

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



**BORLANMIŞ AISI 304, AISI 420 VE AISI 430 PASLANMAZ
ÇELİKLERİN İÇYAPI, SERTLİK VE KOROZYONA
DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜRKER TÜRKOĞLU

BALIKESİR, OCAK - 2017

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



**BORLANMIŞ AISI 304, AISI 420 VE AISI 430 PASLANMAZ
ÇELİKLERİN İÇYAPI, SERTLİK VE KOROZYONA
DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜRKER TÜRKOĞLU

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. İrfan AY (Tez Danışmanı)

Doç. Dr. Sare ÇELİK

Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN

BALIKESİR, OCAK - 2017

KABUL VE ONAY SAYFASI

Türker TÜRKOĞLU tarafından hazırlanan “BORLANMIŞ AISI 304, AISI 420 VE AISI 430 PASLANMAZ ÇELİKLERİN İÇYAPI, SERTLİK VE KOROZYONA DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 09.01.2017 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

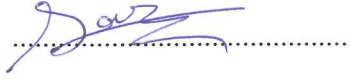
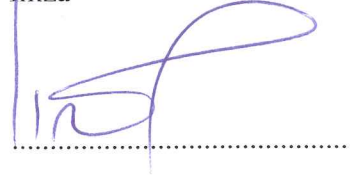
Jüri Üyeleri

Danışman
Prof. Dr. İrfan AY

Üye
Doç. Dr. Sare ÇELİK

Üye
Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN

İmza



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

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

ÖZET

**BORLANMIŞ AISI 304, AISI 420 VE AISI 430 PASLANMAZ
ÇELİKLERİN İÇYAPI, SERTLİK VE KOROZYONA DAYANIKLILIK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
TÜRKER TÜRKOĞLU
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. İRFAN AY)

BALIKESİR, OCAK - 2017

Endüstride teknoloji geliştikçe, ihtiyaçlar değişmekte ve bu ihtiyaçları karşılamak için yeni yöntemler ortaya çıkmaktadır. Borlama işlemi demir esaslı malzemelere uygulanabilen bir ısıl işlem prosesidir. Bu çalışmada kullanılan malzemeler; AISI 304 Östenitik paslanmaz çelik; endüstride en yaygın olarak kullanılmakta olan tiptir, AISI 420 Martenzitik paslanmaz çelik; buhar, gaz türbinleri, dişli, rulman ve millerde ve AISI 430 Ferritik paslanmaz çelik; egzoz manifoldu, turbo şarj ve katalitik konvertör elamanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Çalışmada AISI 304, AISI 420 ve AISI 430 paslanmaz çelik numunelere 850-925 -1000°C sıcaklıklarda 2-4-6 saat sürelerinde kutu borlama işlemi uygulanmıştır. Borlanmış numunelere metalografik işlemler gerçekleştirilmiş ve optik mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. Oluşan bor tabakası kalınlığı, mikro sertlik değerleri ve HCl asidi içerisindeki kütle kayıpları ölçülmüştür. Borlama sıcaklığı ve süresi arttıkça bor tabakası kalınlıklarının ve sertliklerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu işlemler neticesinde en fazla bor tabakası kalınlığı 1000°C'de 6 saat borlanan AISI 304 malzemesinden elde edilmiştir. Borlama işlemi için aktivasyon enerjileri hesaplanmış ve en yüksek aktivasyon enerjisi 242.153 kJ/mol ile AISI 420 çeliğinden elde edilmiştir. Daha sonra XRD analizi gerçekleştirilerek borlama işlemi sonrası oluşan fazlar tespit edilmiştir. Son olarak %10 HCl asit içerisinde bulunan numunelerin yüzde kütle kayıpları hesaplanarak borlama işleminin korozyona direnci etkisi ortaya konulmuştur.

ANAHTAR KELİMELEER: Borlama, Paslanmaz Çelik, AISI 304, AISI 420, AISI 430

ABSTRACT

INVESTIGATION OF PROPERTIES HARDNESS, CORROSION RESISTANCE AND MICROSTRUCTURE ON THE BORONIZED AISI 304, AISI 420 AND AISI 430 STAINLESS STEELS

MSC THESIS

TÜRKER TÜRKOĞLU

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING**

(SUPERVISOR: PROF. DR. İRFAN AY)

BALIKESİR, JANUARY 2017

As technology develops, needs change and new methods emerge to meet these needs. Boronizing is a heat treatment process that can be applied to iron-based materials. In this study; AISI 304 Austenitic stainless steel is the most widely used in the industry, AISI 420 Martensitic stainless steel is used in steam, gas turbines, gears, bearings and mills and AISI 430 Ferritic stainless is frequently used in exhaust manifold, turbocharger and catalytic converter elements. In study, AISI 304, AISI 420 and AISI 430 stainless steel samples were applied on pack boronizing treatment at temperatures of 850-925-1000°C for 2-4-6 hours. Metallographic processing was performed on the borided samples and optical microstructure images were obtained. The resulting borided layer thickness, micro hardness values and mass losses in HCl acid were measured. It has been determined that the boron layer thicknesses and hardnesses increase with increasing the boron temperature and the duration. As a result of these operations, the maximum boron layer thickness was obtained from AISI 304 material which is boronized for 6 hours at 1000 °C. In addition, the activation energies for the boronizing treatment were calculated and the highest activation energy was obtained from the AISI 420 steel with 242.153 kJ / mol. Then, XRD analysis was carried out to determine phases formed after the boronizing process. Finally, the percent mass loss of the samples in 10% HCl acid was calculated and the corrosion resistance effect of the boronizing process was determined.

KEYWORDS: Boronizing, Stainless Steel, AISI 304, AISI 420, AISI 430

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xi
1. GİRİŞ	1
2. BOR ELEMENTİ	3
2.1 Bor Elementinin Özellikleri	4
2.2 Bor Elementinin Kullanım Alanları	7
3. BORLAMA	8
3.1 Borlama Yöntemleri	10
3.1.1 Katı Ortamda Borlama	10
3.1.2 Sıvı Ortamda Borlama	13
3.1.3 Gaz Ortamda Borlama	14
3.1.4 Plazma Borlama	15
3.2 Borlama İşleminin Avantaj ve Dezavantajları	16
3.2.1 Borlama İşleminin Avantajları.....	16
3.2.2 Borlama İşleminin Dezavantajları	17
4. BORÜR TABAKASININ ÖZELLİKLERİ	19
4.1 Borür Tabakası	19
4.2 Geçiş Bölgesi.....	21
4.3 Borür Tabakasına Alaşım Elementlerinin Etkisi.....	22
4.4 Bor Tabakasının Mekanik Özellikleri	24
4.4.1 Sertlik.....	25
4.4.2 Aşınma Direnci	25
4.4.3 Korozyon Direnci	27
4.5 Bor Tabakasının Kalınlığı	28
4.6 Bor Tabakası Çeşitleri	29
4.7 Borlanabilen Malzemeler	30
5. PASLANMAZ ÇELİKLER	31
5.1 Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması	31
5.1.1 Ferritik Paslanmaz Çelikler	32
5.1.2 Martenzitik Paslanmaz Çelikler	33
5.1.3 Dupleks (Çift Fazlı) Paslanmaz Çelikler	34
5.1.4 Östenitik Paslanmaz Çelikler	35
5.1.5 Çökeltme Yoluyla Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler	36
5.2 Paslanmaz Çeliklerin Korozyonu	36
5.2.1 Oyuklanma(Pitting) Korozyonu	37
5.2.2 Tanelerarası Korozyon.....	39
5.2.3 Galvanik Korozyon.....	40
5.2.4 Aralık Korozyonu	40
5.2.5 Gerilmeli Korozyon	41
6. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	42
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	47

7.1	Deney Amacı	47
7.2	Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Spektral Analizleri.....	47
7.3	Deney Numunelerinin Kodlanması	49
7.4	Metalografik Çalışmalar	50
7.5	Sertlik Ölçümü	56
7.6	XRD Analizi	57
7.7	Korozyon Direnci İncelemesi.....	58
8.	DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	59
8.1	Mikroyapı Görüntüleme Ve Tabaka Kalınlığı Ölçümleri	59
8.1.1	Borür Tabakasının İrdelenmesi.....	85
8.2	Aktivasyon Enerjisi Hesabı	88
8.3	Mikro Sertlik İnceleme Sonuçları	93
8.4	XRD İnceleme Sonuçları.....	98
8.5	Korozyon Direnci İnceleme Sonuçları	101
9.	GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	108
10.	KAYNAKLAR.....	111

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Siyah-Gri, beta Boru; 5 değişik bor yapısından sadece birisi .	3
Şekil 2.2: Fe - B ikili denge diyagramı	5
Şekil 2.3: Borun kafes yapısı	6
Şekil 3.1: Katı borlama yönteminin şematik resmi	11
Şekil 3.2: Gaz ortamda borlama tertibatının şematik gösterimi	14
Şekil 3.3: Plazma borlama tesisat şeması	16
Şekil 4.1: Tek ve iki fazlı borür tabakalarının şematik görünüşü	21
Şekil 4.2: Alaşım elementlerinin borlama sırasındaki hareket yönleri	24
Şekil 4.3: Düşük karbonlu çelikte farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin aşınma davranışları	26
Şekil 4.4: Ck 45 çeliğinin 56 °C 'de, bazı asitlere karşı korozyon direnci	27
Şekil 4.5: Borür tabakası çeşitleri	29
Şekil 5.1: Bazı paslanmaz çelik türlerinin mikroyapıları	32
Şekil 5.2: AISI 430 Ferritik paslanmaz çelik mikroyapı görüntüsü	33
Şekil 5.3: AISI 304 Östenitik paslanmaz çeliğin mikroyapı görüntüsü	35
Şekil 5.4: Paslanmaz çelik içerisinde çukurcuk büyümesi	37
Şekil 5.5: Genel korozyon ve pitting (oyuklanma) korozyon farkı	38
Şekil 5.6: Tanelerarası korozyonun şematik görünüşü	39
Şekil 7.1: Zımparalama parlatma cihazı ve numune kesme cihazı	50
Şekil 7.2: Borlamanın gerçekleştirildiği sıcaklık-süre grafiği	51
Şekil 7.3: Borlama işleminin gerçekleştirildiği fırın	52
Şekil 7.4: Borlama potası içerisindeki numunelerin yerleşimi	53
Şekil 7.5: Borlama öncesi ve sonrası numune görüntüleri	53
Şekil 7.6: Metalografik incelemede kullanılan Leica DM2700M marka optik mikroskop	54
Şekil 7.7: Bor tabakası kalınlık ölçümünün tipik görüntüsü	55
Şekil 7.8: Future Tech marka mikro sertlik ölçüm cihazı	56
Şekil 7.9: Çalışmada kullanılan XRD cihazı	57
Şekil 7.10: Paslanmaz çeliklerin kullanıldığı bazı parçalar	58
Şekil 8.1: AISI 304 (Östenitik) malzemesinin matris yapısının mikroyapı görüntüsü	59
Şekil 8.2: AISI 420 (Martenzitik) malzemesinin matris yapısının mikroyapı görüntüsü	60
Şekil 8.3: AISI 430 (Ferritik) malzemesinin matris yapısının mikroyapı görüntüsü	61
Şekil 8.4: Borlanmış numunenin bölgesel gösterimi	61
Şekil 8.5: 850 °C de 2 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü	62
Şekil 8.6: 850 °C de 2 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü	62
Şekil 8.7: 850 °C de 2 saat borlanan AISI 430 mikroyapı görüntüsü	63
Şekil 8.8: 850 °C de 4 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü	64
Şekil 8.9: 850 °C de 4 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü	64

Şekil 8.10: 850 °C de 4 saat borlanan AISI 430 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	65
Şekil 8.11: 850 °C de 6 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	66
Şekil 8.12: 850 °C de 6 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	66
Şekil 8.13: 850 °C de 6 saat borlanan AISI 430 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	67
Şekil 8.14: 850°C de 2-4-6 saat borlanan malzemelerin tabaka kalınlığı grafiği	68
Şekil 8.15: 925 °C de 2 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	68
Şekil 8.16: 925 °C de 2 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	69
Şekil 8.17: 925 °C de 2 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	69
Şekil 8.18: 925 °C de 4 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	70
Şekil 8.19: 925 °C de 4 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	71
Şekil 8.20: 925 °C de 4 saat borlanan AISI 430 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	71
Şekil 8.21: 925 °C de 6 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	72
Şekil 8.22: 925 °C de 6 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	73
Şekil 8.23: 925 °C de 6 saat borlanan AISI 430 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	73
Şekil 8.24: 925°C de 2-4-6 saat borlanan malzemelerin tabaka kalınlığı grafiği	74
Şekil 8.25: 1000°C de 2 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	75
Şekil 8.26: 1000°C de 2 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	75
Şekil 8.27: 1000°C de 2 saat borlanan AISI 430 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	76
Şekil 8.28: 1000°C de 4 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	77
Şekil 8.29: 1000°C de 4 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	77
Şekil 8.30: 1000°C de 4 saat borlanan AISI 430 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	78
Şekil 8.31: 1000°C de 6 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	79
Şekil 8.32: 1000°C de 6 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	79
Şekil 8.33: 1000°C de 6 saat borlanan AISI 430 malzemesinin mikroyapı görüntüsü.....	80
Şekil 8.34: 1000°C de 2-4-6 saat borlanan malzemelerin tabaka kalınlığı grafiği	80

Şekil 8.35: AISI 304 paslanmaz çelik numunelerin mikroyapı görüntüleri (500X)	81
Şekil 8.36: AISI 420 paslanmaz çelik numunelerin mikroyapı görüntüleri (500X)	82
Şekil 8.37: AISI 430 paslanmaz çelik numunelerin mikroyapı görüntüleri (500X)	83
Şekil 8.38: AISI 304 malzemesinin borlama sıcaklığı ve difüzyon derinliği . grafiği	84
Şekil 8.39: AISI 420 malzemesinin borlama sıcaklığı ve difüzyon derinliği . grafiği	84
Şekil 8.40: AISI 430 malzemesinin borlama sıcaklığı ve difüzyon derinliği grafiği	85
Şekil 8.41: Borladığımız numunelerin literatürde ki görsel tipleriyle karşılaştırılması	86
Şekil 8.42: Elementlerin borlamaya etkisi	87
Şekil 8.43: AISI 304 için 850°C’de x^2-t grafiği	89
Şekil 8.44: AISI 304 için 925°C’de x^2-t grafiği	89
Şekil 8.45: AISI 304 için 1000°C’de x^2-t grafiği	90
Şekil 8.46: AISI 304 için $\ln D - 1/T$ grafiği.....	90
Şekil 8.47: AISI 420 için 850°C’de x^2-t grafiği	90
Şekil 8.48: AISI 420 için 925°C’de x^2-t grafiği	91
Şekil 8.49: AISI 420 için 1000°C’de x^2-t grafiği	91
Şekil 8.50: AISI 420 için $\ln D - 1/T$ grafiği.....	91
Şekil 8.51: AISI 430 için 850°C’de x^2-t grafiği	92
Şekil 8.52: AISI 430 için 925°C’de x^2-t grafiği	92
Şekil 8.53: AISI 430 için 1000°C’de x^2-t grafiği	92
Şekil 8.54: AISI 430 için $\ln D - 1/T$ grafiği.....	93
Şekil 8.55: Mikro sertlik ölçüm örneği.....	93
Şekil 8.56: 1000°C- 4 ve 6 saat borlanan AISI 304 numunelerin sertlik grafiği	94
Şekil 8.57: 1000°C- 4 ve 6 saat borlanan AISI 420 numunelerin sertlik grafiği	95
Şekil 8.58: 1000°C- 4 ve 6 saat borlanan AISI 430 numunelerin sertlik .grafiği	96
Şekil 8.59: 1000 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 304 malzemesinin X ışınları difraksiyon paterni.....	98
Şekil 8.60: 1000 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 420 malzemesinin X ışınları difraksiyon paterni.....	99
Şekil 8.61: 1000 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 430 malzemesinin X ışınları difraksiyon paterni.....	99
Şekil 8.62: 1000 °C’ de 6 saat borlanmış numunelerin X ışınları difraksiyon paterni.....	100
Şekil 8.63: Genel ve pitting korozyonu	104
Şekil 8.64: 1000 °C – 6 saat borlanmış AISI 430 malzemesinin %10 HCl asiti içerisindeki kütle kaybı.....	105
Şekil 8.65: 1000 °C – 6 saat borlanmış AISI 420 malzemesinin %10 HCl asiti içerisindeki kütle kaybı.....	105
Şekil 8.66: 1000 °C – 6 saat borlanmış AISI 304 malzemesinin %10 HCl asiti içerisindeki kütle kaybı.....	106

Şekil 8.67: İşlem görmemiş malzemelerin %10 HCl asiti içerisindeki kütle değişimleri.....	106
---	-----

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Kristalin borun yapısı ve kafes parametreleri	5
Tablo 2.2: Bor ve bazı bileşiklerin sertlikleri.....	5
Tablo 2.3: Bor kullanım alanları	7
Tablo 3.1: Çeşitli yüzey işlemleri ile elde edilebilecek sertlik değerleri	9
Tablo 4.1: FeB ve Fe ₂ B fazlarının tipik özellikleri	20
Tablo 5.1: Paslanmaz çelik türlerinin bazı özellikler açısından kıyaslanması .32	
Tablo 7.1: Çalışmada kullanılan malzemelerin spektral analiz sonuçları	48
Tablo 7.2: Deney programı ve numunelerin kodları	49
Tablo 8.1: 850°C'de 2 saat borlanan AISI 304 için aktivasyon enerjisi .hesaplama örneği.....	89
Tablo 8.2: 1000°C- 4 ve 6 saat borlanan AISI 304 numunelerin sertlik değerleri.....	94
Tablo 8.3: 1000°C- 4 ve 6 saat borlanan AISI 420 numunelerin sertlik değerleri.....	95
Tablo 8.4: 1000°C- 4 ve 6 saat borlanan AISI 430 numunelerin sertlik değerleri.....	96
Tablo 8.5: 4-6 saat borlanmış AISI 420 ve AISI 430 malzemelerinin sertlik değerleri.....	97
Tablo 8.6: %10 HCl asiti içindeki numunelerin ham ölçüm değerleri	101
Tablo 8.7: %10 HCl asiti içindeki numunelerin 2. ölçüm değerleri	102
Tablo 8.8: %10 HCl asiti içindeki numunelerin 3. ölçüm değerleri	102
Tablo 8.9: %10 HCl asiti içindeki numunelerin 4. ölçüm değerleri	102
Tablo 8.10: %10 HCl asiti içindeki numunelerin 5. ölçüm değerleri	103
Tablo 8.11: %10 HCl asiti içindeki numunelerin yüzde ağırlık kayıpları ..	103

SEMBOL LİSTESİ

P	: Basınç
T	: Sıcaklık
HV	: Hard Vickers
VSD	: Vickers Sertlik Değeri
B	: Bor
B₄C	: Bor Karbür
BCl₃	: Bortriklorit
BN	: Bor nitrür
C	: Karbon
Fe	: Demir
FeB	: Demir borür
Fe₂B	: Demirdiborür
AISI	: American Iron and Steel Institute
µm	: Mikrometre

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, desteğiyle her zaman yanımda olan, tez danışmanım değerli hocam Prof. Dr. İrfan AY'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam esnasında değerli fikir ve tecrübeleriyle bana yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ hocama ve XRD çalışmalarında yardımlarından dolayı Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN hocama çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamda, bor tozlarının temini hususunda yardımları için Vezneli A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca hiçbir zaman maddi manevi desteklerini benden esirgemeyen, her zaman yanımda olup beni bu günlere getiren sevgili Aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Balıkesir, Ocak 2017

Türker TÜRKOĞLU

1. GİRİŞ

Endüstri uygulamalarında kullanılan malzemelerin aşınma korozyon ve sürtünme gibi tribolojik etkiler sonucunda azalan kullanım ömürlerinin artırılması ancak çalışmakta olan yüzey bölgelerini güçlendirerek mümkün olabilmektedir. Korozyon ve aşınma neticesinde dünya çapında her sene aşırı miktarda malzeme kayıpları olmaktadır. Ülkelerin korozyon sebebiyle kayıpları gayrisafi milli hâsıllarının % 3,5 – 5'i arasında değişmektedir. [1].

Malzemeler yer aldıkları ortamda, çevre-yüzey etkileşimi neticesinde bazı bozulmalara uğrayabilirler. Malzeme ve çevre arasında fiziksel ve kimyasal açıdan herhangi bir reaksiyon oluşması, malzemenin hasar görmesine sebep olabilmektedir. Daha iyi özelliklere sahip malzemeler ortaya çıkarmak için, yüzey işlemleri bilimi ve teknolojisi, gelişmiş ülkelerde büyük çapta önem kazanmaktadır. Yüzey işlemleri, endüstri içerisinde kendine en yaygın kullanım alanı olarak demir ve demir esaslı ürünler arasında yer bulmuştur. Yüzey işlemlerini, kaplama ve yüzey dönüşüm işlemleri olarak iki sınıfa ayırarak ele almak mümkündür. Kaplama metal malzeme üzerine bir element veya bileşiğin biriktirilerek bir tabaka oluşturulma işlemi olarak tanımlanabilir. Yüzey dönüşüm uygulamalarında ise, yüzeyin içyapısı ya da kimyasal yapısının değiştirilmesi söz konusudur [2].

Çeliklerin aşınma dirençlerini arttırmak amacıyla çalışmalar yapılmakta ve endüstride çeşitli metotlar uygulanmaktadır. Metotlar; yüzey kaplama ve astarlama, ısıl işlem ile yüzey sertleştirme ve kompozit malzeme üretimi gerçekleştirme olarak gösterilebilir. Bu yöntemler arasında ise en ekonomik ve en kolay uygulanabilir olan metot olarak yüzey sertleştirme gösterilebilir. Yüzey sertleştirme metotlarından karbürleme ve nitrürleme endüstride en yaygın olarak tercih edilen metotlardır. Fakat son zamanlarda borlama yöntemi karbürleme ve nitrürleme işlemine kıyasla daha fazla yüzey sertliği ve dolayısıyla daha yüksek aşınma direnci sağladığından ötürü tercih sebebi olmaya başlamıştır [3].

Bu çalışmada üç farklı paslanmaz çelik tipine AISI 304, AISI 420, AISI 430 borlama işlemi uygulayarak tabaka kalınlığı, sertlik, korozyon direnci özelliklerine borlama işleminin etkisi incelenmiştir.

Bu sebeple üç farklı sıcaklıkta 850-925-1000 °C ve üç farklı sürede 2-4-6 saat Ekabor2 tozu ile malzemeler alaşımlandırılmıştır. Borlama işlemi sonrasında malzemeler kesitleri boyunca kesilmiştir. Kesilen numuneler bakalite alındıktan sonra sırasıyla zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri uygulanarak incelemeye hazır hale getirilmiştir. Optik mikroskop vasıtasıyla yapılan incelemelerde tabaka kalınlıkları hesaplanmış ve optik mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. Mikrosertlik cihazı ile borlanmış numunelerin sertlikleri yüzeyden matrise doğru hesaplanmıştır. Borlanmış malzemenin ve borlanmamış paslanmaz çeliğin korozyon direncinin borlama ile nasıl değiştiğini saptamak için numuneler asit içerisine yerleştirilerek belirli bir süre boyunca kütle kayıpları hesaplanarak incelenmiştir. Son olarak çalışmanın sonuçları ve değerlendirme yapılarak bu konu üzerine çalışma yapacaklar için önerilerde bulunulmuştur.

2. BOR ELEMENTİ

Bor, yerkabuğunda seyrek olarak bulunan elementlerden bir tanesidir. İçerisinde 150'den fazla mineral ihtiva etmesine rağmen tabiatta serbest olarak bulunmamaktadır [4].

Bor elementi kökeni araştırıldığında Buraq/Baurach (Arapça) ve Burah (Farsça) kelimelerinden gelen ağırlıklı olarak metalik davranış ortaya koyan Bor (B), ilk defa 1808 yılında Gay-Lussac ve Jacques Thenard ile Sir Humphry Davy tarafından Bor Oksit'in Potasyum ile birlikte ısıtılmasıyla elde edilmiştir. Kimyasal olarak ametal bir element olan kristal bor, normal sıcaklıklarda su, hava ve hidroklorik/hidroflorik asitler ile soy davranış göstermekte olup sadece yüksek konsantrasyonlu Nitrik Asit ile sıcak ortamda Borik Asit'e dönüşebilmektedir. Buna ek olarak yüksek sıcaklıklarda saf oksijen ile reaksiyona girerek Bor Oksit(B_2O_3), aynı koşullarda nitrojen ile Bor Nitrit(BN), ayrıca bazı metaller ile Magnezyum Borit(Mg_3B_2) ve Titanyum Diborit(TiB_2) gibi endüstride bazı uygulamalarda kullanılan bileşikler oluşabilmektedir [5].



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

Yaklaşık Atom Ölçüsü: 10,811
Periyodik Atom Numarası: 5
Ergime Noktası: 2180°C
Kaynama Noktası: 3650°C (Basınç altında)
Oksidasyon sayısı: 3
Yoğunluk: 2,35 g/cm³
Sertlik (Mohs): 9,3
Atom çapı: 85 pm
Elektron dağılımı.: [He]2s²2p¹
Doğadaki izotopları: B – 10 19,57%
B – 11 80,43%
Elektronegatiflik: 2,04 (Pauling)
*) Yukarıdaki verilerin geneli resimdeki beta boruna istinadendir

Bor maden yataklarının ülkemizde en çok bulunduğu yerler Uludağ'ın etrafında kümelenmiştir. Bor yatakları, Eskişehir/Kırka, Kütahya/Emet, Balıkesir/Bandırma, Kestelek, Hisarcık, Bigadiç, Susurluk-Sultansazlığı ile sınırlanmaktadır. Bu bölge aynı zamanda dünya bor cevherlerinin de % 70'ini bünyesinde barındırır. Türkiye'nin bugüne kadar keşfedilmiş bor madenleri (B₂O₃) bazında toplam 2.064 milyon ton olup şu anki tüketim hızı devam edecek olursa dünyaya 700 yıl yetmesi düşünülmektedir [5, 6].

2.1 Bor Elementinin Özellikleri

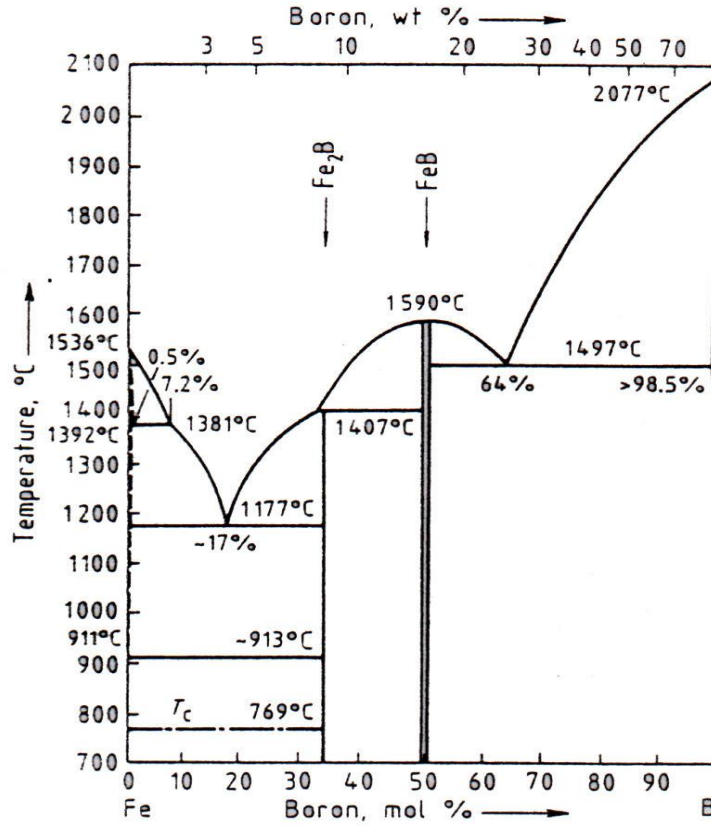
Periyodik tabloda III. grubunda bulunan bor elementinin atom numarası 5, atom ağırlığı 10.81, atom çapı 1.78 Å ve ergime noktası 2400°C dir. Bor 2.33 ± 0.002 gr/cm³ yoğunluklu kristal ve 2.3 gr/cm³ yoğunluklu amorf olmak üzere iki şekilde bulunur. Kristalin borun yapısı ve kafes parametreleri Tablo 2.1' de, bor ve bazı bileşiklerin sertlik değerleri ise Tablo 2.2' de verilmiştir [7, 8].

Tablo 2.1: Kristalin borun yapısı ve kafes parametreleri

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

Tablo 2.2: Bor ve bazı bileşiklerin sertlikleri

Malzeme	Mohs sertlik
Bor (element)	9,3
Bor karbür (B ₄ C)	9,32
Bor nitrür (BN)	1,2
Elmas (standart)	10



Şekil 2.2: Fe - B ikili denge diyagramı [9].

Bor, Karbon esaslı Elmas elementinden sonra dünyada bulunan en sert ikinci madendir. Bor elementi; ısıya dayanımının yanı sıra ergime ve kaynama sıcaklığı çok yüksek olan bir elementtir. 20°C’de ki elektrik geçirgenliği düşük olmasına rağmen, ısınmasıyla birlikte önemli ölçüde artış göstermektedir. Öyle ki 600°C sıcaklık civarında, oda sıcaklığına oranla bu katsayı 100 misli artar. Saydam olmayan siyah amorf yapının yanında 4 değişik kristal yapısı daha vardır [5].

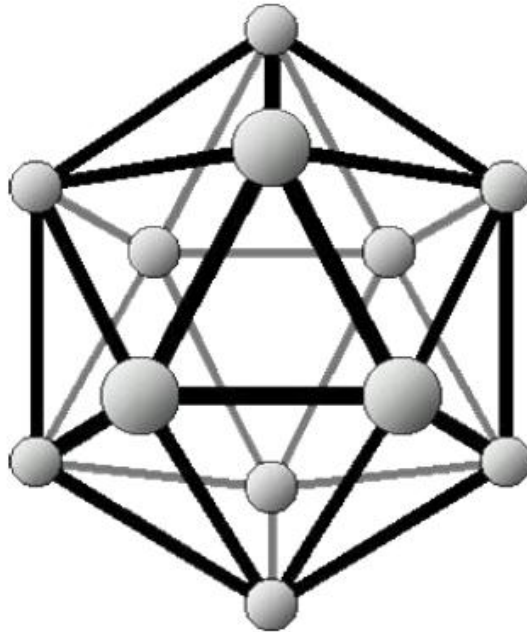
α – orthorombal Bor (kırmızı, saydam)

β – orthorombal Bor (siyah, gri parlak)

α – tetragonal Bor (siyah)

β – tetragonal Bor (kırmızı)

Tüm kristal yapılarında birleşme yapısı 12 köşeli olarak meydana gelmektedir. Bu tür bir kristali 20 yüzeyli olarak da tanımlamak mümkündür. Borun en sağlam yapısı; Amorf bordan ya da yüksek derecede (1200 °C) β – hegzagonal bordan elde edilen α – orthorombal bordur [5].



Şekil 2.3: Borun kafes yapısı [5].

2.2 Bor Elementinin Kullanım Alanları

Bor ürünlerinin kullanıldığı alanlar Tablo 2.3’de gösterilmiştir [5, 10].

Tablo 2.3: Bor kullanım alanları

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

3. BORLAMA

Mossion 1895 yılında, çelik malzemelere borlama ısıl işleminin uygulanabileceğini söylemiş ve bu konuda birçok çalışma ortaya çıkarmıştır. Ancak özellikle de II. Dünya Savaşı'ndan hemen ardından bu konu hususunda araştırma ve çalışmalar artarak yoğunluk kazanmıştır [11].

Borlama ısıl işlemi; bor atomlarının, sert bir bor katmanı oluşturmak için ana malzeme üzerine difüze edildiği termokimyasal yüzey sertleştirme prosesidir. Bor atomları nispeten küçük boyutlu ve çok hareketli olmasının yanı sıra metalik malzemenin yüzeyine kolay bir şekilde difüze olması sebebiyle karbonlu, düşük alaşımlı, paslanmaz çelik malzemeler ve birçok malzeme grubu üzerinde uygulanabilmektedir. Yüksek sertlik gösteren borlama işlemi uygulanmış metal yüzeyi aşınma direnci, sıcaklık direnci ve korozyon direnci bakımından iyi özelliklere sahiptir [12].

Borlama ısıl işlemi yüzeyi titizce temizlenerek hazırlanmış olan malzemelere 700-1000⁰C sıcaklık aralığında, tercihen 1-12 saat sürelerde, bor ihtiva eden katı toz, pasta, sıvı veya gaz ortamlarda gerçekleştirilebilmektedir. Borlama işlemiyle yüzeyde bulunan bor ve demir atomları sıcaklığın etkisiyle bileşik oluşturarak yüzeyde FeB ve Fe₂B yapılarının oluşması sağlanır. Bu ortaya çıkarılan yapıların oluşup oluşmaması ise farklı parametrelere bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir [13, 14].

Bu proseste bor kaynağı olarak ise; amorf bor, B₄C (bor karbür), Na₂B₄O₇ (susuz boraks), H₂B₆, tabakanın düzenli büyümesini sağlayan aktivatör (KBF₄), işlem sıcaklığında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluşturan ve ortamdaki malzemelerin ana malzemeye yapışmasını engelleyen dolgu maddesi ve deoksidanlardan (SiC, vb.) oluşan bazı karışımlar kullanılır [15-16].

Endüstride uygulanmakta olan geleneksel yüzey sertleştirme prosesleriyle kıyaslandığında ise borlamanın birçok avantajı mevcuttur. Bor tabakasının en büyük avantajı çok yüksek sertlik değerine (1450-5000 HV) sahip olması ve yüksek

sıcaklıklarda dahi sertliğini muhafaza edebilmesidir. Borlama işlemi sonrasında çelik malzemelerde ortaya çıkan sertlik değerleri ile diğer yüzey sertleştirme işlemleri sonucunda elde edilen sertlik değerleri Tablo 2.1’de karşılaştırılmalı olarak ortaya konmuştur. Oluşan bor tabakasının sertliği ile geleneksel sertleştirme yöntemlerinde elde edilen sertlik değerleri arasındaki büyük fark net olarak görülmektedir [13,17,18].

Tablo 3.1: Çeşitli yüzey işlemleri ile elde edilebilecek sertlik değerleri [18].

Malzeme	Mikrosertlik (HV)
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540- 600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 çeliği	630 -700
Yüksek hız çeliği BM 42	900-910
Nitrürlenmiş çelik	650-1700
Semantasyonlu düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
WC+Co	1160-1820
Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ seramikler	1483
Al ₂ O ₃ +TiC+ ZrO ₂ seramikler	1730
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Elmas	>10000

Yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayısı kombinasyonu, başta adhezyon ve abrazyon aşınması olmak üzere korozyon ve yüksek sıcaklık oksidasyonun sebebiyet verdiği sorunlara karşı önemli dayanıklılık sağlar. Az

alaşımli çeliklerin asidik ortamlara karşı dayanımlarını (örneğin sülfürik, hidroklorik ve fosforik asit) arttırabilir. Östenitik paslanmaz çeliklerin hidroklorik aside karşı dayanımını arttırabilmektedir. [13,15].

3.1 Borlama Yöntemleri

DIN 17014'e göre ise borlama; termokimyasal işlem yoluyla bor atomları ile kullanılan parça yüzeyinin zenginleştirilmesi olarak tarif edilmektedir. Yani termal enerjinin kullanılmasıyla bor atomlarının iş parçasının yüzeyin içerisine doğru yayınması ve o noktada matris malzemenin atomları ile borür bileşiklerinin oluşturulmasıdır. [19].

Borlama işlemi esnasında, bor atomları malzeme yüzeyine difüze oldukça farklı özellikler gösteren çeşitli katmanlar ortaya çıkacaktır. Malzemenin en dış kısmında borür tabakası, onun bir altında difüzyon bölgesi(geçiş bölgesi) bunun altında da matris bölgesi yani kullanılan ana malzeme bulunmaktadır.

Borür tabakasının kalınlığı birçok farklı parametreye bağlı olarak farklılık gösterir. Malzemenin kimyasal kompozisyonu, dönüşüm ve ergime sıcaklığına ve alaşım elementlerinin oranına bağlı olarak değişir. Borlanmış tabakanın kırılabilirliği ise borür tabakasının kalınlığı ile birlikte artmaktadır. Borür tabakasının kalınlığı; borlama yöntemine, sıcaklığına ve süresine bağlı olarak değişir. Borlama tabakasının kalınlığı proses süresine ve sıcaklığa bağlı olarak artmaktadır [19-20].

3.1.1 Katı Ortamda Borlama

Borlama işlemleri kıyaslanacak olursa en yaygın olarak kullanılan yöntem katı ortamda borlama işlemidir. Bu yöntem görece basit bir yöntem olmasının yanı sıra, basit donanım gerektirmesi, ekonomik olmasının yanında güvenli olması ayrıca kullanılan tozların kimyasal bileşimlerinde değişiklik yapılabilmesi hususundan tercih edilmektedir [19].

Ticari alanda katı ortam borlama maddeleri kullanım alanlarına göre sınıflanılarak satılmaktadır.

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

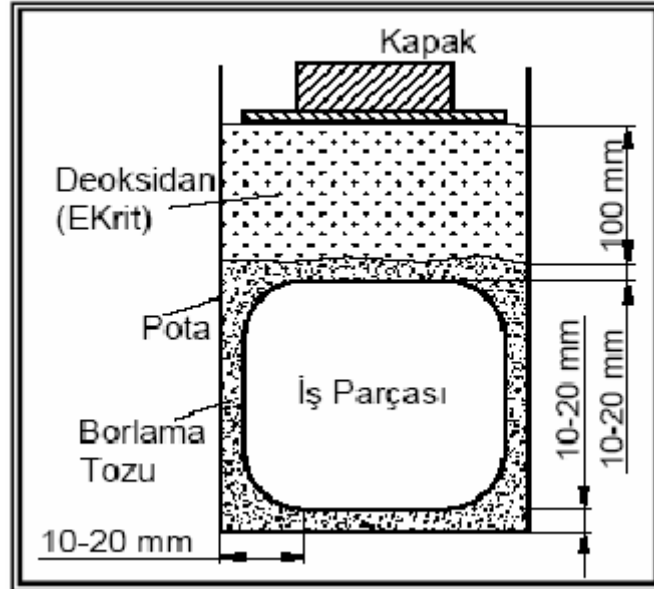
Ekabor 2: Granüllüdür. Yüzey pürüzlülüğü açısından çok yüksek kaliteye sahiptir. Düşük alaşımlı çelikler için kullanılır.

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

Ekabor Pasta: Macun yapısında olup metalik malzemelerin borlanması istenen bölgelerine sürülerek uygulanır [5-7].

Ekabor HM: Sert metallerin borlanması için özel olarak üretilmiştir.

Katı ortamda borlama yöntemi; toz ortamda borlama ve pasta borlama olarak iki çeşittir.



Şekil 3.1: Katı borlama yönteminin şematik resmi [18].

Toz ortamda borlama yönteminde; yüzeyi borlanacak malzeme, toz halindeki bor kaynağı olarak kullanılan ortam içerisinde yaklaşık olarak 800 - 1000 °C sıcaklıklarda 4 - 10 saat bekletilmesi sonucunda borlama işlemi gerçekleştirilir. Bor sağlayıcı toz işlem sırasında ısıya dayanıklı çelik sac kutu içerisine konumlandırılır ve borlanacak parça bu tozun içerisine gömülür. Bu toz, parçanın tüm yüzeylerinde en az 10 mm kalınlığında olması gerekmektedir. Kutuların ağzı bir kapak ile kapatıldıktan sonra önceden belirli bir sıcaklık çevrimine getirilmiş fırın içerisine yerleştirilir ve fırın kapağı kapatıldıktan sonra fırın içi sıcaklığı borlama sıcaklığına yükseltilir. Belirli bir süre içerisinde beklendikten sonra kutumuz fırından alınarak soğutulur ve parça içerisinden çıkarılır. Bu esnada çelik kutunun kapağı kutunun üzerinde kendi ağırlığı sayesinde durmalıdır. Sementasyon işleminde olduğu gibi sıkıca kapatılmasına gerek yoktur. Eğer işlem normal atmosfer de gerçekleştirilecekse kapak sıkıca kapatılır. Bu yöntem koruyucu gaz atmosferi içinde de yapılabilir. Bu yöntem maliyet bakımından diğer türlere göre ucuzdur ve özel bir teknik gerektirmez [21].

Borlama ortamının ana bileşeni borkarbür, ferrobor ve amorf bor malzemelerdir. Bor korbür diğer malzemelere kıyasla daha ucuzdur. Amorf borun saf halinin ise aşırı pahalı oluşunun yanı sıra saf ferrobor eldesinin endüstriyel açıdan çok zor olması bu proseslerin bırakılmasına sebebiyet vermiştir. Diğer bor verici toz ortam olarak kullanılan bor karbür ise amorf bor ve ferrobora kıyasla ucuz olup, bileşimi zamana göre sabittir. Bütün bu etiklere rağmen amorf bor tuzuna aktivatör olarak amonyum klorür eklenerek yapılabilir. Ferrobor ortamında yapılan borlama işlemi sonucu elde edilen tabaka teknik olarak kullanılamaz. Aktivatör dolgu maddeleri ile bir arada kullanılabilir [22].

Pasta borlama yönteminde; borlama işlemi için kullanılması gereken tozlar macun haline getirildikten sonra borlanacak parçanın üzerine yaklaşık olarak 3 mm kalınlıkta olacak şekilde uygulanır. Parça yüzeyine sürülen macun mümkün oldukça hızlı bir şekilde sıcak hava akımında, ön ısıtma bölümünde veya kurutma fırınında maksimum 150 °C'de kurutulması gerekmektedir. Gerektiği takdirde ise macun üzerine tekrarlı olarak birkaç kez olmak koşuluyla biraz daha sürülebilir. Kurutma işleminden sonra macun ile kaplanmış parçalar önceden ısıtılmış fırın içerisine konumlandırılır ve fırın ağzı kapatıldıktan sonra borlama sıcaklığına ısıtılır. Belirli

süre içerisinde bu sıcaklıkta tutulan parçalar dışarı çıkartılır ve soğumaya terk edilir. Parçalar yeterince soğutulduktan sonra malzeme yüzeyine yapışmış olarak duran artıklar temizlenir ve böylelikle borlama ısıl işlemi gerçekleştirilmiş olur [21].

3.1.2 Sıvı Ortamda Borlama

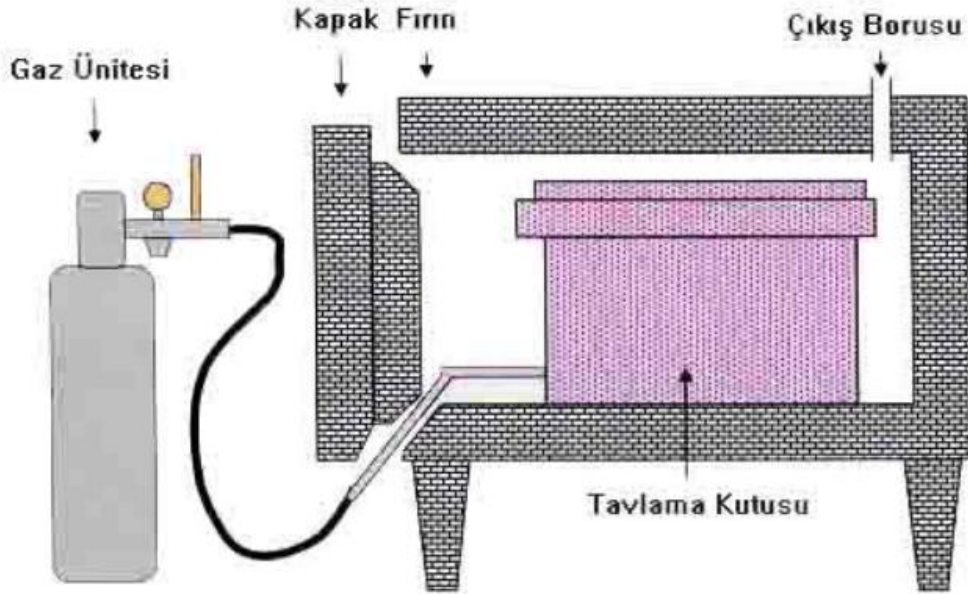
Bu yöntemde ise borlama işleminin gerçekleştirildiği banyo sıvı haldedir. Borlama ısıl işlemi yaklaşık olarak 700-1000°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. Sıvı ortamda borlama, elektrolitik olan ve olmayan sıvı borlama olarak iki ana grupta toplanmaktadır. Sıvı ortamda borlama yönteminin birçok sakıncası mevcuttur; Borlama işleminin başarılı olarak sonuçlandırılması için borlama esnasında banyo ortamının vizkositesi mutlaka artmamalıdır. Bu sebeple sıvı banyo ortamına asla tuz ilavesi yapılmaktadır. Korozif ortamlara dayanıklı fırınlara gereksinim vardır. Borlama sonrasında kullanılan iş parçası yüzeyinde tuz kalıntıları ve reaksiyona girmeyen bor yapıları gözlemlenmiştir. Bu gibi örnekler istenmeyen bileşenlerin giderilmesi zaman bunun yanı sıra özellikle para kaybına yol açmaktadır.

Demir esaslı malzemelerin elektrolitik sıvı borlama ısıl işlem uygulaması, 900-950 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. Tuz banyosu içerisinde elektrolitik borlama işleminde, katot olarak borlanacak demir esaslı malzeme, anot olarak grafit ve elektrolit olarak ise boraks kullanılmaktadır. Borlama işlemi, yaklaşık 900-950 °C sıcaklık aralığında 4-6 saat süre ile 0.15-0.20 A/cm² akım altında gerçekleştirilmektedir. İş parçasının her tarafında homojen bir kaplama tabaka kalınlığı elde edilebilmesi için elektroliz sırasında parça kademeli olarak döndürülmektedir. Düşük alaşımli çeliklerde ise yüksek akım yoğunluğu kullanılarak çok ince kaplamaların elde edilmesinde çok kısa sürelerde borlama işlemi yeterli olmaktadır. Alaşımli çeliklerde bu işlemde bahsedecek olursak kalın kaplama tabakalarının elde edilebilmesi için düşük akım yoğunluğu ve daha uzun süreler içerisinde borlama ısıl işlemi gerçekleştirilmektedir [13, 15].

3.1.3 Gaz Ortamda Borlama

Gaz ortamda borlama işleminde ise işleminde kullanılan ortam gazdır. Borlama işlemi esnasında kullanılan gazlar Ar ve H₂ gazları olup, ayrıca bir evapotartörde gaz haline getirilmiş bir bor kaynağının (BCl₃ gibi) belirli karışımının, dış ortama kapalı paslanmaz çelik malzemedan yapılmış oda içerisindeki numune üzerine püskürtülmesi yoluyla uygulanmaktadır [16].

Bu çeşit borlama işleminde, bor kaynağı olarak bor halojenürleri, diboran ve organik bor bileşikleri kullanılır. Gaz borlayıcıların en önemli üstünlüğü, gaz sirkülasyonunun bir sonucu olarak daha kompakt bir bor dağılımının sağlanabilmesi ve elde edilmelerinin kolay olmasıdır. Genel olarak gaz ortamda borlama işleminde, bor potansiyelinin ayarlanabilmesi sebebiyle tek fazlı bor tabakasını ortaya çıkarmak mümkündür.



Şekil 3.2: Gaz ortamda borlama tertibatının şematik gösterimi [5].

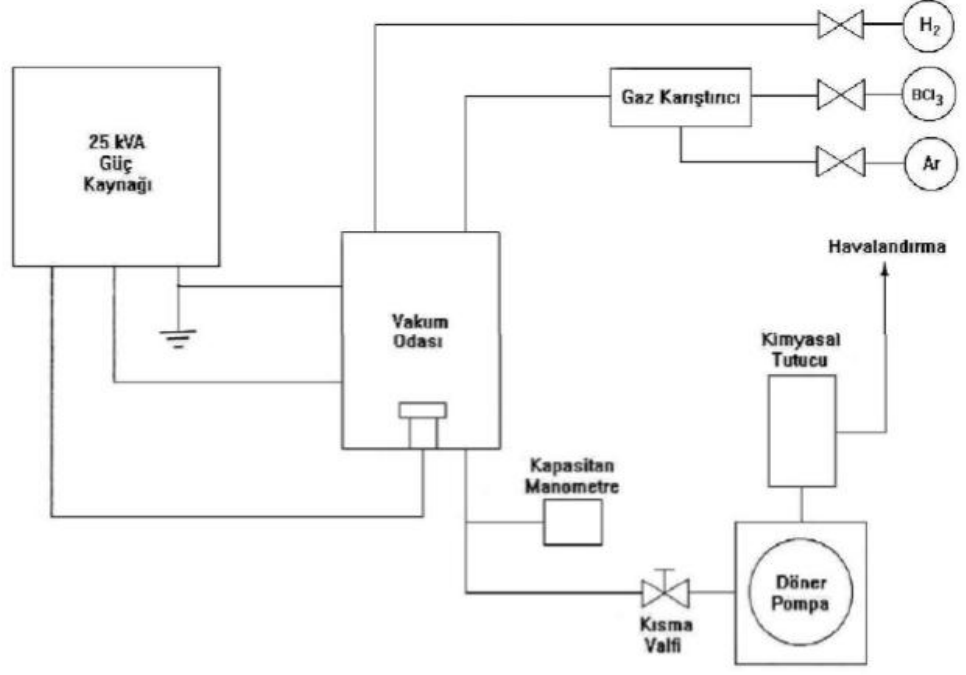
3.1.4 Plazma Borlama

Katı halde bulunan maddeyi enerji uygulayarak sıvı, sıvı haldeki maddeyi enerji uygulayarak gaz ve gaz durumdaki maddeyi enerji uygulayarak plazma haline getirmek mümkündür. Plazma, içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötral atom veya molekül içeren karışım olarak tanımlanabilir. Uygulamada esasında plazma yapı, ısı enerjisi verilerek, ışınla veya elektriksel atım vasıtasıyla elde edilir. En yaygın olarak kullanılan plazma yöntemi, elektriksel boşalmadır [13-19].

Plazma borlama işleminin birçok olum yanı mevcuttur; mikroyapı ve demirbor tabakalarının gelişmesi, işlem sıcaklığı, gaz karışım oranları, malzeme kompozisyonları, işlem basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla kontrol edilebilmektedir. Bu yöntem özellikle Almanya' da otomotiv sektöründe kullanılmaya başlanmasıyla üstün özellikleri nedeniyle endüstrinin dikkatini çekmiş ve artan ilgi neticesinde araştırmalar giderek yoğunlaşmıştır [13].

Plazma borlamanın avantajları şunlardır.

- 1- Borlama işlemi gerçekleştirilen tabakanın bileşim ve derinlik kontrolü yapılabilmektedir.
- 2- Klasik paket borlama ile kıyaslanacak olursa daha yüksek bir bor potansiyeli ihtiva etmektedir.
- 3- Daha ince oluşan bor tabakaları ortaya çıkarılmaktadır.
- 4- İşlemden kullanılan sıcaklık ve işlem süresinde kısmen azalma vardır.
- 5- Teçhizat olarak yüksek sıcaklık fırınlarına ve gerekebilecek aksesuarlara ihtiyaç neredeyse yoktur.
- 6- Kullanılan enerji ve gaz noktasında tasarruf sağlamaktadır [25].



Şekil 3.3: Plazma borlama tesisat şeması [25].

3.2 Borlama İşleminin Avantaj ve Dezavantajları

3.2.1 Borlama İşleminin Avantajları

- Yüzey sertleştirme proseslerinden; nitrürleme yüzey sertleştirme prosesi ile kıyaslanacak olursa oluşturulan bor tabakası yüksek sıcaklıklarda dahi sertliğinden bir şey kaybetmemektedir.
- Kullanım bakımından ele alınacak olursa bir çok çelik malzeme kullanılarak işlem uygulanabilmektedir.
- İşlem neticesinde oluşan bor tabakası yüzeyleri yaklaşık olarak 850°C'ye kadar oksidasyon direncine sahiptir.

- Borlama işlemi sonucunda soğuk yapışma olarak tabir edilen kaynağa olan ilgiyi düşürür.

-Borlama işlemi uygulanan demir esaslı malzemeler, işlem sonucunda korozyon ve erozyon dayanımlarını koruyarak yüksek seviyede yorulma ve servis ömrü elde etmektedirler.

-Katı ortam yöntemi kullanılarak yapılan işlem neticesinde malzeme yüzeyi oldukça temiz çıkması sayesinde herhangi bir ilave yüzey temizleme işlemine gerek kalmamaktadır.

-Borlama ısıl işlemi neticesinde, özellikle düşük alaşımlı çeliklerin bazı asitlerde özellikle; H_2SO_4 , H_3PO_4 ve HCl gibi etkili asitlere karşı korozyon direncini yükseltmek mümkündür.

-Borlama işlemi sonucunda oluşan borür tabakalarının düşük sürtünme katsayısına ve yüksek seviyede yüzey sertliğine sahip olması sebebiyle adhesiv, kimyasal tribo oksidasyon, yüzey yorulması ve abrasiv aşınma gibi temel aşınma mekanizmalarının oluşumunu engelleme noktasında etkili olduğu düşünülmektedir. Bu sonuçlar neticesinde özellikle kalıp üreticilerinin, çok daha pahalı ve zor işlenebilen takım çelikleri yerine, hemde orijinal malzemeye kıyasla daha üstün özelliklere ve aşınma direncine sahip olan kolay işlenebilen çelikleri kullanabilmeleri mümkün hale gelmektedir. Bunun sonucunda takım ve kalıp ömrü arttığı gibi yağlayıcı kullanımını da azalmaktadır [14-18].

3.2.2 Borlama İşleminin Dezavantajları

- Yüzey sertleştirme proseslerinden; gaz semantasyonu ve plazma nitrüleme işlemleriyle kıyaslanacak olursa borlama ısıl işlemi esnek değildir, iş gücü maliyeti daha çoktur ve uygulaması bakımında çok daha zordur.

-Borlama ısıl işlemi uygulandıktan sonra malzeme yüzeyinde hacimsel büyüme ortaya çıkmaktadır ve bunun sonucu olarak da tabaka kalınlığı yaklaşık olarak %5 - %25 kadar değişmeye sebep olmaktadır. Gerçekleşen bu büyüme borlanan malzemenin türüne göre değişim gösterebilmektedir.

-Borlma işlemi sonucu borlanmış yzeylerin hassas işlenmesi elmas takımlarla mkmkn olmaktadır bunun sebebi geleneksel olarak işleme yntemleri kaplama tabakasının kırılmasına sebebiyer vermektedir.

-Borlama işlemi uygulanmış bazı çelikler ilave işleme ihtiyaç duymaktadırlar bu sebeple vakum altında işlemin gerçekleşmesi daha uygundur.

-Borlama işlemi gerekleştirilmış bazı elik alaşım yapıları, diğer ısıl işlemlerden nitrleme ve karbürleme ile kıyaslanacak olursa dñnme isteği gñsteren ve noktasal yorulma olarak tabir edilen ortamlarda dayanımları gñrece daha dñřük kalmaktadır [14-18].

4. BORÜR TABAKASININ ÖZELLİKLERİ

Borlama ısıl işlemleri uygulanırken malzeme yüzeyinde bazı farklı yapılarda fazlar ortaya çıkmaktadır. Bu fazların özellikleri ise birbirinden farklılık göstermekte olup ve oluşum şartları birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir.

4.1 Borür Tabakası

Borlama ısıl işlemleri uygulanırken, iş parçası üzerinde bor atomlarının yüzeye yayılması neticesinde bileşik tabaka olarak tabir edilen bor yapılı bölge, onun bir altında geçiş bölgesi ve en altta ise matrisi meydana getiren çekirdek bölgesi konumlanmıştır. Demir esaslı malzemelerde borca zengin olan FeB en üstte oluşurken, onun hemen altında ise daha homojen ve sünek bir yapı gösteren Fe₂B olmak üzere iki demirborür fazı meydana gelmektedir. Borlama işlemi uygulandıktan sonra ortaya çıkacak olan tabaka özellikleri, borlama ortamına, borlama yöntemine, borlanacak malzemenin bileşimine, uygulanacak olan ekstra ısıl işlemlere, borlama sıcaklığına ve borlama süresi gibi ısıl işlem şartlarına bağlıdır. Bu parametreler neticesinde ya düz yapıda ya da dişli/kolonsal yapıda borür tabakası oluşmaktadır [19].

Bor atomlarının yayılma yönlerine bağlı olmakla birlikte, tek fazlı Fe₂B fazı, çift fazlı Fe₂B + FeB fazlarına göre çok daha tercih edilmektedir. Bunun sebebi borür tabakası oluşum esnasında bu çift fazlı yapının birbirlerine çekme ve basma gerilmesi uygulamaları ve bunun sonucu olarak iki faz arasında çatlaklar meydana gelmesidir. [5].

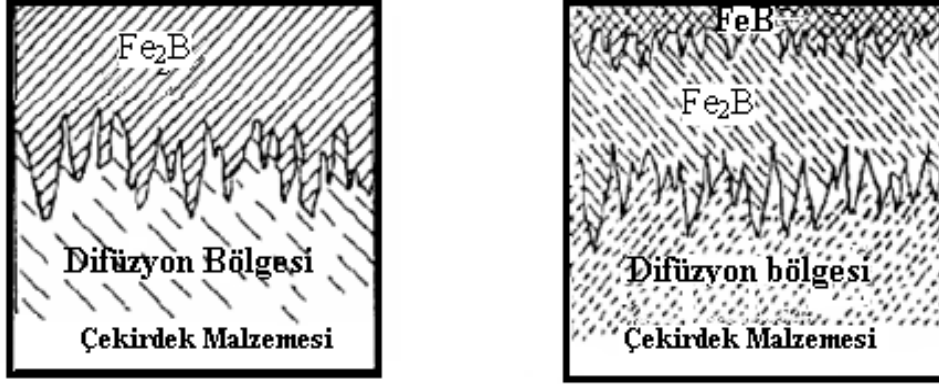
Bu istenmeyen durum mekanik zorlamalar altında oluşan borür tabakaların kalkmasına sebebiyet vermektedir. Termal şok neticesinde veya mekanik etkiler altında kopmalar ve tabaka halinde kalkmalar meydana gelmektedir. Bu olasılıklar göz önüne alındığında, minimum FeB fazı içeriğine sahip kaplama tabakaları elde edilmeye çalışılmaktadır [26].

Demir borür bileşiklerinin oluşması için en müsait yerler; yüzey pürüzlülükleri, ve tane sınırları, dislokasyon bölgeleri, atomik boşluklar gibi mikro hatalar; toplu çekirdekleşme olmasa bile bu bölgelerde çekirdekleşme ilerler ve küçük borür alanları ortaya çıkabilmektedir. Çekirdekleşme prosesinin ilk adımı Fe₂B çekirdeğinin oluşumudur. Fe₂B çekirdekleşmesini borca daha zengin bileşiklerin çekirdekleşmesi takip eder. İlk oluşan Fe₂B alanlarının dış yüzeylerinde FeB ve FeB_n (n > 1) bileşiklerinin ortaya çıktığı tespit edilmiştir [13, 27].

Tablo 4.1: FeB ve Fe₂B fazlarının tipik özellikleri [28].

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

Borür tabakası morfoloji yönünden ele alınacak olursa alaşımsız çeliklerde testere dişli bir yapıya sahip görülmektedir. Gerçekleşmekte olan difüzyon yüzeyden iç kısımlara doğru olmasının sonucu bu dişli yapı ortaya çıkmaktadır. Bu tip yapı özellikle saf demir veya alaşımsız düşük karbonlu çelik yapılarında açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Ancak karbon ya da alaşım elementlerinin miktarlarındaki yükseliş bor difüzyonunu yavaşlatacaktır. Azalmata olan bor difüzyonu ile oluşmakta olan borür tabakasında hem kalınlık düşmekte, hem de borür tabakası ile ana malzeme yapısının ara yüzeyindeki testere dişli yapı giderek düz bir hal almaktadır [5, 19].



Şekil 4.1: Tek ve iki fazlı borür tabakalarının şematik görünüşü [19].

4.2 Geçiş Bölgesi

Borlama ısıl işleminde kullanılan çelik bileşiminde bulunan elementler yeniden dağılmak isteyeceklerdir. Bu arada FeB ve Fe₂B borür tabakalarının, karbon ve silisyum elementlerini çözündürme kabiliyeti bulunmaması neticesinde bor difüzyonu esnasında Si ve C borür tabakasından aşağıya doğru itilir. Bu olay neticesinde oluşan borür tabakası ile borlanan metal matris arasında geçiş bölgesi olarak tabir edilen bir ortaya çıkmaktadır. Bu bölgede konumlanan bor, borür oluşturamayacak miktardadır [16, 29].

Geçiş bölgesi morfolojisini ele alacak olursa, matrisin yapının mikroyapısından daha farklı bir görünüme sahip olacaktır ve borür tabakası ile kıyaslanırsa çok daha kalın bir yapı ortaya çıkacaktır. Borür tabakası tarafından karbonun içeri doğru itilmesi neticesinde bu bölgede esas malzemeye göre daha fazla perlit yapısının bulunduğu ileri sürülmektedir. Geçiş bölgesindeki C miktarının ana malzemedeki seviyesini koruduğunu, buna karşılık borun yüzeyden içe tarafa doğru aşamalı olarak azaldığını tespit etmiştir [15, 30].

4.3 Borür Tabakasına Alaşım Elementlerinin Etkisi

Genel anlamda bütün alaşım elementleri ele alınacak olursa; tabaka kalınlığında bir azalma gözlemlenmiştir. Alaşım elementleri difüzyona etki ederek bor difüzyonunu azaltmakta, ana malzemenin ve oluşacak borür tabakasının özelliklerini değiştirmektedir [5, 31].

Alaşım elementleri borür tabakası ile matris ara yüzeyindeki kristallografik düzeni ve faz bileşenlerini etkilemektedir. Aynı şekilde alaşım elementleri altlık malzemedeki ana elementin bor'a karşı olan aktivitesine, yani borun difüzyonunu azaltarak ve reaktifliğine tesir ederek, genellikle tabaka kalınlığını azaltıcı yönde etki etmektedir. Nitekim saf demirde tabaka kalınlığı, alaşımlı çeliklerdekinden daha yüksektir. Ayrıca alaşım elementleri kaplamanın özelliklerini değiştirmektedir [18, 19].

Alaşım elementlerinin malzeme içerisindeki iktiva durumuna göre tabakanın ve matris malzemenin dişli yapı oluşturma derecesi değişmektedir. Kuvvetli dişlenmeler, karbonlu çeliklerde ve düşük alaşımlı çeliklerinde ortaya çıktığı görülmektedir. Alaşım elementi miktarı arttığında dişlenme azalmaktadır. Oluşan borür bölgeleri, dişli şekilleri sebebiyle matris metale daha iyi bağlanabilirler. Alaşımlı çeliklerde ise bu borür bölgesi alaşımsızlara kıyasla daha ince olup hatta bazen hiç oluşmayabilir. Oluşan bu dişli yapılar yüzeye dik olduğu için, işlem öncesi parçanın çok iyi şekilde işlenmesi gerekmektedir [16,32].

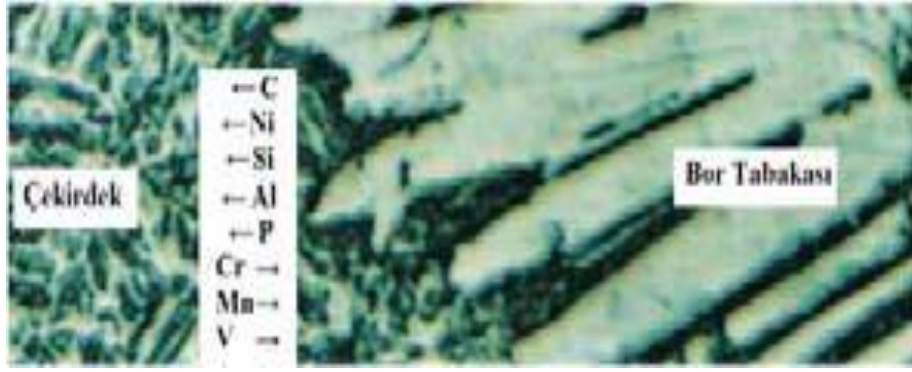
Paslanmaz çelik malzemeler üzerine yapılan borlama işlemlerinde, yüzey üzerinde nikel elementinin düşük çözünürlüklü olduğu bor tabakası oluştuğu ve fazla nikelin ise bor tabakasının altında nikelce zengin tabaka oluşturmak üzere yapıya difüze olduğu tespit edilmiştir. Krom elementinin bir kısmı CrB gibi bor tabakasında çözünürken geri kalanı kısmı nikelce zengin olan tabaka ve bor tabakaları arasında kromca zengin bir tabaka oluşturmak üzere içeriye doğru difüze olur [19, 33].

Karbon: Karbon, hem oluşacak olan bor tabakasına, hem de tabaka/matris arayüzey morfolojisine etki etmektedir. Borür tabakasında önemli bir çözünürlük göstermeyen karbon atomları, borür tabakası boyunca difüzyona uğramaz, borlama süresince yüzeyden matrise doğru sürüklenir ve borür tabakasının hemen altındaki geçiş bölgesinde Fe_3C , $Cr_{23}C_6$, Fe_6C_3 , gibi karbürlerin oluşumuna sebep olur. Çelik

malzemelerde borür tabakasında oluşan FeB ve Fe₂B gibi fazlarının sertlikleri karbon yüzdesinin artışına bağlı olarak artmaktadır. Bu artış ise % 0,4 C'a kadar ettikten sonra sabit kalır. Az ve orta karbonlu çeliklerde borür tabakası kolonsal bir yapı morfolojisine sahip olurken, yüksek karbonlu çelik malzemelerde borür tabakası /matris ara yüzeyinin düz ve kompakt bir yapıya sahip olduğu ve karbonun borun difüzyonunu zorlaştırdığı tespit edilmiştir [5, 15, 18].

Krom: Cr elementi, çelik malzemelerde oluşacak borür tabakasının hem morfolojisine hem de derinliğine etki etmektedir. Ana malzemedeki krom ihtivasının artması kromun bor'a olan affinitesinden dolayı zengin reaksiyon oluşumunu sağlar, borit derinliklerini düşürür, kaplama/yüzey arayüzeyini düzleştirerek yumuşatır. %4 Cr içeren çeliklerde kolonsal karakterde ve derinliği 66–95 µm kalınlığında borür tabakaları elde edilirken, %12 krom içeren çeliklerde ise 65 µm kalınlığında ve düz karakterde borür tabakası elde edilmektedir. %26 Cr içeren çeliklerde ise borür tabakasının kalınlığı birkaç tanesi hariç 5 µm' yi aşmadığı gözlemlenmektedir. Krom elementinin atom numarası demirden düşük bir element olduğu için borca en zengin olan (Fe, Cr)B'ye öncelikle ve sistematik olarak matristen faza girerek yüzeye doğru yayılmaktadır. Çelik malzemelerin borlanmış tabakalarında mevcut olan (Fe, Cr)B ve (Fe, Cr)₂B fazlarının sertlik değerleri, krom miktarının artması ile birlikte artar. Bu fazların sertliklerini ölçmek kolay değildir. Ara yüzey bölgelerinde elde edilen sertlik ölçümleri kaplama tabakası sertliğinden daha düşük değerler verecektir. Ayrıca kromun çok fazla olmasa dahi kırılma tokluğunu düşürdüğü belirtilmiştir [19,27].

Nikel: Yüksek nikel elemeti ihtiva eden çeliklerde iç içe geçmiş dişli yapıda ve bor kalınlığında bir azalma oluşabilmektedir. Bor tabakası altında nikel yoğun bir şekilde birikir, Fe₂B tabakasından girer ve bazı durumlarda FeB tabakasından Ni₃B çökmesini hızlandıracaktır. Ayrıca Fe₂B tabakasına karşılık gelen alttaki bölgeden yüzeyi önemli bir ölçüde ayıracaktır. Fe-Ni ve östenitik paslanmaz çeliklerin her ikisindeki bu bölge oldukça belirgin olarak gözlemlenmiştir. [16, 18].



Şekil 4.2: Alaşım elementlerinin borlama sırasındaki hareket yönleri [13].

Krom, mangan elementlerinin atom numaraları demirden daha düşük olması sebebiyle borlanan malzemenin içinden yüzeyine doğru yayınma gerçekleşecektir. Oysa nikel ve karbon, krom ve manganezin tersi yönünde yayılmaktadır. Ayrıca manganın kırılma tokluğuna olumlu, kromun ise olumsuz etki ettiği düşünülmektedir [13, 32].

4.4 Bor Tabakasının Mekanik Özellikleri

Borlanmış malzemelerde mekanik özellikleri belirleyen en önemli fiziksel özellikler kırılma tokluğu, sertlik, darbe direnci olarak gösterilebilir. Borlanmış malzemenin ve yüzeyin mekanik özellikleri temel olarak işleminde kullanılan borlama ortamının bor potansiyeline, borlama süresine, işlem sıcaklığına, matris malzemenin bileşimine bağlı olarak değişebilmektedir [26].

Borlama işlemi demir soyundan gelen malzemelerin kopma ve akma mukavemetlerini yaklaşık % 10 - 20, yorulma dayanımlarını ise % 25 ve korozyonlu yorulma ömrünü % 200 arttırmasına karşılık plastisite özelliklerini azaltır. Borlu tabaka özelliklerine ait çalışmalar daha ziyade aşınma, korozyon, sertlik özelliklerine yönelik devam etmektedir [31].

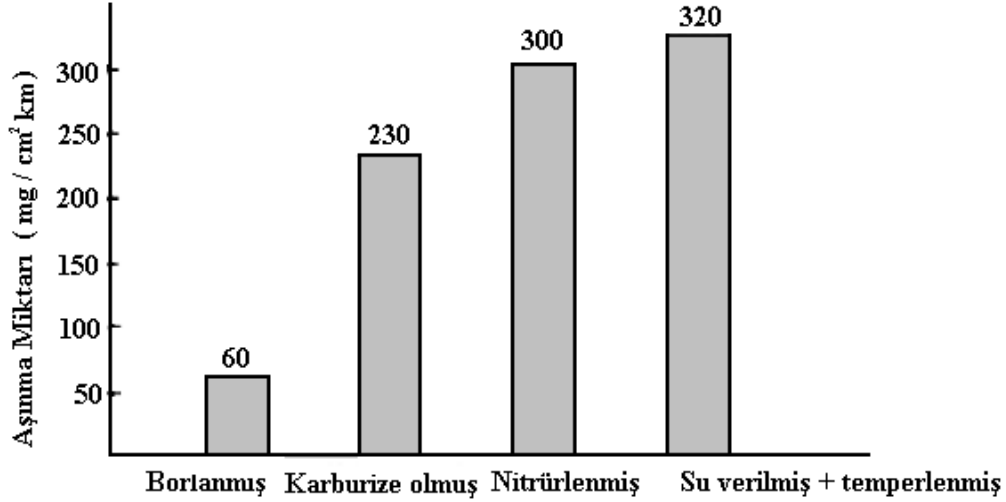
4.4.1 Sertlik

Borlama işleminin en önemli karakteristik özelliği sertlik üzerine olup, elde edilen sertlik değeri ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşabilecek bor fazlarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Borlama işlemi ile çok yüksek ergime sıcaklıklı (1450-5000 HV) faz yapısından oluşan borür tabakaları elde edilebilmektedir. Borlama işlemi sonrasında elde edilen FeB fazı Fe₂B'den daha sert ancak daha gevrek yapıdadır [15,19].

Borlanmış malzemelere gerçekleştirilen mikrosertlik ölçümleri oluşan tabaka boyunca yapılır. Yüzey yapısından ana matris yapıya doğru ilerlendikçe sertlik değerlerinde azalma görülür. Bu olay bor atomlarının ancak difüzyon bölgesine kadar gelebilmesi ve bu bölgelerde sert bileşikler oluşturması ile açıklanabilir [26,34].

4.4.2 Aşınma Direnci

Aşınma sürtünmeli olarak çalışmakta olan bütün sistemlerde görülmekte olup bir malzeme problemi olmayıp pek çok değişkene bağlı olan bir sistem problemidir. Sistemin özelliğine bağlı kalmak koşuluyla farklı mekanizmalarda ortaya çıkar. Genellikle bu mekanizmalar sistemin aşınma davranışını belirlemede temel çıkış noktası olmasına rağmen, aynı anda oluşan aşınma mekanizmaların birbirini tetiklemesi sonucunda konu oldukça karmaşık bir durum göstermektedir [26, 35].



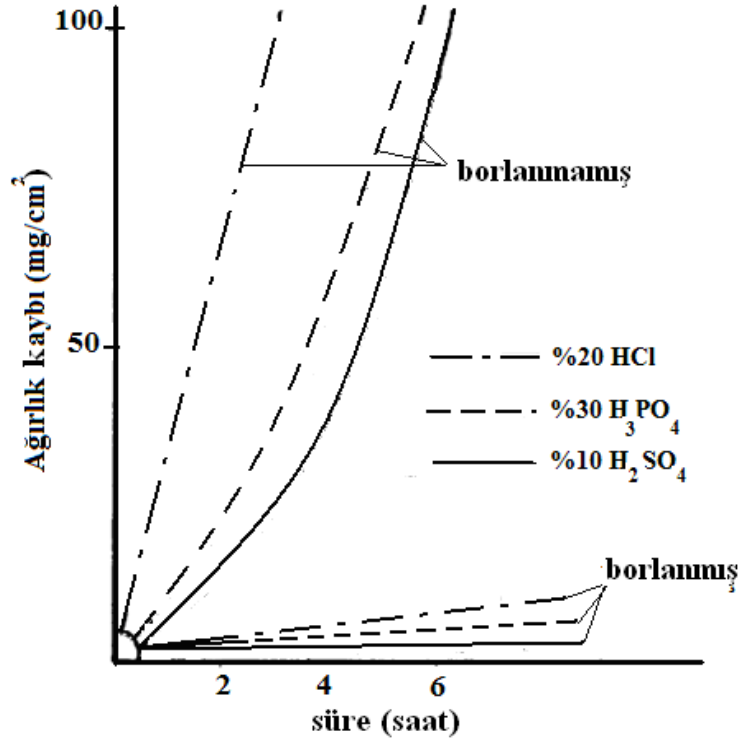
Şekil 4.3: Düşük karbonlu çelikte farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin aşınma davranışları [4].

Bor tabakanın aşınma dayanımı, tabakanın tek veya çift fazlı olup olmamasına ve oluşum biçimine bağlı olarak değişir. En az aşınma olayı Fe₂B fazında, en fazla aşınma ise daha sert ancak daha gevrek bir yapı gösteren FeB fazındaki bor tabakasında meydana gelmektedir. En yüksek aşınma dayanımının FeB içermeyen tabakalarda, yani sadece Fe₂B fazından oluşan tabakalarda elde edildiği deneylerle kanıtlanmıştır. Bu yorumlar neticesinde minimum FeB fazı içeren tabakalar elde edilmeye çalışılmalıdır [16,36].

Borlanmış yüzeylerin aşınma açısından üstünlüğü, hem çalışma ortamından kaynaklanan, hem de kayma sürtünmesi sonucu ortaya çıkan ısının, borlu tabakaların sertlik durumlarında ve aşınma dayanımlarında aşırı miktarda bir azalmaya neden olmamasıdır [19, 37].

4.4.3 Korozyon Direnci

Çevrenin kimyasal ve elektrokimyasal etkileri sebebiyle 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 ortaya çıkarmaktadır [5, 21].



Şekil 4.4: Ck 45 çeliğinin 56 °C 'de, bazı asitlere karşı korozyon direnci [38].

Demir esaslı metal malzemelerin borlanması, bu malzemelerin bazı asit ve sıvı metallere karşı olan direncini önemli ölçüde takviye etmektedir. Borlama ısıtma işlemi ile metallere özellikle de asidik sıvılar, deniz suyu ve yüksek sıcaklık ortamlarına karşı yüksek dayanıklılık sağlanır. Özellikle belirtecek olursak H₂SO₄, H₃PO₄, HCl gibi asitleri ile Pb, Al, ve Zn metallerin sıvı banyolarında borlanmış malzemelerin korozyon dayanımları çok yüksektir [7, 19, 39].

Demir grubu malzemelere uygulanan borlama işlemi, bu malzemelerin bazı asit ve sıvı metallere karşı olan direncini büyük ölçüde artırmaktadır. Özellikle HCl asidi ile Al, Pb ve Zn metallerin sıvı banyolarında borlu malzemelerin korozyon dayanımı çok yüksektir [5,7].

Yüksek miktarda krom içeren çeliklerde borlama işlemi ile koruyucu krom oksit yerine daha az koruyucu olan krom borür meydana gelmektedir. Bu bakımdan yüksek alaşım ihtiva eden malzemelerin borlanması sonucu daha iyi korozyon özelliği her zaman elde edilmeyebilir [21].

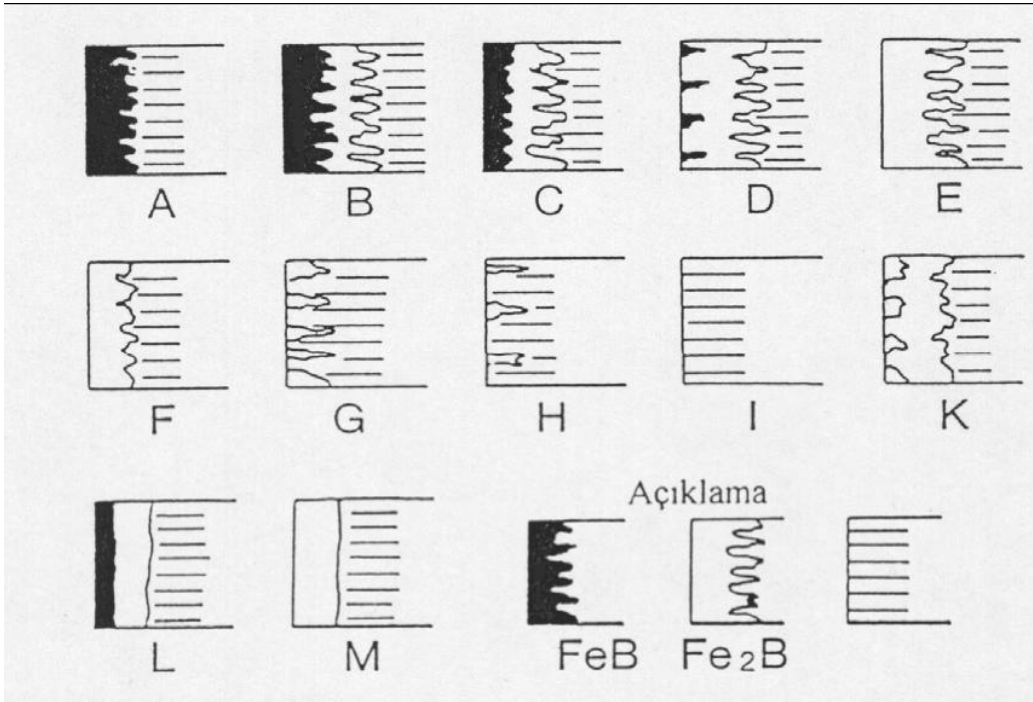
4.5 Bor Tabakasının Kalınlığı

Teorik olarak incelenecek olursa tabaka kalınlığı sınırsız olarak elde edilebilir. Bu da işlem süresinin ve sıcaklığın artması sayesinde gerçekleşir. İşlem sıcaklığının Fe - B denge diyagramındaki ötektik sıcaklığının (1149 °C) altında olması gerekir. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklar lokal erimeler meydana getirerek malzeme yüzeyinin bozulmasına sebep olur. Zaman faktörünün de ekonomik yönden mantıksal bir değer içerisinde ele alınması gerekmektedir. Kalınlığının artmasını engelleyen bir faktörde kırılgenliktir. Borlama işlemi uygulanmış tabakanın kırılgenliği, kalınlıklıkla birlikte artar. Dolayısıyla çelik esaslı malzemeler için 20 - 200 µm 'lik kalınlık kullanma şartlarına, borlanan malzemenin cinsine ve su verilip verilmeme durumuna göre ayarlanabilir. Kırılgenlik ele alınacak olursa alaşımlı çeliklerde maksimum 100 µm alaşımsız çeliklerde 140 - 200 µm kalınlığa; hatta darbesiz aşınma altında çalışan parçalarda su verme koşulu ile 400 µm 'lik kalınlığa kadar çıkılabilmektedir [31].

Çelikler malzemelerde ki alaşım elementi oranı ve karbon miktarının artması ile birlikte bor difüzyonu azalmaktadır. Bunun neticesinde borür tabakasının hem kalınlığı azalmakta, hem de testere dişli şeklindeki yapısı giderek düz bir hal almaktadır. Tabaka kalınlığını sınırlayan bir diğer parametrelerden biri ise kırılgenlik olarak tanımlanır. Tabaka kalınlığı arttıkça kırılgenliği da artacağı için özellikle çift fazlı tabaka yapısı gösteren malzemelerde kalınlığın fazla olmaması gerekmektedir [38, 40].

4.6 Bor Tabakası Çeşitleri

Borür tabakalarının yapısı incelendiğinde; borlama yöntemine, borlanan malzemenin bileşimine, borlama ortamına ve işlem şartlarına bağlı olarak; ya düz bir yapıda ya da parmaklı dişli bir formda olabilir. Tabaka tiplerinden hareketle bazı tabaka özelliklerinin belirlenebileceğini söylemek mümkündür [5].



Şekil 4.5: Borür tabakası çeşitleri [17].

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

M:Tek fazlı tabaka, FeB ve Fe₂B, düz

F tipi Endüstride E ve yani tek fazlı borür tabakası (Fe₂B) tercih edilmektedir.

Bu tabakalar, düşük kırılma değeri sahiptir ve ana malzemeye, borlu tabakanın özelliklerini olumsuz yönde etkilemeden; borlama sonrası ısıl işlemler uygulanabilir [5,17].

4.7 Borlanabilen Malzemeler

Borlama ısıl işlemi neticesinde iş parçalarının ömürleri önemli seviyede geliştirilebilir. Daha kalın ve matris malzeme ile iyi bağlantılı borür tabakalarının, yüksek alaşımlılardan daha çok, düşük alaşımlı ve alaşımsız yapıda bulunan çeliklerde elde edildiği düşünülecek olursa; alaşımlı çelikler, alaşımsız çeliklerle değiştirilerek iş parçası maliyetleri düşürülebilir. Keza talaşlı imalat gibi proseslerle üretilen parçalar toz metalurjisi tekniği ile üretilen malzemeler ile değiştirilebilir [23].

Borlama ısıl işlemi östenit fazında gerçekleşmektedir bu sebeple havada sertleşecek olan çelikler borlama sonrasında anında sertlik artışı göstereceklerdir. Suda sertleştirilen iş parçalarına borür tabakasının termal şoka maruz kalması nedeniyle su verilmesi gerekli olduğu durumlarda borlanma işlemi uygulanmazlar. Sülfür ihtiva eden ve kurşunlanmış çelikler yüzeyde çatlak oluşturabilme ihtimaline karşı nitrüleme görmüş çelikler ise çatlak hassasiyetleri nedeniyle borlama ısıl işlemine tabi tutulmamalıdır. Alüminyum alaşımlı çeliklerde ve ağırlıkça %0,5'ten daha fazla Si içeren çeliklerde kırılma borür tabakaları oluşturmaları sebebiyle borlama işlemi olumlu sonuçlar vermemektedir. Alüminyum içeren çelikler borlama işlemine tabi tutulmamalıdır. [15, 16].

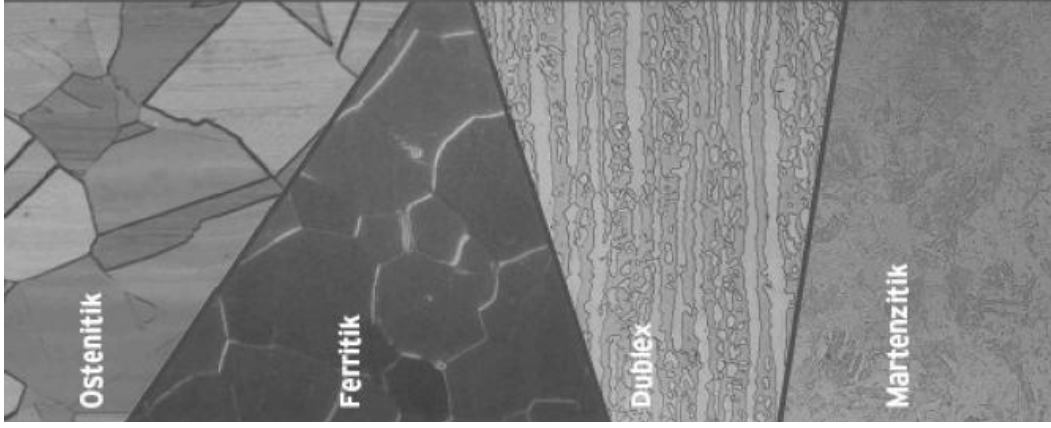
5. PASLANMAZ ÇELİKLER

Paslanmaz çelikler içerdikleri % 12'den daha yüksek oranda krom sebebiyle ve birçok ortamda üstün korozyon direnci göstermesi sebebiyle tercih edilen çelik çeşitidir. İhtiva ettikleri Cr, yüzeyde ince yapılı oksit tabakası oluşturarak çeliği korozyondan korumaktadır. Kristal yapıya ve sertleştirme mekanizmasına bağlı olarak paslanmaz çelikleri sıralayacak olursak; ferritik paslanmaz çelikler, martenzitik paslanmaz çelikler, östenitik paslanmaz çelikler ve çökelme ile sertleşen paslanmaz çelikler olmak üzere dört gruba ayırmak mümkündür [26, 41].

Paslanmaz çeliklerin tercih sebepleri olarak; mekanik dayanım, hijyenik özellikler korozyon dayanımı, imalat kolaylığı yüksek ve düşük sıcaklıklara dayanım, görünüm, ve uzun ömür olarak belirtilebilir [42].

5.1 Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması

- 1-Ferritik paslanmaz çelikler,
- 2- Martenzitik paslanmaz çelikler,
- 3- Duplex (çift fazlı)paslanmaz çelikler
- 4- Östenitik paslanmaz çelikler
- 5-Çökelme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çelikler olmak üzere beş gruba ayırmak mümkündür [43].



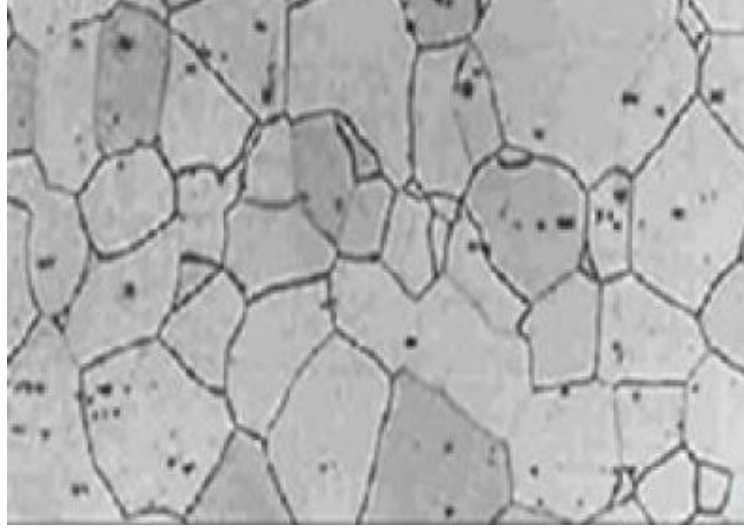
Şekil 5.1: Bazı paslanmaz çelik türlerinin mikroyapıları [42].

Tablo 5.1: Paslanmaz çelik türlerinin bazı özellikler açısından kıyaslanması [44].

Alaşım Grupları	Manyetik tepkiler	İşlem sertleşme oranı	Korozyon direnci	Sünek	Yüksek Sıcaklık Direnci	Düşük Sıcaklık Direnci	Kaynaklanabilme
Östenitik	Genellikle Hayır	Çok Yüksek	Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek
Dubleks	Evet	Orta	Çok Yüksek	Orta	Düşük	Orta	Yüksek
Ferritik	Evet	Orta	Orta	Orta	Yüksek	Düşük	Düşük
Martenzitik	Evet	Orta	Orta	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük

5.1.1 Ferritik Paslanmaz Çelikler

Bünyelerinde %11-30 oranlarında krom ihtiva eden paslanmaz çeliklerdir. Karbon içerikleri %0,12'den daha azdır. Diğer alaşım elementleri ise, işlenebilirlik veya korozyon dirençleri gibi özellikleri geliştirmek için az miktarda ilave edilirler. Ferritik paslanmaz çelikler, içerdikleri düşük karbon elementi sebebiyle normal olarak östenitten ferrite dönüşüme uğramazlar ve bu sebeple su verme yoluyla sertleştirilemezler. Buna karşın pek çok ferritik paslanmaz çeliklerde, küçük karbon oranları olan çelikler yüksek sıcaklıklardan hızla soğutulursa biraz sertleşme oluşur. Bu alaşımlarda kaynak edilebilirlik, iyileştirilmiş süneklik ve iyi korozyon direnci için, karbon ve azot düzeylerinin çok az olması gerekir [19, 45].



Şekil 5.2: AISI 430 Ferritik paslanmaz çelik mikroyapı görüntüsü [42].

Ferritik paslanmaz çelikler süneklik problemine sahiptir ve bunu aşmak için düşük karbon ve azot içerikli yeni ferritik paslanmaz çelikler geliştirilmiş olup ticari amaca yönelik olarak üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu alaşımlar iyileştirilmiş korozyon direnci ve kaynaklanabilme özelliğine sahiptir [42, 45].

Ticari ferritik paslanmaz çelikler bazı özel durumlarda (klorür ihtiva eden çevre şartlarında) östenitik paslanmaz çeliklerden daha fazla korozyon direncine sahip olabilirler. Ferritik paslanmaz çeliler ayrıca paslanmaz çeliklerle kıyaslandığında yüksek ısı iletkenliğine ve daha düşük termal genleşmeye sahiptir [46].

Yüksek korozyon direnci ve orta derecede şekillenebilirlik kabiliyetine sahip olmalarının yanı sıra yapısında nikel bulunmamasından dolayı nispeten ucuzdur [26, 41].

5.1.2 Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Karbon miktarı % 0,1 seviyesinden yüksek olan çelikler yüksek sıcaklıklarda östenitik içyapıya sahiptirler. Östenitleme sıcaklığı çeliğin türüne göre 950-1050°C

arasındadır. Bu sıcaklıkta tutulan çeliğe su verildiği takdirde martenzitik bir içyapı elde edilecektir. Bu şekilde elde edilen yüksek sertlik ve mekanik dayanım, karbon yüzdesi ile birlikte artış gösterir. Ürün çeşidine bağlı olarak kaydıyla martenzitik çelikler tavllanmış veya ıslah edilmiş durumda endüstriye sunulur. Tavllanmış olarak satın alınan ürünler biçim verildikten sonra ıslah işlemine (su verme + temperleme) tabi tutulur. Temperleme sıcaklığı değiştirilerek değişik özellikler elde edilir. En iyi korozyon dayanımı elde etmek için, ısıtma işlem sıcaklığına tavsiye edildiği sürece uyulması çok önemlidir [42].

Krom elementinin malzemeyi yüksek derecede sertleştirebilme özelliğinden dolayı, hava ve yağda gibi ortamlarda soğutma ile kafes yapısı distorsiyona uğratarak martenzitik yapı ortaya çıkartılır. Temperlenmiş martenzitik paslanmaz çeliklerde, düşük krom içeriği sebebiyle diğer paslanmaz çeliklerle kıyaslanacak olursa daha az korozyon direncine neden olacaktır [19, 47].

Martenzitik çelikler magnetik olup daha çok; ısıtma işlem mukavemet gerektiren daha ziyade korozyona maruz yerlerde özellikle (pompa mili ve valf imalatında) kullanılır. En çok kullanılan tipleri, 410 ve 420'dir [43, 48].

5.1.3 Dupleks (Çift Fazlı) Paslanmaz Çelikler

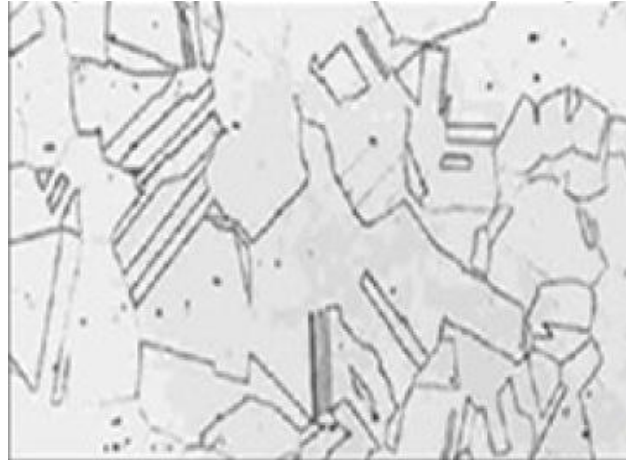
Çift fazlı olarak tabir edilen bu çelikler içerisinde iki faz birlikte bulunur. Bunun sonucunda hem ferritik hem de östenitik çeliklerin gösterdiği özelliklerden iyi yapıda bir malzeme elde edilmiş olur. Böylelikle östenitik çelikler ile kıyaslanacak olursa çok daha iyi gerilme korozyonu dayanımına; ferritik çelikler ile kıyaslanacak olursa ise daha iyi seviyede süneklik ve tokluk değerlerine sahip olurlar. Ayrıca, iki fazın bir arada bulunması halinde tavllanmış durumda bile 550 ile 690 MPa akma dayanımı gösterirler ki, bu değer fazların tek başına türdeki çeliklerin akma dayanımının yaklaşık iki katı seviyesindedir. Endüstride var olan ticari kaliteler % 22 - % 26 krom, % 4 - % 7 nikel, azami % 4,5 molibden, yaklaşık % 0,7 bakır ve volfram ile % 0,08 - % 0,35 azot içerirler [42, 49].

Modern dupleks paslanmaz çelikler ısıtma işlem görmüş hallerinde yaklaşık -50 °C gibi sıcaklıkların altında tokluk kaybına uğrarlar. Zira bu çeliklerde ferrit fazının

bulunması sonucunda düşen sıcaklıkla çentik darbe eğrisinde sünek-gevrek geçiş sıcaklığı da azalır yaklaşık 475 °C gevrekliği ile birlikte bu faktör duplex paslanmaz çeliklerin kullanım sıcaklıklarının da sınırlayıcı etkide bulunacaktır. Dolayısı ile de bu tür çelikler -50 °C ile 280 °C sıcaklıkları arasında mekanik özelliklerini çok iyi korurlar. Kaynak edilebilirlik özellikleri ve fiyatları da buna eklenirse günümüzün vazgeçilmez bir paslanmaz çelik türü olarak endüstride yer almaktadırlar [43, 50].

5.1.4 Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler, kimyasal bileşiminde %12 - 25 Krom ve %8 - 25 Nikel ihtiva eden ve paslanmaz çelik ailesinin en yaygın kullanım alanına sahip olan çeliklerdir. Yüksek korozyon dirençlerinin yanısıra şekillendirilebilirliklerinin etkisiyle üstün bir pozisyona ve bu sebeple pek çok mühendislik uygulamaları için arzu edilen özelliklere sahiptir [43, 51].



Şekil 5.3: AISI 304 Östenitik paslanmaz çeliğin mikroyapı görüntüsü [42].

Bu çelikler hem yüksek sıcaklıklarda hem de oda sıcaklığında YMK kafese sahip östenitik içyapılarını korudukları nedeniyle ısı ile sertleştirilemezler. Süneklilikleri, toklukları ve şekillendirilebilme kabiliyetleri düşük sıcaklıklarda bile üstündür. Anti manyetik olan östenitik paslanmaz çeliklerin mukavemetleri ancak soğuk şekillendirme işlemi ile birlikte artar [42,45].

5.1.5 Çökeltme Yoluyla Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler

Çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler bakır, molibden, niyobyum, titanyum ve alüminyum gibi alaşım elementleri içermekte olup, bu elementlerin bir veya birkaçının etkisi ile çökeltme sertleşmesi gösteren Fe-Cr-Ni'li paslanmaz çelikler ailesinin bir grubudur [42, 52, 53].

Tipik olarak 17-7 PH kalite paslanmaz çeliğin ısı işleme; 760 – 960 °C'de östenitleme, su verme ve yaklaşık olarak 500-600 °C'de yaşlandırma olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmektedir. Yaşlandırma, östenit bölgesinden su verilerek elde edilen martenzitik yapıda Ni₃Al ve diğer intermetalik bileşiklerin çökeltmesini sağlar. Düşük yaşlandırma sıcaklıklarında daha yüksek mukavemet elde edilir [26].

Çökeltme sertleşmesi uygulanabilir paslanmaz çelikler yaklaşık 1700 MPa değerine kadar çıkmakta olan akma dayanımlarına sahiptirler. Soğuk şekillendirme ve onun akabinde yaşlandırma işleme ile bu değer daha da yükseltilebilmektedir. En yaygın olarak kullanılan türü 630 kalite tür olan bu grubun kullanım alanı olarak uçak-uzay ve diğer yüksek teknoloji alanları gösterilebilir [43].

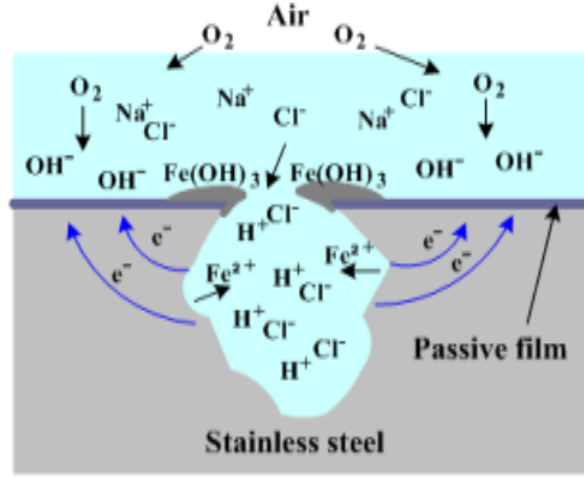
5.2 Paslanmaz Çeliklerin Korozyonu

Genel olarak maddelerin, özel olarak ise metal ve alaşımların çevrenin çeşitli etkileriyle kimyasal ve elektrokimyasal değişime ya da fiziksel çözünme neticesinde aşınma göstermesine korozyon denir [54].

Korozyon olayını tam olarak engellemek çoğu zaman mümkün olmaz. Alınan önlemler neticesinde korozyon hızı azaltılabilmektedir. Korozyon olayının maddi zararı endüstriye çok yüksektir. Korozyonunun kaçınılmaz olduğu bir ortamda malzeme seçimi tamamen ekonomik sebeplere dayandırılmaktadır. Paslanmaz çeliklerde görülmekte olan genel korozyon türleri; aralık korozyonu, oyuklanma korozyonu, tanelerarası korozyon, gerilmeli korozyon ve galvanik korozyon olarak sıralanabilir [55, 56].

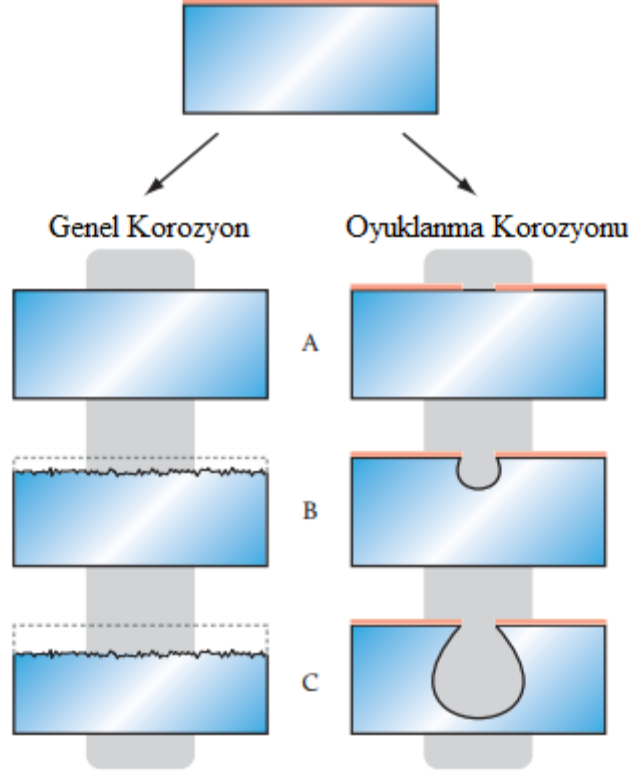
5.2.1 Oyuklanma (Pitting) Korozyonu

Paslanmaz çelikler gösterdikleri korozyon dirençleri sebebiyle tercih edilmektedirler. Bu direnç ise yüzeyde oluşturdukları pasif film olarak tabii edilen yapıya bağlıdır. Malzemenin korozyona uğraması neticesinde pasif film yüzeyinde oyuklar, delinmeler, çukurcuklar oluşursa bu tip korozyon oyuklaşma (pitting) korozyonu olarak isimlendirilir. Bu korozyon aynı zamanda çukurcuk korozyonu olarak da tabir edilmektedir. Meydana gelen bu oyuklar farklı çaplarda olabilir, fakat genellikle küçük boyuttadırlar. Bu oyuklaşmalar bazen birbirinden uzak, bazen de birbirlerine çok yakın bir şekilde meydana gelebilmektedirler [54].



Şekil 5.4: Paslanmaz çelik içerisinde çukurcuk büyümesi [57].

Paslanmaz çelikler oyuklaşma korozyonuna karşı diğer metal ya da alaşım gruplarından çok daha fazla duyarlılık göstermektedirler. Bu nedenle paslanmaz çelikleri çukurcuk korozyonuna karşı daha dayanıklı duruma getirmek için pek çok araştırma çalışması gerçekleştirilmiş olup ve bu araştırmalar neticesinde paslanmaz çelik yapısında yer alan elementlerin pitting korozyonuna karşı direnç üzerine katkıları irdelenmiştir. Cr, Mo ve N, paslanmaz çeliklerin pitting dirençlerini geliştirirler [54, 56].



Şekil 5.5: Genel korozyon ve pitting (oyuklanma) korozyon farkı [58].

Paslanmaz çelikler oyuklaşma korozyonuna karşı 510–800°C sıcaklık aralığında daha duyarlı olduğu söylenebilmektedir. Korozyon oyukcukları genellikle tane sınırlarında olarak adlandırılan bölgelerde veya dubleks paslanmaz çeliklerde gelişme eğilimi göstermektedir. Oyuklaşma korozyonu hızına ya da oluşmasına parçanın hareketli ya da durgun olması da önemli oranda etki sağlamaktadır. Korozif bir ortam içerisinde hareket etmeden bulunan paslanmaz çeliklerde çukurcuk korozyonu oluşma ihtimali ve korozyon hızı daha yüksek olacaktır. Stabil durum ortadan kalktığı takdirde çoğu kez oyuklaşma korozyonu hızı azalır. Örnek vermek gerekirse, paslanmaz çelikten imal edilmiş deniz suyu içinde bir pompa uzun bir süre çalıştırılmadığı takdirde pitting korozyonuna uğrarken, durmaksızın çalıştığı takdirde oyuklaşma korozyonu gözlenmez [54].

Ferritik alaşımlı paslanmaz çeliklerde pitting korozyonuna karşı direnç krom elementinin varlığı ile oldukça gelişir fakat molibdenli alaşımlar çok daha etkilidir. [9] Martenzitik alaşımların ise diğer türlerle kıyaslandığında pitting korozyonu dirençleri yeterince iyi olmamaktadır [54, 59].

sorunun olabileceği dikkate alınmamıştır. Fakat bu sorun ferritik alaşımlarda da görülebilmektedir [54].

5.2.3 Galvanik Korozyon

Galvanik korozyon olarak tabir edilen bu tipte; farklı iki metalin birbiri ile teması neticesinde gerçekleşen korozyon türüdür. Galvanik korozyon da metallerden biri galvanik seride daha aktif bulunurken diğeri daha pasiftir yer alacaktır. Daha aktif olan metal ile pasif olan arasında bir potansiyel fark oluşacak ve korozyon hızı da bu potansiyel farka bağlı olarak değişecektir. Paslanmaz çeliklerde temas bölgelerinde, yüzeyde pasifliğin bozulmasına sebebiyet vermektedir [56].

Farklı potansiyellerde bulunan iki metal birbiriyle temas halinde iken aralarında bir galvanik pil oluşturacaklardır ve aktif olan metal anot, soy metal ise katot görevi yaparal aktif metalde korozyona sebep vereceklerdir [54, 61].

5.2.4 Aralık Korozyonu

Aralık Korozyonu ise; aynı veya değişik türde ki iki metalin bağlnma durumunda ve birleştirilmesinde, bağlantı bölgelerinde ya da aralık bölgelerinde ortaya çıktığı görülen korozyon türüdür. Korozyon hızı pitting korozyonunda olduğu gibi değişkenlik göstermektedir. Bu bölgelerde hava ile temasın kesilmesi neticesinde veya yeterli temasın gerçekleşmemesi durumlarında O₂ eksikliğinden dolayı yüzeyde var olan pasif film onarılamayacak ve malzeme korozyon meydana gelecektir [56].

Bu tip korozyonda aralık, açıkta bulunan yüzeylere göre çok daha uzun süre nemli kalır ve istenmeyen korozif maddeler çatlaklarda birikmeye başlar ve korozyon hızını gittikçe arttıracaktır [54, 62].

Paslanmaz çeliklerde Cr ve Mo aralık korozyonuna direnci arttıran elemanlardır. Aralık korozyonunda da oyuklaşma korozyonuna benzer şekilde kritik çatlak sıcaklığı olarak belirtilen olay mevcuttur. Bu sıcaklık aralığının yapısına ve

ortama göre değişkenlik gösterir. Aralık korozyonuna yeterli direnç göstermesi istenen çeliklerin seçiminde belirlenen bu sıcaklık değerleri dikkate alınmak zorundadır [8]. Paslanmaz çelik türlerinin aralık korozyonuna dirençleri oyuklaşma korozyonuna karşı gösterdikleri direnç ile benzerlik gösterir. Ni, Cr, Mo, içeriğinin yüksek olması neticesiyle aralık korozyonuna direnci arttırdığı için bu tip korozyona karşı en iyi direnç bu elementleri bünyesinde ihtiva eden östenitik paslanmaz çelikler tarafından gösterilir [54].

5.2.5 Gerilmeli Korozyon

Gerilmeli korozyon çatlaması, çekme gerilmesi ve korozyonun birlikte sebebiyet verdiği çatlama olayıdır. Çeşitli işlemlerde kullanılmakta olan paslanmaz çelik malzemeler, bu işlemler esnasında iç ve dış gerilmelere maruz kalmaktadırlar. Gerilmeli korozyon çatlaması olayında, korozyon olduğu takdirde çekme mukavemetinin altındaki gerilme değerlerinde dahi meydana gelebilmektedir [56].

Paslanmaz çelik malzemeler özellikle de klorür ihtiva eden ortamlarda gerilmeli korozyon çatlağına karşı duyarlıdırlar. Sıcaklık ve oksijenin bulunması paslanmaz çeliğin içerisinde gerilmeli korozyon çatlağına karşı olan hassasiyetini şiddetlendirme eğiliminde olacaktır. Ferritik ve dubleks paslanmaz çeliklerin çoğu gerilmeli korozyon çatlağına karşı yüksek ölçüde direnç gösterirler. Östenitik, martenzitik paslanmaz, çökelme sertleşmeli çelikler ise klorür ihtiva eden ortamlarda gerilmeli korozyon çatlağına karşı zayıftırlar [54, 62].

6. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Mehmet Özer çalışmasında; AISI 1020, AISI 1060 ve AISI 4140 çeliklerinden imal edilmiş olan borlama numunelerine 840 – 880 – 920 ve 960°C’de 2 – 4 – 6 ve 8 saat sürelerle katı borlama işlemi uygulamıştır. Bor kaynağı olarak da “ Ekabor – 2 ” tozu kullanmıştır. AISI 1020 çeliğinde bor difüzyon derinliği fazla olduğundan bu durumla orantılı olarak malzeme boyutları da diğer numunelere göre büyüdüğünü saptamıştır. Bu verileri AISI 1060 ve 4140 takip etmektedir. Borlama işlemi sonrası numunelerde mikrosertlik açısından borlama işlemi sonrasında AISI 1020’ de % 423, AISI 1060’ da % 336 ve AISI 4140 da % 411’ lik bir artış olduğu görülmüştür. Borlanan üç numunede de sertlik, en dış yüzeyden matrise doğru gidildikçe azalma saptamıştır. Bor difüzyonunun bor yapmadığı kısımdan itibaren de matrisin sertliğine düştüğünü ve en yüksek sertlik değerleri borürlerin bulunduğu kolonlarda saptandığını görmüştür [5].

Mehmet Ali Yağcı çalışmasında; AISI M2 (DIN 1.3343) çeliğine katı ortamda borlama yöntemi uygulanarak, işlem parametrelerinin yüzey özellikleri üzerine etkisi incelemiştir. Borlama deneyleri 900, 1000 ve 1100 °C ile 2, 4, 6 ve 8 saatlik sürelerde, EKabor-2 tozu kullanılarak gerçekleştirmiştir. Borür tabakası fazları (FeB ve Fe₂B) ve geçiş bölgesinin varlığı, mikro yapı incelemeleriyle tespit etmiştir. Yapılan sertlik ölçümleri sonucu 1000°C’de 6 saat borlanan numunede yüzeyden 10 :m mesafede 1895 HV ile en yüksek değeri elde edildiğini saptamıştır. Ayrıca 1100°C’de 6 ve 8 saatlik sürelerdeki numunelerde FeB fazının aşırı kırılğan yapısı sebebiyle önemli derecede düşük sertlik değerleri saptamıştır. Borlanmış numunelerin sertliği yüzeyden içeriye doğru ilerledikçe azalmakta olduğu ve borlama sıcaklığına ve süresine bağlı olarak, borür tabakasının kalınlığı ise ortalama 14 :m ile 126 :m arasında değişmekte olduğunu gözlemlemiştir. Sürenin uzaması ve sıcaklığın artması, borür tabakasının büyümesi ile sonuçlanmakta olduğunu ve özellikle FeB ve Fe₂B fazlarını içeren çift fazlı borür tabakasının yüzeyine paralel doğrultuda, bu iki fazın ara yüzeyi boyunca çatlakların oluştuğu gözlemlemiştir [16].

Tarkan Ayter çalışmasında; AISI 1020, AISI1040 ve AISI 2344 çeliklerine borlama işlemi; katı borlama olarak, Ekabor I tozu ile 900°C’de 2-4 ve 6 saat olarak yapmıştır. AISI 1020 çeliği diğer çelikler ile aynı şartlar altında, daha büyük boyut değişimi oluşturduğu saptamıştır. Bu verileri AISI 1040 ve 2344 takip etmektedir. AISI 1020 çeliğinin diğer çeliklerden daha fazla boyut değişimine sahip olabilmesi alaşımsız yapısı ve daha az (C) oranına sahip olmasından kaynaklanmakta olduğunu düşünmektedir. AISI 1040 çeliğide alaşımsız çeliklerden sayılsa da, 1020 çeliğine oranla neredeyse 2 kat (C) oranına sahip olması nedeniyle, borun çelik içine difüzyonu zorlaştırmakta olduğunu saptamıştır. AISI 2344 çeliğinin bor gelişimini olumsuz etkileyen ise yapısındaki alaşım elementlerinin çokluğu olduğunu gözlemlemiştir. Bor tabakası; aynı çelik numuneleri için, süre artışı ile yükseliş göstermektedir. En düşük bor tabakası 2 saatlik borlamada, en geniş bor tabakası ise 6 saatlik borlamada meydana geldiğini saptamıştır. Malzeme çeşidi, borlama saati ve ilk yüzey pürüzlülüğü; ayrımı göstermeksizin, oluşan tüm numunelerin bor tabakaları ağırlıklı olarak tek faz oluşturmakta olduğunu ve XRD analizinde tanımlanan bu fazın FeB fazı olduğunu elde etmiştir. 6 saatlik borlanmış numuneler, 2 saatlik borlanmış numunelerden daha geniş bor tabakası oluşturduğundan dolayı, 6 saatlik numuneler – 2 saatliklere oranla ana malzemenin içine doğru daha yüksek sertlikler göstermekte olduğunu saptamıştır. Mesafeler karşılaştırıldığında ise AISI 1020 çeliklerinin, AISI 1040 çeliğine ve AISI 2344 çeliğine karşı daha derin mesafelere dek mikro sertlik yüksekliğini koruduğu gözlemlemiştir [4].

Ali Günen çalışmasında; AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 10-50 nm boyutundaki Nanobor ve 1400 µm boyutundaki EKabor 3 tozları ile yüzeyi alaşımlandırılarak mikroyapı, mekanik özellikleri ve korozyon davranışları araştırmıştır. Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin aynı koşullarda Ekabor tozları ile borlanan numunelere göre yüzey sertlik değerlerinde 2 kat’a kadar daha fazla sertlik değerleri elde etmiş, çekme, üç noktalı eğme dayanımları ve aşınma dayanımlarında da daha iyi sonuçlar almıştır [19].

Gökhan Başman çalışmasında; 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 artmış olduğunu saptamıştır. Borlamada oluşan borür

tabakasının kalınlığında, banyoya yapılan katkıların oranlarının yanında tipleri de etkili olduğu gözlemlenmiştir. 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 ulaşıldığı saptanmıştır. Genel olarak sıcaklığın 850 °C ‘den 1050°C ‘ye yükselmesi borür tabakasının kalınlığını, özellikle artan katkı oranlarında, misli ile arttığı gözlemlenmiştir [26].

Mehmet Çakır; tek silindirli hava soğutmalı dizel bir motorun gömlek iç yüzeyinin bor kaplanması sonucu, segman-gömlek arasında oluşan sürtünme direnci ve motor performans değerlerindeki değişimler araştırmıştır. Motor gömleklerini kutu borlama tekniği ile 780 °C’de 4 saat süre ile borlamıştır. Borlama işlemi sonucu dökme demir gömlek kesitinde yaklaşık 25 µm kaplama kalınlığını elde etmiştir. Borlama sonucu gömlek yüzeyi daha sert, pürüzsüz ve gözenekli seramik bir yapı olan Fe₂B’a dönüştüğünü saptamıştır. Borlanmış yüzeyin standart yüzeye göre daha pürüzsüz olması sürtünme direncini iyileştirmiş olduğunu saptamıştır. Motor performans deneyleri sonucunda mekanik sürtünmeye harcanan güçten yaklaşık %6 oranında bir kazanç sağlandığı ve motor yükünün artırılmasıyla mekanik verimin arttığını gözlemlenmiştir [67].

Cuma Bindal çalışmasında, az alaşımlı karbon çeliklerinde borlama ile yüzeye kaplanan borürlerin özelliklerini tespit etmeye çalışmış ve borlama süresi, krom miktarı gibi parametrelerin değişimine göre krom borürler saptamıştır. Kromun az olsa da kırılma tokluğunu düşürdüğünü gözlemlenmiştir [27].

Redouane Chegroune ve Mourad Keddou çalışmasında; AISI 316 paslanmaz çeliği plazma pasta borlama tekniği ile 700 750 800°C lerde 3,5,7 saat borlamış, bu işlemin kinetiğini ve karakterizasyonunu incelemiştir. Yüzeyde bulunan bor tabakasında FeB, Fe₂B, CrB, Cr₂B ve Ni₃B fazlarını tespit etmiştir. AISI 316 için bor aktivasyon enerjisi yaklaşık olarak 250.8 kJ mol⁻¹ olduğunu saptamıştır [68].

L. ANGKURARACH ve P. JUIJERM çalışmasında; AISI 420 Martenzitik paslanmaz çeliği kutu borlama yöntemiyle 900 °C de 2 ve 6 saat borlama işlemine tabi tutmuştur. AISI 420 çeliğindeki bor tabakasının yüksek alaşım elementi

içermesinden dolayı düzgün ve kompakt morfolojiye sahip olduğunu gözlemlemiştir. Yaklaşık olarak bor tabakasının sertliğinin 1800-2000 HV civarlarında olduğunu saptamıştır [64].

Sang Yul Lee çalışmasında; AISI 403 Martenzitik paslanmaz çeliği kromlama ve borlama işlemlerine maruz bırakmıştır ve bu dubleks tabakalı malzemenin mekanik özelliklerini incelemiştir. Öncelikle AISI 403 çeliği 1100 °C de 2 saat kromlama yapılmış sonrasında EKabor 3 tozu ile 950 °C de 9 saat borlamıştır. Kromlama ve borlama işlemi sonrası tabaka sertliği yaklaşık olarak 2300 HV olarak ölçmüştür. XRD sonrası elde edilen fazlarda FeB, Fe₂B ve CrB fazlarının varlığını gözlemlemiştir [12].

Emre Dilektaşlı çalışmasında; plastik ekstrüzyon kalıplarında kullanılan AISI 4140, AISI H13, AISI 420 ve EN 1.8519 çeliklerinden imal edilmiş olan borlama numunelerine 850 – 900 ve 950 °C’ de 4 – 6 ve 8 saat sürelerle pasta borlama işlemini uygulamıştır. Borlanan numunelerin optik mikro yapı fotoğrafları çekilmiş borlama şartlarına göre 20 ile 140 µm arasında değişen tabaka kalınlıkları elde etmiş, daha sonra faz analizi için X-ray difraksiyon analizini yapmış ve Fe₂B, FeB, CrB fazları tespit etmiştir. Difüzyon bölgesinin kalınlığı ve yüzey sertliği ölçmüştür. Sırasıyla 260, 242, 251 ve 250 HV_{0,2} sertliğinde temin edilen AISI 4140, AISI H13, AISI 420 ve EN 1.8519 kalite çeliklerinin yüzey sertliği borlama işlemi sonucunda 1800-2200 HV_{0,2} mertebesine kadar çıktığını saptamıştır [66].

Umut Yapar çalışmasında; ticari EN-TS-C10E, EN-TS-C35E, EN-TS-C60E ve 41Cr4 makina yapım çeliklerini borlamıştır. Borlama sonrası malzeme yüzeylerinde oluşan borür yapıları ve malzemelerin yüzey özellikleri borlama süresi (2, 4, 6 ve 8 saat) ve borlama sıcaklığına (850°C, 950°C ve 1050°C) bağlı olarak incelemiştir. Borlanan tüm numunelerde yüzeyden itibaren sertlik profilleri çıkartmış ve malzeme yüzeylerinde ana malzeme sertliğinden yaklaşık 7-9 kat yüksek sertlikler bulmuş, sertlik değerleri malzeme karbon miktarı ile ilişkilendirmiştir. Ayrıca borlama sıcaklığına ve süresine bağlı olarak tabaka kalınlığındaki değişimler incelemiş, karbon miktarına bağlı olarak borür tabakası kalınlığının nasıl değiştiği incelemiştir [2].

İbrahim Güneş çalışmasında; AISI 210 ve AISI 430 çeliklere Ekabor 2 tozu kullanarak borlama işlemi uygulamıştır. Borlama işlemi 850 -950 – 1050 °C derecelerde 2-3-6 saat sürelerinde gerçekleştirmiştir. Bor tabakasının incelemesini optik mikroskop, XRD tekniği ve mikro sertlik testleriyle incelemiştir. XRD sonuçlarında çeliğin yüzeyindeki bor tabakası analizlerinde FexBy, CrxBy and NixBy bileşenlerini saptamıştır. AISI 310 ve AISI 430 malzemelerinin bor tabakası sertlikleri sırasıyla 1658 - 2284 HV_{0,1} ve 1762 - 2165 HV_{0,1} değerlerinde olduğunu tespit etmiştir [63].

Bütün bu literatür çalışmasından sonra, paslanmaz çeliklerin ham halde ve borlanmış halde korozif ortamlarda çalışması durumunda, özellikle de HCl asitinin değişik konsantrasyonlarındaki ortamlarında, borlamanın etkisinin nasıl olduğu konusunda yapılan çalışmalardaki boşluğu tespit ederek bu çalışmayı yapmaya karar verilmiştir.

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1 Deney Amacı

Bu çalışmanın amacı; farklı tipteki paslanmaz çelik malzemelere katı borlama işlemini uygulayarak malzemelerin bor tabakası kalınlıklarına, tabakalardaki sertlik değerlerine ve korozyona karşı dirence borlama işleminin etkisini incelemektir. Bu amaç çerçevesinde deneysel çalışma yapabilmek için endüstriden AISI 304, AISI 420 ve AISI 430 tiplerinde paslanmaz çelik malzemeler temin edilmiştir. Bu malzemelere 3 farklı sıcaklıkta 850 – 925 - 1000°C ve 3 farklı sürelerde 2-4-6 saat borlama işlemi uygulanmıştır. Bor tabakası kalınlıkları, sertlik dağılımları ve HCl ortamında ki korozyon ölçümleri neticesinde elde edilen veriler çerçevesinde bulunan sonuçlar, birbirleriyle karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

7.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Spektral Analizleri

Deneyde paslanmaz çelik türlerinden 3 farklı tip malzeme kullanılmıştır. Bunlar östenitik paslanmaz çelik grubundan AISI 304, martenzitik paslanmaz çelik grubundan AISI 420 ve ferritik paslanmaz çelik grubundan AISI 430 paslanmaz çelik malzemelerdir. Bu üç malzemenin boyları 2 cm alınmış fakat aynı çapta malzeme temin edilemediğinden, AISI 304 malzemesi 14.5 mm çapında, AISI 430 malzemesi 16 mm çapında AISI 420 ise 14 mm çapında temin edilmiştir. Çaplar arasındaki bu farkın borlama esnasında gerçekleşen difüzyon işlemine negatif etkisi olmayacağı düşünülmüştür. Temin edilen bu malzemelerin kimyasal analizlerini saptamak için spektral analizleri yapılmıştır. Analiz neticesinde elde edilen malzeme bileşimleri Tablo 7.1’de gösterilmiştir.

Tablo 7.1: Çalışmada kullanılan malzemelerin spektral analiz sonuçları

Malzeme	C	Mn	Mo	S	Si	Cr	Ni
AISI 304	0.026	1.604	0.408	0.024	0.390	18.750	8.469
	Co	Nb	Ti	Sn	W	V	Cu
AISI 304	0.215	0.22	0.002	0.010	0.048	0.053	0.438
	C	Mn	Mo	S	Si	Cr	Ni
AISI 420	0.116	0.506	0.045	0.022	0.322	13.133	0.093
	Co	Nb	Ti	Sn	W	V	Cu
AISI 420	0.020	0.001	0.003	0.005	0.01	0.049	0.045
	C	Mn	Mo	S	Si	Cr	Ni
AISI 430	0.087	1.596	0.237	0.058	0.255	16.925	0.093
	Co	Nb	Ti	Sn	W	V	Cu
AISI 430	0.023	0.001	0.004	0.007	0.083	0.087	0.064

Borlama işlemi sırasında ve sonrasında oluşabilecek olumsuzluklara karşı her bir koşul için malzemelerden ikişer adet numune alınmıştır.

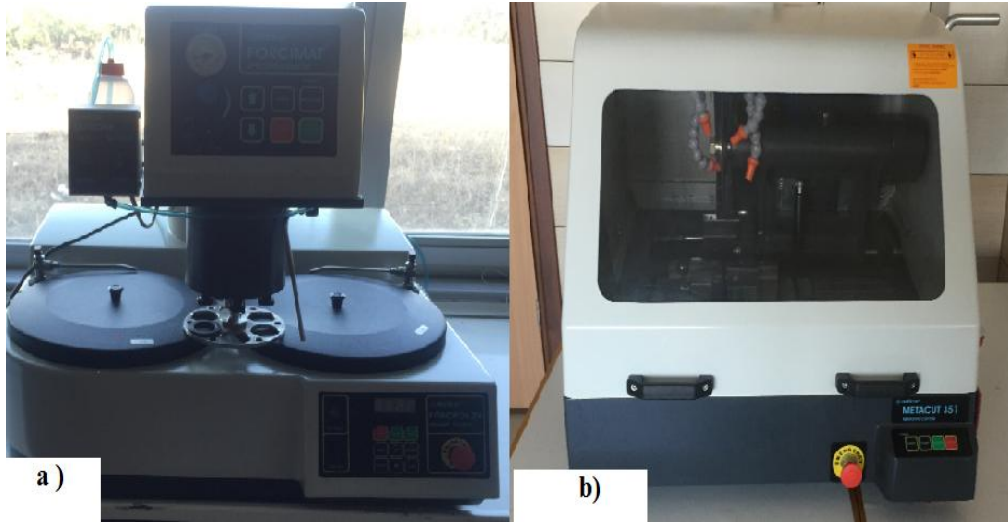
7.3 Deney Numunelerinin Kodlanması

Tablo 7.2: Deney programı ve numunelerin kodları

Numune Kodu	Numune	Borlama Sıcaklığı- (°C)	Borlama Süresi (Saat)
Ö-1-2	AISI 304	850	2
Ö-1-4	AISI 304	850	4
Ö-1-6	AISI 304	850	6
Ö-2-2	AISI 304	925	2
Ö-2-4	AISI 304	925	4
Ö-2-6	AISI 304	925	6
Ö-3-2	AISI 304	1000	2
Ö-3-4	AISI 304	1000	4
Ö-3-6	AISI 304	1000	6
M-1-2	AISI 420	850	2
M-1-4	AISI 420	850	4
M-1-6	AISI 420	850	6
M-2-2	AISI 420	925	2
M-2-4	AISI 420	925	4
M-2-6	AISI 420	925	6
M-3-2	AISI 420	1000	2
M-3-4	AISI 420	1000	4
M-3-6	AISI 420	1000	6
F-1-2	AISI 430	850	2
F-1-4	AISI 430	850	4
F-1-6	AISI 430	850	6
F-2-2	AISI 430	925	2
F-2-4	AISI 430	925	4
F-2-6	AISI 430	925	6
F-3-2	AISI 430	1000	2
F-3-4	AISI 430	1000	4
F-3-6	AISI 430	1000	6

7.4 Metalografik Çalışmalar

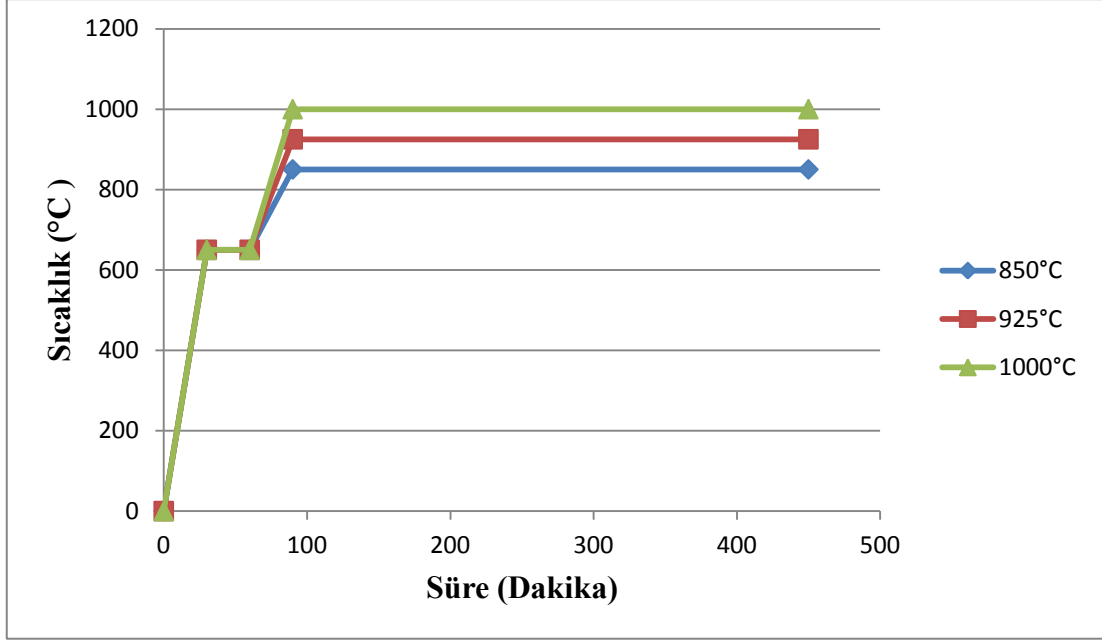
Endüstriden temin edilen paslanmaz çubuk malzemeler Balıkesir Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Merkezi Metalografi laboratuvarında $\varnothing 15 \times 20$ mm boyutlarında metalografik kesme cihazı ‘‘METKON METACUT M351’’ ile kesilmiştir. Kesilen bu numuneler borlama işleminden önce otomatik zımparalama cihazı ‘‘ METKON FORCİPOL 2V’’ ile zımparalanarak borlama işlemine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 7.1: Zımparalama parlatma cihazı ve numune kesme cihazı

a) Zımparalama ve parlatma cihazı b) Numune kesme cihazı

Borlama işlemi Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği Malzeme Laboratuvarında bulunan ‘‘Protherm Furnaces PLF 110/45’’ fırın içerisinde 3 mm paslanmaz çelik malzemedен imal edilmiş kutularda gerçekleştirilmiştir.



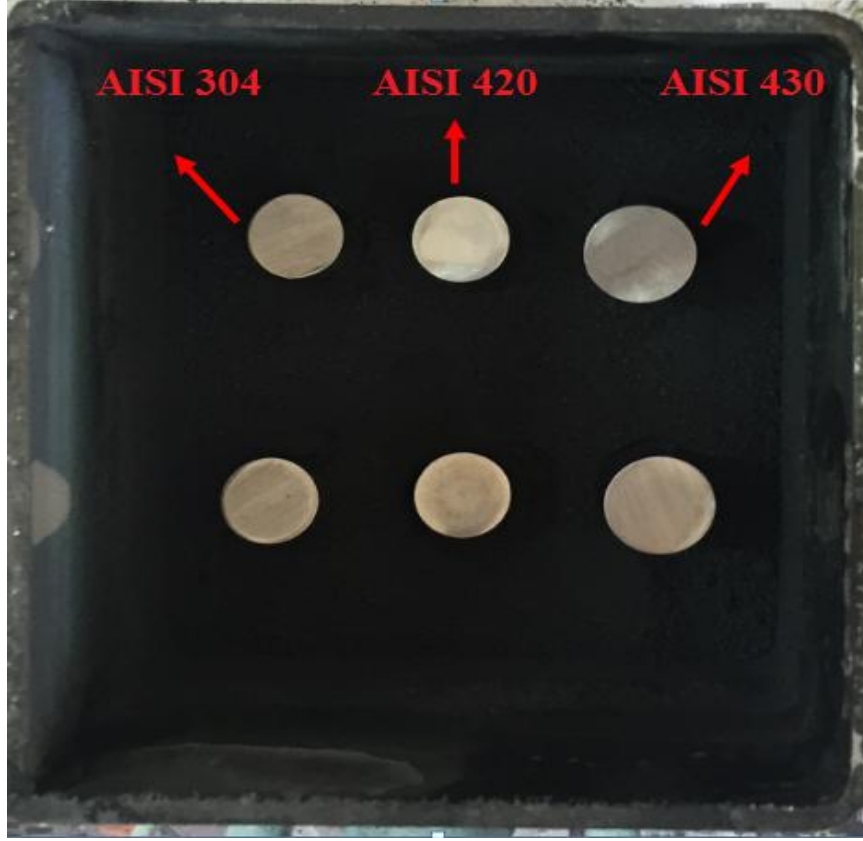
Şekil 7.2: Borlamanın gerçekleştirildiği sıcaklık-süre grafiği

Borlama işlemi katı ortamda gerçekleştirilmiştir. Kutuların içerisine ‘‘E-Kabor2’’ bor tozu ile beraber toplam 6 adet numune konumlandırılmıştır. ‘‘E-Kabor2’’ tozunun içeriği ; B_4C – SiC – KBF_4 şeklindedir ve bor tozu Vezneli A.Ş.tarafından temin edilmiştir. Borlama kutusunun ve içerisindeki toza gömülü haldeki numuneleri eşdeğer bir sıcaklık çevrimi içerisinde tutmak için sıcaklık kademeli olarak borlama sıcaklığına getirilmiştir. Borlama süresi, sıcaklık istenilen sıcaklığa ulaştığı andan itibaren tutulmuştur.

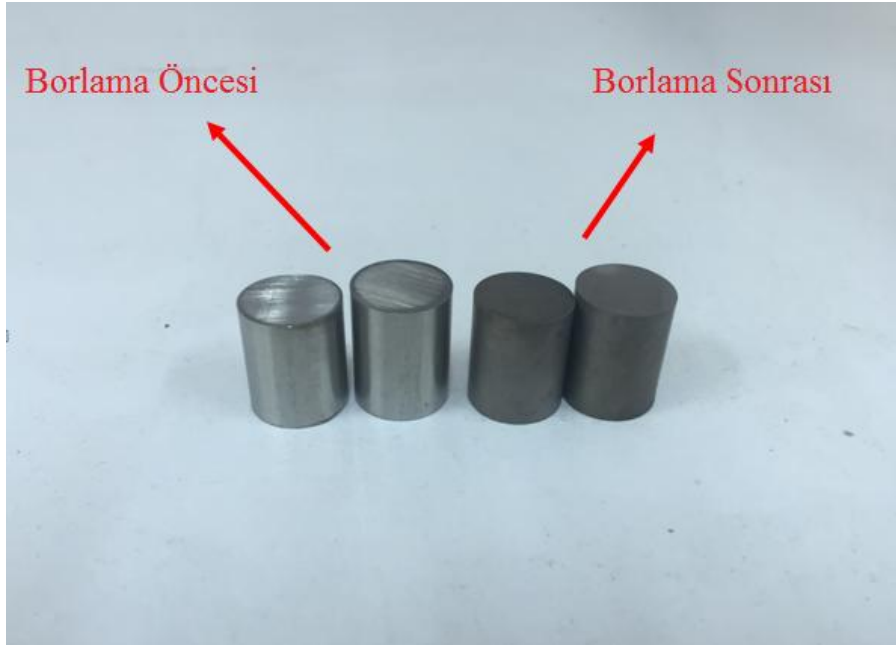


Şekil 7.3: Borlama işleminin gerçekleştirildiği fırın

Borlama sıcaklığı olarak 850°C - 925°C - 1000°C sıcaklık seviyeleri belirlenerek bu sıcaklıklarda 2-4-6 saat sürelerde borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kutu tabanından 2cm seviyesine kadar bor tozu doldurulduktan sonra üzerine numuneler yerleştirilmiştir. Numuneler kendi arasında ve kutudan en az 1cm mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Numuneler konumlandırıldıktan sonra üzerine 3cm 'E-Kabor-2' ilave edilmiştir. Bunun sebebi, normalde Ekabor-2'nin 2cm konulduktan sonra sonra oksijen tutucu Ekrit tozu 2cm konulması gerekmektedir. Ancak ekrit tozunun birinci işlemde bor tozu ile karışıp ayıklanması zor olduğundan ikinci kez yapılacak işlemlerde bor difüzyonunu zorlaştırılacağı göz önüne alınarak numune üstü Ekabor-2'nin kalınlığı artırılarak 3cm yapılmıştır. İşlem bittikten sonra gördük ki, kapağın altındaki hava Ekabor-2'nin sadece 0.5cm'lik kısmını oksitlemiş olup sert bir tabaka meydana gelmiştir. Oksit bizim numunelerimize ulaşmamış, böylece işlemimiz sağlıklı bir şekilde sonuna kadar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.4: Borlama potası içerisindeki numunelerin yerleşimi



Şekil 7.5: Borlama öncesi ve sonrası numune görüntüleri

Borlama işlemi sonrası fırından çıkartılan borlama kutusu havada soğutulduktan sonra numuneler çıkartılmış ve temizlenerek metalografi işleminde incelenmek için kesime hazır hale getirilmiştir.

Borlama işlemine tabi tutulan malzemeler Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında kesilerek metalografik inceleme çalışmaları için hazır hale getirilmiştir.

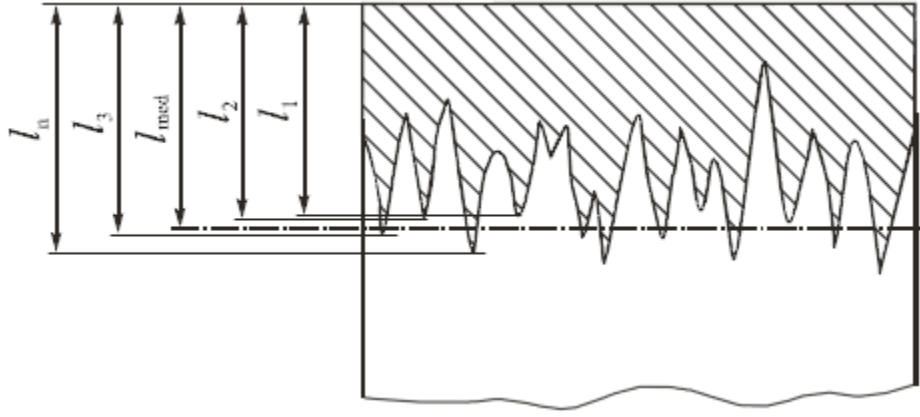


Şekil 7.6: Metalografik incelemede kullanılan Leica DM2700M marka optik mikroskop

Metalografik incelemeler için hazır hale getirilen numuneler öncelikle zımparalama işlemi için ‘‘METKON FORCİPOL 2V’’ zımparalama ve parlatma cihazında 200 dev/dk hızda sırasıyla 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 numaralı SiC zımparalardan geçirilmiştir. Farklı kademelerdeki zımparalardan geçirilen bu numuneler, daha sonra aynı cihazda parlatma işlemi için elmas parlatma solüsyonu vasıtası ile çuhada parlatılmıştır.

Son olarak numuneler **Vilella** [100ml etanol+5ml HCl + 1gr pikrik asit + Gliserin (Asidin konsantrasyonunu düşürmek için kullanıldı)] dağılayıcı ile dağlama işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Daha sonra ‘Leica DM2700M’ marka optik mikroskop ile optik mikroyapı görüntüleri çekilmiş, mikroskop üzerine monte edilmiş olan aparat yardımıyla bor tabakası kalınlıkları ölçülmüştür.



Şekil 7.7: Bor tabakası kalınlık ölçümünün tipik görüntüsü [17]

Tabaka kalınlığı ölçümünün hesaplanması üstte görüldüğü üzere tabaka üzerinden beş ölçümün ortalaması alınmasıyla saptanmıştır.

7.5 Sertlik Ölçümü

Borlama tabakası kalınlıklarının sertlik dağılımları ve ölçümleri Şekil 7.8’ de gösterilen “**Future Tech**” marka mikro sertlik ölçüm cihazı kullanarak yapılmıştır.

Sertlik ölçüm işlemi Vickers uç kullanarak 50g yük ve 10 saniye süre ile gerçekleştirilmiştir. Mikro sertlik ölçümleri yüzeyden itibaren belirli aralıklarla her bir sertlik mesafesi için **5 adet** ölçüm alınıp bu değerlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.8: Future Tech marka mikro sertlik ölçüm cihazı

7.6 XRD Analizi

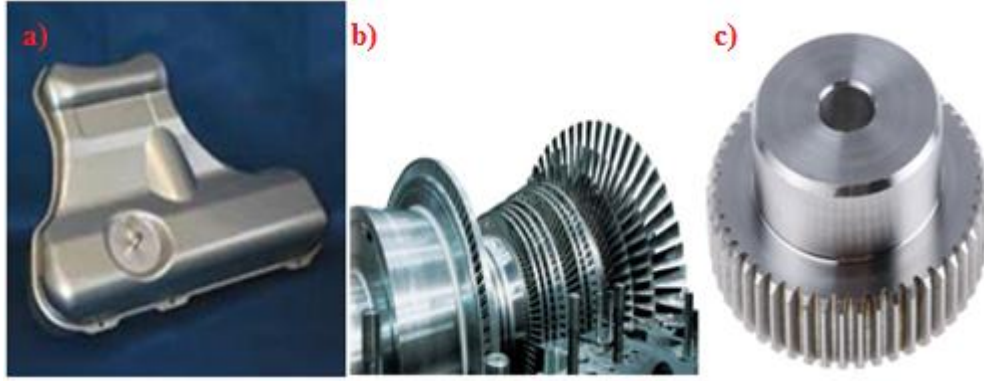
XRD (X Işını Difraksiyonu) analizi, bakır gibi hedef elementten elde edilen X ışın demetinin analiz edilecek malzeme üzerine gönderilmesiyle gerçekleştirilir. XRD analizi uygulanarak numunelerde ortaya çıkan fazlar belirlenmiştir. Çalışmada İstanbul Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Adnan Tekin Malzeme Uyg.-Ar.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



Şekil 7.9: Çalışmada kullanılan XRD cihazı

7.7 Korozyon Direnci İncelemesi

Paslanmaz çelikler genel anlamda korozyon dayanımı konusunda en kuvvetli malzeme gruplarındandır. AISI 304 Östenitik paslanmaz çelik; süt ve kimya endüstrisinde en yaygın olarak kullanılmakta olan tiptir, AISI 420 Martenzitik paslanmaz çelik; buhar, gaz türbinleri, dişli, rulman ve millerde ve AISI 430 Ferritik paslanmaz çelik; egzoz manifoldu, turbo şarj ve katalitik konvertör elamanlarında sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 7.10: Paslanmaz çeliklerin kullanıldığı bazı parçalar

a)Yakıt tankı b) Türbin bıçakları c) Dişli elemanları

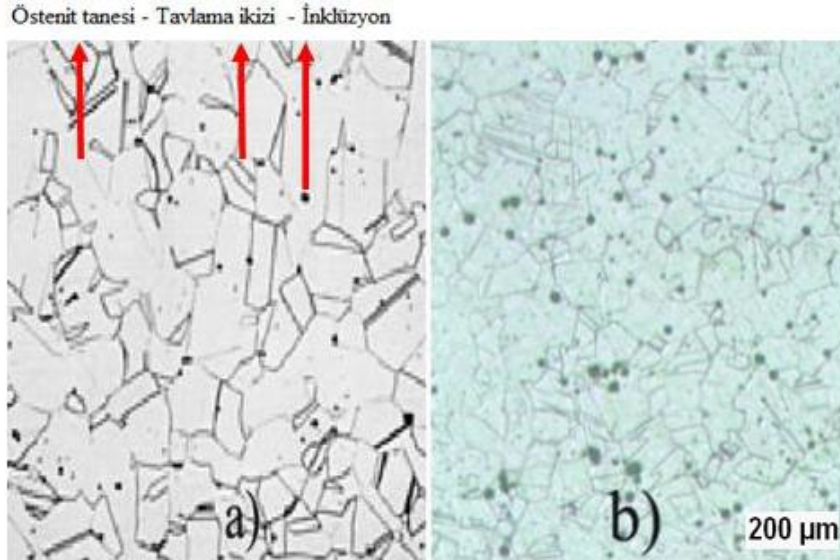
Araştırmalarımız neticesinde paslanmaz çeliklerin HCl asitine karşı dirençlerinin düşük olduğu literatürde bahsedilmektedir. Bu sebeple, borlamanın paslanmaz çeliklerin korozyon direncine etkisi incelenmiştir. Borlanmış numuneler ve herhangi bir işlem görmemiş ham haldeki numuneler %10 HCl asiti içerisine atılmıştır. Belirli süreler (28 gün) sonunda numuneler asitin içerisinden çıkarılıp hassas terazide kütleleri ölçülmüştür. Son olarak kütle kayıpları ölçülerek hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Borlama'nın korozyon üzerine etkisi karşılaştırmalı olarak açıklanmıştır.

8. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

8.1 Mikroyapı Görüntüleme Ve Tabaka Kalınlığı Ölçümleri

850-925-1000°C derecelerinde ve 2-4-6 saat boyunca borlama işlemi gerçekleştirilen paslanmaz çelik malzemeler metalografik hazırlamadan geçirildikten sonra 'Leica DM2700M' marka optik mikroskop ile optik mikroyapı görüntüleri çekilmiş ve bor tabakası kalınlıkları ölçülmüştür. Optik incelemeler neticesinde borür tabakasının, numuneler üzerinde homojen bir şekilde oluştuğu saptanmıştır. Borür tabakasının kalınlığının, numunelere göre farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Borlama işleminin süresi ve sıcaklığı arttıkça bor tabakasının kalınlığı artmıştır.

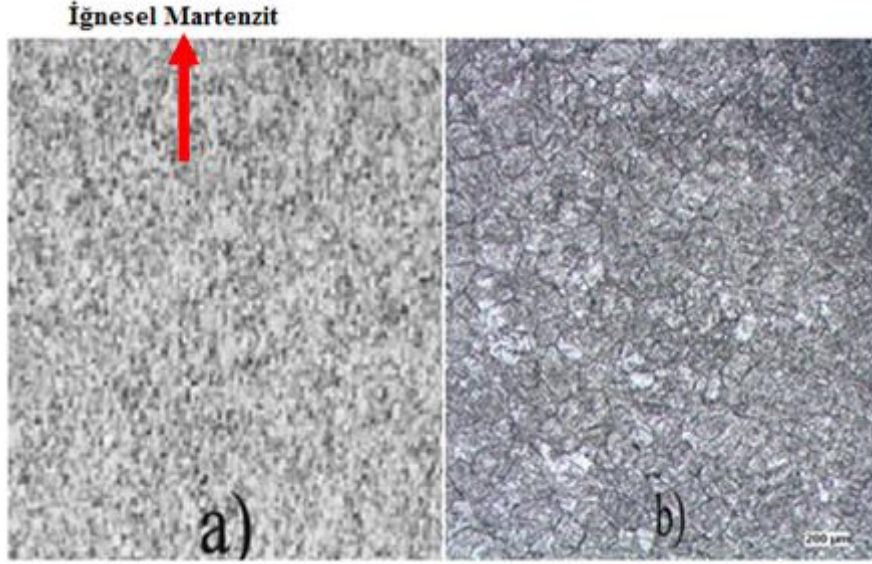
Borlanan malzemelerin matris yapıları Şekil 8.1, Şekil 8.2, Şekil 8.3 de gösterilmiştir.



Şekil 8.1: AISI 304 (Östenitik) malzemesinin matris yapısının mikroyapı görüntüsü

a) Literatürdeki AISI 304 görüntü [44] b) Numunemiz

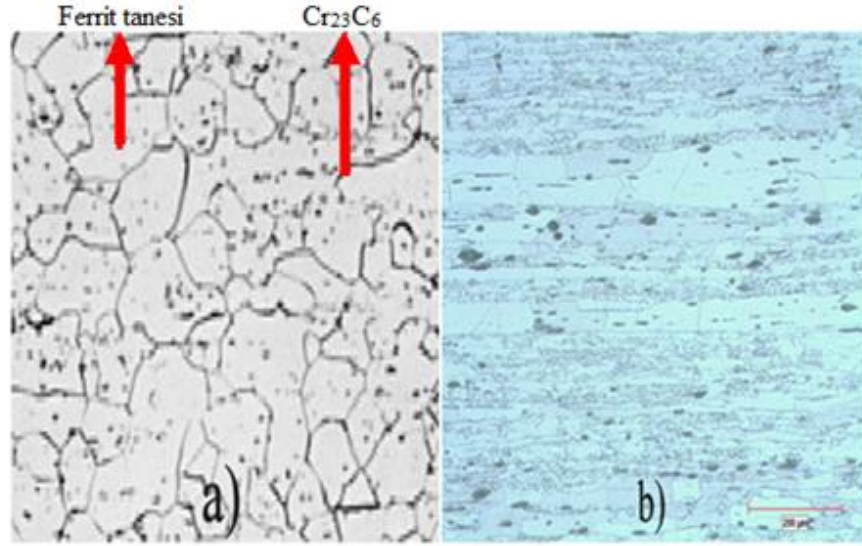
Şekil 8.1 de gösterilen AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunenin matris yapısı incelendiğinde yapının eşeksizli östenit taneleri ve tavlama ikizlerinden oluştuğu görülmektedir. Literatürde bu bölgelere ek olarak küçük inklüzyonlarında olabileceği belirtilmiştir [44].



Şekil 8.2: AISI 420 (Martenzitik) malzemesinin matris yapısının mikroyapı görüntüsü

a) Literatür AISI 420 görüntü[44] b) Numunemiz

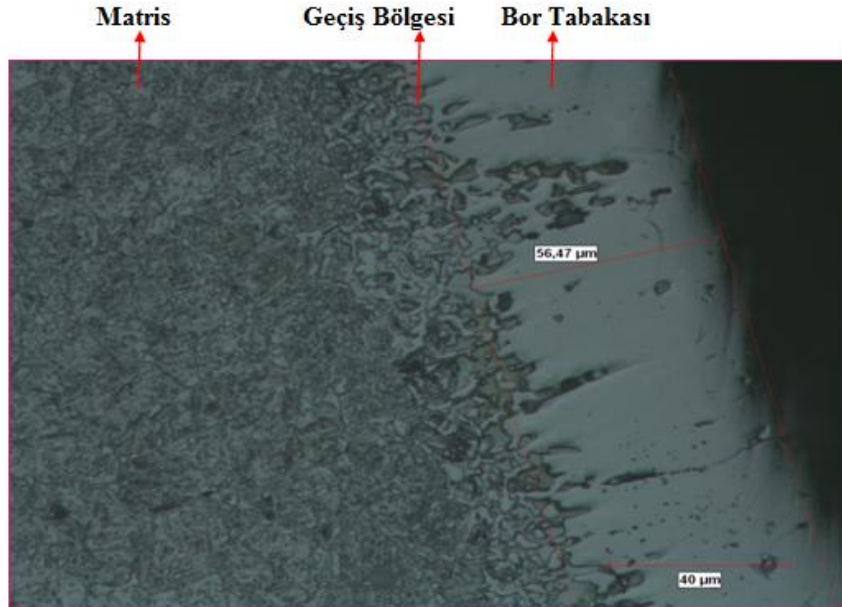
Şekil 8.2 de gösterilen AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik numunenin matris yapısı incelendiğinde yapının iğnesel bölgelerden oluştuğu ve bu bölgelerin martenzit bölgeleri olduğu düşünülmektedir. Literatürde martenzit bölgeleri ile birlikte sülfid inklüzyonların da mevcut olabileceği belirtilmiştir [44].



Şekil 8.3: AISI 430 (Ferritik) malzemesinin matris yapısının mikroyapı görüntüsü

a) Literatür AISI 430 görüntü [44] b) Numunemiz

Şekil 8.3’de gösterilen AISI 430 ferritik paslanmaz çelik numunenin matris yapısı incelendiğinde yapı eş eksenli ferrit taneleri ve rastgele disperse olmuş kısmi krom karbür tanecikler içerdiği düşünülmektedir. Literatürde bu bölgelere ek olarak şerit halinde koyu martenzit yapılarının da olabileceği belirtilmiştir [44].



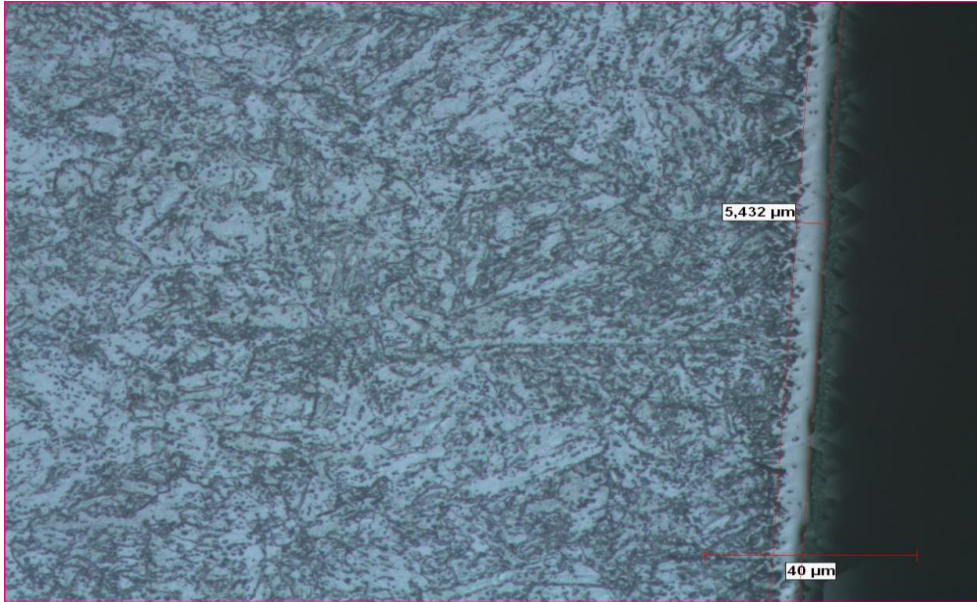
Şekil 8.4: Borlanmış numunenin bölgesel gösterimi

AISI 420 - 1000°C’de 6 saat borlanan malzeme

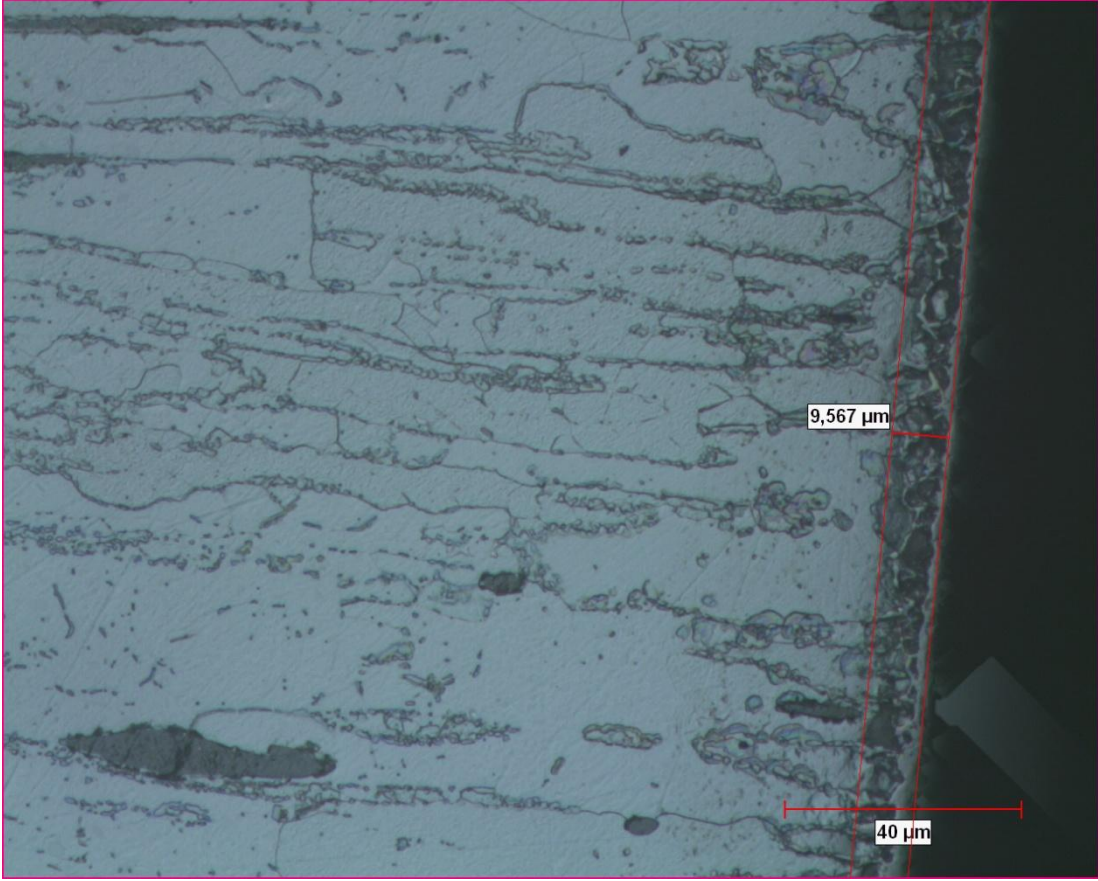
850 °C’de 2 saat süresince borlanan malzemelerin optik mikroyapı görüntüleri Şekil 8.5, Şekil 8.6, Şekil 8.7’de verilmiştir.



Şekil 8.5: 850 °C de 2 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü



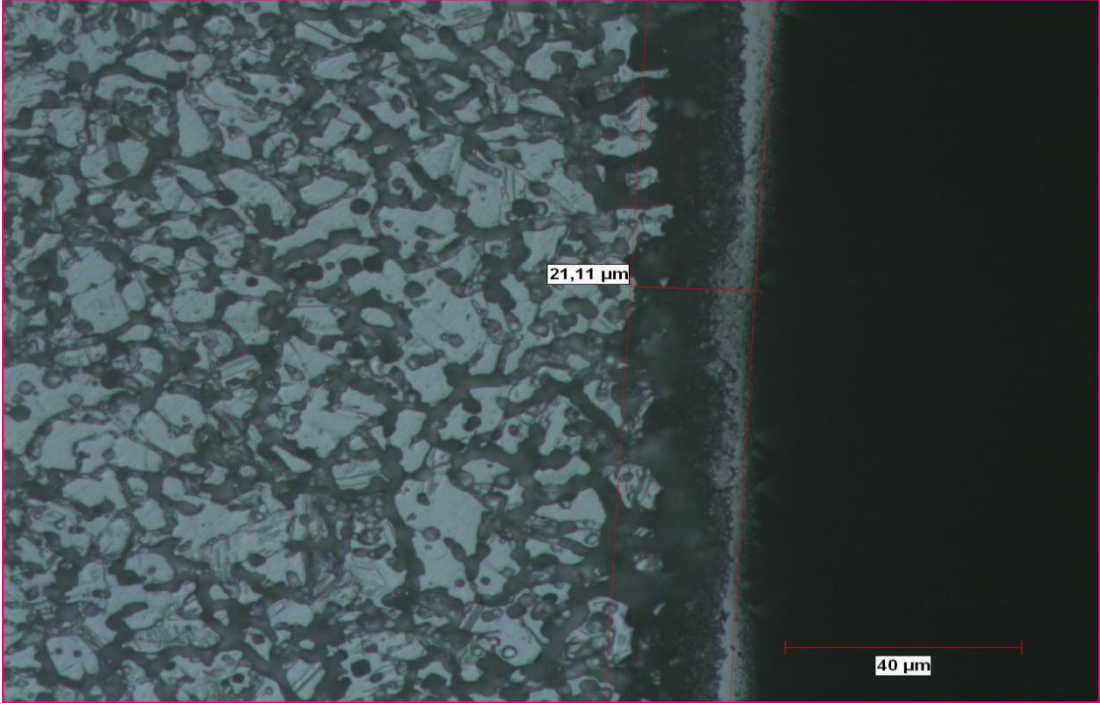
Şekil 8.6: 850 °C de 2 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü



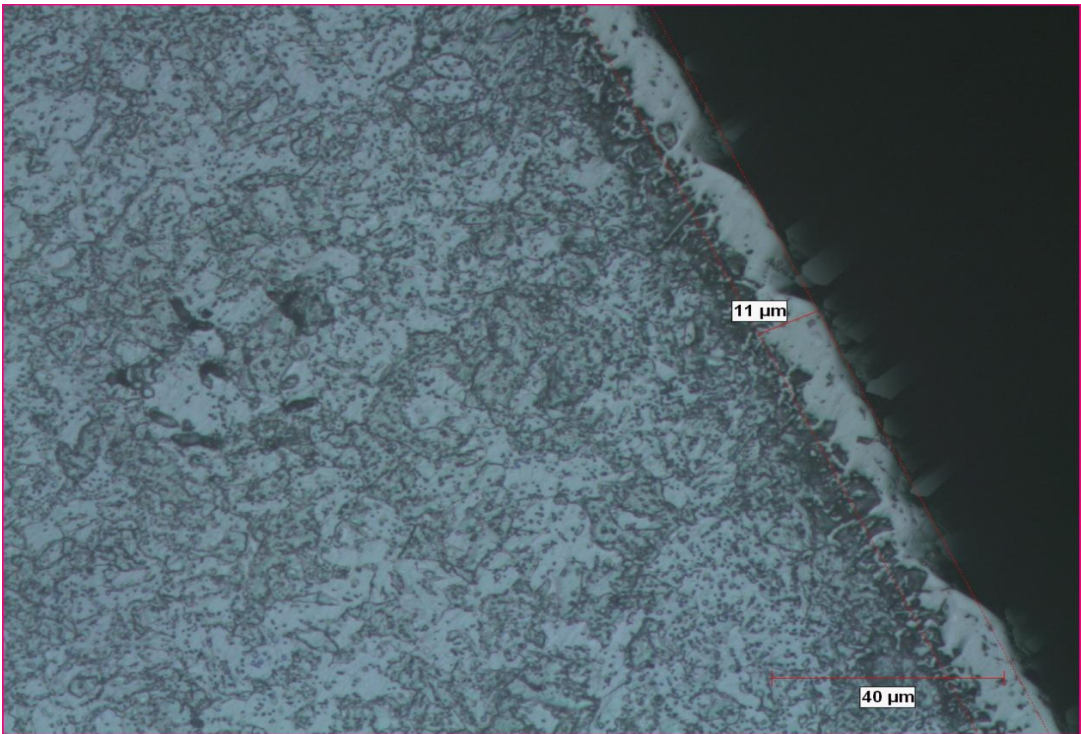
Şekil 8.7: 850 °C de 2 saat borlanan AISI 430 mikroyapı görüntüsü

850°C’de 2 saat borlanan malzemelerin optik mikroyapıları ve tabaka kalınlığı sonuçları incelendiğinde farklı kalınlıklarda borür tabakası oluşumu gözlemlenmiştir. Bor tabakalarının yapıları incelendiğinde kompakt bir yapı tespit edilmiştir. 850°C de yapılan borlama işleminde en fazla tabaka kalınlığı 11.17µm ile AISI 304 malzemesinde, en az tabaka kalınlığı ise 5.432µm ile AISI 420 malzemesinde elde edilmiştir.

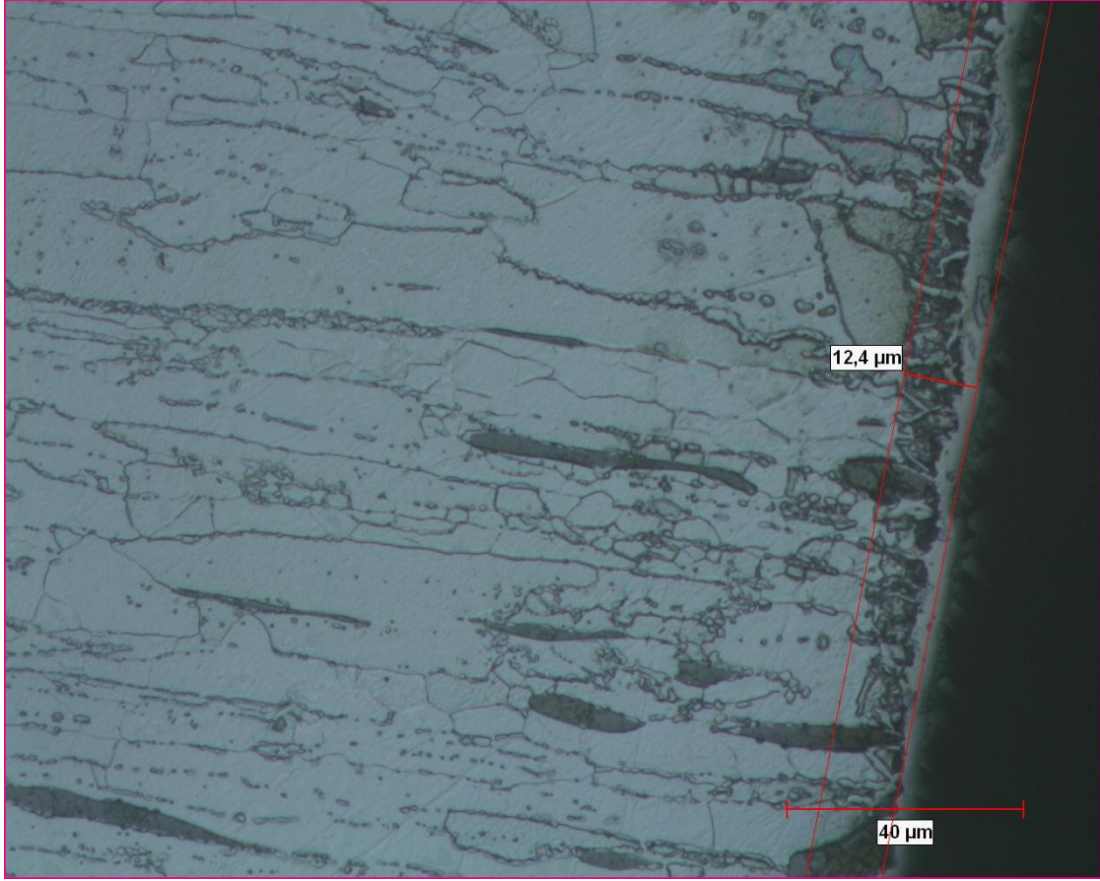
850 °C’de 4 saat süresince borlanan malzemelerin optik mikroyapı görüntüleri Şekil 8.8, Şekil 8.9, Şekil 8.10’da verilmiştir.



Şekil 8.8: 850 °C de 4 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü



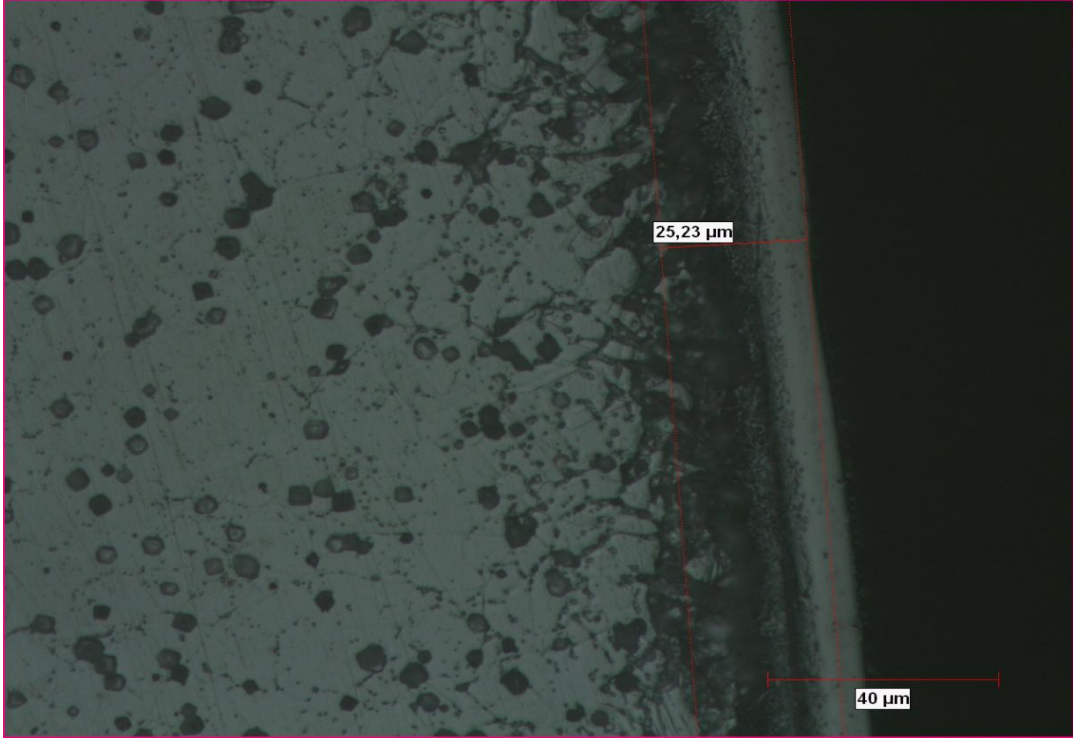
Şekil 8.9: 850 °C de 4 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü



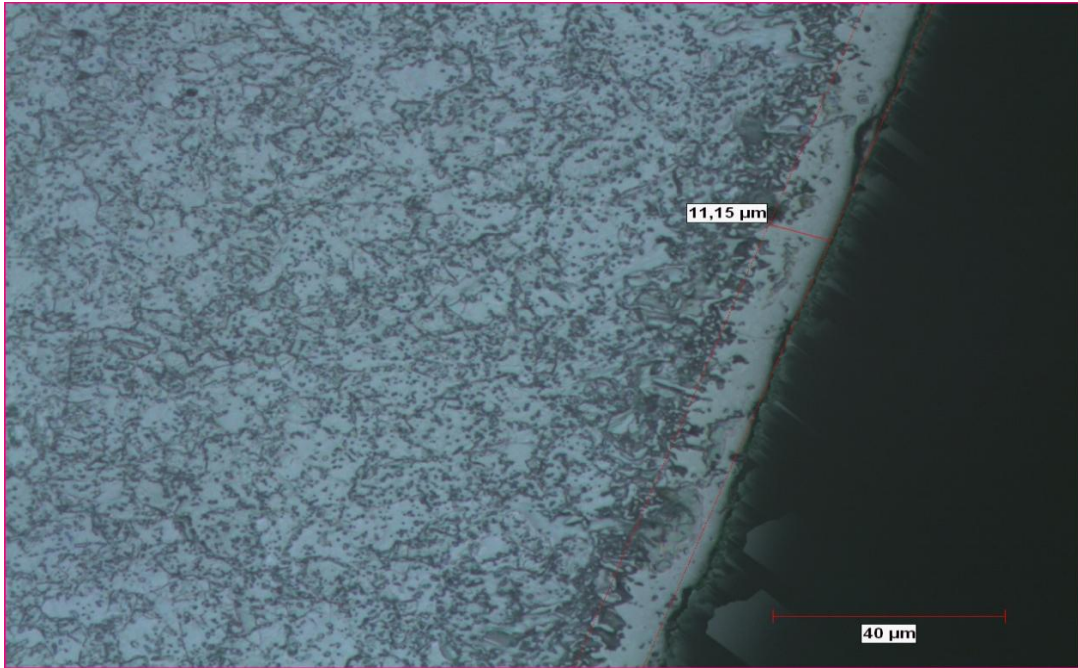
Şekil 8.10: 850 °C de 4 saat borlanan AISI 430 malzemesinin mikroyapı görüntüsü

850°C’de 4 saat borlanan malzemelerin optik mikroyapıları ve tabaka kalınlığı sonuçları incelendiğinde farklı kalınlıklarda borür tabakası oluşumu gözlemlenmiştir. Bor tabakalarının yapıları incelendiğinde kompakt bir yapı tespit edilmiştir. 850°C de 4 saat süresince yapılan borlama işleminde en fazla tabaka kalınlığı 21.11µm ile AISI 304 malzemesinde, en az tabaka kalınlığı ise 11µm ile AISI 420 malzemesinde elde edilmiştir.

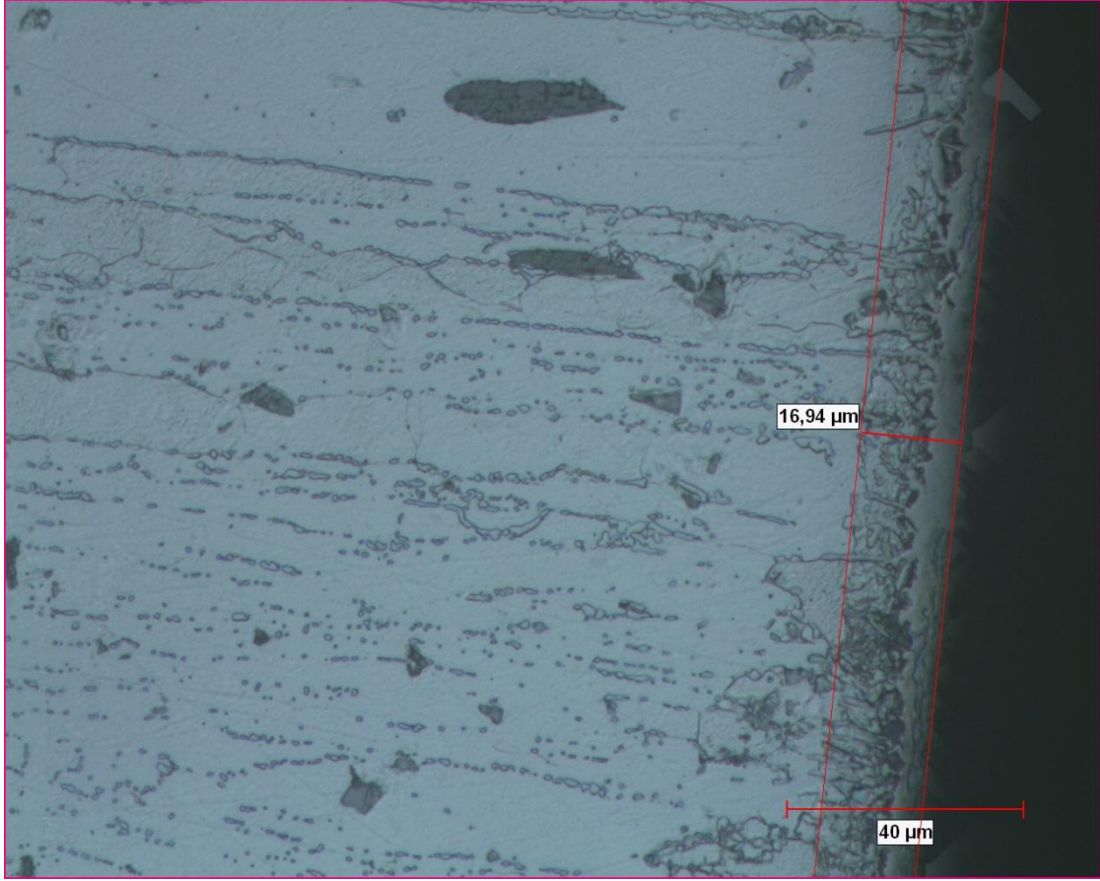
850 °C’de 6 saat süresince borlanan malzemelerin optik mikroyapı görüntüleri Şekil 8.11, Şekil 8.12, Şekil 8.13’de verilmiştir.



Şekil 8.11: 850 °C de 6 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü

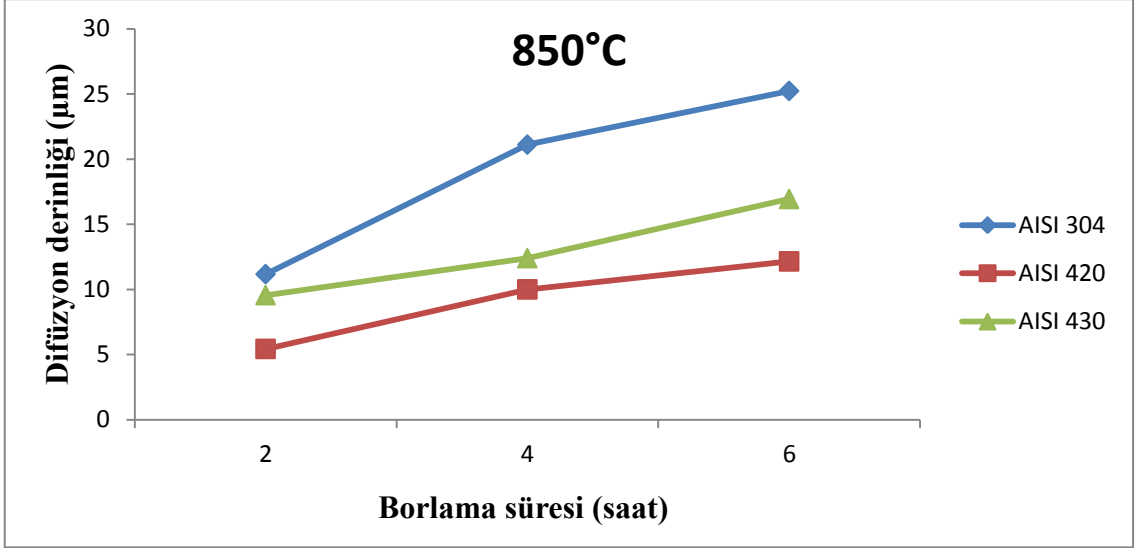


Şekil 8.12: 850 °C de 6 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü



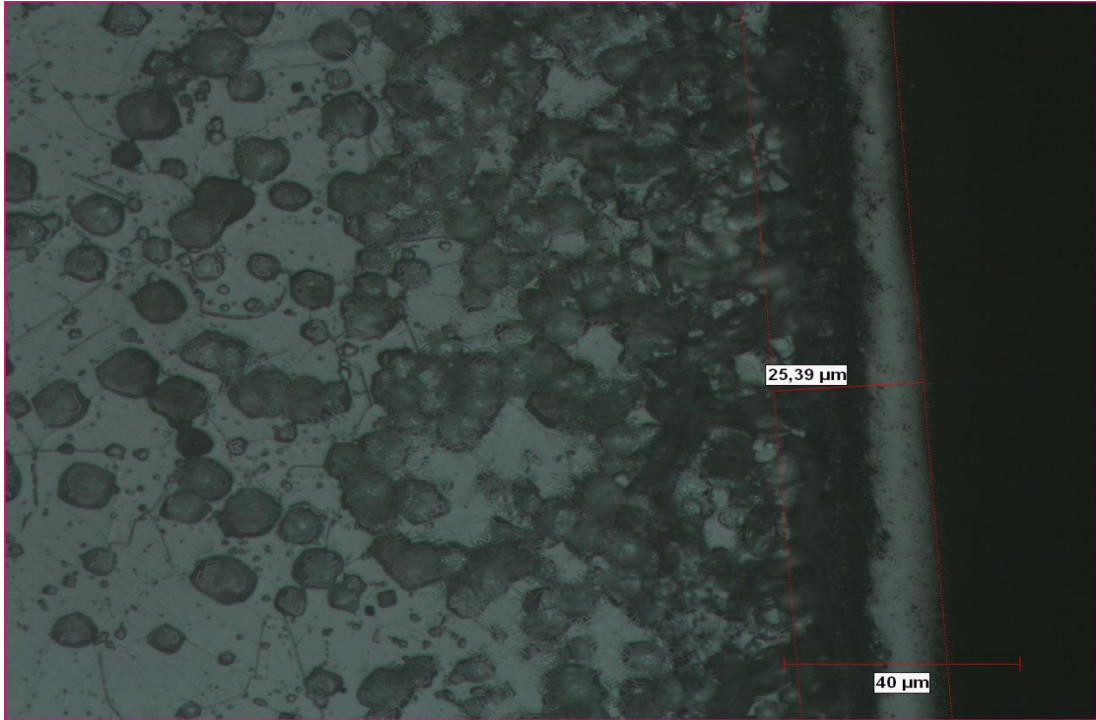
Şekil 8.13: 850 °C de 6 saat borlanan AISI 430 malzemesinin mikroyapı görüntüsü

850°C’de 6 saat borlanan malzemelerin optik mikroyapıları ve tabaka kalınlığı sonuçları incelendiğinde farklı kalınlıklarda borür tabakası oluşumu gözlemlenmiştir. Bor tabakalarının yapıları incelendiğinde kompakt bir yapı tespit edilmiştir. 850°C 6 saat süresince yapılan borlama işleminde en fazla tabaka kalınlığı 25.23μm ile AISI 304 malzemesinde, en az tabaka kalınlığı ise 11.15μm ile AISI 420 malzemesinde elde edilmiştir.

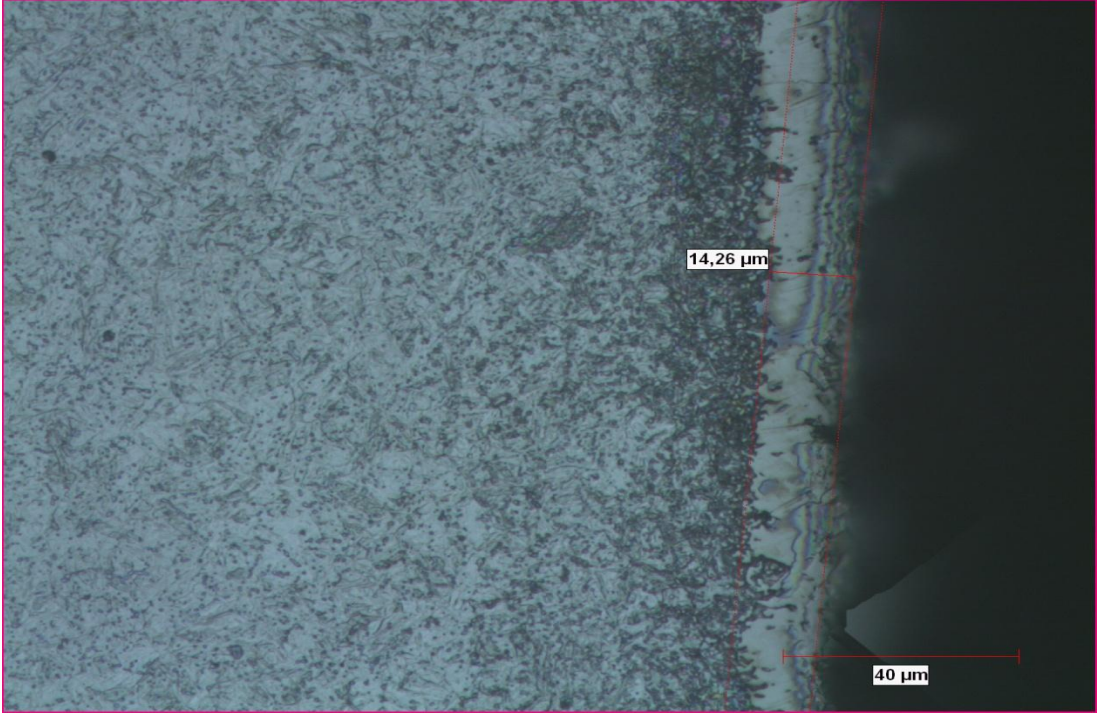


Şekil 8.14: 850°C de 2-4-6 saat borlanan malzemelerin tabaka kalınlığı grafiği

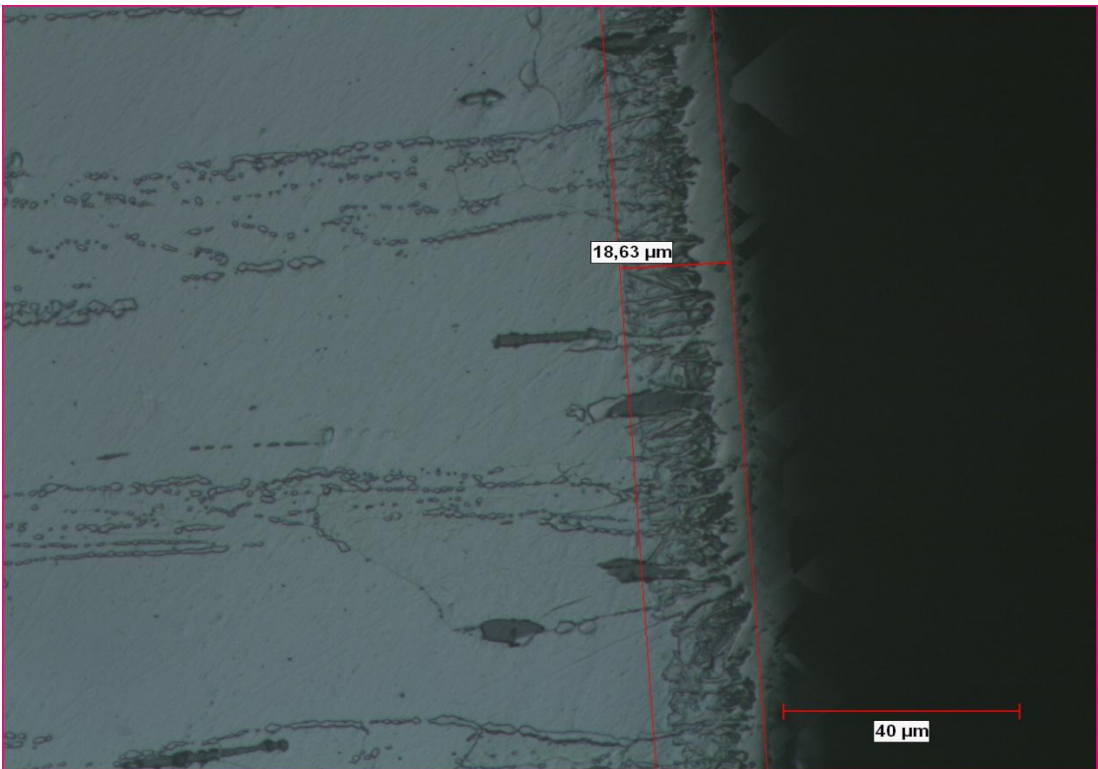
925°C’de 2 saat süresince borlanan malzemelerin optik mikroyapı görüntüleri Şekil 8.15, Şekil 8.16, Şekil 8.17’de verilmiştir.



Şekil 8.15: 925 °C de 2 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü



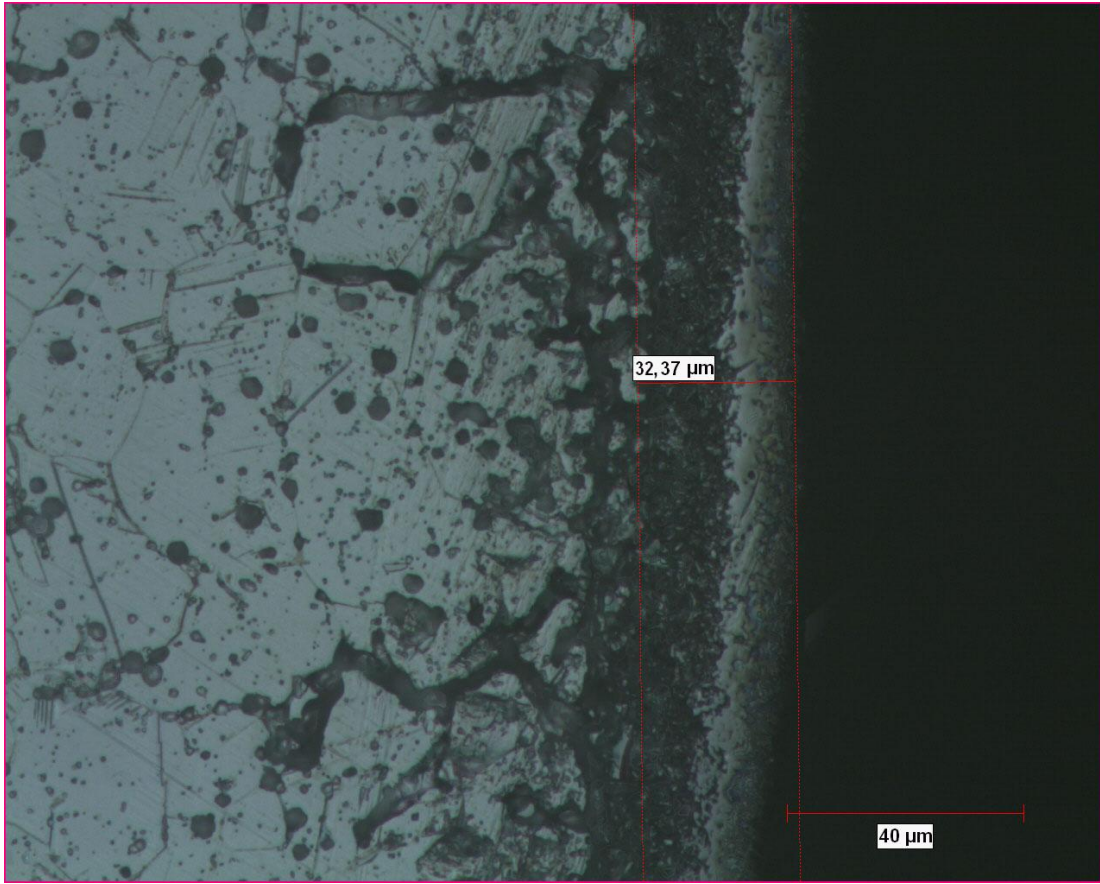
Şekil 8.16: 925 °C de 2 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü



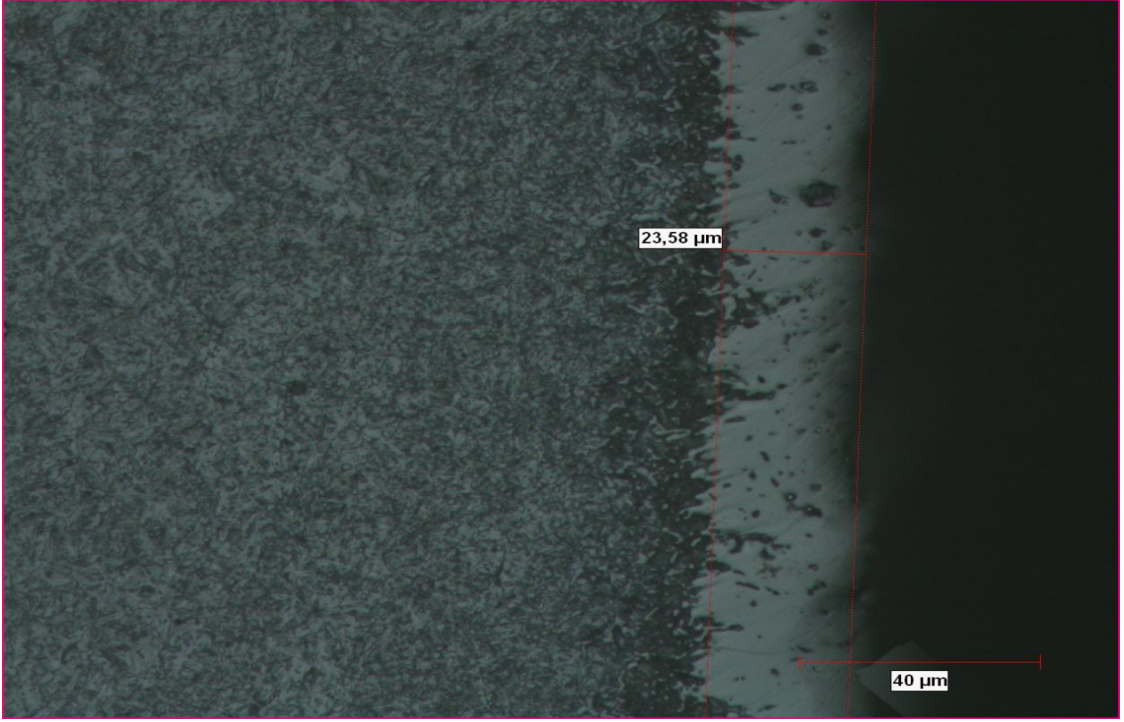
Şekil 8.17: 925 °C de 2 saat borlanan AISI 430 malzemesinin mikroyapı görüntüsü

925°C’de 2 saat borlanan malzemelerin optik mikroyapıları ve tabaka kalınlığı sonuçları incelendiğinde farklı kalınlıklarda borür tabakası oluşumu gözlemlenmiştir. Bor tabakalarının yapıları incelendiğinde kompakt bir yapı tespit edilmiştir. 925°C 2 saat süresince yapılan borlama işleminde en fazla tabaka kalınlığı 25.39µm ile AISI 304 malzemesinde, en az tabaka kalınlığı ise 14.26µm ile AISI 420 malzemesinde elde edilmiştir.

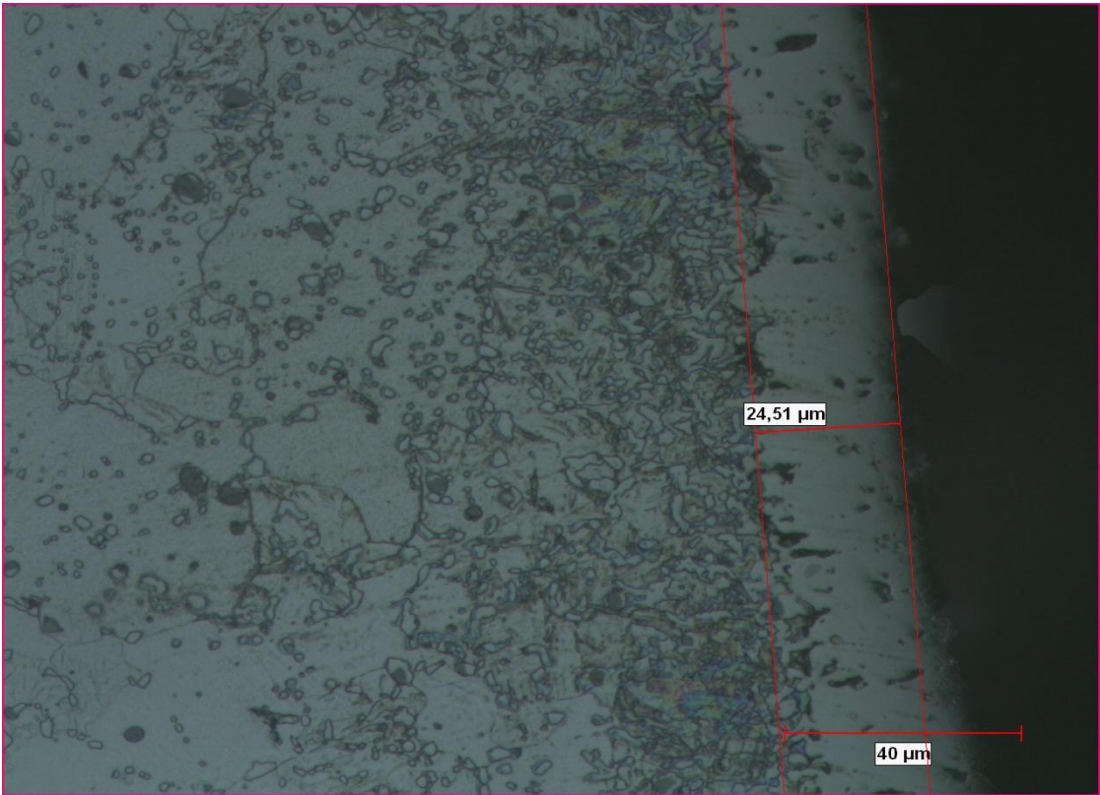
925 °C’de 4 saat süresince borlanan malzemelerin optik mikroyapı görüntüleri Şekil 8.18, Şekil 8.19, Şekil 8.20’de verilmiştir.



Şekil 8.18: 925 °C de 4 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü



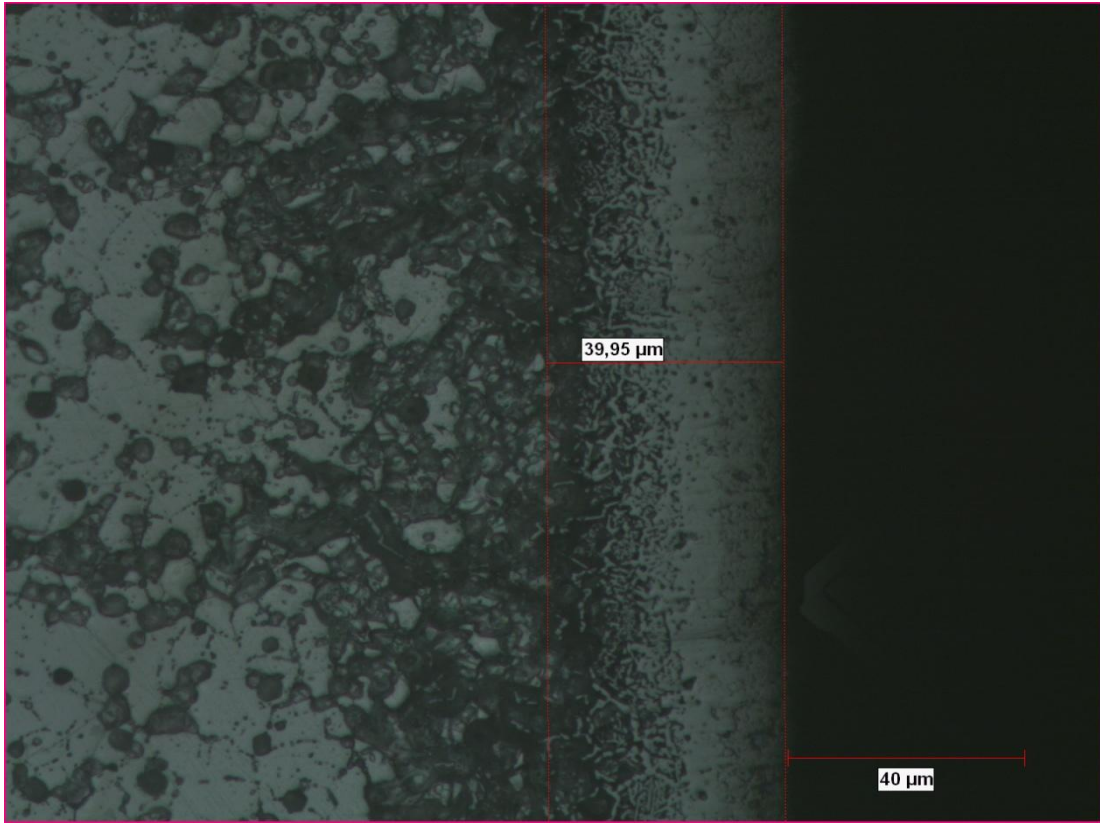
Şekil 8.19: 925 °C de 4 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü



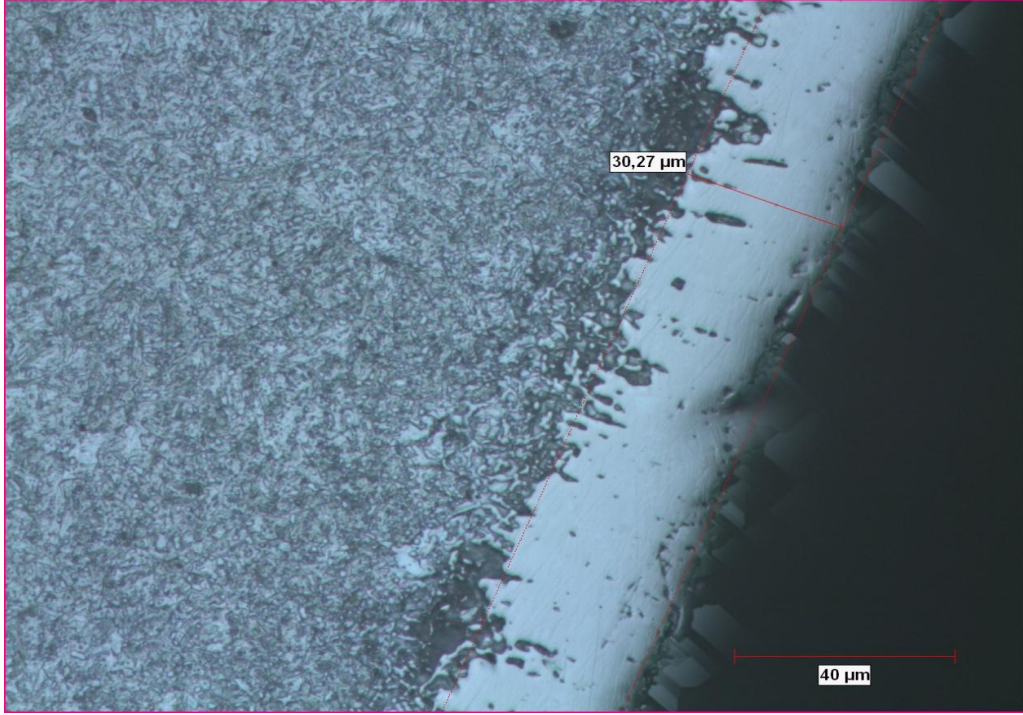
Şekil 8.20: 925 °C de 4 saat borlanan AISI 430 malzemesinin mikroyapı görüntüsü

925°C'de 4 saat borlanan malzemelerin optik mikroyapıları ve tabaka kalınlığı sonuçları incelendiğinde farklı kalınlıklarda borür tabakası oluşumu tespit edilmiştir. Bor tabakalarının yapıları incelendiğinde kompakt bir yapı gözlemlenmiştir. 925°C 4 saat süresince yapılan borlama işleminde en fazla tabaka kalınlığı 32.37µm ile AISI 304 malzemesinde, en az tabaka kalınlığı ise 23.58µm ile AISI 420 malzemesinde elde edilmiştir.

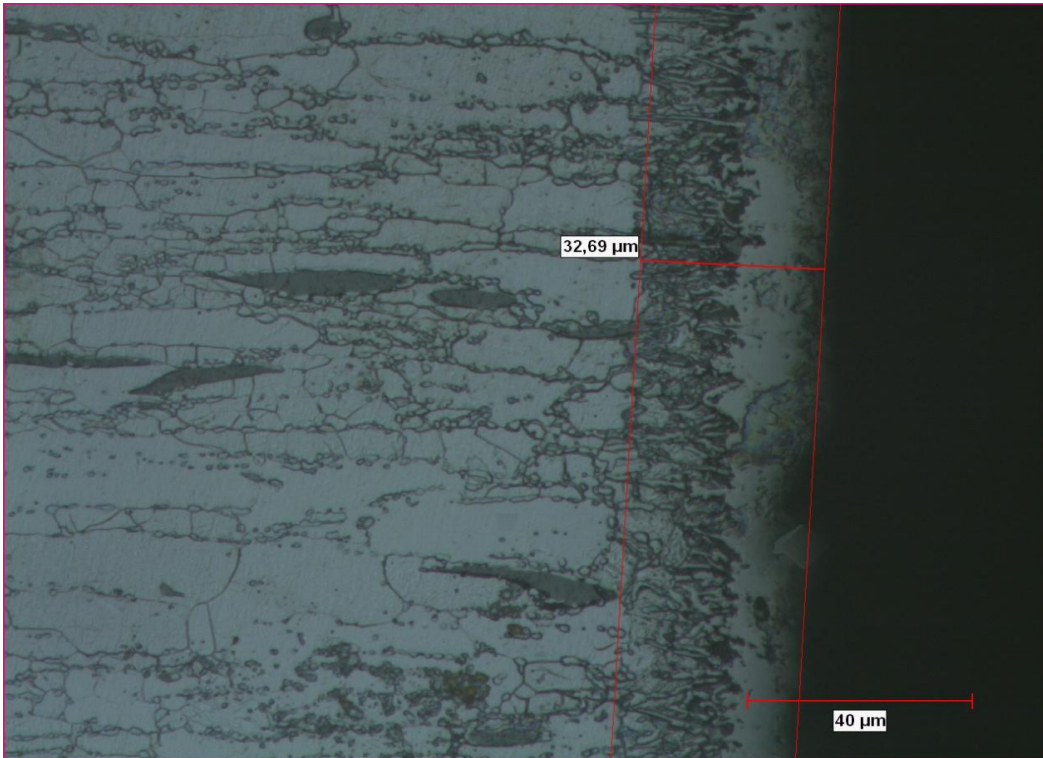
925 °C'de 4 saat süresince borlanan malzemelerin optik mikroyapı görüntüleri Şekil 8.21, Şekil 8.22, Şekil 8.23'de verilmiştir.



Şekil 8.21: 925 °C de 6 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü

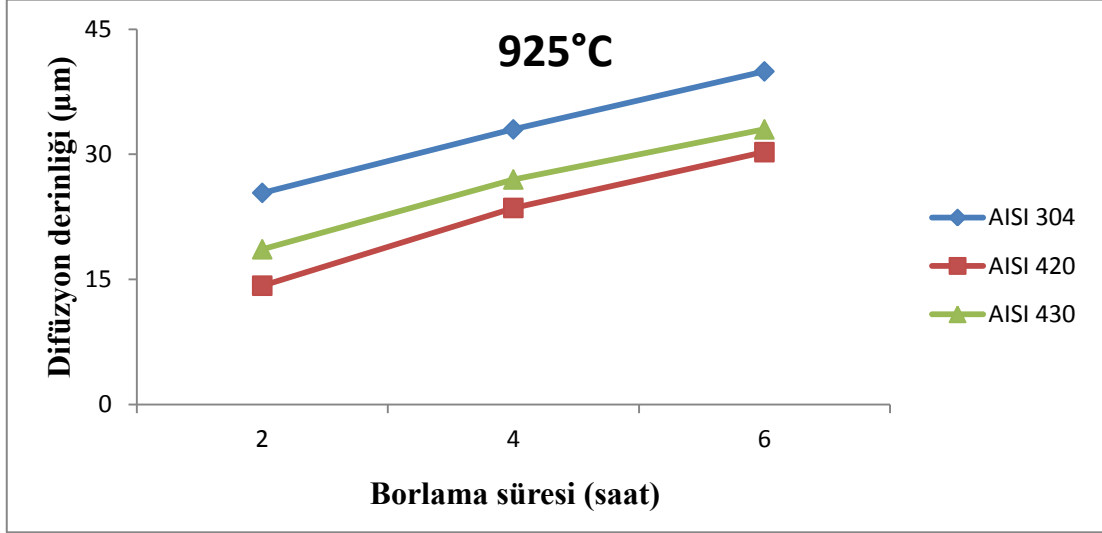


Şekil 8.22: 925 °C de 6 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü



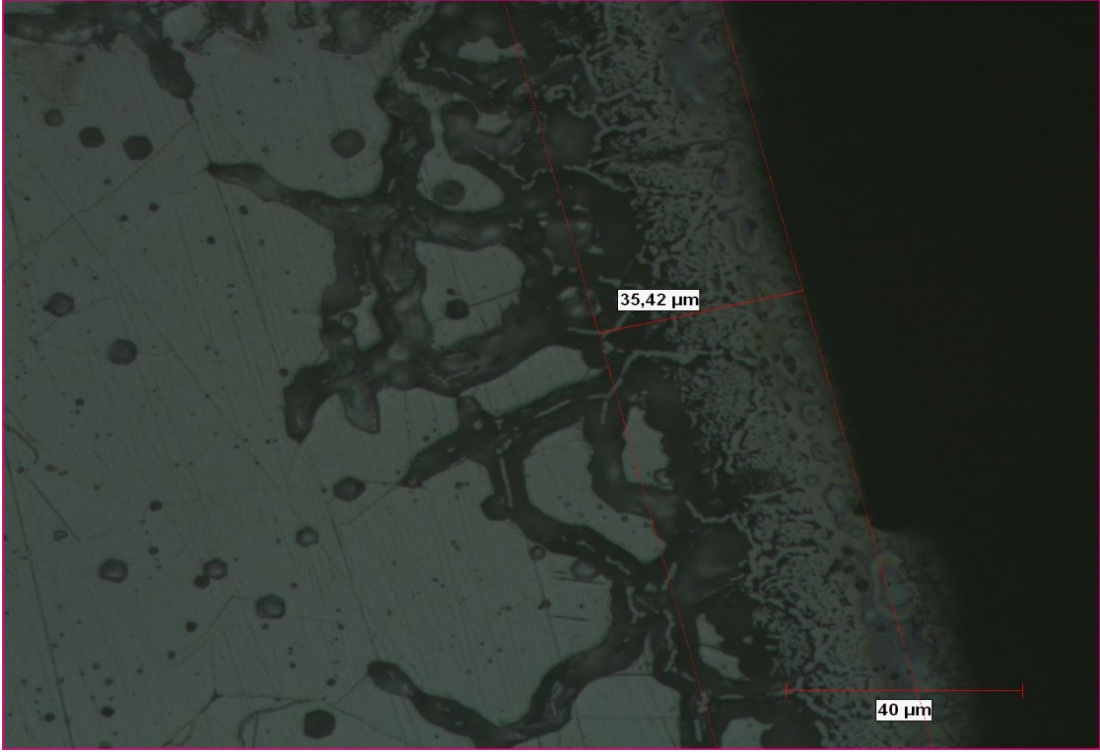
Şekil 8.23: 925 °C de 6 saat borlanan AISI 430 malzemesinin mikroyapı görüntüsü

925°C'de 6 saat borlanan malzemelerin optik mikroyapıları ve tabaka kalınlığı sonuçları incelendiğinde farklı kalınlıklarda borür tabakası oluşumu tespit edilmiştir. Bor tabakalarının yapıları incelendiğinde kompakt bir yapı gözlemlenmiştir. 925°C de 6 saat süresince yapılan borlama işleminde en fazla tabaka kalınlığı 39.95µm ile AISI 304 malzemesinde, en az tabaka kalınlığı ise 30.27µm ile AISI 420 malzemesinde elde edilmiştir.

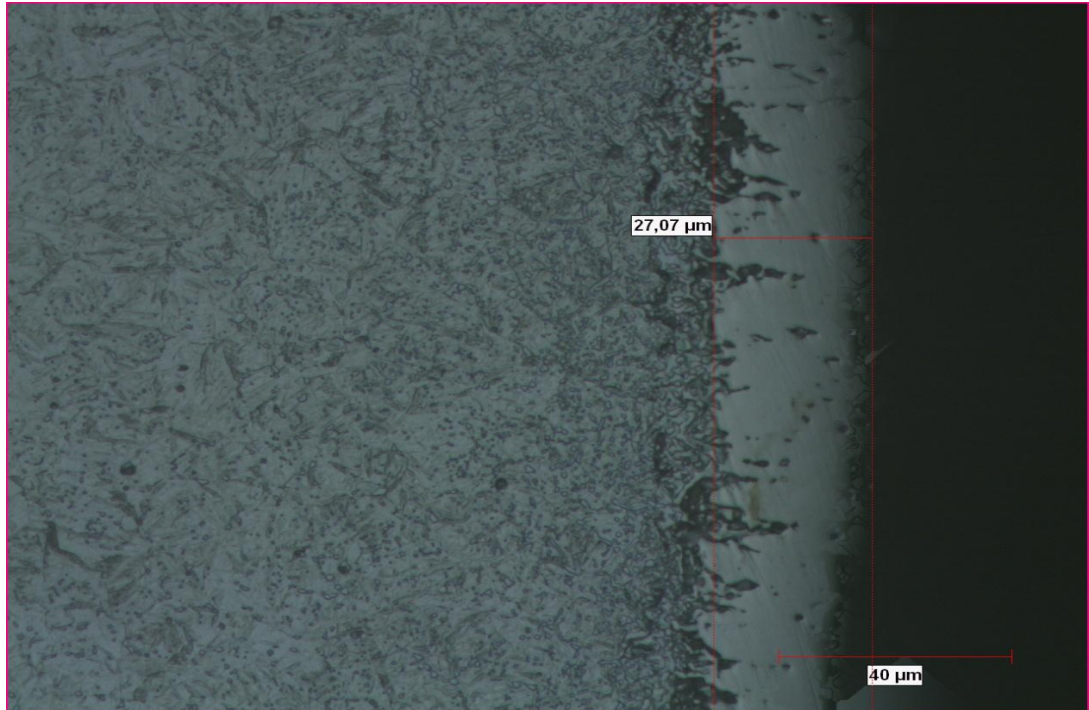


Şekil 8.24: 925°C de 2-4-6 saat borlanan malzemelerin tabaka kalınlığı grafiği

1000°C'de 2 saat süresince borlanan malzemelerin optik mikroyapı görüntüleri Şekil 8.25, Şekil 8.26, Şekil 8.27'de verilmiştir.



Şekil 8.25: 1000°C de 2 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü



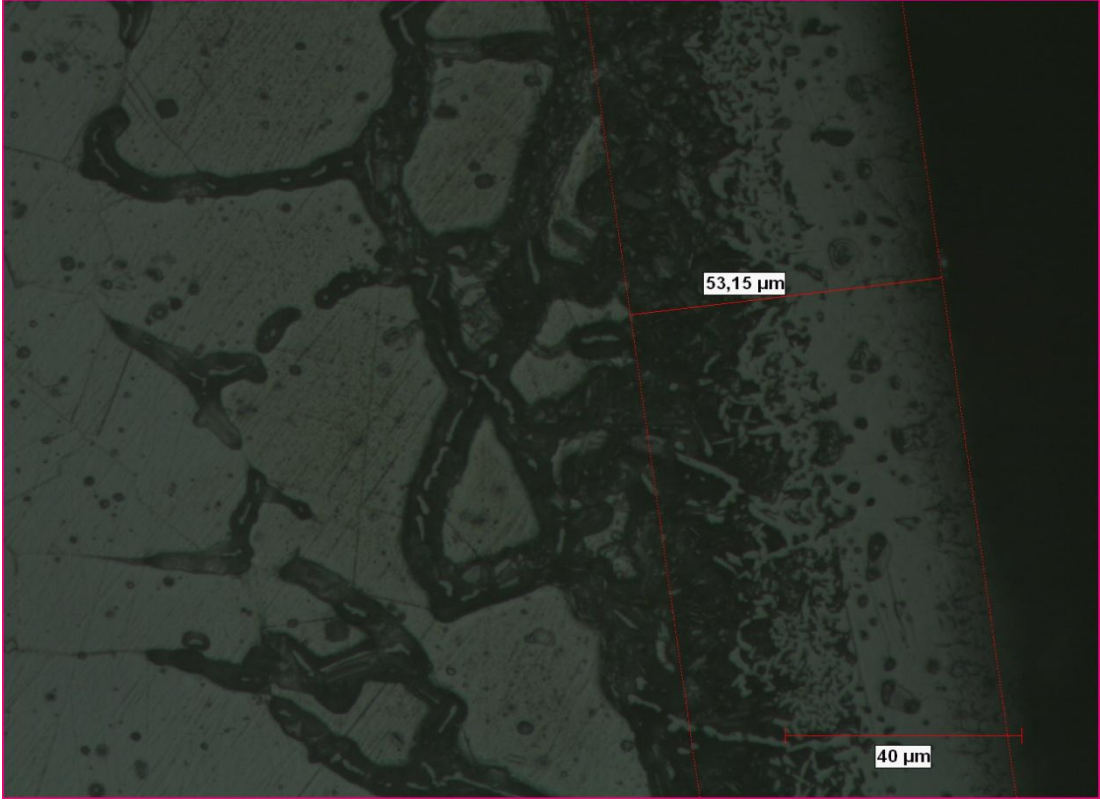
Şekil 8.26: 1000°C de 2 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü



Şekil 8.27: 1000°C de 2 saat borlanan AISI 430 malzemesinin mikroyapı görüntüsü

1000°C’de 2 saat borlanan malzemelerin optik mikroyapıları ve tabaka kalınlığı sonuçları incelendiğinde farklı kalınlıklarda borür tabakası oluşumu tespit edilmiştir. Bor tabakalarının yapıları incelendiğinde kompakt bir yapı gözlemlenmiştir. 1000°C’de 2 saat süresince yapılan borlama işleminde en fazla tabaka kalınlığı 35.42μm ile AISI 304 malzemesinde, diğer parametreler için yapılan ölçümlerden farklı olarak en az tabaka kalınlığı ise 20.73μm ile AISI 430 malzemesinde elde edilmiştir.

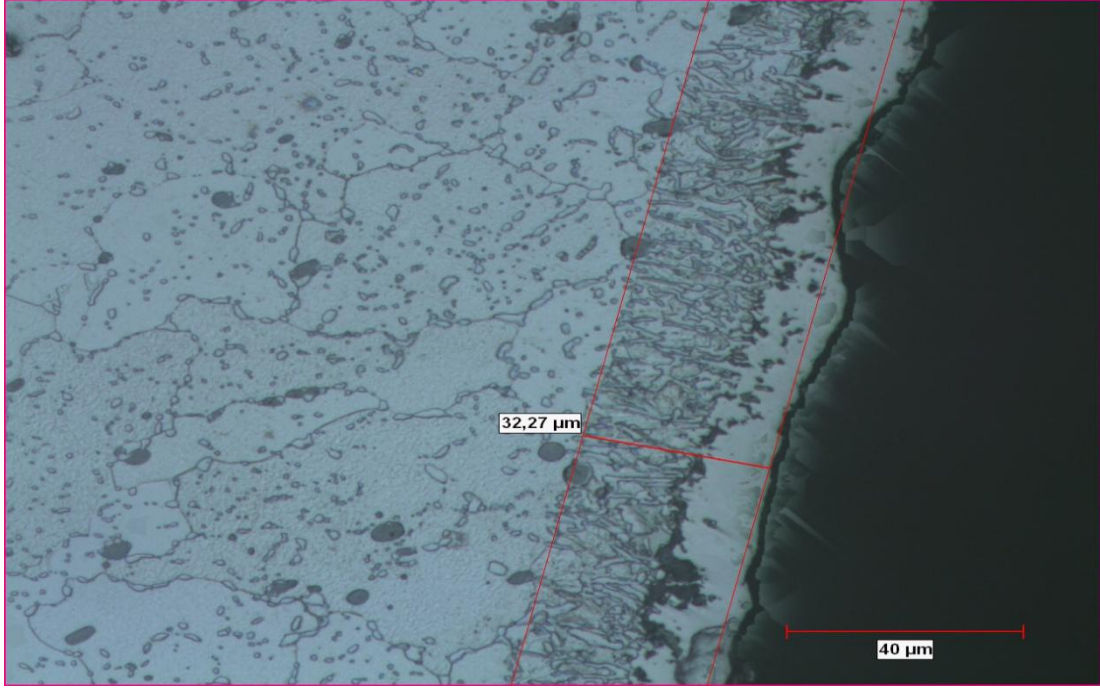
1000 °C’de 4 saat süresince borlanan malzemelerin optik mikroyapı görüntüleri Şekil 8.28, Şekil 8.29, Şekil 8.30’da verilmiştir



Şekil 8.28: 1000°C de 4 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü



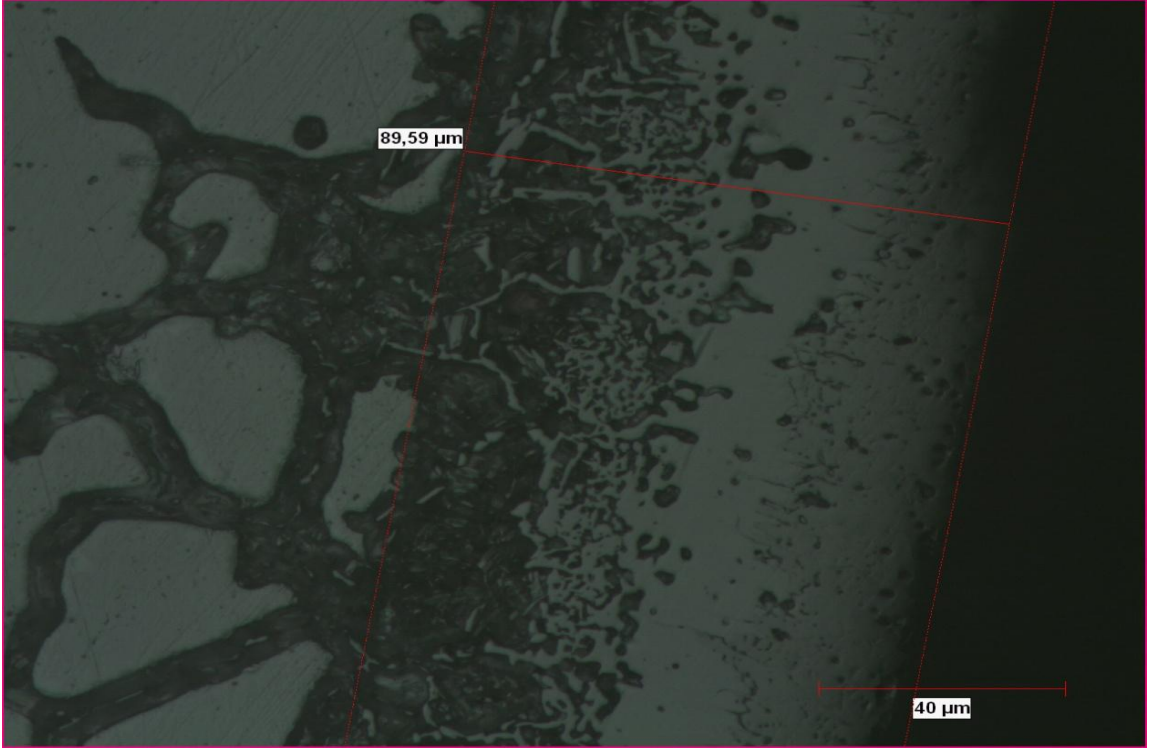
Şekil 8.29: 1000°C de 4 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü



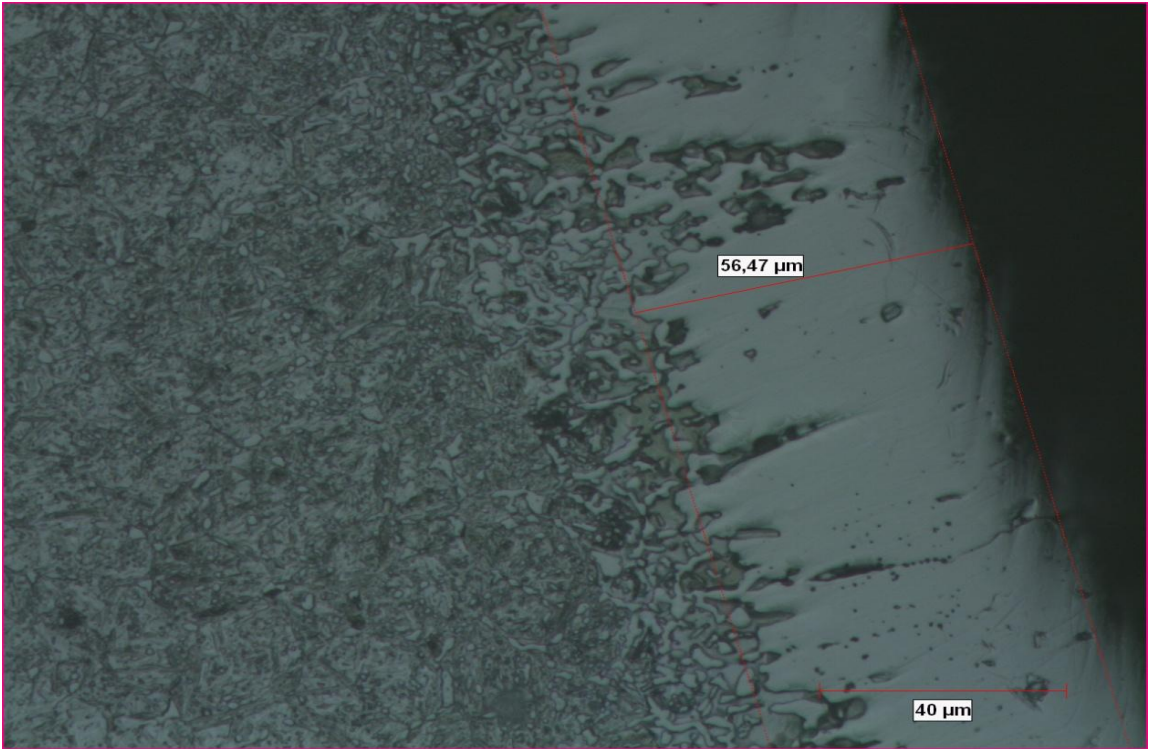
Şekil 8.30: 1000°C de 4 saat borlanan AISI 430 malzemesinin mikroyapı görüntüsü

1000°C’de 4 saat borlanan malzemelerin optik mikroyapıları ve tabaka kalınlığı sonuçları incelendiğinde farklı kalınlıklarda borür tabakası oluşumu tespit edilmiştir. Bor tabakalarının yapıları incelendiğinde kompakt bir yapı gözlemlenmiştir. 1000°C de 4 saat süresince yapılan borlama işleminde en fazla tabaka kalınlığı 53.15μm ile AISI 304 malzemesinde, en az tabaka kalınlığı ise 32.27μm ile AISI 430 malzemesinde elde edilmiştir.

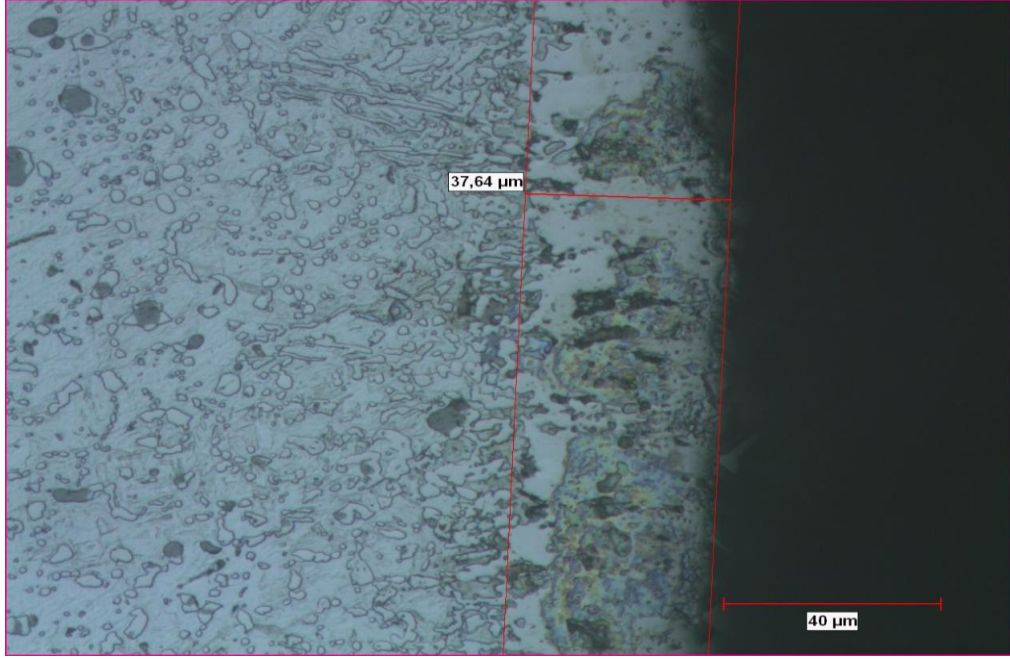
1000 °C’de 6 saat süresince borlanan malzemelerin optik mikroyapı görüntüleri Şekil 8.31, Şekil 8.32, Şekil 8.33’de verilmiştir.



Şekil 8.31: 1000°C de 6 saat borlanan AISI 304 malzemesinin mikroyapı görüntüsü

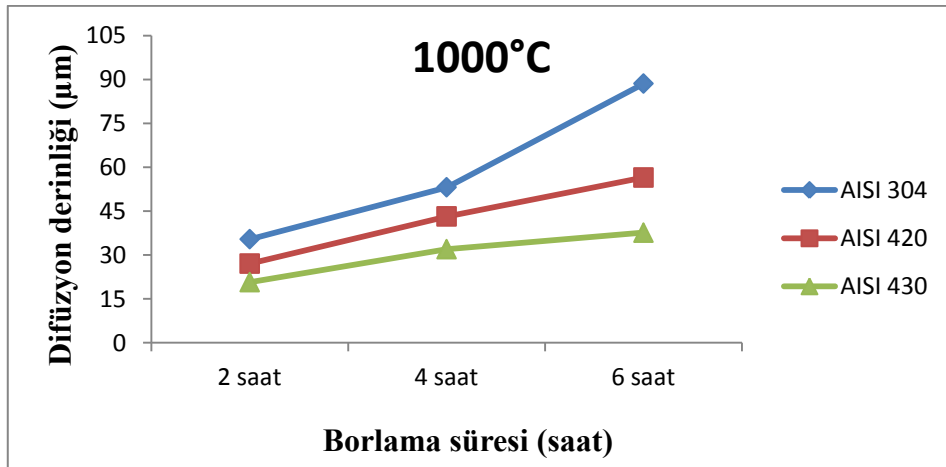


Şekil 8.32: 1000°C de 6 saat borlanan AISI 420 malzemesinin mikroyapı görüntüsü

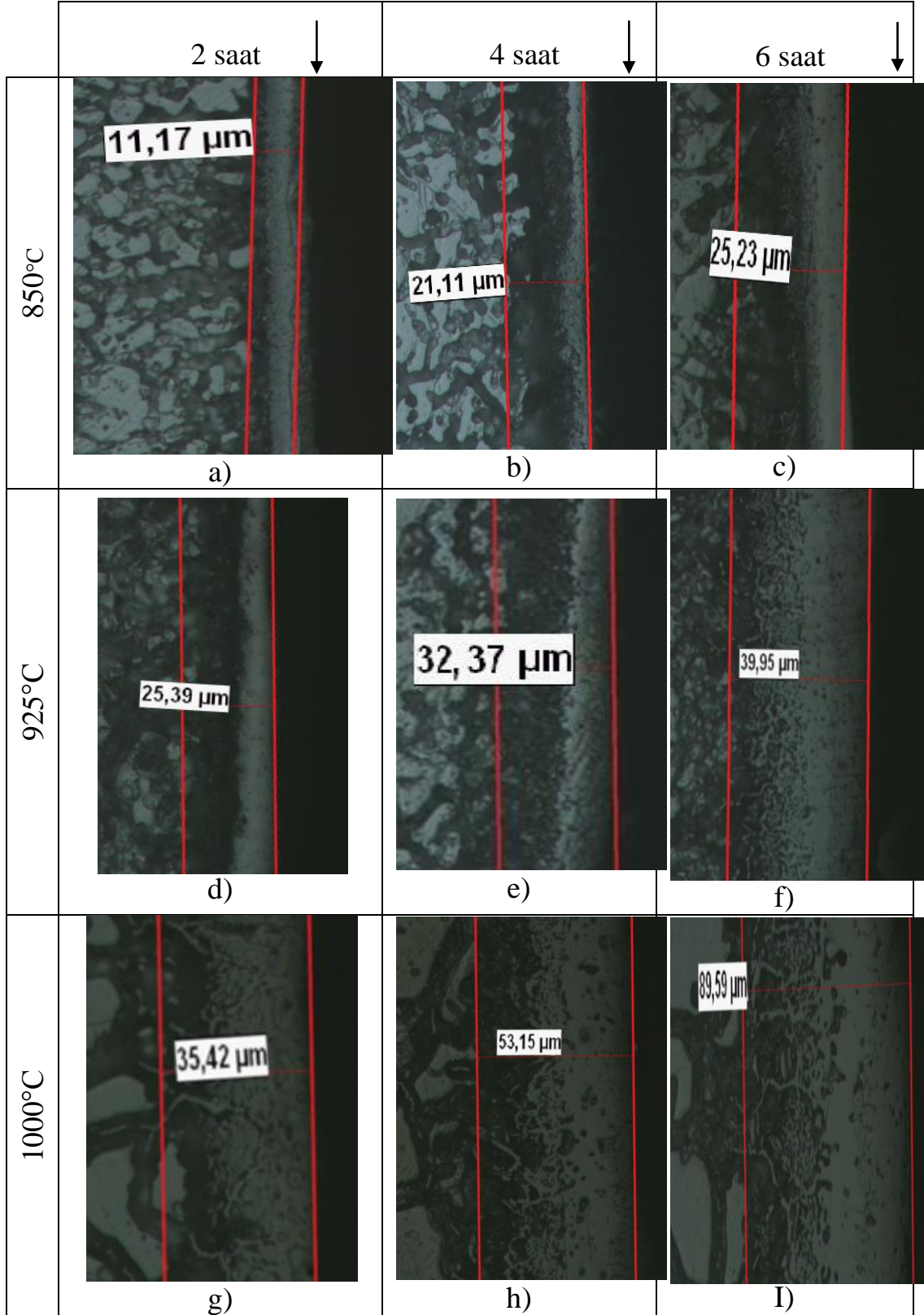


Şekil 8.33: 1000°C de 6 saat borlanan AISI 430 malzemesinin mikroyapı görüntüsü

1000°C’de 6 saat borlanan malzemelerin optik mikroyapıları ve tabaka kalınlığı sonuçları incelendiğinde farklı kalınlıklarda borür tabakası oluşumu tespit edilmiştir. Bor tabakalarının yapıları incelendiğinde kompakt bir yapı gözlemlenmiştir. 1000°C’de 6 saat süresince yapılan borlama işleminde en fazla tabaka kalınlığı 89.59µm ile AISI 304 malzemesinde, en az tabaka kalınlığı ise 37.64µm ile AISI 430 malzemesinde elde edilmiştir.

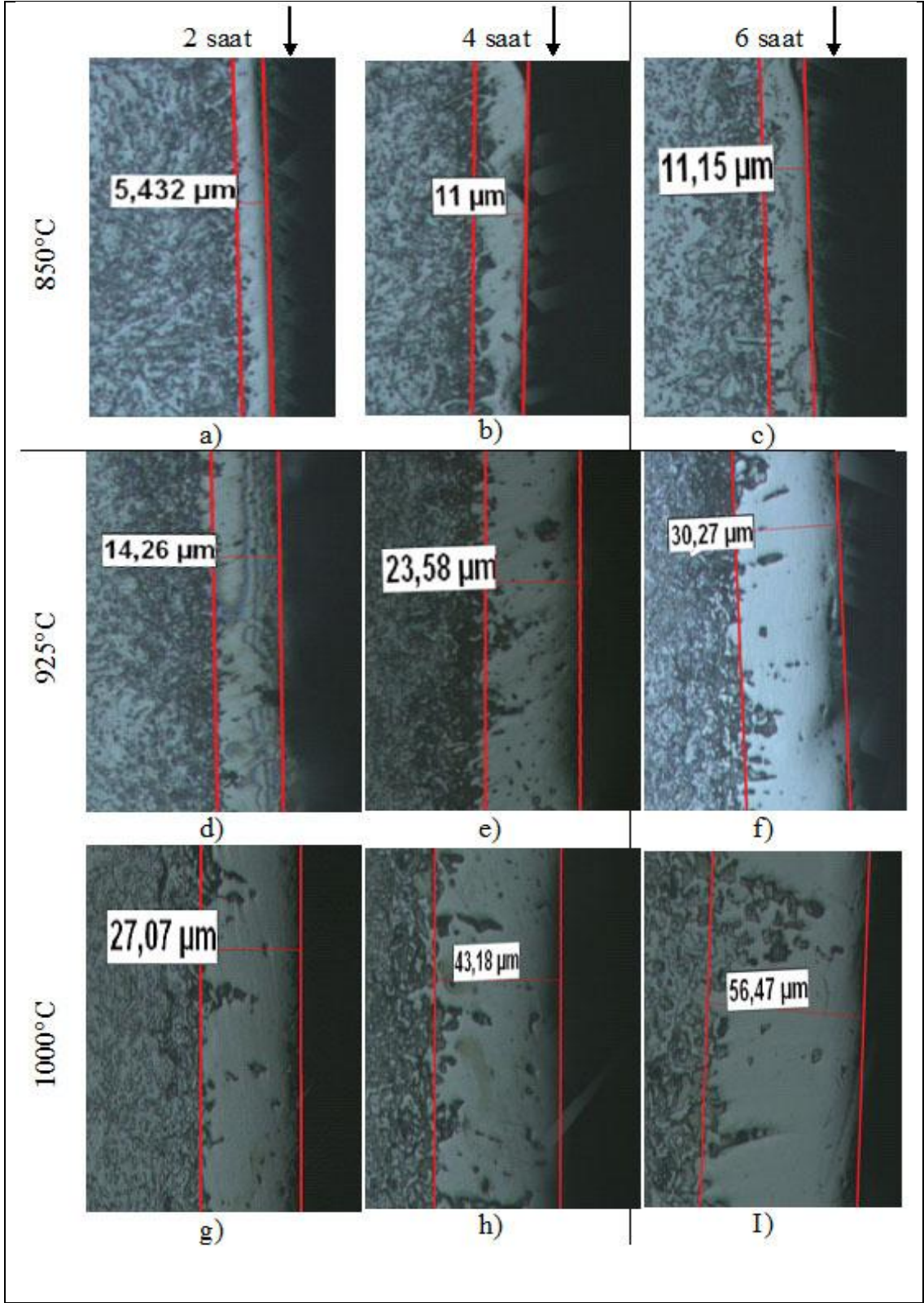


Şekil 8.34: 1000°C de 2-4-6 saat borlanan malzemelerin tabaka kalınlığı grafiği

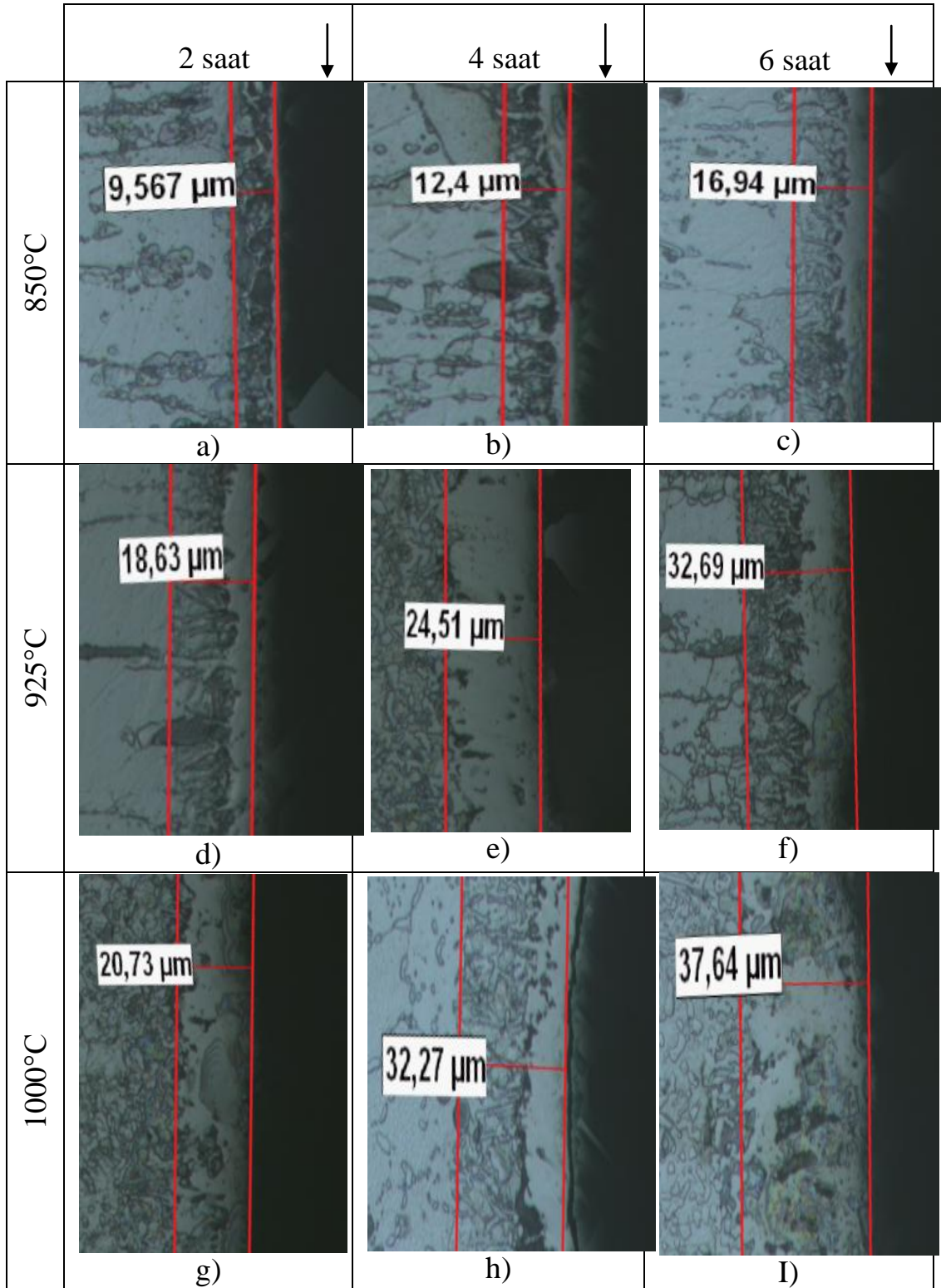


Şekil 8.35: AISI 304 paslanmaz çelik numunelerin mikroyapı görüntüleri (500X)

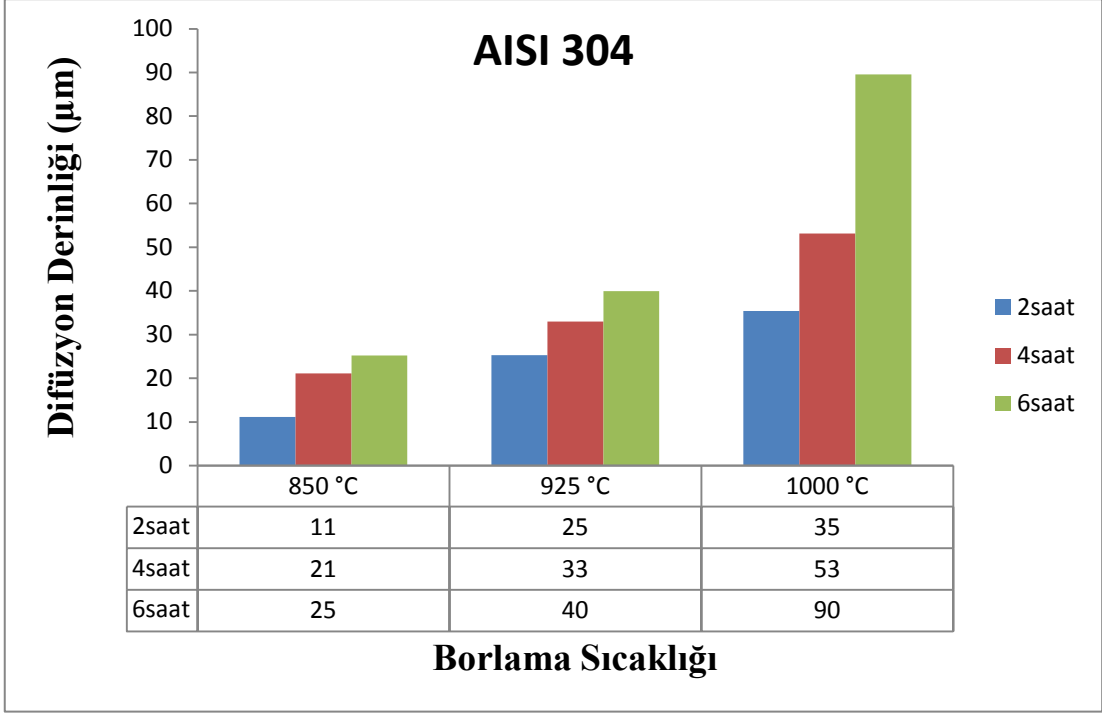
a)850°C - 2 saat, b) 850°C - 4 saat, c) 850°C - 6 saat, d)925°C - 2 saat, e) 925°C - 4 saat, f) 925°C - 6 saat, g)1000°C - 2 saat, h) 1000°C - 4 saat, i) 1000°C - 6 saat,



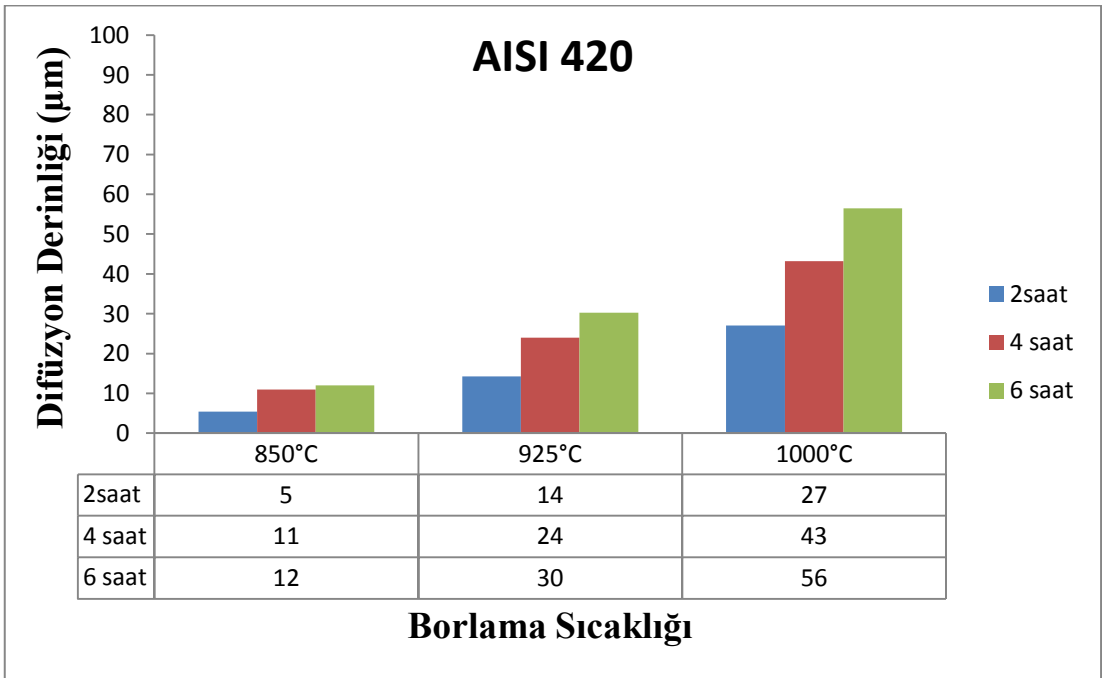
Şekil 8.36: AISI 420 paslanmaz çelik numunelerin mikroyapı görüntüleri (500X)
a)850°C'de 2 saat, b) 850°C'de 4 saat, c) 850°C'de 6 saat, d)925°C'de 2 saat,
e)925°C'de 4 saat, f) 925°C'de 6 saat, g)1000°C'de 2 saat, h) 1000°C'de 4 saat, I)
1000°C'de 6 saat



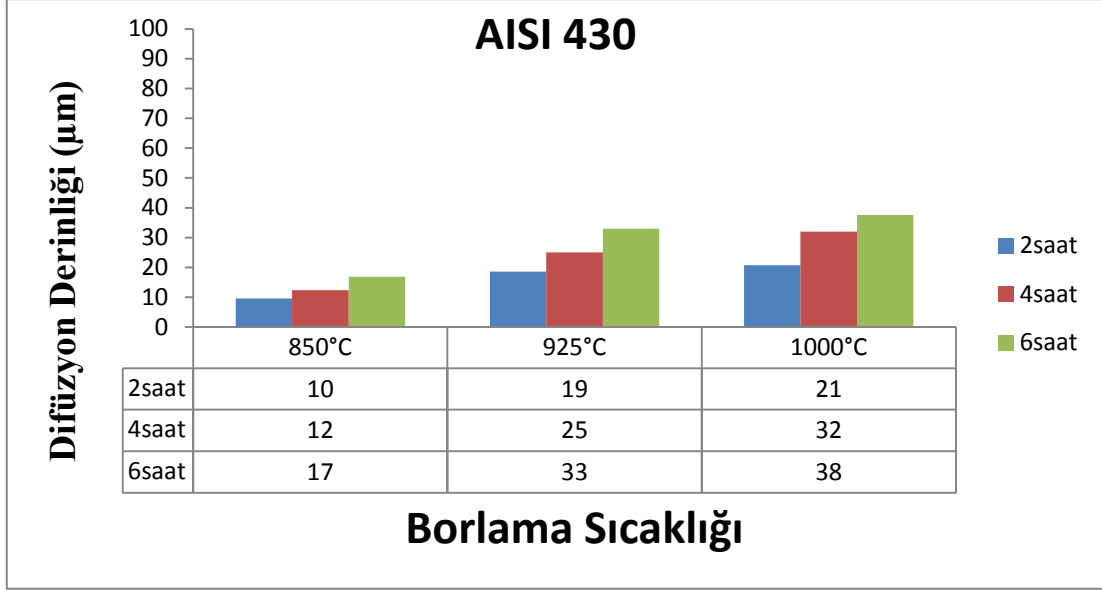
Şekil 8.37: AISI 430 paslanmaz çelik numunelerin mikroyapı görüntüleri (500X) a) 850°C - 2 saat, b) 850°C - 4 saat, c) 850°C - 6 saat, d) 925°C - 2 saat, e) 925°C'de 4 saat, f) 925°C'de 6 saat, g) 1000°C'de 2 saat, h) 1000°C'de 4 saat, I) 1000°C'de 6 saat,



Şekil 8.38: AISI 304 malzemesinin borlama sıcaklığı ve difüzyon derinliği grafiği



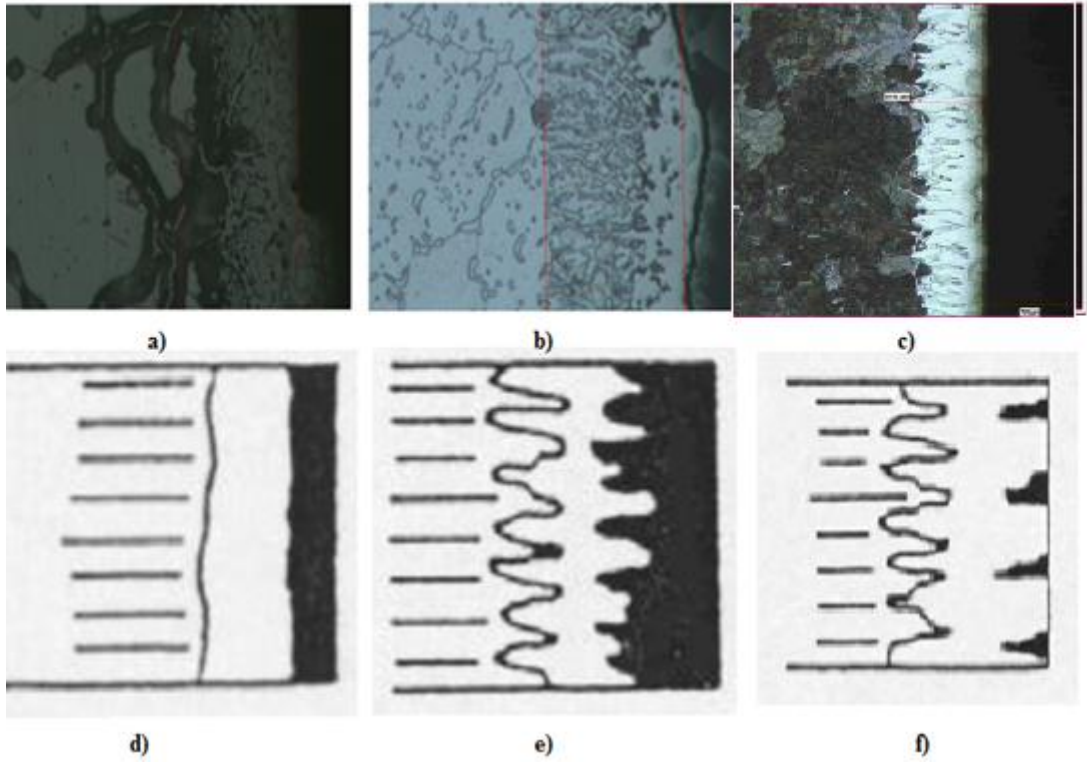
Şekil 8.39: AISI 420 malzemesinin borlama sıcaklığı ve difüzyon derinliği grafiği



Şekil 8.40: AISI 430 malzemesinin borlama sıcaklığı ve difüzyon derinliği grafiği

8.1.1 Borür Tabakasının İrdelenmesi

Borlama işlemi uyguladığımız malzemelerden AISI 304 ve AISI 420 malzemeleri, AISI 430 malzemesine kıyasla alaşım elementlerinin fazla olmasından dolayı bor tabakası morfolojisi **düz ve kompakt** oluşmuşken, AISI 430 malzemesinde çoğunlukla düz kısmen de olsa dişli bir yapı gözlemlenmiştir. Paslanmaz çelikleri borladığımız çalışmamızda, alaşımın bir sonucu olarak elde ettiğimiz düz ve kompakt yapının aksine Özer ve Ay alaşım elementlerinin sınırlı olduğu AISI 1020 çeliğini borlamış ve testere dişli borür yapısını elde etmişlerdir [5].

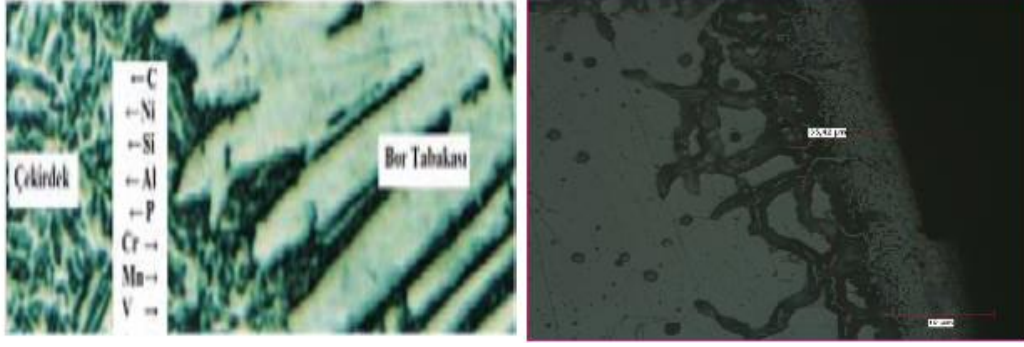


Şekil 8.41: Borladığımız numunelerin literatürde ki görsel tipleriyle karşılaştırılması

a) AISI 304 b) AISI 430 c) AISI 1020 [5] d) L tipi düz e) B tipi dişli f) D tipi

Çalışmada kullanılan malzemelerin bor tabakası morfoloji (dış görünüm) yapıları incelendiğinde; bor tabakası yapısı matris farklılığı açık şekilde ayırt edilebilmektedir. Özer ve Ay çalışmasında [5], düşük karbonlu çelikleri borlamış, borlama sonucu oluşan borür tabakasında karbon çözünemediği için metalin yapısında bulunan karbon, bor difüzyonu sırasında yüzeyden iç kısımlara itilmesi sonucu karbonca zengin testere dişli görünüme sahip geçiş bölgesi oluştuğunu gözlemlemiştir [30]. Çalışmamızda, paslanmaz çeliklerin borlanması ise bor tabakasının düzlemsel ve kompakt bir yapı sergilediği görülmüştür.

Çalışmamızda kullanılan AISI 304, AISI 420 ve AISI 430 malzemelerinin bor tabakası görüntüleri, **düz, ince ve kompakt** yapıdadır. Bunun nedeni olarak; malzemelerin bünyesinde bulunan Cr, Ni gibi yüksek miktardaki alaşım elementlerinin bor difüzyonunu zorlaştırmasının sonucu olduğu düşünülmektedir [15].



Şekil 8.42: Elementlerin borlamaya etkisi

a) Literatür b) Çalışmamızda kullandığımız AISI 304

Literatürde [26, 69] borürlerin oluşumu, büyük ölçüde bileşik yaptığı atomlar arasındaki atomik boyut faktörüne ve elektrokimyasal etkiye bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir. 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 girecek olan atomların elektron verme kabiliyetlerine bağlıdır. Çeşitli borür yapılarının oluşumu, s^2p , sp , sp^2 ve sp^3 elektron konfigürasyonlarının kombinasyonlarındaki değişimle açıklanabilmektedir.

Çalışmamızda borür tabakası oluşum prosesinde; **Cr**' un atom numarası (24) demir'in atom numarasından (26)'dan düşük olduğu için matris malzeme (Fe) yerine borür $(Fe,Cr)B$ veya $(Fe,Cr)_2B$ tabakasında daha fazla çözünür ve malzeme yüzeyine doğru yayılır. Bor elektron konfigürasyonu ($2s^2 2p^1$) ile bitmektedir. Krom ise ($3d^5 4s^1$) ile bitmektedir. Krom ve bor elektron ortaklaşması yaparak kovalent bağ yapmak isteyeceklerdir. Bunun sonucu da krom ve bor'un birbirlerine karşı afinitesi söz konusu olduğundan. krom bor yüzeyine doğru yayılır. **Nikel (Ni)** elementinin atom numarası (28), demir elementinin atom numarasından (26) büyük olduğu için nikel tercihli olarak borür tabakası altına doğru yayılır, çünkü nikel elektron konfigürasyonunun ($3d^8 4s^2$) şeklinde olmasından dolayı Cr'un aksine Ni daha az ortak elektron kullanımı neticesinde bor katmanının altına doğru yayılacak ve varsa Ni_xB_y şeklinde faz meydana gelecektir (Şekil 8.42'de gösterildiği gibi). Bor tabakası morfolojisinin düzlemsel hale gelmesinin nedeni olarak; alaşım elementinin (Cr),

borür tabakasında bulunan demir atomlarının yerini alması sebebiyle difüzyonun engellenmesin sonucu olduğu ileri sürülmüştür [26, 66, 69].

8.2 Aktivasyon Enerjisi Hesabı

Aktivasyon enerjisi, Bor tabakasının oluşması için gerekli olan enerjidir. Aktivasyon enerjisi oluşacak borür tabakası kalınlığına, borlama işleminin yapıldığı sıcaklığa ve işlem süresine bağlı olarak değişmektedir.

Aşağıdaki çizilen diyagramlara bakarak yapılan hesaplamalar sonucunda aktivasyon enerjileri; AISI 304 için **182.359 kJ/mol**, AISI 420 için **242.153 kJ/mol**, AISI 430 için **190.856 kJ/mol** bulunmuştur. Bulunan değerler literatürde ki çalışmalar ile örtüşmektedir. Bu aktivasyon enerjisini AISI 420 Çeliği için yorumlamak istersek, AISI 420 Çeliği için bor tabakası oluşturmak, çalışmada kullanılan diğer malzemelere kıyasla daha zor olacağı söylenebilir. Sebebi ise, diğer numunelere göre bünyesinde bor tabakası oluşumunu zorlaştıran karbon elementinin yüksek seviyede bulunmasıdır [26, 63, 65, 66].

Borlanan numunelerin aktivasyon enerjilerini bulabilmek için Arrhenius bağıntısı Denklem 8.2' den yararlanılmıştır. İlk önce x^2-t grafiğinin eğimi hesaplanarak difüzyon katsayısı (D) bulunmuştur. Daha sonra bulduğumuz değer (ln)'ni hesapladıktan sonra. $1/T$ değerlerini buluyoruz. Daha sonra $(\ln D - 1/T)$ grafiği çizilir bu grafiğin eğimi $(-Q/R)$ 'yi verir. Bulunan değer, R gaz sabitiyle çarpılarak aktivasyon enerjisi hesaplanmış olur. Tablo 8.1' de hesaplama örneği gösterilmiştir.

$$x^2=D.t \quad (8.1)$$

x: Tabaka kalınlığı (cm), D: Difüzyon katsayısı (cm^2/sn), t: Süre (sn)

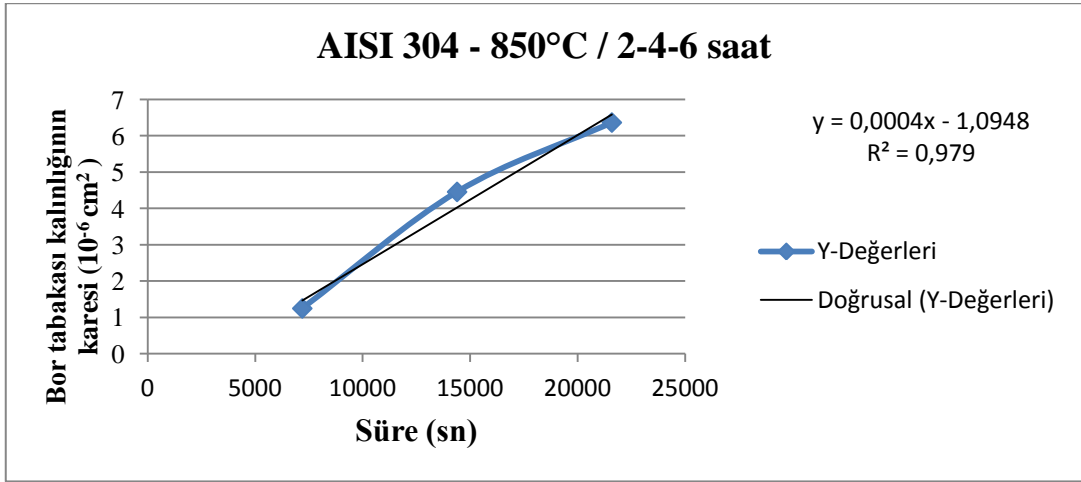
$$D=A.e^{(-Q/RT)} \quad (8.2)$$

D: Difüzyon katsayısı (cm^2/sn), A: Sabit (frekans faktörü),

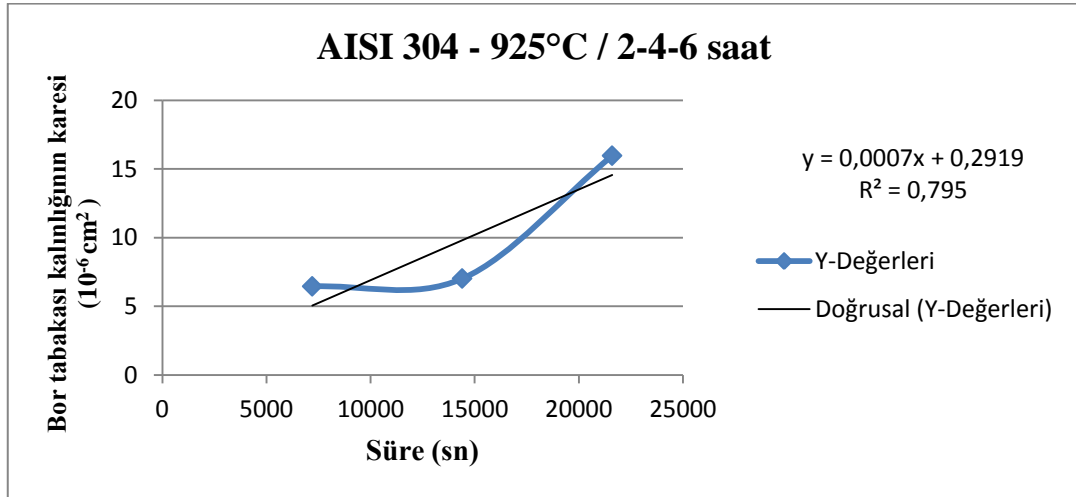
Q: Aktivasyon enerjisi (kJ/mol), R: Gaz sabiti ($8.3144 \text{ j/mol} \cdot \text{°K}$), T: Sıcaklık (°K)

Tablo 8.1: 850°C’de 2 saat borlanan AISI 304 için aktivasyon enerjisi hesaplama örneği

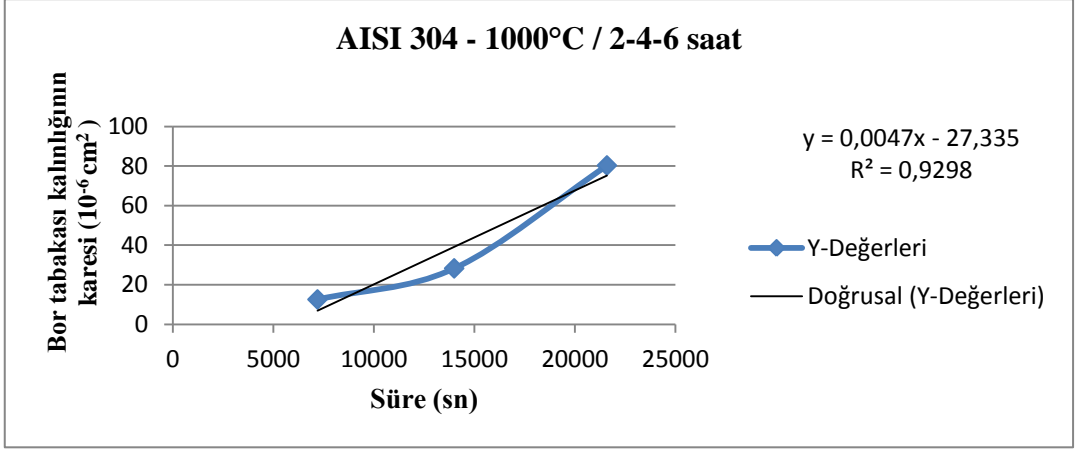
AISI 304 850°C 2 saat	x (mikron)	x(cm)	x ²	D	1/T	lnD
	11.170	$(11.170) \times 10^{-4}$	1.117×10^{-6}	4×10^{-10}	0.89×10^{-3}	-21.63
$Q = (\text{eğim}) \times (R) = 182.359 \text{ kJ/mol}$						



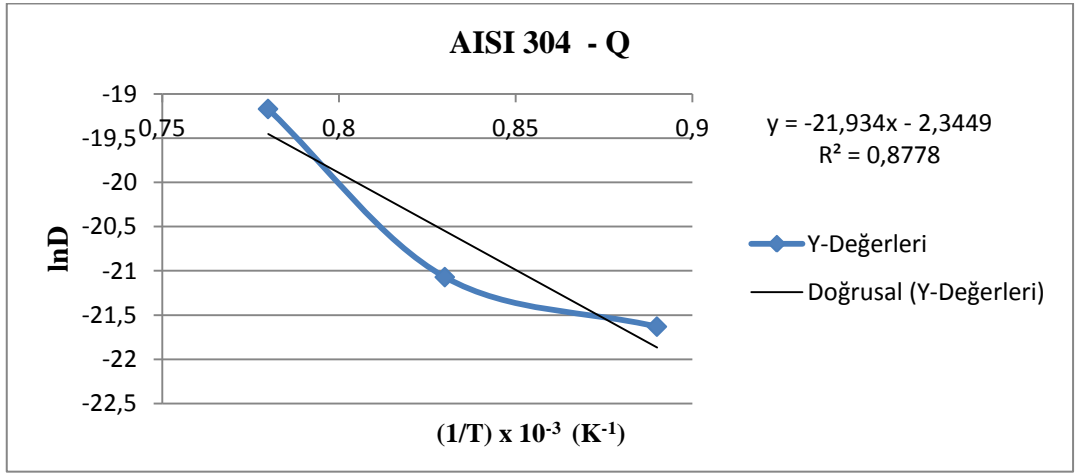
Şekil 8.43: AISI 304 için 850°C’de x^2 -t grafiği



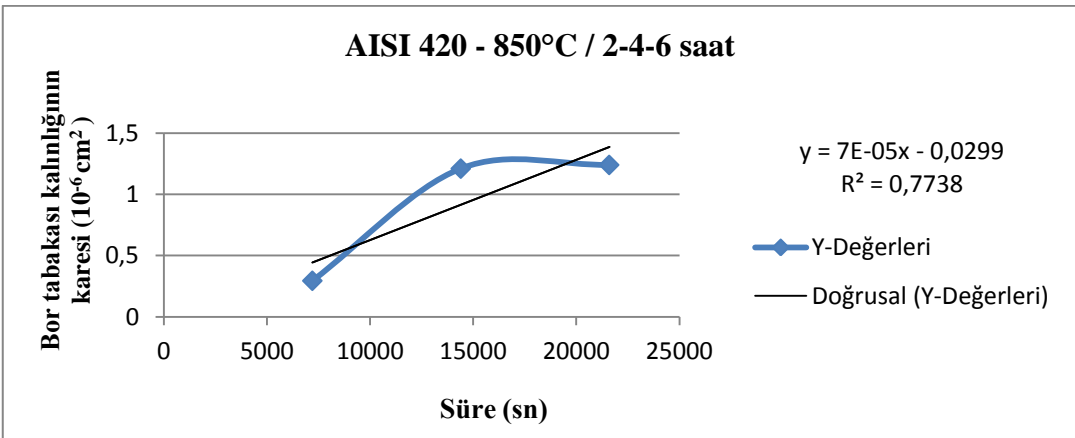
Şekil 8.44: AISI 304 için 925°C’de x^2 -t grafiği



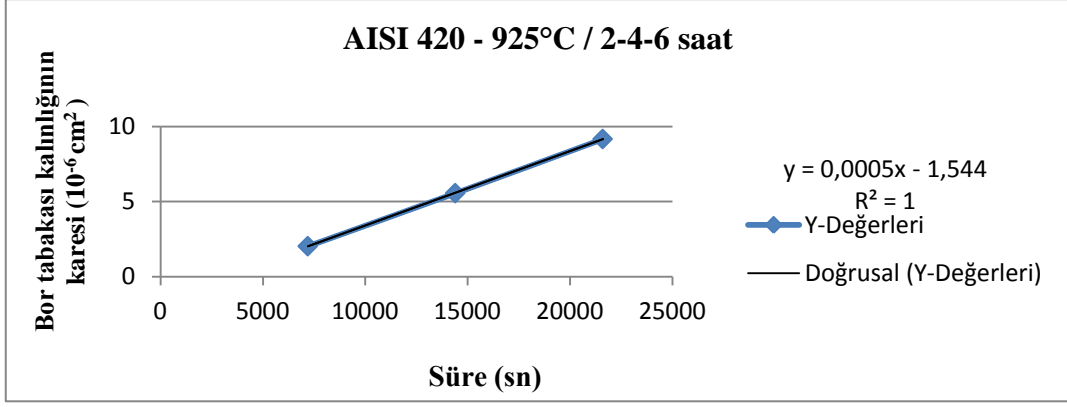
Şekil 8.45: AISI 304 için 1000°C'de x^2 -t grafiği



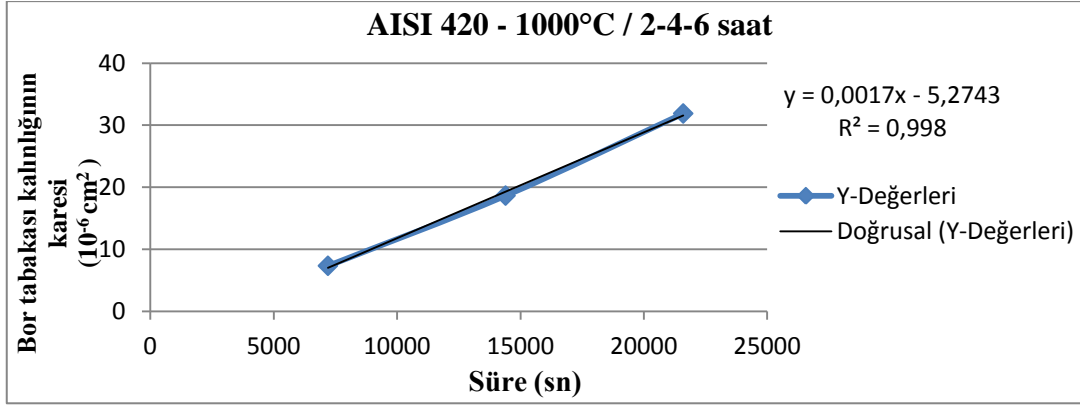
Şekil 8.46: AISI 304 için lnD - 1/T grafiği



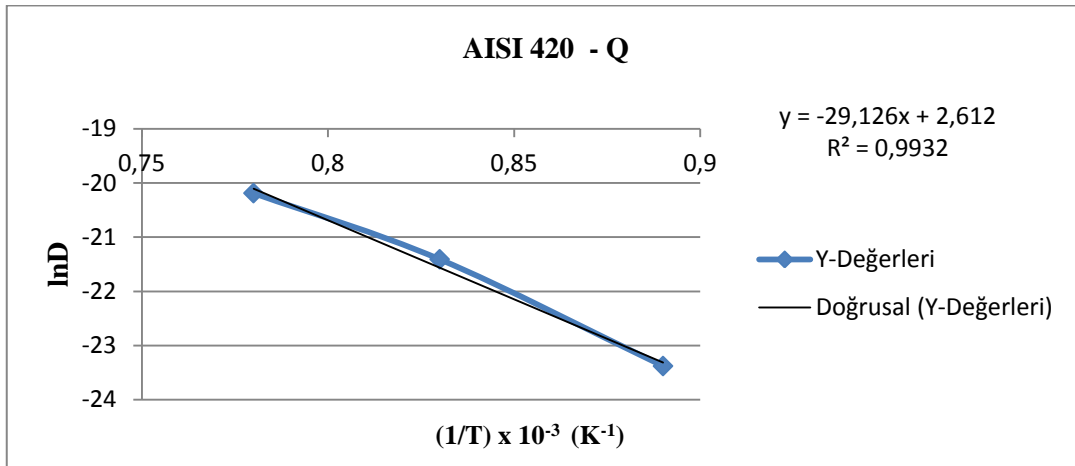
Şekil 8.47: AISI 420 için 850°C'de x^2 -t grafiği



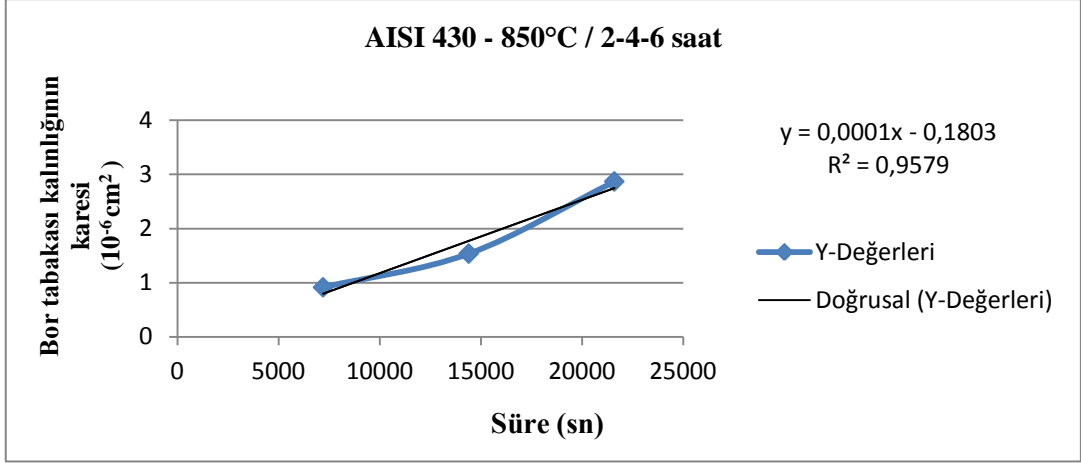
Şekil 8.48: AISI 420 için 925°C’de x^2 -t grafiği



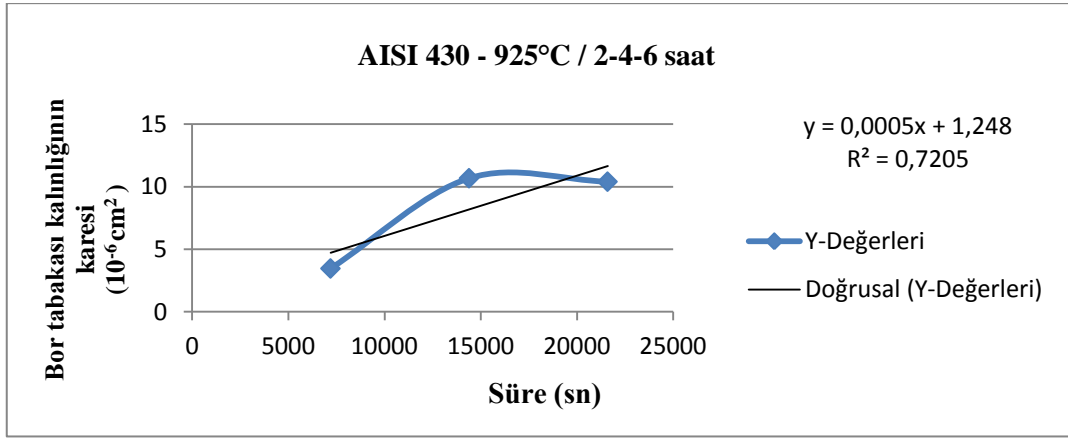
Şekil 8.49: AISI 420 için 1000°C’de x^2 -t grafiği



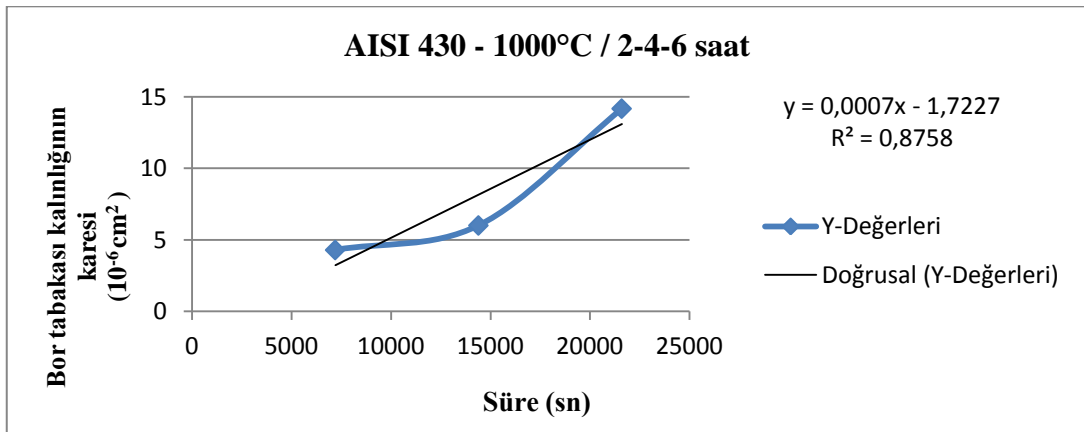
Şekil 8.50: AISI 420 için lnD - 1/T grafiği



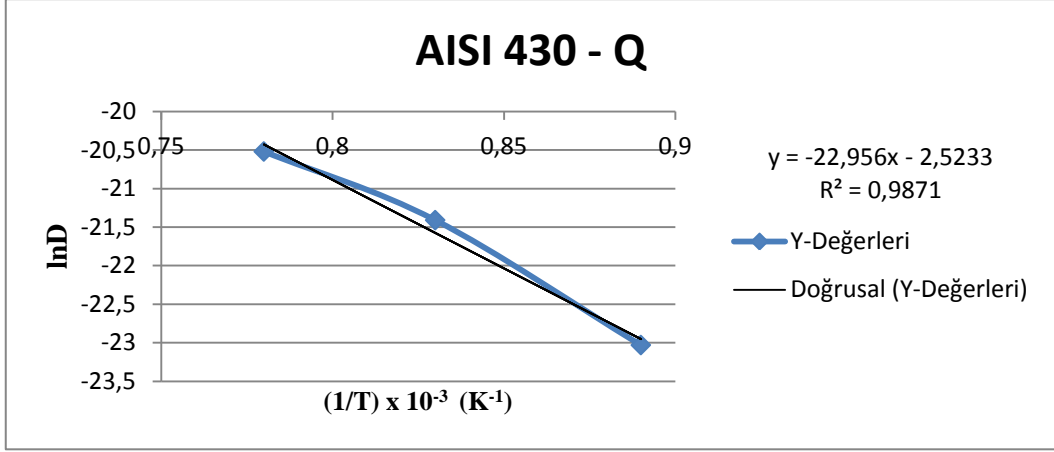
Şekil 8.51: AISI 430 için 850°C’de x^2 -t grafiği



Şekil 8.52: AISI 430 için 925°C’de x^2 -t grafiği



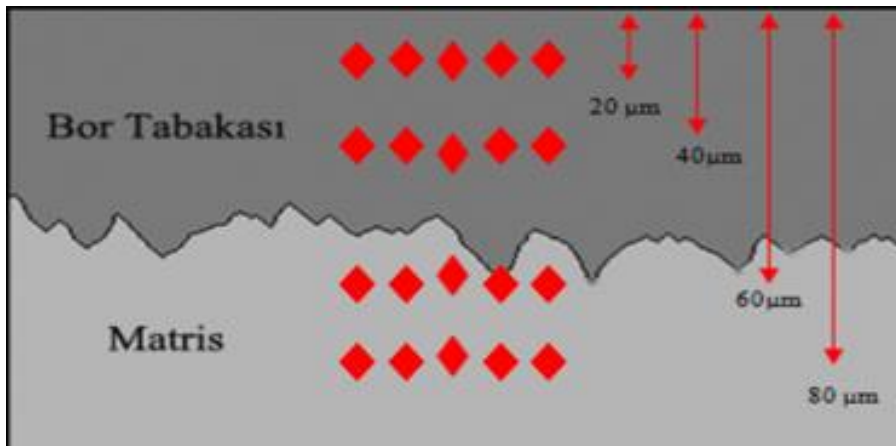
Şekil 8.53: AISI 430 için 1000°C’de x^2 -t grafiği



Şekil 8.54: AISI 430 için lnD - 1/T grafiği

8.3 Mikro Sertlik İnceleme Sonuçları

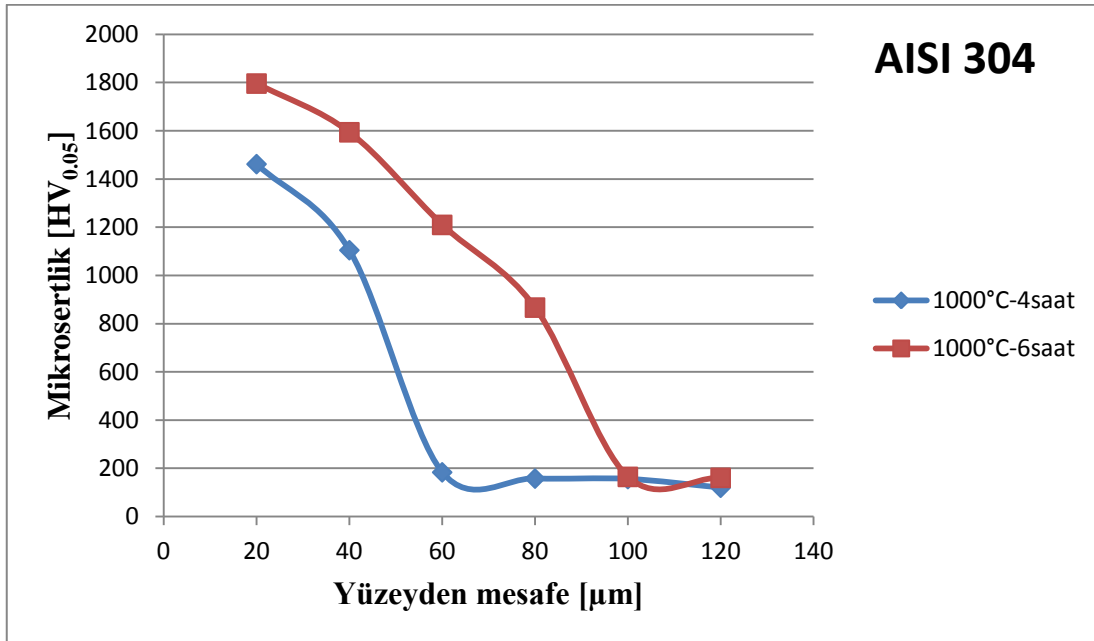
Mikro sertlik ölçüm işlemi her bir numune için yüzeyden başlanarak belirli aralıklarla matrise doğru sırasıyla alınmıştır. Sertlik ölçüm işlemi Vickers uç kullanarak 50 gram yük ve 10 saniye süre ile yüzeyden itibaren belirli aralıklarla her bir sertlik mesafesi için 5 adet ölçüm alınıp bu değerlerin ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir. $HV_{0,01}$ ölçümü gerçekleştirilmemesinin nedeni uygulanması gereken 10 gram yükün bor tabakası üzerinde yeterli iz oluşturamaması sonucu 50 gram yük kullanılarak $HV_{0,05}$ sonuçları elde edilmiştir. Ölçümler her bir paslanmaz çelik numunenin $1000^{\circ}C$ 'de 4 ve 6 saat borlanan numunelerine uygulanmıştır. Bunun nedeni maksimum bor tabaka kalınlıklarının bu numunelerde bulunmasıdır.



Şekil 8.55: Mikro sertlik ölçüm örneği

Tablo 8.2: 1000°C- 4 ve 6 saat borlanan AISI 304 numunelerin sertlik değerleri

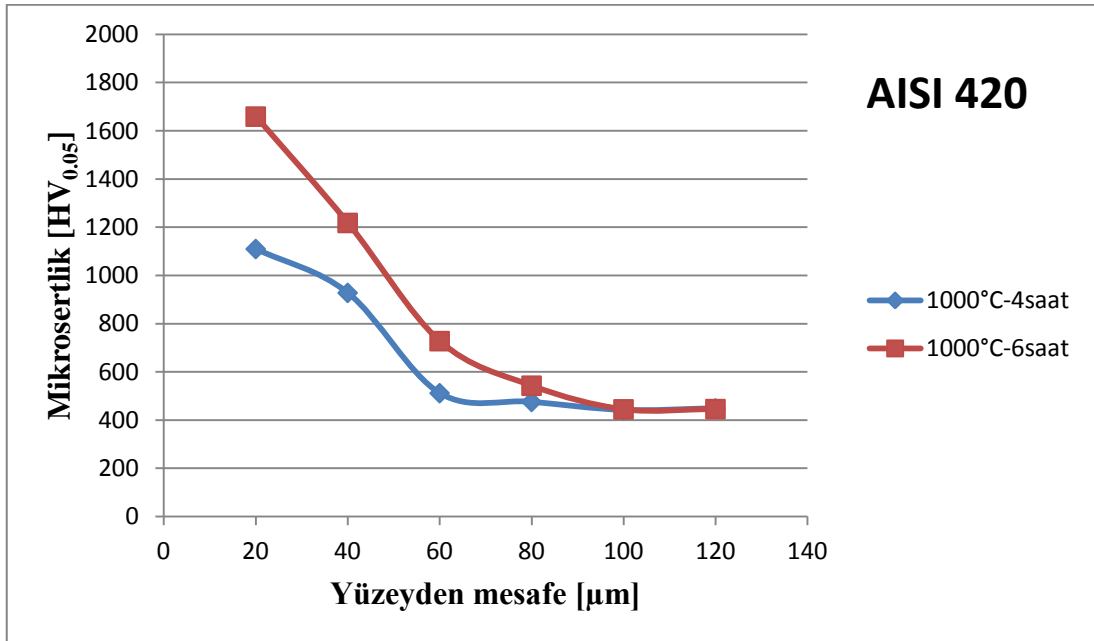
AISI 304			
1000°C – 4 Saat		1000°C – 6 Saat	
Yüzeyden İtibaren Mesafe [μm]	Sertlik [$\text{HV}_{0.05}$]	Yüzeyden İtibaren Mesafe [μm]	Sertlik [$\text{HV}_{0.05}$]
20 μm	1462	20 μm	1736
40 μm	1105	40 μm	1594
60 μm	184	60 μm	1210
80 μm	158	80 μm	867
100 μm	154	100 μm	165
120 μm	166	120 μm	161



Şekil 8.56: 1000°C- 4 ve 6 saat borlanan AISI 304 numunelerin sertlik grafiği

Tablo 8.3: 1000°C- 4 ve 6 saat borlanan AISI 420 numunelerin sertlik değerleri

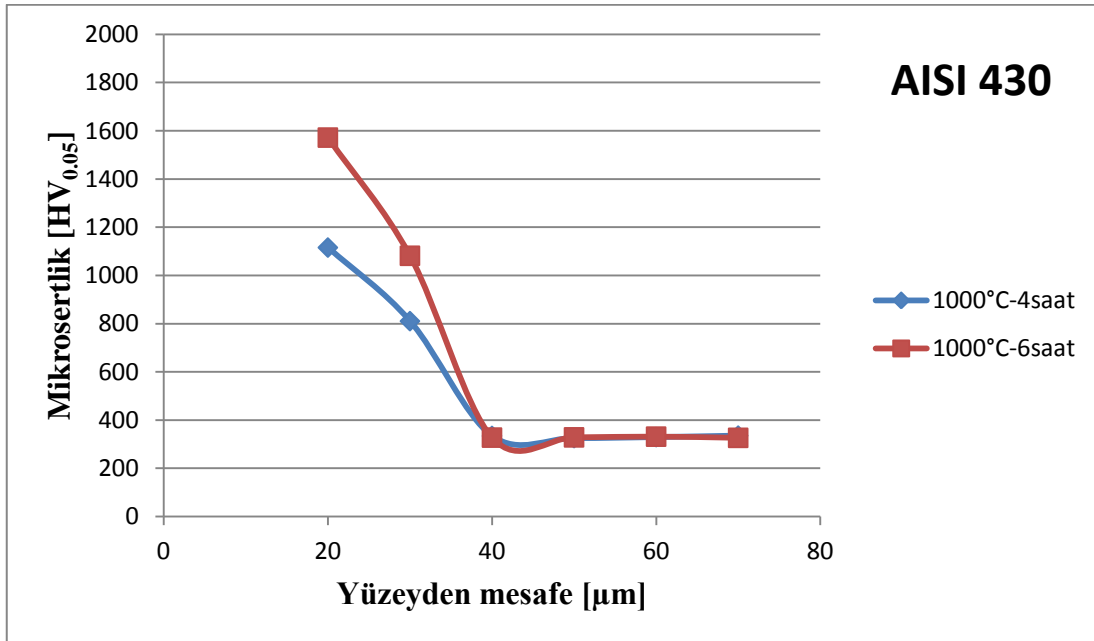
AISI 420			
1000°C – 4 Saat		1000°C – 6 Saat	
Yüzeyden İtibaren Mesafe [μm]	Sertlik [$\text{HV}_{0.05}$]	Yüzeyden İtibaren Mesafe [μm]	Sertlik [$\text{HV}_{0.05}$]
20 μm	1110	20 μm	1659
40 μm	928	40 μm	1218
60 μm	512	60 μm	728
80 μm	476	80 μm	543
100 μm	442	100 μm	445
120 μm	446	120 μm	449



Şekil 8.57: 1000°C- 4 ve 6 saat borlanan AISI 420 numunelerin sertlik grafiği

Tablo 8.4: 1000°C- 4 ve 6 saat borlanan AISI 430 numunelerin sertlik değerleri

AISI 430			
1000°C – 4 Saat		1000°C – 6 Saat	
Yüzeyden İtibaren Mesafe [μm]	Sertlik [$\text{HV}_{0.05}$]	Yüzeyden İtibaren Mesafe [μm]	Sertlik [$\text{HV}_{0.05}$]
20 μm	1116	20 μm	1572
30 μm	811	30 μm	1082
40 μm	335	40 μm	328
50 μm	326	50 μm	402
60 μm	330	60 μm	332
70 μm	336	70 μm	327



Şekil 8.58: 1000°C- 4 ve 6 saat borlanan AISI 430 numunelerin sertlik grafiği

Mikro sertlik ölçümleri neticesinde en fazla sertlik değeri AISI 304 malzemesi için 1000°C-6saat borlanan numunesinden **1736** HV_{0.05} sertlik, AISI 420 malzemesi için 1000°C-6saat borlanan numunesinden **1659** HV_{0.05} sertlik, AISI 430 malzemesi için 1000°C-6saat borlanan numunesinden **1572** HV_{0.05} sertlik değerleri ile elde edilmiştir.

Bor tabakası kalınlığı ölçümünde, tabaka kalınlığının ölçümleri bor tabakasının kısmen süreksizliğinden dolayı bazen minimum, bazen maximum noktalara denk gelmesinden dolayı farklılık gösterebilmektedir.

1000 °C Sıcaklıkta borlanmış numunelerin mikro sertlik değerleri borlama süresinin artmasıyla birlikte yükseldiği tespit edilmiştir. Çalışmamızda kullanılan paslanmaz çelik malzemelere borlama işlemi uygulanmasıyla ham sertlikleri esas alındığında sertliklerinde; AISI 304 için **10 kat**, AISI 420 için **4 kat** ve AISI 430 için **5 kat** sertlik artışı sağlanmıştır. Deneyde kullandığımız malzemelerden ham sertliği (445 HV_{0.05}) en yüksek olan AISI 420 martenzitik çeliğidir. Ham haldeki sertliği (165 HV_{0.05}) olan AISI 304 östenitik çeliğinde borlama işlemi sonrası kullanılan diğer çeliklere kıyasla daha yüksek ve max. sertlik artışı 10 kat (1736 HV_{0.05}) elde edilmiştir. Bunun sebebi; malzemelere gerçekleştirdiğimiz spektral analize baktığımızda diğer malzemelere kıyasla AISI 304 çeliği bünyesinde daha fazla Cr ihtiva etmesi olarak düşünülmektedir. Östenitik malzemede Cr % 18.750, Ferritik malzemede Cr %16.925, Martenzitik malzemede Cr %13.133 bulunmaktadır. Zira bilindiği gibi Cr'un borlama esnasında oluşturduğu CrB fazı ile borür tabakasının sertliğini arttırdığı düşünülmektedir.

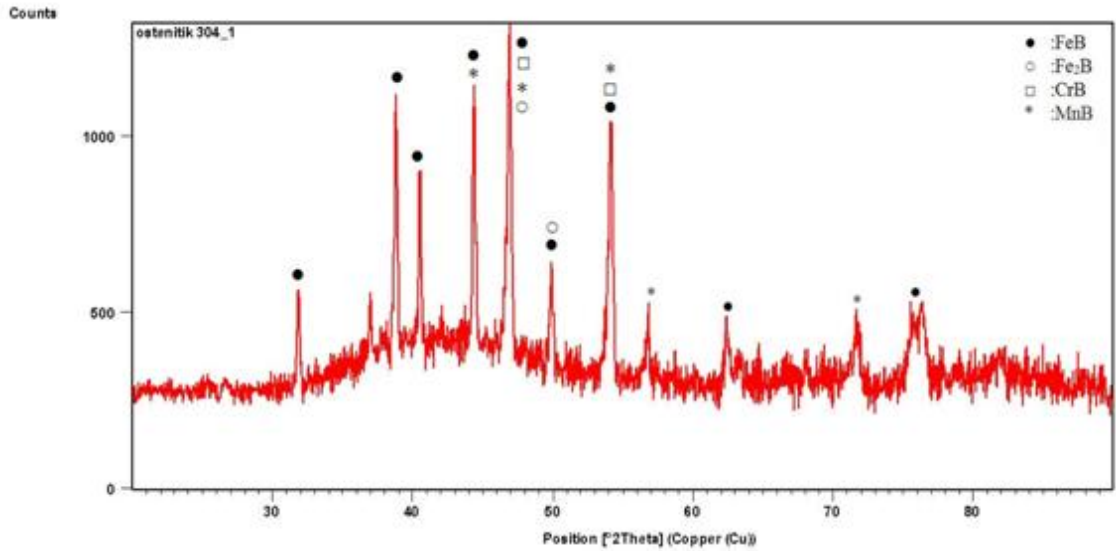
Tablo 8.5: 4-6 saat borlanmış AISI 420 ve AISI 430 malzemelerinin sertlik değerleri

Malzeme	Sıcaklık (°C)	Sertlik (HV _{0.05})	
		4 saat	6 saat
AISI 420 Martenzitik	1000	1110	1659
AISI 430 Ferritik	1000	1116	1572

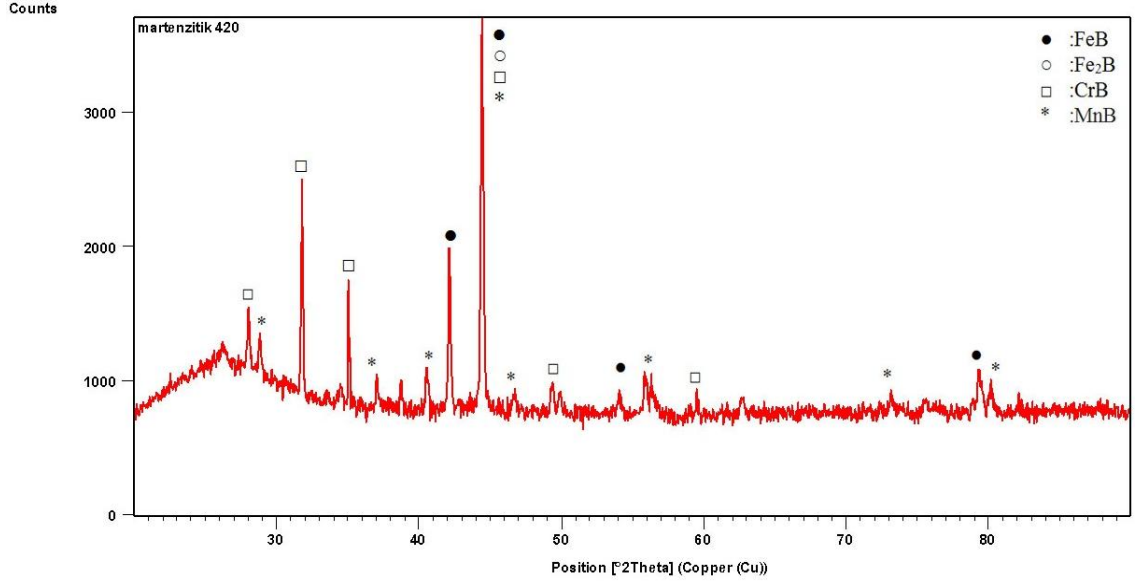
Tablo 8.5'e baktığımızda; Ferritik malzemede Cr yüksek, C' düşük, max sertlik 1572 HV_{0.05} iken, Martenzitik malzemede Cr kısmen daha düşük, C ise yüksek, max. sertik 1659 HV_{0.05} bulunmuştur. Bu iki sonuç birbirine yakın çıkmıştır. İçerdikleri Cr yüzdesi açısından sıralamada AISI 430 Ferritik malzeme sertliği, AISI 304 Östenit paslanmaz çelik malzeme sertliğinden sonra gelmesi gerekirken, en sonda yer almıştır. Bunun sebebi, yapılan XRD analizine bakacak olursak, 6 saat borlanmış AISI 420 martenzitik malzeme içersinde MnB fazının oluşması ve bu fazın tabaka sertliğine olan katkısı olarak düşünülmektedir.

8.4 XRD İnceleme Sonuçları

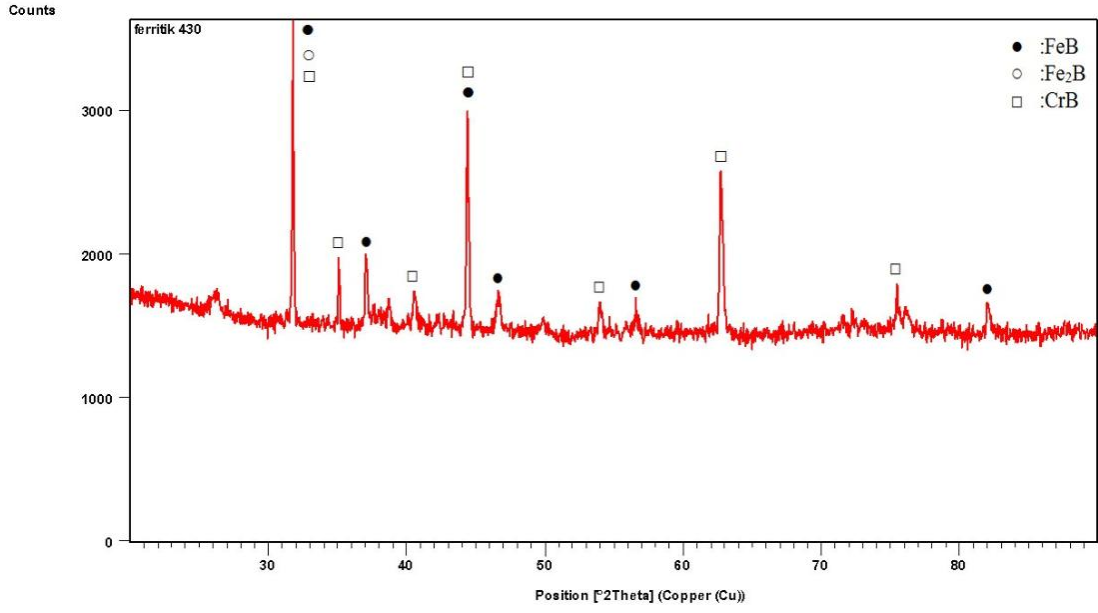
1000 °C' de 6 saat borlama işlemi uygulanan AISI 304, AISI 420 ve AISI 430 paslanmaz çelik malzemelerinin XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. XRD Analizi sonucunda elde edilen fazlar AISI 304 malzemesi için; FeB, Fe₂B, CrB, MnB, AISI 420 malzemesi için; FeB, Fe₂B, CrB, MnB ve AISI 430 malzemesi için; FeB, Fe₂B, CrB fazlarından oluştuğu tespit edilmiştir.



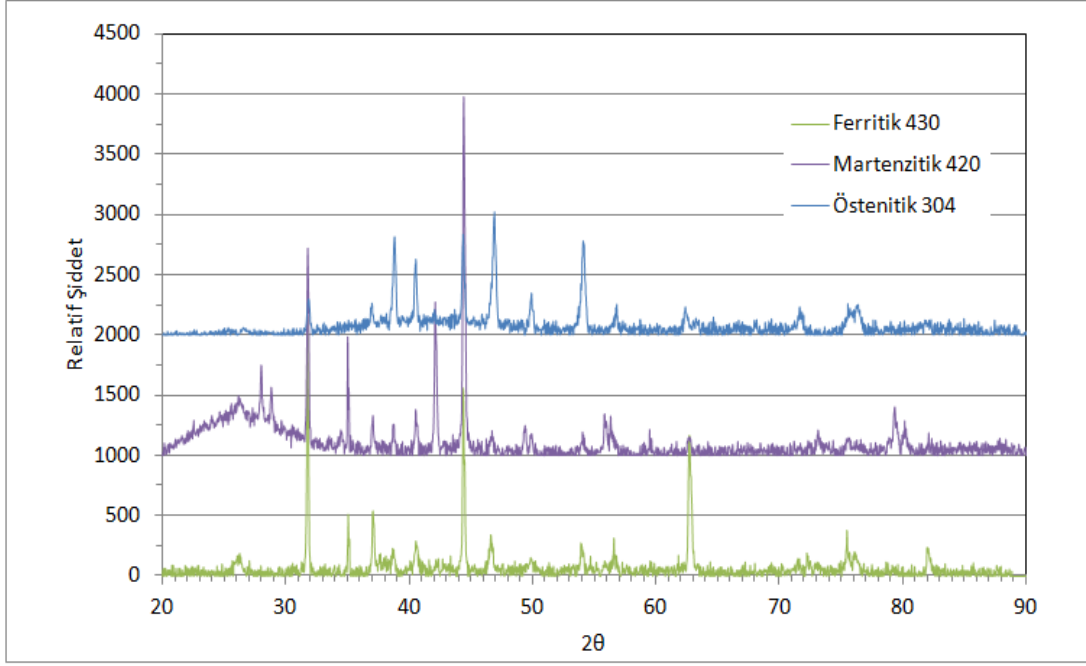
Şekil 8.59: 1000 °C' de 6 saat borlanmış AISI 304 malzemesinin X ışınları difraksiyon paterni



Şekil 8.60: 1000 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 420 malzemesinin X ışınları difraksiyon paterni



Şekil 8.61: 1000 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 430 malzemesinin X ışınları difraksiyon paterni



Şekil 8.62: 1000 °C’ de 6 saat borlanmış numunelerin X ışınları difraksiyon paterni

XRD analiz sonuçlarına göre Ekabor-2 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan paslanmaz çelik numunelerde mikroyapı fotoğrafları ile desteklendiği gibi yüzeyde FeB fazının baskın faz olduğu, bunun sebebinin ise, FeB fazının kromu bünyesinde kabul etmemesi olduğu ileri sürülmüştür. Bu durum; Cr_2B ve Fe_2B birbirinin izomorf olmasıyla ilişkilendirilebilir [26]. Ayrıca FeB fazına ek olarak; Fe_2B , CrB, MnB, fazlarının ise düşük oranlarda var oldukları belirlenmiştir

Özer ve Ay [5] düşük karbonlu çeliklerin borlanması çalışmasında sadece FeB ve Fe_2B fazını tespit ederlerken, çalışmamızda paslanmaz çeliklerin alaşım elementi sayılarının fazla olması sebebiyle bu fazlara ek olarak CrB ve MnB gibi fazlar da elde edilmiştir.

8.5 Korozyon Direnci İnceleme Sonuçları

Korozyon direnci inceleme çalışması, borlanan 3 farklı malzemeler için gerçekleştirilmiştir. Bu üç malzemenin boyları 2 cm alınmış fakat aynı çapta malzeme temin edilemediğinden, AISI 304 malzemesi 14.5 mm çapında, AISI 430 malzemesi 16 mm çapında AISI 420 ise 14 mm çapında temin edilmiştir. Bilindiği gibi kullanılan bu farklı malzemeler aynı çapta dahi olsa, içerdikleri alaşım elemanları sebebiyle yoğunlukları farklı olacaktır. Yani çaplar aynı olsa bile yoğunluk farkından dolayı ağırlıklar farklı olacaktır. Bu sebeple her malzemenin kütle kaybı grafikleri ayrı ayrı çizilmiştir. Asit olarak paslanmaz çeliklerin en az direnç gösterebildiği asitlerden biri olan HCl asiti seçilmiştir. Öncelikle %10 HCl asit hazırlanarak belirli sıralarla kodlanmış malzemelerin bulunduğu kap içerisine dökülmüştür. Korozyon testi oda sıcaklığında, 28 gün süresince 7 günde bir ağırlıklarının ölçümü alınarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ışığında malzemelerin ilk ve son ağırlıklarından yola çıkılarak % ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Borlanmış malzemelerin yanı sıra işlem görmemiş malzemelere de korozyon testi uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 8.6: % 10 HCl asiti içerisindeki numunelerin ham ölçüm değerleri

	İlk Ölçüm Ham			
	AISI 430	AISI 420	AISI 304	
850 °C-2 saat	F12---30,4205 g	M12---23,4408 g	Ö12---20,1883 g	
850 °C-4 saat	F14---30,6328 g	M14---23,7379 g	Ö14---20,8273 g	
850 °C-6 saat	F16---30,4954 g	M16---23,7208 g	Ö16---22,3037 g	
925 °C-2 saat	F22---30,7367 g	M22---23,4952 g	Ö22---21,4654 g	
925 °C-4 saat	F24---30,1493 g	M24---23,4030 g	Ö24---20,9536 g	
925 °C-6 saat	F26---30,0794 g	M26---23,6745 g	Ö26---19,6019 g	
1000°C-2 saat	F32---30,1603 g	M32---23,6263 g	Ö32---20,9831 g	
1000°C-4 saat	F34---30,5647 g	M34---23,7118 g	Ö34---20,7113 g	
1000°C-6 saat	F36---30,5722 g	M36---23,7994 g	Ö36---21,4465 g	
İşlem Görmemiş:	30,3473 g	23,7760 g	24,1544 g	

Tablo 8.7: % 10 HCl asiti içindeki numunelerin 2. ölçüm değerleri

	2. Ölçüm / 7 Gün		
	AISI 430	AISI 420	AISI 304
850 °C-2 saat	F12---30,3728 g	M12---23,3119 g	Ö12---20,1871 g
850 °C-4 saat	F14---30,5319 g	M14---22,6467 g	Ö14---20,8258 g
850 °C-6 saat	F16---30,4764 g	M16---22,1565 g	Ö16---22,3019 g
925 °C-2 saat	F22---30,7197 g	M22---23,0131 g	Ö22---21,4639 g
925 °C-4 saat	F24---30,1362 g	M24---22,9143 g	Ö24---20,9500 g
925 °C-6 saat	F26---30,0687 g	M26---23,0183 g	Ö26---19,6001 g
1000°C-2 saat	F32---30,1452 g	M32---22,9988 g	Ö32---20,4120 g
1000°C-4 saat	F34---30,5419 g	M34---23,4825 g	Ö34---20,6425 g
1000°C-6 saat	F36---30,5646 g	M36---23,6001 g	Ö36---21,3324 g
İşlem Görmemiş:	22,8315 g	19,7103 g	24,1032 g

Tablo 8.8: % 10 HCl asiti içindeki numunelerin 3. ölçüm değerleri

	3. Ölçüm / 14 Gün		
	AISI 430	AISI 420	AISI 304
850 °C-2 saat	F12---30,3468 g	M12---22,2637 g	Ö12---20,1856 g
850 °C-4 saat	F14---30,4568 g	M14---21,5938 g	Ö14---20,8243 g
850 °C-6 saat	F16---30,4421 g	M16---21,3260 g	Ö16---22,3002 g
925 °C-2 saat	F22---30,7185 g	M22---22,4053 g	Ö22---21,4622 g
925 °C-4 saat	F24---30,1250 g	M24---22,4688 g	Ö24---20,9481 g
925 °C-6 saat	F26---30,0579 g	M26---22,9251 g	Ö26---19,5945 g
1000°C-2 saat	F32---30,1366 g	M32---22,8005 g	Ö32---20,1687 g
1000°C-4 saat	F34---30,5347 g	M34---23,2537 g	Ö34---20,5521 g
1000°C-6 saat	F36---30,5452 g	M36---23,4868 g	Ö36---21,2891 g
İşlem Görmemiş:	15,4836 g	16,7379 g	24,0832 g

Tablo 8.9: % 10 HCl asiti içindeki numunelerin 4. ölçüm değerleri

	4. Ölçüm / 21 Gün		
	AISI 430	AISI 420	AISI 304
850 °C-2 saat	F12---30,2942 g	M12---22,1562 g	Ö12---20,1838 g
850 °C-4 saat	F14---30,2541 g	M14---20,3452 g	Ö14---20,7525 g
850 °C-6 saat	F16---30,4006 g	M16---21,0092 g	Ö16---22,2990 g
925 °C-2 saat	F22---30,6437 g	M22---22,2321 g	Ö22---21,4600 g
925 °C-4 saat	F24---30,1250 g	M24---22,4296 g	Ö24---20,9376 g
925 °C-6 saat	F26---30,0500 g	M26---22,6245 g	Ö26---19,5426 g
1000°C-2 saat	F32---30,0926 g	M32---22,4456 g	Ö32---20,1001 g
1000°C-4 saat	F34---30,5329 g	M34---23,0092 g	Ö34---20,4230 g
1000°C-6 saat	F36---30,5448 g	M36---23,2421 g	Ö36---21,1794 g
İşlem Görmemiş:	11,3454 g	14,6342 g	24,0699 g

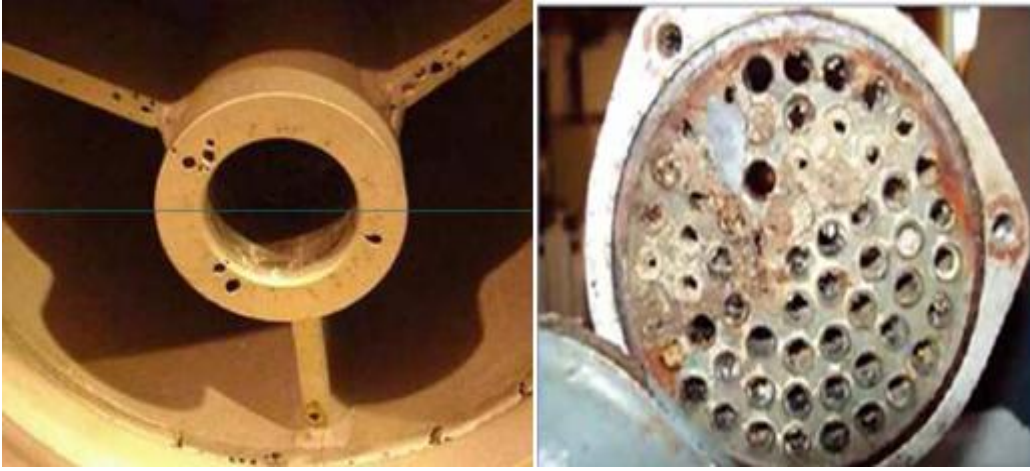
Tablo 8.10: %10 HCl asiti içerindeki numunelerin 5. lim değerleri

	5. lim / 28 Gün			
	AISI 430	AISI 420	AISI 304	
850 C-2 saat	F12----30,2344 g	M12----21,0903 g	12----20,1829 g	
850 C-4 saat	F14--- -30,0131 g	M14----19,9254 g	14----20,7220 g	
850 C-6 saat	F16----30,3488 g	M16----19,6622 g	16----22,2971 g	
925 C-2 saat	F22----30,6032 g	M22----20,0201 g	22----21,4586 g	
925 C-4 saat	F24----30,1017 g	M24----21,4069 g	24----20,9255 g	
925 C-6 saat	F26----30,0423 g	M26----22,2880 g	26----19,5010 g	
1000C-2 saat	F32----30,0298 g	M32----22,1811 g	32----20,0053 g	
1000C-4 saat	F34----30,5308 g	M34----22,7104 g	34----20,3379 g	
1000C-6 saat	F36----30,5430 g	M36----23,1845 g	36----21,0798 g	
İşlem Görmemiş:	8,1629 g	13,9508 g	24,0508 g	

Tablo 8.11: %10 HCl asiti içerindeki numunelerin yüzde ağırlık kayıpları

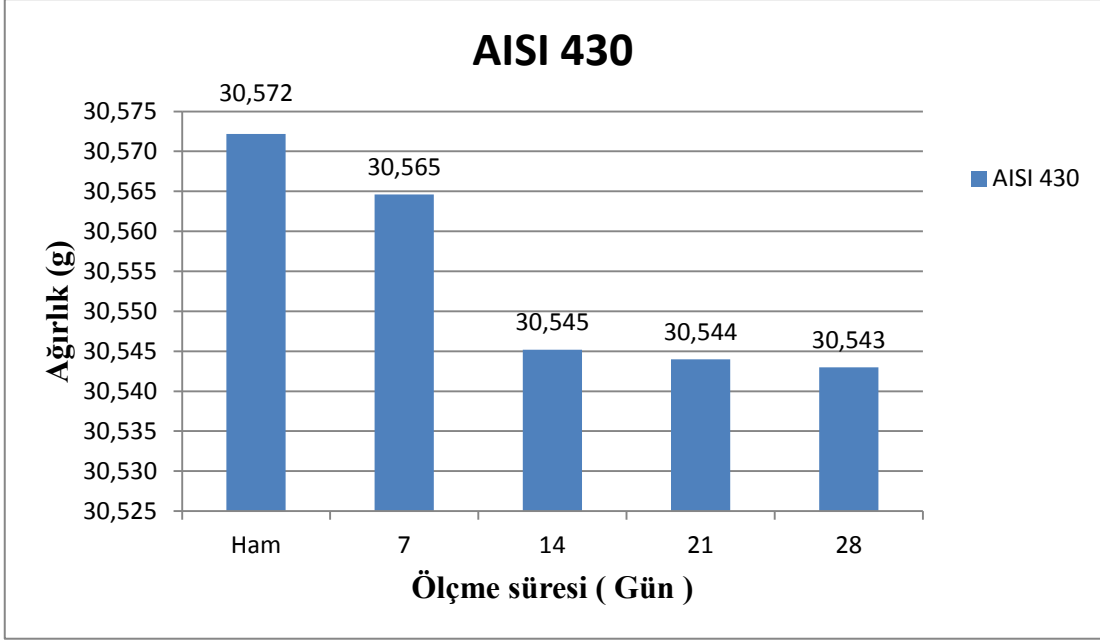
	Ağırlık Kaybı (%)			
	AISI 430	AISI 420	AISI 304	
850 C-2 saat	F12----0,61	M12-----10,0273	12----0,0267	
850 C-4 saat	F14---2,0229	M14----16,0608	14---0,5055	
850 C-6 saat	F16---0,4807	M16----17,1098	16---0,0295	
925 C-2 saat	F22----0,4343	M22----11,3857	22----0,0316	
925 C-4 saat	F24---0,1578	M24----8,1019	24----0,0386	
925 C-6 saat	F26---0,1233	M26----5,8565	26---0,0556	
1000C-2 saat	F32----0,4326	M32----6,1169	32----4,3739	
1000C-4 saat	F34---0,1109	M34----4,2232	34---1,2717	
1000C-6 saat	F36---0,0955	M36----2,5836	36---1,6435	
İşlem Görmemiş:	73,1017	41,3240	0,4289	

HCl asiti kullanılarak yapılan korozyon testi sonucunda özellikle AISI 430 ve AISI 420 malzemelerin borlanmasının HCl asitine karşı korozyon direncini arttırdığı görülmüştür. HCl asiti içerisinde 28 gün sonunda ağırlık kayıpları AISI 430 malzemesi için ~% 73, AISI 420 malzemesi için ~%41 ve AISI 304 malzemesi için ~%0.5 olarak hesaplanmıştır. Borlamanın AISI 430 ve AISI 420 malzemelerinde HCl asitine karşı direnci arttırdığı, AISI 304 malzemesinde ise diğer malzemelere kıyasla etkinin çok düşük kaldığı gözlemlenmiştir.

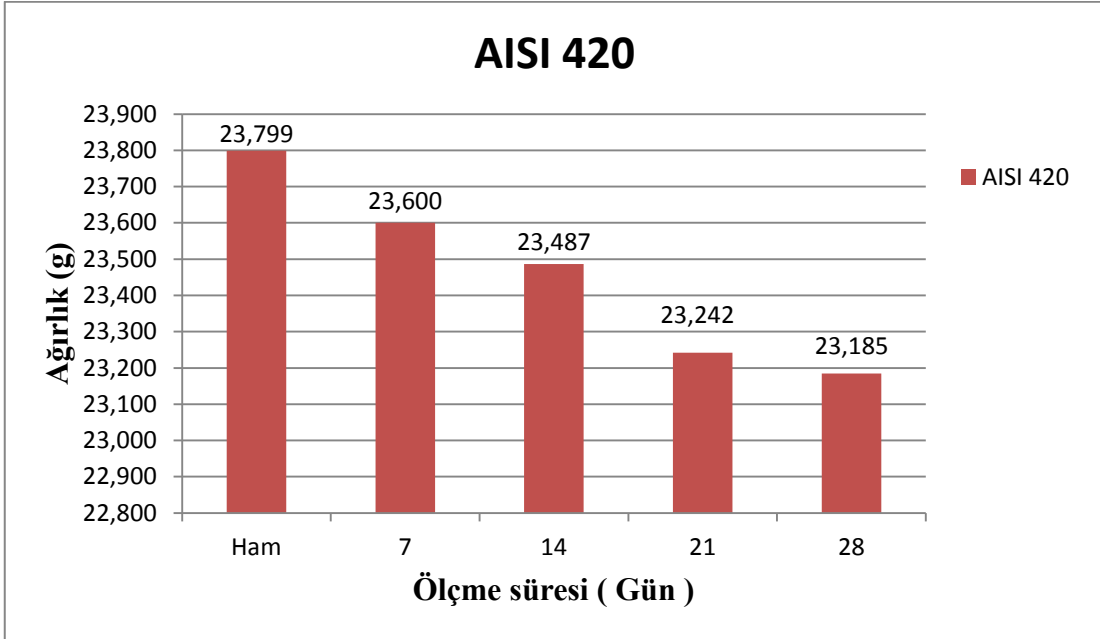


Şekil 8.63: Genel ve pitting korozyonu [58]

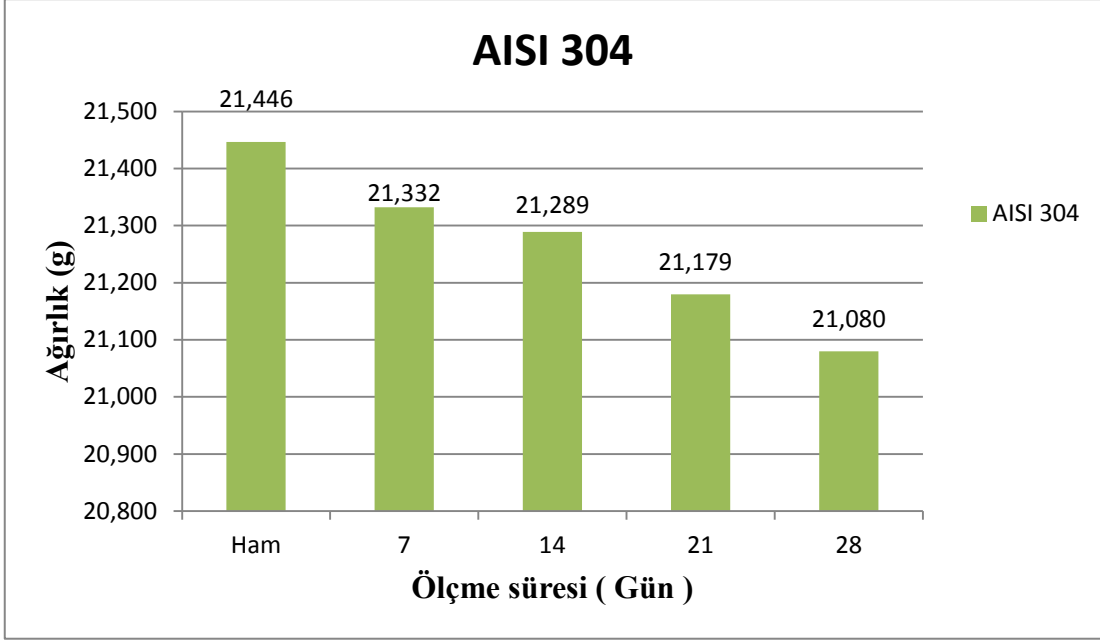
a) Pitting Korozyonu b) Genel Korozyonu



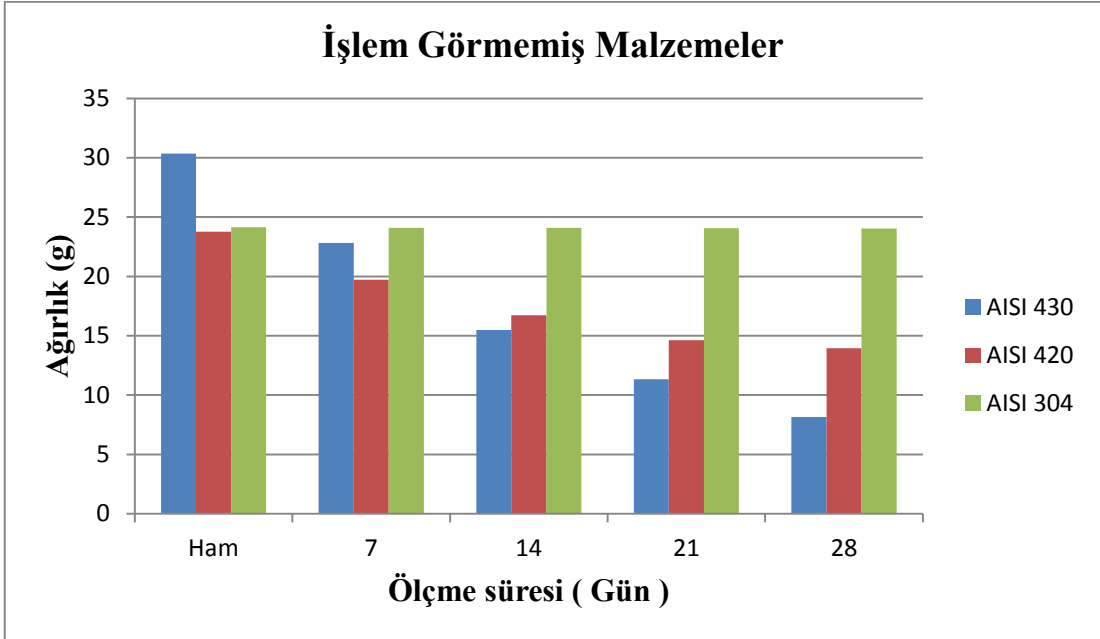
Şekil 8.64: 1000 °C – 6 saat borlanmış AISI 430 malzemesinin % 10 HCl asiti içerisindeki kütle kaybı



Şekil 8.65: 1000 °C – 6 saat borlanmış AISI 420 malzemesinin % 10 HCl asiti içerisindeki kütle kaybı



Şekil 8.66: 1000 °C – 6 saat borlanmış AISI 304 malzemesinin %10 HCl asiti içerisindeki kütle kaybı



Şekil 8.67: İşlem görmemiş malzemelerin %10 HCl asiti içerisindeki kütle değişimleri

Korozyon çeşitleri açısından en tehlikeli türlerden biri “**Pitting Korozyonu**”dur.HCl asiti, ağır klorür iyonlarının ana kaynağıdır Klorür iyonları pasif filmi noktasal olarak dahi bozarak bu alanda korozyon oluşumuna sebebiyet verirler.

Çalışmamızda; AISI 430 malzemesinin ham haldeki 28 gün %10 HCl çözeltisi içerisinde kaldıktan sonra ki kütle kaybı .%73 iken,aynı malzemenin 1000 °C 6 saat borlanması sonucu kütle kaybı çok az yaklaşık % 0.1 olmuştur,Şunu söyleyebiliriz ki borlamanın korozyona karşı direnç artışında çok çok büyük rolü olmuştur.

AISI 420 malzemesinin ham haldeki 28 gün %10 HCl çözeltisi içerisinde kaldıktan sonra ki kütle kaybı ~%41 iken,aynı malzemenin 1000 °C 6 saat borlanması sonucu kütle kaybı yaklaşık % 2.5 olmuştur, Aynı durum bu çelik için de geçerli olup, borlamanın korozyona karşı direnç artışında çok büyük rolü olmuştur.

AISI 304 malzemesi için ise; borlamanın korozyona karşı direnç artışında etkisi sınırlı kalmıştır. AISI 304 malzemesinin ham haldeki 28 gün %10 HCl çözeltisi içerisinde kaldıktan sonra ki kütle kaybı ~% 0.5 iken, aynı malzemenin 1000 °C 6 saat borlanması sonucu kütle kaybı yaklaşık % 1.7 olmuştur. AISI 304 malzemesinin çalışmada kullanılan diğer malzemelere karşı hem ham halde, hem borlanmış halde korozyon direncinin daha yüksek çıkmasının sebebi; AISI 304 malzemesinin içerisinde **Mo** ve **Ni** varlığının olduğu düşünülmektedir. Malzeme içerisindeki Molibden (özellikle) ve nikel varlığı pasif filmi (**CrO₂**) güçlendirerek HCl asitlerinin sebep olduğu çukurcuk korozyonuna karşı direnç artışı sağlamaktadır.

9. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Endüstriden temin edilen AISI 304 Östenitik, AISI 420 Martenzitik, AISI 430 Ferritik paslanmaz çelik numunelere 850°C, 925°C ve 1000°C sıcaklıklarında 2, 4 ve 6 saat sürelerinde kutu borlama işlemi uygulanmıştır. Bu işlemler neticesinde elde edilen genel sonuçlar ve öneriler aşağıda sıralanmıştır.

1. Borlama işlemi sıcaklığı ve süresi arttıkça bor tabakası kalınlığının arttığı tespit edilmiştir. En yüksek bor tabakası kalınlığı AISI 304 östenitik paslanmaz çelik malzemesinin 1000°C’de 6 saat süresince borlanmış numunesinden **89.590 µm** değeri ile elde edilmiştir. En düşük bor tabakası kalınlığı AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik malzemesinin 850°C’de 2 saat süresince borlanmış numunesinden **5.432 µm** değeri ile elde edilmiştir.
2. Yapılan metalografik işlemler sonucunda bor tabakası morfolojisi incelenerek bu tabakanın, “**bor tabakası, geçiş bölgesi ve matris**” yapısından oluştuğu net olarak ortaya çıkarılmıştır. Bor tabakası ve matris uyumunun **dişli** değil şematik gösterim olan **düz** ve **kompakt** olduğu gözlemlenmiştir. Bor tabakası en dış yüzeyinin düzlemsel olması, hiç girinti-çıkıntı olmaması, borlama sırasında oluşabilecek olumsuzluklardan (ısının inip çıkmaması, termal şoka uğramaması) kaçınıldığını göstermektedir.
3. Borlanmış malzemeler üzerinde yapılan mikro sertlik incelemesinde, sertlik bor tabakasından matrise inildikçe azalmıştır. Maksimum sertlik değerleri bor tabakası üzerinde yapılan sertlik ölçümlerinden elde edilmiştir. Borlanmış numunelerin mikro sertlik değerleri, **borlama sıcaklığı** ve **süresinin** artmasıyla paralel olarak arttığı tespit edilmiştir.
4. Çalışmada kullanılan paslanmaz çelik malzemelerin ortalama ham matris sertlik değerleri; AISI 304 çeliği **165 HV_{0.05}**, AISI 420 çeliği **440 HV_{0.05}**, AISI 430 çeliği **330 HV_{0.05}**, olarak ölçülmüştür. Borlama işlemi sonrası bor tabakası üzerinde yapılan mikro sertlik değerlerinde maksimum sertlikler 1000°C’de 6 saat borlanan AISI 304 için **1736 HV_{0.05}**, 1000°C’de 6 saat borlanan AISI 420 için **1659 HV_{0.05}**

ve 1000°C'de 6 saat borlanan AISI 430 için **1572** HV_{0.05} olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar neticesinde borlama işlemi ile malzemeler yaklaşık olarak AISI 304; **10 kat**, AISI 420; **4 kat** ve AISI 430; **5 kat** sertlik artışı sağlanmıştır.

5. Borlanmış malzemelerin bor tabakasını oluşturma ve büyütme aktivasyon enerjileri Arhenius bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır. Aktivasyon enerjileri AISI 304 çeliği için 182.3592 kJ/mol, AISI 420 çeliği için **242.153 kJ/mol**, ve AISI 430 çeliği için 190.856 kJ/mol olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında borlama işleminden önce istenen herhangi bir tabaka kalınlığı için pratik olarak bir sıcaklık ve süresi **Arhenius** bağıntısından belirlenebilecektir.
6. %10'luk HCl asidi kullanılarak yapılan korozyon testi sonucunda; özellikle AISI 430 ve AISI 420 malzemelerine uygulanan borlama işleminin HCl asitine karşı korozyon direncini **net bir şekilde** arttırdığı görülmüştür. HCl asiti içerisinde 28 gün sonunda ağırlık kayıpları ham AISI 430 malzemesi için **~% 73**, ham AISI 420 malzemesi için **~% 41** ve ham AISI 304 malzemesi için **~% 0.5** olarak hesaplanmıştır. **Borlama'** nın AISI 430 ve AISI 420 malzemelerinde HCl asitine karşı direnci arttırdığı, borlamanın AISI 304 malzemesinde HCl asitine karşı etkisi, diğer malzemelere kıyasla çok az ve sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir. Yüzey görüntüsü bozulmuştur.
7. XRD Analizi sonucunda elde edilen fazlar AISI 304 malzemesi için; **FeB, Fe₂B, CrB, MnB**, AISI 420 malzemesi için; **FeB, Fe₂B, CrB, MnB** ve AISI 430 malzemesi için; **FeB, Fe₂B, CrB** fazlarından oluştuğu tespit edilmiştir.

Bu alanda çalışma yapacak kişilere **önerilerim**;

1. Bor tabakasının farklı asitlere (sülfirik asit, sodyum hidroksit vs.gibi) ve koroziv ortamlara karşı direnci noktasında daha ayrıntılı bir araştırma yapılabilir. Özellikle yüksek sıcaklık ortamlarında ki korozyona borlamanın etkisi araştırılabilir.
2. Borlama işleminin malzemelerin kırılma tokluğuna etkisi hakkında daha fazla araştırma yapılabilir.
3. Borlama işleminin, genellikle borlama öncesi herhangi bir işlem görmemiş malzemelere uygulandığı görülmüştür. Örnek olarak, Borlama işleminden önce

kromlama yapılırsa, daha sonrasında borlama işlemi yapılarak dupleks bir yapı ortaya çıkartılıp mekanik özellikleri incelenebilir.

4. Borlama işlemi için kullanılacak bor tozlarında, farklı bor bileşiklerinin (Ekabor-3, veya Ekabor-Ni vs gibi) kullanılması halinde malzemeler için en ideal bir bor tozu seçimi yapılmasına olanak sağlayabilir.

10. KAYNAKLAR

- [1] Khoee, S.M.M., “Ergimiş Boraks Banyosunda Çeliklere Vanadyum Karbür Kaplama”, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (1992).
- [2] Yapar,U., “Düşük Ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama İle Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2003).
- [3] Özcan, H., “32CrMoV Çeliğinin Aşınma Direncini Arttırmak İçin Yeni Bir Isıl İşlem Metodunun Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, (2012).
- [4] Ayter,T., “Borlama İşleminin Çeliklerin Yüzey Kalitesi Ve Aşınma Davranışına Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, (2005).
- [5] Özer,M., “Üç Farklı Çeliğe Katı Borlama İşlemi Yapılmasının İçyapı Ve Sertlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, (2011).
- [6] Helvacı, C., “Türkiye Borat Yatakları: Jeolojik Konumu, Ekonomik Önemi ve Bor Politikası”, 5. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, (2004).
- [7] Taşcı, A., “Borlanmış Çeliklerin Aşınma ve Korozyon Dayanımları”, Y.Lisans Tezi, *İstanbul Ü. Fen Bil. Enstitüsü*, İstanbul, (1993).
- [8] Delikanlı, K., Çalık, A., Uzun, H.A., “Sade Karbonlu Bir Çeliğin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi”, *1.Uluslararası Bor Sempozyumu*, 109-113, (2002).

- [9] Çalık, A., “Makine ve Metalurji Sanayinde Bor Kullanımı”, *2.Uluslararası Bor Sempozyumu*, Eskişehir, (2004).
- [10] Komisyon, “Bor Raporu”, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası*, (2003).
- [11] Duman, İ., “Bor Madenleri ve Stratejik Bor Ürünleri”, *Bilim ve Ütopya*, 114, 18-22, (2003).
- [12] Lee, S.Y., Kim, G.S., and Kim, B.S., “Mechanical Properties Of Duplex Layer Formed On AISI 403 Stainless Steel By Chromizing And Boronizing Treatment”, *Surface and Coatings Technology*, 177-178, 178-184, (2004).
- [13] Uluköy, A., Can, A.Ç., “Çeliklerin borlanması”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12, 189-198, (2006).
- [14] Baştürk, S., Erten M., “Borlama ile yüzey sertleştirme çalışmaları”, *Mühendis Ve Makine*, 47, 57-74, (2006).
- [15] Özbek,İ., “Borlama Yöntemiyle (AISI M50 Ve AISI M2) Yüksek Hız Çeliklerinin Ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, (1999).
- [16] Yağcı,M.A.,“Borlanmış AISI M2 Çeliğinin Metalografik Özelliklerinin İncelenmesi”,Yüksek Lisans Tezi,*Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*,Makine Mühendisliği Anabilim Dalı,Eskişehir,(2009).
- [17] Matuschka, A.G.V., *Boronizing*, München, Wien, Hanser, (1980).
- [18] Sinha, A. K. 1991. Boronizing, *ASM Int, Heat Treating*, bl. 2., s. 437-447.

- [19] Günen,A,“Nano Bor Tozu İle Yüzeyi Alaşımlandırılan Östenitik Paslanmaz Çeliğin Mekanik Özellikler Ve Korozyon Davranışının Araştırılması”,Doktora Tezi,*Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*,Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı,Elazığ,(2012).
- [20] Turhal, A., “Borlamanın paslanmaz çeliğin radyasyon zırhlama özelliğine etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, (2008).
- [21] Uzun, H. A., “Borlama İle Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları”, Y.Lisans Tezi,*Süleyman Demirel Ü. Fen Bil. Enstitüsü*, Isparta, (2002).
- [22] Çetin M., “Borlanmış Hadfield Çeliklerinin Aşınma Dayanımını İncelenmesi”, Y.Lisans Tezi, *Dumlupınar Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, (2003).
- [23] Özsoy, A., “Çeliğin Borlanması Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi”, Doktora Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (1991).
- [24] Karaman,Y., “Endüstriyel Borlama ve Tekstil Endüstrisinde Bir Uygulama”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, (2003).
- [25] Tezcan, R., “Borlama İşlemi ve Endüstriyel Uygulamaları”, Y.Lisans Tezi, *Osmangazi Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (1996).
- [26] Başman, G., “AISI 316 L Tipi Paslanmaz Çeliğin Termokimyasal Difüzyon Yöntemi İle Borlanması, Borlama Banyosu Bileşenlerinin Borür Tabakası Özelliklerine Etkisi”, Doktora Tezi,*İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2010).

- [27] Bindal C., “Az Alaşımli ve Karbon Çeliklerinde Borlama ile Yüzeğe Kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tesbiti”, Doktora Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1991).
- [28] Yapar U., Başman G., Arısoy C.F., Şeşen M.K., “Çeliklerde Borlama Yoluyla Yüzeğe Sertleştirme”, *Metal Dünyası*, 115, 69 – 74, (2002).
- [29] Delikanlı, K., Çalık, A., Uzun, H.A., “Sade Karbonlu Bir Çeliğin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi”, *1.Uluslararası Bor Sempozyumu*, 109-113, (2002).
- [30] Bozkurt, N., “Bor Yayınımlı Çeliklerde Yüzeğe Sertleştirme”, Doktora Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bil. Enstitüsü*, İstanbul, (1984).
- [31] Yünker U., “Borlanmış Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, (2000).
- [32] Selçuk, B., “Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Erciyes Ü. Fen Bil. Enstitüsü*, Kayseri, (1994).
- [33] Yoon, J.H., Jee, Y.K. and Lee, S.Y., “Plasma paste boronizing treatment of the stainless steel AISI 304”, *Surface and Coating Technology*, 112, 71-75, (1999).
- [34] Matuschka, A.G., 1980. *Boronizing*, Carl Hanser Verlag, München.
- [35] Karamış, M. B., “Tribological Behavior of Plasma Nitrided Material Under Dry Sliding Conditions”, *Wear*, 147, 385-399, (1991).
- [36] Karakan, M., Alsaran, A., Çelik, A., “Plazma Borlama”, *Mühendis ve Makine*, 512, (2002).

- [37] Eyre, T. S., “Effect of boronising on friction and wear of ferrous metals”, *Wear*, 33, 383-397, (1975).
- [38] Anatürk, B., “ Borlanmış AISI 1010 Çift Fazlı Çeliğin Korozyon Davranışının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Afyon, (2012).
- [39] Atik, E., “Çeliklerin Borlanarak Aşınma Dayanımlarının Arttırılması”, *Mühendis ve Makine*, 445, 17-20, (1997).
- [40] Fichtl, W. Boronizing and its practical application, *materials in engineering*. 2:276-286, (1981).
- [41] Baydoğan, M., Başman, G., Mindivan, H., Arısoy, F., Çimenoglu, H., Şeşen, M.K., “Çeliklerin Sınıflandırılması”, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası*, Isdemir, İskenderun, (2003).
- [42] Osmanoglu, T., “AISI 304 Ve 430 Kalite Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapılarına, Mekanik Özelliklerine Ve Korozyon Davranışlarına Soğuk Deformasyonun Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, (2012).
- [43] Yontar, A.A., “AISI 304 Paslanmaz Çeliklerin İşlenebilirliğinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, (2011).
- [44] ASM International Handbook Committee., ASM Handbook Volume 20: Materials Selection, *ASM International*, US, (1992).
- [45] Erdoğan, M., (Çeviri). Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, *Nobel Yayınları No:1*, 234s. Ankara, (2001).
- [46] Joseph, K. L. L., Kin, H. L., and Chan, H. S., *Stainless Steel An Introduction and Their Recent Developments*, Dubai:Bentham science publishers, (2012).

- [47] Gürkan, M., “Östenitik ve martensitik paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklık aşınma davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, (2007).
- [48] Güventürk, F., “Çelik El Kitabı”, *Güven Çelik San. ve Tic. Ltd. Şti. Yayınları*, İzmir, 35-4, (1990).
- [49] Gooch, T. “Welding Behaviour and Weldability of Superaustenitic Stainless Steels”, *8th Annual North American Welding Research Conference*, TWI, Cambridge UK, pp. 1-3, (1992).
- [50] Develi, K., “Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Mig Kaynağında Argon Hidrojen Karışımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 25-26, (2003).
- [51] Stenbacka, N., “Shielding Gas Technology When Welding Ordinary and High Alloyed Stainless Steel”, *Aga Gas AB*, 83-90, (1995).
- [52] Kaluç, E. ve Sarı, N.Y., “Duplex ve Süper Duplex Paslanmaz Çelikler ve Kaynağı”, *Mühendis ve Makine Aylık Teknik Dergisi*, Sayı 424, Ankara, 15 s, (1995).
- [53] Odabaş, C., “Paslanmaz Çelikler”, *As Kaynak Yayınları*, 1.Baskı, İstanbul, 13 s., (2002).
- [54] Soncu, M., “G-X 10 CrNiMoNb 18-10 Östenitik Paslanmaz Çeliğin Asidik Çözeltilerdeki Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli, (2008).
- [55] Yalçın, H., and Koç, T., *Mühendisler için korozyon*, Ankara: *TMMOB Kim.Müh.Oda.*, (1997).

- [56] Şen, M., “AISI 304 Tipi Östenitik Paslanmaz Çeliklerde Soğuk Şekillendirme Miktarının Korozyon Üzerine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2010).
- [57] Loto, R.T., “Pitting corrosion evaluation of austenitic stainless steel type 304 in acid chloride media”, *J. Mater. Environ. Sci.*, 4, 448-459, (2013).
- [58] Jessen, C.Q., Stainless steel and corrosion, vol1, *Damstahl*, Denmark, (2011).
- [59] Peckner, D. and Bernstein I.M., “Handbook of Stainless Steels”, *Mc Graw-Hill Book Co*, New York, (1977).
- [60] Nilsson, K., “Corrosion Tests of Stainless Steels in Automative Applications”, *Doktora Tezi*, Lulea University of Technology, İsveç, (2006).
- [61] Özkazanç, H., “Metallerin korozyonu ve korozyondan korunma yöntemleri”, Yüksek Lisans Semineri, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmit, 1-20, (2006).
- [62] Atay, E., “Malzeme mekanik özelliklerinin parça tasarımı ve analizine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, (2001).
- [63] Güneş, İ., ve Yıldız,İ., “Rate Of Growth Of Boride Layers On Stainless Steels”, *Oxidation Communications* 38, 4A, 2189–2198, (2015).
- [64] Angkurarach, L., and Juijerm,P., “Effects Of Direct Current Field On Powder-Packed Boriding Process On Martensitic Stainless Steel AISI 420”, *Archives Of Metallurgy And Materials*, 57, 779-804, (2012).
- [65] Barut, N., Yavuz, D., and Kayalı Y., “Borlanmış AISI 5140 Ve AISI 420 Çeliklerinin Difüzyon Ve Adhezyon Davranışlarının İncelenmesi”, *Afyon Kocatepe Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 14, 1-8, (2014).

- [66] Dilektaşlı, E., “Bazı alaşımli çeliklerin yüksek sıcaklık aşınma davranışına borlama işleminin etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2014).
- [67] Çakır M., “Tek silindirli hava soğutmalı bir motorda borlanmış dökme demir gömleğin motor performans değerleri üzerindeki etkilerinin deneysel araştırılması”, Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, (2013).
- [68] Chegroune., R., Keddani, M., and Abdellah, Z., “Characterization And Kinetics Of Plasma Paste Borided AISI 316 Steel”, *Materiali in Tehnologije*, 50, 263-268, (2016).
- [69] Palombarini, G., Carbucicchio M., “Effects Of Alloying Elements On The Growth Of Iron Boride Coatings”, *Journal of Materials Science Letters*, 6(10) 1147-1149, İtalya, (1997).