlardaki katkılarda, kalsine borik asit / boraks oranı düşük iken FeTi ile, yüksek iken FeSi ile sağlanmaktadır.
2. Banyodaki borik asit oranının artması borür tabakasının kalınlığını ve banyonun akışkanlığını arttırmaktadır. Katkılarının oranlarının artmasıyla banyo akışkanlığı azalmaktadır.
3. Borlama işleminde borür tabakasındaki artışta sıcaklığın etkisi yüksek orandaki katkılarla daha belirgindir. Ti en büyük etkiye sahiptir.
4. Numunelerin yüzeyinde oluşan borür tabakaları süreklidir. FeTi katkılı banyo ile oluşan borür tabakasının yüzeyi en homojen ve en yoğun, FeSi katkılı banyo ile oluşan borür tabakasının yüzeyi en kaba tanelidir.
5. Borlanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri borlama sıcaklığının ve banyoya yapılan katkıların oranlarının artmasıyla artmaktadır. Borlama süresinin ve katkı maddeleri cinslerinin pürüzlülüğe etkisinde ise ilişki bulunmamaktadır. Ancak, 1050 °C’ de yapılan borlama ile elde edilen numunelerden %25 FeTi ilavesiyle borlanmış numunenin yüzey pürüzlülük değeri, diğer katkılarla borlananlara göre düşüktür.
6. Tüm banyo bileşimlerinde borlama ile oluşan borür tabakasında temel faz Fe₂B fazıdır. FeTi ve SiC katkılı banyolarla borlamada FeB fazı oluşmazken, FeSi katkılı ve Ekabor 2 ile banyolarla borlamada FeB fazı oluşmuştur.

7. Borlama işlemi malzemenin akma mukavemetini arttırmıştır. En yüksek değeri FeSi katkılı banyo ile borlanan numune vermiştir. Borlanan numunelerin çekme deneyindeki uzama oranları, orjinal numunelere göre daha düşüktür.
8. Borür tabakasının basma yönündeki kalıntı gerilme miktarları sıcaklığın artmasıyla artmaktadır. Sıcaklığın 850 °C'den 1050 °C'ye yükselmesi kalıntı gerilme miktarını, %25 oranındaki FeSi, FeTi, SiC katkıları ve Ekabor 2 ile, sırayla, 1,1 kat, 3 kat, 3 kat ve 2,5 kat arttırmıştır.
9. Borür tabakasında batıcı uçla oluşturulan deformasyonda çevresel çatlaklar meydana gelmekte, uygulanan yük noktasına dik çatlaklar oluşmamaktadır. Borür tabakalarının özellik sınıflandırılması HF1-HF2 seviyesindedir.
10. Borlanmış malzemelerin yüzey sertlik değerleri, borlama işleminin sıcaklığına ve süresine bağlı olarak artmaktadır. Borlanmış malzemelerin yüzey sertlik değerleri borlanmamış AISI 316 paslanmaz çelik malzemeye göre 9 – 12 kat daha yüksektir.
11. Borlama süresinin ve katkı oranlarının artması ile borür tabakasının kalınlığı ve sertliği artmakta, kırılma tokluğu düşmektedir. En düşük kırılma tokluğu FeTi katkılı banyosuyla oluşan borür tabakasında, en yüksek kırılma tokluğu da ekabor 2 banyosuyla oluşan borür tabakasında elde edilmiştir.
12. Borlanmamış ve banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin yorulma dayanım sınırları sırasıyla 749, 614, 749, 658 ve 591 MPa'dır. FeSi, SiC katkılı banyolarla ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin yorulma dayanım sınırları borlanmamış numunelere göre azalmıştır. FeTi katkısıyla borlanmış numunelerin yorulma dayanım sınırları borlanmamışlarla aynı değerlerdedir. Ticari ekabor 2 ile borlanmış numuneler en düşük yorulma dayanım sınırına sahiptir.
13. FeSi, FeTi ve SiC katkılı banyo ile ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerde yorulma dayanımı; borlanmamış numunelere göre gerilme genliğinin artması ile azalmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Bindal, C.**, 1991. Az alaşımlı çelikler ve ticari karbon çeliklerinde borlama ile yüzeye kaplanan borür tipi seramik kompozitlerin bazı özelliklerinin tespiti, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Yapar, U.**, 2003. Düşük ve orta karbonlu çeliklerin termokimyasal borlama ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesi, *Y. Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Başman, G.**, 1998. GGG 40 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin yorulma davranışına TiN kaplamanın etkisi, *Y. Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Sinha, A.K.**, 1991. Boriding (Boronizing), ASM Handbook, *J. Heat Treating*, OH, USA., **4**, 437-447.
- [5] **Yan, P.X., Song, Q.M., Xu, J.W., Wu, Z.G., Zhang, X.M.**, 2001. High-temperature behavior of the boride layer of 45# carbon steel, *Materials Chemistry and Physics*, **71**, 107-110.
- [6] **Bozkurt, N.**, 1984. Bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] **Baydoğan, M., Başman, G., Mindivan, H., Arısoy, F., Çimenoglu, H., Şeşen, M.K.**, 2003. Çeliklerin Sınıflandırılması, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası*, Isdemir, Iskenderun.
- [8] **Berrios, J.A., Teer, D.G., Puchi-Cabrera, E.S.**, 2001. Fatigue properties of a 316L stainless steel coated with different TiN_x deposits, *Surface and Coatings Technology*, **148**, 171-190.
- [9] **Url-1** <www.boren.gov.tr>, alındığı tarih 26.12.2008.
- [10] **TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası**, 2003. Bor Raporu, *Metalurji Dergisi*, **134**, 11-72.
- [11] **Matuschka, A.G.**, 1980. *Boronising*, Carl Hanser Verlag, München.
- [12] **Yapar, U., Başman, G., Arısoy, C.F., Şeşen, M.K.**, 2002. Çeliklerde Borlama Yoluyla Yüzey Sertleştirme, *Metal Dünyası*, 115, 69-74.
- [13] **Hocking, M.G., Vasantasree, V. and Sidky, P.S.**, 1989. *Metallic and Ceramic Coatings*, John Wiley & Sons Inc., Newyork, pp. 1-2.
- [14] **Graf, A. and Matushcka, W.**, 1997. *Borieren*, , Carl Hanser Verlag, München, Wien, pp.1-87.
- [15] **Rus J., Luis de Leal C., Tsipas D.N.**, 1985. Boronizing of 304 Steel. *J. Materials Science Letters*, **4**, 558-560.
- [16] **Hegewaldt F., Singheiser L., Türk M.**, 1984. Gasborieren. *HTM*, **39**, 1, 7, 15.

- [17] **Seong, H.H. and John, S.C.**, 1980. A Study on electroboronizing of steel by superimposed cyclic current, *J. Materials Science*, **15**, 1379-86.
- [18] **Geoeuriot P., Fillet R., Thevenot F., Driver J.H., Maging T.**, 1983. Methods for Examining Brittle Layers Obtained by a Boriding Surface Treatment (Borudif), *Wear*, **86**, 1-10.
- [19] **Hegevaldt, F., Singheiser, L. and Türk, M.**, 1984. Gas Borieren, *HTM*, München, pp.39.
- [20] **Samsanov, G. V. and Epik, A. P.**, 1966. *Coatings of high temperature materials*, Ed. Hausner, H.H., Plenum Pres, pp.35.
- [21] **Knitek, O., Lugscheider, E. and Leuschen, K.**, 1983. Surface layer on cobalt base alloys by boron diffusion, *Thin Solid Films*, **45**, 331-339.
- [22] **Carbucicchio, M., Badini, C. and Palombarini, G.**, 1980. Mössbauer and metallographic analysis of borided surface layers on Armco iron, *J. Materials Science*, **15**, 711-719.
- [23] **Hayashi, Y. and Sugeno, T.**, 1970. Nature of boron in a iron, *Acta Metallurgica*, **18**, 693-697.
- [24] **Soydan, Y.**, 1996. Katı ortamda bor yayınımlı ile sertleştirilen çelik yüzeylerinin kuru kayma halinde sürtünme ve aşınma davranışları, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [25] **Brakman, C.M., Gommers, A.W. J. and Mittemeijer, E.J.**, 1989. Boriding of iron and Fe-C, Fe-Cr, Fe-Ni Alloys: Boride layer kinetics, *J. Materials Research*, **23**, 3061-3066.
- [26] **Campos, I., Oseguera, J., Figueroa, U., Garcia, J.A., Bautista, O. and Kelemenis, G.**, 2003. Kinetic study of boron diffusion in the paste boriding process, *Materials Science & Engineering A*, **A00**, 1-5.
- [27] **Palombarini, G. and Carbucicchio, M.**, 1984. On the morphology of thermochemically produced Fe₂B/Fe interfaces, *J. Materials Science Letters*, **3**, 791-794.
- [28] **Carbucicchio, M., Badini, C. and Samboga, G.**, 1980. On the early stages of high purity iron boriding with crystalline boron powder, *J. Materials Science*, **15**, 1483-1490.
- [29] **Rus, J., Luis C. and Tsipas, D.N.**, 1985. Boronising of 304 steel, *J. Materials Science Letter*, **4**, 558-560.
- [30] **Galibois, A., Boutekno, O. and Voyzele, B.**, 1980. Mechanisme de formation des couches borurees sur les aciers a haut, Carbone-II, Technique des poudres, *Acta Met.*, **28**, 1765-1771.
- [31] **Xu, C.H., Gao, W. And Yang, Y.L.**, 2001. Superplastic boronizing of a low alloy steel - microstructural aspects, *J. Materials Processing Technology*, **108**, 349-355.
- [32] **Sighnal, S.C.**, 1977. A hard diffusion boride coating for ferrous materials, *Thin Solid Films*, **45**, 321-329.

- [33] **Brakman, C.M., Gommers, A.W. J. and Mittemeijer, E.J.**, 1989. Boriding of iron and Fe-C, Fe-Cr, Fe-Ni Alloys: Boride layer kinetics, *J. Materials Research.*, **23**, 3061-3066.
- [34] **Berzina, I.G., Gusev, E.B., Fedina, G.N. and Fedin, V.M.**, 1984. Investigation of boron diffusion during boronizing of engineering steel 45, *Phys. Met. Metall.*, **57**, 81-84.
- [35] **Lu, M.J.**, 1983. Die bildungs und wachstums kinetik monophsiger boridschichten, *HTM*, **38**, 156-168.
- [36] **Fichtl, W., Trausner, N. and Matuschka, A.G.**, 1987. *Borieren Mit Ekabor*, ESK GmbH.
- [37] **Carbucicchio, M. and Palombarini, G.**, 1987. Effects of alloying elements on the growth of iron boride coatings, *J. Materials Science Letters*, **6**, 1149-1145.
- [38] **Goeuriot, P., Fillit, R., Thevenot, F., Driver, J.H. and Bruyas, H.**, 1981. The influence of alloying element additions on the boriding of steel, *Materials Science and Engineering*, **55**, 9-19.
- [39] **Blazon, M., Stanojevic, B. and Veljkovic, V.**, 1975. Effect of alloying elements on the the formation of boride layer on steel, *Scripta Metallurgica*, **9**, 1153-1156.
- [40] **Badini, C., Cianoglio, C., Paradelli, G.**, 1987. The effect of carbon, chromium and on the hardness of borided layers, *Surface and Coatings Technology*, **30**, 157-170.
- [41] **Paradelli, G., Cianoglio, C., Badini, C.**, 1986. Balance of distribution of some transition metals between the $(M' M'')B$ and $(M' M'')_2B$ Phases, *Met. Transactions A*, **17**, 1665-1669.
- [42] **Özsoy, A.**, 1991. Çeliğin borür tabakası, geçiş zonu ve ana matrisin özelliklerinin iyileştirilmesi, *Doktora Tezi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- [43] **Carbucicchio, M., Palombarini, G. and Cento, L.**, 1984. Electron probe microanalysis of nickel and chromium in Fe-C-Ni and Fe-C-Cr alloys borided at 850°C, *J. Materials Science*, **19**, 3732-3738.
- [44] **Liliental, W. and Tacikowski, J.**, 1980. Effect of heat treatment on the brittleness of boride layers on steel, *Industrial Heating*, **47**, 34-36.
- [45] **Eyre T.S.**, 1975. Effect of Boronising on Friction and Wear of Ferrous Metals. *Wear*, **33**, 383-397.
- [46] **Budinski K.G.**, 1993. The Wear of Diffusion Treated Surfaces, *Wear*, **162-164**, 757-762.
- [47] **E. Melendez *, I. Campos, E. Rocha, M.A. Baron**, 1997. *Materials Science & Engineering*, **A234-236**, 900-903.
- [48] **Yoon, J. H., Jee, Y. K., Lee, S.Y.**, 1999. *Surface and Coatings Technology*, **112**, 71-75.
- [49] **Babushkin, B.V. and Polyakov, B.Z.**, 1973. Residual stresses in steel after boriding from melts, *Met. Science Heat Treatments*, **15**, 7-8.

- [50] **Ozbek, I. and Bindal, C.**, 2002. Mechanical properties of boronized AISI W4 steel, *Surface and Coatings Technology*, **154**, 14-20.
- [51] **Sen, S., Ozbek, I., Sen, U., Bindal, C.**, 2001. *Surface and Coatings Technology*, **135**, 173-177.
- [52] **Ozbek, I. and Bindal, C.**, 2002. Mechanical properties of boronized AISI W4 steel, *Surface and Coatings Technology*, **154**, 14-20.
- [53] **Üçışık, A.H. and Bindal, C.**, 1997. Fracture toughness of boride formes on low alloy steels, *Surface and Coatings Technology*, **94-95**, 561-565.
- [54] **Bindal, C. and Üçışık, A.H.**, 1999. Characterization of borides formed on impurity-controlled chromium-based low alloy steels, *Surface and Coatings Technology*, **122**, 208-213.
- [55] **Gianoglio C., Badini C.**, 1986. Distribution Equilibria of Iron Nickel in Two Phase Fields of the Fe-Ni-B System, *J.Mater. Sci.*, **21**, 4331-4334.
- [56] **Karamış M. B.**, 1991. Tribological Behavior of Plasma Nitrided Material Under Dry Sliding Conditions, *Wear*, **147**, 385-399.
- [57] **DIN 50320 Standard**, 1979. Wear; Terms. Systematic Analysis of Wear Process. Classification of Wear Phenomena, *DIN Standard*, GERMANY.
- [58] **G40-02 Standard**, 2002. Standart Terminology Relating to Wear and Erosion, *ASTM International*, US.
- [59] **ASM International Handbook Committee.**, 1992. ASM Handbook Volume 20: Materials Selection, *ASM International*, US.
- [60] **Bahadur, S.**, 1996. Effect of Surface Coatings and Treatments on Wear, *ASTM International*, US.
- [61] **Stachowiak, G.W. and Andrew, W.B.**, 2001. Engineering Tribology, *Butterworth Heinemann*, US.
- [62] **ASM International Handbook Committee.**, 1992. ASM Handbook Volume 18: Friction, Lubrication and Wear, *ASM International*, US.
- [63] **ASM International Handbook Committee.**, 1992. ASM Handbook Volume 11: Failure Analysis and Prevention, *ASM International*, US.
- [64] **Finnie, I.**, 1995. Some reflections on the past and future of erosion, *Wear*, **186-187**, 1-10.
- [65] **Oka, Y.I., Ohnogi, H., Hosokawa, T. and Matsumura. M.**, 1997. The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact, *Wear*, **203-204**, 573-579.
- [66] **Levy, A.V.**, 1981. The solid particle erosion behavior of steel as a function of microstructure, *Wear*, **68**, 269-287.
- [67] **Geoeuriot, P., Thevenot, F., Driver, J.H., Magnin, T.**, 1983. Methods for examining brittle layers obtained by a boriding surface treatment (Borudif), *Wear*, **86**, 1-10.

- [68] **Özmen Y., Çetincan A.**, 1992. Borlamanın Çeliklerde Aşınma Dayanımına Etkisi, 5. *Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, 583-591, Ankara.
- [69] **Hunger H., True G.**, 1994. Boronizing to Produce Wear-resistant Surface Layers, *Heat Treatment of Metals*, **2**, 31-39.
- [70] **Habig K.H., Chatterjee-Fisher R.**, 1981. Wear Behaviour of Boride Layers on Alloyed Steels, *Tribology International*, 209-215.
- [71] **B. S. Mann**, 1997. Boronizing of cast martensitic chromium nickel stainless steel and its abrasion and cavitation-erosion behaviour, *Wear*, **208**, 125-131.
- [72] **P.X.Yan, Y.C.Su**, 1995. *Materials Chemistry and Physics*, **39**, 304-308.
- [73] **B. Selcuk, R. Ipek, M. B. Karamis, V. Kuzucu**, 2000. *Journal of Materials Processing Technology*, **103**, 310-317.
- [74] **Moore, M.A.**, 1974. The relationship between the abrasive Wear Resistance, Hardness and microstructure of ferritic materials, *Wear*, **28**, 59-95.
- [75] **Lang E.**, 1986. Boronizing, *Coating for High Temperature Applications*, 417-422, U.S.A.
- [76] **Demirci H.**, 1996. Fe-Esaslı Malzemelerin Borlanması ile Kavitasyon Dayanımının Değişimi, 7. *Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, 261-269, Ankara.
- [77] **Tsipas D.N., Rus J.**, 1987. Boronizing of Alloys Steels, *J.Materials Science Letters*, **6**, 118-120.
- [78] **Subrahmanyam J., Gopinath K.**, 1984. Wear Studies on Boronized Mild Steel, *Wear*, **95**, 293-311.
- [79] **Uetz H., Wlassow W.**, 1980. Kinetik und Mechanismen des Verschleisses von Boridschichten by Trockener Gleitreibung. *Wear*, **64**, 231-243.
- [80] **Takeuchi E., Fujii K., Katagiri T.**, 1979. Sliding Wear Characteristics of Gas Boronized Steel, *Wear*, **55**, 121-130.
- [81] **Formanek B., Swadezba L., Macieljny A.**, 1993. Microstructure Wear Resistance and Erosion Resistance of Plasma-Sprayed Boride Coatings, *Surface and Coating Technology*, **56**, 225-231.
- [82] **Fichtl W.**, 1981. Boronizing and its Pratical Applications, *Materials in Engineering*, **2**, 276-286.
- [83] **Atik, E.**, 1997, Farklı bir Yüzey Sertleştirme Yöntemi, *Mühendis ve Makine*.
- [84] **Şen, S., Ozbek, I., Şen, Uğur. and Bindal, C.**, 2001. Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel, *Surface and Coatings Technology*, **135**, 173-177.
- [85] **Ruff, A.W. and Ives, L.K.**, 1975. Measurement of solid particle velocity in erosive wear, *Wear*, **35**, 195-199.
- [86] **Golozar, M. A.**, 2001. Effects Of Boronising On Fatigue Life Of Plain Carbon And Low Alloy Cr–Mo Steels, *Surface Engineering*, **17**, 1, 61-65.

- [87] **Yılmaz, S.S., Unlu, B.S., Varol, R.,** 2007. Borlama ve Bilyalı Dövmenin Demir Esaslı T/M Malzemelerde Yorulma Davranışına Etkisi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **1**, 61-68.
- [88] **VDI-Standard 3198,** 1992. Rockwell C Adhesion Indentation test, Daimler Benz Adhesion Test, *Verein Deutscher Ingenieure (VDI) Richlinie* 3198, 7.
- [89] **Han, S.H., Chun, J.S.,** 1980. A Study on The Electroboronizing of Steel by superimposed Cyclic Current, *Journal of Materials Science*, **15**, 1379-1386.
- [90] **Makyta, M., Chrenkova, M., Fellner, P., Matiasovsky, K.,** 1986. Mechanism of the Thermochemical Boriding Process and Electrochemical Studies in the Molten Systems Based $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, *Z. Anorg. Allg. Chem.*, **540/541**, 169-176.
- [91] **Spence, T.W., Makhlof, M.M.,** 2005. Characterization of the Operative Mechanism in Potassium Fluoborate Activated Pack Boriding of Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, **168**, 127-136.
- [92] **Şen, S., Şen, U., Bindal, C.,** 2005. The growth Kinetics of Borides Formed on boronized AISI 4140 Steel, *Vacuum*, **77**, 195-202.
- [93] **Şen, S., Şen, U., Bindal, C.,** 2005. An Approach to Kinetic Study of Boride Steels, *Surface&Coatings Technology*, **191**, 274-285.
- [94] **Dybkov, V.I., Lengauer, W., Barmak, K.,** 2005. Formation of Boride Layers at the Fe-%10Cr Alloy-Boron Interface, *Journal of Alloys and Compounds*, **398**, 113,122.
- [95] **Taktak, Ş.,** 2006. Tribological Behaviour of Borided Bearing Steels at Elevated Temperatures, *Surface & Coatings Technology*, **201**, 6, 2230-2239.
- [96] **Taktak, Ş.,** 2007. Some Mechanical Properties of Borided, *Materials&Design*, **28**, 6, 1836-1843.
- [97] **Ozdemir, O., Omar, M.A., Usta, M., Zeytin, S., Bindal, C., Üçışık, A.H.,** 2009. An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel, *Vacuum*, **83**, 175–179.
- [98] **Smith DL.,** 1995. *Thin-film deposition: principles and practice*, McGraw-Hill , New York.
- [99] **Tabakoff, W.,** 1999. Erosion resistance of superalloys and different coatings exposed to particulate flows at high temperature, *Surface and Coatings Technology*, **120–121**, 542–547.
- [100] **Das, S., Mondal, D.P. , Sawla, S.,** 2004. Solid Particle Erosion of Al Alloy and Al-Alloy Composites: Effect of Heat Treatment and Angle of Impingement, *Metallurgical And Materials Transactions A*, **35A**, 1369.
- [101] **Stachowiak, G.W., Andrew, W.B.,** 2001. *Engineering Tribology*, Butterworth Heinemann, US.
- [102] **ASTM E-468-90 Standard,** 2004. Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials, *ASTM Standart*, U.S.

- [103] **ASTM E-739-91 Standard**, 2004. Standard Practice for Linear or Linearized Stress Life (S-N) and Strain Life (ϵ -N) Fatigue Data, *ASTM Standard*, U.S.
- [104] **Lee, Y.L., Pan, J., Hattaway, R.B., Barkey, M.E.**, 2005. *Fatigue Testing and Analysis*, Butterworth Heinemann, US.
- [105] **Suresh, S.**, 1991. Phenomenological Approaches Based on Cyclic Stress and Cyclic Strain, *Fatigue of Materials*, pp. 126-140.
- [106] **Ceschini, L., Minak, G.**, 2008. Fatigue behaviour of low temperature carburised AISI 316L austenitic stainless steel, *Surface and Coatings Technology*, 202, 9, 1778-1784.
- [107] **Berríos, J. A., Teer, D. G., Puchi-Cabrera, E. S.**, 2001. Fatigue properties of a 316L stainless steel coated with different TiNx deposits, *Surface and Coatings Technology*, 148, 2-3, 179-190.
- [108] **Morimoto, J., Ozaki, T., Kubohori, T., Morimoto, S., Abe, N., Tsukamoto, T.**, 2009. Some properties of boronized layers on steels with direct diode laser, *Vacuum*, **83**, 185–189.
- [109] **Li, C., Shen, B., Li, G., Yang, C.**, 2008. Effect of boronizing temperature and time on microstructure and abrasion wear resistance of Cr12Mn2V2 high chromium cast iron, *Surface & Coatings Technology*, **202**, 5882–5886.
- [110] **P. H. Kobrin, P.H., Harker, A.B.**, 1989. The effects of thin compressive films on indentation fracture toughness measurements, *Journal of Materials Science*, **24**, 4, 1363-1367.
- [111] **Suh, C.M., Kim, S.H., Lee, J.H., Hwang, N.S.**, 2003. Variation of Boride Layer Characteristics by Heating Conditions and Materials, *International Journal of Modern Physics B*, **17**, 8-9, 1795-1800.
- [112] **Şen, U., Şen, S.**, 2003. The Fracture Toughness of Borides Formed on Boronized Cold Work Tool Steels, *Materials Characterization*, **50**, 261-267.
- [113] **Şen, S.**, 2005. The Characterization of Vanadium Boride Coatings on AISI 8620 Steel, *Surface & Coatings Technology*, **190**, 1, 1-6.
- [114] **Yapar, U., Basman, G., Arisoy, C.F., Yesilcubuk, S.A., Şeşen, M.K.**, 2004. Influence of Boronizing on Mechanical Properties of EN-C35E Steels, *Key Engineering*, **264-268**, 629-632.
- [115] **Yapar, U., Arisoy, C.F., Basman, G., Yesilcubuk, S.A., Şeşen, M.K.**, 2004. Surface Modification of EN-C35E Steels by Thermochemical Boronizing Process and Its Properties, *Key Engineering*, **264-268**, 633-636.
- [116] **Yaer, X., Shimizu, K., Matsumoto, H., Kitsudo, T., Momonoa, T.**, 2008. Erosive wear characteristics of spheroidal carbides cast iron, *Wear* **264**, 947–957.
- [117] **Divakar, M., Agarwal, V.K., Singh, S.N.**, 2005. Effect of the material surface hardness on the erosion of AISI316 , *Wear*, **259**, 110–117.

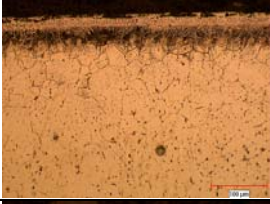
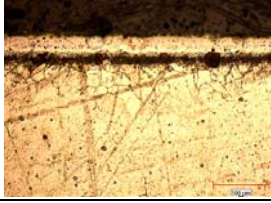
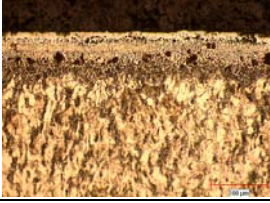
- [118] **M. Meyers, K. Chawla**, 2009. Mechanical Behaviour Of Materials; *Metals, Ceramics, Polymers and Composites*, Cambridge University Press, New York.

EKLER

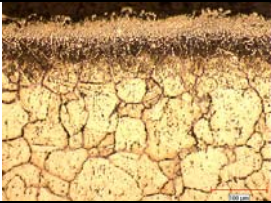
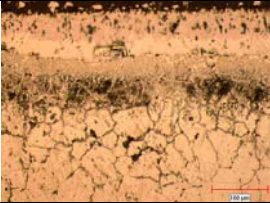
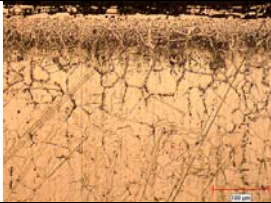
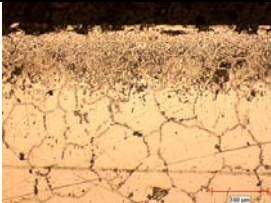
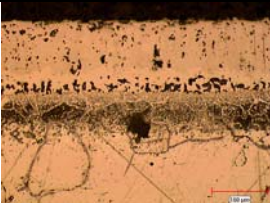
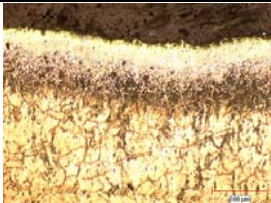
EK A: Şekiller

EK B: Çizelgeler

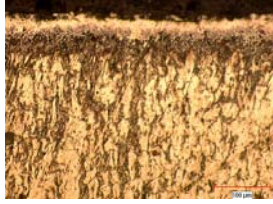
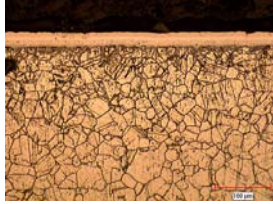
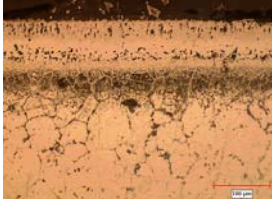
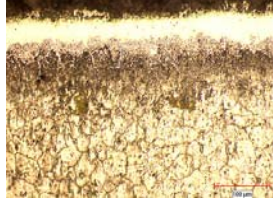
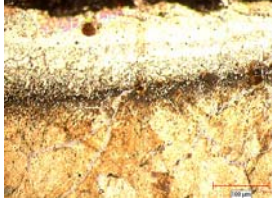
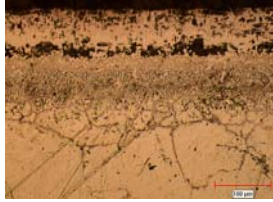
EK –A: Şekiller

Süre, h (saat)	SICAKLIK, °C		
	%5,3 FeSi	%5,3 FeTi	%5,3 SiC
2 h			
4h			
6h			

Şekil A. 1: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %5,3 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 1050°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüsü.

Süre, h (saat)	Banyo Katkısı, %		
	%25 FeSi	%25 FeTi	%25 SiC
2 h			
4h			
6h			

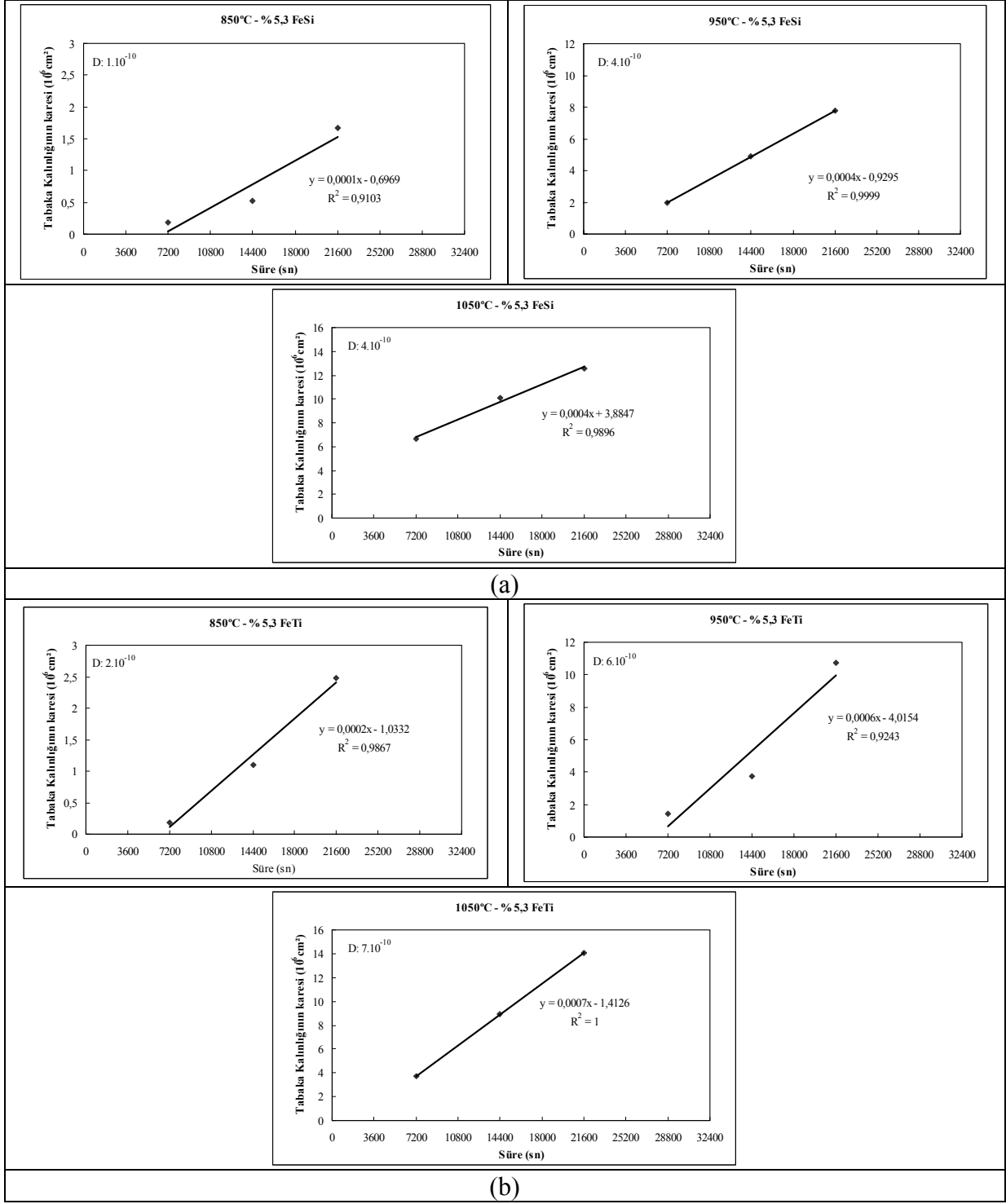
Şekil A. 2: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %25 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 1050°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüsü.

Süre, h (saat)	Banyo Katkısı, %		
	%42,9 FeSi	%42,9 FeTi	%42,9 SiC
2 h			
4h			
6h			

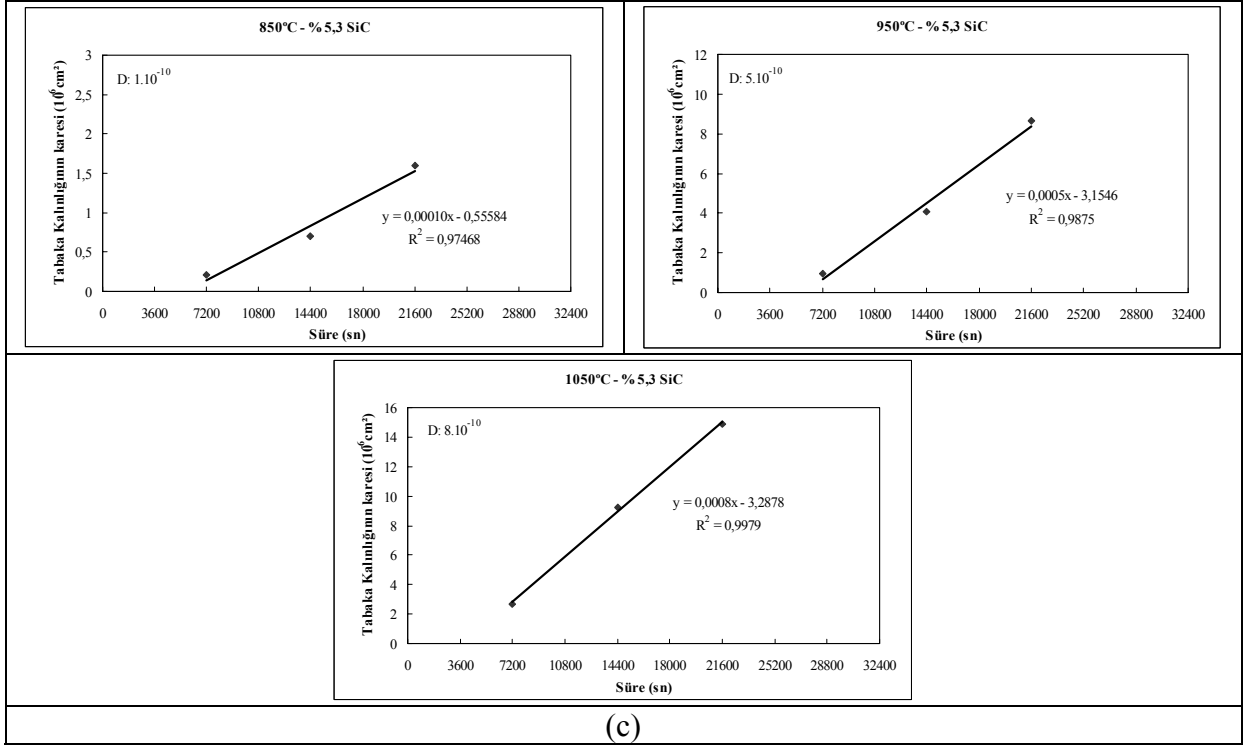
Şekil A. 3: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) banyo katkısı %42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC ilavesiyle 1050°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüsü.

Süre, h (saat)	2 h	4h	6h
Ekabor 2			

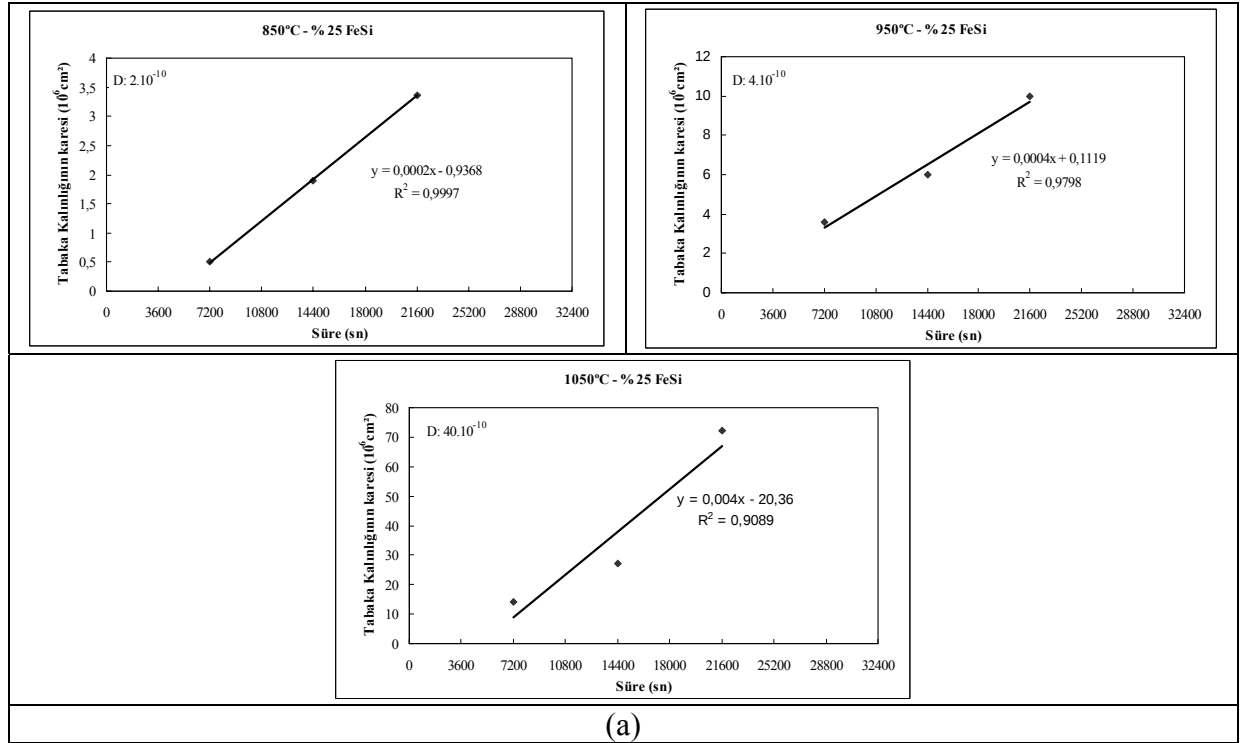
Şekil A. 4: Banyo bileşimindeki Ticari Ekabor 2 ilavesiyle 1050°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin mikroyapı görüntüsü



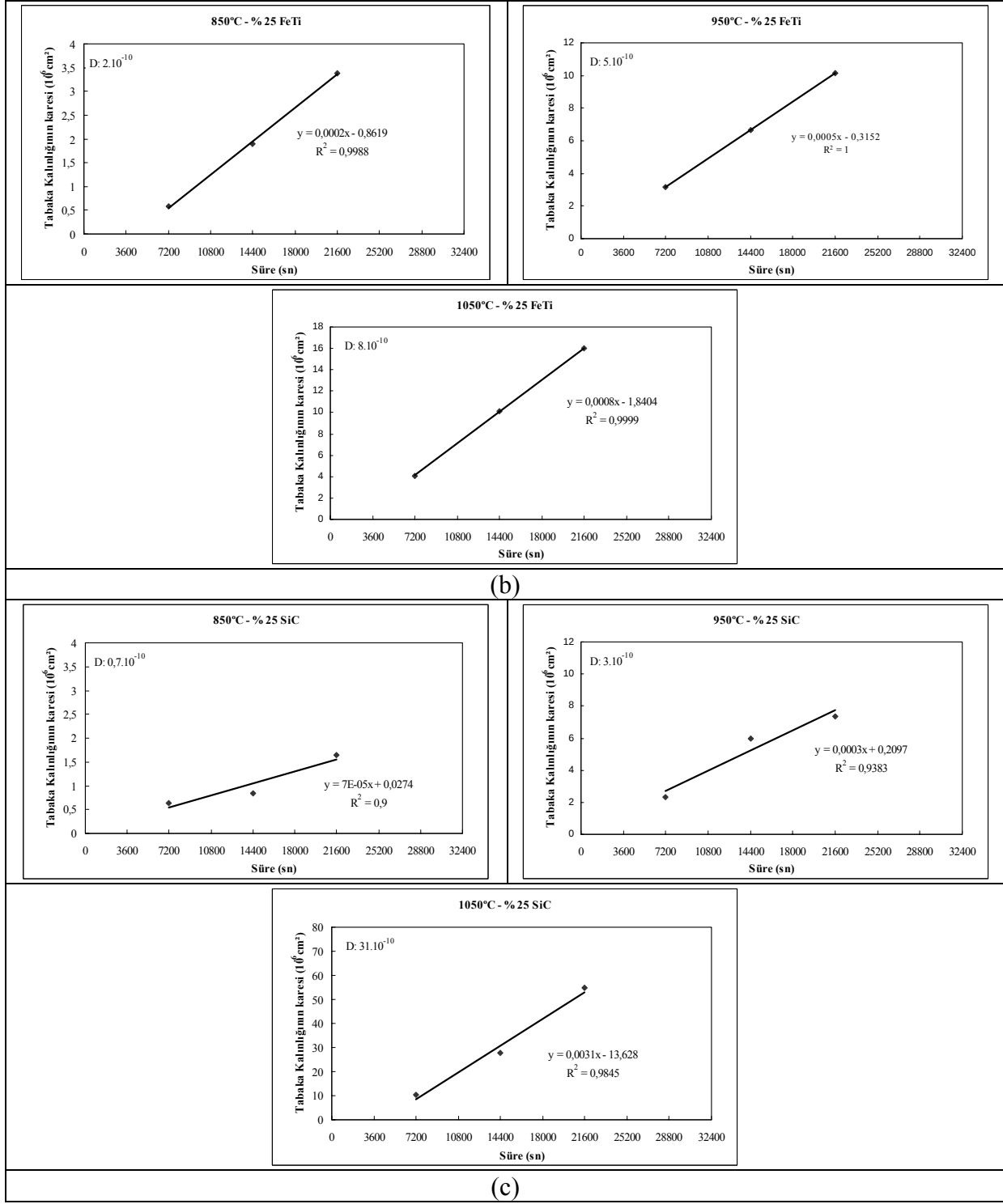
Şekil A. 5: Banyoya yapılan %5,3 oranındaki katkılara ve sıcaklığa bağlı olarak borlamada oluşan borür tabakası kalınlığının karesinin süre ile değişimi ($d^2 - t$ değişimi).



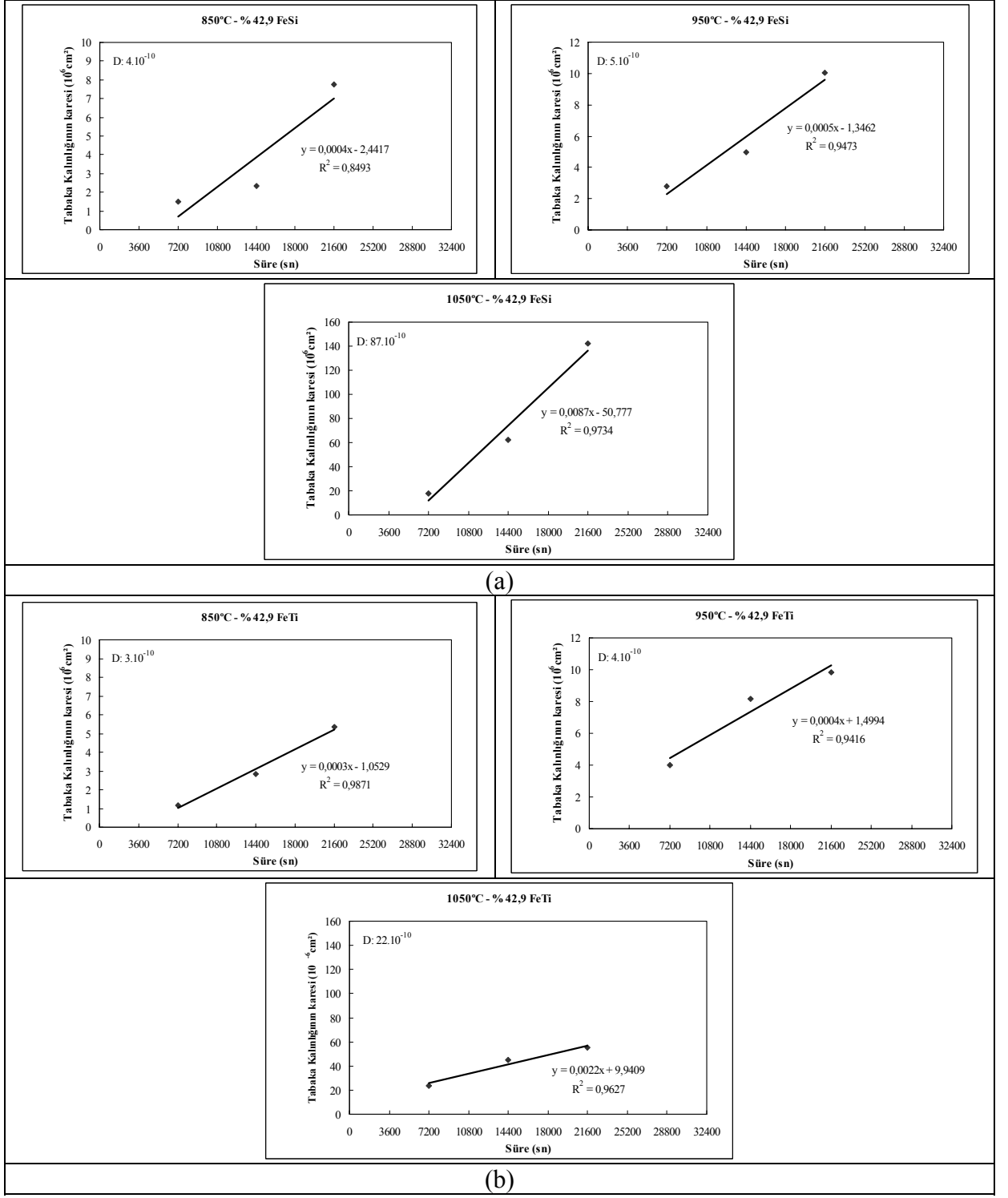
Şekil A. 5: (Devam) Banyoya yapılan %5,3 oranındaki katkılara ve sıcaklığa bağlı olarak borlamada oluşan borür tabakası kalınlığının karesinin süre ile değişimi ($d^2 - t$ değişimi).



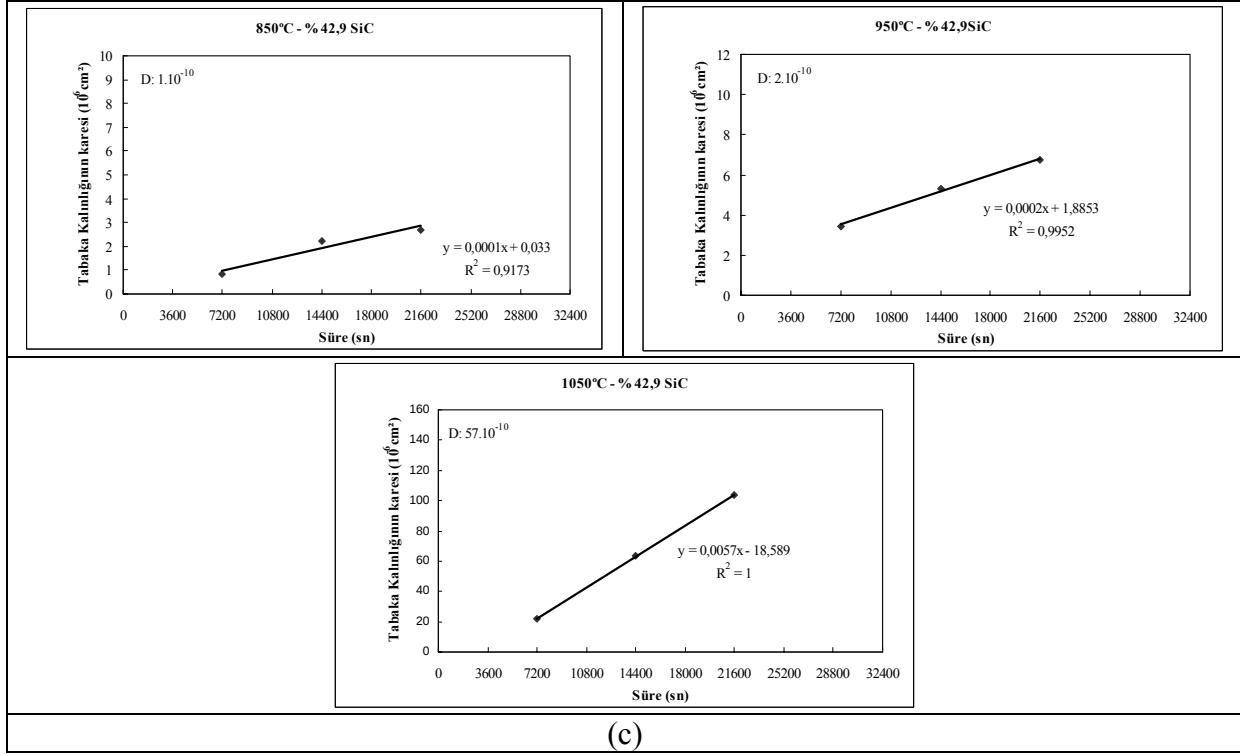
Şekil A. 6: Banyoya yapılan %25 oranındaki katkılara ve sıcaklığa bağlı olarak borlamada oluşan borür tabakası kalınlığının karesinin süre ile değişimi ($d^2 - t$ değişimi).



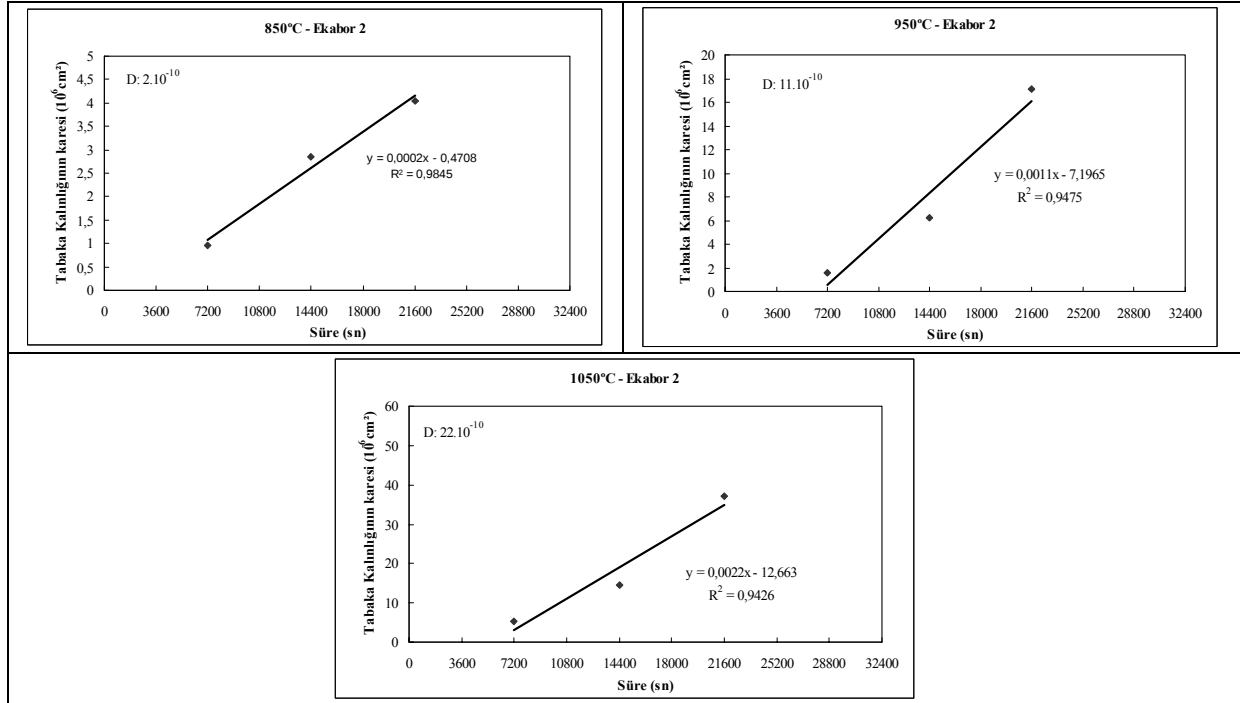
Şekil A. 6: (Devam) Banyoya yapılan %25 oranındaki katkılara ve sıcaklığa bağlı olarak borlamada oluşan borür tabakası kalınlığının karesinin süre ile değişimi ($d^2 - t$ değişimi).



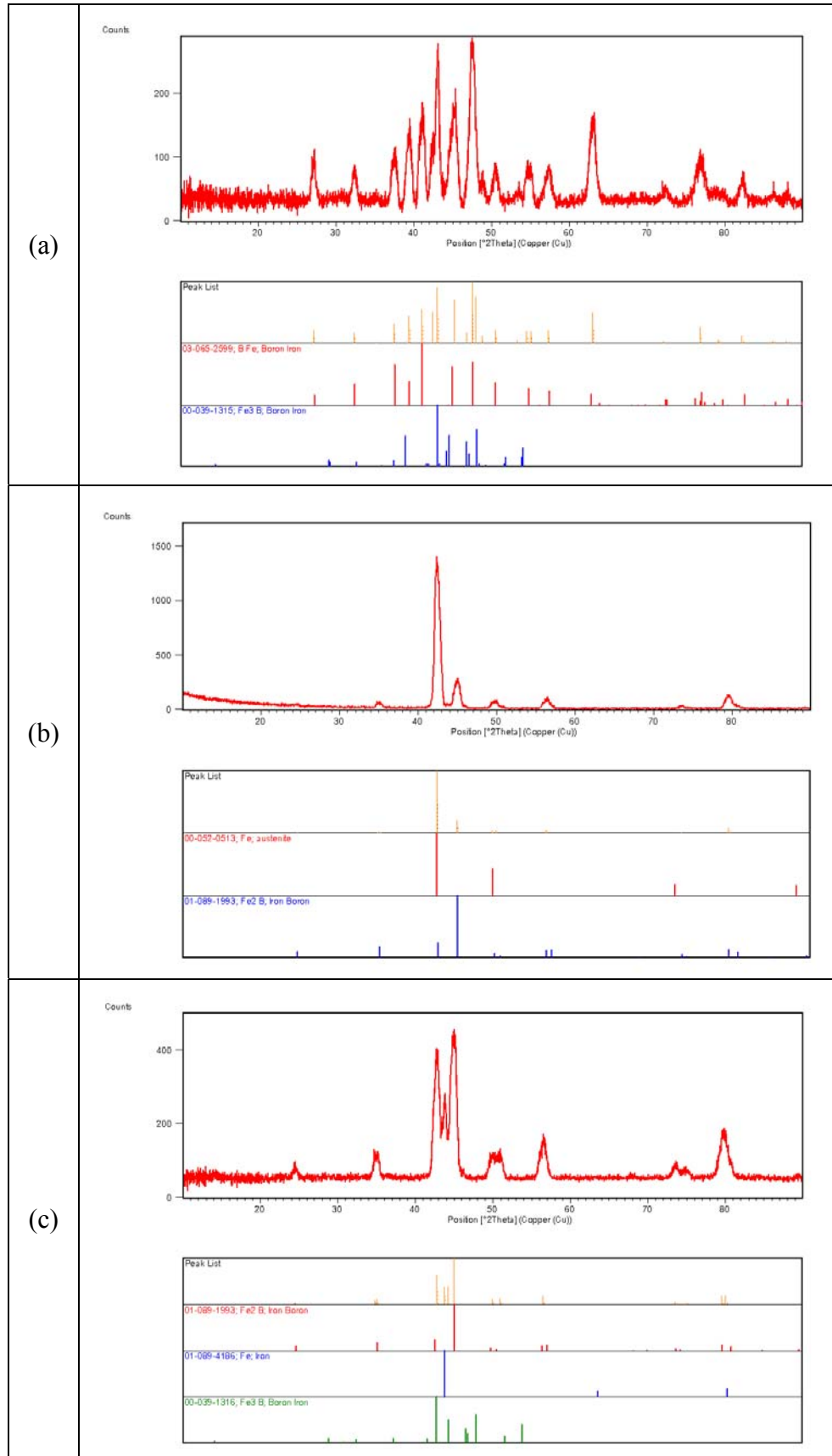
Şekil A. 7: Banyoya yapılan %42,9 oranındaki katkılara ve sıcaklığa bağlı olarak borlamada oluşan borür tabakası kalınlığının karesinin süre ile değişimi ($d^2 - t$ değişimi).



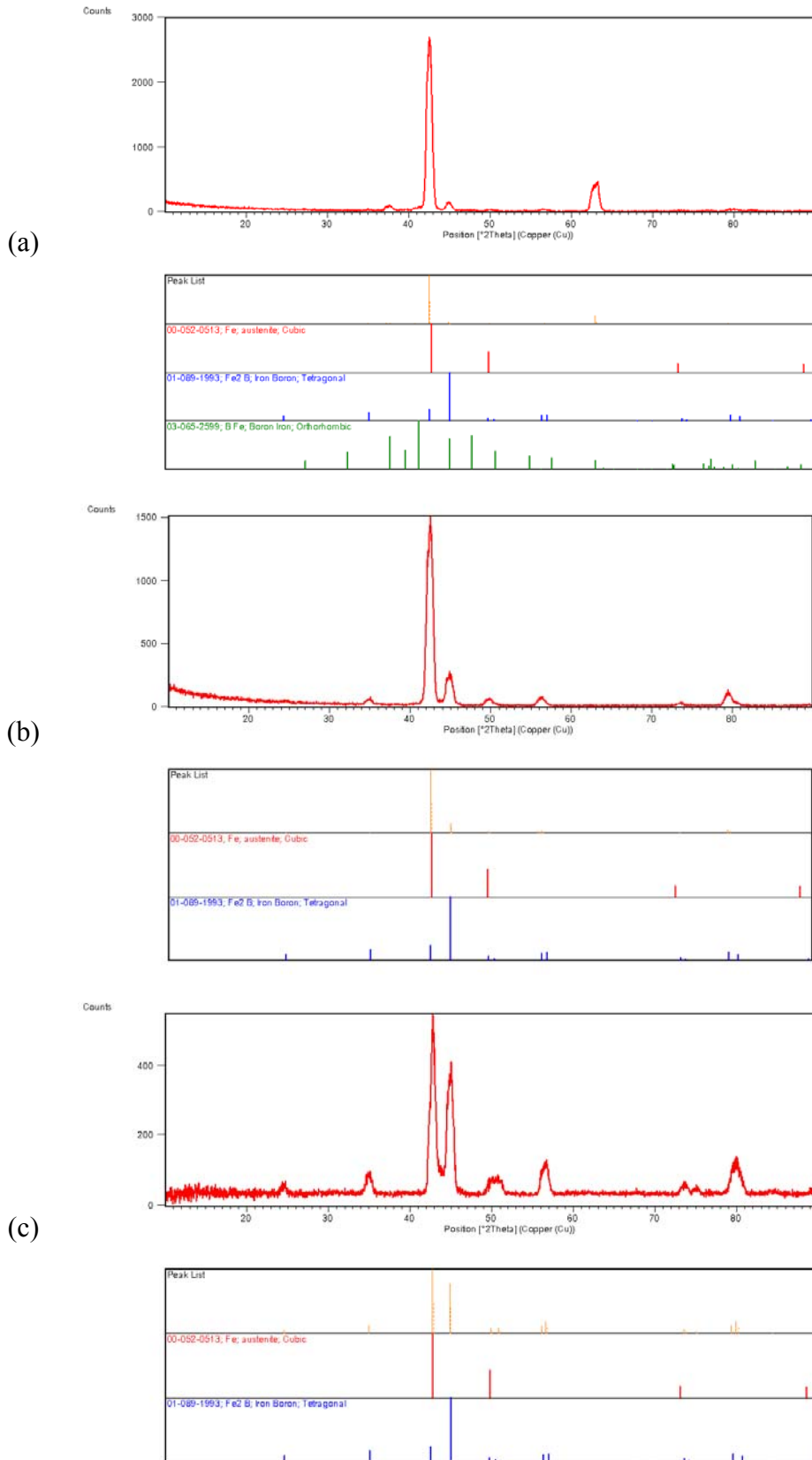
Şekil A. 7: (Devam) Banyoya yapılan %42,9 oranındaki katkılara ve sıcaklığa bağlı olarak borlamada oluşan borür tabakası kalınlığının karesinin süre ile değişimi ($d^2 - t$ değişimi).



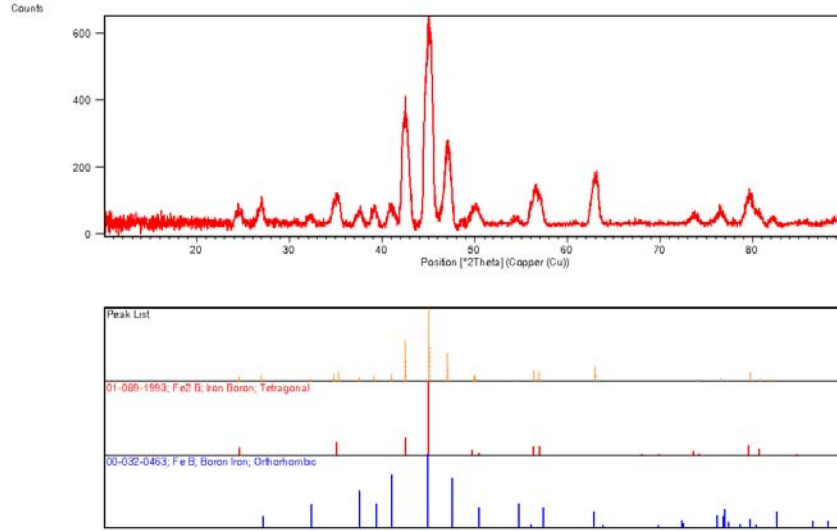
Şekil A. 8: Ekabor 2 ilavesiyle sıcaklığa bağlı olarak borlamada oluşan borür tabakası kalınlığının karesinin süre ile değişimi ($d^2 - t$ değişimi).



Şekil A. 9: Banyoya yapılan %25 oranlarındaki FeSi (a), FeTi (b) ve SiC (c) katkılarının ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakasının X-ışınları difraksiyon paternleri.



Şekil A. 10: Banyoya yapılan %42,9 oranlarındaki FeSi (a), FeTi (b) ve SiC (c) katkılarının ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakasının X-ışınları difraksiyon paternleri.



Şekil A. 11: Borlama banyosundaki ticari ekabor 2 ile 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin X-ışınları difraksiyon paterni.

Katkılar, %	SEM ve EPMA Kesit Görüntü Fotoğrafları		
	SEM	EPMA-SEI	EPMA-BSEI
25 FeSi			
25 FeTi			
25 SiC			

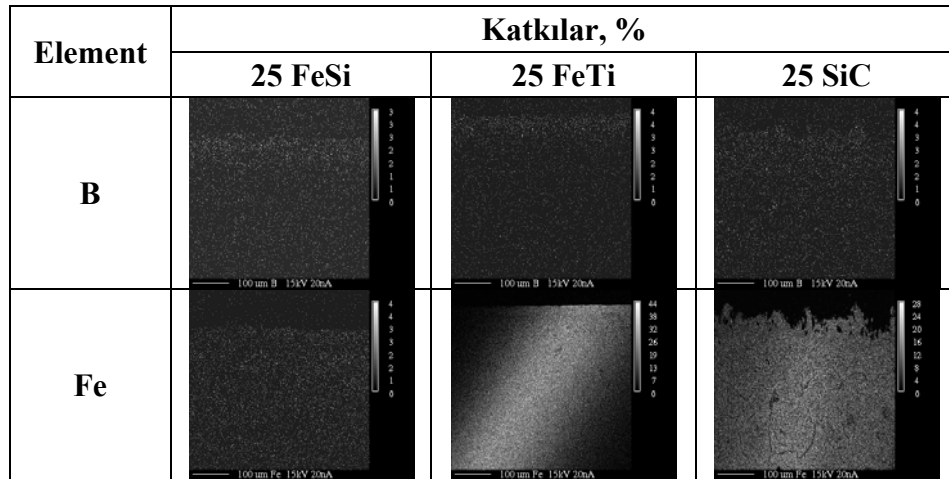
Şekil A. 12: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%25 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) ilavesiyle 1050 °C’de 6 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulan AISI 316L paslanmaz çelik numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının görüntüleri.

Katkılar, %	SEM ve EPMA Kesit Görüntü Fotoğrafları		
	SEM	EPMA-SEI	EPMA-BSEI
42,9 FeSi			
42,9 FeTi			
42,9 SiC			

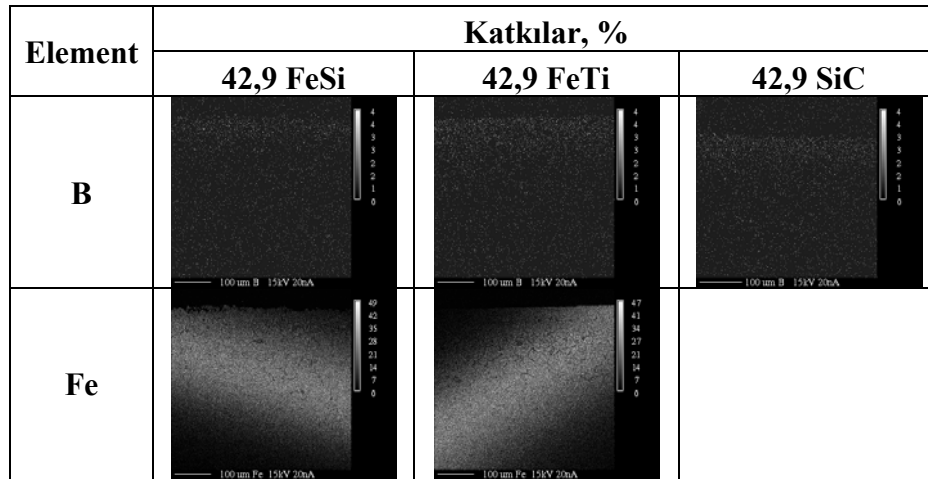
Şekil A. 13: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) ilavesiyle 1050 °C’de 6 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulan AISI 316L paslanmaz çelik numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının görüntüleri.

Borlama Banyosu	SEM ve EPMA Kesit Görüntü Fotoğrafları	
	EPMA-SEI	EPMA-BSEI
Ekabor 2		

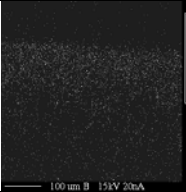
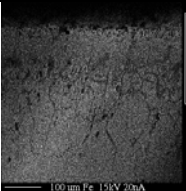
Şekil A. 14: Ticari ekabor 2 ile 1050 °C’de 6 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulan AISI 316L paslanmaz çelik numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının görüntüleri.



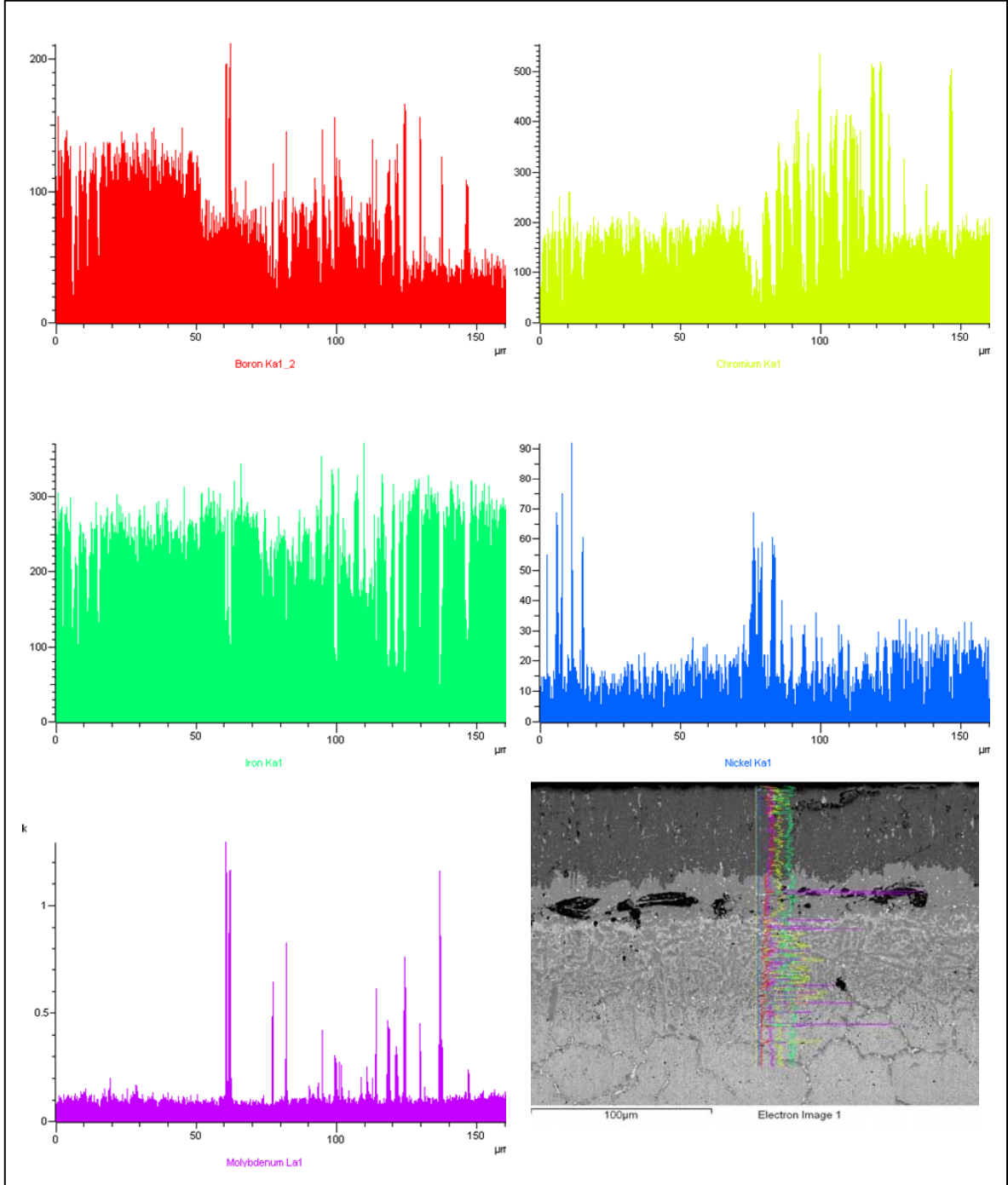
Şekil A. 15: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%25 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) ilavesiyle 1050 °C’de 6 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulan AISI 316L paslanmaz çelik numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının yüzeyindeki B ve Fe’in X-ışını haritalamasının görüntüleri.



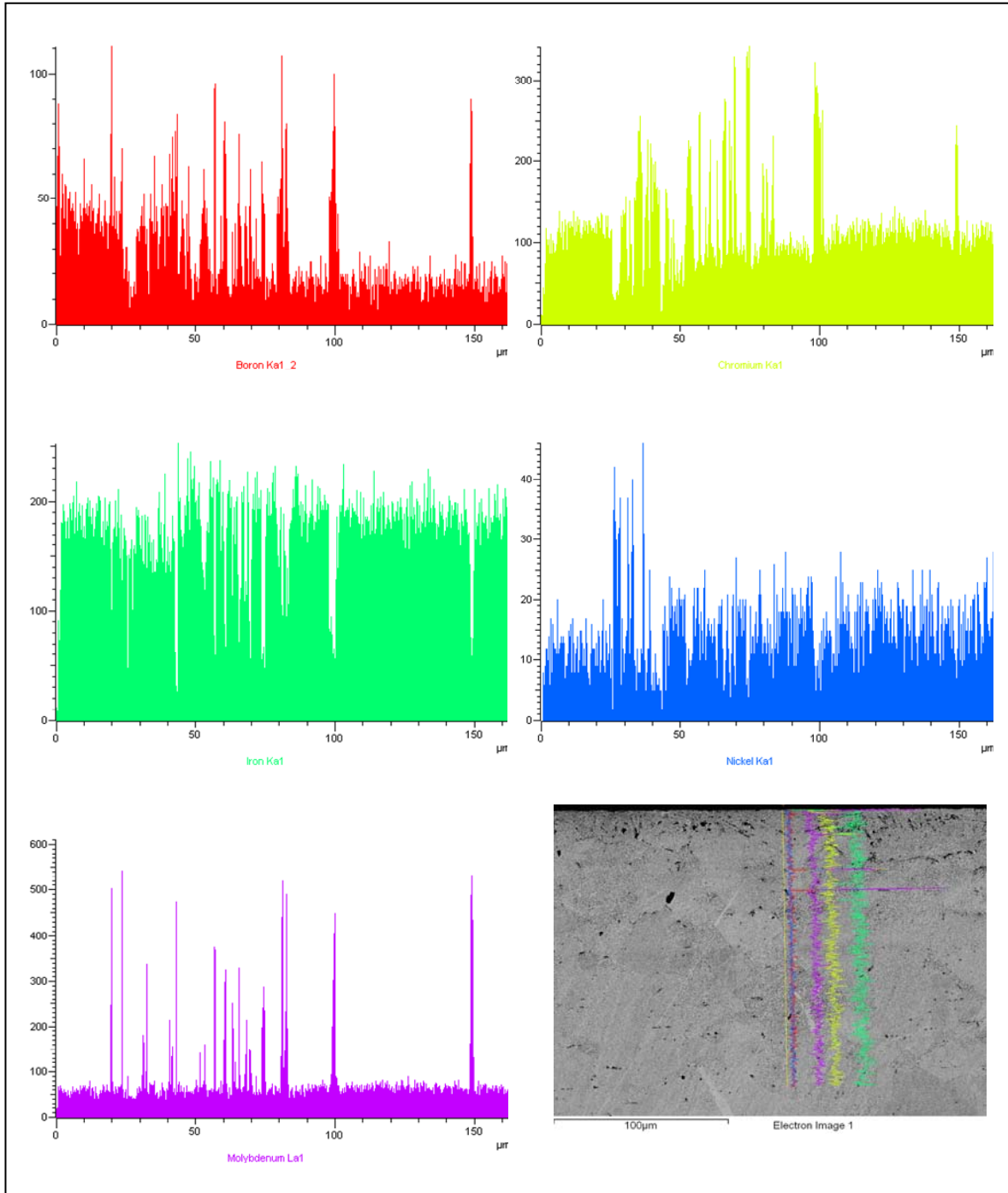
Şekil A. 16: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) ilavesiyle 1050 °C’de 6 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulan AISI 316L paslanmaz çelik numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının yüzeyindeki B ve Fe’in X-ışını haritalamasının görüntüleri.

Element	Borlama Banyosu	
	Ekabor 2	
B		
Fe		

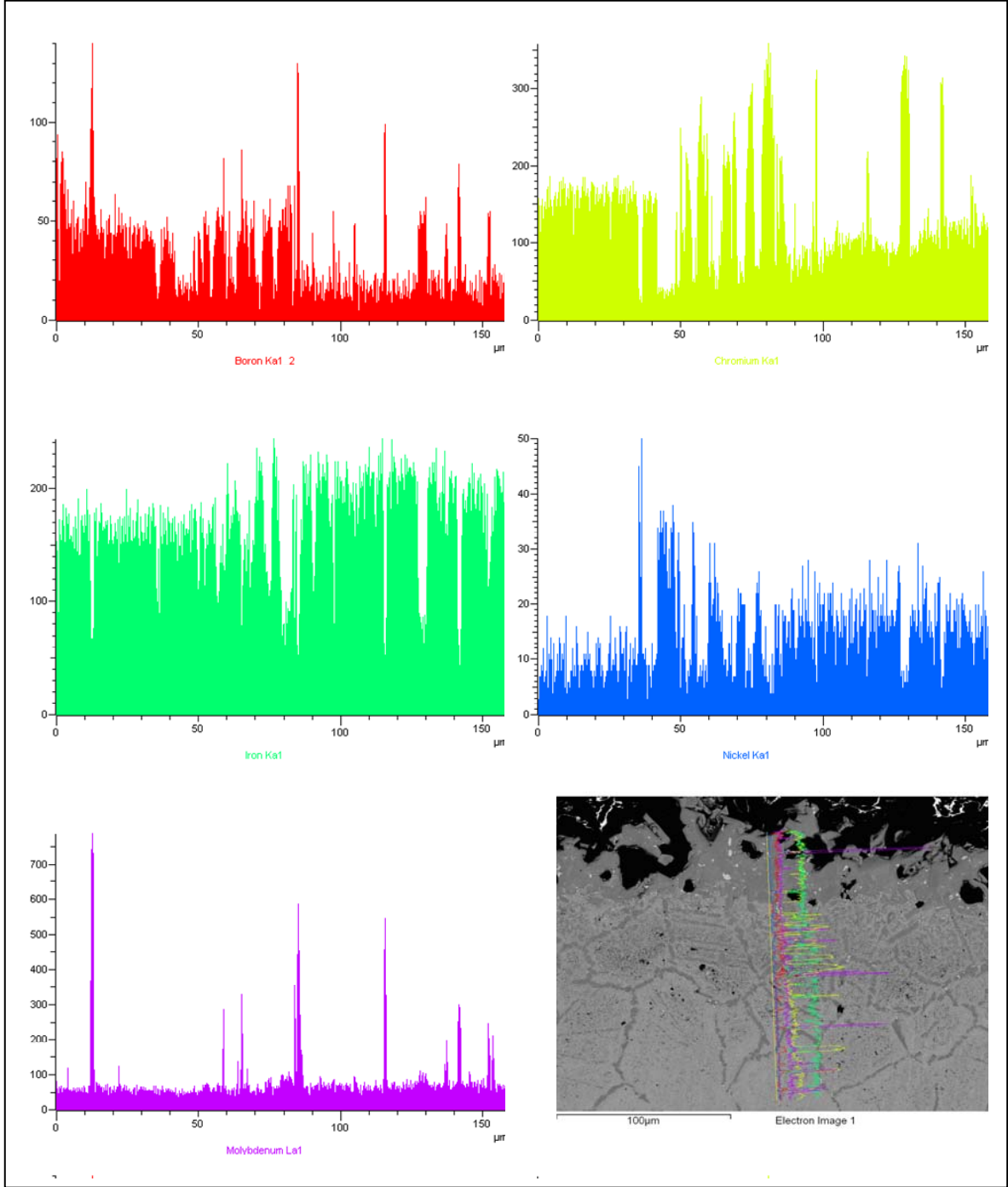
Şekil A. 17: Ekabor 2 banyosuyla 1050°C’de 6 saat süre ile Borlanmış 316 L paslanmaz çelik numunelerin yüzeyindeki B ve Fe’in X ışını haritalamasının görüntüleri.



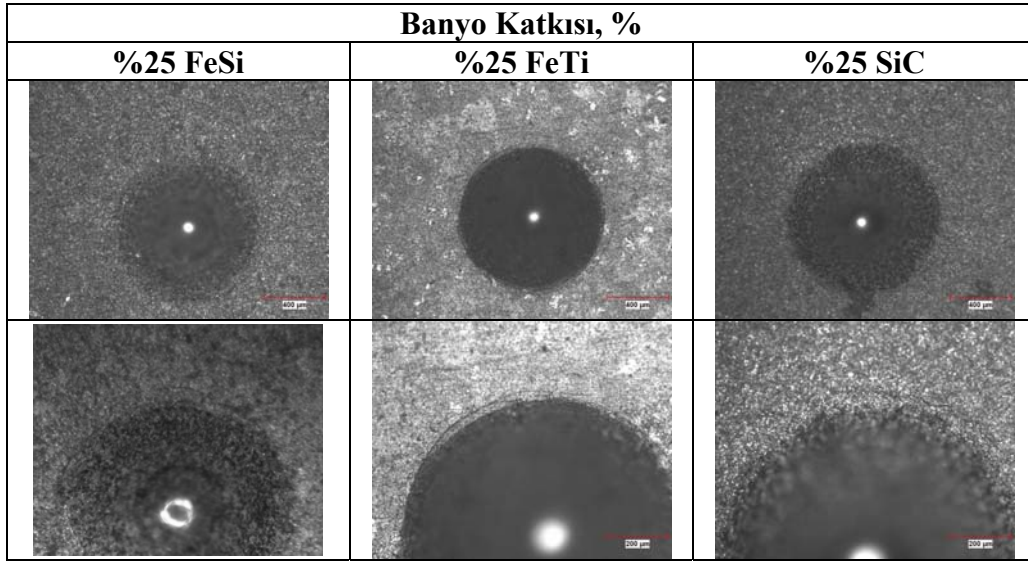
Şekil A. 18: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi katkıların ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarının kesitlerindeki çizgisel EDS analizi.



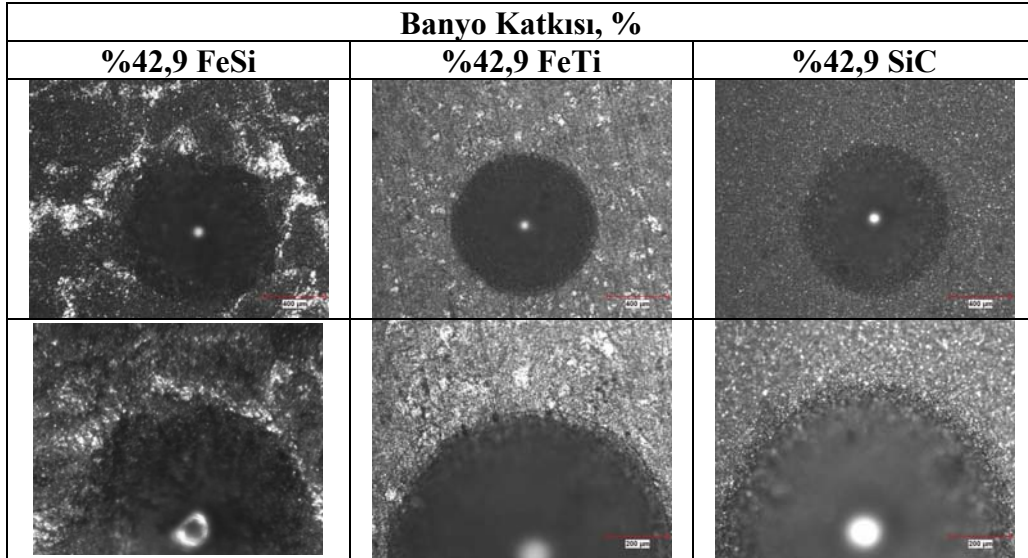
Şekil A. 19: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeTi katkıların ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarının kesitlerindeki çizgisel EDS analizi.



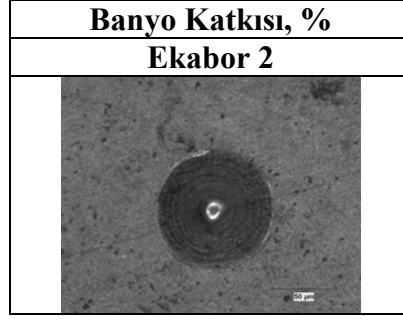
Şekil A. 20: Banyoya yapılan %25 oranındaki SiC katkıların ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarının kesitlerindeki çizgisel EDS analizi.



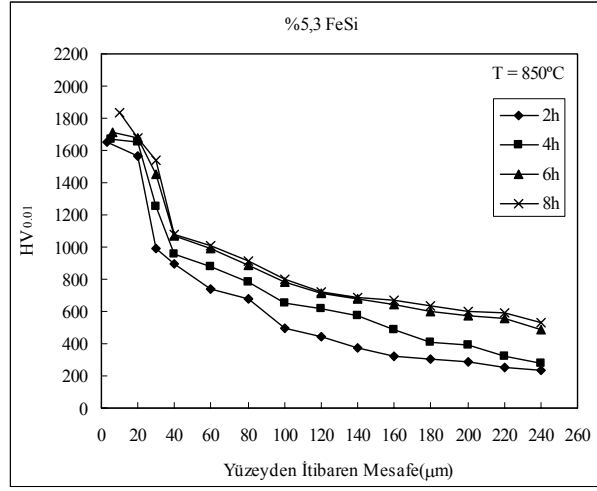
Şekil A. 21: Banyoya yapılan %25 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarının indentasyon ile oluşturulan izlerinin farklı büyütmelelerdeki OM görüntüleri.



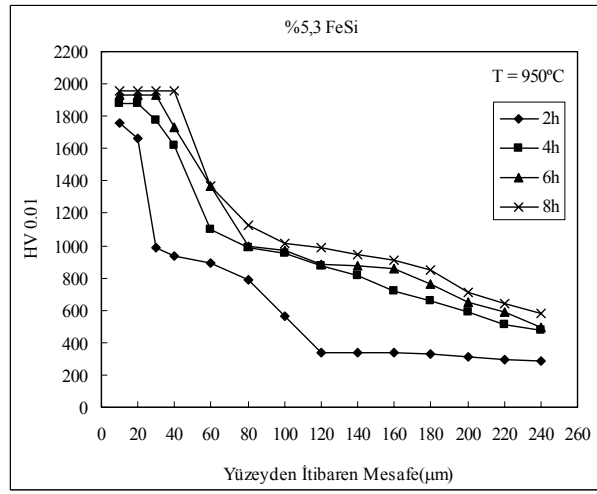
Şekil A. 22: Banyoya yapılan %42,9 oranındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle 1050°C’de 6 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakalarının indentasyon ile oluşturulan izlerinin farklı büyütmelelerdeki OM görüntüleri.



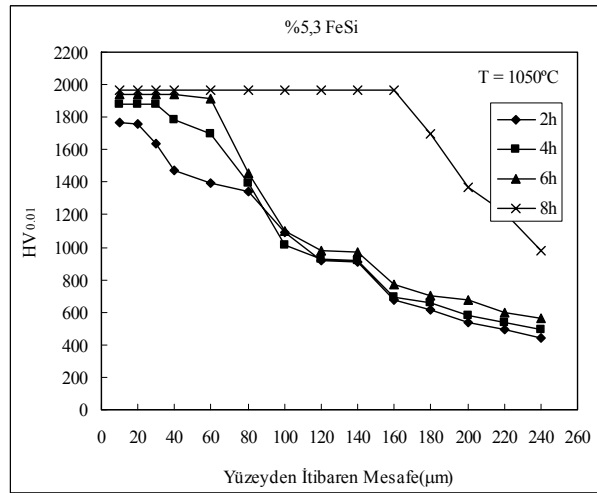
Şekil A. 23: Ticari ekabor 2 ile 1050°C’de 6 saat süre ile Borlanmış 316 L paslanmaz çelik numunenin indentasyon ile yapışma deneyi sonrası OM görüntüleri.



(a)

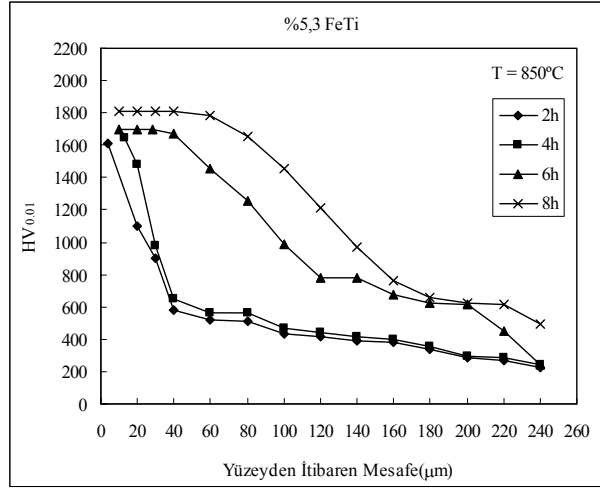


(b)

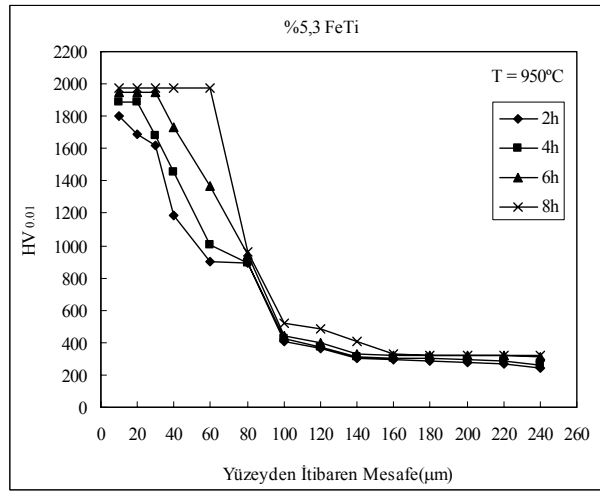


(c)

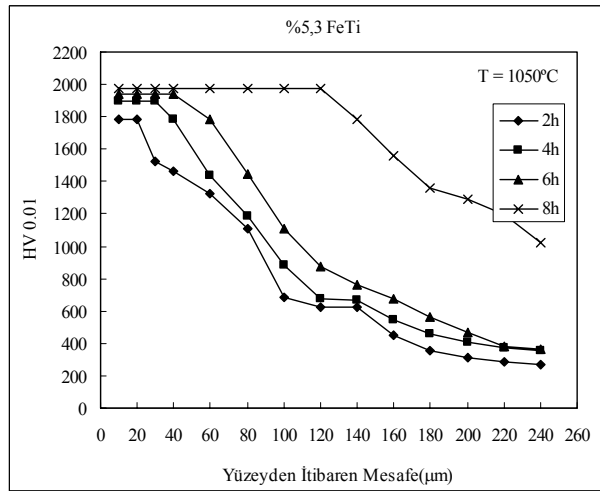
Şekil A. 24: Banyo bileşimine %5,3 oranında FeSi ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) 'de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.



(a)

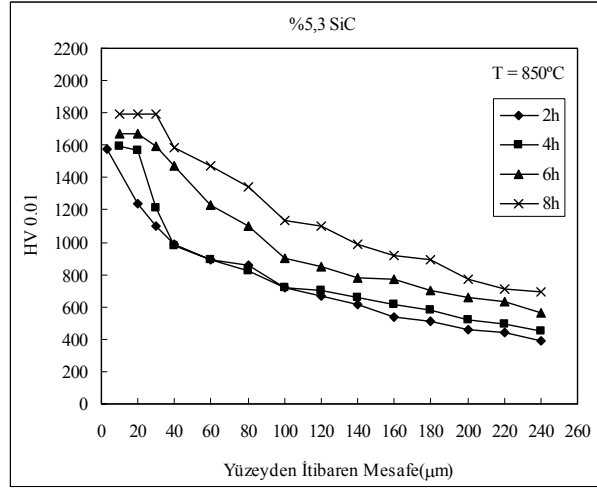


(b)

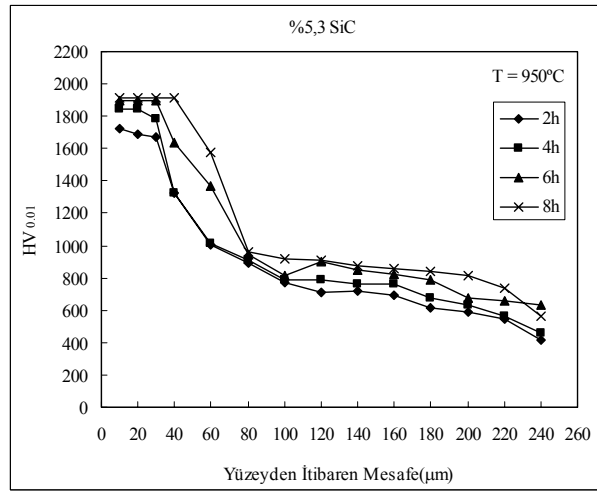


(c)

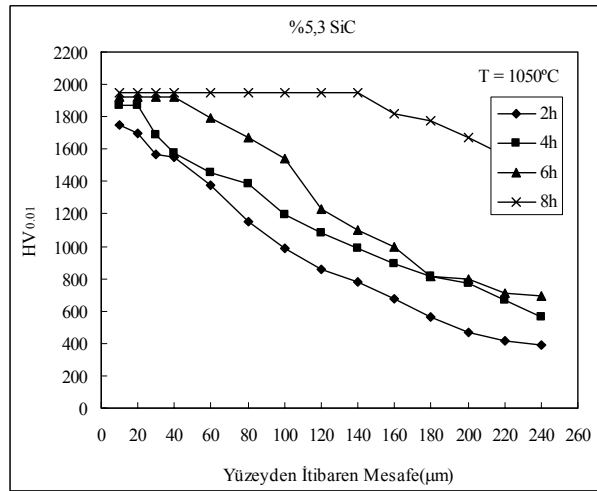
Şekil A. 25: Banyo bileşimine %5,3 oranında FeTi ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) 'de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.



(a)

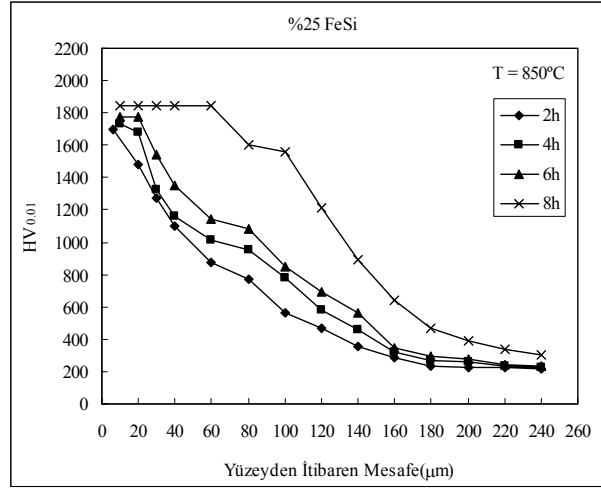


(b)

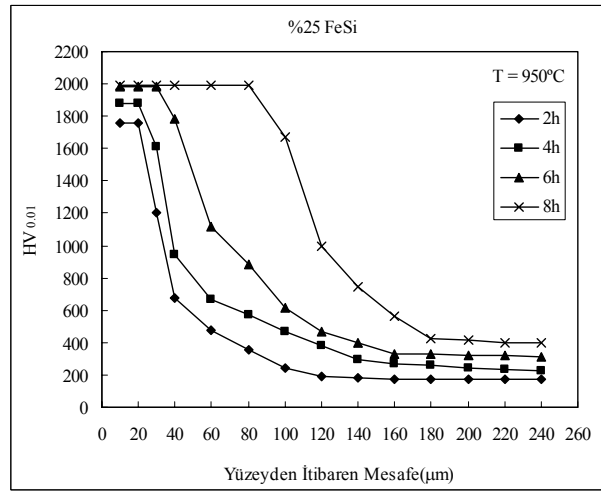


(c)

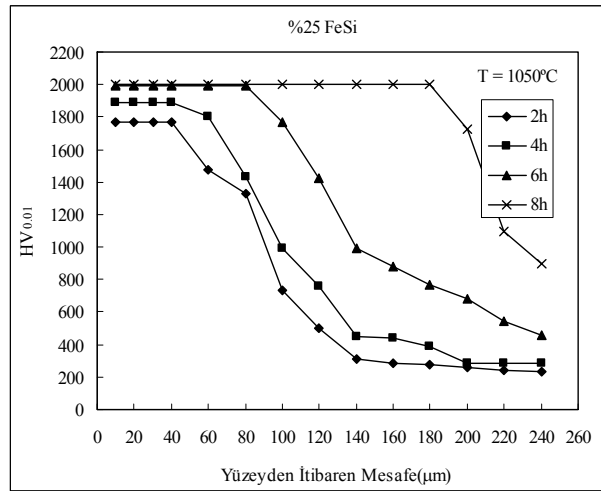
Şekil A. 26: Banyo bileşimine %5,3 oranında SiC ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) 'de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.



(a)

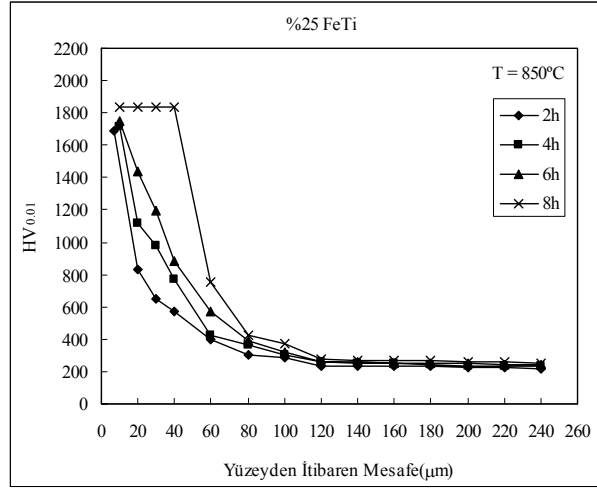


(b)

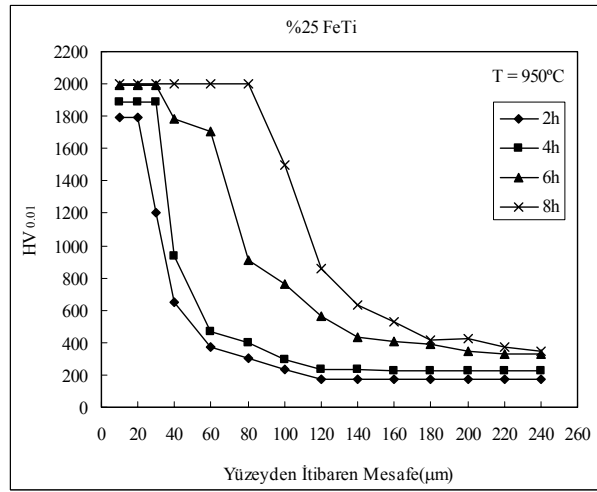


(c)

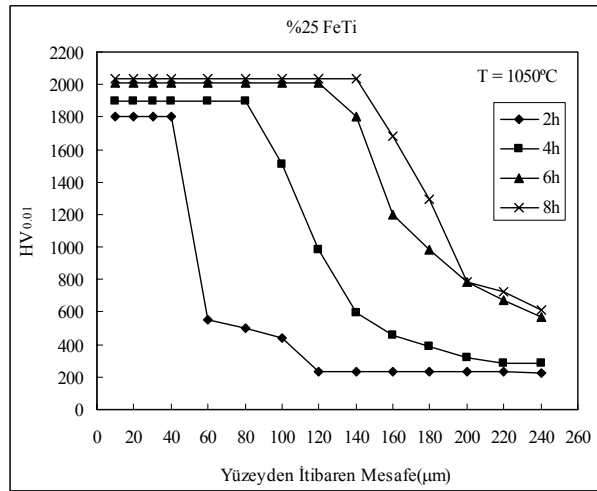
Şekil A. 27: Banyo bileşimine %25 oranında FeSi ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) 'de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.



(a)

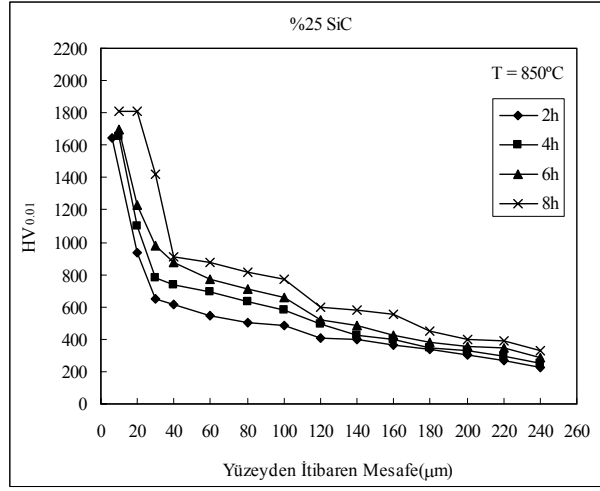


(b)

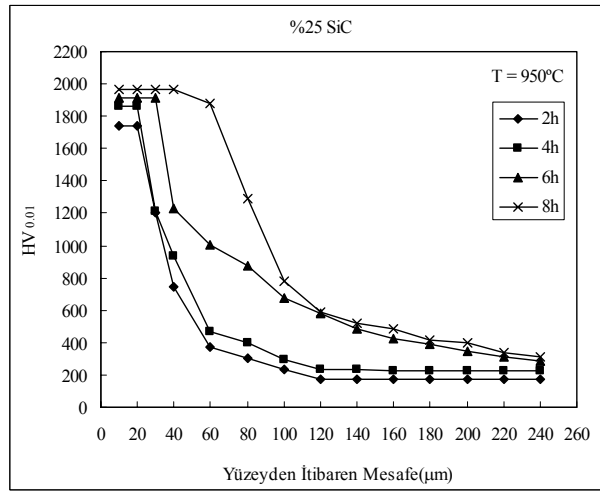


(c)

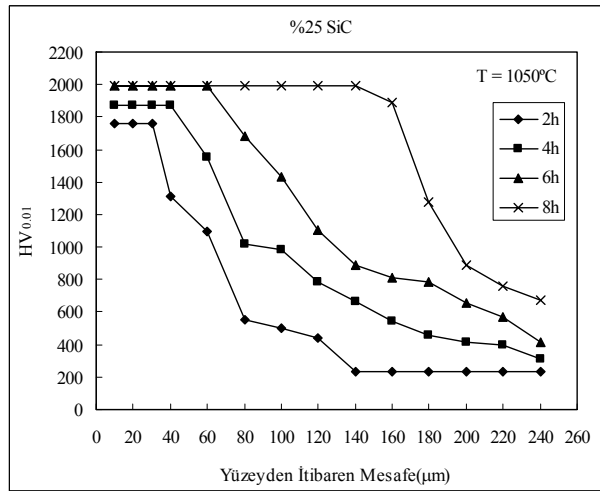
Şekil A. 28: Banyo bileşimine %25 oranında FeTi ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) 'de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.



(a)

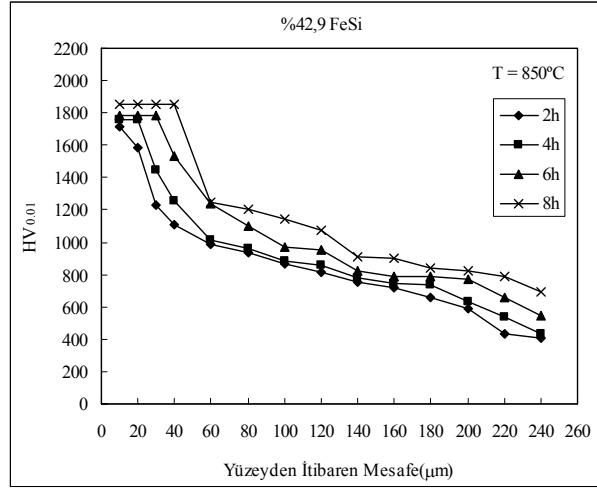


(b)

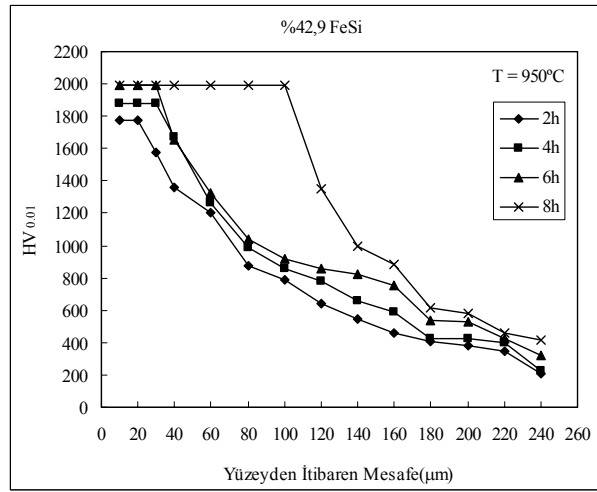


(c)

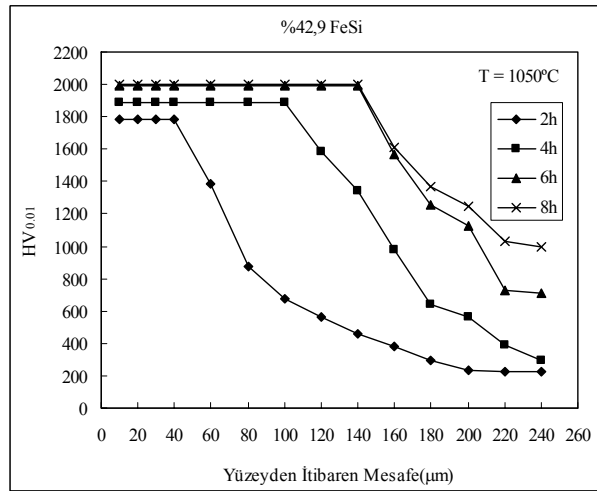
Şekil A. 29: Banyo bileşimine %25 oranında SiC ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) 'de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.



(a)

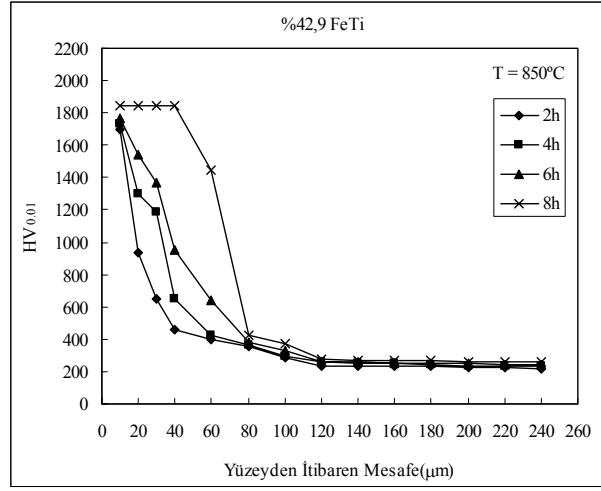


(b)

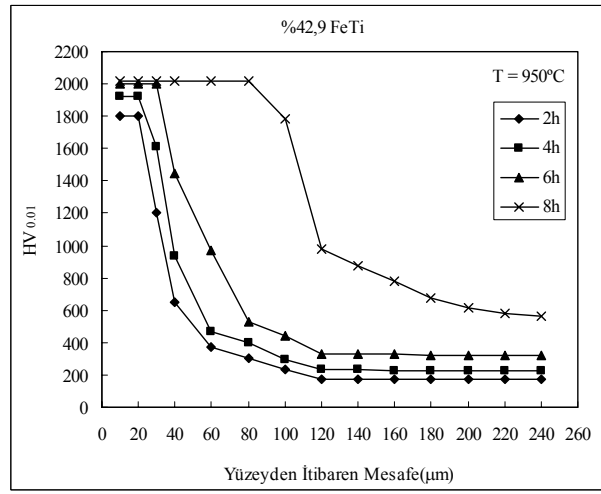


(c)

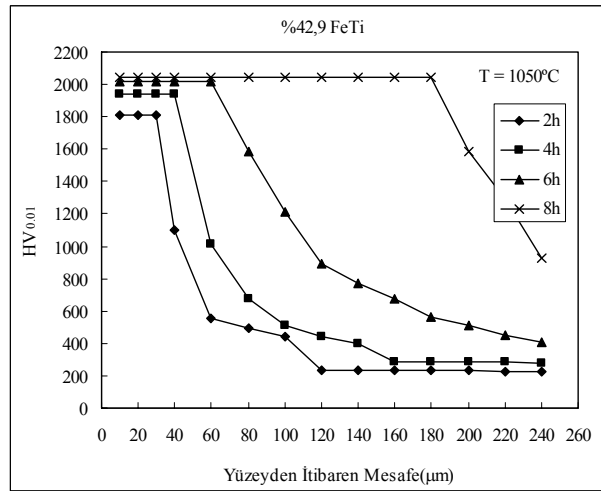
Şekil A. 30: Banyo bileşimine %42,9 oranında FeSi ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) 'de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.



(a)

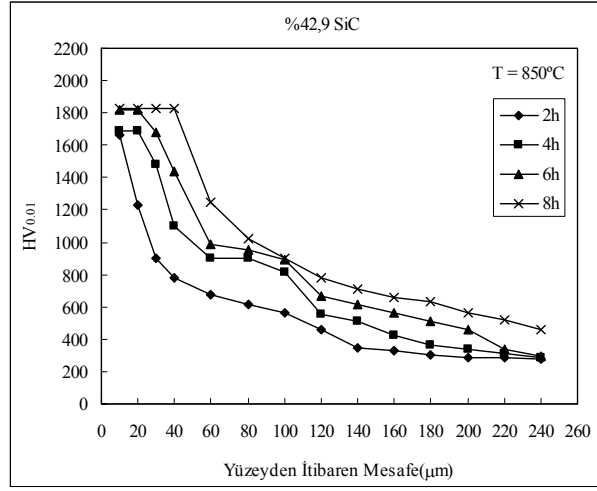


(b)

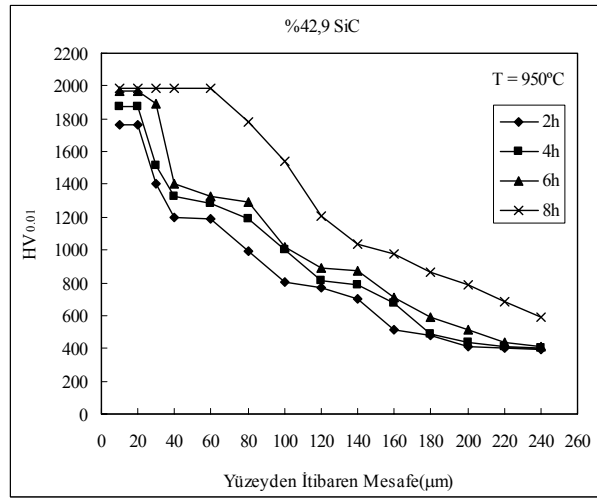


(c)

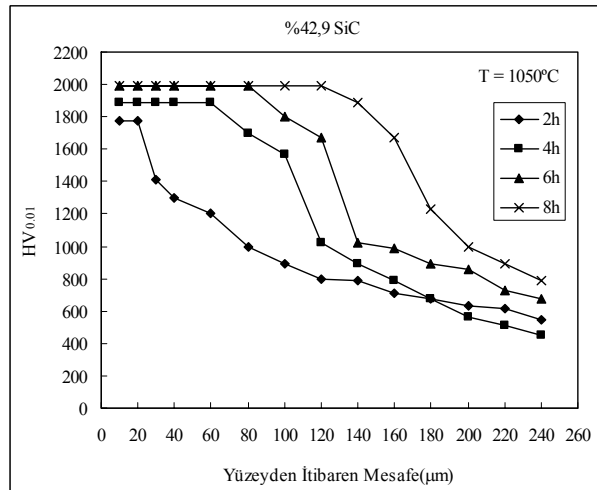
Şekil A. 31: Banyo bileşimine %42,9 oranında FeTi ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) 'de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.



(a)

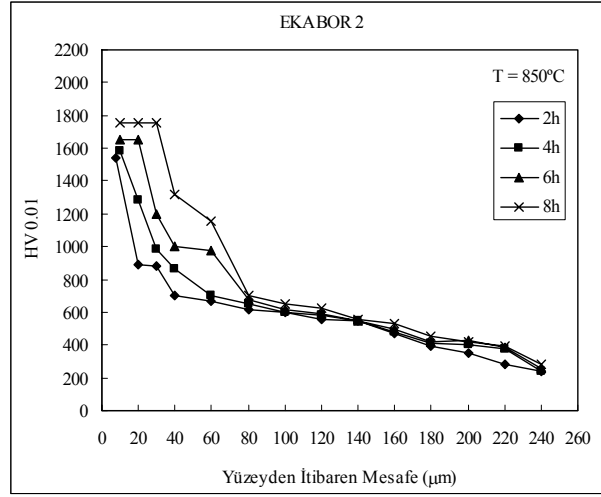


(b)

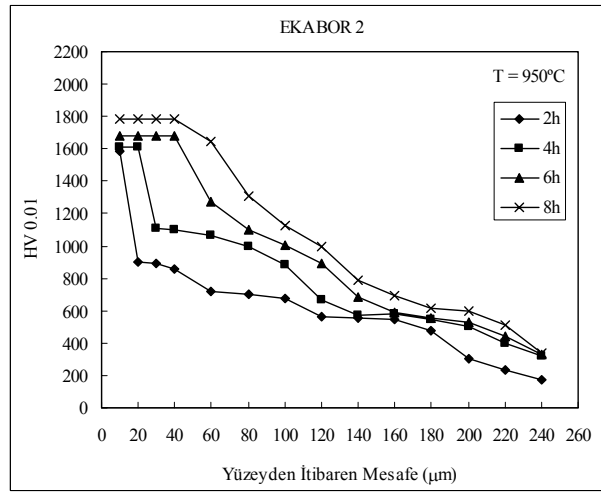


(c)

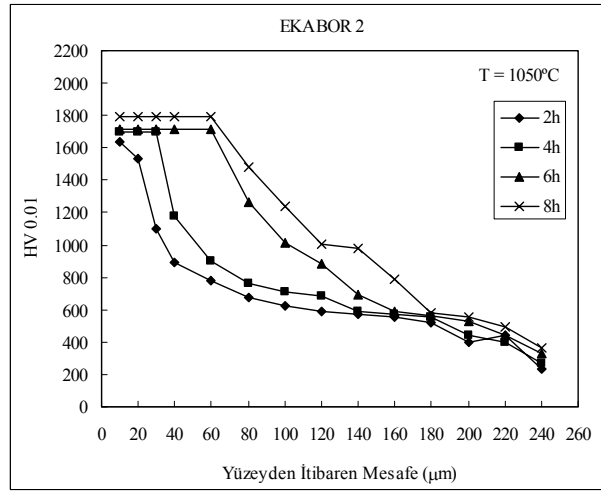
Şekil A. 32: Banyo bileşimine %42,9 oranında SiC ilavesiyle 850°C (a), 950 °C (b) ve 1050 °C (c) 'de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.



(a)

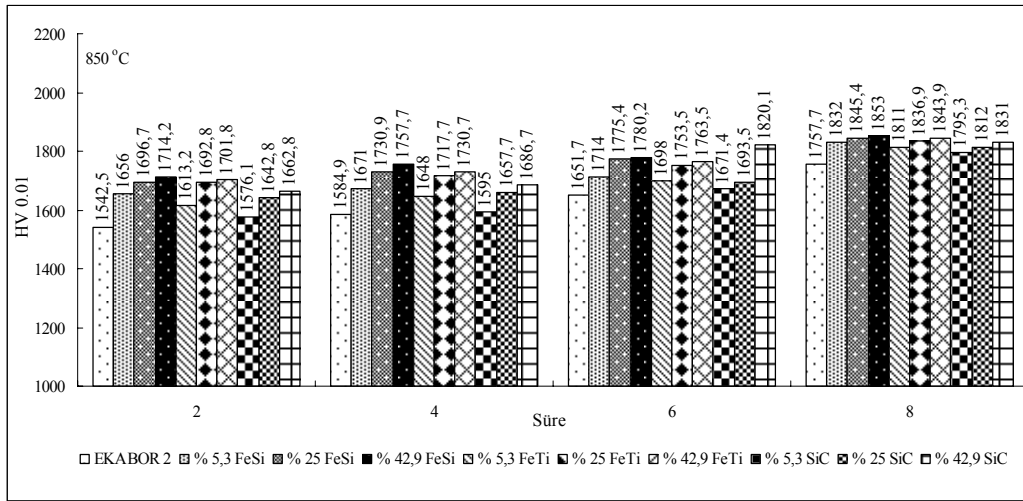


(b)

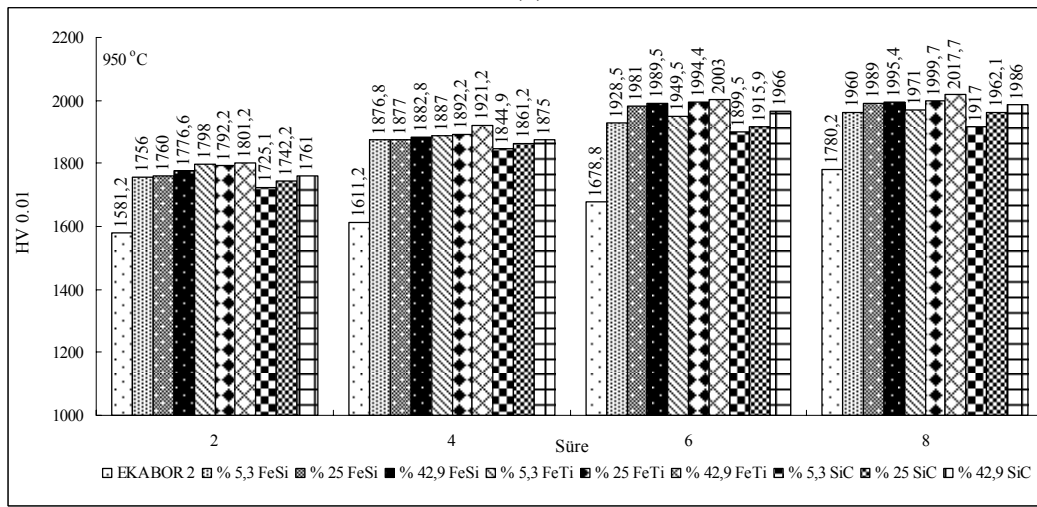


(c)

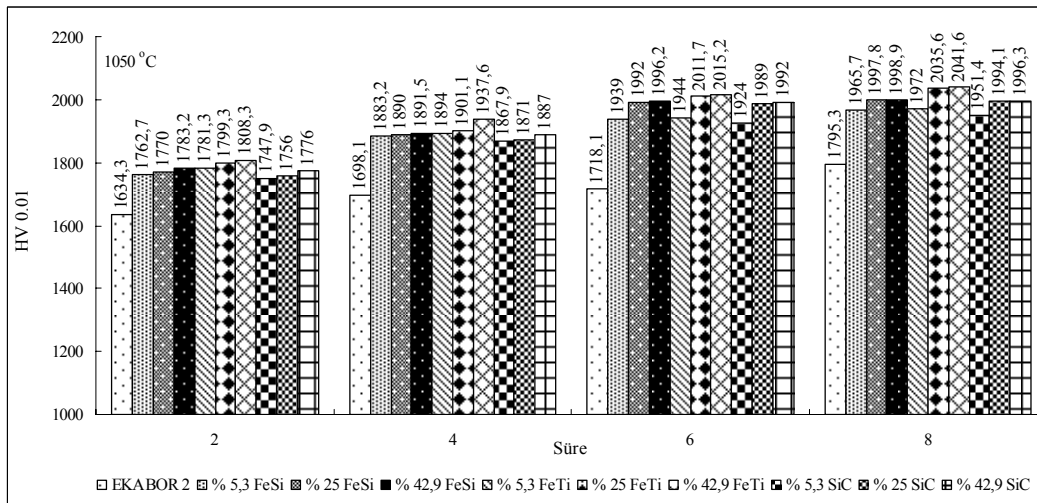
Şekil A. 33: Ticari ekabor 2 ile 850°C (a), 950°C (b) ve 1050°C (c) 'de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımları.



(a)



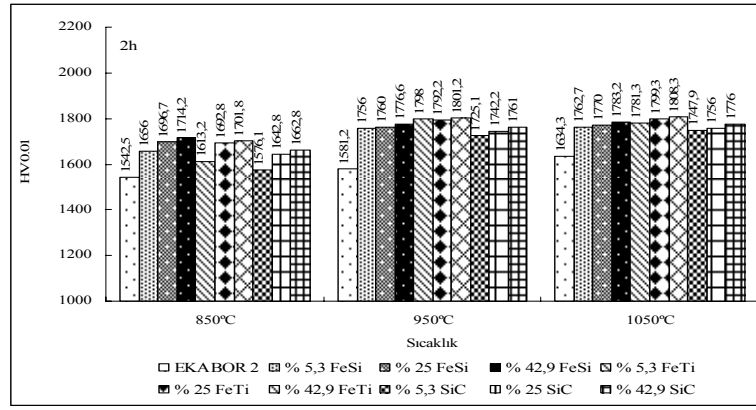
(b)



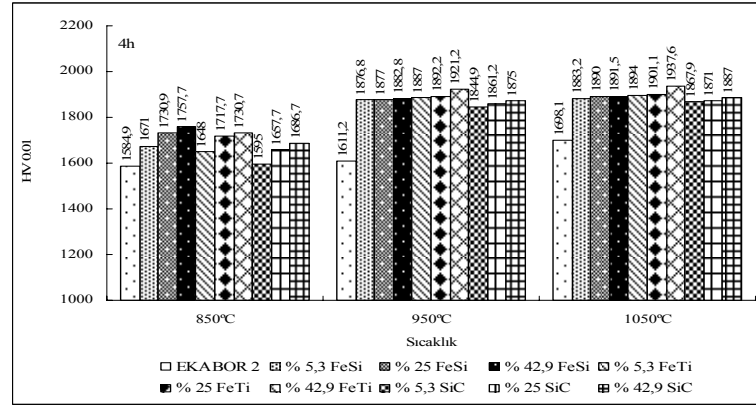
(c)

Şekil A. 34: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%5,3, %25 ve %42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) ilavesiyle 850 (a), 950 (b) ve 1050 °C’de 2, 4, 6, 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzey sertlik değerleri.

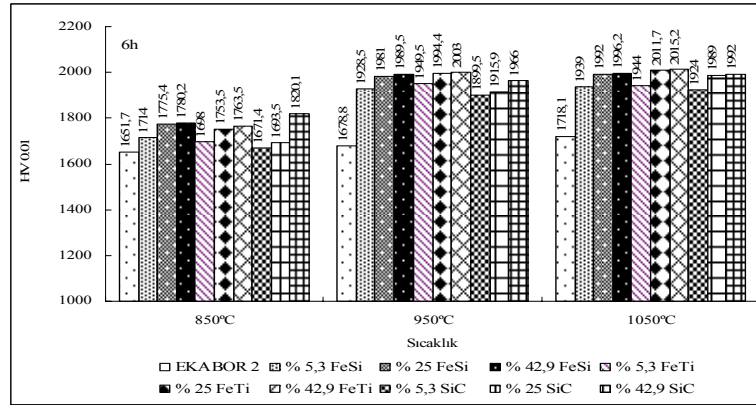
(a)



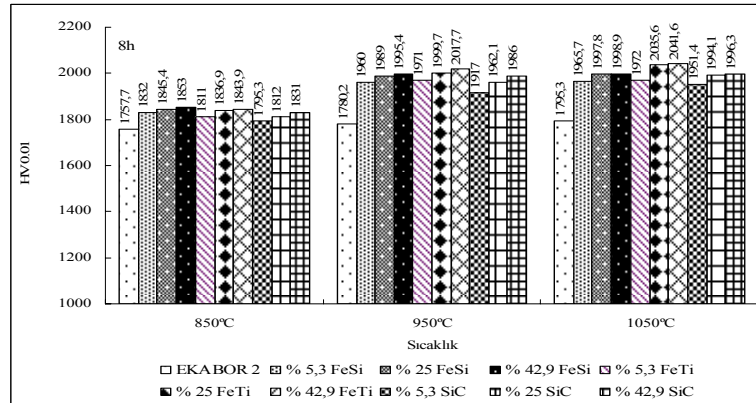
(b)



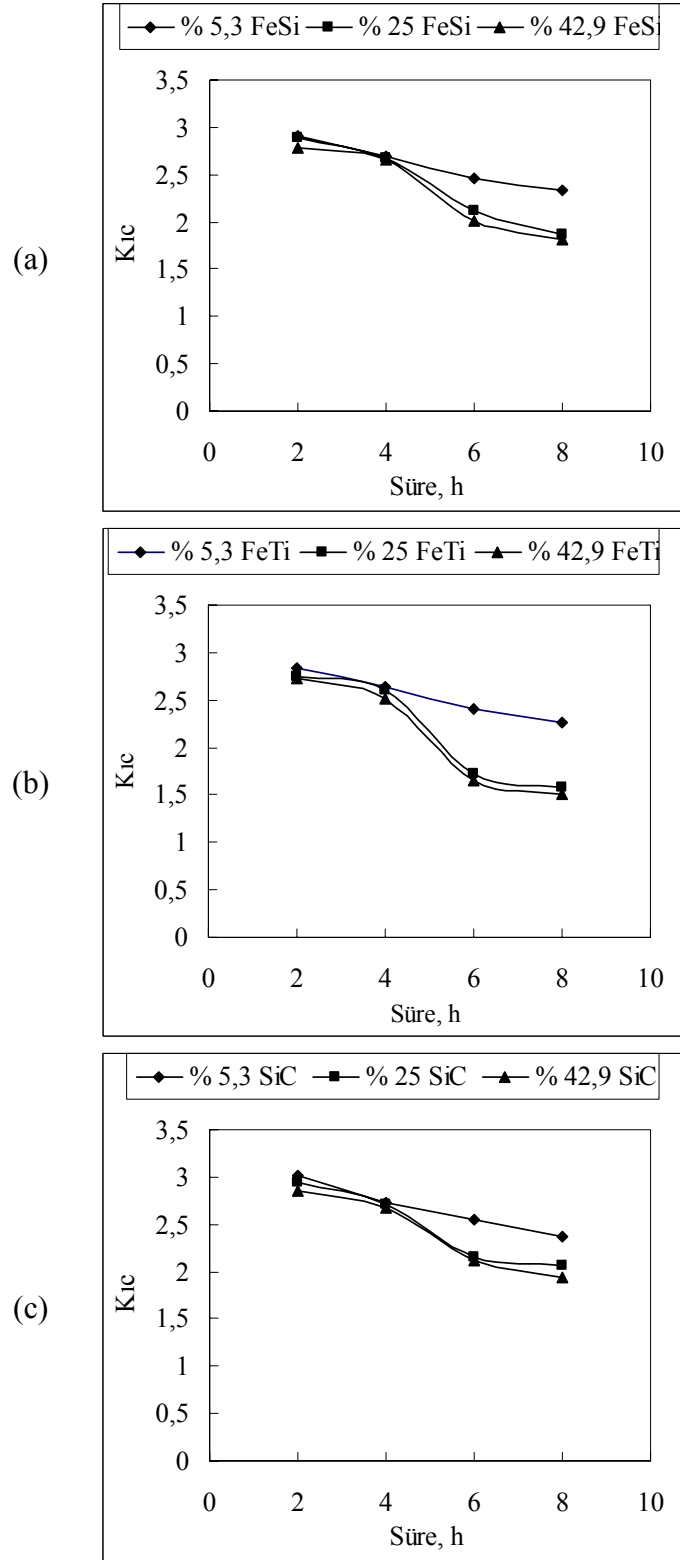
(c)



(d)

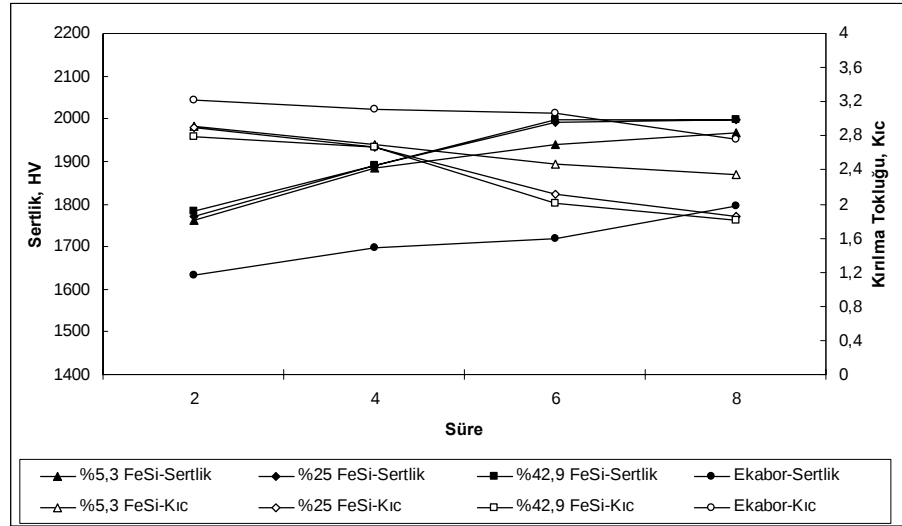


Şekil A. 35: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%5,3, %25 ve %42,9 oranlarında FeSi, FeTi ve SiC katkıları ile) ilavesiyle 850, 950 ve 1050 °C’de 2 (a), 4 (b), 6 (c) ve 8 (d) saat süre ile borlanmış numunelerin yüzey sertlik değerleri.

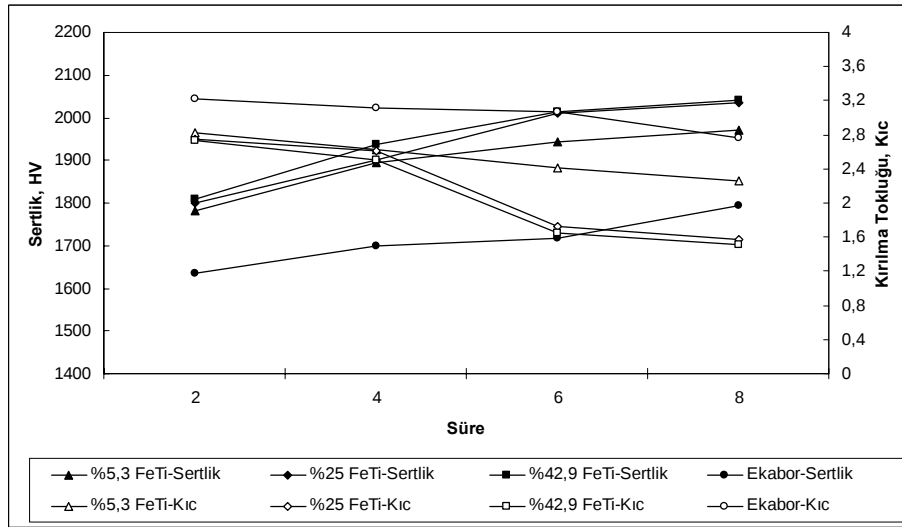


Şekil A. 36: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%5,3, %25 ve %42,9 oranlarında FeSi (a), FeTi (b) ve SiC (c) katkıları ile) değişiminin kırılma tokluğu ile ilişkisi.

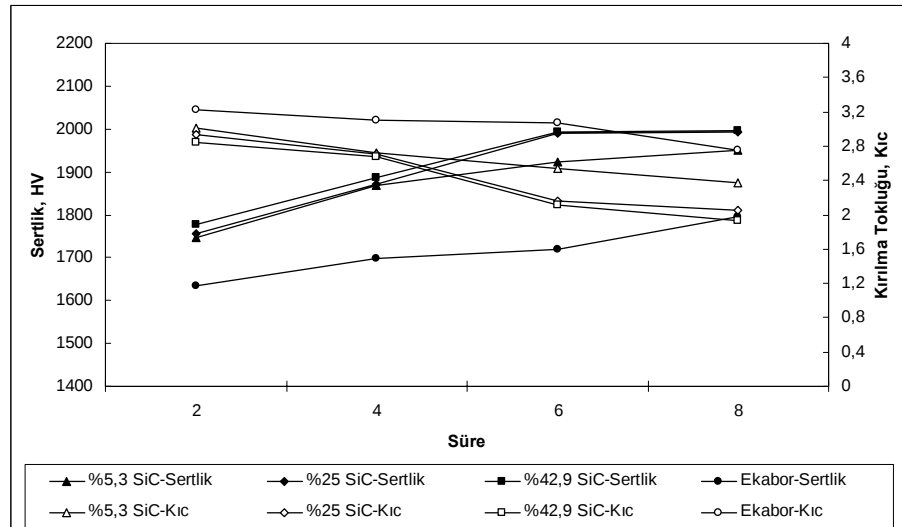
(a)



(b)

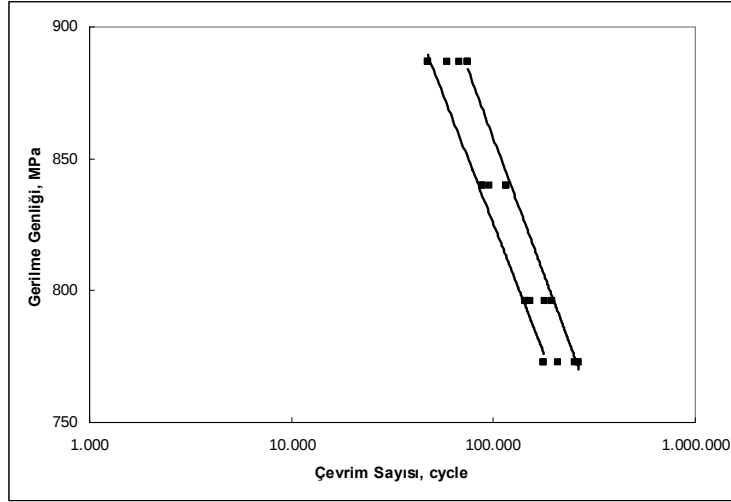


(c)

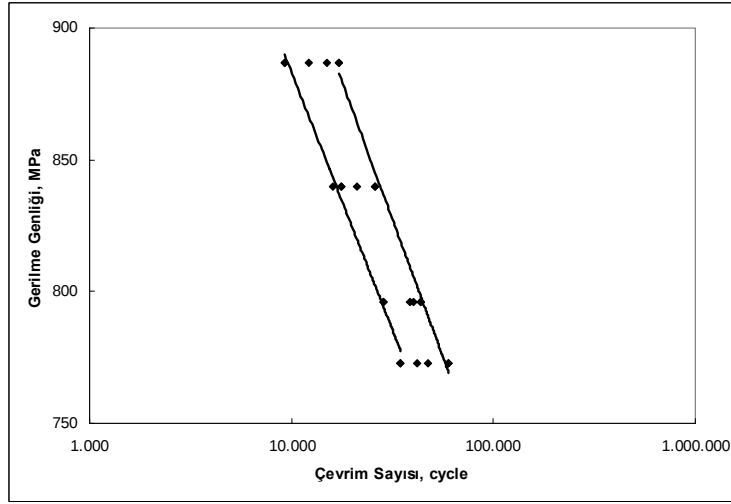


Şekil A. 37: Banyo bileşimindeki (Kalsine Boraks ve Kalsine Borik asit) farklı banyo katkılarının (%5,3, %25 ve %42,9 oranlarında FeSi (a), FeTi ve SiC katkıları ile) değişiminin ve ekabor 2 banyo bileşiminin kırılma tokluğu ve yüzey sertlik değerleri ile ilişkisi.

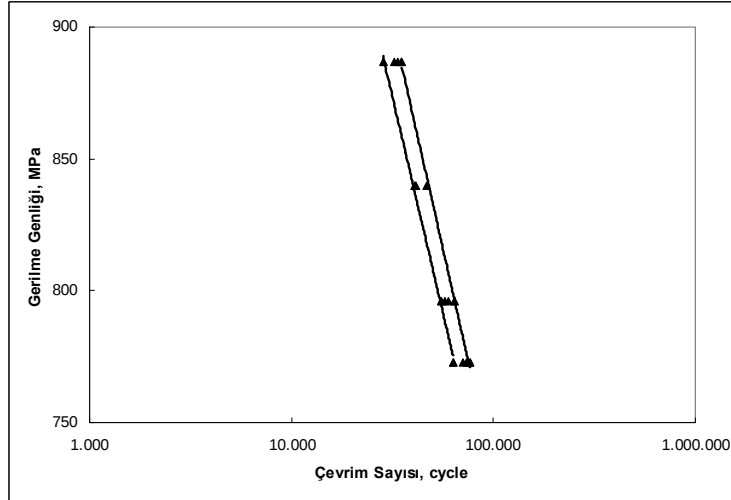
(a)



(b)

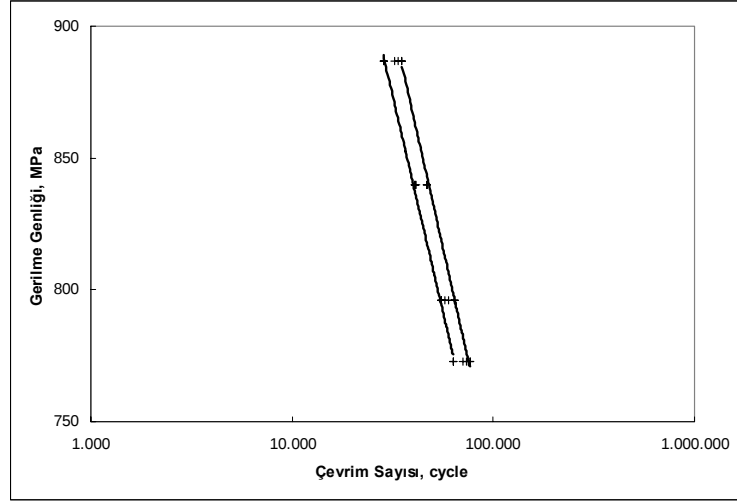


(c)

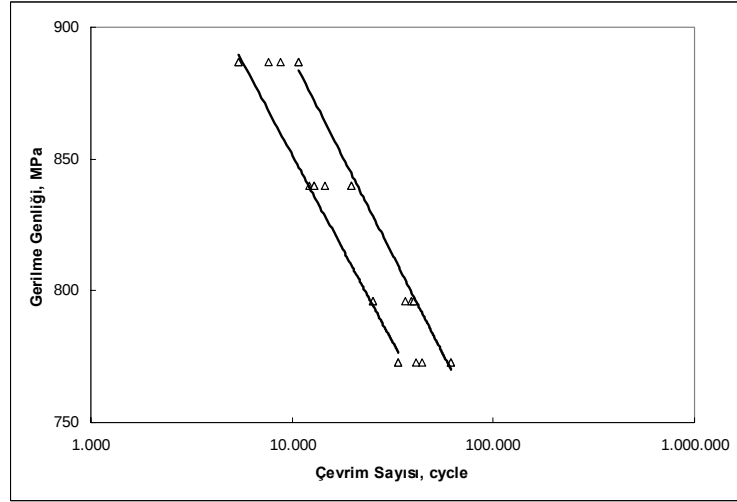


Şekil A. 38: ASTM E739'a göre çizilen Borlanmamış numunelerin, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerle Gerilme genliği (σ_a MPa) ile kırılıncaya kadarki çevrim sayısı (N_f) grafiği (a) Borlanmamış, (b) FeSi Katkısıyla borlanmış, (c) FeTi katkısıyla borlanmış, (d) SiC katkısıyla borlanmış, (e) Ekabor 2 ile borlanmış.

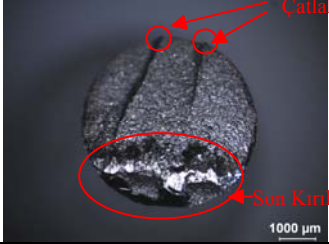
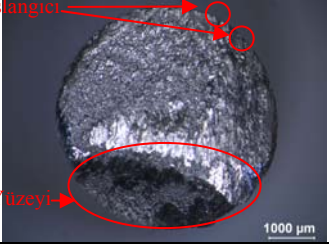
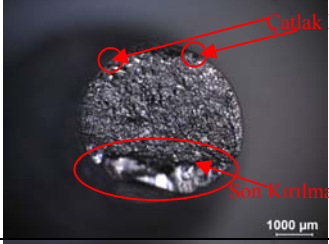
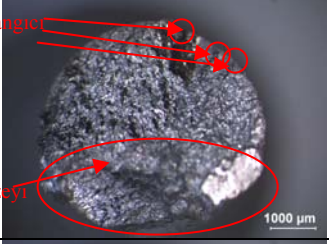
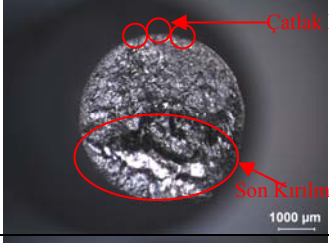
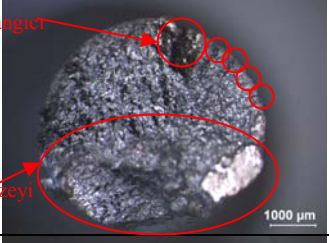
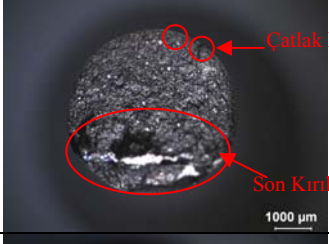
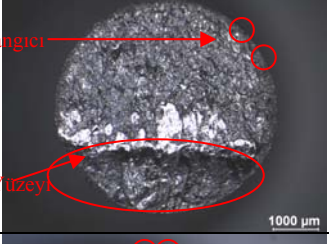
(d)



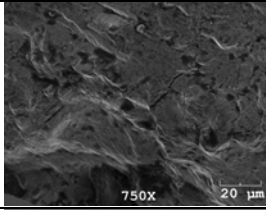
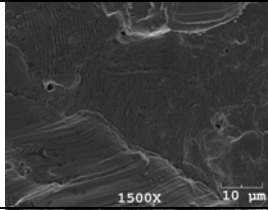
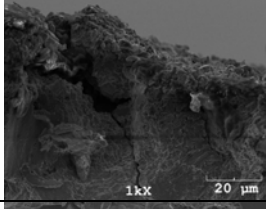
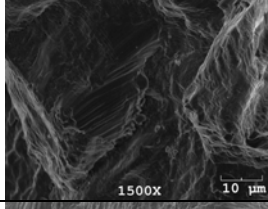
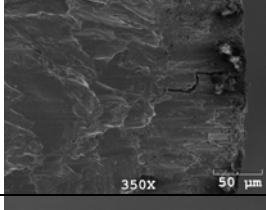
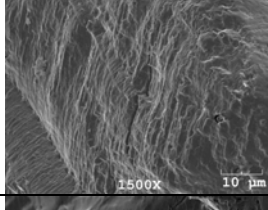
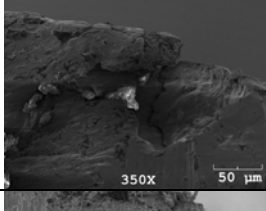
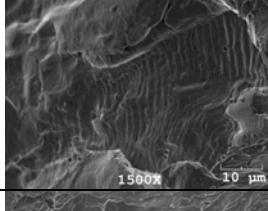
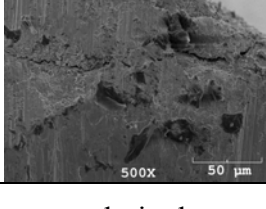
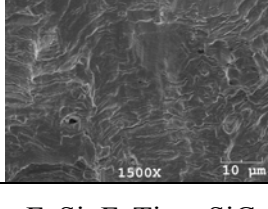
(e)



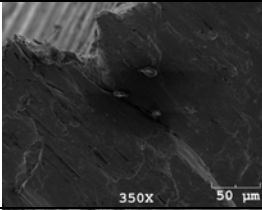
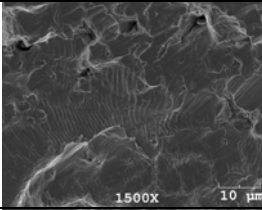
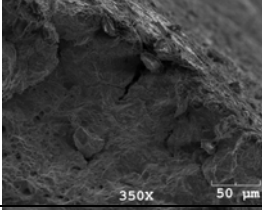
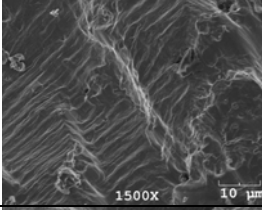
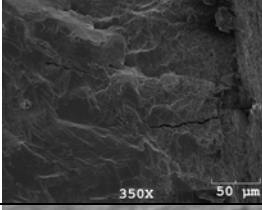
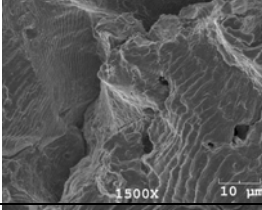
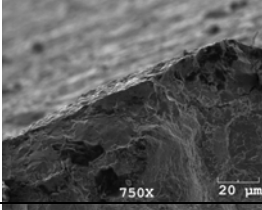
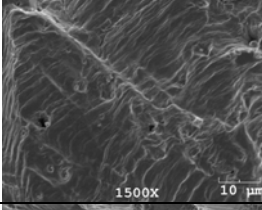
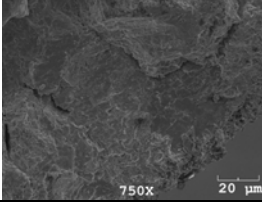
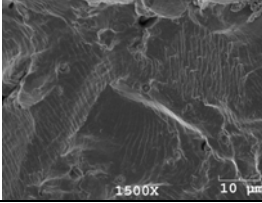
Şekil A. 38: (Devam) ASTM E739'a göre çizilen Borlanmamış numunelerin, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerle Gerilme genliği (σ_a , MPa) ile kırılıncaya kadarki çevrim sayısı (N_f) grafiği (a) Borlanmamış, (b) FeSi Katkısıyla borlanmış, (c) FeTi katkısıyla borlanmış, (d) SiC katkısıyla borlanmış, (e) Ekabor 2 ile borlanmış.

NUMUNE	SM İLE YORULMA KIRIK YÜZEY GÖRÜNÜMLERİ	
	Gerilme Genliği, MPa	
	796 MPa	887 MPa
Borlanmamış		
FeSi Katkısı ile Borlanmış		
FeTi Katkısı ile Borlanmış		
SiC Katkısı ile Borlanmış		
Ekabor 2 ile Borlanmış		

Şekil A. 39: Borlanmamış numunelerin, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin iki farklı Gerilme genliğinde (σ_a MPa) SM ile yorulma kırık yüzey görüntüsü.

NUMUNE	SEM İLE YORULMA KIRIK YÜZEY GÖRÜNÜMLERİ			
	Gerilme Genliği, 796 MPa			
Borlanmamış				
FeSi Katkısı ile Borlanmış				
FeTi Katkısı ile Borlanmış				
SiC Katkısı ile Borlanmış				
Ekabor 2 ile Borlanmış				

Şekil A. 40: Borlanmamış numunelerin, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin 796 MPa Gerilme genliğinde (σ_a MPa) SEM ile yorulma kırık yüzey görüntüsü.

NUMUNE	SEM İLE YORULMA KIRIK YÜZEY GÖRÜNÜMLERİ			
	Gerilme Genliği, 887 MPa			
Borlanmamış				
FeSi Katkısı ile Borlanmış				
FeTi Katkısı ile Borlanmış				
SiC Katkısı ile Borlanmış				
Ekabor 2 ile Borlanmış				

Şekil A. 41: Borlanmamış numunelerin, banyoya yapılan FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle ve ticari ekabor 2 banyosuyla borlanmış numunelerin 887 MPa Gerilme genliğinde (σ_a MPa) SEM ile yorulma kırık yüzey görüntüsü.

EK-B: Çizelgeler

Çizelge B. 1: 316 L tipi paslanmaz çeliğin 950 °C’de 6 saat süreyle farklı borlama banyolarında borlanmasıyla elde edilen borür tabaka kalınlıkları.

Banyo No	% Banyo Bileşenleri				Bileşenler Oranı		Tabaka Kalınlığı, μm
	Kalsine Boraks, gr	Kalsine Borik Asit, gr	FeTi, gr	Boraks ve Borik Asit banyosuna FeTi katkısının oranı, %	FeTi / Kalsine Boraks	Kalsine Borik Asit / Kalsine Boraks	
2-1	95	0	5	5,3	0,1	0,0	22,91
2-2	90	5	5	5,3	0,1	0,1	25,54
2-3	85	10	5	5,3	0,1	0,1	27,97
2-4	80	15	5	5,3	0,1	0,2	29,14
2-5	75	20	5	5,3	0,1	0,3	31,61
2-6	70	25	5	5,3	0,1	0,4	32,75
2-7	65	30	5	5,3	0,1	0,5	56,84
2-8	80	0	20	25	0,3	0,0	24,37
2-9	75	5	20	25	0,3	0,1	26,96
2-10	70	10	20	25	0,3	0,1	28,24
2-11	65	15	20	25	0,3	0,2	30,44
2-12	60	20	20	25	0,3	0,3	31,84
2-13	55	25	20	25	0,4	0,5	35,22
2-14	50	30	20	25	0,4	0,6	58,88
2-15	70	0	30	42,9	0,4	0,0	24,83
2-16	65	5	30	42,9	0,5	0,1	27,24
2-17	60	10	30	42,9	0,5	0,2	31,37
2-18	55	15	30	42,9	0,5	0,3	33,43
2-19	50	20	30	42,9	0,6	0,4	36,10
2-20	45	25	30	42,9	0,7	0,6	43,06
2-21	40	30	30	42,9	0,8	0,8	61,48

Çizelge B. 2: 316 L tipi paslanmaz çeliğin 950 °C’de 6 saat süreyle farklı borlama banyolarında borlanmasıyla elde edilen borür tabaka kalınlıkları.

Banyo No	% Banyo Bileşenleri				Bileşenler Oranı		Tabaka Kalınlığı, μm
	Kalsine Boraks, gr	Kalsine Borik Asit, gr	SiC, gr	Boraks ve Borik Asit banyosuna SiC katkısının oranı, %	SiC / Kalsine Boraks	Kalsine Borik Asit / Kalsine Boraks	
3-1	95	0	5	5,3	0,1	0,0	14,59
3-2	90	5	5	5,3	0,1	0,1	19,90
3-3	85	10	5	5,3	0,1	0,1	20,92
3-4	80	15	5	5,3	0,1	0,2	23,47
3-5	75	20	5	5,3	0,1	0,3	26,05
3-6	70	25	5	5,3	0,1	0,4	29,41
3-7	65	30	5	5,3	0,1	0,5	37,75
3-8	80	0	20	25	0,3	0,0	15,53
3-9	75	5	20	25	0,3	0,1	20,80
3-10	70	10	20	25	0,3	0,1	21,57
3-11	65	15	20	25	0,3	0,2	24,10
3-12	60	20	20	25	0,3	0,3	27,10
3-13	55	25	20	25	0,4	0,5	35,70
3-14	50	30	20	25	0,4	0,6	65,72
3-15	70	0	30	42,9	0,4	0,0	18,15
3-16	65	5	30	42,9	0,5	0,1	21,57
3-17	60	10	30	42,9	0,5	0,2	23,25
3-18	55	15	30	42,9	0,5	0,3	25,94
3-19	50	20	30	42,9	0,6	0,4	27,72
3-20	45	25	30	42,9	0,7	0,6	35,77
3-21	40	30	30	42,9	0,8	0,8	68,83

Çizelge B. 3: Borlama banyosunu oluşturan bileşenlerin oranlarına bağlı olarak reaksiyon ürünlerinin hesaplanmış molları ve oranları.

% Banyo Bileşenleri			Mol			Total B ₂ O ₃	(1/3Ti) / (1/2B ₂ O ₃)
Kalsine Boraks	Kalsine Borik Asit	FeTi	Boraks (B ₂ O ₃)	B ₂ O ₃	Ti		
95	0	5	24,003006	0	0,074091	24,003006	0,0020681281
90	5	5	22739690	0,040445	0,074091	22,780135	0,0021791482
85	10	5	21,476374	0,080891	0,074091	21,557265	0,0023027639
80	15	5	20,213058	0,121336	0,074091	20,334394	0,0024412476
75	20	5	18,949742	0,161782	0,074091	19,111523	0,0025974534
70	25	5	17,686425	0,202227	0,074091	17,888652	0,0027750157
65	30	5	16,423109	0,242672	0,074091	16,665782	0,0029786356
80	0	20	20,213058	0	0,296366	20,213058	0,0098236084
75	5	20	18,949742	0,040445	0,296366	18,990187	0,0104561984
70	10	20	17,686425	0,080891	0,296366	17,767316	0,0111758670
65	15	20	16,423109	0,121336	0,296366	16,544446	0,0120019231
60	20	20	15,159793	0,161782	0,296366	15,321575	0,0129598403
55	25	20	13,896477	0,202227	0,296366	14,098704	0,0140839300
50	30	20	12,633161	0,242672	0,296366	12,875833	0,0154215386
70	0	30	17,686425	0	0,444549	17,686425	0,0168404715
65	5	30	16,423109	0,040445	0,444549	16,463555	0,0180913387
60	10	30	15,159793	0,080891	0,444549	15,240684	0,0195429381
55	15	30	13,896477	0,121336	0,444549	14,017813	0,0212478036
50	20	30	12,633161	0,161782	0,444549	12,794943	0,0232785525
45	25	30	11,369845	0,202227	0,444549	11,572072	0,0257384975
40	30	30	10,106529	0,242672	0,444549	10,349201	0,0287797809

Çizelge B. 4: Borlama banyosunu oluşturan bileşenlerin oranlarına bağlı olarak reaksiyon ürünlerinin hesaplanmış molları ve oranları.

% Banyo Bileşenleri			Mol			Total B ₂ O ₃	(1/3SiC) / (1/4B ₂ O ₃)
Kalsine Boraks	Kalsine Borik Asit	SiC	Boraks (B ₂ O ₃)	B ₂ O ₃	SiC		
95	0	5	24,003006	0	0,112095	24,003006	0,0035025227
90	5	5	22,739690	0,040445	0,112095	22,780135	0,0036905432
85	10	5	21,476374	0,080891	0,112095	21,557265	0,0038998952
80	15	5	20,213058	0,121336	0,112095	20,334394	0,0041344273
75	20	5	18,949742	0,161782	0,112095	19,111523	0,0043989729
70	25	5	17,686425	0,202227	0,112095	17,888652	0,0046996873
65	30	5	16,423109	0,242672	0,112095	16,665782	0,0050445322
80	0	20	20,213058	0	0,448379	20,213058	0,0166369826
75	5	20	18,949742	0,040445	0,448379	18,990187	0,0177083190
70	10	20	17,686425	0,080891	0,448379	17,767316	0,0189271291
65	15	20	16,423109	0,121336	0,448379	16,544446	0,0203261142
60	20	20	15,159793	0,161782	0,448379	15,321575	0,0219484154
55	25	20	13,896477	0,202227	0,448379	14,098704	0,0238521417
50	30	20	12,633161	0,242672	0,448379	12,875833	0,0261174774
70	0	30	17,686425	0	0,672569	17,686425	0,0285205417
65	5	30	16,423109	0,040445	0,672569	16,463555	0,0306389745
60	10	30	15,159793	0,080891	0,672569	15,240684	0,0330973618
55	15	30	13,896477	0,121336	0,672569	14,017813	0,0359846733
50	20	30	12,633161	0,161782	0,672569	12,794943	0,0394238918
45	25	30	11,369845	0,202227	0,672569	11,572072	0,0435899843
40	30	30	10,106529	0,242672	0,672569	10,349201	0,0487406151

Çizelge B. 5: %5,3 FeTi katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Tabaka Kalınlığı (µm)
850	2	4,35
	4	10,51
	6	15,75
950	2	11,88
	4	19,39
	6	32,75
1050	2	19,35
	4	29,85
	6	37,50

Çizelge B. 6: %5,3 SiC katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Tabaka Kalınlığı (µm)
850	2	4,52
	4	8,40
	6	12,63
950	2	9,73
	4	20,12
	6	29,41
1050	2	16,28
	4	30,40
	6	38,54

Çizelge B. 7: %25 FeTi katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Tabaka Kalınlığı (µm)
850	2	7,57
	4	12,76
	6	20,40
950	2	17,80
	4	24,80
	6	31,84
1050	2	20,21
	4	31,87
	6	40,01

Çizelge B. 8: %25 SiC katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Tabaka Kalınlığı (µm)
850	2	7,95
	4	9,20
	6	12,83
950	2	15,30
	4	24,40
	6	27,10
1050	2	31,94
	4	52,53
	6	73,92

Çizelge B. 9: %42,9 FeTi katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Tabaka Kalınlığı (µm)
850	2	10,81
	4	16,85
	6	23,10
950	2	20,00
	4	28,60
	6	31,37
1050	2	48,78
	4	66,90
	6	74,20

Çizelge B. 10: %42,9 SiC katkılı banyo ile borlanmış numunelerin borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen borür tabaka kalınlıkları.

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Tabaka Kalınlığı (µm)
850	2	9,01
	4	14,98
	6	16,42
950	2	18,59
	4	23,00
	6	25,94
1050	2	47,10
	4	79,53
	6	101,92

Çizelge B. 11: Banyoya yapılan FeSi katkılarına ve sıcaklığa bağlı olarak borlama işleminde bor difüzyon katsayıları.

Sıcaklık (°C)	Difüzyon Katsayısı (cm ² /s)		
	%5,3 FeSi	%25 FeSi	%42,9 FeSi
850	1.10 ⁻¹⁰	2.10 ⁻¹⁰	4.10 ⁻¹⁰
950	4.10 ⁻¹⁰	4.10 ⁻¹⁰	5.10 ⁻¹⁰
1050	4.10 ⁻¹⁰	40.10 ⁻¹⁰	87.10 ⁻¹⁰

Çizelge B. 12: Banyoya yapılan FeTi katkılarına ve sıcaklığa bağlı olarak borlama işleminde bor difüzyon katsayıları.

Sıcaklık (°C)	Difüzyon Katsayısı (cm ² /s)		
	%5,3 FeTi	%25 FeTi	%42,9 FeTi
850	2.10 ⁻¹⁰	2.10 ⁻¹⁰	3.10 ⁻¹⁰
950	6.10 ⁻¹⁰	5.10 ⁻¹⁰	4.10 ⁻¹⁰
1050	7.10 ⁻¹⁰	8.10 ⁻¹⁰	22.10 ⁻¹⁰

Çizelge B. 13: Banyoya yapılan SiC katkılarına ve sıcaklığa bağlı olarak borlama işleminde bor difüzyon katsayıları.

Sıcaklık (°C)	Difüzyon Katsayısı (cm ² /s)		
	%5,3 SiC	%25 SiC	%42,9 SiC
850	1.10 ⁻¹⁰	0.7.10 ⁻¹⁰	1.10 ⁻¹⁰
950	5.10 ⁻¹⁰	3.10 ⁻¹⁰	2.10 ⁻¹⁰
1050	8.10 ⁻¹⁰	31.10 ⁻¹⁰	57.10 ⁻¹⁰

Çizelge B. 14: Ticari Ekabor 2 ile yapılan borlamada sıcaklığa bağlı olarak bor difüzyon katsayıları.

Sıcaklık (°C)	Difüzyon Katsayısı (cm ² /s)
	Ekabor 2
850	2.10 ⁻¹⁰
950	11.10 ⁻¹⁰
1050	22.10 ⁻¹⁰

Çizelge B. 15: Banyoya yapılan %5,3 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle borür tabakasının aktivasyon enerjileri (Q) ve frekans faktörü (Do) değerleri.

Banyo Katkısı	Q (kJ/mol)	Do(cm ² /s)
%5,3 FeSi	87,666	1,47.10 ⁻⁶
%5,3 FeTi	78,704	1,05.10 ⁻⁶
%5,3 SiC	129,925	1,05.10 ⁻⁶

Çizelge B. 16: Banyoya yapılan %25 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle borür tabakasının aktivasyon enerjileri (Q) ve frekans faktörü (Do) değerleri.

Banyo Katkısı	Q (kJ/mol)	Do(cm ² /s)
%25 FeSi	181,728	1,35.10 ⁻¹⁴
%25 FeTi	86,096	2,15.10 ⁻⁶
%25 SiC	231,886	3,66

Çizelge B. 17: Banyoya yapılan %42,9 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkılarının ilavesiyle borür tabakasının aktivasyon enerjileri (Q) ve frekans faktörü (Do) değerleri.

Banyo Katkısı	Q (kJ/mol)	Do(cm ² /s)
%42,9 FeSi	185,175	3,80.10 ⁻⁴
%42,9 FeTi	120,283	9,39.10 ⁻⁵
%42,9 SiC	244,444	15,3

Çizelge B. 18: Ekabor 2 banyosuyla oluşmuş borür tabakasının aktivasyon enerjileri (Q) ve frekans faktörü (Do) değerleri.

Banyo Katkısı	Q (kJ/mol)	Do(cm ² /s)
Ekabor 2	149,319	1,96.10 ⁻⁵

Çizelge B. 19: Banyoya yapılan %5,3 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle borlanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Yüzey Pürüzlülük (µm)		
		%5,3 FeSi	%5,3 FeTi	%5,3 SiC
850	2	0,25	0,25	0,47
	4	0,27	0,28	0,30
	6	0,20	0,47	0,40
	8	0,20	0,40	0,53
950	2	0,30	0,40	0,60
	4	0,30	0,45	0,40
	6	0,35	0,50	0,50
	8	0,47	0,45	0,60
1050	2	0,40	0,55	0,70
	4	0,40	0,65	0,60
	6	0,40	0,55	0,60
	8	0,40	0,60	1,16

Çizelge B. 20: Banyoya yapılan %25 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle borlanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Yüzey Pürüzlülük (µm)		
		%25 FeSi	%25 FeTi	%25 SiC
850	2	0,33	0,27	0,33
	4	0,40	0,20	0,27
	6	0,33	0,40	0,20
	8	0,35	0,20	0,40
950	2	0,40	0,30	0,40
	4	0,45	0,33	0,50
	6	0,40	0,50	0,60
	8	0,77	0,90	0,70
1050	2	0,93	0,40	0,60
	4	1,00	0,45	0,73
	6	1,15	0,80	1,10
	8	1,80	0,73	2,30

Çizelge B. 21: Banyoya yapılan %42,9 oranlarındaki FeSi, FeTi ve SiC katkıların ilavesiyle borlanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Yüzey Pürüzlülük (µm)		
		%42,9 FeSi	%42,9 FeTi	%42,9 SiC
850	2	0,40	0,30	0,30
	4	0,40	0,33	0,27
	6	0,30	0,45	0,30
	8	0,30	0,40	0,40
950	2	0,50	0,45	0,40
	4	0,67	0,35	0,50
	6	0,40	0,80	0,33
	8	0,53	1,60	0,60
1050	2	0,90	0,47	1,32
	4	1,20	0,40	1,41
	6	1,80	0,87	1,50
	8	2,60	1,07	2,00

Çizelge B. 22: Ticari ekabor 2 ile borlanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Yüzey Pürüzlülük (µm)
850	2	0,55
	4	0,45
	6	0,4
	8	0,6
950	2	0,5
	4	0,6
	6	0,7
	8	0,85
1050	2	1,1
	4	1,3
	6	1,6
	8	1,85

Çizelge B. 23: Banyo bileşimine %5,3 oranında FeSi ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1756	1876,8	1928,5	1960
20	1662,3	1876,4	1928,4	1960
30	987	1777,5	1928,2	1960
40	934	1623,2	1734,2	1960
60	896	1097,8	1369,3	1371,7
80	784	989	1000	1123
100	567	955	970	1017
120	342	878	882	990
140	338	812	875	945
160	334	721	856	912
180	327	657	765	845
200	310	590	653	712
220	298	511	589	645
240	287	478	496	580

Çizelge B. 24: Banyo bileşimine %5,3 oranında FeSi ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1762,7	1883,2	1939	1965,7
20	1760	1883	1939	1965
30	1635,7	1882,7	1939	1965
40	1474,2	1780,8	1939	1965
60	1397	1699,7	1910	1965
80	1345	1391,9	1452	1965
100	1090	1012,3	1098	1965
120	915	923,9	978	1965
140	911	921,9	967	1965
160	678	689	767	1965
180	613	654	698	1698
200	534	578	678	1369,3
220	498	533	598	1215,8
240	443	490	567	980

Çizelge B. 25: Banyo bileşimine %5,3 oranında FeTi ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1798	1887	1949,5	1971
20	1691	1887	1948,4	1971,2
30	1622	1682	1949,2	1971
40	1190	1452	1734,2	1971
60	902	1002	1369,3	1971
80	889	892	944,9	961,3
100	411	423	438,9	520,3
120	366	376	394,1	482,4
140	301	312	332,3	403,4
160	298	302	321,9	331,2
180	289	301	320,1	321,1
200	278	298	318	320
220	265	285	316,9	318,9
240	245	256	315	318,1

Çizelge B. 26: Banyo bileşimine %5,3 oranında FeTi ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1781,3	1894	1944	1972
20	1781,3	1893,9	1944	1972
30	1523	1894	1944	1972
40	1461	1782	1944	1972
60	1321	1442	1782	1972
80	1110	1190	1443	1972
100	680	882	1109	1972
120	623	675	879	1972
140	622	667	762	1782
160	451	543	672	1561
180	356	455	566	1364
200	314	411	466	1289
220	289	369	378	1191
240	267	352	361	1023

Çizelge B. 27: Banyo bileşimine %5,3 oranında SiC ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1725,1	1844,9	1899,5	1917
20	1693	1844,9	1899,5	1917
30	1671	1782	1899,5	1917
40	1321	1322	1634,2	1917
60	1005	1011	1369,3	1572,3
80	890	910	944,9	961,3
100	771	790	812	920,3
120	711	785	897	912
140	723	765	852	879
160	689	762	821	854
180	611	678	789	843
200	589	634	678	812
220	545	567	656	732
240	412	456	634	567

Çizelge B. 28: Banyo bileşimine %5,3 oranında SiC ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1747,9	1867,9	1924	1951,4
20	1694	1867,9	1924	1951,4
30	1567	1692	1924	1951,4
40	1552	1579	1924	1951,4
60	1378	1457	1790	1951,4
80	1149	1389	1671	1951,4
100	988	1198	1543	1951,4
120	856	1087	1231	1951,4
140	778	991	1099	1951,4
160	679	896	995	1819
180	567	811	812	1778
200	467	774	794	1672
220	414	671	711	1556
240	391	559	689	1452

Çizelge B. 29: Ekabor 2 ile 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1581,2	1611,2	1678,8	1780,2
20	897,9	1611,2	1678,8	1780,2
30	890	1106,8	1678,8	1780,2
40	854,2	1100,4	1678,8	1780,2
60	723,1	1069	1274,1	1644,1
80	697,9	999,2	1101,1	1311,1
100	677,2	880,2	1004,1	1124,1
120	565,3	671,1	890,1	995,1
140	553,7	580,9	687,9	791,9
160	545,9	573,5	585,2	689,2
180	475,2	541,9	553,2	617,2
200	306,4	503,3	527,3	597,3
220	234,1	395,1	441,6	511,6
240	177,2	317	330,6	340,6

Çizelge B. 30: Ekabor 2 ile 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1634,3	1698,1	1718,1	1795,3
20	1534,3	1698,1	1718,1	1795,3
30	1098,6	1698,1	1718,1	1795,3
40	893,2	1174,3	1718,1	1795,3
60	776,6	901,1	1718,1	1795,3
80	674,2	764,2	1265,4	1479,3
100	623,2	709,1	1012,1	1234,3
120	590,1	682,1	882,1	1001,1
140	573,2	587,2	690,6	982,9
160	555,1	572,8	585,2	787,1
180	521,2	558,3	563,2	576,8
200	397,8	444,4	527,3	553,1
220	443	397,6	441,6	497,5
240	234	269	330,6	362,5

Çizelge B. 31: Banyo bileşimine %25 oranında FeSi ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1696,7	1730,9	1775,4	1845,4
20	1480	1683,6	1775	1844
30	1272,3	1324,6	1542	1844
40	1098	1157,9	1354	1844
60	874	1011,6	1146,7	1844
80	770	953	1079	1605
100	567	778	850	1559
120	467	576	689	1213
140	351	456	560	890
160	287	321	346	643
180	230,1	268	298	467
200	227,6	256	276	389
220	221,5	233	243,1	341
240	217,5	229	234	301

Çizelge B. 32: Banyo bileşimine %25 oranında FeSi ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1760	1877	1981	1989
20	1759	1877	1981	1989
30	1200,7	1613,1	1981	1989
40	675	945	1783	1989
60	478	665	1120	1989
80	356	568	887	1989
100	240	469	612	1674
120	190	378	466	997
140	182	298	399	741
160	175	269	330	561
180	174	256	325	423
200	173	241	324	412
220	172,1	230	323	401
240	171	225	312	398

Çizelge B. 33: Banyo bileşimine %25 oranında FeSi ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1770	1890	1992	1997,8
20	1770	1890	1992	1997,8
30	1770	1890	1992	1997,8
40	1770	1890	1992	1997,8
60	1471,7	1799	1992	1997,8
80	1326,7	1432	1992	1997,8
100	730	991	1767,6	1997,8
120	500	756	1427,3	1997,8
140	310,3	451	993,7	1997,8
160	289	440	876	1997,8
180	276	390	769	1997,8
200	256	284	680	1722,8
220	245	282	543	1098,3
240	234	281	456	893

Çizelge B. 34: Banyo bileşimine %25 oranında FeTi ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1692,8	1717,7	1753,5	1836,9
20	832	1116	1439,5	1836,9
30	645,5	983	1197	1836,9
40	568	773	881,3	1836,9
60	396,4	421	573,1	749,9
80	302,8	359,7	389,5	423,1
100	284	304	321,9	375,2
120	236,8	256,7	257,9	280,5
140	232,2	251,1	256	270,1
160	231,3	247,5	255,4	268,7
180	230,1	239,6	251,2	264,3
200	227,6	234,1	249,1	262,1
220	221,5	233,2	246,7	261,9
240	217,5	230,1	243,1	254

Çizelge B. 35: Banyo bileşimine %25 oranında FeTi ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1792,2	1892,2	1994,4	1999,7
20	1792,2	1892,2	1994,4	1999,7
30	1200,7	1892,2	1994,4	1999,7
40	645,9	936,4	1780,4	1999,7
60	375,2	468,7	1705	1999,7
80	306,4	394,2	907,7	1999,7
100	234,1	298,2	759,9	1495,1
120	177,2	234,1	559,8	857
140	176,3	231,9	432	630
160	176	229	411	525
180	174,9	228,4	389	420
200	173,2	227,4	350	423
220	172,1	226,3	332	371
240	172	224	331	350

Çizelge B. 36: Banyo bileşimine %25 oranında FeTi ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1799,3	1901,1	2011,7	2035,6
20	1799,3	1901,1	2011,7	2035,6
30	1799,3	1901,1	2011,7	2035,6
40	1799,3	1901,1	2011,7	2035,6
60	555,1	1901,1	2011,7	2035,6
80	497,8	1901,1	2011,7	2035,6
100	443	1508,3	2011,7	2035,6
120	234	982	2011,7	2035,6
140	232,1	597,6	1801	2035,6
160	232	456	1202,6	1681
180	231,3	390	982	1289,9
200	230	321	788	782,9
220	229	282	673	727,1
240	228,6	281	567	616,8

Çizelge B. 37: Banyo bileşimine %25 oranında SiC ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1642,8	1657,7	1693,5	1812
20	932	1096	1228	1812
30	645,5	783	983	1421,8
40	612	732	879	912
60	544	689	768	876
80	501	634	712	812
100	484	584	654	768
120	411	498	523	596
140	398	423	486	580,5
160	367	398	422	554
180	334	345	378	447
200	301	331	356	401
220	267	298	344	394
240	223	253	289	331

Çizelge B. 38: Banyo bileşimine %25 oranında SiC ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1742,2	1861,2	1915,9	1962,1
20	1742,2	1861,2	1915,9	1962,1
30	1200,7	1213,1	1915,9	1962,1
40	745,9	936,4	1234	1962,1
60	375,2	468,7	1001	1881
80	306,4	394,2	877	1289,9
100	234,1	298,2	678	782,9
120	177,2	234,1	577	587,1
140	176,3	231,9	489	516,8
160	176	229	423	481
180	174,9	228,4	388	413
200	173,2	227,4	345	397
220	172,1	226,3	312	334
240	172	224	289	311

Çizelge B. 39: Banyo bileşimine %25 oranında SiC ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1756	1871	1989	1994,1
20	1756	1871	1989	1994,1
30	1756	1871	1989	1994,1
40	1312,5	1871	1989	1994,1
60	1098,6	1552	1989	1994,1
80	555,1	1019	1685,2	1994,1
100	497,8	982	1432	1994,1
120	443	782	1101	1994,1
140	234	667	892	1994,1
160	232,1	544	811	1888
180	232	457	789	1281
200	231,3	411	658	892
220	230	399	567	762
240	229	312	415	677

Çizelge B. 40: Banyo bileşimine %42,9 oranında FeSi ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1714,2	1757,7	1780,2	1853
20	1580,8	1756	1780,2	1853
30	1228	1445	1780,2	1853
40	1109	1253	1529,7	1853
60	989	1012	1236	1244,6
80	934	959,7	1101	1202
100	868	884	968	1143,7
120	812	856,7	956	1078
140	756	781,1	821	912
160	716	747,5	790	898
180	654	739,6	789	844
200	590	634,1	767	820
220	432	533,2	656	790
240	411	430,1	545	689

Çizelge B. 41: Banyo bileşimine %42,9 oranında FeSi ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1776,6	1882,8	1989,5	1995,4
20	1776,6	1882,8	1989,5	1995,4
30	1580,4	1882,8	1989,5	1995,4
40	1355,6	1674	1654,8	1995,4
60	1206,8	1264	1322,3	1995,4
80	876	989	1036,4	1995,4
100	789	861	915,8	1995,4
120	645	779	858,4	1348
140	543	659	823	991,8
160	456	590	750	887
180	411	428,4	534	616,8
200	378	427,4	528,8	578
220	345	398,3	423,6	456
240	212	224	320	412

Çizelge B. 42: Banyo bileşimine %42,9 oranında FeSi ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1783,2	1891,5	1996,2	1998,9
20	1783,2	1891,5	1996,2	1998,9
30	1783,2	1891,5	1996,2	1998,9
40	1783,2	1891,5	1996,2	1998,9
60	1384,3	1891,5	1996,2	1998,9
80	875	1891,5	1996,2	1998,9
100	678	1891,5	1996,2	1998,9
120	567	1589	1996,2	1998,9
140	456	1345	1996,2	1998,9
160	378	978	1568,9	1610,9
180	296	645	1255,6	1367,1
200	230	567	1123	1245
220	229	389	727,1	1034
240	228,6	298	712	996

Çizelge B. 43: Banyo bileşimine %42,9 oranında FeTi ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1701,8	1730,7	1763,5	1843,9
20	932	1296	1539,5	1843,9
30	645,5	1183	1367	1843,9
40	458	653	951,3	1843,9
60	396,4	421	644,1	1449,9
80	352,8	359,7	379,5	423,1
100	284	294	331,9	375,2
120	236,8	256,7	257,9	280,5
140	232,2	251,1	256,2	270,1
160	231,3	247,5	255,4	268,7
180	230,1	239,6	251,2	264,3
200	227,6	234,1	249,1	262,1
220	221,5	233,2	246,7	261,9
240	217,5	230,1	243,1	256

Çizelge B. 44: Banyo bileşimine %42,9 oranında FeTi ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1801,2	1921,2	2003	2017,7
20	1801,2	1921,2	2003	2017,7
30	1200,7	1613,1	2003	2017,7
40	645,9	936,4	1448,4	2017,7
60	375,2	468,7	971,5	2017,7
80	306,4	394,2	527,3	2017,7
100	234,1	298,2	441,6	1782
120	177,2	234,1	330,6	982
140	176,3	231,9	328,1	876
160	176	229	326	778
180	174,9	228,4	324,3	672
200	173,2	227,4	324,1	612
220	172,1	226,3	323,5	582
240	172	224	323	562

Çizelge B. 45: Banyo bileşimine %42,9 oranında FeTi ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1808,3	1937,6	2015,2	2041,6
20	1808,3	1937,6	2015,2	2041,6
30	1808,3	1937,6	2015,2	2041,6
40	1098,6	1937,6	2015,2	2041,6
60	555,1	1009,2	2015,2	2041,6
80	497,8	672,8	1585,2	2041,6
100	443	508,3	1212	2041,6
120	234	444,4	892	2041,6
140	232,1	397,6	772	2041,6
160	232	289	674	2041,6
180	231,3	286	567	2041,6
200	230	284	511	1582,9
220	229	282	451	12871
240	228,6	281	411	923

Çizelge B. 46: Banyo bileşimine %42,9 oranında SiC ilavesiyle 850°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1662,8	1686,7	1820,1	1831
20	1232	1686,7	1820,1	1831
30	899	1483	1682	1831
40	781	1102	1441	1831
60	677	901	990	1249,9
80	616	899	955	1020
100	567	812	889	899
120	455	556	664	781
140	345	512	611	712
160	331	426	561	654
180	301	367	512	634
200	290	341	455	567
220	287	310	342	521
240	275	282	298	456

Çizelge B. 47: Banyo bileşimine %42,9 oranında SiC ilavesiyle 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1761	1875	1966	1986
20	1761	1875	1966	1986
30	1400,7	1513,1	1892	1986
40	1201	1326	1403	1986
60	1190	1288	1329	1986
80	989	1188	1290	1779
100	802	998	1020	1543
120	771	813	887	1210
140	698	790	873	1034
160	514	678	713	980
180	478	488	590	867
200	415	435	511	786
220	405	411	439	688
240	398	401	411	588

Çizelge B. 48: Banyo bileşimine %42,9 oranında SiC ilavesiyle 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin sertlik dağılımları.

Yüzeyden uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0.01}$)			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
10	1776	1887	1992	1996,3
20	1776	1887	1992	1996,3
30	1412,5	1887	1992	1996,3
40	1302	1887	1992	1996,3
60	1201	1887	1992	1996,3
80	993	1698	1992	1996,3
100	893	1571	1801	1996,3
120	801	1021	1672	1996,3
140	789	892	1021	1891
160	713	789	990	1672
180	677	677	892	1231
200	634	566	856	992
220	611	515	727	889
240	543	453	677	789

Çizelge B. 49: 1050°C’de 2,4,6 ve 8 saat’de farklı katkılarla ve farklı oranlarda borlanmış numunelerin kırılma tokluk değerleri.

Borlama Banyoları	Kırılma Tokluğu (K_{Ic}) (MPa.m ^{1/2})			
	2 saat	4 saat	6 saat	8 saat
Ekabor 2	3,22	3,11	3,07	2,76
%5,3 FeSi Katkısı	2,91	2,70	2,46	2,34
%25 FeSi Katkısı	2,89	2,67	2,11	1,86
%42,9 FeSi Katkısı	2,79	2,66	2,01	1,81
%5,3 FeTi Katkısı	2,83	2,63	2,41	2,26
%25 FeTi Katkısı	2,75	2,61	1,73	1,58
%42,9 FeTi Katkısı	2,73	2,51	1,65	1,51
%5,3 SiC Katkısı	3,01	2,72	2,54	2,37
%25 SiC Katkısı	2,94	2,71	2,16	2,06
%42,9 SiC Katkısı	2,85	2,68	2,11	1,93

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Gökhan BAŞMAN

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul-26.12.1972

Lisans Üniversitesi: İTÜ. Kimya Metalurji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 1991-1995

Yüksek Lisans Üniversitesi: İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Malzeme Programı, 1995-1998

Yayın Listesi:

➤ Science Citation Index (SCI):

- Yapar, U., Arisoy, F., **Basman, G.**, Yesilcubuk, A., Sesen, M. K., 2004. Surface Modification of EN-C35E Steels by Thermo-Chemical Boronizing Process and It's Properties, *Key Engineering Materials*, **264-268**, 633-636.
- Yapar, U., **Basman, G.**, Arisoy, F., Yesilcubuk, A., Sesen, M. K., 2004. Influence of Boronizing on Mechanical Properties of EN-C35E Steel, *Key Engineering Materials*, **264-268**, 629-632.
- Arisoy, C. F., **Basman, G.**, Sesen, M. K., 2003. Failure of a 17-4 PH Stainless Steel Sailboat Propeller Shaft, *Engineering Failure Analysis*, **10**, 711-717.
- Cingi, M., Arisoy, F., Basman, G., Sesen, K., 2002. The Effects of Metallurgical structures of Different Alloyed Glass Mold Cast Irons on The Mold Performance, *Materials Letters*, **55**, 360-363.
- **Basman, G.** Sesen, M.K., Kayalı, E.S., 2001. The Effect of Sputter Cleaning and TiN Coating After Sputter Cleaning on Tensile and Fatigue Behaviour of a Nodular Cast Iron, *Z.Metallkunde*, **92**, 584-588.

➤ Diğer Makaleler:

- Yapar, U., **Basman, G.**, Arisoy, C. F., Sesen M. K., 2003. Çeliklerin Bazı Mekanik ve Korozyon Özelliklerine Borlamanın Etkileri, *Metal Makina*, **16**, **141**, 296- 301.
- Yapar, U., **Basman, G.**, Arisoy, C. F., Sesen M. K., 2002. Borlama ile Çeliklerde Yüzey Sertleştirme, *Metal Dünyası*, **115**, 69-74.

- **Basman, G.**, Atar, E., Kayalı, E.S., 2001. Seramik Malzemelerin Aşınma Davranışı, *Metalurji Dergisi*, **127**, 39.
- Ünlü, N., **Basman G.**, Eruslu, N., 2000. Dökümhanelerde Çevre Kirliliği Problemi, *Metal Dünyası*, **51**, 53
- **Basman, G.**, Sesen, M.K., Kayalı, E.S., 1998. Seramik İnce Filmle Kaplanmış Malzemelerin Yorulma Davranışı, *Metal Dünyası*, **66**, 1-6.

➤ **Kongreler:**

- Yeşilçubuk, S.A., **Basman, G.**, Sesen, M.K., 2008. Otomotiv Endüstrisinde Magnezyum Alaşımların Uygulamaları, *12nci Uluslar arası Malzeme Sempozyumu*, IMSP, Denizli / Türkiye.
- Ersöz, A., Arısoy, C.F., **Basman, G.**, Sesen, M.K., 2008. AISI 4140 Makina Yapım Çeliğinin Elektrokimyasal Borlama ile Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin Geliştirilmesi, *12nci Uluslar arası Malzeme Sempozyumu*, IMSP, Denizli / Türkiye.
- Arıkan, A., Yeşilçubuk, S.A., **Basman, G.**, Sesen, M.K., 2008. Otomotiv Endüstrisinde Nano Kaplama Uygulamaları ve Nano Kaplamanın Modellenmesi, *12nci Uluslar arası Malzeme Sempozyumu*, IMSP, Denizli / Türkiye.
- Er, İ., **Basman, G.**, Arısoy, F., Sesen, M.K., 2008. GX95MnCrMoB 5-5-4 Çeliğinin Mikroyapı ve Eroziyon Aşınma Davranışına Isıl İşlemin Etkisi, *12nci Uluslar arası Malzeme Sempozyumu*, IMSP 2008, Denizli / Türkiye.
- Ersöz, A., Arısoy, C.F., **Basman, G.**, Sesen, M.K., 2008. AISI 4140 Çeliğinin Elektrokimyasal Borlanması Borür Tabakasının Büyüme Kinetiğinin İncelenmesi, *14ncü Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul / Türkiye.
- Arısoy, C. F., **Basman, G.**, Sesen, M.K., 2007. The Effect of Boride Ceramic Coating Produced by Thermochemical Boronizing Technique on Mechanical and Corrosion properties of EN C35 E Automotive Steels, *Proceedings of the 10 th. International Conference and Exhibition of the European Ceramic Society*, Berlin / Germany.
- **Basman, G.**, Topcu, F., Sesen, M.K., 2006. Yaprak Yayların Hasarları ve Hasarlanmış Bir Yaprak Yayın Hasar Analizi, *13ncü Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul / Türkiye.
- **Basman, G.**, Arısoy, F., Yapar, U., Sesen, M. K., 2005. Borlama Tekniği ile 41Cr4 Çeliğinin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi, *12nci Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul / Türkiye.
- Erdem, V. E., Arısoy, F., **Basman, G.**, Sesen, M. K., 2005. SAE 1060 Çeliğinin Eroziyon Aşınma Özelliklerinin Aşınmaya Dirençli Ticari Çelik Plakalarla Karşılaştırılması, *12nci Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul / Türkiye, 1018-1028.
- Sesen, M. K., Arısoy, C. F., **Basman, G.**, Erdem, E., 2005. 19 ncü yüzyılda bina inşaatlarında kullanılan çelik malzeme ve aletlerin metalurjisi, *3ncü Demir Çelik Sempozyumu*, Kdz. Ereğli Zonguldak / Türkiye.
- Yapar, U., **Basman, G.**, Arısoy, F., Yesilcubuk, A., Sesen, M. K., 2003. Influence of Boronizing on Mechanical Properties of EN-C35E Steel, *8 th. ECERS Conference and Exhibition of the European Ceramic Society*, İstanbul / Turkey.
- Yapar, U., **Basman, G.**, Arısoy, F., Yesilcubuk, A., Sesen, M. K., 2003. Surface Modification of En-C35E Steels By Thermochemical Boronizing Process And Its Properties” 2. Iron and Steel Symposium, Zonguldak / Turkey.

- Sesen, M. K., **Basman, G.**, Arisoy, F., 2003. Failures of Stainless Steels Worked Under Dynamic Stress at The Marine Environment and Analysis of a Failure, *Proceedings of the 6th. International Fracture Conference*, Selcuk University Konya / Turkey, 493-500.
- Yapar, U., Arisoy, F., **Basman, G.**, Yesilcubuk, A., Sesen, M. K., 2003. Surface Modification of EN-C35E Steels by Thermo-Chemical Boronizing Process and It's Properties", *8 th. ECERS Conference and Exhibition of the European Ceramic Society*, Istanbul / Turkey.
- Turanlı, G., Arisoy, F., **Basman, G.**, Sesen, M. K., 2002. Magnezit Cevherinin Kalsinasyon Davranışına Özelliklerin Etkisi, *11nci Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul / Türkiye.
- Arıkan, M., **Basman, G.**, 2001. Otomotiv Endüstrisi için Yeni Çelik Ürünler ve Özellikleri, *1.nci Demir Çelik Sempozyumu*, Zonguldak / Türkiye.
- Sesen, M.K., **Basman, G.**, Ünlü, N., 2001. Metal Hurdalarının Geri Kazanımı, *1.nci Demir Çelik Sempozyumu*, Zonguldak / Türkiye.
- **Basman, G.**, Sesen, M. K., Kayalı, E.S., 2000. PVD Yöntemi ile TiN Seramik İnce Filmle Kaplanmış Küresel Grafitli Dökme Demirin Yorulma Davranışı, *10ncu Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul / Türkiye.

➤ **Seminer Notları:**

- Baydogan M., **Basman G.**, Mindivan, H, Arisoy F., Cimenoglu H., Sesen M. K., 2003. Çelik Seçimi, *TMMOB Çelik Seçimi Semineri*, Iskenderun / Türkiye.