



**BORLANMIŞ 430F FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİĞİN
AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mücahit UYAR

Danışman

Doç. Dr. Halil AYTEKİN

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

Haziran 2019

Bu tez çalışması 18.FEN.BİL.24 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BORLANMIŞ 430F FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİĞİN
AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Mücahit UYAR

DANIŞMAN
Doç. Dr. Halil AYTEKİN

METALURJİ ve MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Mücahit UYAR tarafından hazırlanan “Borlanmış 430F Ferritik Paslanmaz Çeliğin Aşınma Davranışı Üzerine Bir Çalışma” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 11/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Halil AYTEKİN

Başkan : Doç. Dr. M. Serhat BAŞPINAR
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Teknoloji Fakültesi.

Üye : Doç. Dr. Halil AYTEKİN
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Teknoloji Fakültesi.

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÇOLAK
Uşak Üniversitesi,
Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu.

İmza



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

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

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

beyan ederim.

11/06/2019



Mücahit UYAR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BORLANMIŞ 430F FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİĞİN AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Mücahit UYAR

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Halil AYTEKİN

Günümüz gelişen dünyasında malzemelerin sürtünmeli ortamlara karşı dirençli olması oldukça büyük önem arz etmektedir. Sürtünme ve aşınma kayıplarını azaltmak için malzemelere çeşitli yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Bu yüzey işlemlerinden biri olan borlama işlemi termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemi olup, borlama sonucu malzemelerin yüzeyinde oluşan nispeten sert bor tabakası sayesinde sürtünme, aşınma ve korozyona karşı dirençli malzeme elde edilebilmektedir. Bu tez çalışmasında, ulaşım ve gıda sektörlerinde sıklıkla kullanılan AISI 430F (ferritik) paslanmaz çeliği, kutu borlama yöntemi ile borlanmış ve borlama sonrası aşınma direnci araştırılmıştır. Ayrıca, borlama işlemi sonucunda oluşan bor tabakaları XRD, Mikrosertlik ve SEM-Optik analizleri yapılarak incelenmiştir. Borlama işlemi ticari Ekabor II bor tozu kullanılarak paslanmaz kutu pota içerisinde 900 °C ve 1000 °C sıcaklıklarda ve 2, 4 ve 6 saat sürelerde gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, incelenen çeliğin yüzeyinde çeşitli bor bileşiklerinin oluştuğu, artan sıcaklık ve zamanla bor tabaka kalınlığının arttığı tespit edilmiştir. Bu artış, çeliğin aşınma direncine olumlu katkı sağlamıştır.

2019, xii + 102 sayfa

Anahtar Kelimeler: 430F Ferritik Paslanmaz Çelik, Borlama, Aşınma, Kaplama, Sertlik.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

A STUDY ON THE WEAR BEHAVIOR OF BORIDED 430F FERRITIC STAINLESS STEELS

Mücahit UYAR

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Halil AYTEKİN

In today's developing world, it is very important that the materials are resistant to friction environments. Various surface treatments are applied to the materials reduce friction and wear losses. The boriding process, which is one of these surface treatments, is a thermochemical surface hardening process. Due to the relatively hard boron layer formed on the surface of the materials, the material resistant to wear and corrosion can be obtained. In this thesis, AISI 430F (ferritic) stainless steel which is frequently used in transportation and food sectors was boronized by the box boriding method and the wear resistance of the steel was investigated after boriding process. Additionally, XRD, microhardness and SEM-Optical analysis of the boride layers were conducted. Boriding process was carried out in stainless steel box using commercial Ekabor II boron powder at temperatures of 900 °C and 1000 °C and for 2, 4 and 6 hours. As a result of the analyzes, it was determined that various boron compounds were formed on the surface of the steel and the boron layer thickness increased with increasing temperature and time. This increase was contributed positively to the wear resistance of the steel.

2019, xii + 102 pages

Keywords: 430F Ferritic Stainless Steel, Boriding, Wear, Coating, Hardness

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Halil AYTEKİN'e, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Proje kapsamında sağladığı maddi imkanlar nedeniyle Afyon Kocatepe Üniversitesi, 18.FEN.BİL.24 numaralı projeyi desteklediği için Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonuna teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım süresince tecrübe ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Arş. Grv. Sinan ATLI, Sayın Ersin DURAK ve Sayın Zekeriya YARIMAY'a teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Mücahit UYAR

AFYONKARAHİSAR, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
RESİMLER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Literatür Özeti	3
2.2. Paslanmaz Çelikler ve Sınıflandırılması	8
2.2.1 Paslanmaz Çeliklerin Üstünlükleri.....	9
2.2.2 Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması.....	10
2.2.2.1 Östenitik Paslanmaz Çelikler.....	12
2.2.2.2 Ferritik Paslanmaz Çelikler	13
2.2.2.3 Martenzitik Paslanmaz Çelik	17
2.2.2.4 Çift fazlı (Dubleks) Paslanmaz Çelikler	18
2.2.2.5 Çökeltme Yoluyla Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler	19
2.3 Borlama ve Borlama Yöntemleri	20
2.3.1 Borlama İşlemi	20
2.3.2 Borlama yöntemleri.....	21
2.3.2.1 Katı (Toz) Ortamda Borlama	22
2.3.2.2 Macun (Pasta) Ortamda Borlama	25
2.3.2.3 Sıvı ortamda Borlama.....	26
2.3.2.4 Gaz Ortamda Borlama.....	27
2.3.2.5 Plazma Borlama.....	28
2.3.3 Bor Tabakası Özellikleri	29
2.3.3.1 FeB ve Fe ₂ B Fazları Özellikleri.....	31

2.3.4. Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulama Alanları.....	32
2.3.5 Bor Tabakasının Avantajları.....	34
2.3.6 Bor Tabakasının Dezavantajları	35
2.4 Aşınma.....	35
2.4.1 Aşınma Çeşitleri	37
2.4.1.1 Adhesiv (Yapışma) Aşınma.....	37
2.4.1.2 Abrasif (Aşındırıcı) Aşınma	38
2.4.1.3 Yorulma aşınması.....	40
2.4.1.4 Eroziyon Aşınma.....	41
2.4.1.5 Korozyon Aşınması.....	41
2.4.2 Aşınmanın Azaltılması İçin Gerekli Önlemler	43
2.4.3 DeneySEL Aşınma Metodları	44
2.4.3.1 Pin-On-Flat Test Yöntemi.....	44
2.4.3.2 Pin-On-Disk Test Yöntemi	45
2.4.3.3 Ball-On-Disk Test Yöntemi.....	46
2.4.3.4 Pin-On-Drum Test Yöntemi	46
3. MATERYAL ve METOT	48
3.1 İncelenen Malzeme	48
3.2 Borlama İşlemi	49
3.3 Ultrasonik Temizleme	51
3.4 XRD Analizi.....	51
3.5 Aşınma Deneyi.....	52
3.6 Profilometre Cihazı ile Aşınma İzi Analizi	53
3.7 SEM ve EDX Analizleri.....	54
3.8 Metalografik İşlemler	55
3.9 Mikrosertlik Analizi.....	58
4. BULGULAR	60
4.1 Borlama İşlemi Uygulanan Parçalar	60
4.2 Metalografik İnceleme ve Karakterizasyon Bulguları.....	61
4.2.1 Ham (Ana) Malzemenin Mikro yapı Görüntüsü	61
4.2.2 Bor Tabaka İÇyapısı	63
4.2.3 Bor Tabakası SEM Mikro Yapısı	67

4.2.4 Bor Tabakası SEM-EDX Analizi	71
4.3 XRD Analizi.....	76
4.4 Mikro Sertlik Ölçümleri	78
4.5 Aşınma Testi	82
5. TARTIŞMA ve SONUÇLAR	92
6. KAYNAKLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ.....	102



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C	Santigrat derece
°K	Kelvin derece
Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alümina
Ar	Argon
B ₂ H ₆	Diboran
B ₂ O ₃	Bor oksit
B ₄ C	Bor karbür
BCl ₃	Bor klorür
C	Karbon
CH ₃	Metil
cm	Santimetre
Co	Kobalt
Cr	Krom
Fe	Fe
Fe ₂ O ₃	Demir III oksit
gr	Gram
H ₂	Hidrojen (Moleküler)
Hf	Hidrojen florür
KBF ₄	Potasyum tetrafloroborat
kg	Kilogram
m	Metre
mm	Milimetre
Mn	Mangan
Mo	Molibden
MPa	Megapascal
N ₂	Azot
Na ₂ B ₄ O ₇	Susuz boraks
Na ₂ CO ₃	Sodyum klorür
NaF	Sodyum florür
Nb	Niobyum
NH ₃	Amonyak
NH ₄ Cl	Amonyak klorür
Ni	Nikel
S	Kükürt
SiC	Silisyum karbür
sn	Saniye
TiC	Tiyanyum karbür
TiN	Titanyum nitrür
W	Volfram
Zn	Çinko
Zr	Zirkonyum

Kısaltmalar

AISI	Amerikan Demir Çelik Endüstrisi
AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
DIN	Uluslararası Alman Standardı
EDX	X-Ray Dağılım Enerji
HMK	Hacim Merkezli Kübik Yapı
Pa	Pascal
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TUAM	Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
V	Volt
XRD	X-Ray Difraktometresi
XRF	X-Ray Floresan
YMK	Yüzey Merkezli Kübik Yapı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Krom içeriğinin paslanmaz çelik içerisindeki görevi	8
Şekil 2.2 Paslanmaz çeliklerin nikel ve krom miktarlarına göre sınıflandırılması (ÇS: Çökelme Sertleşmesi uygulanabilen)	11
Şekil 2.3 Paslanmaz çelik türlerinin mikro yapıları	12
Şekil 2.4 Östenitik paslanmaz çelik mikro yapı görüntüsü.....	13
Şekil 2.5 Ferritik paslanmaz çelik mikro yapı görüntüsü	14
Şekil 2.6 Martenzitik paslanmaz çelik mikro yapısı.....	17
Şekil 2.7 Çift fazlı (ferritik – östenitik) paslanmaz çelik mikro yapısı	18
Şekil 2.8 Katı borlama işleminin şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.9 Plazma borlama yönteminin şematik görüntüsü.....	29
Şekil 2.10 a) tek fazlı FeB tabakası, b) tek fazlı Fe ₂ B tabakası, c) geçiş bölgesi, d)çift fazlı FeB+Fe ₂ B tabakası	31
Şekil 2.11 DIN 50320 normuna göre tribolojik sistem.....	36
Şekil 2.12 Adhesiv aşınma oluşum mekanizması	38
Şekil 2.13 Abrasif aşınmada oluşan iki temel durum.	39
Şekil 2.14 Belirli bir çevrim altındaki bir yüzeyde meydana gelen yorulma aşınması çatlak oluşumları gösterimi	40
Şekil 2.15 Eroziyon aşınma oluşum mekanizmaları	41
Şekil 2.16 Korozyon aşınması etkileşim mekanizmaları	42
Şekil 2.17 Pin-on-flat aşındırma test yönteminin şeması.....	44
Şekil 2.18 Pin-on-disk aşındırma test yönteminin şeması	45
Şekil 2.19 Ball-on-disk aşındırma test yönteminin şeması	46
Şekil 2.20 Pin-On-Drum aşındırma test yönteminin şeması.....	47
Şekil 4.1 İncelenen çeliğin dik kesitinin mikro yapıları, (a) 200 ^X , (b) 500 ^X	62
Şekil 4.2 İncelenen çeliğin çubuk eksenine paralel kesitinin (hadde yönü) mikro yapısı, 200 ^X	63
Şekil 4.3 900 °C’de 2 saat bor tabaka mikro yapısı (a) 200 ^X , (b) 500 ^X	64
Şekil 4.4 900 °C’de 4 saat bor tabaka mikro yapısı (a) 200 ^X , (b) 500 ^X	64
Şekil 4.5 900 °C’de 6 saat bor tabaka mikro yapısı (a) 200 ^X , (b) 500 ^X	65
Şekil 4.6 1000 °C’de 2 saat bor tabakası (a) 200 ^X , (b) 500 ^X	65
Şekil 4.7 1000 °C’de 4 saat bor tabakası (a) 200 ^X , (b) 500 ^X	66
Şekil 4.8 1000 °C’de 6 saat bor tabakası (a) 200 ^X , (b) 500 ^X	66

Şekil 4.9 900 °C’de borlanmış 430F ferritik paslanmaz çeliğinin bor tabakasının SEM mikro yapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.	68
Şekil 4.10 1000 °C’de borlanmış 430F ferritik paslanmaz çeliği bor tabakasının SEM mikro yapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.	68
Şekil 4.11 İncelenen çeliğin bor tabaka kalınlığının sıcaklık ve süre ile değişimi.....	71
Şekil 4.12 900 °C’de borlanmış numunelerin EDX analizleri (a) 2 saat, (b) 4 saat.....	72
Şekil 4.13 900 °C’de 6 saat süreyle borlanmış numunenin EDX analizi.	73
Şekil 4.14 1000 °C’de borlanmış numunelerin EDX analizleri (a) 2 saat, (b) 4 saat.	74
Şekil 4.15 1000 °C’de 6 saat süreyle borlanmış numunenin EDX analizi.	75
Şekil 4.16 900 °C’de borlanmış 430F ferritik çeliğinin XRD grafiği.	76
Şekil 4.17 1000 °C’de borlanmış 430F ferritik paslanmaz çeliğinin XRD grafiği.	77
Şekil 4.18 1000 °C’de 4 saat süreyle borlanmış numune üzerinde mikro sertlik izleri (örnek)	78
Şekil 4.19 430F ferritik paslanmaz çeliğinin bor tabakasının mikro sertlik değişim grafiği.	81
Şekil 4.20 İncelenen 430F ferritik paslanmaz çeliğinin sürtünme katsayıları.	83
Şekil 4.21 Profilometre cihazından elde edilen yüzey görüntüleri (örnek).	85
Şekil 4.22 Ham numunenin aşınma izlerinin SEM görüntüleri	86
Şekil 4.23 900 °C’de borlanmış numunelerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.	87
Şekil 4.24 1000 °C’de borlanmış numunelerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.	88
Şekil 4.25 İncelenen çeliğin kaplama kalınlığı ve aşınma iz derinliği.	89
Şekil 4.26 İncelenen çeliğin aşınma hacmi ve aşınma hızı.	90

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 430F ferritik paslanmaz çeliğin literatür de çekme, akma ve sertlik değerleri.....	16
Çizelge 2.2 430F ferritik paslanmaz çeliğin özellikleri	16
Çizelge 2.3 Pasta borlamada kullanılan koruyucu gazlar ve kimyasal bileşimi	25
Çizelge 2.4 Borlama işlemi uygulanmış çeşitli malzeme fazları ve sertlik değerleri.....	30
Çizelge 2.5 Fe ₂ B ve FeB fazlarına ait özellikler.	32
Çizelge 2.6 Borlama işleminin endüstriyel uygulama alanları.	32
Çizelge 2.7 Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlem görmüş malzemelerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması.....	34
Çizelge 3.1 Deneylerde kullanılan 430F ferritik paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi.	48
Çizelge 4.1 Borlama sonucu oluşan bor tabaka kalınlıkları.....	70
Çizelge 4.2 900 °C’de borlanmış numunelerin mikro sertlik değerleri.	79
Çizelge 4.3 1000°C’de borlanmış numunelerin mikro sertlik değerleri.	80

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 3.1 Deneylerde kullanılan ve işlem görmemiş numune gösterimi.	48
Resim 3.2 Yüzeyleri taşlanmış numuneler	49
Resim 3.3 Borlama işleminde kullanılan paslanmaz çelik pota.....	50
Resim 3.4 Borlama işleminde kullanılan fırın.	50
Resim 3.5 Ultrasonik temizleme cihazı.	51
Resim 3.6 Bor tabakasındaki bor bileşikleri analizinde kullanılan XRD cihazı.	52
Resim 3.7 Aşınma deneyinde kullanılan aşınma cihazı	53
Resim 3.8 Profilometre cihazı.	54
Resim 3.9 Numune yüzeyi ve aşınma izinin üç boyutlu görüntüsü (örnek).	54
Resim 3.10 SEM ve EDX analiz cihazı (LEO 1430 VP model).....	55
Resim 3.11 Hassas numune kesme cihazı.	55
Resim 3.12 Sıcak kalıplama cihazı.	56
Resim 3.13 Sıcak kalıplama yöntemiyle kaplanmış deney numuneleri.	56
Resim 3.14 Zımparalama ve parlatma cihazı.....	57
Resim 3.15 Olympus BX60 marka optik mikroskop.	58
Resim 3.16 Deneyde kullanılan BMS marka mikrosertlik cihazı.	58
Resim 4.1 Ham (borlanmamış) numunenin görüntüsü.....	60
Resim 4.2 900 °C’de borlanmış numunelerin görüntüsü.....	60
Resim 4.3 1000 °C’de borlanmış numunelerin görüntüsü.	61
Resim 4.4 Çubuk eksenine dik ve paralel kesitlerin gösterimi.	61
Resim 4.5 Numunelerin aşınma izi fotoğrafları (a) Ham, (b) 900 °C’de, (c) 1000 °C’de borlanmış	83

1. GİRİŞ

Günümüzde endüstriyel uygulamalarda kullanılan malzemelerde sürtünme ve aşınma problemleri nedeniyle yüzey hasarı oluşmakta ve bu hasar neticesinde malzemeler kullanılamaz hale gelmektedir. Yüzey hasarını en aza indirebilmek ve iyileştirmek için yüzey sertleştirme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında uygulanması kolay olan ve son zamanlarda sıklıkla kullanılan yöntem, borlama yöntemidir. Borlama, yüksek sıcaklıkta ana metalin yüzeyine bor atomlarının termo-kimyasal difüzyon bazlı borür tabakası oluşturulması işlemidir (Zimmerman 2013). Birçok demir, demir dışı ve sermet malzemelere uygulanabilen bir yöntemdir. Borlama ile nitrasyon, sementasyon, karbürizasyon vb. yöntemlere göre yüzeyde daha sert bir tabaka (700-3000 HV) elde edilmektedir (Zimmerman 2013).

Borlama işlemi, yüzeyi hazırlanmış malzemelere 700-1000 °C sıcaklık aralığında 1-12 saat sürelerde katı, pasta, sıvı, gaz ve plazma gibi çeşitli ortamlarda uygulanabilmektedir (Matuschka 1987, Şen 1997, Çalık ve Özsoy 2002, Zimmerman 2013). Kutu borlama endüstride en yaygın olarak kullanılan borlama yöntemidir. Uygulanmasının kolay olması, basit donanım gerektirmesi, düzgün yüzey elde edilmesi, ekonomik, güvenli ve kullanılan toz bileşimin kimyasal kompozisyonunda değişiklik yapılabilmesi, işlem sonrası yüzey temizliğinin kolay olması gibi nedenlerle endüstride en yaygın kullanılan borlama tekniğidir (Özsoy 1991, Meriç vd. 2000).

Paslanmaz çelikler içerdikleri yüksek krom miktarına bağlı olarak gösterdikleri yüksek korozyon direnci sayesinde endüstride oldukça yaygın kullanılan çelik grubudur (Kaluç ve Sarı 1995, Erdoğan 2000). Bu çelikler korozyon dayanımının yanı sıra, imalat kolaylığı, mekanik dayanım, görünüm, sağlıklı olması ve uzun ömürlü kullanım gibi özelliklere sahiptirler (Aran ve Temel 2004). Paslanmaz çelikler, en genel olarak 3 gruba ayrılır. Bunlar östenitik, martenzitik ve ferritik paslanmaz çeliklerdir (Smith 1993, Davis 1994, Odabaş 2004, Baytemir 2011). Östenitik paslanmaz çeliklerden sonra en çok kullanılan paslanmaz çelik grubu ferritik paslanmaz çeliklerdir ve esas olarak % 10.5 – 30.5 krom içeriğine sahiptirler. Her sıcaklıkta ferrit yapıdadırlar (Odabaş 2004). Bu

paslanmaz çelik grubu, gerilmeli korozyon çatlamasına, çukurcuk korozyonuna ve aralık korozyonuna karşı iyi direnç gösterirler (Lippold and Koteckı 2005, Cavazos 2006).

Bu çalışmada AISI 430F ferritik paslanmaz çeliği incelenmiştir. Bu çelik özellikle bağlantı elemanları, dişliler, miller ve piyonlar gibi çeşitli uçak parçaları ve özel vanalar ile yataklar gibi geleneksel mekanik dayanımın yanı sıra aşınma dayanımının da ön plana çıktığı ortamlarda kullanılır. Bununla birlikte kozmetik için karıştırıcılar ve sprey kutular gibi kullanım alanları da mevcuttur (İnt.Kyn.2, İnt.Kyn.3). Ayrıca söz konusu çeliğin, AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğinden farkı, çeliğe eklenen kükürt (S) elementidir. Bu element çeliğin mukavemetini nispeten düşürse de onun talaş kaldırma ile şekillendirilmesini kolaylaştırmaktadır (Daurelio 1998, Avalos 2009). Literatürde AISI 430 çeliğinin borlanması ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Ancak, bu çalışmada incelenen AISI 430F ile ilgili herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca bu çeliğin aşınma direnci de araştırılmamıştır. Bu çalışmada AISI 430F ferritik paslanmaz çeliğine 900 ve 1000 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat sürelerle borlama işlemi uygulanıp, borlama işleminin çeliğin aşınma direnci üzerine etkisi araştırılmıştır. Borlama işlemi sonucunda yüzeyde oluşan bor tabakasının XRD, SEM, ve optik mikroskop analizleri yapılmıştır. Ayrıca, yüzeyden matrise doğru kaplama kalınlığı boyunca sertliğin değişimi ve çeliğin aşınma direnci saptanmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Literatür Özeti

Aşağıdaki literatür taramasında özellikle paslanmaz çelikler üzerine yapılmış yüzey işlemleri ile ilgili çalışmalar özetlenmiştir. Ayrıca farklı malzemeler üzerinde borlama işleminin sonuçları da paylaşılmıştır.

Zong ve diğerleri “Borlanmış AISI 440C Martenzitik Paslanmaz Çeliğin Özellikleri ve Aşınma Performansı” isimli çalışmalarında, çeliğe 1123, 1173, 1223 ve 1323 K sıcaklıklarda 2, 4, 6 ve 8 saat boyunca borlama işlemi uygulamışlar ve bor tabakasını optik mikroskop, XRD ve Mikro-Vickers sertlik test cihazı ile test etmişler. Bor tabakasının düzgün ve düzenli bir morfoloji sergilediğini bulmuşlardır. İşlem sıcaklığı ve süresine bağlı olarak bor tabaka kalınlıklarını 9.3 ile 97.2 μm arası bulmuşlardır. XRD analizi sonucu bor tabakasında FeB, Fe₂B, CrB varlığını tespit etmişlerdir. Yüzey sertliğini 1730-2080 HV005 arası bulmuşlardır. Sürtünme katsayısı 0.41'den 0.32'ye düştüğünü ve aşınma ağırlığı kaybı, borlama işleminden sonra% 82.97 azaldığını gözlemlemişlerdir. Bor tabakasının aşınma direncini önemli ölçüde artırabileceğini tespit etmişlerdir (Zong *et al.* 2018).

Alphonsa ve diğerleri yaptığı araştırmalarında, 430F paslanmaz çeliğinin sertlik ve korozyon direnç özelliklerini iyileştirmek için farklı sıcaklıklarda plazma nitrürleme ve nitrokarbürizasyon yöntemlerini 4 saat boyunca 350 ile 500 °C sıcaklıklar arasında uygulamışlardır. Plazma nitrürleme işlemindeki nitrid tabaka kalınlığının, nitrokarbürizasyona kıyasla kalın olduğunu bulmuşlardır. Nitrokarbürizasyon sertlik değeri, plazma nitrürlemeye kıyasla daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Uygulanan iki yöntemde de korozyona karşı direnç elde etmişlerdir. Ancak, 400 °C'de 4 saatlik uygulamada optimum sertlik ve korozyon direnci gözlemlemişlerdir (Alphonsa *et al.* 2018).

Aytekin ve Akçin yaptıkları araştırmalarında, yüksek korozyon direncine sahip Incoloy 825 alaşımlı çeliğine borlama işlemi uygulayarak, sertliğini artırmayı amaçlamışlardır.

Borlama işlemini, kutu borlama yöntemi ile 900 ve 950 °C’de 2, 4 ve 6 saat sürelerle gerçekleştirmişlerdir. Borlama ile meydana gelen bor tabaka kalınlığı sıcaklık ve süre ile arttığını tespit etmişlerdir. Bor tabaka kalınlığının işlem sıcaklığına ve süresine bağlı olarak 35 ila 170 µm arasında değişmekte olduğunu bulmuşlardır. XRD analizleri neticesinde FeB, Fe₂B, CrB ve NiB fazları varlığını tespit etmişler ve bu fazların rastgele dağılım gösterdiklerini bulmuşlardır. Mikro sertlik kaplama kalınlığı boyunca (matrise doğru) azaldığını ve 600 ila 2200 HV arasında değiştiğini tespit etmişlerdir (Aytekin ve Akçin 2013)

Güneş ve Yıldız beraber yaptığı çalışmalarında, AISI 310 ve AISI 430 paslanmaz çeliklerini kutu borlama tekniği ile 850, 950 ve 1050 °C sıcaklıklarda, 2, 4 ve 6 saat sürelerde borlama işlemi uygulamışlar. Sonrasında bor tabakasının optik mikroskop, XRD ve mikro Vickers sertlik test cihazı ile karakterize etmişlerdir. Malzeme yüzeyinde oluşan bor tabakasında FeB, Fe₂B, CrB, Cr₂B, NiB ve Ni₂B varlığı tespit etmişlerdir. Çeliklerin kimyasal içeriklerine bağlı olarak AISI 310’da 50,48 µm ve AISI 430 çeliğinde 91.62 µm bor tabaka kalınlıkları gözlemlemişlerdir. AISI 310 çeliğin mikro sertlik değerlerini 1658-2284 HV_{0,1} arası, AISI 430 çeliğinin mikro sertlik değerlerini ise 1762-2165 HV_{0,1} arası değerler olarak bulmuşlardır (Güneş ve Yıldız 2015).

Uzun, yapmış olduğu araştırmasında, Ç1040 çeliğine farklı sıcaklık ve sürelerde borlama işlemi uygulamıştır. borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımlarının araştırılması konusu üzerine çalışma yapmıştır. Borlama işlemini 950 ve 1000 °C sıcaklıklarda 3 ile 5 saat sürelerle gerçekleştirmiştir. Bor kaynağı olarak susuz boraks kullanmıştır. Bor tabakasının dişli bir yapıya sahip olduğunu gözlemlemiştir. Sıcaklığın ve sürenin artmasıyla bor tabaka kalınlığının da arttığını saptamıştır. Korozyon deneylerine tabi tutulan borlanmış numune, borlanmamış numuneye oranla yaklaşık 8 kat daha fazla korozyon dayanımının olduğunu bulmuştur. Aşınma deneylerine tabi tutulan borlanmış numunenin borlanmamış numuneye göre aşınma dayanımının 6 kat daha yüksek olduğunu bulmuştur (Uzun 2002).

Sağlam, yapmış olduğu yüksek lisans tezinde “Çelik Dişli Sondaj Matkaplarının Borlama Yöntemi ile Takım Ömrünün Uzatılması” başlığıyla çalışma yapmıştır. Borlama işlemini

1000 °C’de 30, 45, 60, 75, 90 ve 105 dk gibi geleneksel borlama yöntemlerine kıyasla malzeme yüzeyini daha kısa sürede Nano bor tozu ile kaplamıştır. Borlanan numuneler, optik mikroskop, SEM, X-ışını, mikrosertlik ve mikro abrasyon aşınma testleri uygulanmıştır. Sonrasında herhangi bir işlem uygulanmayan numune ile kıyaslamıştır. XRD analizleri sonucunda borür tabakalarında FeB, Fe₂B, CrB Cr₂B, NiB fazlarının varlığını tespit etmiştir. Borlama işlemi sonucunda, borlama süresinin artmasıyla borür tabaka kalınlıkları ve sertlik değerlerinde artışlar gözlemlenmiştir. Borlama işlemi yüzey sertliğini yaklaşık 5 kat arttırdığını ve aşınma deneyleri sonucunda borlama süresi ve sertlik artışına paralel olarak aşınma direncinin arttığını gözlemlenmiştir (Sağlam 2016).

Krelling ve diğerleri, AISI 1020 çeliğine 1000 °C’de 4 saat borlama işlemi uygulamışlardır. Oluşan bor tabakasına X ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Knoop mikro sertlik testi uygulamışlardır. Bor tabakasına sabit bilya ile yük altında mikro aşınma testi uygulanmış ve aşınma deneylerinde silisyum karbür (SiC) aşındırıcı tozları kullanmışlardır. XRD analizi sonucunda borlanmış numuneler üzerinde Fe₂B fazının varlığını ortaya çıkarmıştır. Demir kaynaklı bor tabakası kalınlığı 177 µm ve 2100 HK0.01 sertliğine sahip olduğunu saptamışlardır. Borlanmış numuneler için aşınma mekanizması, yuvarlanma aşınmasına maruz kalırken, işlem görmemiş numunelerde mikro yuvarlanma ile yiv açma işlemi meydana geldiğini gözlemlenmiştir (Krelling *et al.* 2017).

Özbek ve diğerleri, AISI 316L paslanmaz çelik implantların borlama karakterizasyonuna bakmışlardır. Borlama işlemini 850, 900, 950 ve 1000 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat sürelerle, boraks, borik asit ve ferro-silikondan oluşan tuz banyosu kullanılarak uygulamışlar. İşlem sıcaklık ve süresine bağlı olarak bor tabaka kalınlığının 5 ila 40 µm arasında değiştiğini gözlemişlerdir. Sertlik analizleri sonucu bor tabakası yüzeyinde 1500HV den fazla sertlik değerleri elde ettiklerini görmüşlerdir. Oluşan bor tabakasının XRD analizi sonucu Fe₂B, CrB, Ni₃B varlığı tespit etmişlerdir. SEM incelemelerinden sonra bor tabakasının kompakt ve pürüzsüz bir morfolojiye sahip olduklarını gözlemlenmişlerdir. EDX analizinde nikel elementinin kaplama altındaki ana metalin içinde yoğunlaştığını, krom ve manganın ise Fe₂B ve FeB’deki demir yerine tercihen kaplamalara girdiğini gözlemlenmişler (Özbek vd. 2002).

Kayalı ve diğerleri, mikrodalga borlama işleminin AISI P20 çeliğinde oluşan bor tabakasının korozyon ve aşınma davranışına etkisini incelemişlerdir. Borlama işlemini, Ekabor II tozları kullanılarak 2, 4 ve 6 saat boyunca 800, 850 ve 900 °C sıcaklıklarda uygulamışlar. Oluşan bor tabakasını karakterize etmek için, elektron ve optik mikroskopu, X-ışını kırınımı ve sertlik ölçümleri kullanmışlardır. Korozyon davranışını 1M NaCl çözeltisinde, aşınma davranışını ise Ball-On-Disc yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Testler sonucunda bor tabakasının FeB, Fe₂B, CrB ve MnB fazlarını içerdiği bor tabaka kalınlığının, borlama zamanının ve sıcaklığın artışıyla etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Borlama işlemi, yüzey sertliğini artırıp sürtünme katsayısını azaltarak aşınma direncine olumlu katkıda bulunduğu sonucuna varmışlardır (Kayalı vd. 2018).

Keddam ve diğerleri, AISI 440C paslanmaz çeliğine plazma borlama işlemi uygulayıp, karakterizasyonu ve difüzyon kinetiğini araştırmışlardır. Plazma borlama işlemini, boraks macunu kullanılarak %70 H₂ ve %30 Ar gaz karışımı içinde, 700, 750 ve 800 °C sıcaklıklarda 3, 5 ve 7 saat boyunca uygulamışlar. Bor tabaka kalınlığının 7 ila 25,6 µm arasında değiştiğini ve yumuşak bir morfolojiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Uyguladıkları XRD analizi neticesinde bor tabakasında FeB, Fe₂B, CrB ve Cr₂B fazları varlığını gözlemlemişlerdir. Bor aktivasyon enerjisini 134.62 kJ mol⁻¹ olarak bulmuşlardır (Keddam *et al.* 2016).

Küçükkurt, yapmış olduğu “Borlanmış AISI M35 ve AISI M42 Çeliklerinin Karakterizasyonu ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” adlı yüksek lisans tez çalışmasında, AISI M35 ve AISI M42 yüksek hız takım çelikleri kutu borlama tekniği ile 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat sürelerince borlama işlemi uygulamıştır. Borlanan numunelere XRD, SEM ve mikro sertlik analizlerini gerçekleştirmiştir. Analizler sonucunda ana malzeme yüzeyinde çeşitli bor bileşikleri oluştuğunu ve artan sıcaklık ile sürelerin beraberinde bor tabaka kalınlığının arttığını tespit etmiştir. Artışın çeliklerin aşınma direncine olumlu yansıdığını bulmuştur. Mikro sertlik ölçümleri sonucunda 324 ila 1792 HV arası değiştiğini tespit etmiştir (Küçükkurt 2015).

Bakır-nikel ve demir-kükürt alaşımlarının yağsız ortamda sürtünmesi tipik bir katı çözelti alaşımının ve tipik bir iki fazlı alaşımının sürtünme özelliklerini belirlemek için havada ve vakumda pin-on-disk makinesi ile incelenmiştir. Demir sülfür alaşımlarının çelik levhalar üzerindeki sürtünmesi, demir sülfür filminin yapısına bağlı olarak azalır veya artar. Demir-kükürt alaşımları çeşitli çelikler üzerinde “daha küçük” bir yüzey oluşturduğunda, demir sülfürün hem havada hem de vakumda bir kayganlaştırıcı olarak işe yaramaz olduğunun ve hatta sürtünmeyi artırdığının sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte, işlemsiz bir çeliğe karşı sürtünen “daha büyük” yüzeydeki sürekli bir demir sülfür filmi, hem vakumda hem de havada düşük sürtünme göstermektedir (Fehling and Sarkar 1969).

Sürtünme, aşınma ve kaynak özellikleri, yüzde 0,4 ila 0,5 kükürt ilaveli ve ilavesiz 52100, 440-C paslanmaz çelik ve M-2 takım çeliği üzerinde araştırılmıştır. 52100, 440-C ve M-2'ye yüzde 0,4 ila 0,5 kükürt eklenmesi, normal olarak bu alaşımlarla vakum içinde karşılaşılan sürtünmeyi, aşınmayı ve kaynağı azaltmıştır (Buckley and Johnson 1964).

2.2. Paslanmaz Çelikler ve Sınıflandırılması

Paslanmaz çelikler üstün özelliklerinden (yüksek korozyon direnci, işlenebilirlik, güzel görünüm ve sağlık açısından uygunluk vb.) dolayı endüstride yaygın kullanım alanına sahiptir. Paslanmaz çeliklerin temelini demir-krom sistemi oluşturmaktadır. Paslanmaz çelik, en az %10,5 krom içeren bir demir alaşımıdır. Krom, çeliğin yüzeyinde pasif ince bir oksit tabakası üretir. Bu durum, malzeme yüzeyinin daha fazla paslanmasına ve korozyona uğramasına karşı yüksek direnç sağlar, malzemeye parlak bir görünüm kazandırır. Kimyasal bileşiminde karbon, silisyum ve manganez içerir. Nikel ve molibden gibi diğer elementler, gelişmiş şekillendirilebilirlik ve artan korozyon direnci gibi başka faydalı özellikler kazandırmak için eklenebilir (Odabaş 2004).



Şekil 2.1 Krom içeriğinin paslanmaz çelik içerisindeki görevi (Odabaş 2004).

Çeliğin içeriğindeki kromun koruyucu etkisi, krom ile oksijen arasındaki güçlü kimyasal birleşme eğiliminden ileri gelmektedir. Krom içeren çeliklerin yüzeyleri bir krom oksit tabakası ile örtülü olmadıkları sürece korozyona ve özellikle oksidasyona karşı çok hassastırlar (Dallas 2003).

Paslanmaz eliklerin içerisindeki krom, hacim merkezli kübik (HMK) yapıya sahiptir. Demir karbon denge diyagramında yüzey merkezli kübik (YMK) kristal kafes yapısına sahip östenitik bölge, 1000  C sıcaklığında % 12 kadar krom çözünürlüğüne sahiptir. Eğer yapıda % 12'den fazla krom içeriği olursa demir krom alaşımları YMK'dan HMK'ya dönüşüm göstermezler (Aran ve Temel 2004).

2.2.1 Paslanmaz eliklerin stnlkleri

Paslanmaz elikler üstün özellikleri neticesinde endüstrilerde tercih edilme sebepleri oldukça fazladır. Korozyon dayanımı, yüksek ve düşük sıcaklıklara dayanımın yanı sıra aşağıda verilen özelliklerde tercih edilme sebepleridir (Aran ve Temel 2004).

İmalat kolaylığı

Paslanmaz eliklerin çoğunluğu kolayca kesilebilir, kaynaklanabilir, şekillendirilebilir, işlenebilir ve imal edilebilir (Aran ve Temel 2004).

Mekanik dayanım

Birçok paslanmaz çeliğin soğuk şekillendirme özellikleri ile sertleşir ve pekleşir. Bu durum dayanımın artmasına neden olur. Mekanik dayanımı artırmak, malzeme kalınlıklarını ve ağırlığı azaltmak, maliyeti düşürmek için kullanılabilir. Bazı paslanmaz çelikler de ısıl işlem uygulanarak çok yüksek mukavemetli bileşenler yapmak mümkündür (Aran ve Temel 2004).

Yüksek ve düşük sıcaklıklara dayanım

Bazı paslanmaz elik türlerinde, yüksek sıcaklıklarda dahi tufallenme ve malzemenin mekanik dayanımında önemli bir düşme görülmez. Bazı türleri ise çok düşük sıcaklıklarda dahi gevrekleşmezler ve tokluklarını korurlar (Aran ve Temel 2004).

Korozyon dayanımı

Tüm paslanmaz çelikler içeriğindeki krom ve diğer elementler sayesinde korozyona karşı direnç gösterirler. Yüksek ve düşük alaşımlı kaliteler atmosfer koşullarında korozyona dayanır. Çoğu sıcaklıkta, alkali çözeltilerde ve klorürlü ortamlarda, yüksek sıcaklıklarda ve basınçlarda korozyona dayanır (Aran ve Temel 2004).

Görünüm

Paslanmaz çelikler kullanım alanlarına göre çeşitli yüzey kalitelerinde temin edilebilirler. Bu yüzeylerin bakımı kolay olmasından dolayı, çeliğin görünümü ve kalite özellikleri uzun süreler korunabilir (Aran ve Temel 2004).

Hijyenik özellik

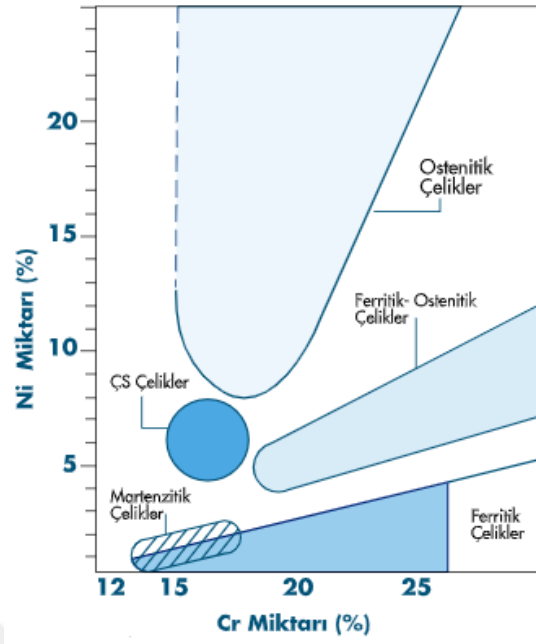
Paslanmaz çeliğin sağlıklı ve temizlenebilir olması hastanelerde, mutfaklarda, yiyecek ve ilaç işleme tesislerinde yaygın olarak kullanılmasını sağlar (Aran ve Temel 2004).

Uzun ömür

Paslanmaz çelikler dayanıklı, az bakım gerektiren ve uzun ömürlü bir malzemedir. Tüm bunlar dikkate alındığında maliyet karşılaştırmasında genellikle en ekonomik seçimdir (Aran ve Temel 2004).

2.2.2 Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması

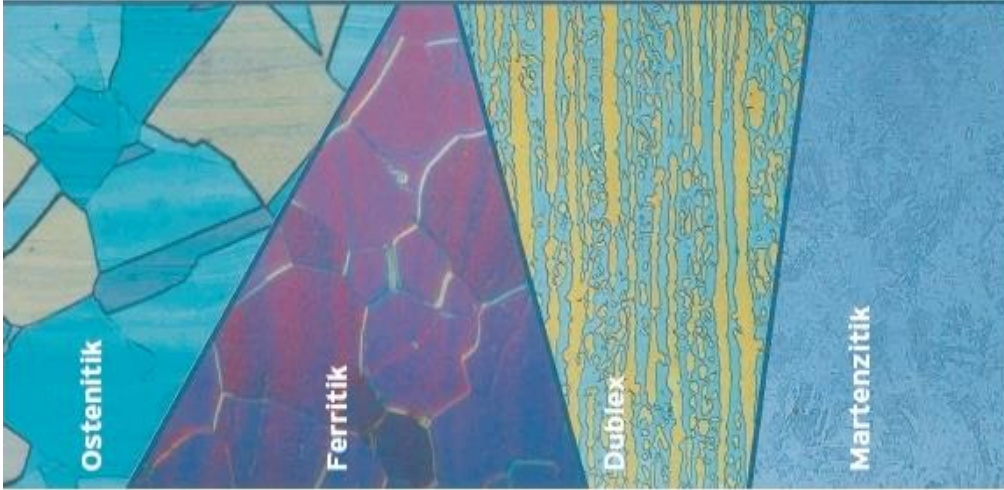
Paslanmaz çelikler Fe- Cr- Ni alaşımlarıdır. İçerdikleri alaşım elementleri artırılarak veya azaltılarak farklı sınıf (tür) paslanmaz çelikler elde edilebilir. Aşağıdaki Şekil 2.2’de krom ve nikel miktarına bağlı olarak yapılan 5 ana sınıflandırma verilmiştir.



Şekil 2.2 Paslanmaz çeliklerin nikel ve krom miktarlarına göre sınıflandırılması (ÇS: Çökelme Sertleşmesi uygulanabilen) (Aran ve Temel 2004).

Paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimi değiştirilerek farklı özelliklere sahip alaşımlar elde edilebilir. Paslanmaz çelik türlerindeki katkı elementlerinin farklı olması veya farklı oranlarda bulunması paslanmaz çeliklerin fiziksel özelliklerinin de farklı olmasına sebep olur. Krom miktarı yükseltilerek, nikel ve molibden gibi alaşım elementleri katılarak malzemenin korozyona karşı olan dayanımı artırılabilir. Bunun dışında bakır, titanyum, alüminyum, silisyum, niyobyum ve selenyum gibi bazı alaşım elementleri ile başka olumlu etkiler sağlanabilir. Paslanmaz çeliklerde içyapıyı belirleyen en önemli alaşım elementleri, önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangandır (Baytemir 2011).

Paslanmaz çeliklerde alaşım elementleri, sınıflandırma ve içyapıyı belirlemede en önemli etmendir. En önemli alaşım elementleri ise önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangandır. Krom ve Nikel içyapının ferritik veya östenitik olmasını belirler. Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılmasına ilişkin mikroyapıları Şekil 2.3’de gösterilmiştir (Aran ve Temel 2004).



Şekil 2.3 Paslanmaz çelik türlerinin mikro yapıları (Aran ve Temel 2004).

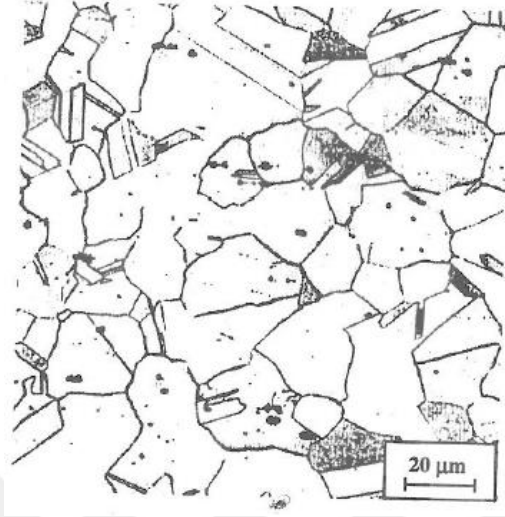
Bunların yanı sıra çökelme sertleştirilmesi uygulanabilen olmak üzere beş ana grupta toplanabilir.

Şekil 2.3’de gösterilen dört grup, alaşımların karakteristik mikro yapısına dayanmaktadır. Paslanmaz çelikte mevcut olabilen fazlar, martenzit, ferrit ve östenittir. Dupleks paslanmaz çelikler yaklaşık olarak %50 östenit ve %50 ferrit içermektedir. Çökelme sertleştirmeli kaliteler ise, çökelme sertleştirilmesi (yaşlandırma ısı işlemi) ile oluşturulmasından dolayı bu şekilde adlandırılmaktadır (Davis 1994, Baytemir 2011).

2.2.2.1 Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler, Fe-Cr sisteminde östenit faz alanını oda sıcaklığına genişleten Ni ve Mn gibi alaşım elementlerinin eklenmesiyle geliştirilmiştir. % 16-26 Cr, % 8-30 Ni ve çeşitli diğer alaşım ilaveleriyle çok sayıda östenitik paslanmaz kaliteler mevcuttur. En yaygın kaliteler, 300 serisi alaşımları olarak bilinir. Örneğin, 304 ve 316 türleridir (Odabaş 2004). Östenit paslanmaz çelikler yüksek oranda krom, nikel, mangan ve düşük miktarda karbon içeren manyetik olmayan paslanmaz çelik türüdür. Şekillendirilebilme ve korozyona karşı dayanıklılıklarıyla bilinen östenitik paslanmaz çelikler, endüstride en yaygın kullanılan paslanmaz çelik sınıfıdır. Yüzey merkezli kübik (YMK) kafes yapısına sahiptirler. YMK kafes yapısını oda sıcaklığı ve yüksek

sıcaklıklarda koruyabilmektedirler. Isıl işlemle sertleştirilemezler. Şekillendirilebilme, süneklik ve tokluk gibi özellikleri düşük sıcaklıkta bile mükemmeldir (Erdoğan 2000).



Şekil 2.4 Östenitik paslanmaz çelik mikro yapı görüntüsü (Savaşkan 2007).

Östenitik paslanmaz çelikler başlıca özelliklere sahiptirler ve bunlar;

- Mükemmel korozyon dayanımı
- Mükemmel kaynak edilebilme kabiliyetleri
- Kolay şekillendirilebilme
- Hijyenik, temiz ve bakımları kolaylığı
- Düşük ve yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere sahip olması
- Tavlınmış olduklarında manyetik olmayışı
- Dayanımları sadece pekleşme ile artırılabilme özelliklerine sahipliği şeklinde sıralanabilir (Smith 2000).

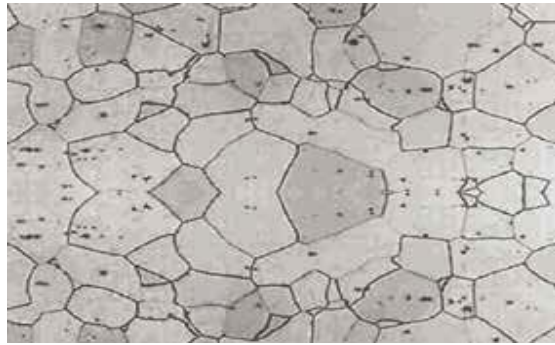
2.2.2.2 Ferritik Paslanmaz Çelikler

Tüm paslanmaz çelik kalitelerinin yaklaşık %20'si ferritik bir mikro yapıya sahiptir. İçeriğinde %11-28 arasında krom içeren gruptur. Endüstride 400 seri sınıfı olarak bilinirler ve 430 en sık kullanılan ferritik paslanmaz çelik türüdür (Krysiak et al. 1993). Krom oranının yüksek olmasından dolayı yüksek korozyon direnci sağlarlar. Hacim merkezli kübik (HMK) kafes yapısına sahip olduklarından manyetik özellik sergilerler.

Sünekliklerinin azlığı, çentik hassaslıkları ve düşük kaynaklanabilirlik özelliklerinden dolayı kullanım alanları östenitik paslanmaz çeliklere göre daha sınırlıdır. İçyapılarını ve mekanik özelliklerini ısıtma işlemleriyle değiştirmek mümkün değildir. Gerilmeli korozyon çatlaması, çukurcuk korozyonu ve aralık korozyonuna karşı iyi direnç gösterirler (Cavazos 2006).

Ferritik paslanmaz çelikler, Mo ve Si gibi alaşım elementleri ile birlikte ağırlıkça %16-30 arası Cr içeren demir-krom alaşımlarıdır. Bunlar, ferrit fazını bütün sıcaklıklarda bir hacim merkezli kübik yapıyı dengelemek ve korozyon direnci gibi özellikleri geliştirmek üzere ilave edilir (Kuzucu vd. 1998). Ferritik paslanmaz çelikler, korozyona dirençli, düşük maliyet ve işlenebilirlik özellikleri sergilerler. Bu sayede, otomobil egzoz borularında, iç, dış dekorasyonda, mutfak gereçlerinde, gıda endüstrisinde, otomotiv endüstrisinde, petrokimya ile kimya endüstrilerinde ve diğer fonksiyonel uygulamalarda giderek daha fazla kullanılmaktadır (Moustafa *et al.* 2000).

Genel olarak, ferritik paslanmaz çelikler, yüksek krom ve düşük karbon içeriği ile karakterize edilir. Düşük krom seviyeleri ve düşük nikel seviyeleri nedeniyle daha ucuzdurlar. Ferritik çelikler, östenitik çelikler kadar tokluğu yüksek ya da korozyona dayanıklı olmasa da, üstün kaynaklanabilirlik ve mühendislik özellikleri ile tanımlanırlar. Isıl işlemle sertleştirilemezler ancak soğuk işlem için uygundurlar (İnt.Kyn.1).



Şekil 2.5 Ferritik paslanmaz çelik mikro yapı görüntüsü (Aran ve Temel 2004).

Genelde içerdikleri yüksek krom oranı, ferritiklere çok yüksek bir korozyon direnci sağlar. Daha çok karbonlu çeliklerin özelliklerine yakın mekanik ve fiziksel özelliklere

sahip olan ferritik paslanmaz çelikler, östenitiklerin tersine manyetikler, düşük karbon içerikleri nedeniyle ısıtılma işlemi tabii tutulamazlar ve kolayca haddelenebilirler. Bu tür çeliklere tek uygulanabilen ısıtılma işlemi tavlama işlemidir. Östenitik paslanmaz çeliklerden daha yüksek akma dayanımına ve daha düşük sünekliğe sahiptirler (Mohandas *et al.* 1999).

Ferritik paslanmaz çeliklerde, parça kalınlığının darbe tokluğu üzerine önemli bir etkisi vardır. Soğutma hızı hassasiyetine sahiptirler. Aynı zamanda soğutma hızına bağlı olarak, karbür ve nitrür çökelmeleri tane sınırı boyunca aynı hızda, matriste ise rastgele dağılım sergilerler. Bu yüzden, tane boyutu, süneklik ve tokluk açısından önemli bir faktördür (Krysiak *et al.* 1993).

Bu çelikler, yüzey işlemi uygulanmadan aşınmaya karşı direnç gerektiren koşullarda sık kullanılmazlar. Çünkü östenitik ve martensitik paslanmaz çelik sınıflarına göre daha yumuşaktırlar (Alphonsa *et al.* 2018).

Ferritik paslanmaz çeliklerin başlıca özellikleri şu şekildedir:

- Orta ila iyi derecede olan korozyon direnci, krom miktarının artması ile iyileşir.
- Isıl işlemle dayanımları artırılmaz ve sadece tavlama durumunda kullanılırlar.
- Manyetikler.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri düşüktür.
- Östenitik paslanmaz çelikler kadar kolay şekillendirilemezler.

AISI 430F kalite ferritik paslanmaz çelik

İçerdiği yüksek kükürt miktarı nedeniyle, ASTM 430 paslanmaz çelikten ayrılırlar. Kükürt (S) miktarının yüksek olması işlenebilirliğinin iyi olmasını sağlamıştır (Daurelio *et al.* 1998). Ancak kaynaklanabilirlik kötü yönde etkilenmiştir. AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğe göre AISI 430F kalite paslanmaz çelik genellikle otomatik vidalı makinelerde kullanılmak üzere çubuk şeklinde kullanılır.

Çizelge 2.1 430F ferritik paslanmaz çeliğin literatür de çekme, akma ve sertlik değerleri (İnt.Kyn.2).

Mekanik özellikler	Değerler
Çekme mukavemeti	430-630 MPa
Akma mukavemeti (%0,2)	≥ 250 MPa
Sertlik, Brinell (HB)	≤ 200

430F ferritik paslanmaz kalite malzeme oldukça parlak bir görünüşe sahip olmalarının yanı sıra, genelde ulaşım araçlarında, elektronik ekipmanlarda, gıda ve gıda üretim tesislerinde, dekorasyonlarda, otomatta işlenecek su ve buhar için cıvata, mil, burçlarda, bağlantı elemanları, dişliler, miller ve piyonlar gibi çeşitli uçak parçalarında başarıyla kullanılır. Özel vanalar ve yataklar, kozmetik için karıştırıcılar, spreyleyler, ısı eşanjörleri, ölçüm aletleri gibi parçalarda da kullanılmaktadır. Gözenekliliğinden dolayı yüksek basınçlı gaz veya sıvı ihtiva etmek için kullanılmamalıdır. Aşağıdaki Çizelge 2.2’de 430F ferritik paslanmaz çelik özellikleri verilmiştir (İnt.Kyn.2, İnt.Kyn.3).

Çizelge 2.2 430F ferritik paslanmaz çeliğin özellikleri (İnt.Kyn.2).

Ana tasarım Özellikleri	
İşlenebilirlik	Kükürt ilavesi nedeniyle mükemmel işlenebilirliğe sahiptir. İşlenebilirlik açısından 303 kaliteden bile daha iyi işlenebilirliğe sahiptir. Neredeyse bir otomat çeliği kadar rahat işlenebilmektedir.
Kaynak Yapılabilirliği	Yüksek kükürt içeriğinden dolayı malzeme kaynak için uygun değildir. Eğer kaynak yapılması gerekiyorsa düşük ısı ayarları ve dolgu metali kullanılmalıdır.
Korozyon dayanımı	İçerdiği yüksek kükürt oranından dolayı korozyona dayanımı düşüktür. Korozif ortamlarda paslanma olabilir.
Mıknatıslanma	Mıknatıs çeker

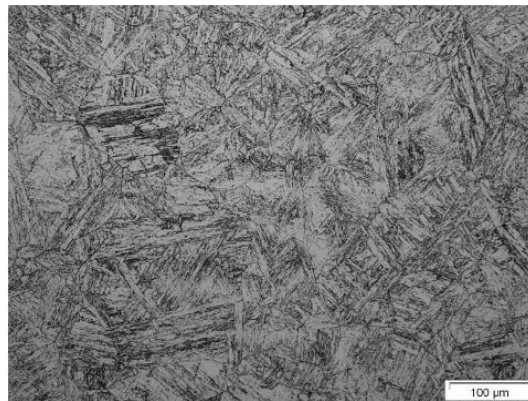
2.2.2.3 Martenzitik Paslanmaz Çelik

Martenzitik çelikler, yüksek sıcaklıklarda sahip oldukları yüzey merkezli kübik kafese sahip östenitin, hızlı soğutma sonucu hacim merkezli tetragonal kafese sahip martenzit yapıya dönüşümü ile elde edilir. Martenzitik paslanmaz çelikler % 11-18 Cr, % 1.2'ye kadar C ve düşük miktarlarda Mn ve Ni içerir (İnt.Kyn.1).

Çelikler yüksek sıcaklığın yanı sıra karbon miktarı %0,1 den artmaya başladıkça östenitik içyapı özelliği kazanırlar. Çeliğin türüne göre bu işlemin ısısı 950-1050°C arasında değişim gösterir (Aran ve Temel 2004). Östenitleme sıcaklığını yakalamış olan çeliğe su verildiğinde martenzitik içyapıya sahip bir çeliğe dönüşür. Bu dönüşmüş çeliğin içyapısına bakıldığında tavlanmış durumda bulunan ferritik faz gözlemlenir.

Karbon yüzdesi, dayanım ve sertlik doğru oranda artış gösterir. Karbon miktarı ne kadar artarsa östenit bölge o kadar artar ve martenzitli paslanmaz çeliklerin ısısı 1000-1100 °C kadar yükseltip östenitlenir. Sonrasında su verilerek sertleştirilebilir.

Martenzitik paslanmaz çeliklerin başlıca kullanım yerleri, pimler, cerrahi dişçilik aletleri, valfler, bağlantı elemanları olabilirken, düşük karbon oranına sahip olan çelikler türbinlerde kullanılır. Paslanmaz çelik martenzitik içyapıya dönüşürken kritik soğuma hızının düşük olması korozyon direncini artırır. 815 °C'ye kadar korozyon dirençlerini yitirmezler. Ancak uzun süre yüksek ısıya maruz kaldığında korozyon başlangıcı olur bu sebeple 700 °C'nin üzerinde endüstriyel alanda kullanılamaz (Çelik 2006).



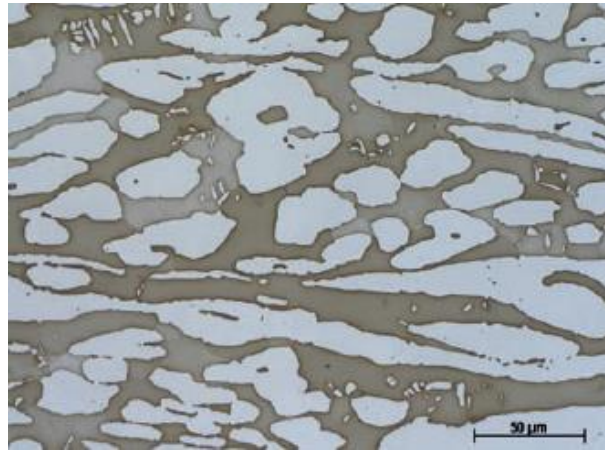
Şekil 2.6 Martenzitik paslanmaz çelik mikro yapısı.

2.2.2.4 Çift fazlı (Dubleks) Paslanmaz Çelikler

Dubleks paslanmaz çelikler, %50 östenit ve %50 ferrit fazları içeren bir içyapısına sahip paslanmaz çelik grubudur. Kimyasal bileşimlerinde %22-25 Cr, %5-7 Ni, %4 'e kadar Mo, bakır ve azot ilaveleri içerir. İçeriğindeki çift fazdan (östenit ve ferrit) dolayı diğer gruplara nazaran üstün özellik ve iyileştirilmiş özellikler sergilerler (Gooch 1992). Diğer paslanmaz çelik sınıfları gibi AISI 200, 300 veya 400 grupları kapsamına girmez.

Çift fazlı olmaları, ferritik ve östenitik paslanmaz çeliklerin faydalı özelliklerini çoğunu birleştirir. Ayrıca çift yönlü mikro yapıları yüksek güç ve stres korozyon çatlağına karşı yüksek direnç sağlar. Malzeme toklukları ferritik çeliklerinkinden daha yüksektir. Ancak, östenitik çeliklerinkinden daha düşüktür ve kuvvetleri (tavlanmış) östenitik çeliklerinkinden yaklaşık iki kat daha yüksektir (Gooch 1992).

Dubleks paslanmaz çelikler iyi derecede mekanik ve korozyon özellikleri sebebiyle ve kaynak kabiliyetlerinin iyi olması sebebiyle deniz suyu, tuzlu su ortamları, ısı değiştiriciler, basınçlı kaplar, kimya endüstrisi ve petrokimya tesisleri genel kullanım alanlarıdır (Kaluç ve Sarı 1995).



Şekil 2.7 Çift fazlı (ferritik – östenitik) paslanmaz çelik mikro yapısı (Aran ve Temel 2004).

2.2.2.5 Çökelme Yoluyla Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler

Çökelme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çeliklerin geliştirilip ihtiyaçları karşılaması 1940'lı yıllara dayanır. Çökelme sertleşmesi prensip olarak alaşımı çözeltiliye alma tavından sonra uygulanan hızlı soğumayı takip eden bir yaşlandırma işlemidir (Baylan 2004). Alüminyum, bakır, titanyum ve molibden gibi alaşım elementlerin karşılıklı etkileşimi ya da tek başına etki gösteren alaşım elementlerinden meydana gelen çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler Fe-Cr-Ni'li paslanmaz çelik ailesinin bir üyesidir (Aydın 2002, Odabaş 2004).

Çökelme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çeliklerin içyapıları östenit, yarı östenitik, martenzitik çeşitlerden biri olabilir. Çözeltiliye alma tava sırasında alaşım elementleri çözünür ve mukavemet kazandırır. Çeliğe kazandırılan mukavemet değeri 1700 MPa kadar yükselebilir. Bu durumda, paslanmaz çelik içerisinde en yaygın kullanılan östenitik paslanmaz çeliklerin mukavemeti ile karşılaştırıldığında çökelme sertleşmesi paslanmaz çeliğin mukavemeti üstün gelmektedir (Baylan 2004).

Korozyona dayanıklı olması, iyi derecede mekanik dayanıma sahip olması ve mıknatıslanma göstermesi temel özelliklerindendir. Günümüzde üretilen çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler, yüksek hızlı uçakların dış yüzeylerinde, füze gövdelerinde, deniz taşıtlarında, yakıt tanklarında, uçakların iniş takımlarında, pompalarda, millerde, somun, cıvata, kesici aletler ve kavramalarda yaygın bir uygulama alanına sahiptir. Uçak ve uzay gibi ileri derecede ki teknoloji alanlarında 630 grubu yaygın kullanım alanı olarak bilinir (Teker 2010).

2.3 Borlama ve Borlama Yöntemleri

2.3.1 Borlama İşlemi

Borlama, difüzyon yoluyla bor atomlarının malzeme yüzeyine yayınımıdır. Bir diğer deyişle, bor atomlarının termokimyasal işlemle malzeme yüzeyine yayınmasıdır (Çalık ve Özsoy 2002). Borlama işlemi çok geniş uygulama alanına sahiptir. Alaşımsız ve alaşımlı çeliklere, dökme demirlere, demir dışı metal ve alaşımlarına, bu alaşımların toz metalurjisi yoluyla üretilen tozlarına, bazı süper alaşımlar ile sermetler gibi birçok malzeme grubuna uygulanabilmektedir (Saygın 2006, Başman ve Sesen 2011). Borlama işlemi uygulanacak malzemelere özelliklerine göre 700-1000 °C arasında ve 1-12 saat aralığında farklı bor verici ortamlarda (katı, pasta, sıvı, gaz, plazma) bekletmek suretiyle yapılır (Matuschka 1987, Şen 1997, Çalık ve Özsoy 2002, Zimmerman 2013).

Borlama, termo-difüzyonal bir yüzey sertleştirme işlemi olup esas itibarıyla metal yüzeyine bor atomlarının yüksek sıcaklıkta çeliğe yayınımıdır. Bor atomları ısı enerjisi etkisiyle metal yüzeyine yayınırlar ve esas metal atomlarıyla uygun borürler meydana getirirler (Zimmerman 2013).

Borlama, çok çeşitli demir, demir dışı ve sermet malzemeye uygulanabilen bir termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemidir. İşlem, bor atomlarının ana metalin kafesine difüzyonunu gerektirir ve yüzeyde sert bir bor bileşiği oluşur. Yüzeyde bor tabakası, bir tek faz veya bir çift faz bor tabakası formunda olabilir (Şahin 2009, İnt.Kyn.3).

Bor tabakası, yüzeyden itibaren malzemenin tüm derinliğine kadar düzgün bir sertlik tabakası sağlar. Bor tabakasından elde edilen sertlik değerleri diğer yüzey sertleştirme işlemlerinden çok daha fazladır. Sertlik değerlerini yüksek sıcaklıklarda koruyabilmektedir. Borlama işlemi, malzemenin yüksek sertliğinin yanı sıra aşınma, korozyona direncini ve yüzey yorulma özelliklerini artırır (İnt.Kyn.8).

2.3.2 Borlama yöntemleri

Borlama işleminin bor verici ortamlarda katı, pasta, sıvı, gaz ve plazma olmak üzere birçok yöntemi vardır. Endüstride katı borlama daha sık kullanılmaktadır. Borlama yöntemlerini uygulama durumlarına göre iki grupta toplanmaktadır.

Termokimyasal yöntemler

- Kutu borlama
- Pasta borlama
- Sıvı borlama
- Gaz borlama

Termokimyasal olmayan yöntemler

- Fiziksel buhar biriktirme (PVD)
- Kimyasal buhar biriktirme (CVD)
- Plazma sprey kaplama vb.

Günümüzde en çok tercih edilen borlama yöntemleri, termokimyasal yöntemlerdir. Bu yöntemleri kullanarak malzeme üzerinde malzemenin özelliklerine göre yüksek bor tabakası oluşturulabilir (Türktekin 1998). Borlamanın başlıca özellikleri;

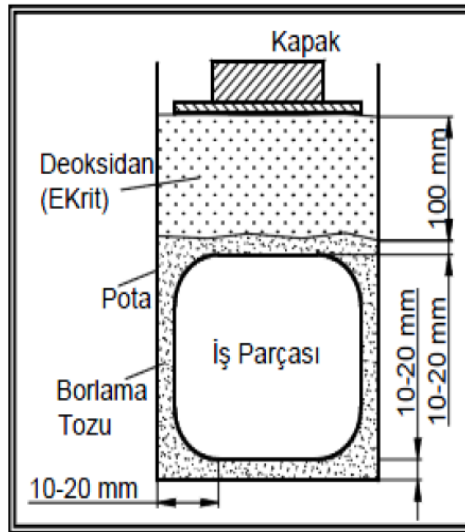
- Yüksek sıcaklıklarda (nitrülenmiş çeliklerin sertliğini koruyamadığı) bor tabakası sertliğini korur.
- Borlama, demir esaslı malzemelerin aşınma, korozyon ve erozyon dayanımı vb. mekanik özelliklerini güçlendirir ve bu özelliği sayesinde endüstride geniş bir uygulama alanı bulur.
- Borlanmış işlemi uygulanmış yüzey 850 °C ye kadar oksidasyona dayanıklıdır. Oksitleyici ve koroziv ortamlarda çalışan parçaların yorulma dayanımlarını artırır ve servis ömrünü uzatır (Uluköy ve Can 2006).

2.3.2.1 Katı (Toz) Ortamda Borlama

Borlama tozu ısıya dayanıklı ve paslanmaz çelik saç olma özelliklerine sahip bir kutunun içine yerleştirilerek parçanın tüm yüzeylerine eşit miktarda en az 10-20 mm bor tozunun içine gömülerek kutunun ağzı hava almamak ve parçanın yüzeyi oksitlenmeyecek üzere sıkıca kapatılır. Bu işlemin ardından elektrikli rezistanslı olma özellikli bir fırında istenilen (gerekli görülen) sıcaklıkta kutu borlama işlemi gerçekleştirilmektedir (Uzun 2002, Sağlam 2016). Bor verici olarak yaygın kullanılan bor bileşikleri, bor karbür (B_4C), ferrobor ve amorf bordur (Komutsu *et al.* 1974, Zimmerman 2013).

Kutu borlama yöntemi, kullanım kolaylığı, uygulama güvenliği, tozların bileşimini değiştirme kabiliyeti, sınırlı ekipman ihtiyacı ve bunun sonucunda ortaya çıkan ekonomik tasarruflar nedeniyle endüstrideki en yaygın kullanılan borlama işlemidir (Matuschka 1980).

Borlama işlemi uygulanacak olan malzemeye, toz verici ortamda malzemelerin türüne göre 800 – 1100 °C sıcaklık aralığında, 1-12 saat bekletilmek suretiyle gerçekleştirilmektedir. Borlanacak malzeme ısıya dayanıklı paslanmaz çelik saç içine yerleştirilir (Uluköy ve Can 2006).



Şekil 2.8 Katı borlama işleminin şematik gösterimi (Uluköy ve Can 2006).

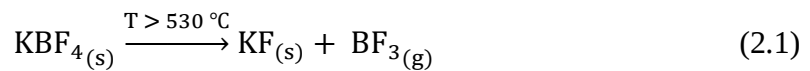
Kutu borlamada pota olarak alaşımsız çelik, paslanmaz çelik veya alümina potaları kullanılabilmektedir. Literatürde ise kutu borlama kaynakları ise şöyledir (Özbek 1999, Zimmerman 2013).

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

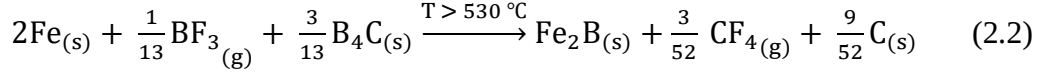
Ticari Ekabor II tozu, %5 B₄C, %5 KBF₄, %90 SiC oluşmaktadır. B₄C bor kaynağı, KBF₄ aktivatör ve SiC seyreltici olarak kullanılmaktadır.

Kaplama oluşturma işlemlerinin çoğuna benzer şekilde, borlama iki adımdan oluşur; başlatma ve büyüme (İnt.Kyn.16).

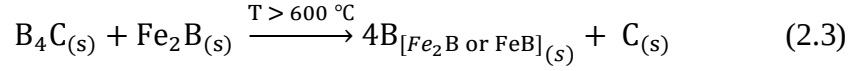
Başlatma: Öncelikle, bir aktivatör olarak potasyum fluoborat (KBF₄), yüksek sıcaklıkta (530 °C'den fazla) ayrışır ve Formül 2.1'e göre gaz halindeki bor triflorür (BF₃) oluşturur (İnt.Kyn.16).



Ardından, bor triflorür, demir katmanı (Fe₂B) oluşturmak için çelik malzeme yüzeyinde bor karbür ile reaksiyona girer (İnt.Kyn.16).



Büyüme: Demir bor tabakası, bor karbürü (borlama maddesinde) ve demir borit tabakasını, aşağıdaki reaksiyona göre yüzeyde reaksiyona sokarak büyür (İnt.Kyn.16).



Atomik bor, bor tabakasına yayılır ve tabakayı kalınlaştırır. Borlama maddesi karışımındaki bor miktarı bor tabakasının bileşimini belirler (İnt.Kyn.16).

Eğer çelik yüzeyindeki bor içeriği yüksekse (bu, borlama maddesinde yüksek B_4C konsantrasyonu anlamına gelir), o zaman FeB oluşacak ve Fe_2B tabakasının tepesinde büyüyecektir. Aksi takdirde Fe_2B , bor tabakasında baskın olan kompozisyonudur. Fe_2B baskın tabaka olduğundan, borun yüzeyindeki aktiviteyi azaltmak için sertleştirici karışıma SiC ilave edilir. Bundan dolayı SiC “seyreltici” ajan olarak adlandırılır (İnt.Kyn.16).

Ortak bor veren maddeler bor karbür (B_4C), ferrobör ve amorf bördür. Ferrobör ve amorf bör daha yüksek bor potansiyeline sahiptir. Malzeme yüzenine daha kalın bir tabaka sağlarlar ve B_4C 'den daha pahalıdır (Komutsu *et al.* 1974, Zimmerman 2013).

Aktivatör olarak kullanılan tozlar bileşiklerine bağlı olarak KBF_4 , NaBF_4 , $(\text{NH}_4)_3\text{BF}_4$, NH_4Cl , Na_2CO_3 , BaF_2 ve $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ kullanılır (Zimmerman 2013). Silisyum karbür (SiC) ve alümina (Al_2O_3) seyrelticiler olarak görev yapar ve reaksiyonda yer almazlar. Aktivatörler börür tabakasının düzenli gelişmesine etki ederler. Seyrelticiler ise borlama esnasında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluştururlar, bor miktarını kontrol eder ve borlama maddesinin sıkışmasını önler (Komutsu *et al.* 1974, Baştür ve Erten 2006, Zimmerman 2013).

Borlama işlemi uygulanabilen çeşitli parçalar;

- Valf bileşenleri - kapılar, yuvalar, bilyalar, gövdeler, regülatör valfler

- Pompa bileşenleri - pervane gövdeleri, gövdeler, pistonlar, silindirler
- Tarım makineleri - hasat biçerdöverler, ayırıcılar, mahsul transferi, doğrama parçaları
- Otomotiv - dizel motor yağı pompaları, dişliler
- Damgalama - ölür, takım
- Tekstil - yivli variller
- Ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıbı - kalıp burguları, varil, kalıp bileşenleri

2.3.2.2 Macun (Pasta) Ortamda Borlama

Borlamada kullanılmak istenen tozların, macun kıvamına getirilerek kullanılabildiği bir borlama yöntemidir. Macun kıvamını almış borlayıcı madde sertleştirilip, kaplanmak istenen yüzeye 3 ile 6 mm kadar kalınlıkta sürülür. Fırına yerleştirilmek üzere iyice kurumaya alınır. Kuruma işlemi sağlandıktan sonra gerekli görülen sıcaklığa ayarlanan fırına yerleştirilir. Böylece borlama işlemi yapılır. Bu yöntemle yapılan borlama işleminin gaz ortamında yapılması önem teşkil eder. Bu yöntemin en önemli avantajı kısmi borlama yapılıyor olabilmesi yani çok karmaşık ve büyük parçalara yöntemin uygulanabilmesidir. Diğer toz ortam borlama yöntemi olan katı borlama yöntemiyle karşılaştırılacak olunursa bu yöntemle zamandan tasarruf sağlanır. Bu yöntemin avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajların başında, borlama sırasında kullanılan yüzeye macunun yapışması gelir, sulu sodyum silikat çözeltisi, %3 polivinil alkol ya da %0,5 metil selüloz içeren sulu çözeltiler kullanılması bu olumsuz etkiyi en aza indirmeye yardımcıdır (Çalık 2005a).

Çizelge 2.3 Pasta borlamada kullanılan koruyucu gazlar ve kimyasal bileşimi (Çalık 2005a).

Koruyucu gaz adı	Kimyasal bileşim
Argon	%99.996
Kalıp gazı (Formier gazı)	%5-30 H ₂ , %25 N ₂
NH ₃ spalt gazı (Amonyak)	%75 H ₂ , %25 N ₂
Saf azot	%99 N ₂ , %1 H ₂

2.3.2.3 Sıvı ortamda Borlama

Bu yöntemde borlama ortamı sıvı haldedir ve sıvı ortamını iki grupta toplamak mümkündür. Bunlar elektrolitik borlama ve elektrolitik olmayan (normal sıvı) borlama olmak üzere iki grupta toplanabilir. Bu yöntem, sıvı çözeltiye 900 - 1100 °C sıcaklık aralığının da 2 - 9 saat süreyle daldırılarak yapılan borlama yöntemidir. Bu yöntemle yüksek bor tabakaları oluşturabilir olsa da birçok dezavantajı mevcuttur. En büyük dezavantajı sıcaklıktır ve bu durum şöyle açıklanmaktadır. Sıcaklığın 850 °C'nin altına düşmesi durumunda erimiş boraksın akıcılığı azalacağından borlama imkânsız hale gelir. Bu yöntemde kullanılan bor verici bileşikler, boraks, susuz boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), susuz borik asit (B_2O_3), metaborik asit (HBO_2), bor karbürdür (Bayça ve Şahin 2004, Sağlam 2016).

Sıvı ortamda borlama avantajları;

- Hem elektrolitik hem de elektrolitik olmayan borlamada, halojenleri içeren kimyasallar kullanılmadan gerçekleştirilebilir. Bu işlemlerin toz ve paket borlama da ortak olan zararlı florlu bileşikler (HF , BF_3) ve klorlu (HCl , BCl_3) bileşik dumanları yaymayacağı anlamına gelir (Zimmerman 2013).
- Elektrolitik tuz banyosunun bor potansiyeli yüksektir ve tek fazlı Fe_2B katmanları daha kolay oluşur (Kartal 2011)
- Elektrolitik tuz banyosu borlamasında, çok kısa işlem sürelerinde kalın bor tabakaları oluşturmak için kullanılabilir. Ancak yüksek borlama oranları ile oluşabilecek FeB oluşumunun önlenmesi için özen gösterilmelidir (Kartal 2011).

Sıvı ortamda borlama dezavantajları;

- Borlama tuz banyolarını içeriğindeki kimyasını zaman içinde sabit tutmak zordur: Çünkü test etmek basit bir işlem değildir. Tuz banyosu borlama maddeleri tüketildikçe sık aralıklarla periyodik olarak düzeltmeyi gerektirebilir (Zimmerman 2013).

- Borlama sonrasında parça yüzeyinde oluşan tuz kalıntıları ve reaksiyona girmeyen bor kalıntılarının parça yüzeyinden giderilmesi zaman ve ekonomi kaybına yol açar (Zimmerman 2013).
- Borlamanın başarılı olabilmesi için borlama sırasında banyo vizkozitesi artmamalıdır. Bu nedenle sıvı banyoya tuz ilavesi yapılmalı ve bu da maliyeti artırır (Zimmerman 2013).
- Borlama fırınları korozi ortamlara dayanıklı seçilmelidir (Zimmerman 2013).
- Elektrolitik tuz banyosunda, anotların ve katotların iş parçaları yüzey alanlarına uygulayacağı yük yoğunluğunun, üretebileceği yük için gerekli amper ayarlarını hesaplamak gereklidir. Farklı boyutlar ve iş parçası geometrileri işlenirken, yük yapılandırması ve farklı akım ayarları seçmek için iş parçasının yüzey alanları hesaplanmalı ve bilinmelidir (Kartal 2011).

2.3.2.4 Gaz Ortamda Borlama

Borlama işlemlerinin yapıldığı bir diğer ortam çeşidi ise gaz ortamda borlamadır. Bu işlemde, bor halojenürleri, diboran ve bor hidrürleri bor kaynağını teşkil eder. Beklentilerden daha olumlu sonuca ulaşabilmek için saydığımız bor kaynaklarından diboran (B_2H_6) ile kullanılabilir. Bu yöntemi diğer yöntemlerden ayıran yönü, işlem içerisinde kullanılan maddelerin zehirli ve patlayıcı özelliklere sahip olan maddeler olup, kötü etkili sonuçlara neden olabilir nitelikte olmasıdır. Bir diğer olumsuz yanı ise trimetil bor (CH_3)₃B kullanımında borlama işlemi ile birlikte ortama C yayılımı sağlayarak kaplanan yüzeyi olumsuz etkilenip kalite kaybı yaşatmaktadır (Özsoy 1991). Bu işlemler gerçekleşirken ortamda zehirli gaz ve patlama tehlikesi hâkimdir. Bu durum, işlemi olumsuz bir sonuca götürmektedir.

Gaz borlama yöntemi, malzemenin 700 - 950 °C ısıtılmasıyla ve 0,67 bar basınç altında BCl_3 - H_2 gaz karışımının 1'e 15 oranında seyreltilmesi ile parçaların yaklaşık 120 - 150 mikron kalınlığında bor tabakası elde edildiği bildirilmiştir. Son yıllarda araştırmalarda H_2 gazı yerine (75:25) N_2 - H_2 gaz karışımı kullanılmasıyla tabakalarda oluşan FeB faz miktarı azaltılarak daha düzgün bir yapı elde edilmesi sağlanmıştır. Bu durum, difüzyon işleminden önce difüzyonu olumsuz etkileyecek istenmeyen fazlar ortamdaki

uzaklaştırılır. Bu işlem titanyum ve alaşımlarına da uygulanabilir (Hegewaldt 1984, Davis 2002).

Gaz borlamanın avantajları;

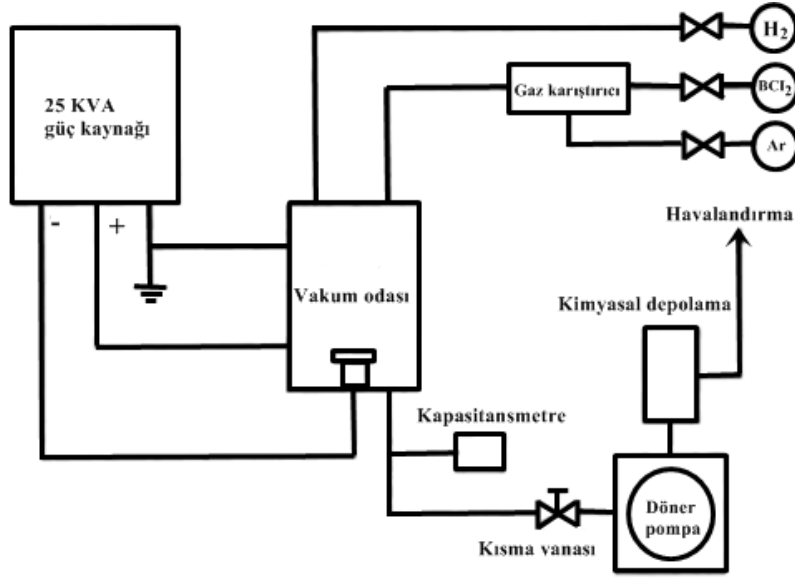
- Gaz sirkülasyonu sonucu borun yüzeye daha yüksek tabaka halinde çok yayılması
- Katı borlama işlemine göre gelişmiş sıcaklık kararlılığı ve elde etme kolaylığı (Bergmann and Brokmeier 1981).

Gaz borlamanın dezavantajları;

- Trimetil bor, borlama ile birlikte C yayılımına neden olarak tabaka kalitesini bozar
- Teçhizat ve işlem pahalıdır.
- Ortamda zehirli gaz ve patlama tehlikesi vardır (Barış 2007).

2.3.2.5 Plazma Borlama

Plazma borlama, $B_2H_6-H_2$ veya BCl_3-H_2-Ar karışımları plazma kaynaklarında başarıyla kullanılabilir (Filep 1988). Bu yöntem, 800 - 1000 °C sıcaklıklarda, yaklaşık 10^{-2} Pa düşük basınç altında yapılır. Bor verici olarak BCl_3 , BF_3 , B_2H_6 ve TEB, redükten (indirgeyici) olarak da argon veya hidrojen gazı kullanılır (Uluköy ve Can 2006, Barış 2007, Sağlam 2016). Çalışma atmosferinin zehirli olması bu yöntemin en büyük dezavantajıdır.



Şekil 2.9 Plazma borlama yönteminin şematik görüntüsü (Dearnley *et al.* 1986).

Plazma borlama yönteminin üstünlükleri;

- Borlanmış tabakanın kompozisyonu ve derinliğinin kontrolü
- Geleneksel paketli boronizasyona kıyasla artan bor potansiyeli
- Daha ince plazma ile işlem görmüş borit katmanları
- Sıcaklıkta ve tedavi süresinde azalma
- Yüksek sıcaklık fırınlarının ve aksesuarlarının ortadan kaldırılması
- Enerji ve gaz tüketiminde tasarruf (Tezcan 1996).

2.3.3 Bor Tabakası Özellikleri

Yüksek sıcaklıklarda bor atomunun malzeme yüzeyine yayınmasıyla ana malzeme ve yüzey arasında borür tabakası meydana gelir. Oluşan bu tabaka tek fazlı veya birden fazla faz içerebilmektedir. Bor tabakasının yapısı, borlanacak malzemenin kimyasal içeriğine (alaşım elementlerine) doğrudan bağlıdır (Dilektaşlı 2014). Buna örnek olarak Çizelge 2.4’de borlama işlemi uygulanmış çeşitli malzemelerin fazlarını ve sertliklerini göstermektedir (Motojima *et al.* 1981, Dearnley *et al.* 1986).

Oluşan bor tabakasının özellikleri şöyle sıralanabilir (Türktekin 1998).

- Çok yüksek sertlik değerleri
- Yüksek sıcaklığa direnç
- Alt yüzeye iyi tutunma özelliği (difüzyonun güçlü olması)
- Yüksek ısınma direnci
- Yüksek sıcaklıklarda sertliğini koruma özelliği
- Demir malzemelere uygun genleşme katsayısı (Türktekin 1998).

Çizelge 2.4 Borlama işlemi uygulanmış çeşitli malzeme fazları ve sertlik değerleri (Motojima *et al.* 1981, Dearnley and Bell 1985, Davis 2002).

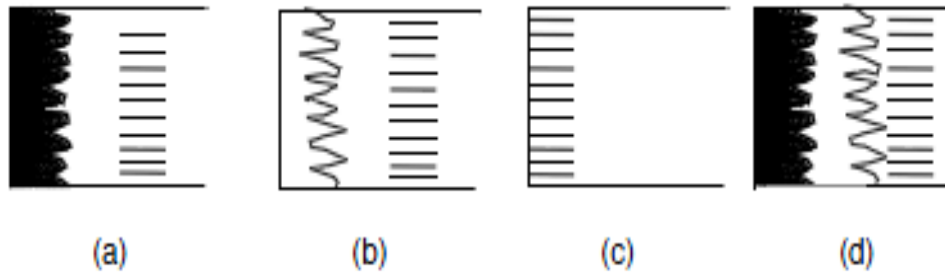
Malzeme	Elde Edilen Fazlar	Mikro Sertlik Hv kg/mm ²
Fe	FeB	1900-2100
	Fe ₂ B	1800-2000
Co	CoB	1850
	Co ₂ B	1500-1600
	Co ₃ B	700-800
	CoB	2200 (100g) ^(a)
Co-27,5 Cr	Co ₂ B	1550 (100g) ^(a)
	Co ₃ B	700-800
	Ni ₄ B ₃	1600
Ni	Ni ₂ B	1500
	Ni ₃ B	900
	Mo ₂ B	1660
Mo	MoB ₂	2330
	Mo ₂ B ₅	2400-2700
W	W ₂ B ₅	2600
Ti	TiB	2500
	TiB ₂	3370
Nb	NbB ₂	2200
	NbB ₄	-
Hf	HfB ₂	2900
Zr	ZrB ₂	2250

Demir esaslı malzemelerin borlanması kaplama tabakası demir borürlerin oluşum ve büyümesi ile olmaktadır. Oluşan bor tabakaları, diğer sertleştirme yöntemlerine göre birçok avantajı vardır. En önemli özelliği yüksek sertlik değerlerine sahip olmaları ve bu sertliklerini yüksek sıcaklıklarda koruyabilmeleridir. Ayrıca, bor tabakaları yüzey sertliklerinin yanında, düşük sürtünme katsayılarına da sahiptir (Özbek 1999, Dilektaşlı 2014).

Borlama süresinin artması ile tabaka kalınlığı artar. Borlama işlem sıcaklığını sınırlayan erimedir. FeB denge diyagramında ötektik sıcaklığın 1149 °C altında olması gerekir. Uygulamada bu sıcaklığın üzerine çıkılırsa malzeme üzerinde yerel erimeler meydana gelerek malzeme yüzeyi bozulabilir. Sıcaklık artması, tabaka kalınlığını artırmasının yanında poroziteyi de artırmaktadır. Porozitenin artması ise tabakanın gevrekleşmesine yol açmaktadır (Şahin 1999).

2.3.3.1 FeB ve Fe₂B Fazları Özellikleri

Bor atomunun malzeme yüzeyine yayınımına bağlı olarak, tek fazlı Fe₂B veya FeB fazı, çift fazlı FeB+Fe₂B fazları kolonsal bir görünümle oluşmaktadır. Ayrıca, borun malzeme yüzeyine tutunmasını literatürde testere dişine benzetilmektedir. Bor tabakasında iki fazda basma ve çekme gerilmeleri oluşmakta ve çoğu zaman bu gerilmeler sebebiyle, bu iki faz arasında çatlaklar oluşmaktadır. Bu oluşum bor tabakasının termal şok ve mekanik etkiler altında ayrılmasına (kopmasına) neden olmaktadır (Jiang 2011). Demir esaslı malzemelerin borlanması ile oluşan bor tabaka çeşitleri Şekil 2.10'da görülmektedir (Dilektaşlı 2014).



Şekil 2.10 a) tek fazlı FeB tabakası, b) tek fazlı Fe₂B tabakası, c) geçiş bölgesi, d) çift fazlı FeB+Fe₂B tabakası

Endüstride tek fazlı Fe₂B fazı tercih edilmektedir. FeB fazı kırılğan yapısı nedeniyle tercih edilmemektedir. Fe₂B fazı düşük kırılğanlık değerine sahiptir. Ana malzemeye, borlu tabakanın özellikleri olumsuz yönde etkilenmeden borlama sonrası ısıt işlemler uygulanabilir (Şahin 2009).

Çizelge 2.5 Fe₂B ve FeB fazlarına ait özellikler (İnt.Kyn.5).

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Ergime noktası (°C)	1390	1550
Mikrosertlik (HV)	1600-2000	1600-2400
Uzama Katsayısı (1000°C)	8.10 ⁻⁶ 1/°K	10-16. 10 ⁻⁶ 1/°K
Termal İletkenlik(1000°C)	0.2-0.3 W/(cm °C)	0.1-0.2 W/(cm °C)
Küri Noktası (°C)	742	325
Yoğunluk (gr/cm ³)	7.00	6.3
Kristal Sistem	Tetragonal hacim merkezli	Ortorombik

2.3.4. Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulama Alanları

Borlanmış malzemelere ait kullanım sektörleri Çizelge 2.6’da tablo halinde verilmiştir (Komisyon 2003, Özer 2011, İnt.Kyn.6).

Çizelge 2.6 Borlama işleminin endüstriyel uygulama alanları.

Kullanım Alanı	Kullanım yerleri
Savunma sanayi	Zırh plakalar, seramik plakalar, ateşli silah namluları, fişek vb.
Cam ve Seramik sanayi	Bor silikat camlar, laboratuvar camları, uçak camları, borcam, emaye, fayans, porselen boyaları, sırlar vb
Elektronik ve Bilgisayar sanayi	Mikro çipler, LCD ekranları, CD sürücüler, akım levhaları vb.
Enerji sektörü	Gaz türbinleri, yüksek ısı transistörler vb.

Çizelge 2.6 (Devam) Borlama işleminin endüstriyel uygulama alanları.

Kullanım Alanı	Kullanım yerleri
Görüş sistemleri	Kamera ve mercek camları, fotoğraf makineleri
İletişim araçları	Cep telefonları, modemler, televizyonlar vb.
Makine sanayi	Manyetik cihazlar, zımpara ve aşındırıcılar kompozit malzemeler vb.
Metalürji	Kaplama elemanları, yüksek sıcaklık refrakterleri vb.
Nükleer sanayi	Nükleer atık depolama (kolemanit cam bloklar), reaktör aksamaları vb.
Otomobil sanayi	Titreşim söndürücü malzemeler, hava yastığı şişirme mekanizmaları vb.
Tarım sektörü	Sentetik gübreler, biyolojik gelişim ve kontrol kimyasalları vb.
Tıp	Yapay organlar, antibiyotikler vb.
Uzay ve Havacılık sanayi	Sürtünmeye, aşınmaya ve ısıya dayanıklı malzemeler, roket yakıtı, uydular, yüksek hız kanatları vb.

Bor tabakası yüksek sertliğini, yüksek sıcaklıklarda dahi koruması, borlama işleminin önemli özelliklerindendir. Diğer geleneksel sertleştirme işlemleriyle karşılaştırıldığında oluşan bor tabakanın sertliğinin de yüksek olduğu bilinmektedir. Çizelge 2.7’de bor kaplanmış malzemenin diğer geleneksel sertleştirme işlemlerine göre karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 2.7 Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlem görmüş malzemelerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması (Dearnley and Bell 1985, Şen 1997).

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

2.3.5 Bor Tabakasının Avantajları

Borlanmış malzemelerin tabakalarının en önemli özelliği, bor tabakasının çok yüksek sertlik değerine ve ergime noktasına sahip olmasıdır. Bor tabakasının yüksek sertliğinin yanında düşük sürtünme katsayısına ve yüksek aşınma direncine sahip olması da önemli avantajlarındandır. Borlama işleminin bazı avantajları aşağıda belirtilmiştir.

- Malzeme türüne bağlı olarak 1400 - 2400HV arası yüksek sertlik
- Yüksek sıcaklıklarda sertliğini koruyabilme
- Alaşımlı ve alaşımsız çeliklerde yüksek katman sertliği
- Geleneksel sert malzeme kaplamalarına kıyasla belirgin şekilde geliştirilmiş yapışma
- Aşınmaya karşı yüksek direnç

- Korozif ortamda yüksek yorulma direnci
- Borlama işleminin çok geniş uygulama alanlarına sahip olması
- Al ve Zn erimelerine karşı iyi direnç
- Asitlere göre iyi davranış (Uluköy ve Can 2006, İnt.Kyn.5).

2.3.6 Bor Tabakasının Dezavantajları

- Borlama teknikleri esnek değildir. Gaz ortamda sementasyon ve plazma nitrürasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre işçilik ve işletim maliyetleri daha yüksektir (Özbek 1999).
- Borlama işlemi uygulanan malzemelerde bor tabaka kalınlığının %5-25'si oranında boyut artışı görülmektedir. Bu artış, borlanan malzemenin cinsine ve borlama şartlarına bağlıdır (Şen 1997).
- Bor tabakasının kırılgan olması ve bor tabakalarının kırılmasında birçok faktör rol oynayabilir. FeB ve Fe₂B fazlarının çok sert olmaları, bor tabakaları arasında geniş sertlik değer farkının olması ve FeB fazının kırılgan olmasıdır (Tabur 2008, Zimmerman 2013).
- Borlanmış çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde sementasyon ve nitrasyonla kıyaslandığı zaman çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği sebebiyle, dişli üretiminde bir sınırlama söz konusudur.
- Yüksek hız çeliklerin serleştirme sıcaklıkları genellikle, 1150 °C'den fazla olduğu için, borlama işlemi uygulamaya uygun değildir (Zimmerman 2013).
- Borlanmış yüzeylerin dikkatli işlenmesi gereklidir. Aksi takdirde geleneksel yollarla işlenmesi kaplama tabakasında kırılmalara neden olmaktadır (Şen 1997).

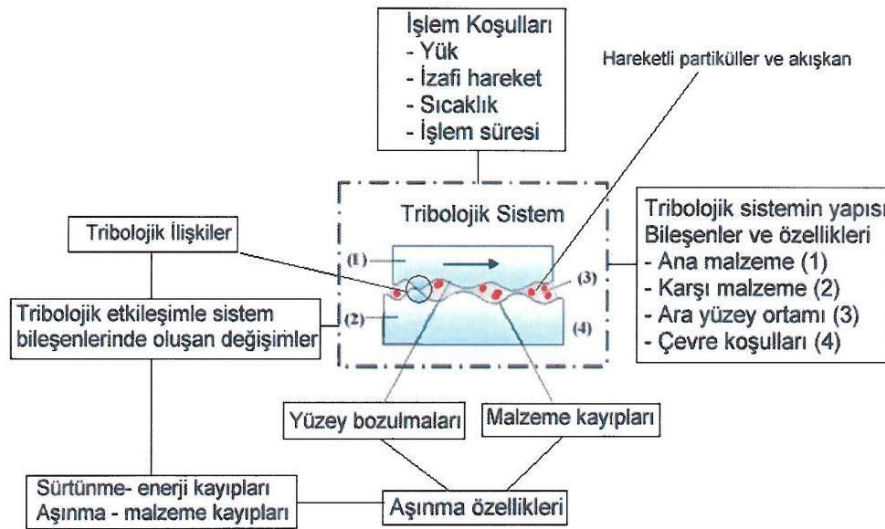
2.4 Aşınma

Aşınma tribolojik sistem literatüründe birçok anlama sahiptir. Aşınma, sürtünme veya çarpma sonucu malzemenin yüzey çıkarılması olarak tanımlanır. Kısacası aşınma, iki temas eden yüzey arasındaki mekanik etkileşimden kaynaklanan ilerleyici madde kaybı olarak tanımlanmaktadır (Sağlam 2006).

Malzemenin çalışma şartları aşınan yüzeyleri etkiler. Bu nedenle bir malzemenin davranışı büyük ölçüde bir malzemenin yüzeyine, yüzey temas alanına ve malzemenin çalışması gereken ortama bağlıdır. Aşınma esnasında bir ya da iki katı yüzeyde kayma, dönme ve darbe etkisiyle hasar meydana gelir. Aşınma sonucunda malzeme amaçlanan normal fonksiyonunu kaybeder.

Aşınma olayındaki beş önemli unsur tribolojik sistemi oluşturur. Bunlar;

1. Ana malzeme (aşınan)
2. Karşı malzeme (aşındıran)
3. Ara malzeme
4. Yük
5. Hareket (Esen 2006).



Şekil 2.11 DIN 50320 normuna göre tribolojik sistem.

Aşınmayı, malzeme seçimi, sürtünme, yüzeye uygulanan yük, kayma mesafesi, yağlama yüzey kalitesi ve sertliği bazı önemli faktörler etkilemektedir. Aşınma sisteminde aşınma hasarları iki katlıdır. Bunlar;

- a) Temas eden yüzeydeki malzeme kaybı, malzemenin boyutunu azaltır. Bu, genellikle hareketli parçalar arasındaki mesafenin artmasına neden olur ve sonuç olarak yüksek titreşim, yüksek gürültü, düşük verimlilik ve sistem arızası ile

sonuçlanır. Dinamik yükleme söz konusuysa, azaltılmış bileşen boyutu yorucu kırılmaya neden olarak feci bir başarısızlığa yol açabilir (İnt.Kyn.7).

- b) Aşınma kalıntısı olarak bilinen aşınmış yüzeyden ayrılan malzeme de benzer şekilde zararlıdır. Örneğin, yiyecek veya içecek işlemesi için kullanılan bir makinenin aşınma problemleri olduğunda kirlenmeye neden olabilir. Temas yüzeyinin içinde sıkıştığında aşındırıcı olarak hareket edebilir ve daha yüksek aşınma oranına neden olabilir. Aynı zamanda bir sistemin normal çalışmasını engelleyen bir valfi, kritik bir boru hattını, bir yağ filtresini veya elektrik temas noktasında biriken bir bloğu bloke edebilir. Aşınma maliyeti çok büyüktür ve bu nedenle, aşınmayı azaltmak veya ortadan kaldırmak amacıyla, endüstrinin ilk çağlarından beri büyük çabalar sarf edilmiştir (İnt.Kyn.7).

2.4.1 Aşınma Çeşitleri

Aşınma prosesleri, tribolojik yük tipine ve bunlara dâhil olan malzemelere, örneğin kayma aşınmasına, yıpranma aşınmasına, aşındırıcı aşınmaya ve malzeme boşluğuna göre farklı tiplerde sınıflandırılabilir. Aşınma bir takım mekanizmalardan kaynaklanır ve aşağıdaki önemli aşınma mekanizmaları sınıflandırılmıştır.

2.4.1.1 Adhesiv (Yapışma) Aşınma

Yapışma aşınması olarakta adlandırılan aşınma türüdür. Adhesiv aşınma durumunda mikro parçalar ana malzeme ve aşındırıcı arasına kaynak veya mikro kaynak olarak yapışma gerçekleştirdiği ve ana malzemeyi aşındırdığı aşınma türüdür. İki yüzey birbirine göre kaydıgında, bir yüzeydeki tepe noktası veya bir sertlik diğer yüzeydeki bir tepe noktası ile temas ettiğinde, sürtünme ısısından dolayı anlık bir mikro kaynak oluşturarak malzemenin aşınmasına neden olur (Barış 2007, İnt.Kyn.8).



Şekil 2.12 Adhesiv aşınma oluşum mekanizması (Affatato and Brando 2013).

Aşınma anında yapışma işlemleri durumunda, temas eden iki yüzey arasında gerçekleşen bağlanma sonucunda aşınma meydana gelir. İki yüzeyin daha sonra ayrılmasıyla, her iki yüzeyden malzeme çekilerek aşınmaya neden olabilir (Barış 2007, Başman ve Sesen 2011, İnt.Kyn.9).

Tabakalar arası hata enerjisi, kristal yapı, doğal oksit filmi oluşumu gibi bütün parametreler adhesif aşınmayı etkiler.

2.4.1.2 Abrasif (Aşındırıcı) Aşınma

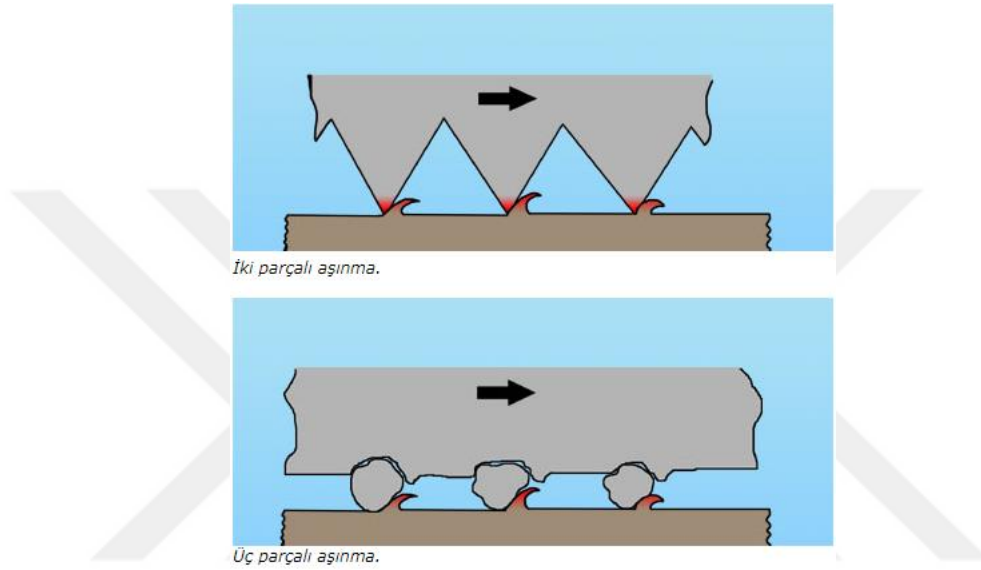
Bu aşınma türü bir biri üzerinde kayan yüzeylerin arasında aşındırıcı sert partiküllerin bulunması sonucu meydana gelmektedir. Sert partiküller ya dışarıdan sisteme girer veya adhesiv aşınma mahsülleri olarak sistem içinde meydana gelir (Barış 2007). Abrasif aşınma, karşı karşıya gelen iki cismin (malzemenin) uygulanan yük ve hareket karşısında daha sert veya daha çıkıntılı diğer malzemenin, oluşan sürtünme durumundan dolayı zedeleyip mikro talaş çıkarıp, karşısındaki cisme hasar veren aşınma türüdür (Karamış 1986, Demirel 2013).

Abrasif aşınma, endüstride en sık karşılaşılan aşınma mekanizmasıdır. Literatürde iki temel modu vardır.

- a) İki elemanlı
- b) Üç elemanlı

İlk durumda iki cismin aşınma aşamasına girmesi ve aşındıranın aşınandan sert olma durumu öğütme, kesme ve talaşlı imalat çalışmaları bu aşınma sonucu elde edilen makine işlemleridir. Buna iki elemanlı denir (Çelikyürek 2006).

İkinci durumda ise iki malzeme arasına yerleşen sert partiküllerin sürtünmesi sonucu oluşan aşınmadır ve buna üç elemanlı denir (Çelikyürek 2006).



Şekil 2.13 Abrasif aşınmada oluşan iki temel durum.

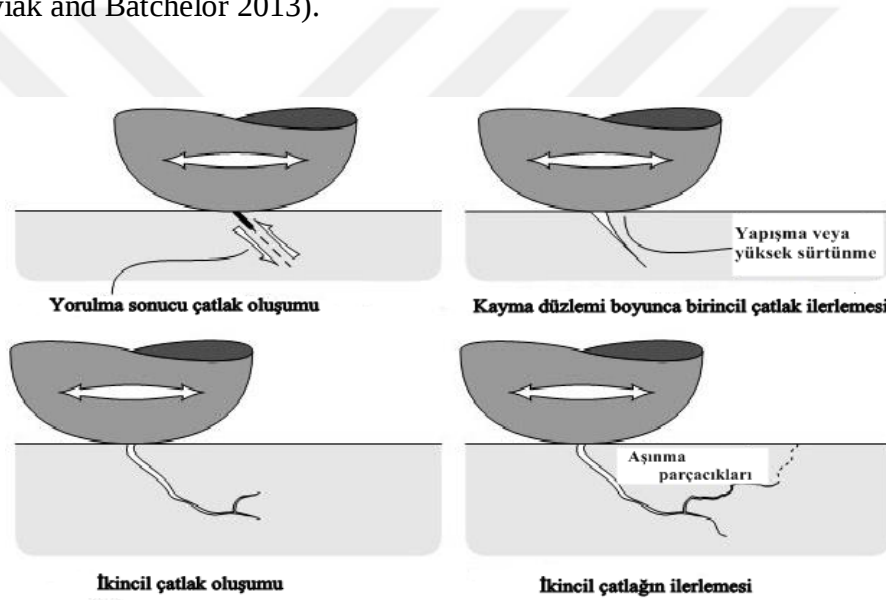
Bir yüzeyden keskin bir uç diğer yüzeye bir oyuk sürerse iki parçalı aşınma olarak adlandırılır. Aşınmaya neden olan iki yüzey arasındaki bir parçacık ise, üç parçalı aşınma olarak adlandırılır (Affatato and Brando 2013).

Abrasif aşınma direnci;

- Artan sertlik ve tokluk
- Azalan deformasyon sertleşme hızı
- Yabancı partiküller aşınma direncini arttırabilir.
- Ana malzemeden daha sert, tok, elastik modülü yüksek ve iri boyutlu partiküller aşınma direncini arttırır (Akbulut 2006).

2.4.1.3 Yorulma aşınması

Yorulma aşınması, yüksek yerel strese sahip olan yüzeyler arasındaki temastan kaynaklanır. Kayma veya yuvarlanma sırasında yağlama ve yağlama olmadan tekrarlanır. Tekrarlanan, değişen mekanik gerilmeler, gerilen yüzey altında çatlakların oluşumuna ve yayılmasına neden olur. Bu durum, malzemenin kalıcı şekil değişimine neden olarak kullanılamaz hale gelmesine neden olur. Uygulanan yük malzemenin yorulma dayanımından yüksekse, yorulma meydana gelir (Stachowiak and Batchelor 2013). Aşağıdaki Şekilde 2.14’de belirli yük altında yüzeyde meydana gelen yorulma aşınması ve onun sonucunda meydana gelen çatlak oluşum mekanizmaları gösterilmiştir (Stachowiak and Batchelor 2013).



Şekil 2.14 Belirli bir çevrim altındaki bir yüzeyde meydana gelen yorulma aşınması çatlak oluşumları gösterimi (Stachowiak and Batchelor 2013).

Yorulma çatlakları, malzemenin yüzeyinde başlar ve yüzey altı bölgelere yayılır. Çatlaklar, tekrarlı yüklemeler veya döngüsel yükler altında birbirlerine bağlanabilir ve böylece malzeme parçalarının ayrılması ve bozulmasına neden olabilir (Oğuz 1993).

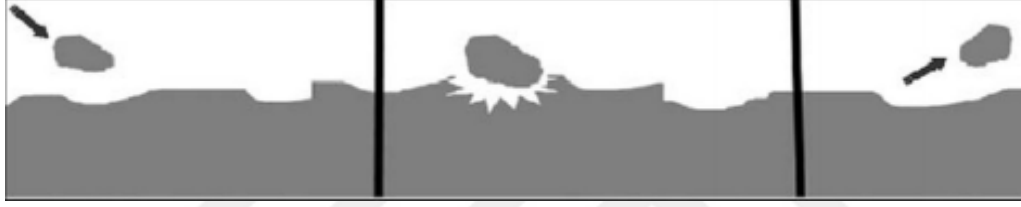
Kayma sırasında yorulma aşınması meydana geldiğinde;

- Yüksek sürtünme katsayısı ve yüksek plastik deformasyon vardır.
- Kesme gerilmesi çok yüksektir.

- Yüzey malzemesi kayma yönünde kaydırılır.
- Mikron büyüklüğünde dislokasyon hücreleri oluşur (İnt.Kyn.10).

2.4.1.4 Eroziyon Aşınma

Bir akışkandaki veya başka bir taşıyıcıdaki parçacıklar, temasta bulundukları katı yüzeylerinde sürekli darbe etkisi yaparak oluşturdukları hasar eroziyon aşınma olarak nitelendirilmektedir (İpek ve Karamış 1999). Malzeme yüzeyine temas eden her parçacık, yüzeyden küçük parçalar koparır. Temasta bulunan hasarlar kütle, parçacık hızı, sıkışma açısı gibi etmenlere bağlıdır (Stachowiak and Batchelor 2013).



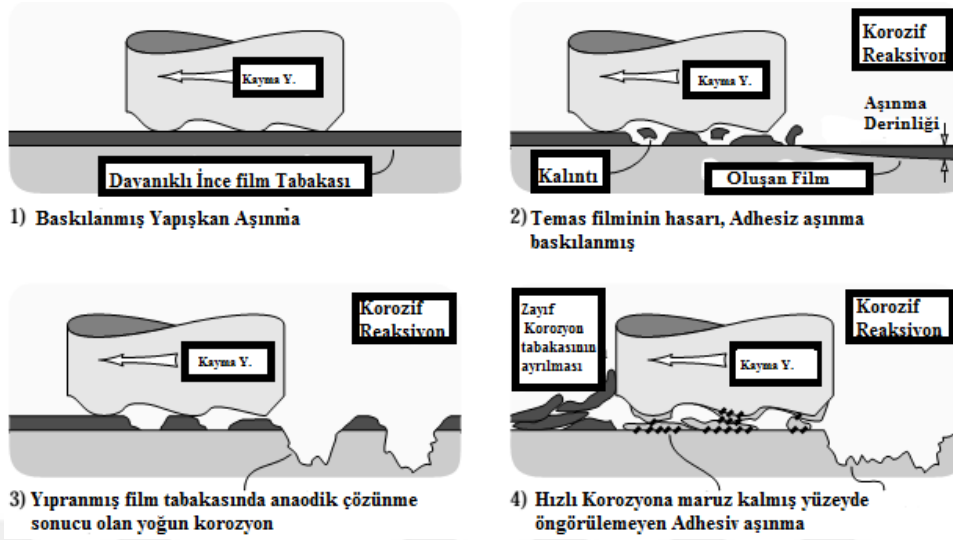
Şekil 2.15 Eroziyon aşınma oluşum mekanizmaları (Affatato and Brando 2013).

Eroziyon aşınmayı etkileyen faktörler;

- Parçacıkların şekli
- Parçacık boyutu ve sertliği
- Hız
- Sıcaklık (İnt.Kyn.11).

2.4.1.5 Korozyon Aşınması

Korozyon aşınması, bir malzemenin çevresiyle etkileşimin bir sonucu olarak ortaya çıkması ve aşınma yüzeyinde kimyasal reaksiyona girmesi nedeniyle oluşan bozulmadır (Affatato and Brando 2013). Korozyon aşınmasında ilk önce bağlantı yüzeyleri çevre ile reaksiyona girer ve yüzey ürünleri üzerinde reaksiyon ürünleri oluşur. Reaksiyon ürünleri etkisiyle malzemelerin temas etkileşimlerinde çatlak oluşumu ve onun sonucunda aşınma oluşumu meydana gelir. Bu işlem, artan sıcaklıktan dolayı özelliklerin reaktivitesinin artmasına ve mekanik özelliklerin değişmesine neden olur (Natishan et al. 2000).



Şekil 2.16 Korozyon aşınması etkileşim mekanizmaları (Stachowiak and Batchelor 2013).

Korozyon aşınması, reaktif bir ortama maruz kalmanın neden olduğu yüzey hasarıdır. (atmosfer, nem birikmesi, bakteri, asitler, elektrolitler, proses kimyasalları veya yağlayıcı yan ürünler). Korozyon yüzeysel bir olgudur. Bu yüzden, malzemenin yüzeyi korozyona karşı direnci düşük olsa bile, mükemmel yüzey özelliklerine sahip malzeme kullanmak yeterlidir (Affatato and Brando 2013).

Korozyonu azaltma teknikleri;

- Korozyona dayanıklı metalurji
- Sıvı kirlenme kontrolü (ısı, nem, su, asitler, bakteri)
- Koruyucu bariyer (kaplamalar, yüzey işlemleri vb.)
- Korozyon kontrol edici katkı maddeleri (pas önleyiciler, metal deaktivatörleri, üst taban katkı maddeleri vb.)

Korozyon aşınmasının başlıca nedenlerinden biri, uygun olmayan bileşen malzemeleridir. En iyi uygulamalar için, her zaman mükemmel korozyon direnci özelliklerine sahip malzemelerin kullanılması önerilir. Örneğin, vidalar ve namlu kaplamaları ile mükemmel çalışan malzemeler arasında nikel alaşımları, sertleştirilmiş

paslanmaz çelik ve demir içermeyen malzemeler bulunur. Korozyon aşınmasına neden olan diğer faktörler aşağıdaki gibidir (İnt.Kyn.12).

- Yanlış tasarım
- Uygun olmayan ısı profili
- Yetersiz nem giderme

Korozyon aşınmasının önlenmesi için başlıca etmenler;

- Sıcaklık, hız ve yükün azaltılması
- Yağ soğutmanın iyileştirilmesi
- Uyumlu materyaller kullanmak
- Fosfat gibi yüzey kaplamalarının kullanılması

2.4.2 Aşınmanın Azaltılması İçin Gerekli Önlemler

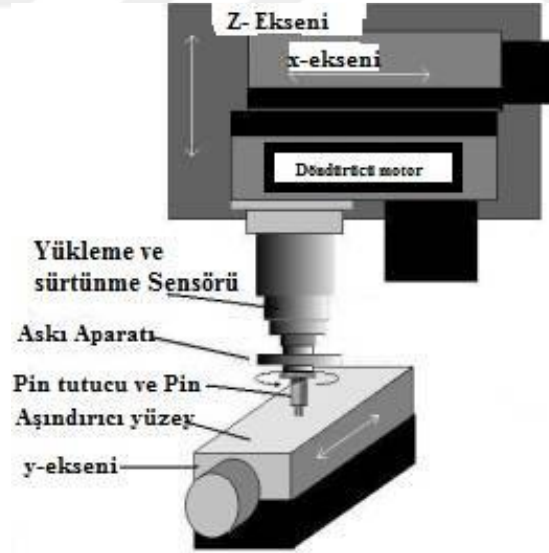
- a. Aşınmaya dayanıklı malzeme seçimi, parçanın çalıştığı ortamdaki mevcut aşınma türü ve şiddeti belirtilerek yapılmalıdır.
- b. Parçanın şekli, aşınmayı en aza indirecek şekilde tasarlanmalıdır.
- c. Sadece aşındırıcı ortamla temas halindeki yüzeyler veya tüm yüzey alanı, esas malzemenin özelliklerinden daha üstün özelliklere sahip ve mevcut aşınma türüne daha dayanıklı bir malzeme ile kaplanmalıdır.
- d. Parçanın tamamının aşınmaya dirençli malzemeden üretilmesi yerine, maliyeti azaltmak açısından sadece aşınan yerlerin aşınmaya dirençli malzemelerden üretilmesi daha uygun olacaktır.
- e. Parçanın üretim aşamasında herhangi bir imalat hatasına yer verilmemelidir.
- f. Bir yağın vizkozitesi sıcaklığa göre değişir. Vizkozite indeksi büyük olan yağlar, sıcaklık ile özellikleri daha az değişim gösteren yağlardır. Yağlayıcı ile çalışan ortamlarda yüksek vizkozite değerli ve yüksek basınca dayanıklı yağlar (fosfor ve kükürt katkılı) kullanılarak yağ filminin çabuk bozulması önlenabilir. Bununla beraber, katkılı yağların oksidasyon aşınmasını arttırıcı bir rol oynadığı da düşünüldüğünde malzeme seçiminde daha dikkatli olunmalıdır.

- g. Soğutucu seçimi, parçanın çalışma ortamına uygun biçimde olmalıdır.
- h. Yağlayıcı ve soğutucunun uygun bir filtreleme işleminden geçirilerek içindeki aşındırıcı partüküllerin sisteme tekrar girmesine engel olunmalıdır.
- i. Yağlayıcının kontrolleri düzenli olarak yapılmalı ve en düşük kullanım limiti belirlenerek belli aralıklarla yenilenmelidir.
- j. Sürtünme elemanları malzeme açısından bir birine uygun seçilmelidir (Sarıkaya 2007, Ayvaz 2013).

2.4.3 Deneysel Aşınma Metodları

2.4.3.1 Pin-On-Flat Test Yöntemi

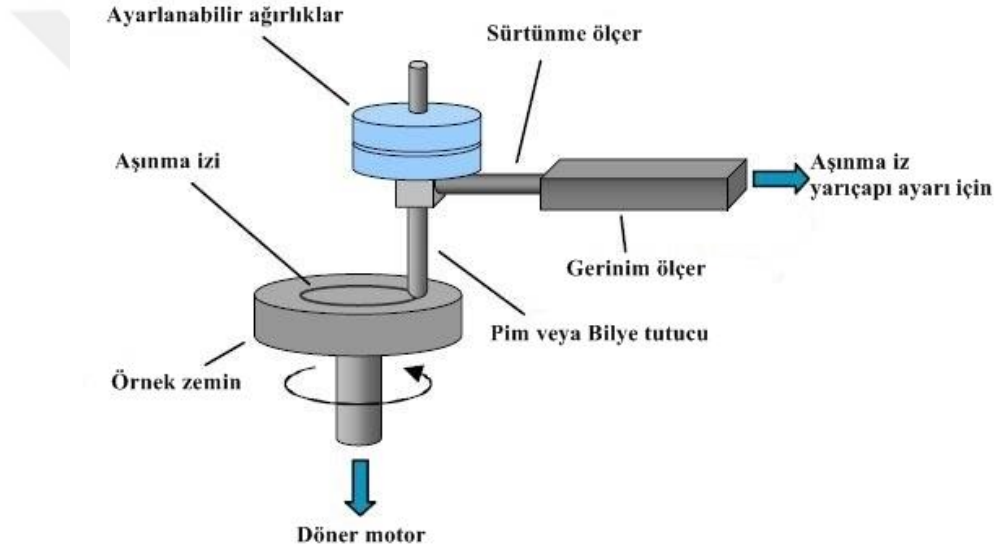
Bu aşındırma yönteminde bir y eksenini boyunca dönen bir pimin numune yüzeyinde doğrusal hareket etmesiyle sürtünme katsayıları hesaplanır. Burada alt tabaka sabit iken numune x eksenini boyunca hareket ettirilerek uç kısımdaki sensör vasıtasıyla sürtünme kuvveti, normal kuvvet, sıcaklık ve zaman gibi faktörler hesaplanır. Burada yük yukarıdan uygulanır (İnt.Kyn.13).



Şekil 2.17 Pin-on-flat aşındırma test yönteminin şeması (İnt.Kyn.13).

2.4.3.2 Pin-On-Disk Test Yöntemi

Malzemelerin kayma koşulları altında aşınma ve sürtünme özelliklerini değerlendirmek için kullanılan test yöntemidir. Çalışma prensibi, disk üzerindeki pin yatay dönen bir disk ve kalibre edilmiş bir ağırlık vasıtasıyla malzemenin yüzeyini aşındırması temeline dayanır. Aşındırma esnasında dönel disk üzerindeki numuneye aksenal sabit bir yük uygulanır. Cihaz üzerinde bulunan sensörler uygulanan yüke karşılık gelen kuvvet değerleri vasıtasıyla sürtünme katsayısı gibi pek çok faktörler hesaplanabilir (Kennedy and Hashmi 1998).

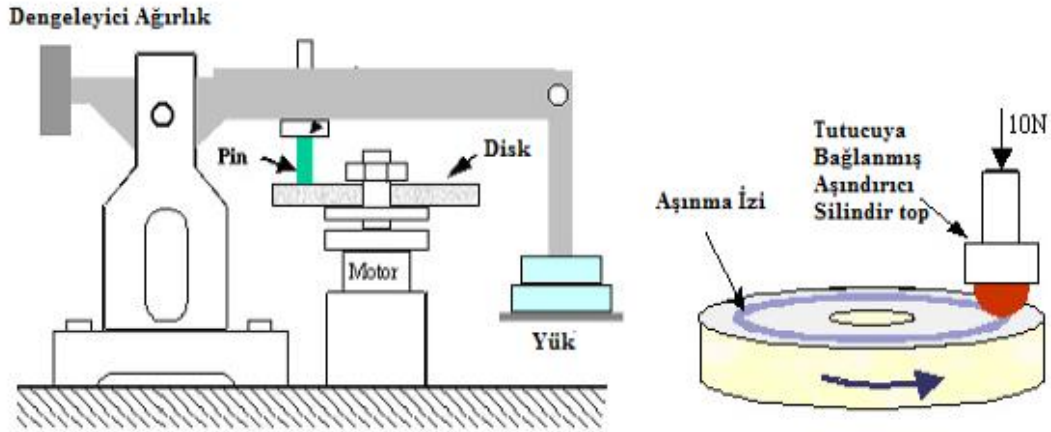


Şekil 2.18 Pin-on-disk aşındırma test yönteminin şeması (İnt.Kyn.14).

Döner disk üzerine monte edilen numune, bir bilye veya pime yük uygulanarak numune yüzeyi aşınır. Disk üzerindeki pine bağlı gerinim ölçer, çalışılacak numunelerde kontrollü aşınma sonucu meydana gelen sürtünme katsayılarını kaydederek numune hakkında karşılaştırma yapılmasına olanak tanır. Numunede aşınma sonucu kaybedilen malzeme kaybı, malzemenin aşınma hacim oranının hesaplanmasına izin verir. Aşınma hacim oranı, tüm numunelerde aynı işlem yapıldığında aşınma direnci karşılaştırmaları için nicel bir değer olarak kullanılabilir.

2.4.3.3 Ball-On-Disk Test Yöntemi

Bu yöntem, pin-on-disk yöntemiyle oldukça benzerdir. Dönel disk üzerine sabitlenmiş numunenin, sabit bir yük altında aşındırıcı ucun numune yüzeyini aşındırması sonucu numune yüzeyindeki sürtünme kuvvetinin hesaplanması temeline dayanır (İnt.Kyn.15).

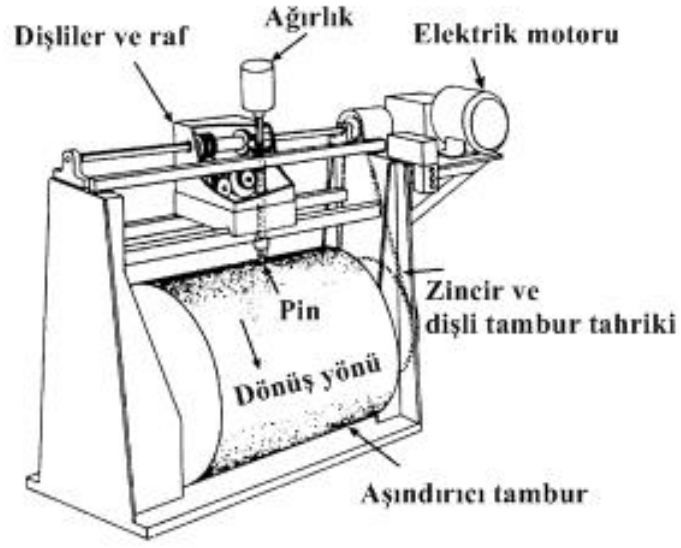


Şekil 2.19 Ball-on-disk aşındırma test yönteminin şeması (İnt.Kyn.15).

Test yönteminde, pim üzerinde 8 mm çapında dairesel tungsten karbür veya alümina gibi aşındırıcı bilyeler kullanılmaktadır. Pime uygulanan yük ve pimdeki sert bilye vasıtasıyla numune yüzeyi aşındırılır. Uygulanan yüke loadcell bağlanarak aşınma esnasındaki sürtünme kuvvetleri belirlenir. Numuneye belirli yük, devir ve uzunluk parametreleri uygulanarak sürtünme kuvveti etkisiyle numune yüzeyinde oluşan aşınma izi derinliği profilometre testi ile saptanabilir (İnt.Kyn.15).

2.4.3.4 Pin-On-Drum Test Yöntemi

Silindirik bir pin üzerinde aşındırıcı kâğıt vasıtasıyla malzeme yüzeyinin aşındırılması temeline dayanır. Bu testin aşınma simülasyonu değirmene benzemektedir (Kennedy and Hashmi 1998).



Şekil 2.20 Pin-On-Drum aşındırma test yönteminin şeması (Alman and Hawk 2001).

Aşındırıcı dönen bir tambura (silindire) sabit bir yük altında sürtünme kuvveti, sıcaklık, aşınma derinliği gibi malzeme özellikleri ölçülebilir. Bu yöntemin başka bir varyasyonunda tutucu pim’de aksenal olarak kendi etrafında dönebilmektedir (İnt.Kyn.13).

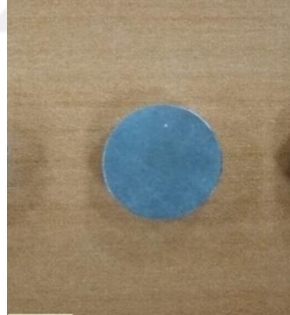
3. MATERYAL ve METOT

Bu tezde yer alan tüm deneysel çalışmalarda AKÜ bünyesinde bulunan Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarları ve AKÜ-TUAM araştırma merkezi kullanılmıştır.

3.1 İncelenen Malzeme

Bu çalışmada, AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğine göre S (kükürt) oranı oldukça yüksek olan 430F ferritik paslanmaz çeliği kullanılmıştır. İçeriğindeki S (kükürt) oranının fazla olması bu çeliğin işlenebilirliğini önemli derecede arttırmaktadır (Daurelio 1998, Avalos 2009).

İncelenen çelik, 3 metre boyunda ve 16 mm çapında silindirik içi dolu malzeme olarak temin edilmiştir. Temin edilen malzemeden Resim 3.1’de gösterilen şekilde 7 adet numune çıkarılmıştır. 1 tanesi referans (ham) numune olarak kullanılmıştır.



Resim 3.1 Deneylerde kullanılan ve işlem görmemiş numune gösterimi.

Temin edilen malzemeden numune alınarak XRF spektro-analiz ile kimyasal bileşim analizi yapılmıştır. Deneyde kullanılacak 430F ferritik paslanmaz çeliğin kimyasal analizi Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Deneylerde kullanılan 430F ferritik paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi.

Çelik	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
					%				
430F	0,078	0,528	0,706	0,022	0,224	17,076	0,240	0,188	80,656

Bu elik türü genelde ulaşım aralarınday, elektronik ekipmanlarday, gıday ve gıday üretim tesislerinde, dekorasyonlarday, otomattay işlenecek suy ve buhar için cıvata, mil, burç gibi parçalarda kullanılmaktadır (İnt.Kyn.2, İnt.Kyn.3).

3.2 Borlama İşlemi

İlk olarak, uygun ölçülerde kesilerek hazırlanan numunelerin yüzeyleri (yüzeylerin pürüzsüz ve paralel olması için) hassas taşlama cihazıyla taşlanmış ve borlama için uygun hale getirilmiştir (Resim 3.2). Borlama işlemi kutu borlama şeklinde gerçekleştirilmiş ve bor verici olarak ticari Ekabor II kullanılmıştır. Borlama işlemi 900 C ve 1000 C sıcaklıklarday 2, 4 ve 6 saat sürelerle yapılmıştır. Borlama için silindirik paslanmaz elik potalar kullanılmıştır. Resim 3.2’de borlama işlemi için yüzeyleri taşlanarak hazırlanan numuneler gösterilmiştir.



Resim 3.2 Yüzeyleri taşlanmış numuneler.

Borlama işlemi öncesinde, numunelerin yüzeyleri alkol ile temizlenerek istenmeyen maddelerden (yağ, kir, nem vb.) arındırılmıştır. Paslanmaz potanın (kutuy) tabanına ticari Ekabor II tozu (%5 B₄C, %5 KBF₄, %90 SiC), numunenin kutu tabanına olan mesafesi dikkate alınarak, yeterli miktarday dökülmüştür. Ardından yüzeyleri temizlenen 1 adet numune potanın içerisine konulmuştur. Daha sonra tekrardan tabanay dökülen toz kadar Ekabor II tozu numunenin üzerine dökülüp, üstü düzeltilmiştir. Potanın kapağı sıkı geçme şeklinde kapatılıp dış ortamlay ilişkisi nispeten kesilmiştir. Resim 3.3’de borlamaday kullanılan içi doldurulmuş ve sıkı geçme şeklinde kapatılmış potay gösterilmektedir.



Resim 3.3 Borlama işleminde kullanılan paslanmaz çelik pota.

Hazır olan potalar Protherm marka fırın içerisinde 900 ve 1000 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerde gerçekleştirilmiştir. Borlama işleminde kullanılan Protherm marka fırın Resim 3.4’de gösterilmektedir.



Resim 3.4 Borlama işleminde kullanılan fırın.

3.3 Ultrasonik Temizleme

Borlama işleminden sonra XRD analizi öncesi, ultrasonik temizleme gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu temizleme işlemi aşınma deneyi öncesi ve sonrasında da yapılmıştır. Bu işlemin temel amacı, numune yüzeyinde istenmeyen maddeleri numuneden uzaklaştırmaktır. Çalışma prensibi, titreşim yoluyla numune yüzeyinde görünmeyen yerlerde kalan maddeleri titreşim yoluyla temizler. Bu işlemin uygulanmasında, numune 100 ml beher içerisine etil alkol doldurulup içerisine numune yerleştirilir ve cihaz çalıştırılır, numuneler etil alkol içerisinde 30 dk bekletilir. Her bir numune ayrı beherlere yerleştirilmiştir. Resim 3.5’de ultrasonik temizleme cihazı gösterilmektedir.



Resim 3.5 Ultrasonik temizleme cihazı.

3.4 XRD Analizi

Borlama işlemi sonrasında numune yüzeyinde oluşan bor tabakasındaki bor bileşiklerinin analizinde AKÜ- TUAM’da bulunan XRD cihazı kullanılmıştır. Resim 3.6’da AKÜ- TUAM analiz edilen XRD cihazı gösterilmiştir.



Resim 3.6 Bor tabakasındaki bor bileşikleri analizinde kullanılan XRD cihazı.

3.5 Aşınma Deneyi

Bu tez çalışmasında uygulanan aşınma deneyi, Ball-on-disk aşınma yöntemine uygun bir cihazla yapılmıştır. Bu yöntemde, numune dönen bir disk üzerine yerleştirilir. Belirli yük uygulanarak ve ana malzemedan daha sert bir malzeme (bilye) temas ettirilerek aşınma gerçekleştirilir.

Aşınma deneyleri, yaklaşık 6,5 mm yüksekliğinde ve 16 mm çapındaki deney numuneleri kullanarak, normal atmosferik koşullar altında ve kuru ortamda yapılmıştır. Aşınma deney şartları olarak, 10N yük altında 0,2 m/sn kayma hızını verecek şekilde 318 devir ve 500 m yol alacak kadar süre kabul edilmiştir. Bu kayma hızına göre iz çapı 12 mm olarak ayarlanmıştır. Ayrıca, aşındırıcı olarak 8 mm çapında WC-Co (Tungsten Karbür-Kobalt) bilye kullanılmıştır. Loadcell ile ölçülen sürtünme kuvveti bilgisayara aktararak, bu değerler ile sürtünme katsayısı hesaplanmıştır.

Numune cihazın dönen disk (ayna) kısmına yüzeyi düz olacak şekilde (Aşındırıcı bilyenin bulunduğu yüzey üzerinden su terazisi ile yüzeyler paralel olacak şekilde ayarlanmıştır.) yerleştirilmiştir. Daha sonra, numune yüzeyi ve bilye alkolle iyice temizlenmiş ve

kurutulmuştur. Hiçbir şekilde el değmeden bilye numune yüzeyine yerleştirilmiştir. Bilgisayar ortamından aşınma deneyinde önceden belirlenmiş parametreler (devir sayısı, yük değeri, toplam katedilen yol, izin çapı) girilmiş ve deney başlatılmıştır. Her bir numunenin iki yüzeyine de aşınma testi uygulanmıştır. Her yüzeyden sonra bilyenin aşınan kısmı değiştirilmiştir. Resim 3.7’de deneyde kullanılan aşınma cihazı gösterilmiştir.



Resim 3.7 Aşınma deneyinde kullanılan aşınma cihazı.

3.6 Profilometre Cihazı ile Aşınma İzi Analizi

Aşınma deneyi sonucunda numune yüzeylerinde oluşan aşınma izlerin analizi, Nanovea ST 400 adlı cihazda yapılmıştır. Numuneler bu cihazın tablasına yerleştirilerek yüzeylerindeki aşınma izleri lazer ışınıyla taranmıştır. Daha sonra, cihazın bağlı olduğu bilgisayardaki Professionel 3D programı vasıtasıyla numune yüzeyinin ve aşınma izinin üç boyutlu görüntüsü çıkarılmıştır. Bu cihaz yardımıyla numunenin aşınma hacmi ve aşınma derinliği hakkında bilgi edinilmiştir. Resim 3.8’ de analizde kullanılan Profilometre cihazı gösterilmiştir. Resim 3.9’ da ise cihaz yardımıyla çizilen üç boyutlu görüntü gösterilmiştir.



Resim 3.8 Profilometre cihazı.



Resim 3.9 Numune yüzeyi ve aşınma izinin üç boyutlu görüntüsü (örnek).

3.7 SEM ve EDX Analizleri

Borlanan numunelerin yüzeyinde oluşan bor kaplama tabakasının SEM analizi yapılmış ve aynı zamanda bor tabakasında bulunan elementler için çizgisel EDX element analizi de yapılmıştır. Bununla birlikte, aşınma deneyinden sonra da aşınma izi SEM analizleri yapılmıştır. SEM ve EDX analizlerinde LEO 1430 VP model AKÜ-TUAM'a ait SEM cihazı kullanılmıştır. Aşağıdaki Resim 3.10'da SEM ve EDX analizleri için kullanılan LEO marka SEM cihazı gösterilmiştir.



Resim 3.10 SEM ve EDX analiz cihazı (LEO 1430 VP model).

3.8 Metalografik İşlemler

Aşınma deneyine tabi tutulduktan sonra numuneler, hassas kesme cihazı ile ortadan ikiye kesilmiş ve metalografik incelemeler için hazırlanmıştır. Kesme anında numunenin sürtünmeden dolayı oluşacak sıcaklıktan etkilenmemesi için sıvı soğutucu bor yağı kullanılmıştır. Numuneyi kesme anında çok dikkat edilerek kesilmiştir. Aşağıdaki Resim 3.11’de numuneleri kesmek için kullanılan hassas kesme cihazı gösterilmiştir.

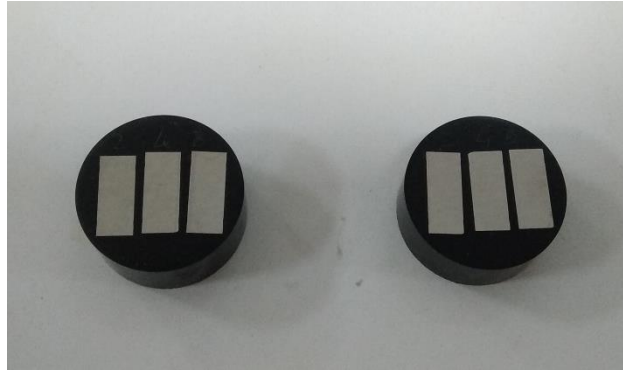


Resim 3.11 Hassas numune kesme cihazı.

Kesilen numunelerde kesme sonucu oluşan çapaklar giderildikten sonra numunelerin diğer deney aşamalarının (metalografik incelemeler ve mikro sertlik ölçümleri) uygun değerlendirilebilmesi için sıcak kalıplama (sıcak bakalit) yöntemiyle numuneler kalıplanmıştır. Sıcak kalıplamada kullanılan cihaz Resim 3.12’de, sıcak kalıplama uygulanan numuneler Resim 3.13’de gösterilmiştir.



Resim 3.12 Sıcak kalıplama cihazı.



Resim 3.13 Sıcak kalıplama yöntemiyle kaplanmış deney numuneleri.

Numunelerin metalografik olarak incelenmesi aşamasında zımparalama ve parlatma işlemlerinde Forcibol 2V zımpara cihazı kullanılmıştır. Cihazın görüntüsü Resim 3.14’de gösterilmiştir.



Resim 3.14 Zımparalama ve parlatma cihazı.

Zımparalama işlemine 120'lik zımpara kâğıdı ile başlanmıştır. Ardından numuneler sırasıyla kalından inceye doğru 240, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200'lük zımpara kâğıtlarından geçirilmiştir. Zımpara cihazı için devir 250-300 arası kullanılmıştır. Her zımpara kâğıdı değiştiğinde bir önceki numune yüzeyinde oluşan ize dik olacak şekilde numune tutulmuştur ve son zımpara kâğıdı da dâhil olmak üzere bu işlemler uygulanmıştır. Zımparalama işleminin ardından numune yüzeyini parlatma işlemine geçilmiştir. Parlatma işlemi, çuha üzerine 1 μm 'lik sıvı alümina (Al_2O_3) dökülerek gerçekleştirilmiştir.

Parlatma işleminin ardından 1 birim HCl, 1 birim HNO_3 ve 1 birim H_2O karışımı hazırlanarak numune yüzeyleri dağlanmıştır. Süreler deneme yanılma yöntemiyle AISI 430F ferritik paslanmaz çeliği için 45 saniye olarak tespit edilmiştir.

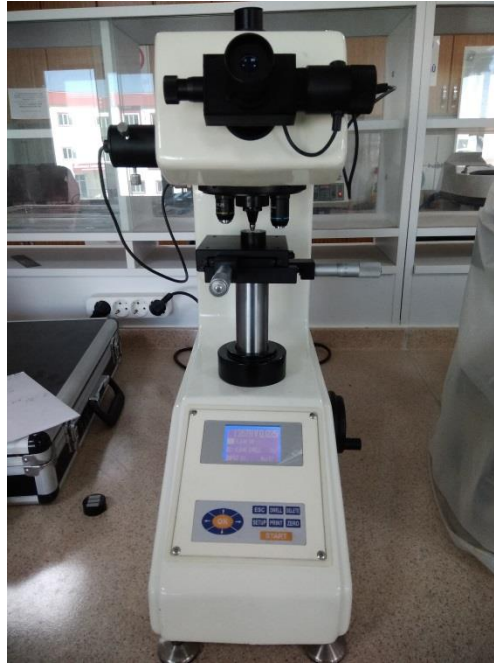
Dağlanmış numunelerin matris ve bor tabakaları Olympus BX60 marka optik mikroskop altında, $100\times$, $200\times$ ve $500\times$ büyütmelemlerde incelenmiştir. Olympus BX60 marka optik mikroskop ise Resim 3.15'de gösterilmiştir.



Resim 3.15 Olympus BX60 marka optik mikroskop.

3.9 Mikro sertlik Analizi

Borlama işlemi uygulanmış olan numunelere yüzeylerinde oluşan bor tabakasının sertlik ölçümleri BMS marka mikro sertlik cihazı ile yapılmıştır. Deneyde kullanılan cihazın görüntüsü Resim 3.16’de gösterilmiştir.



Resim 3.16 Deneyde kullanılan BMS marka mikrosertlik cihazı.

Sertlik ölçümleri bor kaplama tabakasının malzeme yüzeyinden itibaren başlanarak ana malzemeye (matrise) kadar ölçülmüştür. Mikrosertlik ölçümü Vickers yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri olarak, 25 gr yük, 10 sn yükleme süresi ve batıcı uç olarak ise tepe açısı 136° olan Elmas (kare tabanlı piramit) İndentör kullanılmıştır. Her bir numune için çıkan sertlik değerleri cihaz üzerinden direkt olarak okunmuştur.

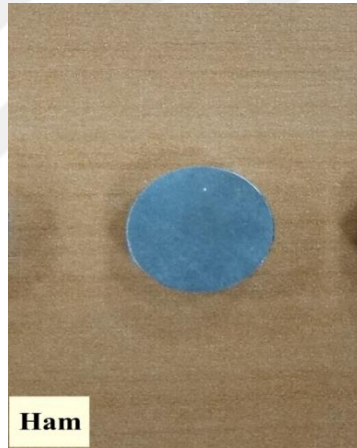


4. BULGULAR

Bu çalışmada incelenen AISI 430F ferritik paslanmaz çeliğine önce 900 ve 1000 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat sürelerle borlama işlemi uygulanmıştır. Daha sonra ise yüzeyde oluşan bor tabakasının XRD, SEM, ve optik mikroskop analizleri yapılmıştır. Ayrıca yüzeyden matrise doğru kaplama kalınlığı boyunca sertliğin değişimi ve çeliğin aşınma direnci saptanmıştır.

4.1 Borlama İşlemi Uygulanan Parçalar

İncelenen çeliğin belirlenen borlama sıcaklık ve süreleri sonucu oluşan numune dış görünüşleri aşağıda şekillerde gösterilmiştir.



Resim 4.1 Ham (borlanmamış) numunenin görüntüsü.



Resim 4.2 900 °C’de borlanmış numunelerin görüntüsü.



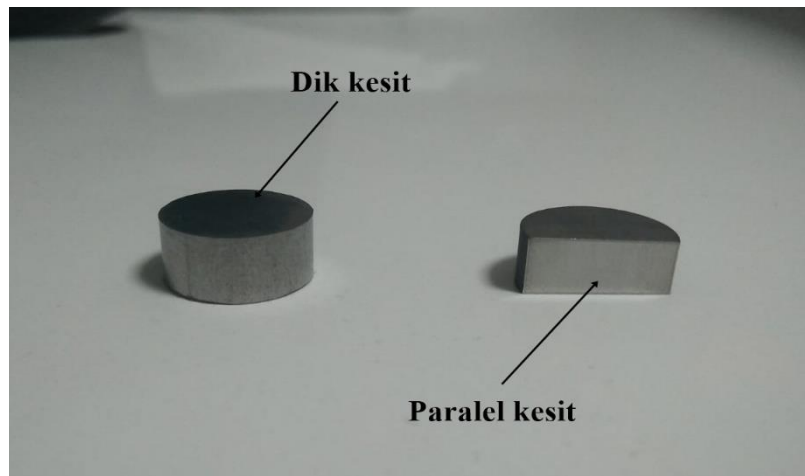
Resim 4.3 1000 °C’de borlanmış numunelerin görüntüsü.

Yukarıdaki resimlerden görüldüğü üzere, çeliğin ham numunesinin görüntüsü metalik parlak bir renkte iken borlama işlemi sonrasında tüm numuneler mat gri renkte bir görünüme sahiptirler.

4.2 Metalografik İnceleme ve Karakterizasyon Bulguları

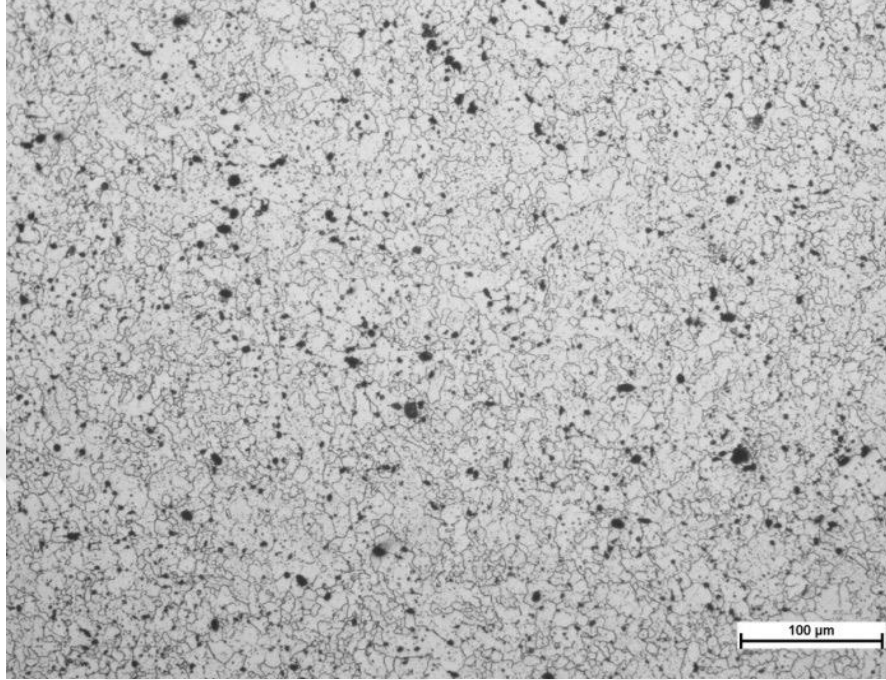
4.2.1 Ham (Ana) Malzemenin Mikro yapı Görüntüsü

Ham numunenin mikro yapı görüntüleri çubuk eksenine dik ve paralel kesitlerden alınmıştır. Bu kesitler aşağıdaki Resim 4.4’de gösterilmiştir.

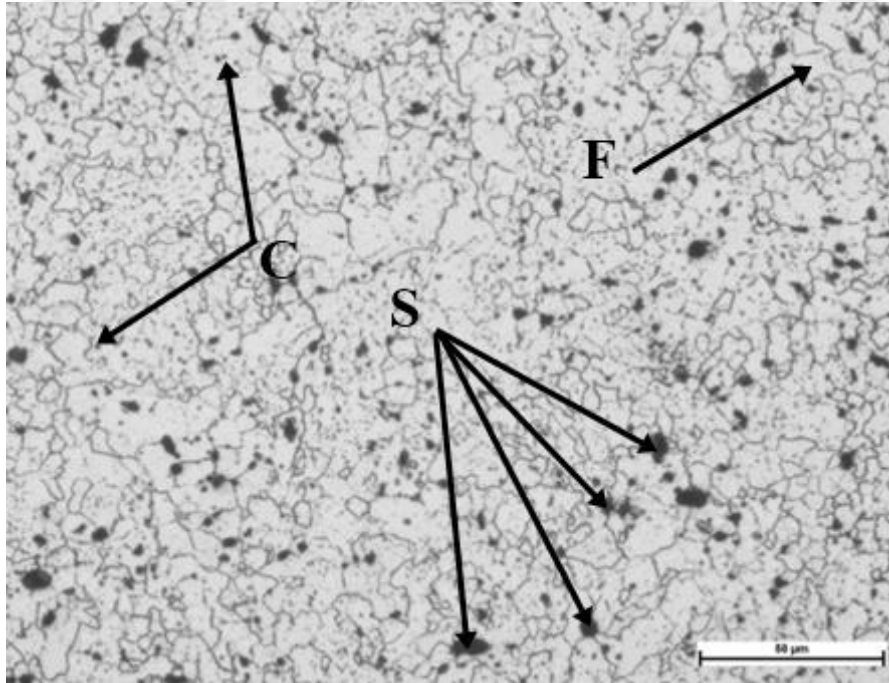


Resim 4.4 Çubuk eksenine dik ve paralel kesitlerin gösterimi.

Ham numunenin çubuk eksenine dik kesitinden elde edilen mikro yapı görüntüsü aşağıdaki şekil 4.1’de verilmiştir.



(a)

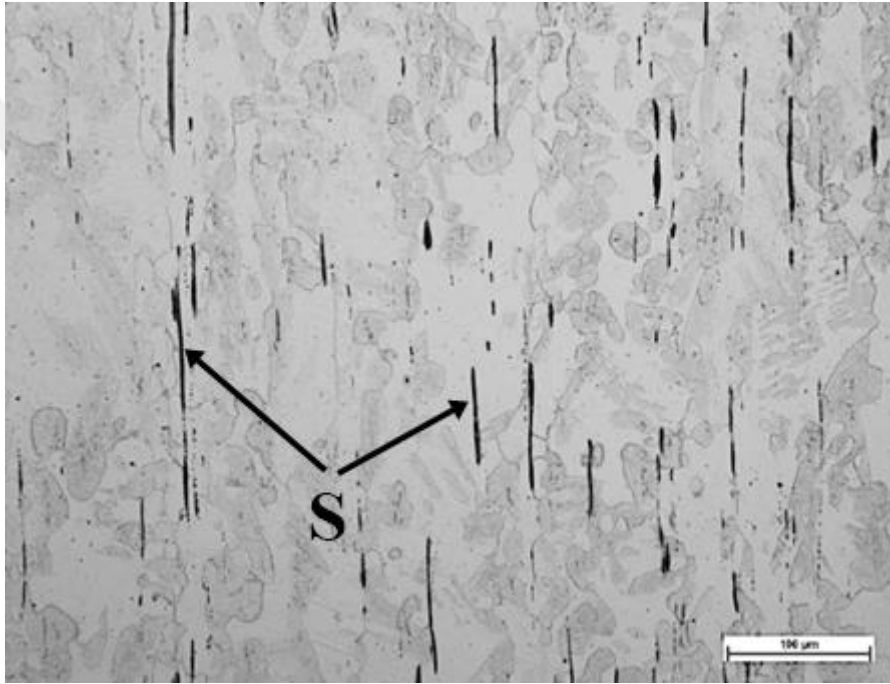


(b)

Şekil 4.1 İncelenen çeliğin dik kesitinin mikro yapıları, (a) 200^x, (b) 500^x.

Şekil 4.1 (b)'de görüldüğü üzere, 430F ferritik paslanmaz çeliğin mikro yapısında iri siyah bölgeler kükürtlü bileşikler “S”, ufak siyah bölgeler karbürler “C”, beyaz bölgeler ise ferrit “F” matristir. Ayrıca tane sınırları da oldukça net bir şekilde görülmektedir (Avalos 2009). Mikro yapıdaki kükürt “S” miktarı bu çeliğin işlenebilirliğini önemli ölçüde arttırmaktadır (Daurelio 1998, Avalos 2009).

Ham numunenin çubuk eksenine paralel kesitinden elde edilen mikro yapı görüntüsü Şekil 4.2’de verilmiştir.



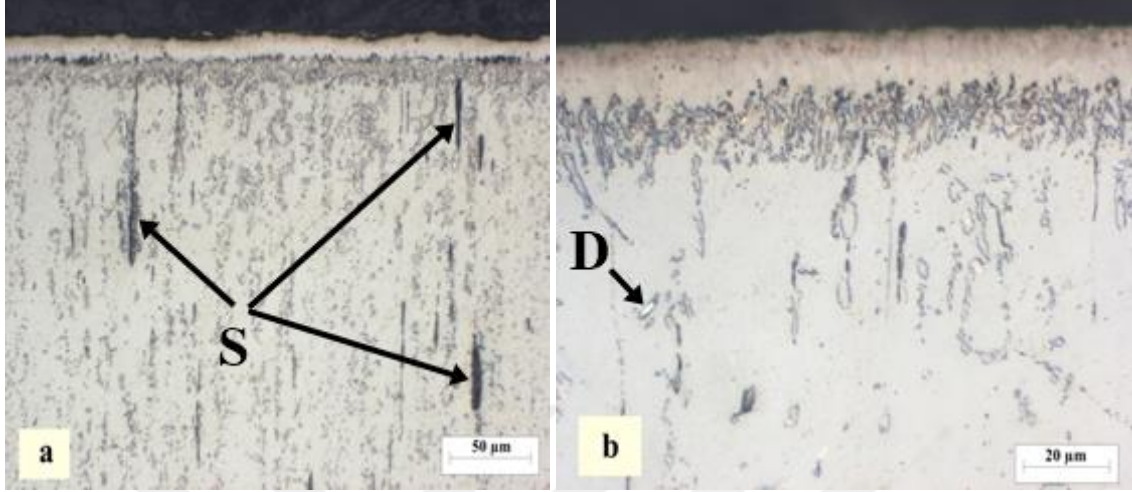
Şekil 4.2 İncelenen çeliğin çubuk eksenine paralel kesitinin (hadde yönü) mikro yapısı, 200^x.

Borlama işlemi sonrası hassas kesme cihazı ile kesilen numunenin haddeleme yönündeki mikro yapısına bakıldığında tanelerin ve kükürtlü bileşikler “S” haddeleme yönüne doğru uzadığı görülmüştür.

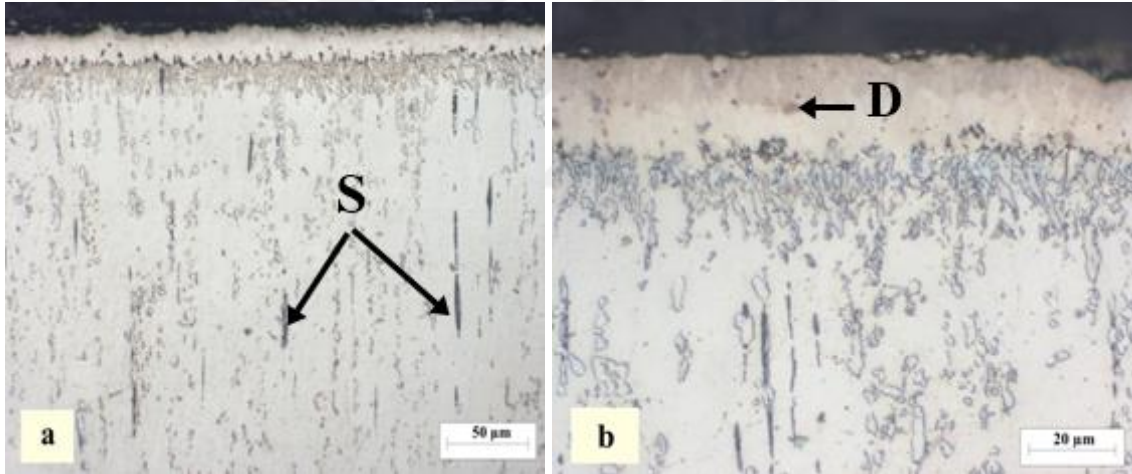
4.2.2 Bor Tabaka İçyapısı

Bu çalışmada incelenen çeliğin borlama işlemi sonucu oluşan bor tabakası, geçiş bölgesi ve ana malzeme mikro yapı görüntüleri sırasıyla aşağıda gösterilmiştir. Şekil 4.3, 4.4 ve

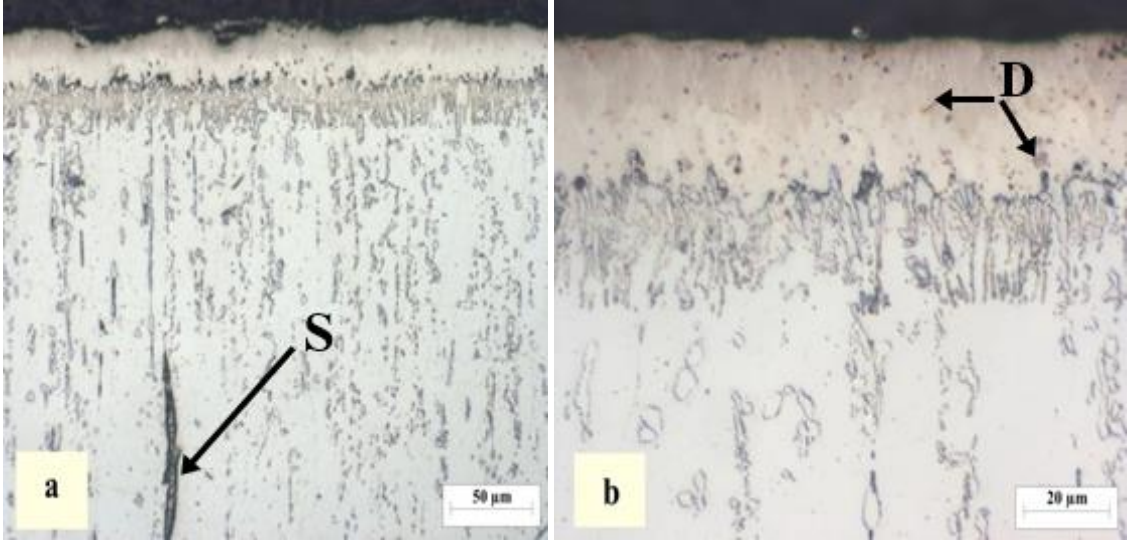
4.5’da 900 °C’de 2, 4 ve 6 saat sürelerle borlama işlemi uygulanan 430F ferritik paslanmaz çelik numunelerin mikro yapı resimleri verilmektedir.



Şekil 4.3 900 °C’de 2 saat bor tabaka mikro yapısı (a) 200^x, (b) 500^x.



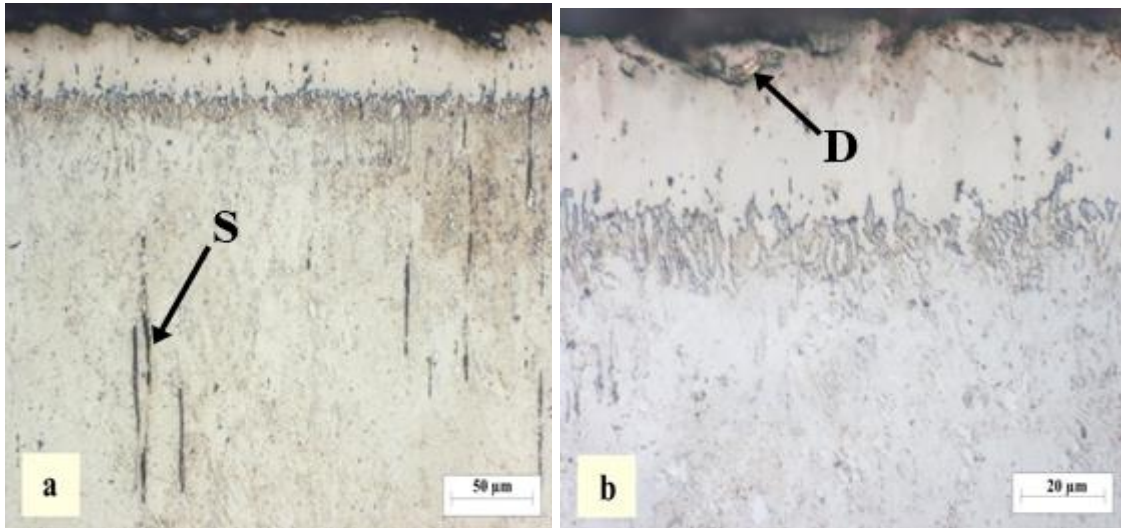
Şekil 4.4 900 °C’de 4 saat bor tabaka mikro yapısı (a) 200^x, (b) 500^x.



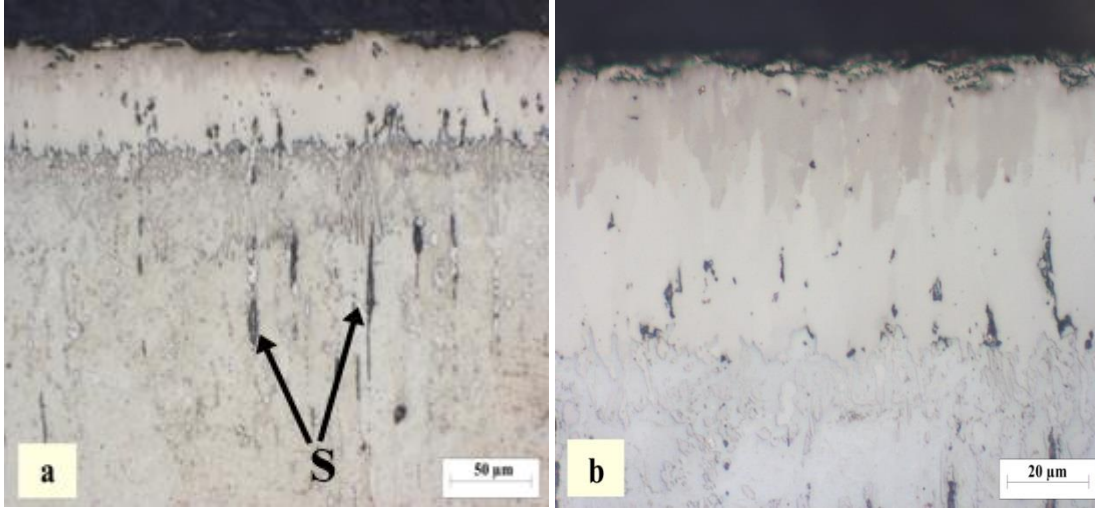
Şekil 4.5 900 °C’de 6 saat bor tabaka mikro yapısı (a) 200^X, (b) 500^X.

900 °C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlanmış numunelerin mikro yapıları incelendiğinde bor tabakasının süreye bağlı olarak arttığı görülmektedir. Ayrıca, bor tabakası ile ana malzeme arasındaki geçiş bölgesi belirgin bir şekilde ayrılmıştır. Resimler çubuk eksenine paralel kesitten elde edildiği için “S” ile gösterilen ve çizgi şeklinde uzanmış olan yapılar kükürt bileşikleridir. Resimlerde bazı dağlama hataları da “D” (özellikle geçiş bölgesinde) mevcuttur.

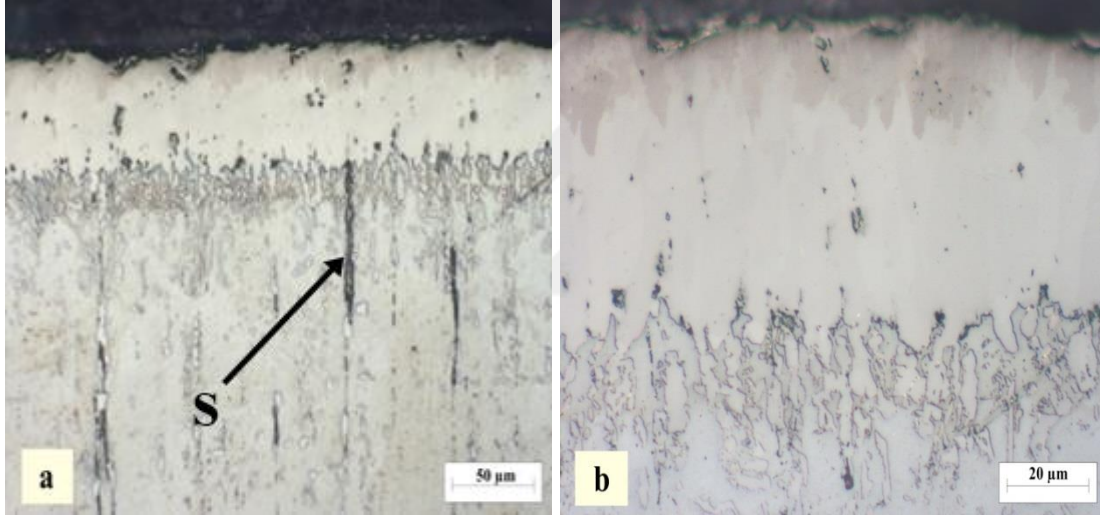
Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8’de 1000 °C’de 2, 4 ve 6 saat sürelerle borlama işlemi uygulanan 430F ferritik paslanmaz çelik numunelerin mikro yapı resimleri verilmiştir.



Şekil 4.6 1000 °C’de 2 saat bor tabakası (a) 200^X, (b) 500^X.



Şekil 4.7 1000 °C’de 4 saat bor tabakası (a) 200^x, (b) 500^x.

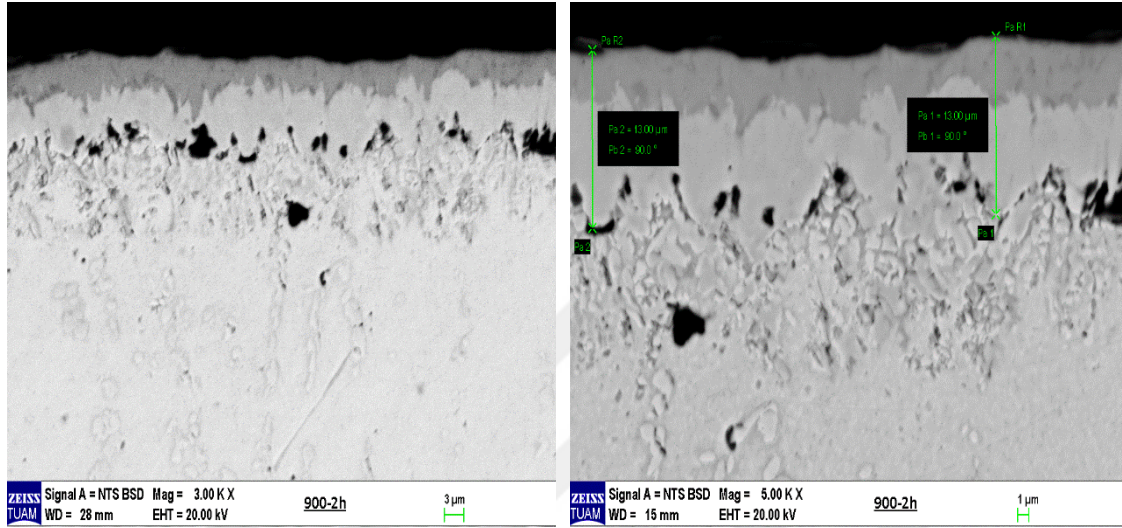


Şekil 4.8 1000 °C’de 6 saat bor tabakası (a) 200^x, (b) 500^x.

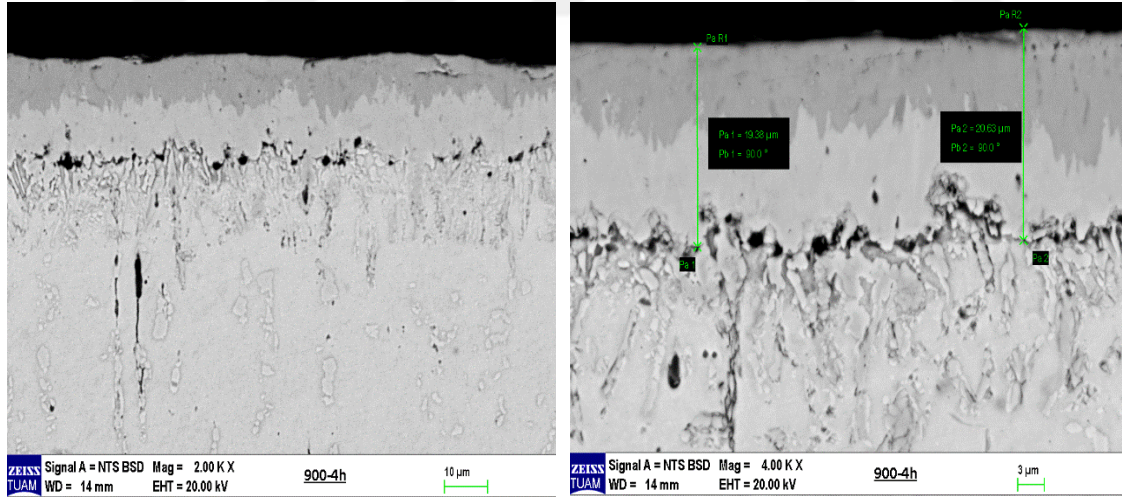
Yukarıda yer alan resimler incelendiğinde, diğer sıcaklıkta olduğu gibi bor tabakası süreye bağlı olarak artmaktadır. Bor tabakası ile ana malzeme arasındaki geçiş bölgesi net bir şekilde ayrılırken, mikro yapı görüntüleri çubuk eksenine paralel kesitten alındığı için “S” ile gösterilen ve çizgi şeklinde uzanmış olan yapılar kükürt bileşikleridir. Ayrıca, dağlama hataları da “D” (özellikle geçiş bölgesinde) gözlenmiştir.

4.2.3 Bor Tabakası SEM Mikro Yapısı

900 °C ve 1000 °C’de 2, 4 ve 6 saat sürelerle borlama işlemi uygulanan 430F ferritik paslanmaz çelik numunelerin iki farklı büyütmede alınmış SEM mikro yapı fotoğrafları Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da verilmiştir.

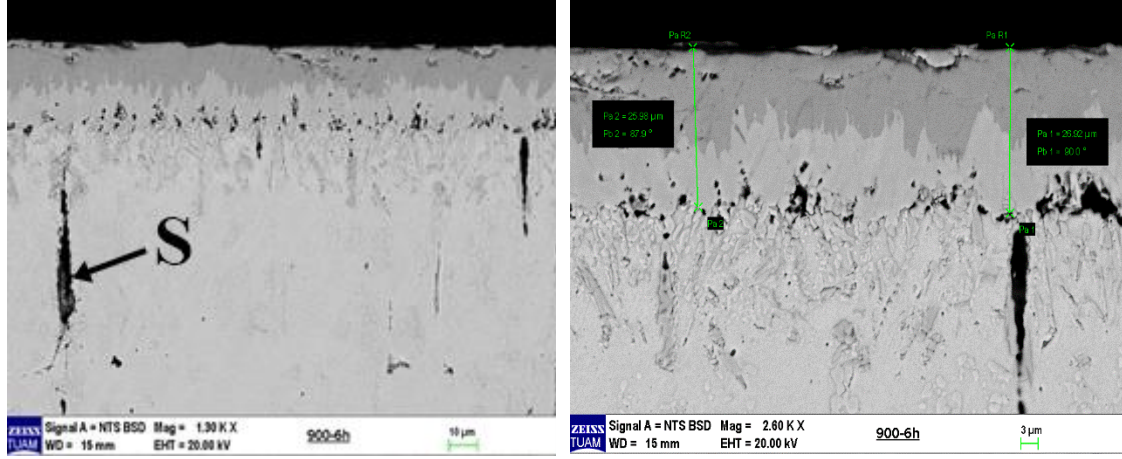


(a)



(b)

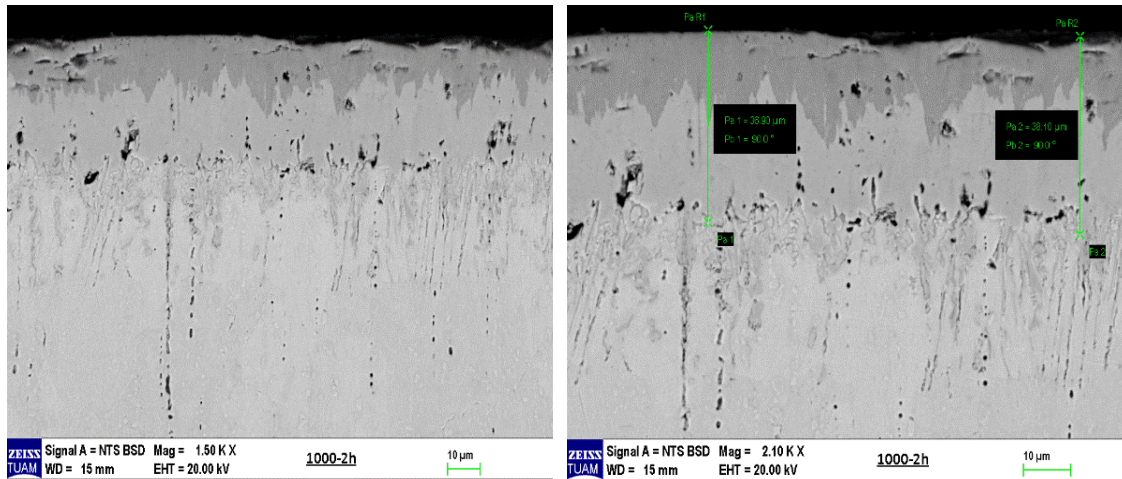
Şekil 4.9 900 °C’de borlanmış 430F ferritik paslanmaz çeliğinin bor tabakasının SEM mikro yapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.



(c)

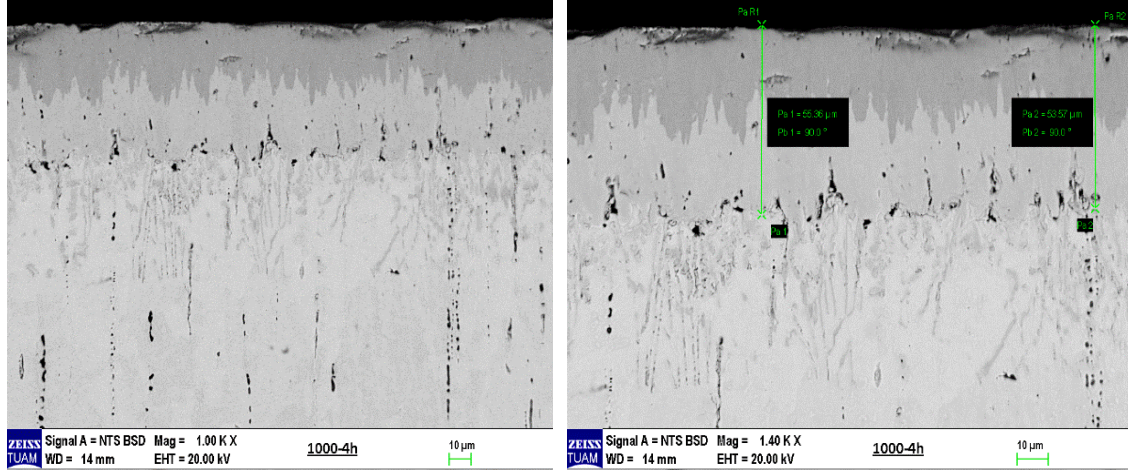
Şekil 4.9 (Devam) 900 °C’de borlanmış 430F ferritik paslanmaz çeliğinin bor tabakasının SEM mikro yapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

Yukarıdaki mikro yapılar incelendiğinde, bor tabakası kalınlığının süreye bağlı olarak arttığı görülmektedir. Bor tabakasında grinin farklı tonlarında görülen kısımlar farklı bor bileşiklerine işaret etmektedir. Daha detaylı analiz XRD, SEM-EDX ve kaplama tabakasının mikro sertlik değerlerine bakılarak yapılabilir. Burada, optik mikroskop için hazırlanmış numuneler kullanıldığından (hadde yönünde), çizgi şeklinde uzanmış olan yapılar kükürt bileşikleridir. Ayrıca, SEM cihazı vasıtasıyla ölçülen tabaka kalınlıkları resim üzerinde gösterilmiştir.

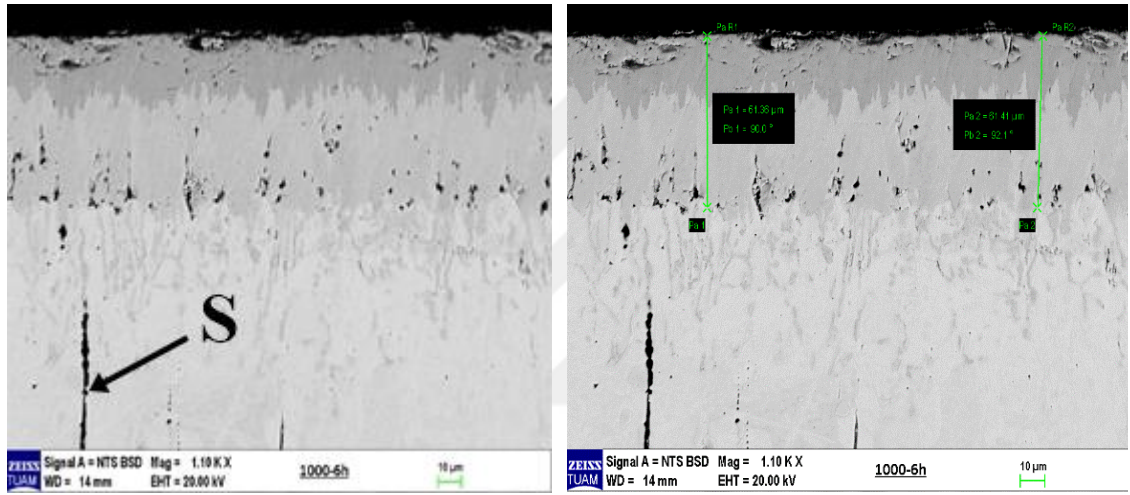


(a)

Şekil 4.10 1000 °C’de borlanmış 430F ferritik paslanmaz çeliği bor tabakasının SEM mikro yapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.



(b)



(c)

Şekil 4.10 (Devam) 1000 °C’de borlanmış 430F ferritik paslanmaz çeliği bor tabakasının SEM mikro yapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

Şekil 4.10’den görüldüğü üzere, 1000 °C’de borlanmış numunelerde de bor tabakasının süreye bağlı olarak arttığı görülmektedir. Aynı şekilde çubuk eksenine paralel kesitinden alınan SEM görüntülerinde çizgi şeklinde uzanmış olan yapılar kükürt bileşikleridir. Tabaka kalınlığı 900 °C’de borlanmış numunelere daha fazla olduğu için bor tabakasındaki farklı bor bileşiklerinin varlığını gösteren gri tonlar daha belirgin bir şekilde görülmektedir. SEM cihazı ile ölçülen tabaka kalınlıkları da resim üzerinde gösterilmiştir.

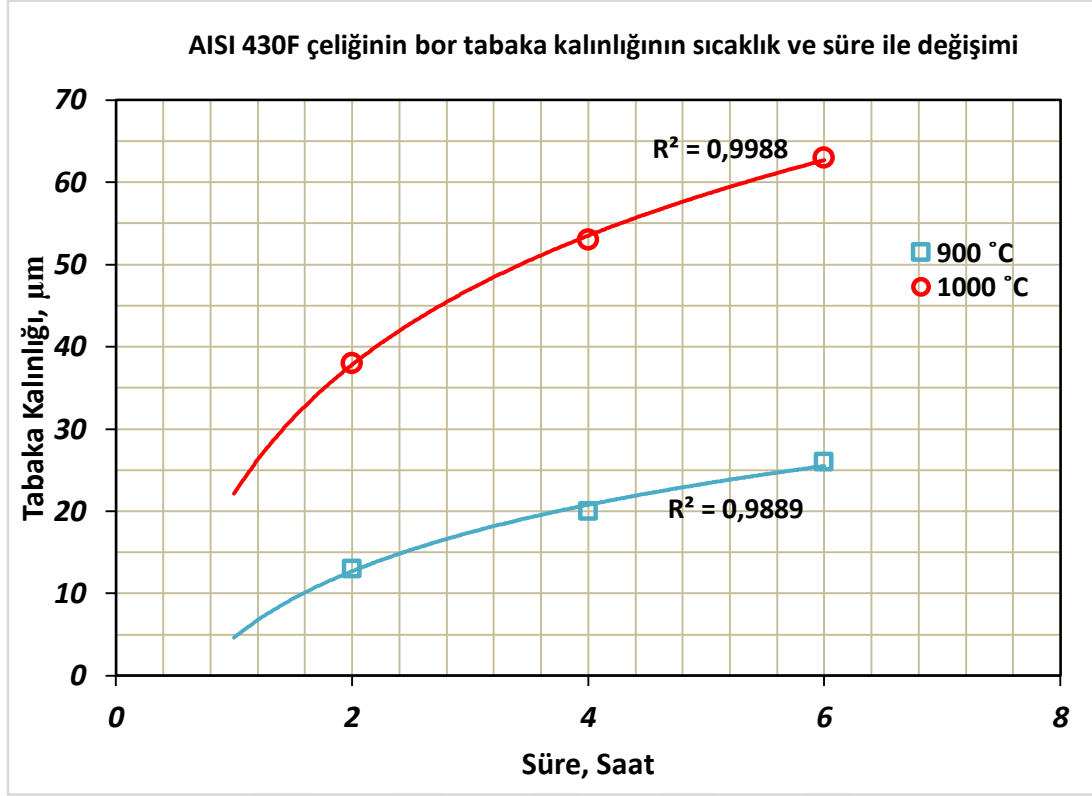
SEM mikro yapı analizleri sırasında ölçülen bor tabaka kalınlıkları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 4.1 Borlama sonucu oluşan bor tabaka kalınlıkları.

Borlama İşlemi		Bor tabakası
Sıcaklık (°C)	Süre (saat)	Kalınlık (μm)
900	2	13
	4	20
	6	26
1000	2	38
	4	53
	6	63

Çizelge 4.1’de görüldüğü üzere, 900 °C’de yapılan borlama işlemi sonucu elde edilen bor tabaka kalınlığı 13 – 26 μm arasında değişirken, 1000 °C’de yapılan borlama işlemi sonucunda elde edilen bor tabaka kalınlığı ise 38 – 63 μm arasında değişmektedir. İki sıcaklık karşılaştırıldığında 1000 °C’de yapılan borlama işleminde elde edilen en düşük bor tabaka kalınlığının, 900 °C’deki bor tabaka kalınlığında elde edilen en yüksek bor tabaka kalınlığına göre daha yüksek bor kaplama kalınlığına sahip olduğu görülmektedir.

Aşağıdaki Şekil 4.11’de borlanmış 430F ferritik paslanmaz çeliğinin bor tabaka kalınlığının sıcaklık ve süreye göre değişim grafiği verilmiştir.

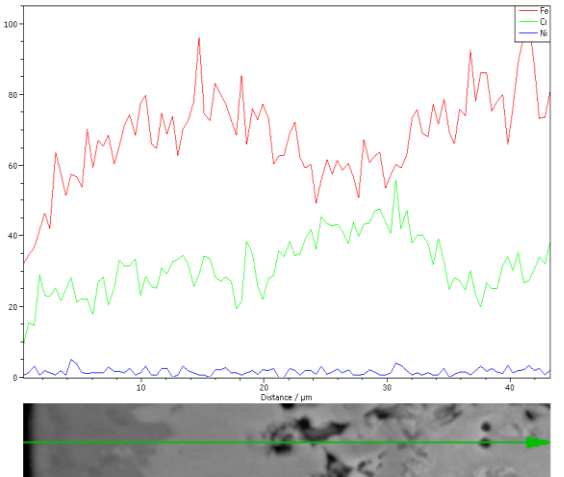
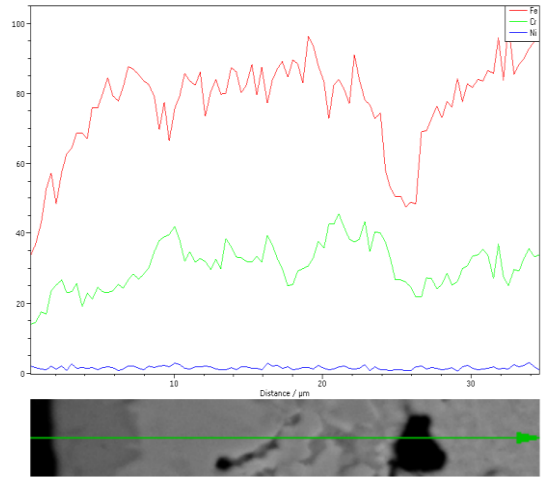
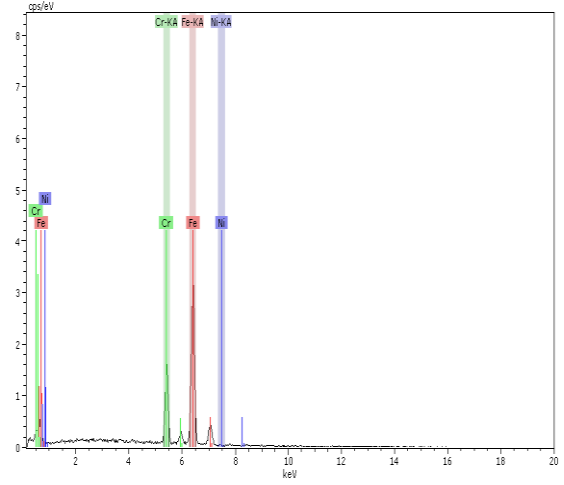
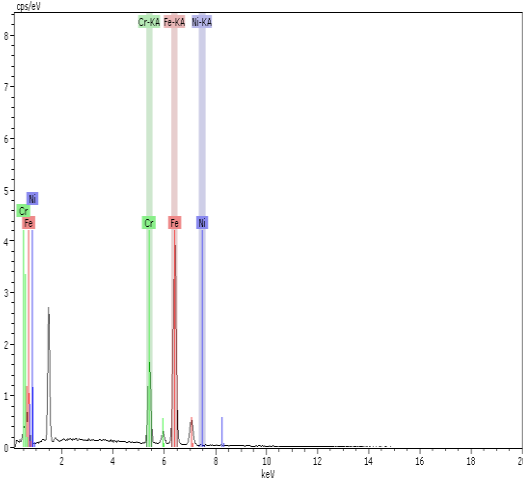
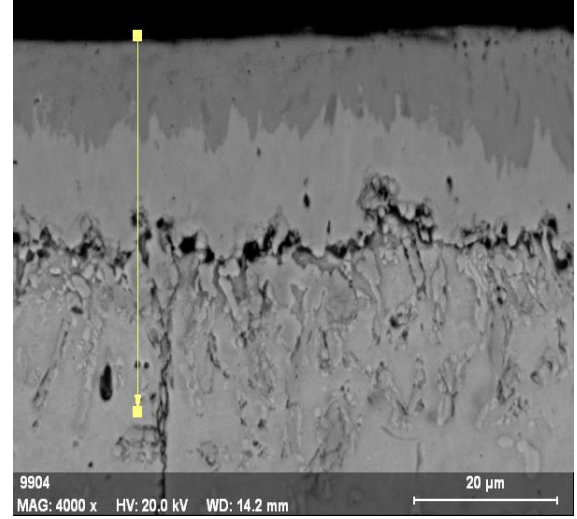
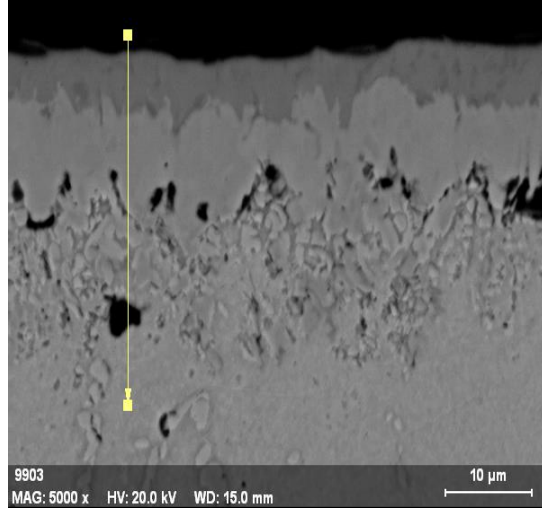


Şekil 4.11 İncelenen çeliğin bor tabaka kalınlığının sıcaklık ve süre ile değişimi.

Şekil 4.11’den görüldüğü üzere, bor tabaka kalınlığı artan borlama sıcaklığı ve süresi ile birlikte artmaktadır. Ayrıca, borlama işlemi difüzyon-temelli bir işlem olduğundan, borlama süresine bağlı olarak bor tabaka kalınlıkları difüzyonun ilk aşamalarında hızla artmakta, ancak daha sonra ise tabaka kalınlıklarındaki bu artış hızı (herhangi bir borlama sıcaklığı için) azalmaktadır. Yukarıdaki grafikte yer alan eğriler, logaritmik fonksiyon olarak hesaplanmıştır.

4.2.4 Bor Tabakası SEM-EDX Analizi

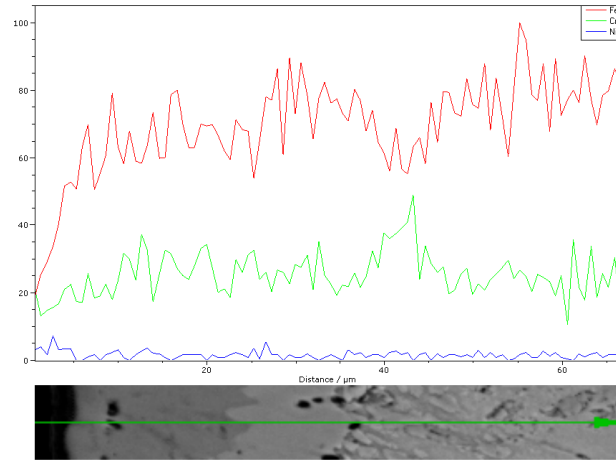
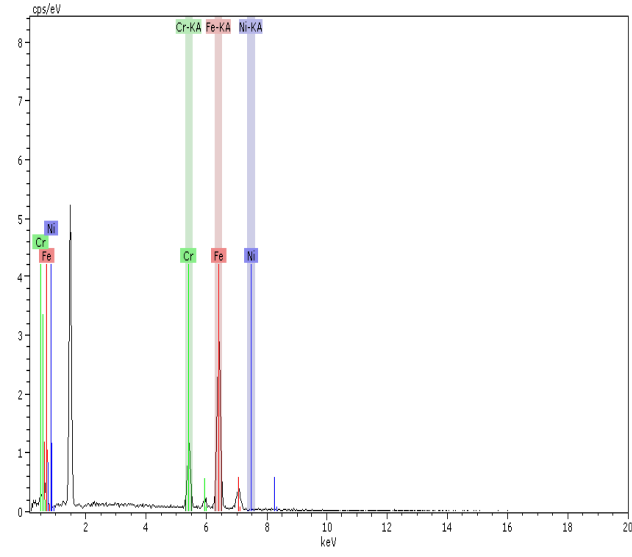
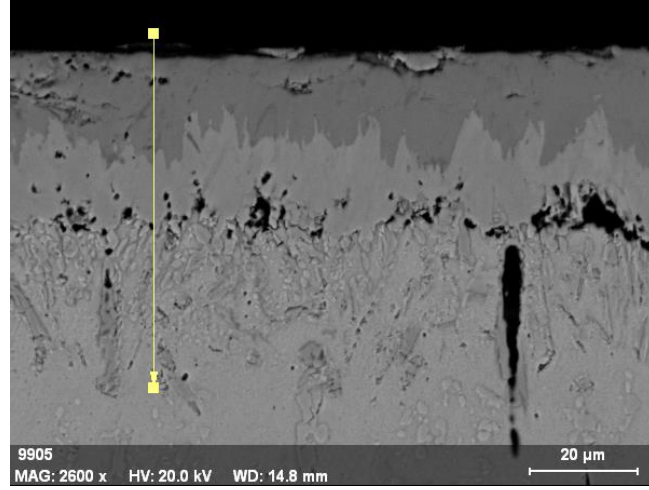
900 °C ve 1000 °C’de farklı sürelerle borlanmış olan 430F ferritik paslanmaz çeliğinin bor tabakasının SEM mikro yapısı üzerinde çizgisel SEM-EDX analizleri sırasıyla aşağıdaki resimlerde verilmiştir.



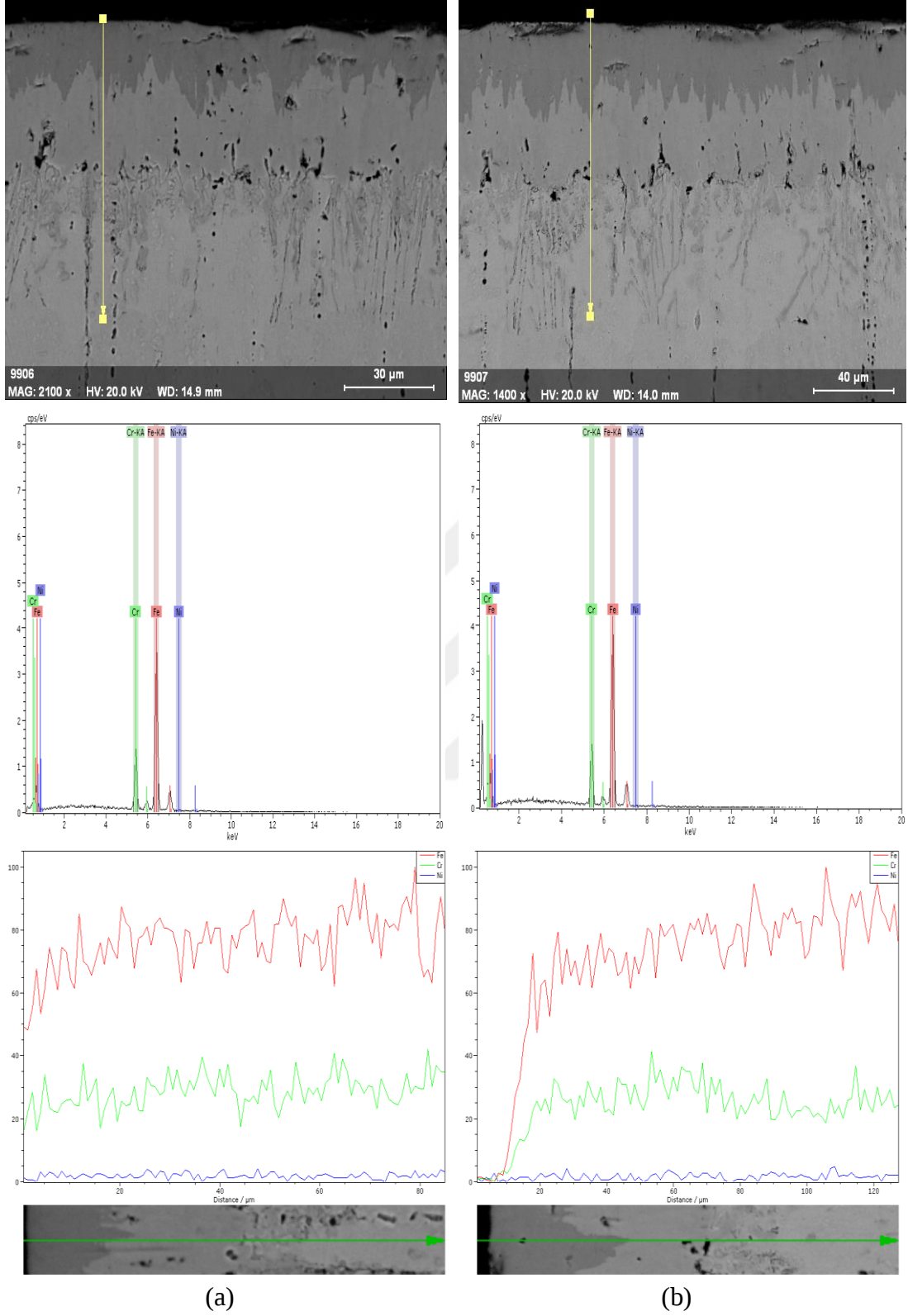
(a)

(b)

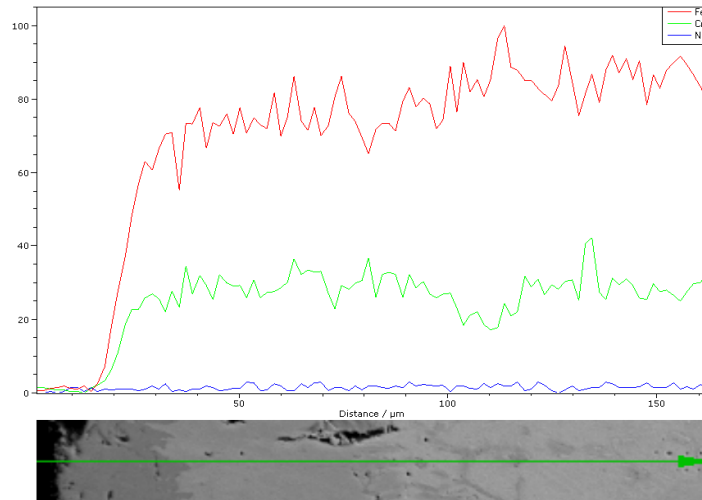
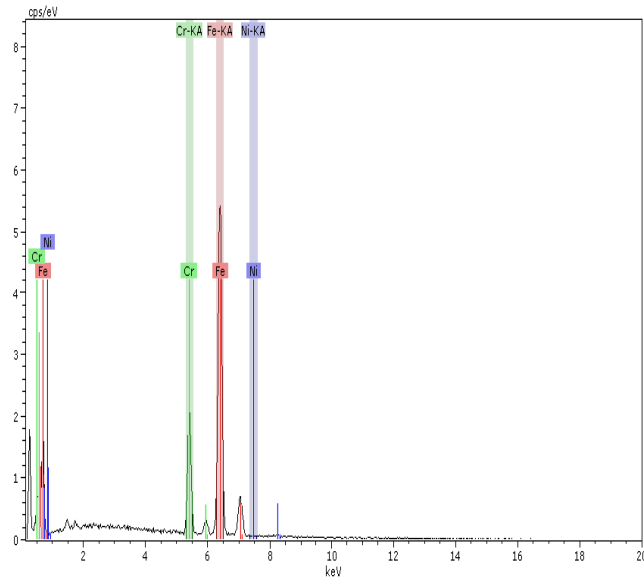
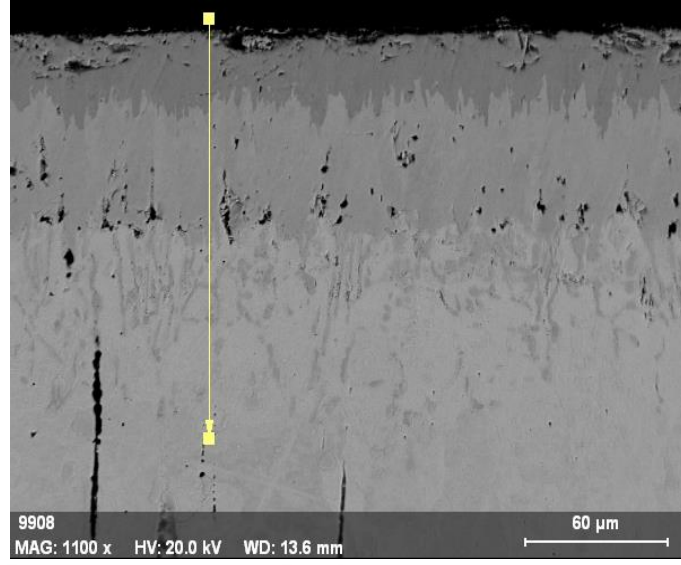
Şekil 4.12 900 °C’de borlanmış numunelerin EDX analizleri (a) 2 saat, (b) 4 saat.



Şekil 4.13 900 °C’de 6 saat süreyle borlanmış numunenin EDX analizi.



Şekil 4.14 1000 °C’de borlanmış numunelerin EDX analizleri (a) 2 saat, (b) 4 saat.

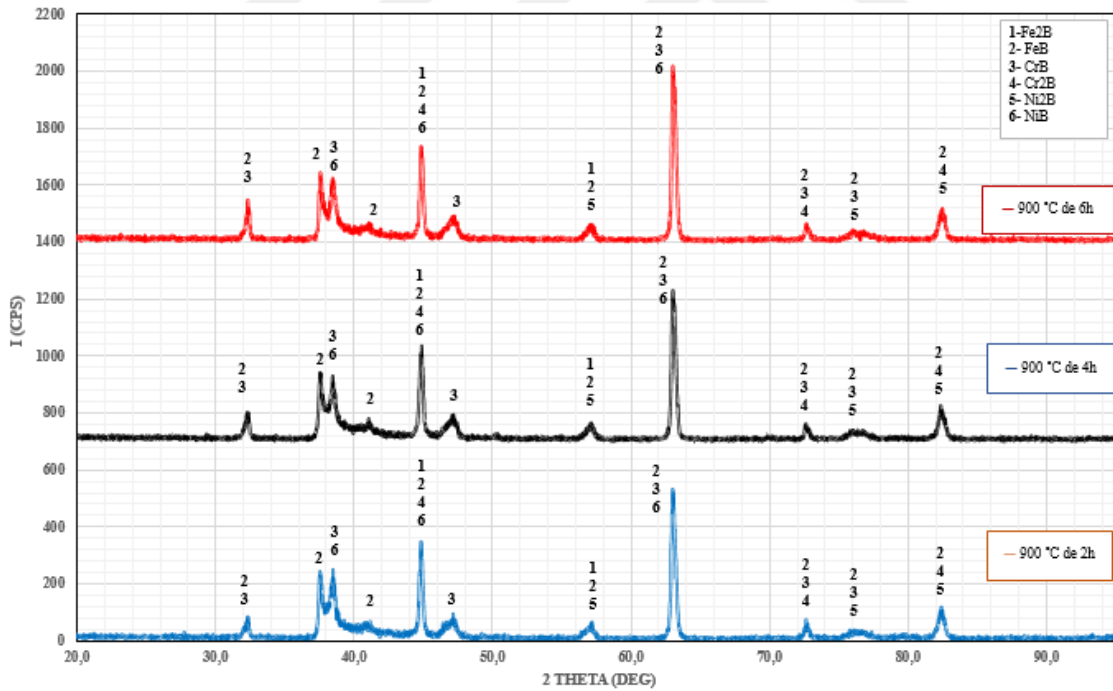


Şekil 4.15 1000 °C’de 6 saat süreyle borlanmış numunenin EDX analizi.

Yukarıdaki resimlerde verilmiş olan SEM-EDX analizleri incelendiğinde, kaplama tabakası ve matriste, çelikte bulunan baskın elementler olan Fe ve Cr elementleri gözlenmiştir. Burada kaplama tabakasında Fe ve Cr'un bor bileşiklerinin varlığından söz edilebilir. Ayrıca, yüzeyden matrise doğru Fe elementindeki artış, FeB ve Fe₂B varlığına ve bu bileşiklerin tabakadaki yerleşim tavrına (yüzeye yakın bölgelerde FeB olmak üzere) işaret etmektedir. İncelenen çelikte Ni elementi göreceli olarak oldukça düşük olduğundan, SEM-EDX analizinde baskın elementler tarafından baskılanmıştır.

4.3 XRD Analizi

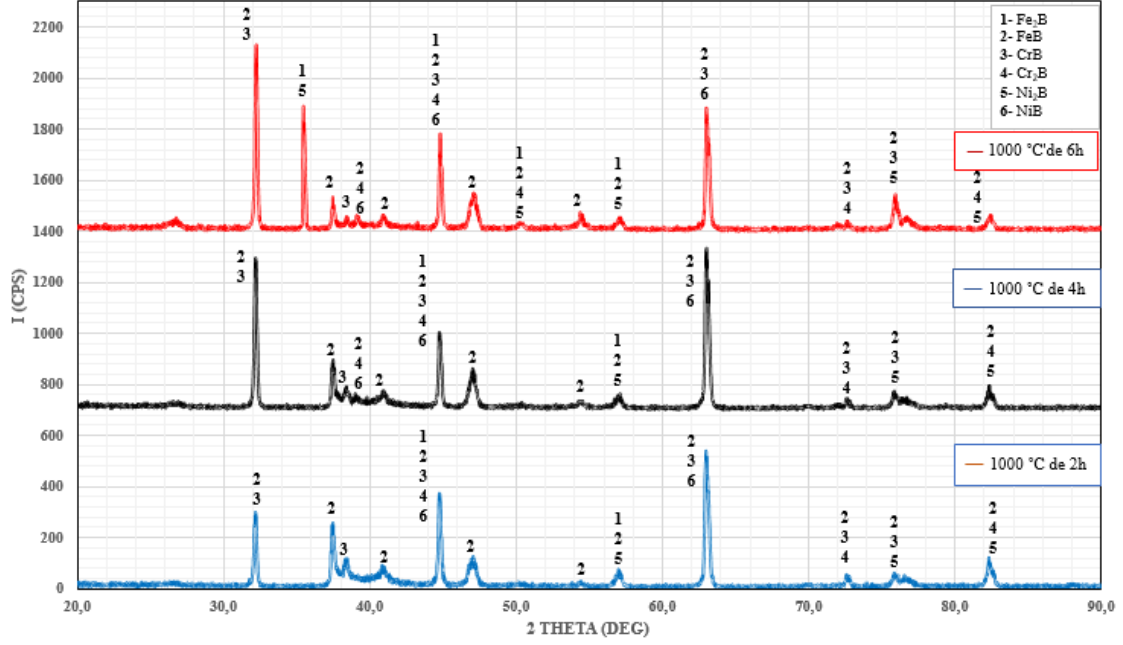
Borlama işlemi sonrası yapılan XRD analizi sonucunda, numune yüzeylerinde oluşan bor tabakasında bulunan bor bileşikleri araştırılmıştır. 900 °C ve 1000 °C'de borlanmış 430F ferritik paslanmaz çeliğin XRD analizinden elde edilen grafik aşağıdaki Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.16 900 °C'de borlanmış 430F ferritik çeliğinin XRD grafiği.

Şekil 4.16'ya bakıldığında, 900 °C'de 2, 4 ve 6 saat sürelerinde borlanan numunelerde, incelenen çelikte baskın yer alan elementlerin (SEM-EDX analizinde de görüldüğü gibi)

bor bileşiklerinin FeB, Fe₂B, CrB ve Cr₂B yanı sıra Ni elementinin bor bileşiklerinin de NiB ve Ni₂B oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.17 1000 °C'de borlanmış 430F ferritik paslanmaz çeliğinin XRD grafiği.

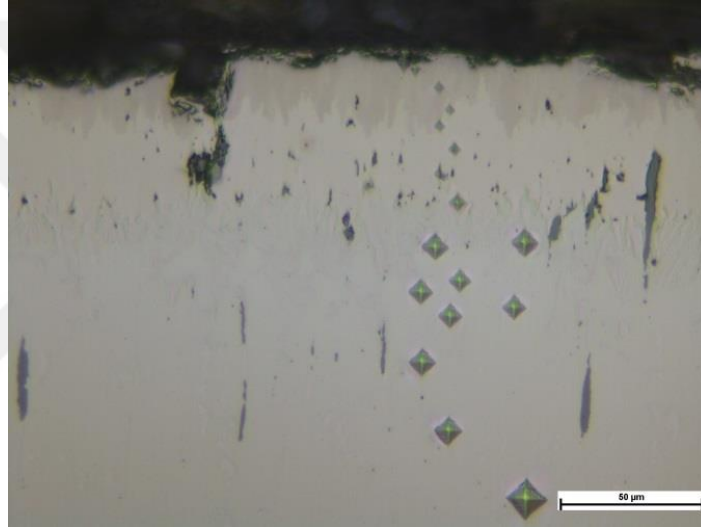
Şekil 4.17'de XRD grafiklerindeki pikler incelendiğinde, 900 °C'de olduğu gibi, tüm süreler için en baskın bor bileşikler FeB, Fe₂B, CrB ve Cr₂B'dur. Bunun yanı sıra bor tabakasında NiB ve Ni₂B bileşiklerine de rastlanmıştır.

Genel olarak, bor tabakasında Fe'in ve Cr'un bor bileşiklerinin daha baskın olması beklenen bir durumdur.

4.4 Mikro Sertlik Ölçümleri

Metalografik işlemlerle yüzeyi hazırlanan numuneler üzerinde mikro sertlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney oda sıcaklığında, 10 sn süreyle ve 25 gr yük altında yapılmıştır.

Aşağıdaki resimde, mikro sertlik ölçümünün yapıldığı bölge ve indentörün bıraktığı iz, 1000 °C’de 4 saat süreyle borlanmış numunenin mikro yapısı üzerinde, örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.18 1000 °C’de 4 saat süreyle borlanmış numune üzerinde mikro sertlik izleri (örnek).

Şekil 4.18’den görüldüğü üzere, mikro sertlik ölçümleri numunenin incelenen yüzeyi üzerinde belirli bir hat üzerinden alınmıştır. İzlerin boyutları sertlik sonuçlarına işaret ettiğine göre sertlik değerlerinin yüzeyden matrise doğru (kaplama boyunca) azaldığı bu görselden anlaşılmaktadır.

900 ve 1000 °C sıcaklık ve tüm süreler için oluşan bor tabakalarında, yüzeyden ana malzemeye (matris) doğru ölçülmüş mikro sertlik sonuçları aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 4.2 900 °C’de borlanmış numunelerin mikro sertlik değerleri.

Sıcaklık	Süre	Sertliğin Yüzeyden Mesafesi	Mikro Sertlik Değerleri	Bor Kaplama Kalınlığı
°C	Saat	µm	HV (0,025)	µm
900	2	5,5	1457	13,00
		9,4	1210	
		16,1	431	
		26,1	273	
		44,3	193	
		55,2	184	
	4	7,3	1614	19,95
		14,7	1489	
		15,5	1336	
		24,7	625	
		38,6	273	
		47,8	192	
	6	6,3	1860	25,95
		12,8	1672	
		16,36	1550	
		27,6	956	
		35,1	778	
		39,5	347	
		47,2	281	
		53,3	187	

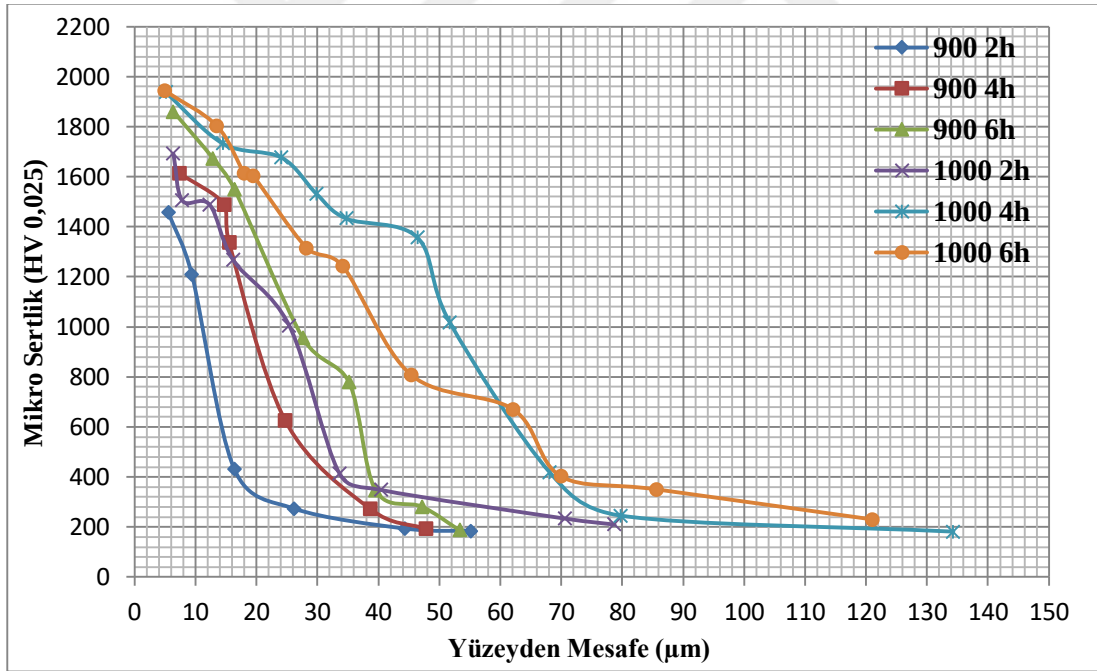
Çizelge 4.3 1000 °C’de borlanmış numunelerin mikro sertlik değerleri.

Sıcaklık	Süre	Sertlik Yüzeyden Mesafesi	Mikro Sertlik Değerleri	Bor Kaplama Kalınlığı
°C	Saat	µm	HV (0,025)	µm
1000	2	6,3	1692	37,50
		7,7	1506	
		12,2	1489	
		16,1	1267	
		25,3	1005	
		33,5	414	
		40,4	348	
		70,5	234	
		78,7	210	
	4	5,1	1938	52,68
		14,5	1733	
		24,1	1677	
		29,8	1532	
		34,7	1433	
		46,4	1357	
		51,7	1017	
		68,0	419	
		79,7	245	
		134,3	181	
	6	4,9	1944	62,50
		13,4	1803	
		17,9	1614	
		19,4	1604	
		28,2	1315	
		34,1	1242	
		45,3	807	
		62,1	669	
		69,9	402	
		85,6	350	
		121,1	230	

Çizelge 4.2 ve 4.3’den görüldüğü üzere, mikro sertlik değerleri çeliğin yüzeyinden başlayarak bor tabakası boyunca giderek düşmektedir. Tüm durumlar için mikro sertlik değerlerine bakıldığında, sertlik değeri matriste en düşük 181-230 HV_{0,025} iken bor

tabakasında en yüksek 1944 HV_{0,025} kadar ulaşmıştır. Ayrıca kaplama tabakası boyunca, farklı bor bileşiklerinin varlığı nedeniyle, çeşitli sertlik değerlerine rastlanmıştır. Bu durum kaplama tabakası kalınlığı, nispeten büyük olan 1000 °C’de borlanmış numunelerde daha belirgindir. Bor tabakası kalınlığının düşük olduğu numunelerde (özellikle 900 °C 2 saat borlanmış numune) nispeten küçük bir alanda sertlik ölçümü yapıldığı ve bu küçük alanda oldukça fazla bor bileşiği bulunduğundan düşük sertlik ölçümleri ile karşılaşılabilir. Ancak, bor tabakasının yüzeye yakın bölgelerdeki sertlik değerleri ile matrisin sertlik değerleri karşılaştırıldığında bor tabakasının sertliği en az 7 kat (yaklaşık olarak) daha yüksektir. Ayrıca, bor tabaka kalınlığının artmasıyla yüzeydeki sertlik değerlerinin de arttığı görülmektedir.

430F ferritik paslanmaz çeliğin bor tabakasının, yüzeyden matrise doğru ölçülmüş olan, mikro sertlik sonuçlarının değişimi aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4.19 430F ferritik paslanmaz çeliğinin bor tabakasının mikro sertlik değişim grafiği.

Şekil 4.19’a bakıldığında, bor kaplama tabakasının yüzeyinden matrise doğru mikro sertlikteki düşüş belirgin bir şekilde görülmektedir. Bor tabaka kalınlığının yüksek olduğu numunelerde (900 °C’de 6 saat ve 1000 °C’de tüm sürelerde) yüzeydeki sertlik değerleri de yüksektir. Tabaka kalınlığı nispeten düşük olan numunelerde sertlik ani bir

şekilde azalırken tabaka kalınlığı arttıkça (tabii ki mesafe arttığı için) sertlikteki bu düşüşün şiddeti de zayıflamaktadır. Ayrıca, incelenen çeliğe yapılan borlama işlemi sonucunda numunenin sertliğindeki artış, bu grafikte daha belirgin bir şekilde görülmektedir.

4.5 Aşınma Testi

Aşınma deneyinde elde edilen veriler (sürtünme katsayısı, aşınma hacmi, aşınma izi derinliği, aşınma hızı) aşağıda sırasıyla verilmektedir.

Aşınma deneyine tabii tutulan numunelerin yüzeylerinden oluşan aşınma izinin görüntüleri aşağıdaki resimde verilmiştir. Fotoğraflar, eşit uzaklıktan ve dijital kamera ile çekilmiştir.

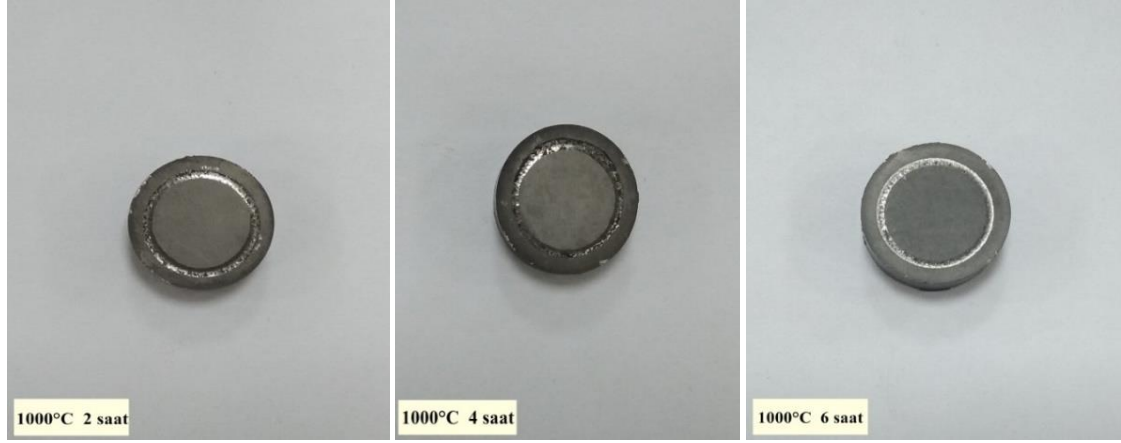


(a)



(b)

Resim 4.5 Numunelerin aşınma izi fotoğrafları (a) Ham, (b) 900 °C’de, (c) 1000 °C’de borlanmış.

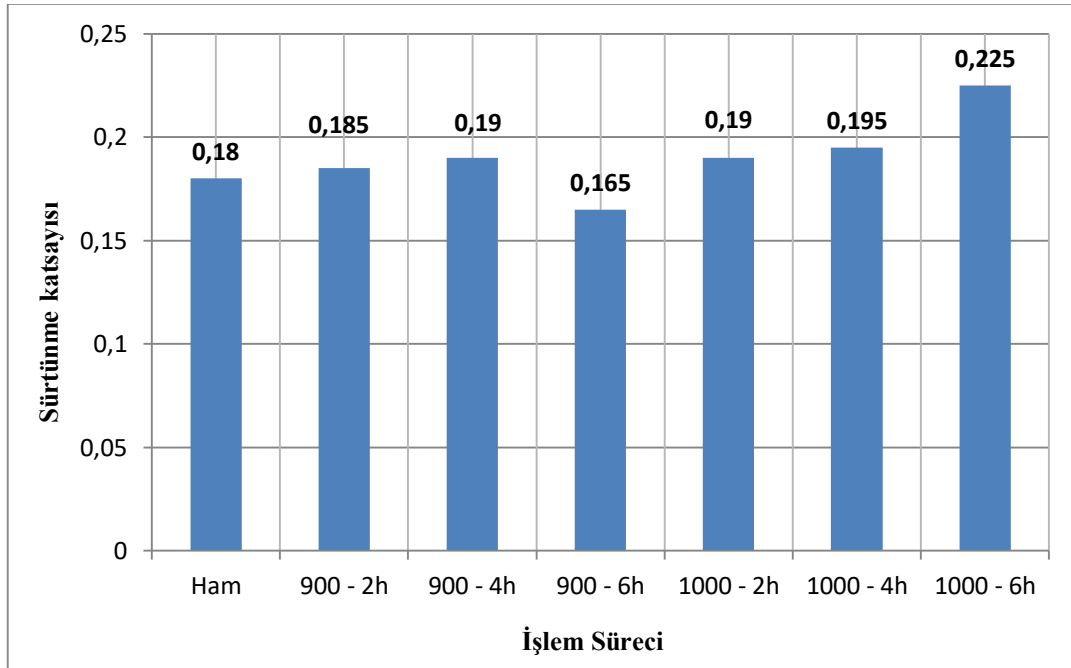


(c)

Resim 4.5 (Devam) Numunelerin aşınma izi fotoğrafları (a) Ham, (b) 900 °C’de, (c) 1000 °C’de borlanmış.

Resim 4.5’e bakıldığında, aşınma izi genişliklerinin, özellikle 1000 °C’de borlanmış numunelerde, diğer numunelere göre, giderek azaldığı, 900 °C’de ise ham numune ile hemen hemen aynı ya da daha fazla olduğu görülebilmektedir.

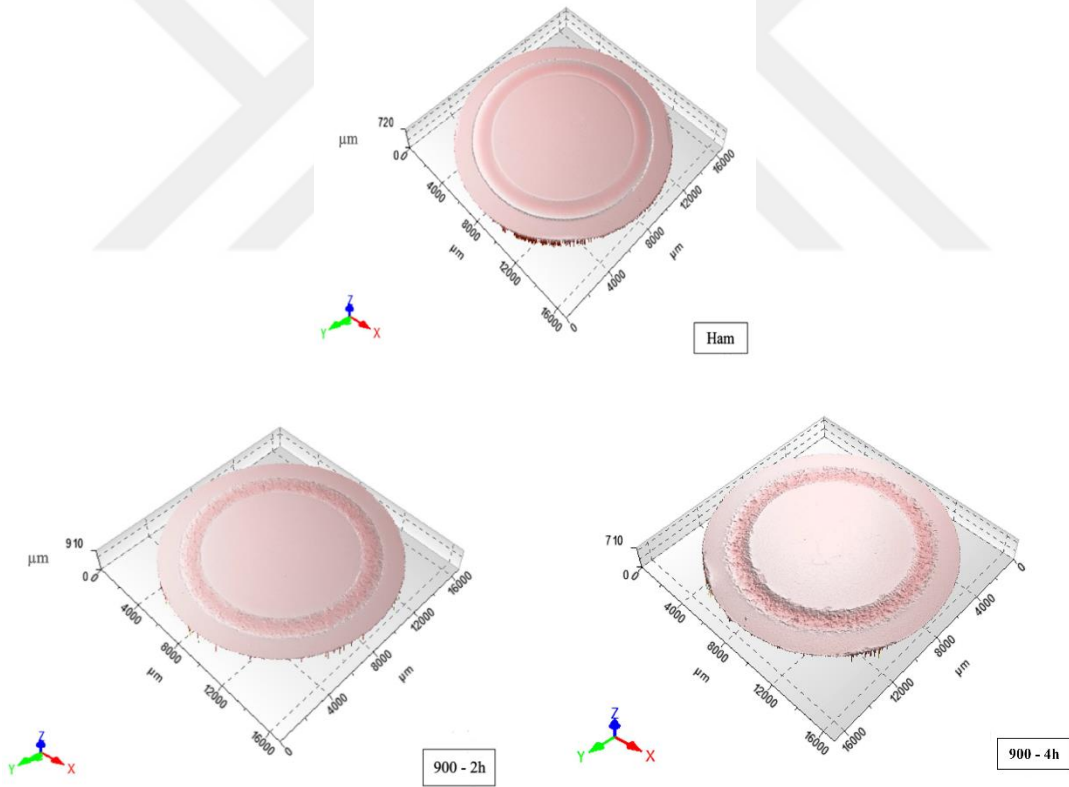
İncelenen 430F ferritik paslanmaz çeliğinin, aşınma test cihazından elde edilen, sürtünme katsayılarının grafiği aşağıdaki şekilde verilmiştir.



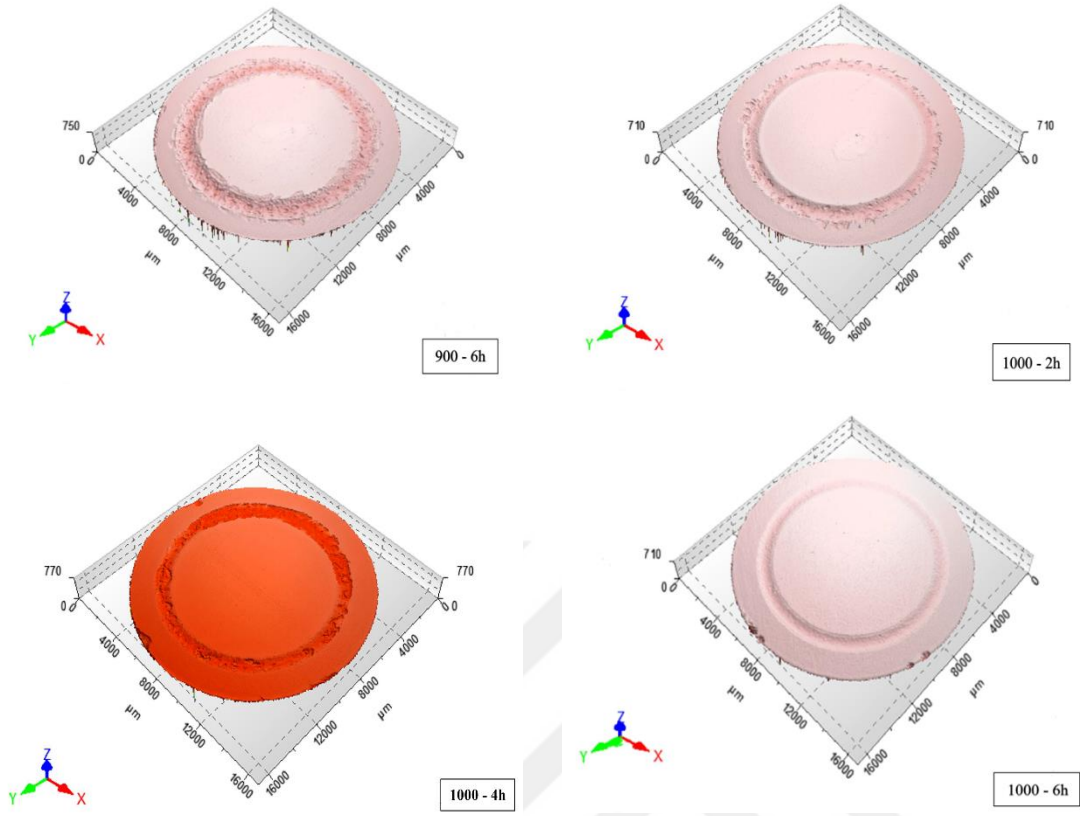
Şekil 4.20 İncelenen 430F ferritik paslanmaz çeliğinin sürtünme katsayıları.

Şekil 4.20’den görüldüğü üzere, sürtünme katsayısı ilgili aşınma deney şartları için (0,2 m/sn kayma hız ve 500 m yol) çelikteki kükürt varlığı nedeniyle nispeten düşüktür (Buckley and Johnson 1964, Fehling and Sarkar 1969, Aydın vd. 2012). İncelenen çeliğin ham numunesi ile borlanmış numuneler karşılaştırıldığında (1000 °C’de 6 saat borlanmış numune nispeten yüksek olsa da) sürtünme katsayısında anlamlı bir değişim görülmemiştir.

Aşınma deneyinden sonra Profilometre cihazı ile elde edilen aşınma izi görüntüleri (örnek olarak) aşağıdaki resimlerde verilmiştir. İncelenen çeliğin aşınma hızı, hacmi ve derinliğinin elde edilmesinde bu üç boyutlu görseller (aşınma izi görüntüleri) kullanılmış ve ölçümler numunelerin her iki yüzeyinden de alınmıştır.



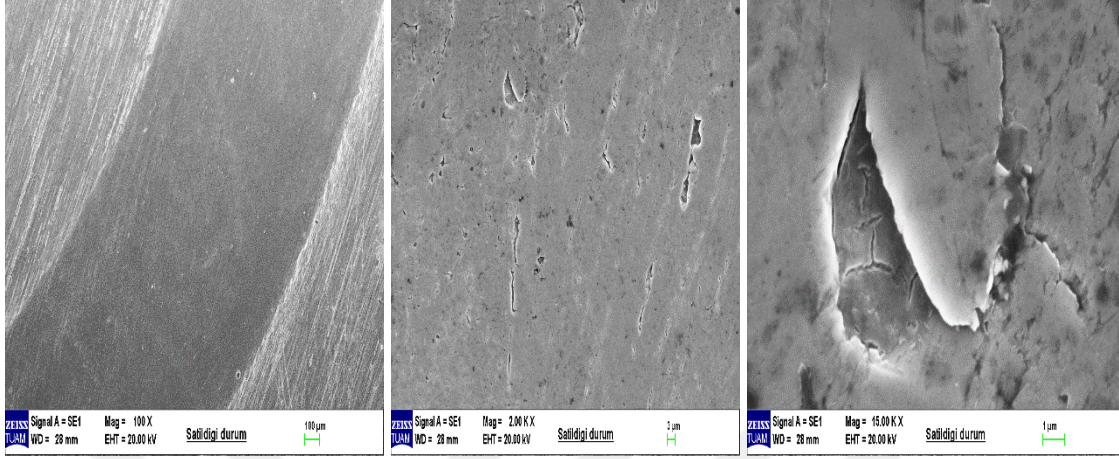
Şekil 4.21 Profilometre cihazından elde edilen yüzey görüntüleri (örnek).



Şekil 4.21 (Devam) Profilometre cihazından elde edilen yüzey görüntüleri (örnek).

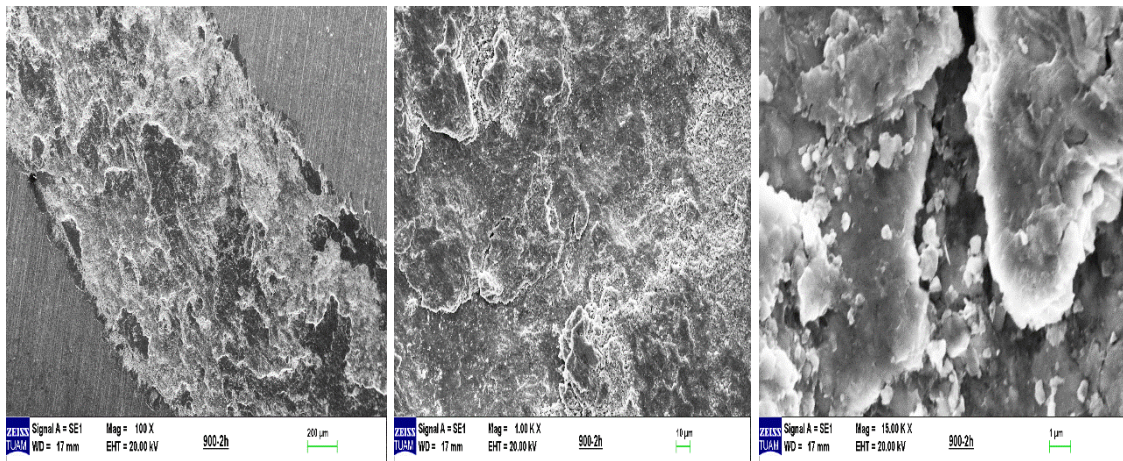
Şekil 4.21'e bakıldığında, aşınma izleri özellikle ham numune ve 1000 °C'de 6 saat sürede borlama işleminde görsel olarak nispeten düzgün görünürken, diğer tüm durumlarda bor tabakalarının kırıldığı oldukça belirgin bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, kırılan sert bor tabakası aşınma olayına katkıda bulunmaktadır. 900 °C'de iz genişlikleri ve bor tabakasındaki kırılmalar, 1000 °C'deki tüm durumlarla kıyaslandığında, daha belirgindir.

İncelenen 430F ferritik paslanmaz çeliğinin aşınma izlerinin SEM görüntüleri aşağıdaki resimlerde verilmiştir.



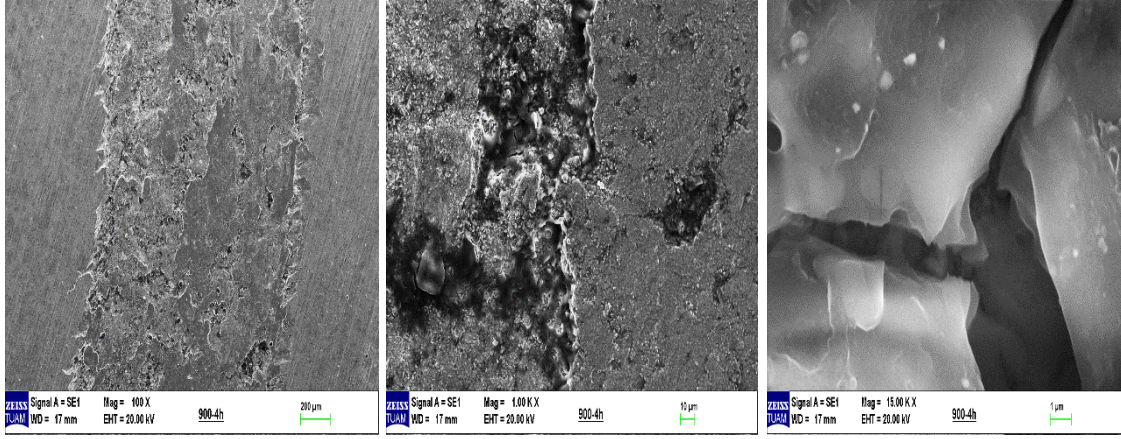
Şekil 4.22 Ham numunenin aşınma izlerinin SEM görüntüleri.

Şekil 4.22 incelendiğinde, ham numunenin aşınma yüzeyinin oldukça pürüzsüz olduğu, ancak aşınma esnasında büyük parçaların koparak, aşınmaya (metal kaybına) katkıda bulunduğu görülmektedir. Resimde en sağdaki görselde kopan parçanın sünek koptuğu görülmektedir. Adhesiv aşınma olarak adlandırılan bu aşınma tipinde, kopan yumuşak parçalar (burada olduğu gibi) yumuşak matrisin üzerine sıvanarak nispeten pürüzsüz görünümü ortaya çıkarmıştır.

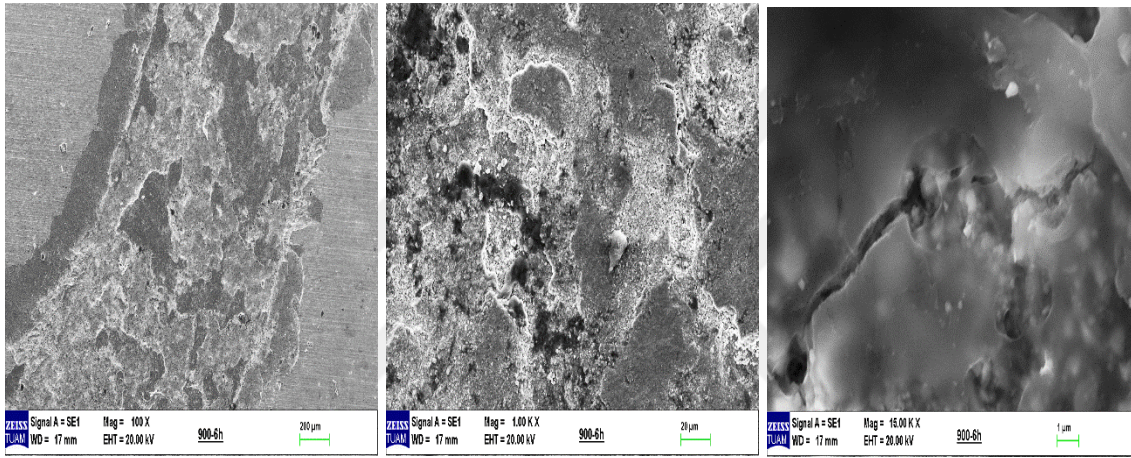


(a)

Şekil 4.23 900 °C’de borlanmış numunelerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.



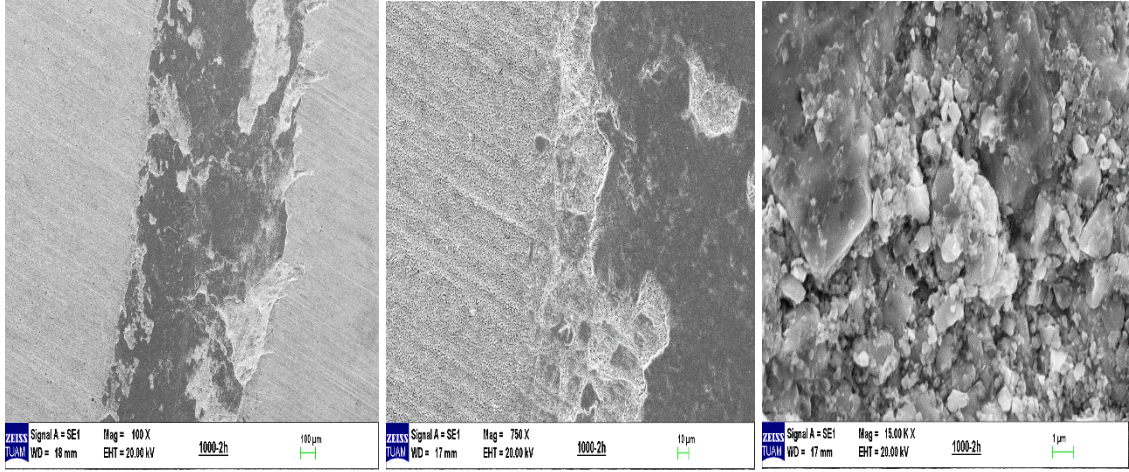
(b)



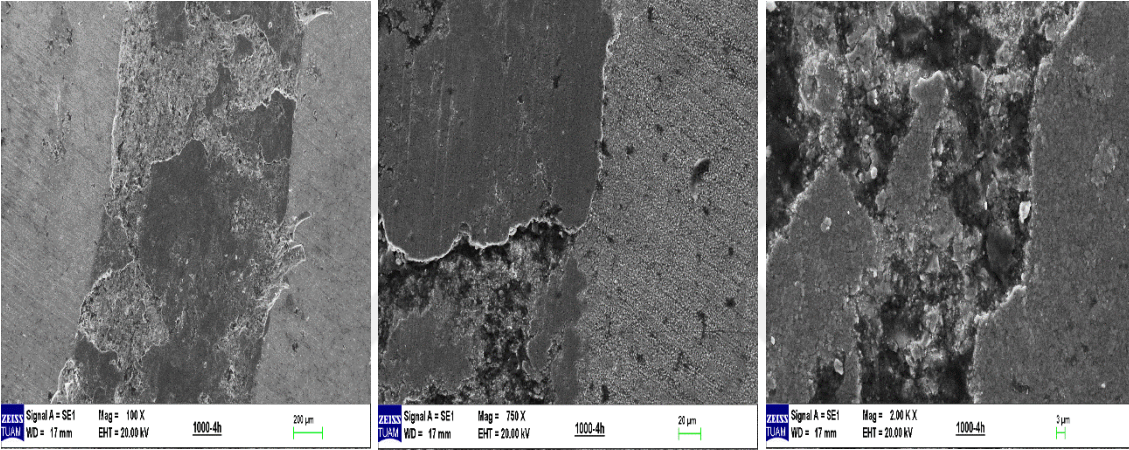
(c)

Şekil 4.23 (Devam) 900 °C’de borlanmış numunelerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

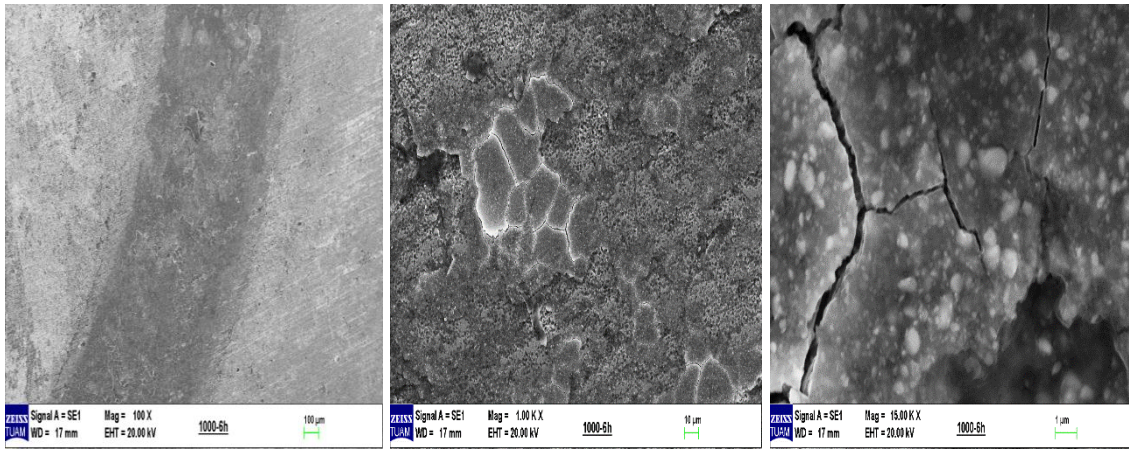
Şekil 4.23’e bakıldığında, ham numuneden farklı olarak, 900 °C’de borlanmış olan numunelerde sert ve kırılgan olan bor tabakası aşınma deneyi esnasında kırılmış (gevrek olarak) aşınmaya (metal kaybına) katkıda bulunmuştur. Resimler dikkatlice incelendiğinde, aşınma derinliğinin matrise kadar ulaştığı ve yüzeyde nispeten oldukça küçük kırılmamış bor tabakası alanlarının kaldığı görülmektedir. Bu durum borlama işlemi sonucunda elde edilmiş olan bor tabakası kalınlığının yeterli olmadığını göstermektedir. Ayrıca, burada gözlenen aşınma mekanizması abrasif aşınmadır.



(a)



(b)

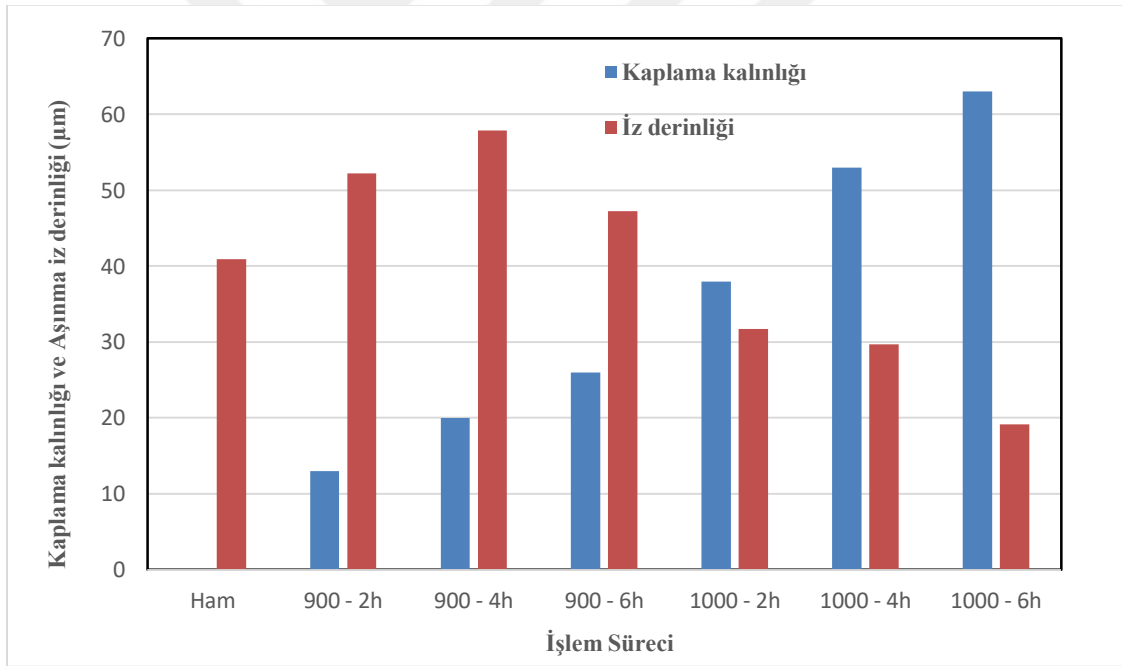


(c)

Şekil 4.24 1000 °C'de borlanmış numunelerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

Şekil 4.24'den görüldüğü üzere, 1000 °C'de borlanmış olan numunelerde de sert ve kırılğan olan bor tabakası aşınma deneyi esnasında gevrek olarak kırılmıştır. Resimler incelendiğinde, bor tabakası kırılrsa da aşınma deneyi sonunda nispeten oldukça büyük kırılmamış bor tabakası alanlarının kaldığı ve aşınma derinliğinin nispeten düşük (özellikle 1000 °C'de 6 saat süre için) olduğu görülmektedir. Bu borlama işlemi sonucunda elde edilmiş olan bor tabakası kalınlığının yeterli olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, bu sıcaklıkta da, aşınma mekanizması olarak abrasif aşınma gözlenmiştir.

Aşınma testinden sonra yapılan Profilometre cihazı ile numunelerin aşınma iz derinlikleri ölçülmüştür. Şekil 4.25'de incelenen çeliğin kaplama kalınlığı ile aşınma iz derinliklerine ait grafik gösterilmiştir.



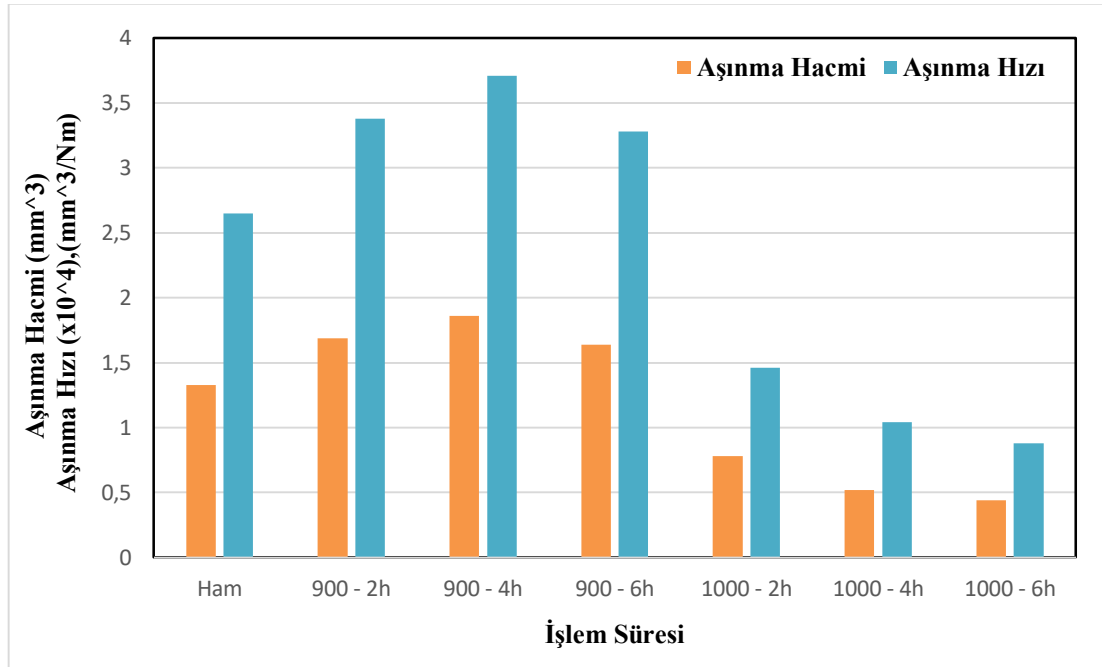
Şekil 4.25 İncelenen çeliğin kaplama kalınlığı ve aşınma iz derinliği.

Şekil 4.25'e bakıldığında, saptanan iz derinlikleri aşınma izi SEM görüntülerini desteklemektedir. Bor tabaka kalınlıkları da dikkate alındığında, aşınma izi derinliklerinin, 900 °C'de tüm süreler için matrise kadar ulaştığı, 1000 °C'de ise ulaşmadığı görülmektedir. Dolayısıyla, 900 °C'de tüm süreler için bor tabakasından kırılarak kopan sert parçalar matrisin aşınmasını hızlandırmış ve bu durum daha fazla

aşınma izi derinliği ile sonuçlanmıştır. 1000 °C’de ise aşınma olayı kaplama tabakasında kalmış ve aşınma izi derinliği küçük olmuştur.

Profilometre cihazı ile saptanmış aşınma hacmi değerleri (aşınan metal miktarını ifade eden) ve bu değerler kullanılarak Formül 4.1 ile hesaplanan aşınma hızı değerleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$\text{Aşınma Hızı} = \frac{\text{Aşınma Hacmi (mm}^3\text{)}}{\text{Yük (N) x Yol (m)}} \quad (4.1)$$



Şekil 4.26 İncelenen çeliğin aşınma hacmi ve aşınma hızı.

Şekil 4.26’den görüldüğü üzere, aşınma hacminde ve aşınma hızında 900 °C’de uygulanan borlama işlemi sonucunda ham numuneye göre bir artış gözlenmiştir. Bu olumsuz durumun sebebi, bu sıcaklıktaki tüm sürelerde kırılmalı ve sert olan bor kaplama tabakası aşınma esnasında nispeten hızlı bir şekilde kırılması ve bor tabakası kalınlığı nispeten düşük olduğundan kırılan sert parçaların matrisin aşınmasını (abrasif aşınma) teşvik etmesidir. 1000 °C’de ise tüm süreler için aşınma hacmi ve aşınma hızı değerleri, diğer tüm durumlardan daha düşüktür. Ayrıca, 1000 °C’de süre arttıkça, aşınma hacmi ve aşınma hızı değeri de düşmektedir. Bunun sebebi ise, artan bor kaplama kalınlığı

sonucunda (aşınma deney şartları gereğince önceden belirlenen 500 m yol boyunca) aşınma deneyi esnasında bırakılan izin derinliğinin kaplama tabakasını geçip matrise ulaşamamış olmasıdır. Yani aşınma olayı nispeten sert bor tabakasında kalmıştır. Malzemenin aşınma direncini ifade eden aşınma hızı açısından en iyi borlama işlemi olarak 1000 °C’de 6 saat süre göze çarpmaktadır. Ayrıca satıldığı durumla kıyaslandığında, 1000 °C’de (tüm süreler için) yapılan borlama işlemi, ilgili çeliğin aşınma direncini iyileştirmiştir.



5. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, ulaşım ve gıda sektörleri başta olmak üzere birçok sektörde kullanılan AISI 430F ferritik paslanmaz çeliğine termo-kimyasal yüzey sertleştirme işlemi olan borlama ısıtma işlemi uygulanarak, çeliğin karakterizasyonu ve aşınma davranışları araştırılmıştır.

Yapılan deneyler ve analizler neticesinde elde edilen tüm sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- a. İncelenen çelik için bor tabaka kalınlığı artan borlama sıcaklığı ve süresi ile birlikte artmaktadır. 900 °C’de oluşan bor tabakası 13-26 µm, 1000 °C’de oluşan bor tabakası ise 38-63 µm arasında değişmektedir. 1000 °C’de yapılan borlama işleminde elde edilen en düşük bor tabaka kalınlığı, 900 °C’de elde edilen en yüksek bor tabaka kalınlığından daha yüksek bor kaplama kalınlığına sahiptir.
- b. XRD analiz incelemelerinde, tüm sıcaklık ve sürelerde FeB, Fe₂B, CrB, Cr₂B, NiB ve Ni₂B bileşiklerine rastlanmıştır. Bu sonuçlar, SEM-EDX analizi ile desteklenmektedir.
- c. Borlama işlemi sonucunda, kaplama tabakası boyunca çeşitli sertlik değerlerine rastlanmıştır. Bunun sebebi, çeliğin kimyasal bileşimine bağlı olarak, bor tabakasında oluşan bor bileşiklerinin farklılığıdır. Bu durum kaplama tabakası kalınlıkları nispeten büyük olan 1000 °C’de borlanmış numunelerde daha belirgindir. Bor tabakasının yüzeye yakın bölgelerdeki sertlik değerleri ile matris değerleri karşılaştırıldığında bor tabakasının sertliği yaklaşık 7 kat daha yüksektir. Mikro sertlik değerleri matriste en düşük 181-230 HV_{0,025} iken bor tabakasında en yüksek 1944 HV_{0,025} kadar ulaşmıştır. Borlama işlemi sonucunda bor tabaka kalınlığının artmasıyla yüzeydeki sertlik değerlerinin de arttığı görülmüştür.
- d. Aşınma deneyinden elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları incelendiğinde, ilgili çeliğin sürtünme katsayısının nispeten düşük olması çelikteki kükürt varlığına

bağlanmıştır. İncelenen çeliğin ham numunesi ile borlanmış numuneler karşılaştırıldığında sürtünme katsayısında anlamlı bir değişim görülmemiştir.

- e. Aşınma izlerinin SEM incelemeleri sonucunda, ham numunede adhesiv aşınma durumu, 900 °C ve 1000 °C’de sıcaklıklarda ise abrasif aşınma durumu gözlenmiştir. Ham numunede aşınma esnasında sünek olarak kopan parçalar yumuşak matrisin üzerine sıvanarak nispeten pürüzsüz görünüm ortaya çıkarmıştır. 900 °C’de borlanmış olan numunelerde sert ve kırılğan olan bor tabakası aşınma deneyi esnasında kırılmış (gevrek olarak) aşınmaya (metal kaybına) katkıda bulunmuştur. 1000 °C’de borlanmış olan numunelerde ise bor tabakası kırılrsa da, tabaka kalınlığı nispeten daha fazla olduğundan kırılan parçaların etkisi sınırlı kalmıştır.
- f. Aşınma iz derinlikleri incelendiğinde, 900 °C’de tüm süreler için matrise kadar ulaştığı, 1000 °C’de ise ulaşmadığı gözlenmiştir. Bu durum aşınma izinin SEM analizi ile desteklenmektedir.
- g. Numunelerin 900 °C’de uygulanan borlama işlemi sonucu ham numuneye göre aşınma hacmi ve aşınma hızları artış göstermiştir. Bu durumun sebebi, bu sıcaklıktaki tüm sürelerde sert ve kırılğan olan bor tabakasının aşınma esnasında hızlı bir şekilde kırılması ve bor tabakası kalınlığı nispeten düşük olduğundan kırılan sert parçaların matrisin aşınmasını teşvik etmesidir. 1000 °C’de ise artan süreyle beraber aşınma hacmi ve aşınma hızları düşmektedir. Bunun nedeni ise, bu sıcaklıkta tüm süreler için bor tabaka kalınlığının nispeten artması sonucunda aşınma olayının bor tabakasında kalmasıdır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar detaylıca incelendiğinde,

- Malzemenin aşınma direncini ifade eden aşınma hızı açısından en iyi borlama işlemi olarak 1000 °C’de 6 saat süre göze çarpmaktadır.
- Satıldığı durumla kıyaslandığında, 1000 °C’de (tüm süreler için) yapılan borlama işlemi, ilgili çeliğin aşınma direncini iyileştirmiştir.
- Bu çelik için, 1000 °C’nin altında yapılan borlama işlemleri ise önerilmemektedir.

6. KAYNAKLAR

- Affatato, S. and Brando, D. (2013). Introduction to Wear Phenomena of Orthopaedic Implants. *Wear of Orthopedic Implants and Artificial Joints*, **1**: 3-26.
- Akbulut, H. (2006). Malzemelerin sürtünme ve aşınma ders notlar, Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Sakarya. 36-52.
- Alman, D.E. and Hawk, J.A. (2001) Abrasive wear behavior of a brittle matrix (MoSi_2) composite reinforced with a ductile phase (Nb), *Wear*, **251**: 890-900
- Alphonsa, J., Mukherjee, S., and Raja, V.S. (2018). Study of plasma nitriding and nitrocarburising of AISI 430F stainless steel for high hardness and corrosion resistance. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, **53**: 51-58.
- Aran, A. ve Temel, M.A. (2004). Paslanmaz çelik yassı mamuller üretimi kullanımı standartları, Sarıtaş Teknik Yayını, Acar Matbaacılık A.Ş. İstanbul, 113s.
- Avalos, M., Alvarez-Armas, I. and Armas, A.F. (2009). Dynamic Strain Aging Effects on Low-Cycle Fatigue of AISI 430F. *Materials Science and Engineering*, **513**: 1-7.
- Aytekin, H. ve Akçin Y. (2013). Characterization of Borided Incoloy 825 Alloy. *Materials and Desing*, **50**: 515-521.
- Ayvaz, S. (2013). Cr-Mo çeliklerinin aşınma ve korozyon aşınma özelliklerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük.
- Barış M. (2007). Farklı Borlama Sürelerinin Transmisyon Çeliğinde Abrasif Aşınma Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Başman, G. ve Sesen, K. (2011). The improvement of the surface properties of AISI 316L type stainless steel by boronizing. *ITU Journal*, **10**: 115-121.
- Baştür, S. ve Erten, M. (2006). Borlama ile Yüzey Sertleştirme Çalışmaları. *Mühendislik Makina Dergisi*, **47**: 57-74.
- Bayça, S. U. ve Şahin, S. (2004). Borlama. *Mühendis ve Makine*, **45**: 51-59

- Baylan, O. (2004) Elektrik Ark Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Östenitik- Martenzitik Farklı Paslanmaz Çeliklerin Kaynaklı Bağlantılarında, Mikroyapı ile Özellikler Arasında İlişkinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Z.K.Ü. Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Zonguldak, s. 3-33.
- Baytemir, M. (2011). Östenitik AISI 310-Ferritik AISI 430 paslanmaz çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Bergmann, H.W. and Brokmeier U. (1981). Influence Of Cr, Mn, Co and Ni on the Crystallization Behaviour of (Fe-xMx)_y Metalloid_{1-y} Metallic Glasse, MRS Online Proceedings Library, Almanya.
- Buckley, D.H. and Johnson, R.L. (1964). Friction and Wear of Nickel-Aluminium Alloys and Some Sulfur-Modified Steels in Vacuum to 10⁻⁹ mm Hg. NASA-TN-D-2307, May.
- Cavazos JL. (2006). Characterization of precipitates formed in a ferritic stainless steel stabilized with Zr and Ti additions. *Materials Characterization*, **56**: 96–101.
- Çalık A. ve Özsoy A. (2002). Termal Çevirimli Borlama İşleminin Ç1010 Çeliğine Etkileri. 11. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, İstanbul.
- Çalık, A. (2005a). Borlama ve Endüstriyel Uygulama Alanları. I. Ulusal Bor Çalıştayı Bildiriler Kitabı Ankara.
- Çelik, E. (2006). Martenzitik Paslanmaz Çelik Ve Ferritik Paslanmaz Çeliğin Kendileriyle ve Birbirleriyle Sürtünme Karıştırma Yöntemi ile Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ. 3,5.
- Çelikyürek, İ. (2006). Demir alüminantların borlanması ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir. 107-108.
- Dallas, J. (2003). Thermal Analysis Techniques, ASM Handbook Online, 21: 973-976.

- Daurelio, G., Ludovico, A.D., Panagopoulos, C.N. and Tundo, C. (1998). Ferritic, Martensitic, and Precipitation Hardening Stainless Steel Laser Weldings. Second GR-I International Conference on New Laser Technologies and Applications.
- Davis, J. R. (2002). Surface Hardening of Steels, Understanding the Basics, ASM Metal Handbook. ASM International USA 218-220.
- Davis, J.R. (1994). Davis and Associates, editors, ASM Specialty Handbook,- Stainless Steels. American Society for Metals Materials Park.
- Dearnley, P.A., Farrell, T. and Bell, T. (1986). Developments in Plasma Boronizing. *Journal of Materials for Energy Systems*, **8**: 128–131
- Dearnly, P. and Bell, T.(1985). Engineering the Surface with Boron Based Materials. *Surface Engineering*, **1**: 203-217.
- Demirel Ç. (2013). AISI 8640 ve GS 60 Çelik Malzemelerin Abrasif Aşınma Ve Korozyon Davranışına Borlama İşleminin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Dilektaşlı E. (2014). Bazı Alaşımlı Çeliklerin Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışına Borlama İşleminin Etkisi. Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen bilimleri enstitüsü, İstanbul
- Erdoğan, M. (2000) Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, Cilt I, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 169 s.
- Esen, E. (2006). Çelik Yüzeylerinin Kaplanması, Erdemir, Zolguldağ Ereğli, 9-11.
- Fehling, J.R. and Sarkar, N.K. (1969). The Friction of Copper-Nickel and Iron-Sulfur Alloys in Air and Vacuum. *Wear*, **14**: 33-47.
- Filep, E., Farkas, Sz. and Kolozsvary, G. (1988). *Surface Engineering*. **4**: 155–158
- Gooch, T. (1992) Welding Behaviour and Weldability of Superaustenitic Stainless Steels, 8th Annual North American Welding Research Conference, TWI, Cambridge UK. 1-3.
- Güneş, İ. ve Yıldız, İ. (2015). Rate of Growth of Boride Layers on Stainless Steels. *Oxidation Communications*, **38**: 2189-2198.
- İpek, R. ve Karamış, M. B. (1999). Aşınma test yöntemleri ve gelişmeler, *Mühendis ve Makine Dergisi*, **469**: 24-29.

- Jiang J. (2011). Preparation Of Fe₂B Boride Coating On Low-Carbon Steel Surfaces And Its Evaluation Of Hardness And Corrosion Resistance, *Surface & Coatings Technology*, **206**: 473–478.
- Kaluç, E. ve Sarı, N.Y. (1995). Duplex ve Süper Duplex Paslanmaz Çelikler ve Kaynağı, *Mühendis ve Makine Aylık Teknik Dergisi*. Sayı **424**, Ankara, 15 s.
- Karamış, M.B. (1986). Abrasif Aşınma Mekanizmasında Yüzey Basıncının Aşınmaya Etkisi. 2. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, 493-500
- Kartal, G., Timur, S., Sista, V., Eryılmaz, O.L. ve Erdemir, A. (2011). The Growth of Single Fe₂B Phase on Low Carbon Steel Via Phase Homogenization in Electrochemical Boriding (PHEB). *Surface Coatings Technology*, **206**: 2005–2011
- Kayalı, Y., Barut, N., Talaş, Ş. ve Büyüksağış, A. (2018). Investigation of Corrosion and Wear Behavior of Borided AISI P20 Steel in Micro-Wave Furnace. *Materials Research Express*.
- Keddarn, M., Chegroune, R., Kulka, M., Panfil, D., Ulker, S. ve Taktak, S. (2016). Characterization and Diffusion Kinetics of the Plasma Paste Borided AISI 440C Steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **70**: 1377–1385.
- Kennedy, D.M. and Hashmi, M.S.J. (1998). Methods of wear testing for advanced surface coatings and bulk materials. *Material Processing Technology*, **77**: 246-253.
- Komisyon, (2003). Bor Raporu. TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası.
- Krelling, A.P., da Costa, C.E., Milan, J.C.G. and Almeida, E.A.S. (2017). Micro-abrasive wear mechanism of borided AISI 1020 steel. *Tribology International*, **111**: 234-242.
- Krysiak, K F., Grubb, J.F. and Campbell, R.D. (1993). Selection of wrought ferritic stainless steels, *ASM Metals Handbook*, **6**: 443-454.
- Kuzucu, V., Aksoy M. ve Korkut MH. (1997). The effect of niobium on the microstructure of ferritic stainless steel. *Materials Science Engineering*, **230**: 75–80.

- Kuzucu, V., Aksoy, M. ve Korkut, MH. (1998). The effect of strong carbide – forming elements such as Mo, Ti, V and Nb on the microstructure of ferritic stainless steel. *Journal Mater Process Technology*, **82**: 165– 171.
- Küçük Kurt, M. (2015). Borlanmış AISI M35 ve AISI M42 Çeliklerinin Karakterizasyonu ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Afyonkarahisar.
- Lippold, J.C. and Kotecki, D.J. (2005). Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. John Wiley&Sons, Amerika, 87.
- Matuschka, A. G. (1980). Boronizing. Carl Hanser Verlag. München Wien.
- Meriç, C., Şahin, S. ve Yılmaz, S. S. (2000). Investigation of The Effect on Boride Layer of Powder Particle Size Used in Boronizing with Solid Boron-yielding Substances, *Materials Research Bulletin*, **35**: 2165-2172.
- Mohandas, T., Ridley, G.M. and Naveed, M. (1999), A comparative evaluation of gas tungsten and shield metal arc welds of a ferritic stainless steel. *Journal Of Materials Processing Technology*, **94**: 133-140.
- Motojima, S., Maeda, K. and Sugiyama, J.K. (1981). *Journal of the Less-Common Metals*. **81**: 267–272
- Moustafa I.M, Moustafa M.A. and Nofal A.A. (2000). Carbide formation mechanism during solidification and annealing of 17% Cr-ferritic steel. *Materials Letters*. **42**: 371–379.
- Odabaş, C. (2004). Paslanmaz Çelikler; Temel Özellikleri, Kullanım Alanları, Kaynak Yöntemleri, Askaynak, 2.Baskı, Tavaslı Matbaası, İstanbul.
- Özbek I. (1999). Borlama Yöntemiyle AISI M50, AISI M52 Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performansının Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Özbek, I., Konduk, B.A., Bindal, C. and Ucisik, A.H. (2002). Characterization of Borided AISI 316L Stainless Steel İmplant. *Vacuum*, **65**: 521-525.

- Özer, M. (2011). Üç Farklı Çeliğe Katı Borlama İşlemi Yapılmasının İçyapı ve Sertlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Özsoy, A. (1991). Çeliğin Borlanmasında Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi. Anadolu Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 101s, Eskişehir.
- Sağlam G. (2016). Çelik dişli sondaj matkaplarının borlama yöntemi ile takım ömrünün uzatılması, Yüksek lisan tezi, Bartın üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Sağlam, İ. (2006). Mekanik Alaşımlama Yolu İle Üretilen Alüminyum Bazlı Kompozit Malzemelerin Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Metal Eğitimi Bölümü Döküm Eğitimi Anabilim Dalı, Zonguldak.
- Sarıkaya, Ö. (2007). Aşınmaya karşı yüzey mühendisliği yöntemleri. Korozyon Derneği Yayını, Ankara, 1-60.
- Savaşkan, T. (2007). Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Celepler Matbaacılık. Trabzon.
- Saygın, M. (2006). AISI 1020 Çeliklerinde Borlamanın Yorulma Dayanımına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 59s.
- Smith, W.F. (1993). Structure and Properties of Engineering Alloys, *Mcgraw-Hill International Editions*.
- Smith, W.F. (2000). Paslanmaz Çelikler, Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri. Çeviri: Erdogan, M. Ankara. 5: 169-214.
- Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W. (2013). Friction-Induced Vibrations and Self-Organization: Mechanics and Non Equilibrium Thermodynamics of Sliding. Engineering Tribology, Butterworth Heinman, UK, 1-73.
- Şahin, S. (1999). Katı Borlama Yöntemi İle Ferrobör üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.

- Şahin, S. (2009). Effects of boronizing process on the surface roughness and dimensions of AISI 1020, AISI 1040, and AISI 2714. *Journal of Materials Processing Technology*, **208**: 1736-1741.
- Şen, Ş. (1998). Termokimyasal Borlama işlemiyle AISI 5140, AISI 4140 ve AISI 4340 çeliklerinin yüzey performanslarının geliştirilmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 165.
- Şen, U. (1997). Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Borlanması Ve Özellikleri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tabur, M. (2008). Bor Karbür Kaplanmış AISI 8620 Ve HARDOX 400 Çeliklerinin Abrasif Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 220s, Ankara.
- Teker, T. (2010). AISI 430/AISI 1040 Çelik Çiftinin Anahtar Deliği Plazma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi, Mikroyapı ve Mekanizma Özelliklerin Araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, s. 4-37
- Tezcan, R. (1996). Borlama İşlemi ve Endüstriyel Uygulamaları. Y. Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi. Eskişehir. 46s
- Türktekin, M. (1998). H13 Sıcak İş Takım Çeliklerine Borlama ve Nitrürleme İşlemlerinin Birlikte Uygulanması. Erciyes Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek lisans Tezi, Kayseri. 79s.
- Uluköy, A. ve Can, A. (2006). Çeliklerin borlanması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **12**: 189-198.
- Uzun, H.A. (2002). Borlama İle Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları, Y.Lisans Tezi.
- Zimmerman, C. (2013). Boriding (Boronizing) of Metals, ASM Handbook, *Steel Heat Treating Fundamentals and Processes*, **4**: 709-738.
- Zong, X., Jiang, W. and Fan, Z. (2018). Characteristics and Wear Performance of Borided AISI 440C Martensitic Stainless Steel. *Materials Express*, **8**: 500-510.

İnternet Kaynakları

1. <https://www.thefabricator.com/article/metalsmaterials/an-overview-of-austenitic-and-ferritic-stainless-steels> 15.03.2019
2. <https://bircelik.com/tr/kategori/430f-1-4105-> 08.03.2019
3. <https://www.rgpballs.com/tr/aisi-430-430f-paslanmaz-%C3%A7elik-bilyalar/> 27.04.2019
4. <https://www.bodycote.com/services/heat-treatment/case-hardening-with-subsequent-hardening-operation/boriding/> 22.04.2019
5. <http://www.alper.com.tr/hizmetler/isil-islem/borlama.html> 19.03.2019
6. <https://www.boren.gov.tr/Sayfa/metalurji/33> 28.04.2019
7. http://emrtk.unimiskolc.hu/projektek/adveng/home/kurzus/korsz_anyagtech/1_konzultacio_elemei/wear_and_wear_mechanism.htm 29.04.2019
8. <https://www.tec-eurolab.com/eu-en/adhesive-wear-V1.aspx> 05.04.2019
9. <https://sgr20027784.wordpress.com/forms-of-corrosion/metallurgical-factors-affecting-adhesive-wear/> 02.04.2019
10. <https://www.corrosionpedia.com/definition/495/fatigue-wear> 18.04.2019
11. <https://web.itu.edu.tr/temizv/Sunular/Triboloji.pdf> 28.04.2019
12. <https://www.corrosionpedia.com/definition/338/corrosive-wear> 18.04.2019
13. http://www.cetr.com/ASTM_Standard/ASTM_F732-82_Recip_Pin_on_Flat_Joint_Prostheses.htm 28.04.2019
14. <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=4706> 29.04.2019
15. http://emrtk.unimiskolc.hu/projektek/adveng/home/kurzus/korsz_anyagtech/1_konzultacio_elemei/case_study.htm 28.04.2019
16. <http://surface-heat.com/boronizing> 12.06.2019

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mücahit UYAR
Doğum Yeri ve Tarihi : Ayvacık, 01.12.1994
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0536 446 5771/ mucahituyarr@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Taşova Lisesi, (2008-2012)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, (2013-2017)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, (2017-2019)