



**AISI 8620 ÇELİĞİNİN
YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Göktuğ DÜZENLİ

Danışman

Doç. Dr. Yusuf KAYALI

METALURJİ VE MALZEME

MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ekim 2023

Bu tez çalışması 21.FEN. BİL. 35 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANSTEZİ

AISI 8620 ÇELİĞİNİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ

Göktuğ DÜZENLİ

Danışman

Doç. Dr. Yusuf KAYALI

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ekim 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Göktuğ DÜZENLİ tarafından hazırlanan “AISI 8620 Çeliğinin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 13 / 10 / 2023 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. Yusuf KAYALI

Başkan : Prof. Dr. Aysel BÜYÜKSAĞIŞ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen - Edebiyat Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Yusuf KAYALI
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

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

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

.....

Prof. Dr. Bekir YALÇIN

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.

13/ 10 / 2023

Göktuğ DÜZENLİ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AISI 8620 ÇELİĞİNİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Göktuğ DÜZENLİ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yusuf KAYALI

İmalat sanayinde kullanılan malzemelerde meydana gelen kayıpların (özellikle aşınma ve korozyon sebebiyle) önüne geçmek amacıyla yeni özelliklere sahip çelik türleri geliştirilmekte veya mevcut çelikler üzerine kaplama işlemleri yapılmaktadır. Sementasyon çelikleri olarak bilinen AISI 8620 çelikleri millerin, piston pimlerinin ve dişli çarkların yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. AISI 8620 çeliklerin korozyon, aşınma ve mekanik özelliklerini geliştirmek için çelik alaşımına krom, molibden, tungsten ve vanadyum gibi alaşım elementleri ilave edilir. Aynı zamanda çeşitli kaplama yöntemleri (elektrolitik, termal spre, nitrürleme, borlama, fiziksel buhar biriktirme, kimyasal buhar biriktirme) kullanılarak mevcut çeliklerin yüzey özellikleri geliştirilmektedir. Bu çalışmada AISI 8620 çeliği elektrokimyasal olarak krom kaplandıktan sonra, kutu borlama yöntemi ile borlanmıştır. Kaplamaların optik ve SEM-EDX mikroskobu ile karakterizasyonu sonrasında yüzeyde oluşan fazların analizleri XRD yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. İncelenen örneklerin sürtünme, aşınma ve sertlik davranışları daha sonra Tafel yöntemiyle kaplama öncesi ve sonrası korozyon özellikleri belirlenmiştir. Sonuç olarak borlanmış numunelerde; borlama sıcaklık ve sürelerinin artmasıyla borür tabaka kalınlıklarının arttığı tespit edilmiştir. Cr kaplı numunelere kıyasla borla kaplanan numunelerin sertlik değerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Cr kaplı numunenin aşınma hızı ve değerinin diğer numunelere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Korozyon dirençleri mukayese edildiğinde ise Cr kaplanan numunenin borla kaplanan numunelere göre daha yüksek korozyon direncine sahip olduğu görülmüştür.

2023, xiii + 61 sayfa

Anahtar Kelimeler: AISI 8620 çeliği, Borlama, Mikrosertlik, Aşınma, Elektrokimyasal korozyon.



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

IMPROVEMENT OF SURFACE PROPERTIES OF AISI 8620 STEEL

Göktuğ DÜZENLİ

Afyon Kocatepe University

Institute for Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Supervisor: Assoc.Prof. Yusuf KAYALI

In order to prevent losses in materials used in the manufacturing industry (especially due to wear and corrosion), steel types with new properties are developed or coating processes are carried out on existing steels. AISI 8620 steels, known as case hardening steels, are widely used in the construction of shafts, piston pins and gear wheels. Alloying elements such as chromium, molybdenum, tungsten and vanadium are added to the steel alloy to improve the corrosion, wear and mechanical properties of AISI 8620 steels. At the same time, the surface properties of existing steels are improved by using various coating methods (electrolytic, thermal spray, nitriding, boriding, physical vapor deposition, chemical vapor deposition). In this study, AISI 8620 steel was borided using the box boriding method after being electrochemically chrome plated. After the characterization of the coatings by optical and SEM-EDX microscopy, the phases formed on the surface were analyzed by the XRD method. The friction, wear and hardness behaviors of the examined samples were then determined by the Tafel method, and their corrosion properties were determined before and after coating. As a result, in boronized samples; It was determined that the boride layer thickness increased with increasing boriding temperature and duration. It was observed that the hardness value of boron-coated samples was higher compared to Cr-coated samples. It was determined that the wear rate and value of the Cr coated sample were lower than other samples. When the corrosion resistances were compared, it was seen that the Cr coated sample had higher corrosion resistance than the boron coated samples.

2023, xiii + 61 pages

Keywords: AISI 8620 steel, Boronizing, Microhardness, Wear Electrochemical corrosion.



TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesi ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Yusuf KAYALI' ya, 21.FEN.BİL. 35 numaralı proje kapsamında sağlamış olduğu maddi destek nedeniyle Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Komisyonuna ve üniversiteme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca aldığım kararları her zaman destekleyen, bu günlere ulaşmam için her türlü maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen merhum babam İsmail DÜZENLİ, annem Neziha DÜZENLİ, abim Gökhan DÜZENLİ ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her alanında olduğu gibi bu çalışmamı hazırlarken de her aşamada bana destek olup motive eden değerli eşim Seren DÜZENLİ' ye şükranlarımı sunarım.

Göktuğ DÜZENLİ

Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 AISI 8620 Sementasyon Çeliği.....	3
2.2 Krom Kaplama.....	5
2.2.1 Elektrolitik Krom Kaplama	5
2.3 Borlama.....	6
2.3.1 Borlama İşleminin Avantajları.....	8
2.3.2 Borlama İşleminin Dezavantajları	9
2.3.3 Borlama Yöntemleri	10
2.3.3.1 Kutu Borlama	10
2.3.3.2 Pasta Borlama	13
2.3.3.3 Sıvı Borlama	13
2.3.3.4 Gaz Borlama	14
2.3.3.5 Plazma Borlama.....	15
2.3.4 Bor Tabakasının Genel Özellikleri	15
2.4 Aşınma	18
2.4.1 Abrasif Aşınma	19
2.4.2 Adhesif Aşınma.....	19
2.4.3 Yorulma Aşınması	20
2.4.4 Korozyon Aşınması.....	21
2.5 Korozyon	23
2.5.1 Korozyon Çeşitleri	23

2.5.1.1 Üniorm (Genel) Korozyon	23
2.5.1.2 Galvanik Korozyon.....	24
2.5.1.3 Çukur (Pitting) Korozyonu.....	24
2.5.1.4 Seçimli Korozyon	24
2.5.1.5 Erozyon Korozyonu.....	25
2.5.2. Korozyon Hızı Ölçme Yöntemleri.....	26
2.5.2.1 Kütle Kaybı Yöntemi.....	26
2.5.2.2 Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi	27
2.5.2.3 Lineer Polarizasyon Yöntemi	28
2.5.2.4 Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopi Yöntemi.....	29
3. MATERYAL ve METOT	30
3.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler	30
3.1.1 Deney Numuneleri	30
3.1.2 Krom Kaplama İşlemi	32
3.1.3 Borlama İşlemi	33
3.2 Metalografik Çalışmalar	34
3.3 Deneylerde Kullanılan Cihazlar ve Yöntem	35
3.3.1 Sert Krom Kaplama.....	35
3.3.2 Borlama Fırını	36
3.3.3 Hassas Kesme Cihazı	36
3.3.4 Mikrosertlik Cihazı	37
3.3.5 X-Işınları Difraksiyonu (XRD) Analiz Cihazı.....	38
3.3.6 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	38
3.3.7 Elektrokimyasal Korozyon Deneyleri.....	39
3.3.8 Aşınma Deneyi	39
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELENMESİ.....	41
4.1 Mikroyapı Özellikleri	41
4.2 X-ışını Difraktometresi Analizleri	43
4.3 Tabaka kalınlığı ve Sertlik Özellikleri.....	44
4.4 Aşınma Karakterizasyonu.....	45
4.5 Elektrokimyasal Korozyon Karakterizasyonu	48
5. SONUÇLAR, ÖNERİLER ve TARTIŞMA.....	54

5.1 Sonuçlar	54
5.2 neriler	54
6. KAYNAKLAR.....	55
ÖZGEÇMİŐ.....	61



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C	Santigrat derece
Ø	Çap
µm	Mikrometre
µA	Mikroamper
mV	Mili volt
mm	Milimetre
Bar	Basınç birimi
g	Gram
cm	Santimetre
mpy	Mil olarak korozyon hızı
I _{kor}	Korozyon akımı
E _{kor}	Korozyon potansiyeli
R _p	Polarizasyon direnci
I _{kor}	Korozyon akım yoğunluğu
SO ₄ ⁻	Sülfat
Al ₂ O ₃	Alümina
NaCl	Sodyum klorür
H ₂ O	Su
Fe	Demir
Ni	Nikel
Mo	Molibden
C	Karbon
Si	Silisyum
Mn	Mangan
S	Kükürt
P	Fosfor
Cr	Krom

Kısaltmalar

AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
EN	Avrupa standartları
EDX	Enerji dağıtıcı X-ışını analizi
HB	Brinell Sertlik
HV	Vickers Sertlik
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
SAE	Otomotiv Mühendisleri Topluluğu
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
XRD	X-Işınları Difraktometresi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Katı borlama işlemi şematik gösterimi	11
Şekil 2.2 Fe-B ikili denge diyagramı	16
Şekil 2.3 Borür tabakaları ile geçiş bölgesi temsili	16
Şekil 2.4 Tek ve çift fazlı borür tabakalarında kalıntı gerilmelerin dağılımı	17
Şekil 2.5 Abrasif aşınma mekanizması	19
Şekil 2.6 Adhesif aşınma mekanizması.....	20
Şekil 2.7 Yüzey yorulmasında çatlağın oluşumu ve ilerlemesi	21
Şekil 2.8 Korozyon aşınmasının gelişimi.....	21
Şekil 2.9 Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle korozyon akımı (I_{kor}) ve korozyon potansiyelinin (E_{kor}) bulunması	27
Şekil 2.10 Lineer polarizasyon yöntemiyle polarizasyon direnci (R_p) bulunması	28
Şekil 3.1 AISI 8620 sementasyon çeliği satın alma durumundaki mikro yapısı.....	30
Şekil 3.2 Deneyler için hazırlanan AISI 8620 sementasyon çeliği numune	31
Şekil 3.3 Elektrokimyasal Cr kaplama ünitesi	31
Şekil 3.4 AISI 316L paslanmaz çelik potanın geometrik şekli ve boyutları.....	32
Şekil 3.5 Borlama işleminin yapılış yönteminin şematik gösterimi.....	33
Şekil 4.1 AISI 8620 çeliğinin a) Cr Kaplanmış, b) 850 3h, c) 900 1h, d) 900 3h numunelerin optik resimleri.....	41
Şekil 4.2 AISI 8620 çeliğinin a) Cr kaplanmış, b) 850 3h, c) 900 1h, d) 900 3h numunelerin SEM resimleri.....	42
Şekil 4.3 AISI 8620 çeliğinin a) Cr kaplanmış, b) 850 3h, c) 900 1h, d) 900 3h numunelerin XRD analizleri.....	43
Şekil 4.4 AISI 8620 çeliğinin yüzeyine yapılan kaplamaların a) tabaka kalınlıkları ve b) mikrosertlik değişimi.....	44
Şekil 4.5 Yüzey işlemi yapılan AISI 8620 çeliğin sürtünme katsayısı ve aşınma hızı	46
Şekil 4.6 a) İşlemsiz 8620, b) Cr kaplanmış, c) 850 3h, d) 900 1h, e) 900 3h numunelerin aşınma izleri SEM resimleri.	48
Şekil 4.7 % 3.5 NaCl ortamında 1 saat bekletilmiş olan AISI 8620 çeliğinin Tafel eğrileri.....	51

Şekil 4.8	a) İşlemsiz 8620, b) Cr kaplanmış, c) 850 3h, d) 900 1h, e) 900 3h numunelerin korozyon sonrası Sem-Edx analizleri.....	53
------------------	--	----



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1	AISI 8620 sementasyon çeliğinin farklı ülke standartlarındaki karşılıkları.....	4
Çizelge 2.2	AISI 8620 sementasyon çeliğinin kimyasal bileşimi	4
Çizelge 2.3	AISI 8620 sementasyon çeliğinin ısıtım işlem koşulları.....	4
Çizelge 2.4	Elektrolitik sert krom kaplama banyo bileşenleri	6
Çizelge 2.5	Bor ve bazı bileşiklerin sertlikleri	7
Çizelge 2.6	Çeşitli yüzey işlemleri ile elde edilebilecek sertlik değerleri.....	8
Çizelge 2.7	Kutu borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri.....	12
Çizelge 2.8	Uygun bor sağlayıcıları ve bazı özellikleri	14
Çizelge 2.9	Borür tabakaları ısıtım genleşme katsayıları	17
Çizelge 2.10	FeB ve Fe ₂ B fazlarının çeşitli özellikleri	18
Çizelge 3.1	AISI 8620 sementasyon çeliği kimyasal analizi.....	30
Çizelge 3.2	Banyo kurulum ve çalışma şartları	33
Çizelge 3.3	AISI 8620 çeliğine yapılan borlama işlemleri	34
Çizelge 4.1	Yüzey işlemleri yapılmış AISI 8620 çeliğin aşınma değerleri	47
Çizelge 4.2	Yüzey işlemleri yapılmış AISI 8620 çeliğinin % 3.5 NaCl ortamında elde edilen korozyon karakteristikleri	49

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Zımpara ve parlatma makinesi.....	34
Resim 3.2 Mikroyapı görüntüleri için kullanılan optik mikroskop.....	35
Resim 3.3 Elektrokimyasal krom kaplama düzeneği.....	36
Resim 3.4 Borlama işleminde kullanılan kuyu fırını	36
Resim 3.5 Hassas kesme cihazı	37
Resim 3.6 Mikrosertlik cihazı	37
Resim 3.7 X-Işınları analiz cihazı.....	38
Resim 3.8 Taramalı elektron mikroskobu	38
Resim 3.9 Korozyon deneyinde kullanılan cihazlar ve deney düzenek.....	39
Resim 3.10 Aşınma deneyinde kullanılan cihaz	40

1. GİRİŞ

Çağımız sanayisinde, mekanik sistemler yüksek hızlarda büyük kuvvetlerle karşılaştığından ve ağır şartlar altında çalıştığından, malzemelerin performansını iyileştirmek bu şartlara dayanımlarını artırabilmek adına endüstriyel ve bilimsel araştırmalar ilerlemektedir (Ekinci ve Akdemir 2011). Bu durumda metalik malzemelerin mekanik özellikleri, mikroyapısı ve aşınma davranışı arasındaki ilişkiye yönelik araştırmalar artmaktadır (Ulu vd. 2006).

Aşınma ve korozyon, sanayinin tüm dallarında gizli bir tehlike olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum genellikle kararlı ve yavaş ilerleyen bir süreçtir. Vaktinde gerekli tedbirler alınmazsa ekonomik olarak büyük kayıplarla sonuçlanmaktadır.

İmalatta aşınma ve korozyona bağlı malzeme kayıplarını önlemek için farklı bileşimlerde çelik kaliteleri geliştirilmesi veya mevcut çelik üzerine kaplama işlemleri yapılması önerilmiştir (Erden 2016).

Çeliklerin mekanik özelliklerini daha yüksek seviyelere çıkarılması için endüstride nitrürleme, sementasyon, krom kaplama ve borlama sıklıkla kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemler arasında borlamanın çok iyi aşınma ve korozyon direncinin olması yanında aynı zamanda katı yağlayıcı görevi görmesi de diğer yöntemlere göre büyük avantaj sağlamaktadır (Bozkurt 2022).

Çeliğin mekanik özelliklerine ek olarak birlikte aşınma ve korozyon dirençleri çeliğe krom, tungsten, vanadyum ve molibden benzeri alaşım elementleri eklenerek iyileştirilebilir. Aynı zamanda çeşitli kaplama yöntemleri (elektroliz, termal püskürtme, nitrürleme, borlama, fiziksel buhar biriktirme, kimyasal buhar biriktirme) kullanılarak mevcut çeliğin yüzey özellikleri iyileştirilmektedir.

Metallere uygulanan yüzey işlemleri son yıllarda giderek artmaktadır. Farklı kaplama yöntemleri, malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirebilir. Bu kaplamaların oluşturulma amacı; yüzeyin işlevselliğini yani malzeme yüzeyinin aşınma ve korozyon

direncini arttırmak ve mekanik streslere karşı etkin direncini sağlamaktır.

Bu çalışmada elektrolitik krom ve borlama yöntemleri ile kaplanmış AISI 8620 sementasyon çeliği kullanılmıştır. AISI 8620 çekirdekte yumuşak ve tokluğun istenildiği, yüzeyde ise sert ve aşınmaya dayanıklı olan, darbeli yerlerde tercih edilen esnek bir yapı çeliğidir. Nikel içerik özellikleri sayesinde AISI 8620, yüksek kabuk tokluğuna ve ortalamanın üzerinde önemli tokluğuna sahiptir. Aynı zamanda en yaygın kullanılan karbonlama alaşımlı çeliktir.

Tez için hazırlanan numuneler Optik, SEM, XRD ile karakterize edilmiş, aşınma ve korozyona uğramış yüzey özellikleri SEM-EDX ve elektrokimyasal yöntemlerle belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 AISI 8620 Sementasyon Çeliği

Çelik; sanayide geniş bir kullanım alanı olan ve ticari değere sahip demir (Fe) ve karbon (C) alaşımıdır. İlk kullanıldığı günden bu yana teknolojik gelişmelerle birlikte daha da iyi performans sergileyen çeliğe ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle, imalat sürecinde malzeme kaybını aşınma ve korozyonla önlemek için farklı çelik bileşimleri geliştirilmiştir. AISI 8620 kalite çelik, bu sorunu çözmek amacıyla üretilen çeliklerden biridir (Erden 2016).

AISI 8620 çekirdekte yumuşak ve tokluğun istenildiği, yüzeyde ise sert ve aşınmaya dayanıklı olan, darbeli yerlerde tercih edilen esnek bir yapı çeliğidir. Nikel içerik özellikleri sayesinde AISI 8620, yüksek kabuk tokluğuna ve ortalamanın üzerinde önemli tokluğuna sahiptir. Aynı zamanda en yaygın kullanılan karbonlama alaşımlı çeliktir. AISI 8620 çeliğinin uygulama alanları arasında dişliler, kranklar, miller, akslar, burçlar, ağır pimler, civatalar, yaylar, el aletleri ve daha başka birçok mekanik parça bulunur (İnt.Kyn.1).

Semente çelikler için karbon içeriği genellikle %0,10 ile %0,20 civarındadır. Fakat birkaç sınıfta ortalama %0,25' lere ulaştığı görülebilir. Alaşımsız veya düşük alaşımlı olabilmektedir. Alaşımsız çelikler, yüksek kaliteye sahip çelik (P ve S, ayrı ayrı %0,045'e kadar) ve yüksek kaliteli çelik (P ve S, her biri %0,035'e kadar) şeklinde üretilir. Yakın zamanda geliştirilmiş alaşımsız Cm15 çeliği ve bazı alaşımlı çeliklerde daha kolay işlenebilme kabiliyeti kazandırmak için kükürt içeriği %0,020 - %0,035 civarında arttırılmıştır.

Ülkemizde dişli kutusu üretiminde en çok tercih edilen yüksek mukavemetli çelik 21NiCrMo2 (1.6523 veya AISI 8620), TS 2850 (Ekim 1977) (TS EN 10084, 29 Nisan 2010'da TS 2850'nin yerini alan bir standart) ile korunmaktadır. 21 NiCrMo2 (AISI 8620) çeliği, makine ve otomobillerde yüksek gerilimli dişliler, pimler, miller ve vites

kovanları gibi parçalarda kullanılmaktadır. AISI 8620 sementasyon çeliğinin farklı ülke standartlarındaki karşılıkları, TS 2850'ye göre Çizelge 2.1, kimyasal bileşimi Çizelge 2.2 ve ısıtım işlem koşulları Çizelge 2.3'te gösterilmiştir (Topbaş, 1998).

Çizelge 2.1 AISI 8620 Sementasyon çeliğinin farklı ülke standartlarındaki karşılıkları

Türkiye TS 2850	Almanya DIN 17210	Fransa	İngiltere	İtalya	Japonya	Amerika Birleşik Devletleri AISI/SAE
MKE	Malz. No Sembol	AFNOR	B.S.	UNI	JIS	
Ç 8620	1.6523 21NiCrMo2	20 NCD 2	805 M 20	20NiCrMo2	SNM220(H)	8620

Çizelge 2.2 AISI 8620 Sementasyon çeliğinin kimyasal bileşimi

KİMYASAL BİLEŞİM (% Ağırlık)							
C	Si	Mn	Pmax	Smax	Cr	Mo	Ni
0.18...0.23	0.20...0.35	0.70...0.90	0.040	0.040	0.40...0.60	0.15...0.25	0.40...0.70

Çizelge 2.3 AISI 8620 Sementasyon çeliğinin ısıtım işlem koşulları

Sementasyon İşlemi Tarzı			Sementasyondan Sonra Soğutma Ortamı						
Direkt Sertleştirme	Basit Sertleştirme	Çift Sertleştirme	Sementasyon Sıcaklığı °C	Su	Yağ	Sıcak Banyo	Tuz Banyo	Sement. Kutusu	Hava
			900	-	*	*	-	*	*
			950						
			Çekirdek Sertleştirme Sıcaklığı	Ara Tavlama Sıcaklığı		Cidar Sertleştirme			Meneviş Sıcaklığı En az 1 saat
*	*	-	°C	°C	°C	Su	Yağ	Sıcak Banyo	°C
			840	630	800				170
			:	:	:	(*)	*	*	:
			870	650	830				210

2.2 Krom Kaplama

Krom çok sert bir yapıya ve 1857 °C gibi yüksek bir ergime değerine sahip olması nedeniyle metallere dayanım ve sertlik kazandıran bir elementtir. Metal ve alaşımlarını korozyondan korumak, aşınma direnci ve sertlik gibi mekanik özelliklerini geliştirmek aynı zamanda dekoratif görünüm sağlamak için kaplama yöntemleri uygulanmaktadır.

Kaplama yöntemleri, fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), termal yöntemler (plazma kaplama, yüksek hızda oksit yakıt püskürtme (HVOF) vb.), sıcak daldırmanın yanı sıra elektrolitik yöntemle de uygulanmaktadır. Kimyasal ve termal kaplama, elektrolitik kaplama yöntemiyle mukayese edildiğinde ekonomik oluşu sebebiyle avantajlıdır (Kır ve Apay 2020).

2.2.1 Elektrolitik Krom Kaplama

Elektroliz; bir kap ya da tank içerisinde elektrik akımından yararlanarak sıvı ortamında kimyasal bileşiklerin ayrıştırılması işlemidir. Bu yöntemde çözünerek pozitif ve negatif yüklü iyonlara ayrılmış bir bileşiğin çözeltisi içinde birbirinden bağımsız halde daldırılan iki elektrot mevcuttur. Güç kaynağına bağlanan elektrotlarda meydana gelen gerilim, iyonların karşıt yüklü kutuplara (elektrot) doğru hareketini sağlamaktadır. Zıt uçlarda yükünü dengeleyen atom ya da moleküller elektrotta sedimantasyona uğrar. Ya da elektrolit içindeki moleküllerle yeni reaksiyona girer.

Elektrolitik kaplama yöntemlerinden, sert krom kaplama malzemelerin aşınma özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapılmaktadır. Makine parçaları, otomotiv enstrümanları ile takım tezgahlarına ait donanımlarda eksik yağlama sonucunda aşınmalara rastlanmaktadır. Bu durum malzemelerin sertlik ve tokluk gibi mekanik değerlerini etkilemektedir (Kır ve Apay 2020).

Elektrolitik sert krom kaplama atmosfere, asit, alkali ve tuzlara karşı çok iyi korozyon direnci göstermektedir (Bayraktar 1998). Sert krom kaplama ile 0.002-0.400 mm kalınlık elde edilerek çok sert bir tabaka oluşturulmaktadır. Bu kaplamayla elde edilen ürünler

darbelere oldukça dayanıklı, kimyasal ve yüksek sıcaklıklarda çalışırken ortama çok iyi mukavemet sağlamaktadır. Aynı zamanda diğer metallere nazaran görünüşünün iyi olması, parlaklığı ve sertliği aranan bir metal olmasını sağlamaktadır.

Krom kaplama yapmak için altı değerli kromik asit çözeltisi kullanılmaktadır. Kullanışlı krom kaplama için kullanılan üç temel formülde de CrO_3 krom (III) oksit krom kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. CrO_3 su içerisinde çözündüğünde kromik asit $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (bikromat asit) formunu almaktadır. Sülfat (SO_4^{2-}) iyonları üç formülde de katalizör görevini yapmaktadır. Eğer çözelti belirli miktar katalizör içermezse kaplama yapmanın mümkün olmadığı literatürde belirtilmiştir. Katalizör miktarının optimum seviyede olmaması durumunda krom metali kaplanmayacaktır. En başarılı katalizörler asit anyonları olup bunlar arasında en çok tercih edilenin sülfat olduğu karşımıza çıkmaktadır. Çizelge 2.4'te elektrolitik sert krom kaplama banyo bileşenleri verilmiştir (Bozyazı 2002).

Çizelge 2.4. Elektrolitik sert krom kaplama banyo bileşenleri.

Banyo Tipi	Kromik Asit g/lt	Sülfat g/lt	Akım Yoğunluğu A/dm ²	Banyo Sıcaklığı °C
Düşük konsantrasyon	250	2.5	31-62	52-63
Yüksek konsantrasyon	400	4.0	16-54	43-63

2.3 Borlama

Bor, elementlerin periyodik tablosunda B harfiyle temsil edilir, atom numarası 5, atom ağırlığı 10.81'dir. Yarı metalik ve yarı iletken özellikleri bulunan bor elementi periyodik tablonun 3A grubunda yer alır (İnt.Kyn.2). İki şekilde bulunan bor, kristal olarak 2.33 g/cm³ yoğunluğa, amorf olarak 2.3 g/cm³ yoğunluğa sahiptir (Uzun 2002).

Bor elementi yeryüzünde asla serbest olarak bulunmaz ve muhtelif metal veya ametal elementlerle değişik özelliklerde bileşikler oluşturur. Böylelikle çeşitli bor bileşikleri farklı endüstriyel sektörlerde tercih edilmektedir. Bor, bileşiklerinde metalik olmayan bir

bileşik gibi davranır. Saf bor ise karbon gibi elektriği iyi iletmektedir. Kristal bor görünüşü, ışığı yansıtma ve kırılma özelliklerinden dolayı elması andırır. Neredeyse elmas gibi sertliğe de sahiptir (Uluköy 2005). Bor ve bazı bileşiklerin sertlikleri Çizelge 2.5 'te verilmiştir.

Çizelge 2.5. Bor ve bazı bileşiklerin sertlikleri (Uzun 2002)

Malzeme	Mohs Sertlik
Bor	9.3
Bor karbür (B ₄ C)	9.32
Bor nitrür (BN)	1.2
Elmas (standart)	10

Bor mineral ve bileşiklerinin kullanıldığı sektörlere bakıldığında; savunma sanayi, cam, elektronik, bilgisayar, tıp, uzay ve havacılık, enerji, görüntüleme aygıtları, haberleşme aygıtları, yapı, kağıt, kimyasal hammadde, makine, tarım, metal ürün, otomotiv, seramik, spor ekipmanları, koruyucu ekipman, kıyafet, nükleer sanayi olarak karşımıza çıkmaktadır (İnt.Kyn.3).

Borlama içeriğinde demir bulunduran, demir esaslı olmayan metaller ve seramiklere de uygulanabilen termokimyasal yüzey sertleştirme işlemidir (Kayalı 2011). Bu yöntem sayesinde bor atomları difüzyonla alt tabaka kafesine zorlanır ve yüzeyde sert ara tabaka bor bileşiği oluşmasını sağlar. Yüzeydeki borürler, tek fazlı veya çift fazlı borür tabakaları olarak oluşabilir. Bor kaplama işlemi, borun Fe₂B ve FeB gibi intermetalik bileşikler oluşturmak için yüksek sıcaklıkta çelik yüzeyine yayıldığı bir işlemdir. Endüstriyel uygulamalarda, sadece Fe₂B'den oluşan tek fazlı bir bor tabakası, daha az kırılabilirlik ve yapısal kararlılıkla birlikte borlama sonrası ısıtılma işlemi açısından tercih edilir (Gödek 2017).

Borlama işlemi; malzeme yüzeyinin iyice temizlenip parlatılmasından sonra, 700 °C ile 1000 °C arasında 1-12 saat süresince katı, sıvı ya da gaz fazda bor verici ortamda gerçekleştirilir (Uluköy 2005). Teknolojik gelişmeler sonucunda plazma ve plazma pasta borlama (PPB) gibi teknikler de yaygınlaşmıştır. Ayrıca kimyasal çöktürme yöntemleri (PVD - CVD) ve termal yöntemlerle de malzemeler üzerinde bor tabakası oluşturulabilir (Kayalı 2011).

2.3.1 Borlama İşleminin Avantajları

Diğer sertleştirme yöntemleriyle mukayese edildiğinde bor tabakasının 1450 HV-5000 HV sertlik değerine sahiptir. Aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda da bu sertlik değerini koruyabilmektedir. Borlanmış çeliğin diğer yöntemlerle yüzeyinin sertleştirilmesinde elde edilen değerler Çizelge 2.6'da gösterilmiştir. Bor tabakasının sertlik değerleri ile diğer sertleştirme yöntemlerinin sertlik değeri sonuçları arasındaki büyük fark ortadadır. Borlanmış yüzeylerin sonuçları, sert krom kaplama ve sertleştirilmiş takım çeliklerinden daha fazla, tungsten karbür ile özdeştir. Yüzeydeki sertliğin fazla ve sürtünme katsayısının az olmasının birleşimi, korozyona ve yüksek sıcaklık oksidasyon hasarına, özellikle yapışma ve aşınmaya karşı önemli bir direnç sağlar (Uluköy ve Can 2005).

Çizelge 2.6 Çeşitli yüzey işlemleri ile elde edilebilecek sertlik değerleri (Uluköy ve Can 2005).

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

Bor tabakasının yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısı değerleri çok yüksek aşınma direnci sağlar. Bu özellikler kalıp yapımında ana malzemenin işlenmesinde kolaylık sağlarken, daha düşük maliyetli ve mekanik özellikleri bakımından orijinal yapıya göre

üstün performans sunmaktadır (Kayalı 2011).

Borür tabakasının bazı avantajları aşağıda verilmiştir:

- a) Yüzeyi borlu tabakalar 850 °C civarında ısıya maruz kaldığında çok fazla ergimiş metal oksidasyon direncine ve ortalama korozyon direncine sahiptir.
- b) Borla kaplı malzeme, oksidan ve korozyona maruz kaldığı durumlarda üst düzeyde bir yorulma direnci gösterir.
- c) Borla kaplanan malzemelerde yağlama gereksinimi çok fazla olmazken, borür tabakası sayesinde sürtünme katsayısı ve soğuk birleşme yatkınlığı da azalır (Kayalı 2011).
- d) Bor tabakasındaki sertlik değeri nitrasyon ısıl işlemine göre artan sıcaklık değeriyle doğru orantılıdır (Gödek 2017).

2.3.2 Borlama İşleminin Dezavantajları

Borlama işleminin avantajlarına ek olarak dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar;

- a) Borlama teknolojisi sınırlıdır. Gaz fazındaki karbürizasyon, plazma nitrürleme ve öteki termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerinden maliyetlidir. Gaz karbonlama ve plazma nitrürleme daha değişken yöntemlerdir. Bu yöntemlerin işçiliği az olmakla birlikte maliyeti de düşüktür. İlaveten uygulama sürelerinin kısa oluşu, uygulanabilmesinin de basitliği borlama yöntemine göre avantaj sunmaktadır. Bu nedenle harici ortamda iyi bir aşınma dayanımı, aşırı sertlik ve şiddetli oksidasyon direnci istendiğinde borlama işlemi tercih edilmektedir (Yapar 2003).
- b) Borlanan malzemelerde bor tabakasının boyutunda %5-20 oranında bir fazlalaşma görülmektedir. Örnek olarak, 25 µm'lik bir katman kalınlığı, 1.25-6.25 µm'lik bir büyüme ile sonuçlanır. Tabaka kalınlığındaki bu büyümenin sebebi borlama malzemesinin türü ve koşullarıyla ilgilidir. Fazla ayrıntılı ölçülerle çalışma durumunda, elmas donanımlarla kaplama işlenmesi yapılabilir, ama yüzeyin

alışılmış yöntemlerle işlenmesi kaplama tabakasında kırılmalara yol açmaktadır. Bu durum düşük kaplama kalitesine aynı zamanda çatlaklara sebep olur (Yapar 2003).

- c) Çoğu zaman borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı yorulma özelliği yüksek basınç yüzeyi (2000N) altında sementasyon ve nitrifikasyona kıyasla çok düşük performans gösterir. Borlamanın bu özelliğinden dolayı dişli üretimi sınırlıdır (Kayalı 2011).
- d) Ekipmanlara borlama işleminden sonra genellikle su verilir ve temperlenir. Aşamalar sırasında borür tabakanın özelliklerini korumak için reaksiyon vermeyen bir hava tabakası ya da vakum gereklidir (Yapar 2003).

2.3.3 Borlama Yöntemleri

Borlama da nitrüleme ve sementasyon gibi yüzey sertleştirme işlemlerinin süreçlerine benzemektedir. Uygun sıcaklık altında belirli bir süre bor kaynağından malzeme yüzeyine ve içine işleyen bor, metal ile tek ya da birden fazla intermetalik faz oluşturarak yüzeyde katman oluşturur (Albayrak 2021).

Borlama birden fazla yöntemle yapılabilir. Genel olarak iki farklı başlıkta toplanan bu yöntemler;

- a) Termokimyasal yöntemler (kutu borlama, pasta borlama, sıvı borlama, gaz borlama ve plazma borlama) (Ünal 2022).
- b) Termokimyasal olmayan yöntemler (fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey kaplama vb. yöntemler) (Kayalı 2011).

2.3.3.1 Kutu Borlama

Uygulama kolaylığı, basit ve az donanım ihtiyacı ve ekonomik olması gibi avantajları

2.7'de kutu borlama yönteminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri verilmektedir (Ünal 2022).

Çizelge 2.7. Kutu borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri (Ünal 2022).

İsim	Formül	Molekül Ağırlığı (gr)	Teorik Bor Miktarı (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Amorf Bor	B	10.82	95-97	2050
Ferro-Bor	Fe-B	-	17-19	-
Bor Karbür	B ₄ C	55.29	77.28	2450

Kutu borlamada pota olarak paslanmaz çelik, alaşımsız çelik ya da alümina kutular kullanılmaktadır. Borlama kaynağı olarak yapılan çalışmalarda toz karışımları aşağıdaki gibidir (Uluköy 2005).

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

Ticari olarak kullanılan katı ortam borlayıcıları toz ve granül halinde bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır (Barut 2018):

- Ekabor I: Toz biçiminde bulunur.
- Ekabor II: Granül biçiminde bulunur.

- c) Ekabor III: Granül biçiminde bulunur.
- d) Ekabor HM: Özel olarak hazırlanmış olan Ekabor HM sert malzemeler için kullanılır.
- e) Ekabor Ni: Nikel ve nikel alaşımların borlanması tercih edilir.
- f) Ekabor pasta: Macun kıvamındaki Ekabor pasta metalik malzemelerin borlama işleminde gerekli kısma sıvanarak uygulanır.

2.3.3.2 Pasta Borlama

Borlama tozunun macun haline getirilerek uygulanması yöntemidir. Bu yöntemdeki avantaj iş parçasının belirli bir bölgesinin lokal olarak borlanabilmesidir. Bu yöntemde %45 B₄C ve %55 kriyolit kullanılır. Klasik borlama toz harcı bor karbür + silisyum karbür + potasyum tetrafluoro borate (B₄C+SiC+KBF₄) iyi bir bağlayıcı olan butil asetat içinde çözünmüş nitro selüloz ile birlikte kullanılmaktadır (Barut 2018, Albayrak 2021).

Hazır haldeki borlayıcı karışım, malzeme yüzeyine 1-2 mm kalınlığında tatbik edilerek kuruması sağlanır. Pasta borlama yöntemi demir muhteva eden materyaller için 800 °C ve 1000 °C sıcaklıklarında farklı sürelerde gerçekleştirilir (Ünal 2022).

2.3.3.3 Sıvı Borlama

Bu yöntem için sıvı haldeki bor banyosu kullanılmaktadır. Sıvı ortamda borlama elektrolitik sıvı borlama ve elektrolitik olmayan(daldırma) sıvı borlama olarak ikiye ayrılır (Barut 2018).

Elektrolitik sıvı borlama demir esaslı malzemelere göre uygun bir yöntemdir (Albayrak 2021). Demir esaslı malzemelere 4-6 saat süre ile 900-950 °C sıcaklıklarda uygulama yapılmaktadır. Elektrolitik sıvı borlama işleminde borlanacak numune katot, grafit elektrot ise anot olarak kullanılmaktadır. Elektrolit olarak boraks tercih edilmektedir (Yapar 2003). Borlama süresi ve akım yoğunluğu ana malzemenin alaşım elementi miktarına göre değişmektedir. Borlama esnasında akım değeri 0,15-0,2 A/cm² civarındadır. Bor tabakasının yüzeye eşit kalınlıkta dağılması için işlem esnasında

kaplanacak malzeme farklı eksenlerde döndürülmelidir (Ünal 2022). Çizelge 2.8’de uygun bor sağlayıcıları ve bazı özellikleri verilmiştir.

Yöntemin dezavantajları ;

- Borlanmış çelik malzemelerin yüzeyindeki tuz kalıntıları ve ortamda tepkimeye girmeyen bor zaman ve enerji kaybına sebep olur.
- İşlemin başarılı olabilmesi için çözeltinin akışkanlığının artmaması için tuz ilavesi yapılması gerekir. Bu da maliyeti artıran bir durumdur.
- Malzemeyi korozyif ortamlardan korumak için fırınlara ihtiyaç vardır (Barut 2018).

Çizelge 2.8. Uygun bor sağlayıcıları ve bazı özellikleri (Albayrak 2021).

Bor Kaynağı	Kimyasal Bileşim	Molekül Ağırlığı (gr)	Yüzde Bor Miktarı	Ergime Sıcaklığı (°C)
Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	381.42	11.35	-
Susuz Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	201.26	21.50	741
Metabor Asidi	HBO_2	43.83	24.69	-
Sodyumtetraflorürborat	NaBF_4	109.81	9.85	-
Bor Oksit	B_2O_3	69.64	31.07	450
Bor Karbür	B_4C	55.29	78.28	2450
Potasyumtetraflorürborat	KBF_4	69.67	15.52	-

2.3.3.4 Gaz Borlama

Gaz fazındaki malzemelerin bor kaynağı olarak kullanıldığı yöntemdir. Gaz borlama yönteminde bor halojen ve bor hidrürler sıklıkla tercih edilen bor taşıyıcı gazlardır. Bu yöntemde en çok tercih edilen zemin aşağıda verilmiştir (Kayalı 2011, Ünal 2022).

- Diborane (B_2H_6)- H_2 karışımı
- Borhalid (iyonize bor)- H_2 /veya (75/25 N_2 - H_2) gaz karışımı
- (CH_3) $_3\text{B}$ ve (C_2H_5) $_3\text{B}$ gibi organik bor bileşikleri

Bor yoğunlaşmasının ayarlanabilmesi tek fazlı homojen bor tabasının yapısının elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yöntem özellikle karmaşık şekle sahip malzemelerin

borlanması ve tüm yüzeylere eşit dağılmış tabaka kalınlığı elde edilmesi istenilen durumlarda avantaj olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra kullanılan gazların patlayıcı, ortamın zehirliliği ve uygulanacak ekipmanın pahalı olması da yöntemin dezavantajlarıdır (Barut 2018, Ünal 2022).

2.3.3.5 Plazma Borlama

Mevcut yüzey sertleştirme yöntemlerine göre, plazma ile yüzey sertleştirme işlemleri önemli avantajlara sahiptir. Bunlar; güvenilirlik, çevresel temizlik, ekonomiklik, işlem süresinin kısa olması, çok iyi aşınma direnci, minimum çarpılma ve mikro yapının kontrol edilebilirliği (Uluköy 2005)

Demir esaslı ve demir dışı metallere Ar ve H₂ gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl₃, B₂H₆, BF₃ veya B(OCH₃)₃ (trimetilborat) kullanarak, 800-1000 °C sıcaklıkta, yaklaşık 10⁻² Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulan plazma içerisinde yapılan yöntemdir. Mikroyapı ve demirbor tabakalarının büyümesi işlem sıcaklığı, gaz karışım oranları, malzeme kompozisyonları, işlem basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla kontrol edilebilmektedir (Albayrak 2021).

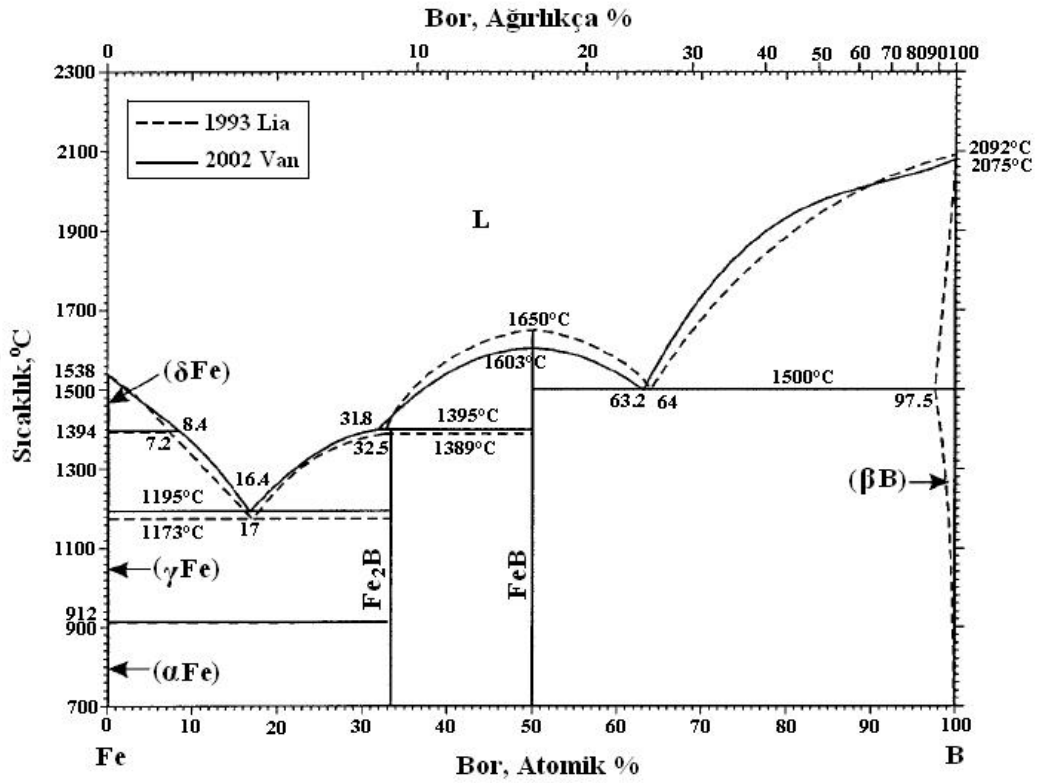
2.3.4 Bor Tabakasının Genel Özellikleri

Borlama sırasında, bor atomlarının difüzyonu ile yüzeydeki metal kafeste bor bileşikleri oluşur. Bu tabaka, tek fazlı veya çok fazlı borürlerden oluşabilir. Bor tabakasının şekli, boyutu ve oluşan fazların bileşimi ana malzemenin kimyasal bileşimine bağlıdır.

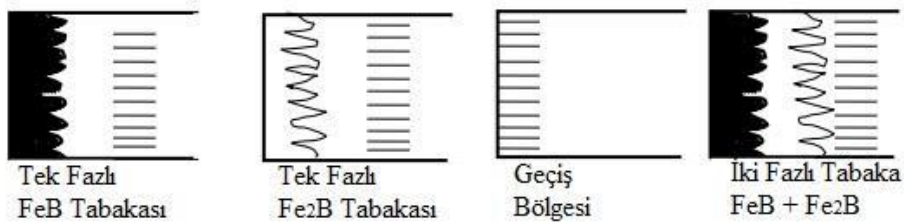
Bu tabakanın sertliği oluşan bor tabakasının şekline ve ana malzemenin kimyasal bileşimine bağlıdır (Uluköy 2005).

Borlama sonucunda malzeme içerisinde borür tabakaları, geçiş bölgesi ve ana malzeme olmak üzere farklı bölgeler görülebilir. Demir esaslı malzemelerde borür tabakaları genellikle FeB ve Fe₂B'den oluşmaktadır. Fakat borlama sonrasında bu tabakaların her ikisi ya da bir tanesi görülebilmektedir (Ünal 2022).

Fe-B ikili denge diyagramı Şekil 2.2 ‘de verilmiştir. Ayrıca borür tabakasındaki fazların bölgesi şekil ile gösterilmiştir. Şekil 2.3’te ise borür tabakaları ile geçiş bölgesi temsili verilmiştir.



Şekil 2.2. Fe-B ikili denge diyagramı (Kayahı 2011).



Şekil 2.3. Borür tabakaları ile geçiş bölgesi temsili (Albayrak 2021).

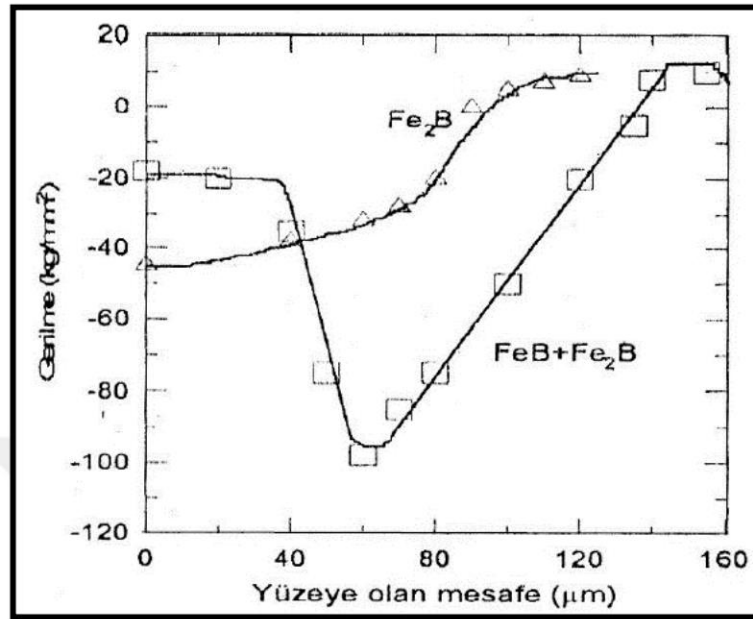
Tek fazlı Fe₂B katmanı iki fazdan oluşan FeB+Fe₂B katmanına kıyasla üstün nitelikleri içerir. İki fazlı tabakalarda yüzeyden önceki katmanda gözenek olması olasıdır. Borür tabakası ince olursa, gözenek meydana gelmesi ve tabakanın kabarma olasılığı azalır (Yapar 2003).

Borür tabakası ve difüzyon bölgeleri arasında malzemelerin ısı genleşme katsayıları farkından dolayı oluşan artık gerilmeler, tabakanın aşınma dayanımı ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Çizelge 2.9’da borür tabakaları ve ana malzemenin ısı genleşme katsayıları görülmektedir (Soydan 1996).

Çizelge 2.9. Borür tabakaları ısı genleşme katsayıları (Yapar 2003).

Malzeme	Isıl Genleşme Katsayısı (10^{-6}) / °K		
FeB	11.53	23	10-16
Fe ₂ B	8.7	7.85	8

Tek fazlı tabakaların tercih edilme sebeplerinden biri de çift fazlı tabakaya sahip malzemelerin iç kısımlarında kırılmalar ve kalıntı gerilmelerine bağlı olarak bu sıkıntıların görülmesidir. Şekil 2.4’te tek ve çift fazlı borür tabakalarında kalıntı gerilmelerin dağılımı verilmiştir (Ünal 2022).



Şekil 2.4. Tek ve çift fazlı borür tabakalarında kalıntı gerilmelerin dağılımı (Soydan 1996).

Borlama sıcaklığı düşük tutularak ısı işlem sonrası soğutmanın hızlı yapılması artık gerilmelerin azalması için olumlu sonuçlar vermektedir (Soydan 1996).

Fe₂B fazının FeB fazına göre daha çok tercih edilme sebeplerinden biri de ısı genleşme katsayısının ana malzemeye yakın olmasıdır. Özellikle Fe₂B tabakasının daha az gevrek

olması ve porozite miktarına etkisinin az olması avantaj olarak gösterilebilir. Çizelge 2.10'da FeB ve Fe₂B fazlarının çeşitli özellikleri verilmiştir (Ünal 2022).

Çizelge 2.10. FeB ve Fe₂B fazlarının çeşitli özellikleri (Ünal 2022).

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Kristal Yapı	Hacim merkezli tetragonal	Ortorombik
Latis Parametresi (Å)	a= 5.078 c=4.28	a= 4.053 b=5.495 c=2.946
Bor içeriği (% ağırlık)	8.83	16.23
Yoğunluk (gr.cm ⁻³)	7.43	6.75
Elastisite Modülü (GPa)	280-295	590
Mikrosertlik (GPa)	18-20	19-21
Oluşum Entalpisi (ΔH) (kJ.mol ⁻¹)	-71.13	-71.13
Gibbs Serbest Enerjisi (kJ.mol ⁻¹)	-71.75	-69.47
Ergime Sıcaklığı (°C)	1389-1410	1540-1657
Termal İletkenlik (W/ m.°K)	30.1 (20 °C)	12 (20 °C)
Elektriksel Direnç (10 ⁻⁶ Ω.cm)	38	80

2.4 Aşınma

Aşınma, katı maddelerin yüzeylerinden çeşitli faktörlerle aralıksız malzeme kayıplarının yaşanmasıdır. Malzemelerin katı, sıvı veya gaz gibi diğer malzemelerle temas etmesi sonucunda mekanik etmenlerle yüzeylerinden partiküller ayrılarak oluşan istenmeyen yüzey bozulmalarının gerçekleşmesidir (Toğuşlu 2011).

Makinelerdeki arızaların, yapı elemanlarının tasarruf dışı kalmalarının en önemli nedenlerinden biri aşınmadır. Sürtünme enerji kaybı, aşınma da geri kazanılamayan madde kaybıdır. Bu sebeple ortaya çıkan kayıpların ve ekonomik etkilerin önüne geçebilmek için her yıl çeşitli tedbirler geliştirilmektedir. Sanayide aşınmanın sebep olduğu hasarların aşınma tiplerine göre % 50 abrasif aşınma, % 15 adhesif aşınma, % 8 erozif aşınma, % 8 kimyasal aşınma, % 5 korozyon aşınma, % 14 yorulma ve bunun

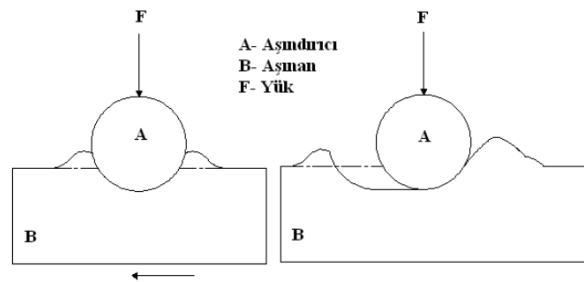
dışındaki aşınmalar olduğu görülmektedir (Kayalı 2011).

Endüstride, çalışma ortamlarına göre aşınma dayanımları yüksek ve ekonomik olarak ucuz malzeme üretimi yapmak oldukça zordur. Bu duruma çözüm olarak her çalışma ortamına uygun mikroyapıda ve sertlikte malzeme üretimi yapılarak birbirleriyle temas halinde çalışan malzemelerde aşınmanın en az seviyelerde tutulması sağlanmıştır (Güney 2021).

2.4.1 Abrasif Aşınma

Malzemelerin kendi yüzeyinden daha sert parçacıklarla teması sonucunda sert parçacığın malzemenin yüzeyinden parça koparmasına abrasif aşınma denir. Yırtılma ve çizilme aşınması olarak ta adlandırılırken sistemde hızlı bir hasara yol açmaktadır. Malzeme tercihinde daha sert alaşım kullanarak, ısıtım işlem uygulayarak ya da malzeme yüzeyini kaplayarak abrasif aşınma azaltılabilmektedir.

Abrasif aşınma mekanizmasında etkili olan temel faktörler, sertlik, aşındırıcı, tane veya pürüzün boyutu ve şekli, uygulanan normal yük ve kayma hızı olarak sayılabilir. Şekil 2.5'te abrasif aşınma mekanizması gösterilmektedir (Kahraman 2009).

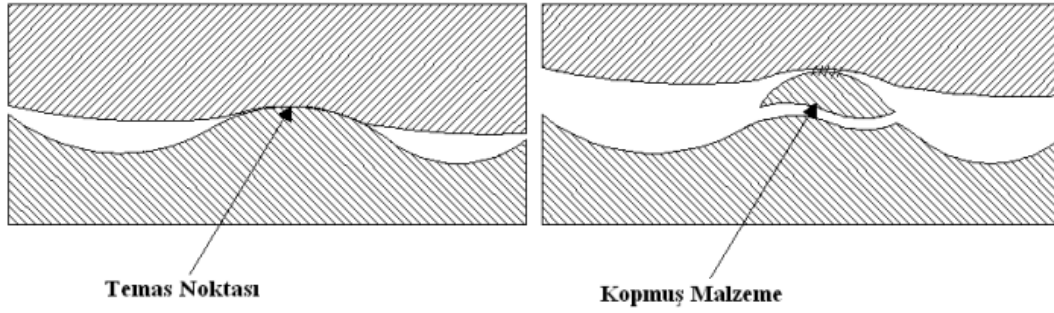


Şekil 2.5. Abrasif aşınma mekanizması (Kahraman 2009).

2.4.2 Adhesif Aşınma

Birbirine temas eden cisimlerin temas yüzeylerinin, bir normal kuvvet etkisi altında bağlı hareket yapmalarıyla meydana gelen bir aşınma türüdür. Bu yüzeyler ne kadar düzgün işlenip parlatılsa da asla pürüzsüz olmayacaktır. Temas halinde olan yüzeylerdeki

gerilmeler ufak basınçlarda dahi akma gerilmesi sınırına, erişirler veya geçerler. Bu durumda etkileşimdeki metaller arasında adhezyon kendini gösterir ve parçalar arasında malzeme transferi, soğuk kaynaklaşma ve partiküllerin kopması durumları gerçekleşir. Şekil 2.6’da adhesif aşınma mekanizması görülmektedir.

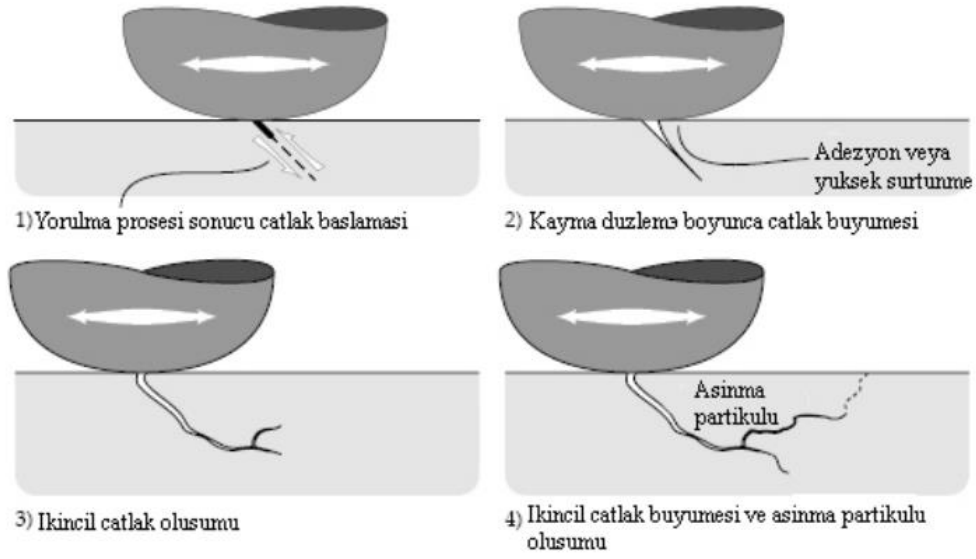


Şekil 2.6. Adhesif aşınma mekanizması (Kahraman 2009).

Adhesif aşınmanın azaltılmasında; farklı malzemelerden oluşan sürtünme çiftlerinin kullanılması, metal yüzeylerin birbirine temas eden yüzeylerinin yağlanması gibi uygulamaların faydalı olduğu görülmüştür (Toğuşlu 2011).

2.4.3 Yorulma Aşınması

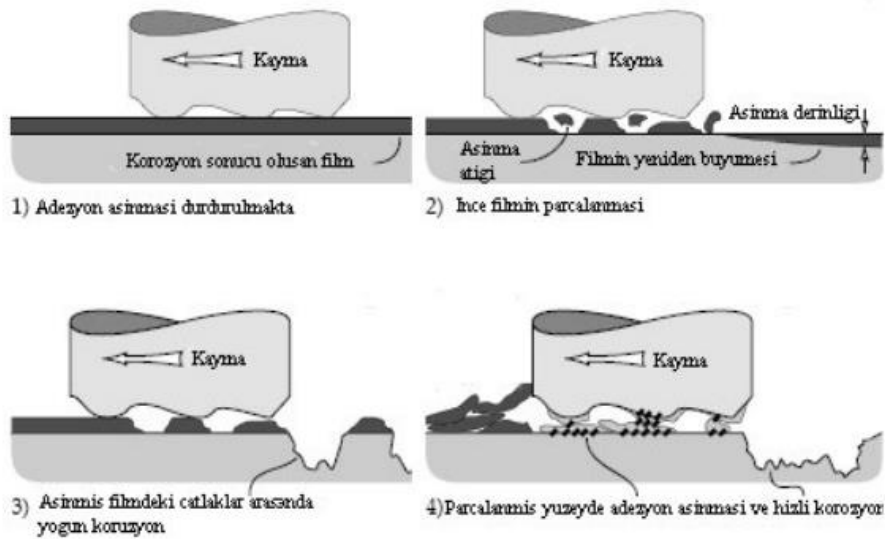
Cisimlerde hareketli yükler ve sarsılmalar sebebiyle zaman içerisinde yorulma gerçekleşir. Bilhassa, yüzeylerin aralıksız ve dinamik yükler altında bulunmaları, yüzeyin alt kısmında yorulma çatlaklarını meydana getirir. Bu mikro çatlaklar zaman içerisinde yüzeye doğru yol alarak, malzemenin yüzeyinden parçaların kopmasına yol açar. Genellikle makine dişlilerinde, rulmanlı yataklarda, demiryolu raylarında, soğuk veya sıcak haddeleme işlemlerinde görülmektedir. Şekil 2.7’de yüzey yorulmasında çatlağın oluşumu ve ilerlemesi gözlemlenmektedir (Kahraman 2009).



Şekil 2.7. Yüzey yorulmasında çatlağın oluşumu ve ilerlemesi (Kahraman 2009).

2.4.4 Korozyon Aşınması

Aşınma meydana gelen yüzeylerde ilaveten kimyasal tepkimeler sonucunda ortaya çıkan malzeme yitimine korozyon aşınma denir. Malzemelerde sadece kimyasal aşınma meydana gelmekle birlikte başka aşınma türleriyle de birlikte gerçekleşebilmektedir. Demir esaslı malzemelerde en sık karşılaşılan korozyon ise oksidasyondur. Şekil 2.8’de korozyon aşınmasının gerilimi gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Korozyon aşınmasının gelişimi (Toğuşlu 2011).

Korozyon filmi çoğu zaman iki numaralı görselde görüldüğü üzere kayma temasları neticesinde hızlıca kırılabilen oksit veya başka kırılabilir bileşikler içermektedir. Sonuç itibarıyla korozyon tabakası parçalanmakta ve meydana gelen aşınma kalıntılarının reaksiyonuyla ana malzeme yüzeyinde abrasif aşınma ortaya çıkar. Sonuncu evrede korozif tabaka bütünüyle yüzeyden kopar.

Çoğu zaman paketlenmiş bir şekilde uzun süre bekleyen makinelerin rulmanlı yataklarında ve mil-göbek gibi geçme olan yerlerinde, taşıma esnasında oluşan ufak sarsıntı ve titreşimler sürtünme oksidasyonunun oluşmasına neden olabilirler (Toğuşlu 2011).

Korozif aşınmayı engellemek adına malzemelerin yüzeylerine ısı işlem tatbik edilir ve oksidasyon önleyici özel yağlayıcılarla desteklenir (Kahraman 2009).

Arslan (2020), AISI 304 L çeliğini mikrodalga hibrit ısıtma ile 850 °C, 900 °C, 950 °C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle borladıktan sonra disk üzerindeki top (ball-on-disc) türü aşındırıcı ile 10 N yük altında 0,15 m/sn yağlayıcısız ortamda aşındırmıştır. 950 °C’de 4 saat borlanan numune $1,04656 \times 10^{-5}$ (mm³/J) en yüksek özgül aşınma dayanımına sahipken 850 °C’de 2 saat borlanan numunenin minimum özgül aşınma dayanımına $4,3288 \times 10^{-5}$ (mm³/J) sahip olduğu tespit edilmiştir. 900 °C’de 6 saat ve 950 °C’de 6 saat borlanan çeliklerde ise gevrek FeB fazı kalınlığının arttığı ve adhezyon dayanımını azalttığı görülmüştür. Borlanmış çeliklerde oksidatif ve abrazif aşınma hasarları gözlenmiştir.

Kayalı (2011), AISI 316 L östenitik paslanmaz çeliğini 800, 850 ve 900 °C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle kutu borlama yöntemiyle borlanmıştır. Aşınma deneylerini STM G-77 standardına göre kuru ve sıvı ortamlarda oda sıcaklığında 5 N yük altında 0,3 m/s kayma hızında 500 metre mesafede gerçekleştirmiştir. Borlama sıcaklığı ve süresinin yüzey pürüzlülüğü değerleriyle doğru orantılı olarak artıp azaldığı tespit edilmiştir. Borlanmamış numunelerin sulu ve kuru ortamdaki sürtünme katsayılarının borlandıktan sonra düştüğü gözlemlenmiştir.

Uçgun (2022), Hastelloy C-276 nikel esaslı süper alaşımını 975 °C’de 5 ve 7 saat süreyle

kutu borlama yöntemi ile borlamıştır. Aşınma testlerini kuru sürtünme koşullarında ASTM G-133 standardına göre 5, 10 ve 20 N yükler altında 5000 s süreyle 15 mm strok boyunda 60 mm/saniye hızla 300 m uzunluğunda gerçekleştirmiştir. Deney sonucunda işlemsiz numunelere kıyasla borlanmış numunelerin aşınma oranlarının düşük olduğu, aynı sıcaklıklarda borlama süresinin artmasıyla borür tabaka kalınlığının da arttığı gözlemlenmiştir. Ana malzemenin sürtünme katsayında azalma, aşınma direncinde ise iyileşme olduğu gözlemlenmiştir.

2.5 Korozyon

Korozyon, metallerin çevrenin kimyasal ve elektrokimyasal etkileri sonucunda yapılarında meydana gelen olumsuz değişiklikler olarak tanımlanabilir. Metal ve alaşımlarının gaz ortamda oksitlenmesi kimyasal korozyon, sulu çözeltiler içinde yükseltgenmesi elektrokimyasal korozyon olarak ifade edilmektedir (Kayalı 2011).

Bazı durumlarda korozyon yavaş gerçekleşebilmektedir. Zararlarının farkına varmak uzun zaman alacağından metal konstrüksiyonların dizaynında korozyonun etkilerinin farkına varılamamaktadır. Bu sebeple yatırım ve üretim maliyetlerinin artması söz konusudur.

Korozyonu önlemek ya da korozyondan korunmak için çevre şartlarına bağlı kalarak malzeme seçimi yapılmalı ve bu duruma uygun dizaynlar gerçekleştirilmelidir. Alaşım elementleri katma, ısıt işlem uygulama, katodik koruma, anodik koruma ve korozyon önleyicisi (inhibitör) kullanımı gibi yöntemlerle de korozyon hızı yavaşlatılabilmektedir (Çolak 2010).

2.5.1 Korozyon Çeşitleri

2.5.1.1 Üniform (Genel) Korozyon

Korozyonun metal yüzeyinin her noktasına aynı oranda etkisi sonucu meydana gelmesi sebebiyle homojen korozyon da denilmektedir. Homojen dağılım sebebiyle en fazla metal

kaybının yaşandığı türdür. Korozyon hızı diğer türlere göre daha yavaştır. Demirin paslanması, bakır rengindeki soluklaşma, nikel yüzeyinin sislenmesi, gümüşün kararması genel korozyon örnekleridir. Bu tür korozyon, yüzeyde kaba ve dalgalı bir görünüş oluşturur. Polisaj işlemiyle yüzeyde meydana gelen korozyon temizlenebilir (Çolak 2010).

2.5.1.2 Galvanik Korozyon

Bakır ve paslanmaz çelik gibi iki farklı metal ya da alaşım aynı ortamda bulunduklarında aralarında meydana gelen potansiyel fark sonucu oluşan korozyondur. Bu tip korozyonun oluşumunu engellemek için farklı özellikteki metallerin aralarında elektron geçişini durdurmak amacıyla ipek bant, amyant, macun gibi izolatör görevi görececek malzemeler kullanılmalıdır (Kayalı 2011).

2.5.1.3 Çukur (Pitting) Korozyonu

Metal yüzeylerinde çukur şeklinde meydana gelen korozyon türüdür. Alüminyum ve magnezyum alaşımlarında çok görülen bir korozyon çeşididir. İlk başlarda yüzeyde toplanan ve kabaran gri toz şeklindeki yığıntılar temizlendikten sonra küçük boşluklar ve oyuklar ortaya çıkar. Başlangıçta küçük olan çukurlar zamanla büyür, derinleşir ve metal delinir. Metal kaybı az olsa da en tehlikeli korozyon türüdür. Çukur korozyonu oyukları parça kalınlığı uygun ise kazınarak temizlenebilir (Kayalı 2011).

2.5.1.4 Seçimli Korozyon

Alaşımlarda yer alan bir metalin ya da elementin çözünmesine yol açan korozyon türüne seçimli korozyon denir. En çok pirinç alaşımında rastlanır ve alaşım içerisinde bulunan çinkonun bakırdan önce korozyona uğrayarak alaşımdan uzaklaşmasına sebep olur. Pirinçten çinkonun uzaklaşması sonucu alaşımda kalan bakır metali gözenekli bir yapıda kalır ve başlangıçtaki pirinç alaşımının mekanik dayanımından çok düşük bir hale geçer (İnt.Kyn.4).

2.5.1.5 Erozyon Korozyonu

Erozyon korozyonu, metal yüzeyler ve koroziv sıvılar arasındaki nispi hareket nedeniyle mekanik aşınmadan kaynaklanır. Bu durumda hızlı hareket eden akışkanların aşınmasıyla metalin yüzeyi kademeli olarak bozulur ve boşluklar oluşur. Bu tür korozyon genelde boru malzemelerle gaz ve sıvıların iletilmesi için kurulan tesisatlarda, boru hatları, pompa gövdesi ve kanatları, valflar ve valf yuvaları, kazan ve kondenser boruları, türbin kanatları gibi donanımlarda görülmektedir. Akışkan maddenin türü ve hızı erozyonlu korozyonun hızını büyük ölçüde etkilemektedir. Bu sebeple akışkan hızı azaltılarak, sıvıda çökeltme yapılarak veya metal katodik korunarak büyük oranda engellenebilir (Kayalı 2011, İnt.Kyn.5).

Efe (2022), 8620 çeliğini 700 °C’de 4, 8, 12, 16 saat 900 ve 950 °C’de 2, 4, 6, 8 saat süreyle kutu borlama yöntemi ile borlamış, korozyon direncini belirlemek için ASTM G31-72 standardında ağırlık kaybı yöntemi kullanarak test yapmıştır. Numuneler % 10 sülfürik asit % 90 saf su içeren 56 °C sıcaklıktaki çözeltiye daldırılmış ve bir süre bekletilmiştir. 700 °C’de borlanan numunelerin korozyon testinde en az malzeme kaybının 16 saat borlanan numunede olduğunu gözlemlemiştir. Bu sıcaklıkta borlanan numunelerin korozyon direncinin borlanmamış numunelere nazaran daha düşük olduğu tespit edilmiştir. 900 ve 950 °C’de borlanan numunelerde ise 8 saat borlama süresinde en az malzeme kaybı olduğunu gözlemlemiştir. 900 ve 950 °C sıcaklıkta borlama işlemi yapılan numunelerin korozyon dirençlerinin işlemsiz numunelerden yüksek olduğunu tespit etmiştir.

Bozkurt (2022), 4340 ıslah çeliğini 850, 950 ve 1050 °C sıcaklıklarda 6, 8, 10 saat süreyle kutu borlama yöntemiyle borlama işlemi gerçekleştirmiştir. Korozyon deneyi potansiyodinamik polarizasyon testleri ağırlıkça % 3,5 NaCl ortamında gerçekleştirilmiştir. Korozyon hızlarını 850 °C’de 0,097, 950 °C’de 0,127 ve 1050 °C’de ise 0,563 olarak gözlemlemiştir. Sabit sıcaklıkta borlama sıcaklığının artmasının korozyon hızını artırdığını, düşük sıcaklıkta borlama işleminin korozyon direncine daha olumlu etki ettiğini tespit etmiştir.

2.5.2 Korozyon Hızı Ölçme Yöntemleri

Korozyon, metal malzemelerin bulunduğu ortamla reaksiyonları sonucu doğal olarak meydana gelen ve malzemelerde istenmeyen değişikliklere sebep olan bir olaydır. Korozyonu önlemek ya da yavaşlatmak, korozyon hızına ve korozyon çeşidine bağlı olmakla birlikte bu durumu etkileyen birden fazla unsur vardır. Metalin bulunduğu ortamdaki çözünme miktarı olarak adlandırılan korozyon hızı, metalik malzemelerin korozyon dayanımlarında önemli rol oynamaktadır. Korozyon hızını ölçmek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Elektrokimyasal yöntemlerle korozyon hızı en kısa sürede ölçülebilmekte ve korozyon hızı bu yöntemde akım yoğunluğu olarak verilmektedir. Korozyon hızını belirlemede kullanılan başlıca yöntemler; kütle kaybı, Tafel ekstrapolasyon, lineer polarizasyon ve elektrokimyasal empedans spektroskopidir (Kayalı 2011, İnt.Kyn.6).

2.5.2.1 Kütle Kaybı Yöntemi

Bu yöntemde kütle kaybı için hazırlanan numuneler korozif ortama bırakılmadan önce tartılır. Belirli bir süre korozif ortamda bekletilen numuneler çıkarılıp üzerindeki birikintiler temizlendikten sonra tartma işlemi tekrar yapılır. Korozyon hızı kütle kaybı, numunelerin başlangıçtaki yüzey alanı ve korozyon süresi göz önünde bulundurularak Eşitlik 2.1’de ki denklemle hesaplanır.

$$V = \frac{(m_1 - m_2)}{S \cdot t} \quad (2.1)$$

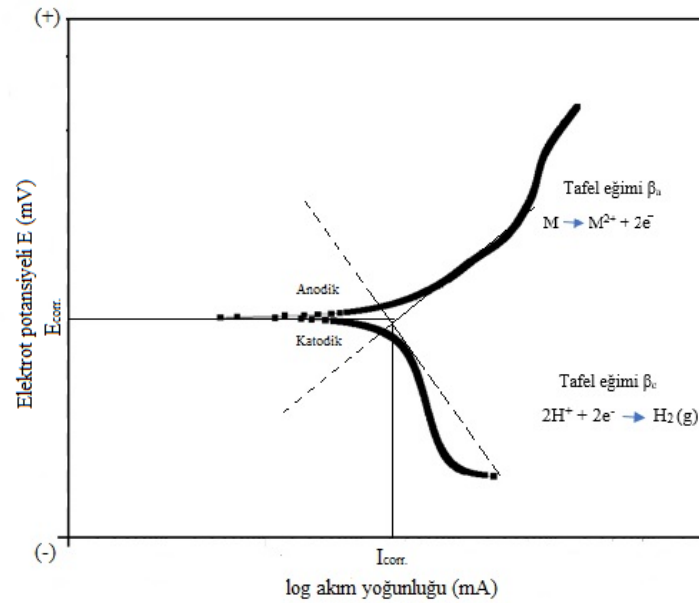
Korozyon hızı aşağıdaki şekilde de ifade edilebilmektedir (Çetin 2007). Burada V korozyon hızı ($\text{mg.cm}^{-2}.\text{saat}^{-1}$), m_1 numunenin korozyondan önceki kütlesi (mg), m_2 numunenin korozyondan sonraki kütlesi (mg), S numunenin toplam yüzey alanı (cm^2), t korozyon süresidir.

Kütle kaybı yöntemi yapılış açısından basit ve bazı kolaylıklara sahip olsa da deney süresinin uzun olması, korozyon hızının yüksek olduğu durumlarda güvenilir sonuçlara

ulaşma zorluğu açısından dezavantaja da sahiptir (Kayalı 2011).

2.5.2.2 Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi

Tafel ekstrapolasyon yönteminin kullanımı diğer yöntemlere göre daha kolay olduğundan endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yöntemle çok düşük korozyon hızlarını tespit etmek ve kontrol altında tutmak mümkündür. Korozyona uğrayan metal için anodik ve katodik Tafel eğrilerinin deneysel tespitinden sonra eğrilerin çizgisel bölgelerinin korozyon potansiyeline ekstrapole edilmesiyle korozyon hızı, aynı zamanda korozyon akımı tespit edilir. Tafel yöntemi ile çizilen “yarı logaritmik akım yoğunluğu – potansiyel” grafiğindeki eğrilerin yardımıyla korozyon potansiyeli ve korozyon akım değerleri bulunur (Gerengi 2008). Şekil 2.9’da bu değerlerin nasıl bulunduğu gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle korozyon akımı (I_{kor}) ve korozyon potansiyelinin (E_{kor}) bulunması (işlemsiz 8620).

Tafel ekstrapolasyon yönteminde çok düşük korozyon hızlarının tespit edilmesi mümkündür. Tafel eğrileri yardımıyla korozyon hızı ve akımı diğer yöntemlere göre daha kısa sürede bulunabilmektedir. İdeal koşullarda bu yöntemle elde edilen değerlerin doğruluğu geleneksel kütle kaybı yöntemiyle elde edilen değerlere eşit değerdedir.

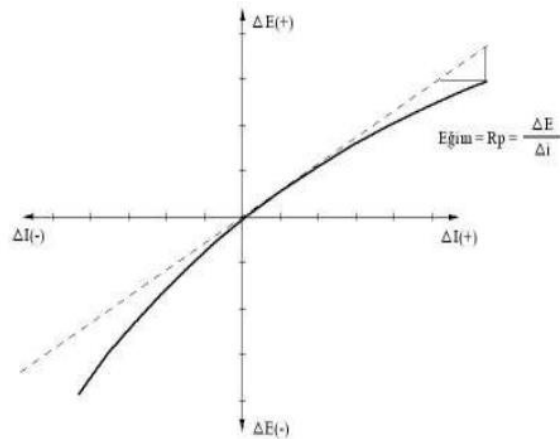
Belirtilen bu durumlar Tafel ekstrapolasyon yönteminin avantajları olarak sayılabilir (Gerengi 2008).

2.5.2.3 Lineer Polarizasyon Yöntemi

Galvanostatik veya potansiyostatik polarizasyon nedeniyle korozyona uğrayan metalin potansiyeli korozyon potansiyelinden (E_{kor}) farklıysa, potansiyel E başlangıçta akım yoğunluğunun doğrusal bir fonksiyonudur. Bu doğrusal ilişki 10 mV'luk potansiyel değişimi için geçerlidir. Lineer polarizasyon eğrisinin eğimine ($\Delta E/\Delta I$), polarizasyon direnci (R_p) adı verilir. Polarizasyon direnci, korozyon akım yoğunluğu cinsinden ifade edilen korozyon hızıyla ters orantılıdır (Çetin 2007).

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,303 (\beta_a + \beta_c)} \times \left[\frac{\Delta I}{\Delta E} \right] = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,303 (\beta_a + \beta_c)} \times \left[\frac{1}{R_p} \right] = \frac{B}{R_p} \quad (2.2)$$

Yukarıdaki Stern-Geary eşitliğinde I_{kor} korozyon akımını, β_a ve β_c ise anodik ve katodik Tafel eğrilerini ifade etmektedir. Polarizasyon direncinin ölçümü metalin anlık korozyon hızıdır. Bu onu tanımlamanın kolay bir yoludur. B sabiti, kütle kaybı ölçümlerinden veya elektrokimyasal verilerden belirlenebilir. Anot ve katot Tafel eğimleri β_a , β_c ve R_p belirlenerek korozyon hızı hesaplanabilir (Çetin 2007). Şekil 2.10'da Lineer polarizasyon yöntemiyle polarizasyon direncinin (R_p) bulunması gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Lineer polarizasyon yöntemiyle polarizasyon direnci (R_p) bulunması (Gerengi 2008).

Korozyon potansiyeli 10 mV'a kadar olan durumlarda kullanımı uygundur. Bu değerden yukarı çıkıldığında polarizasyon eğrisindeki doğrusallıktan sapmalar meydana gelmektedir. Lineer polarizasyon yöntemi daha uzun sürece sahip (kütle kaybı yöntemi) yöntemlere göre daha kısa sürede sonuç verir. Uygulanan potansiyel sisteme daha az zarar verdiğinden birden fazla ölçüm hızlı bir şekilde yapılabilir. Düşük korozyon hızına sahip (0.1 mpy değerinden daha küçük) malzemelerin korozyon hızını daha doğru ölçmede kullanılabilir. Kütle kaybı yöntemiyle ölçülemeyen küçük parçaların korozyon değerlerini lineer polarizasyon yöntemiyle ölçebiliriz (Gerengi 2008).

2.5.2.4 Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi Yöntemi

Bu yöntem korozyon hızı ölçümlerinde 30 yıldır başarıyla kullanılmaktadır. Sistemin elektrokimyasal yapısı hakkında geniş bilgi sağladığı için hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. DC güç kaynağıyla yapılan ölçümlerle karşılaştırıldığında elektrotlar üzerinde çok az etkisi vardır. Bu nedenle daha güvenilir bilgi sağlar. Ayrıca yüksek dirençli ortamlarda ölçüm yapılmasının diğer yöntemlere göre avantajları bulunmaktadır (Gerengi 2008, Kayalı 2011).

Elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) aynı zamanda DC polarizasyon ölçümlerine bir frekans boyutu da katar. Korozyona uğramış elektrota küçük, değişken, sinüzoidal, doğrusala yakın kontrollü bir potansiyel sinyali gönderilir.

Korozyon direnci daha yüksek boyalı ve kaplanmış yüzeylerin dirençlerini bulmakta daha iyi sonuçlar verir. Doğru akım yöntemlerine göre malzeme çok daha az zarar görür. Korozyon süreci esnasında malzeme üzerinde oluşacak muhtemel film tabaksı hakkında detaylı bilgiler vermesi yöntemin avantajları olarak sayılabilir (Gerengi 2008).

3. MATERYAL ve METOT

Bu bölümde deney çalışmalarında kullanılan materyal, cihazlar ve yöntemler hakkında bilgiler verilmiştir.

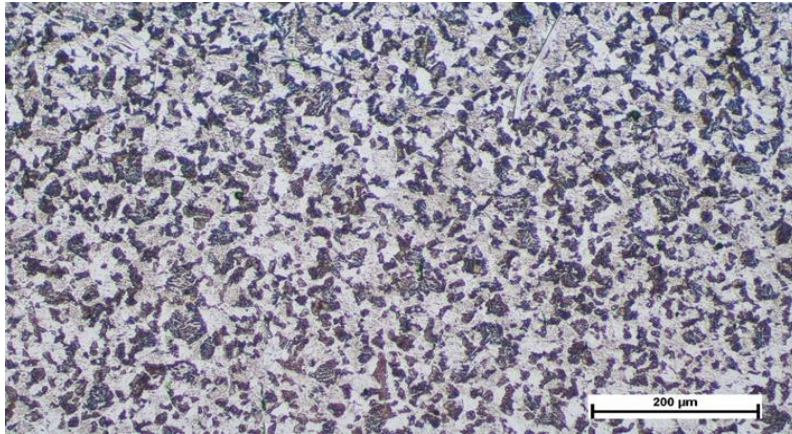
3.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzeme

Bu çalışmada Ø20x15 mm ebatında AISI 8620 sementasyon çeliği kullanılmıştır. AISI 8620 sementasyon çeliğinin satın alma durumundaki kimyasal analizi Çizelge 3.1’de, verilmiştir.

Çizelge 3.1. AISI 8620 sementasyon çeliği kimyasal analizi

Çelik Türü	Kimyasal Bileşim							
	(% Ağırlıkça)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
AISI 8620	0.20	0.21	0.83	0.008	0.009	0.56	0.46	0.180

AISI 8620 çeliğinin satın alınma durumundaki mikro yapısı Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

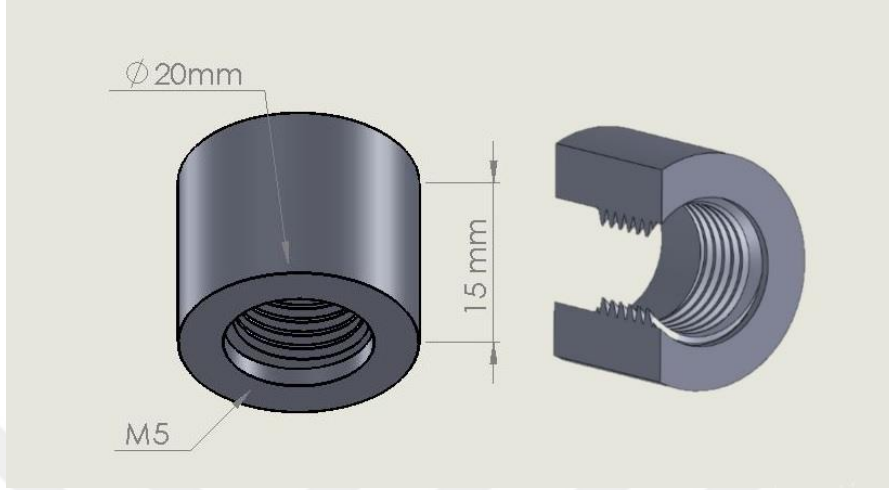


Şekil 3.1. AISI 8620 sementasyon çeliği satın alma durumundaki mikro yapısı

3.1.1 Deney Numuneleri

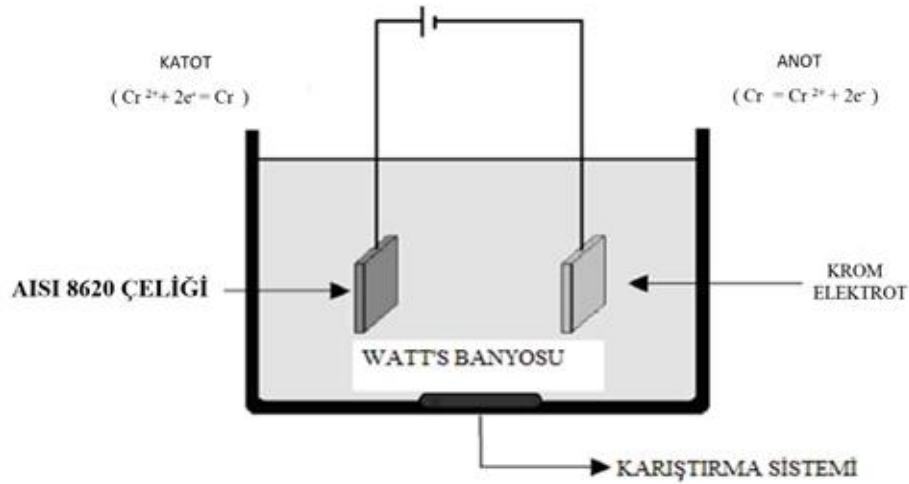
Şekil 3.2’de çalışmalarda kullanılan AISI 8620 çeliği numuneleri 20 mm çapında 15

mm'lik ölçülerde kesilerek borlama ve krom kaplama işlemleri için hazır hale getirilmiştir.



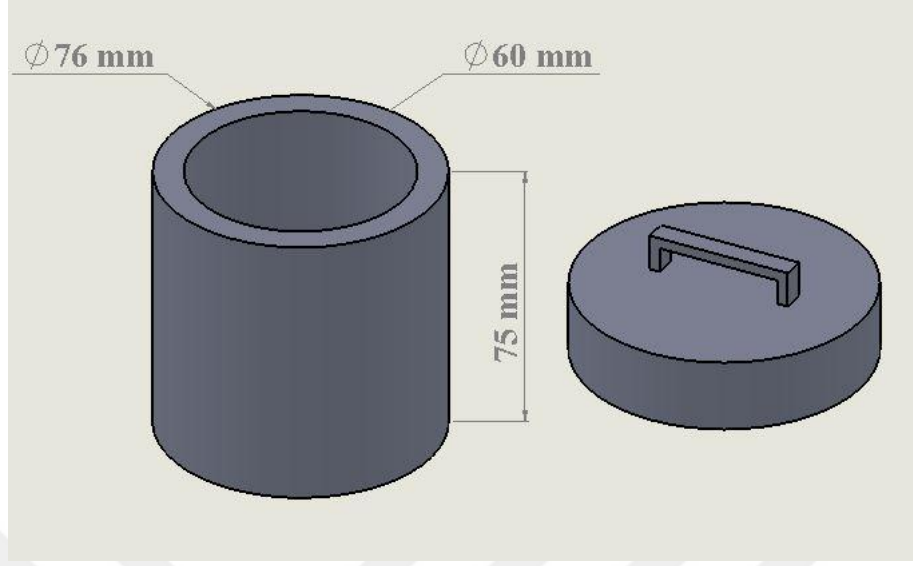
Şekil 3.2. Deneyler için hazırlanan AISI 8620 sementasyon çeliği numune

Bu çalışmada krom kaplama için Şekil 3.3'te gösterilen elektrokimyasal Watt's banyosu kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Elektrokimyasal Cr kaplama ünitesi

Borlama işlemi Şekil 3.4'te görülen AISI 316 paslanmaz çeliğinden üretilen potada gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4. Borlama işleminde kullanılan AISI 316L paslanmaz çelik potanın geometrik şekli ve boyutları.

3.1.2 Krom Kaplama İşlemi

Bu işlem esnasında kaplama için kromik asit çözeltisinin ($H_2Cr_2O_7$) aşındırıcı etkisinden çok etkilenmeyen PVC kaplı tanklar kullanılmıştır. Çalışma elektrodunun yüzeyindeki pasif filmi uzaklaştırmak için her bir kaplamadan önce çalışma elektrotları 1200'lük zımpara kağıdı ile parlatılmıştır. 1/1 etanol aseton karışımı ile yıkanıp, bidistile su ile yıkanarak devamında kurutulmuştur. Daha sonra numuneler bekletilmeden Watt's banyosuna daldırılarak krom kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Anot olarak fazlaca kullanılan, çözünmeyen anot tipi krom elektrot tercih edilmiştir. % 100 verimde çözünen krom elementi ve daha düşük katot verimiyle kaplandığından her zaman çözünemeyen anotlar kullanılarak kaplama işlemi gerçekleştirilir.

Krom kaplama banyoları genellikle iki ana bileşen kullanılarak oluşturulur. Krom kaplamayı sağlayan krom tuzu ve katalizör, krom kaplama banyosunun hazırlanması için yeterli olmaktadır. Krom tuzu olarak kromik asit kullanılmıştır (CrO_3).

Katalizör olarak ta çok az miktarda sülfürik asit kullanılmıştır. Sert krom kaplama

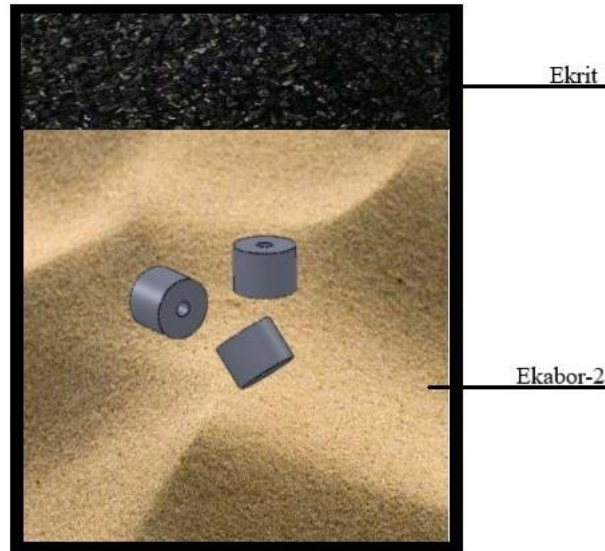
banyoları genellikle 6 değerlikli krom kullanılarak oluşturulur. Bununla birlikte, çoğu dekoratif uygulamada, 6 değerlikli kromun yanı sıra ticari olarak kullanılmaya başlanan 3 değerlikli krom kaplama banyoları da tercih edilmektedir. Çizelge 3.2’de banyo kurulum ve çalışma şartları verilmiştir.

Çizelge 3.2. Banyo kurulum ve çalışma şartları.

	Dekoratif Krom	Sert Krom
Kromik Asit (g.L^{-1})	200-300	200-350
Sülfürik Asit/Kromik Asit (a.a^{-1})	%0.4-0.6	%1.1-1.4
Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	35-45	50-60
Katodik Akım Yoğunluğu (A.dm^{-2})	10-20	10-100
Anodik Akım Yoğunluğu (A.dm^{-2})	10-20	5-30

3.1.3 Borlama İşlemi

Borlama işleminde Şekil 3.5’te görülen kutu borlama yöntemi kullanılmıştır. Çelik pota içerisine Ekabor-2 tozu dökülerek numuneler bu tozun içerisine yerleştirilmiştir. Üzerlerini 5-6 mm kapatacak şekilde Ekrit tozu ilave edilerek pota kapağı kapatılmıştır.



Şekil 3.5. Borlama işleminin yapılış yönteminin şematik gösterimi.

Fırın içerisine konulan potanın 850 °C’de 3 saat 900 °C’de 1 saat ve 900 °C’de 3 saat sürelerinde bekletilerek borlama işlemi yapılmıştır. Hemen ardından fırından çıkarılan numunelerin oda sıcaklığında soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Numunelere yapılan uygulamalar Çizelge 3.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. AISI 8620 çeliğine yapılan borlama işlemleri

Yapılan işlemler	Kısaltmalar
850 °C 1 saat borlama	850 1 h
900 °C 1 saat borlama	900 1 h
900 °C 3 saat borlama	900 3 h

3.2 Metalografik Çalışmalar

Elektrokimyasal yöntemle krom kaplanan ve ardından borlama işlemine tabi tutulan parçalar hassas kesme cihazında kesilerek sıcak bakalite alma cihazıyla kalıp haline getirilmiştir. Metalografik incelemeler için hazırlanan parçalar Resim 3.1’de görülen cihazda, sıralı olarak 120’den başlamak suretiyle 1200 numaralı zımparaya kadar zımparalanmıştır. Parlatma işleminde 3µm’lik elmas pasta kullanılmıştır. Parlatılan yüzeyler %3 lük nital ile dağlanarak malzemenin yapısal özellikleri ortaya çıkarılmıştır.



Resim 3.1. Zımpara ve parlatma makinesi.

Yapısal özellikler, Resim 3.2’de ki optik mikroskop ve SEM mikroskobu ile incelenerek görüntüleri alınmıştır. Tabaka kalınlık değerleri mevcut optik mikroskoba takılan optik mikrometre sayesinde ölçülerek tespit edilmiştir. Tabaka kalınlığı, deney numunesinin yüzeyinden yapılan en az on beş ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Aşınma testleri bilye-disk cihazında sabit 10 N yük altında yaklaşık 0,3 m/s kayma hızında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Aşınma hızı, Perthometer M2 marka pürüzlülük cihazından elde edilen aşınma profili kullanılarak hesaplanmıştır.



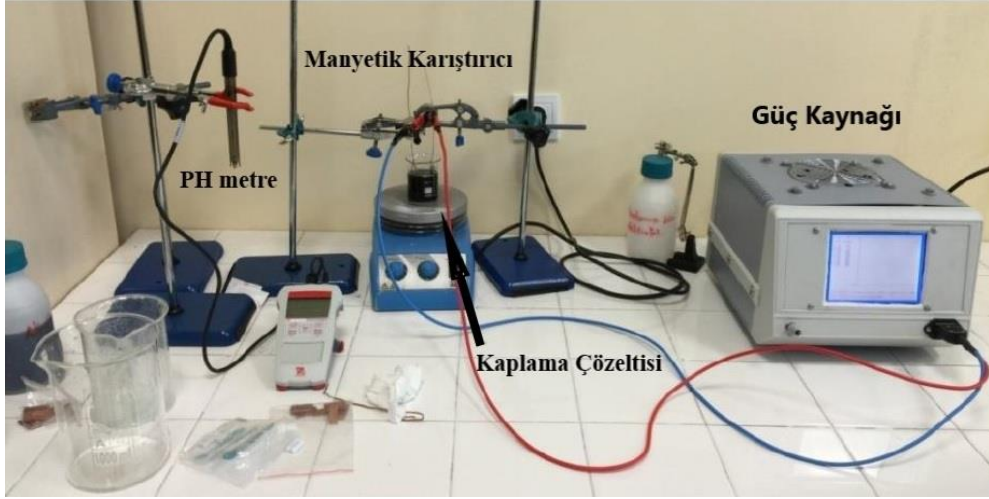
Resim 3.2. Mikroyapı görüntüleri için kullanılan optik mikroskop.

3.3 Deneylerde Kullanılan Cihazlar ve Yöntem

Deney aşamasında kullanılan cihazlar ve özellikleri şu şekilde sıralanmıştır:

3.3.1 Sert Krom Kaplama

Bu işlem esnasında PVC kaplı tanklar kullanılmıştır. Anot olarak saf krom anot tercih edilmiştir. Krom tuzu olarak kromik asit kullanılmıştır (CrO_3). Resim 3.3’te işlemin yapıldığı düzenek verilmiştir.



Resim 3.3. Elektrokimyasal krom kaplama düzeneği

3.3.2 Borlama Fırını

Bu çalışmada borlama işlemi için atmosferik şartlara açık hassasiyeti ± 1 °C olan tel rezistanslı kuyu fırını kullanılmıştır. Borlamanın yapıldığı fırın Resim 3.4'te görülmektedir.



Resim 3.4. Borlama işleminde kullanılan kuyu fırının fotoğrafı.

3.3.3 Hassas Kesme Cihazı

Kaplama ve borlama işlemine tabi olan AISI 8620 çelik numuneler ortalama 12-16 saatlik

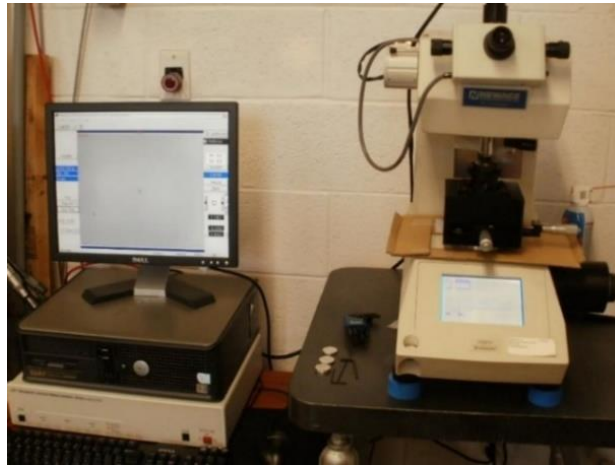
düşük devir ve hızda STRUERS Minitom marka yüksek hassasiyetli, ısı deformasyonuna karşı koruma sağlayan hassas kesme cihazında elmas kaplı disk ile kesilmiştir. Resim 3.5'te hassas kesme cihazı görülmektedir.



Resim 3.5. Hassas kesme cihazı

3.3.4 Mikrosertlik Cihazı

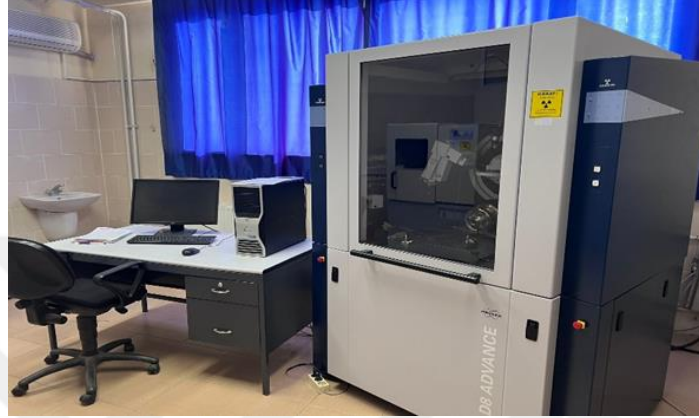
Kaplama ve borlama işlemine tabi olan AISI 8620 çelik numunelerin sertlik ölçümleri Resim 3.6'da görülen SHIMADZU HMV-2 model sertlik cihazı ile yüzeyden 50 g yük altında, Vickers uç kullanılarak 15 s bekleme süresi ile yapılmıştır. Numunelerin yüzeyinden alınan 15 ölçümün tepe ve dip değerleri atılarak ara değerlerin ortalamaları neticesinde sertlik değerleri tespit edilmiştir.



Resim 3.6. Mikrosertlik cihazı

3.3.5 X-Işınları Difraksiyonu (XRD) Analiz Cihazı

Kaplama ve borlama işlemine tabi olan AISI 8620 çeliklerin X-ışınları analizleri $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılan Resim 3.7’de görülen Bruker Marka D 8 Advance marka X-ışınları Difraktometresin de 20-90 derece arasında gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.7. X-Işınları Analiz Cihazı.

3.3.6 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Kaplama ve borlama işlemine tabi olan AISI 8620 çelik numunelerin mikro yapı analizleri Resim 3.8’de görülen Nova Nanosem 650 marka taramalı elektron mikroskobunda yapılmıştır.



Resim 3.8. Taramalı elektron mikroskobu.

3.3.7 Elektrokimyasal Korozyon Deneyleri

Kaplama ve borlama işlemine tabi olan AISI 8620 çelik numuneler deney öncesinde 25 °C’de her birinde 15 dakika olmak üzere sırasıyla aseton, etanol ve çift distile edilmiş su ile ultrasonik olarak temizlenerek etüvde 40 °C’de 1 saat süreyle kurutulmuştur. Gamry reference 600 potansiyostat/galvanostat/ZRA ve echem analyst soft programı ile elektrokimyasal korozyon deneyleri gerçekleştirilmiştir (Resim 3.9).



Resim 3.9. Korozyon deneyinde kullanılan cihazlar ve deney düzeneği fotoğrafı.

Tafel eğrilerinden korozyon akımı (I_{kor}), korozyon hızı, polarizasyon direnci (R_p) ve korozyon potansiyeli (E_{kor}) değerleri tespit edilmiştir. Daha sonra korozyon akımının yüzey alanına bölünmesiyle korozyon akım yoğunluğu (i_{kor}) elde edilmiştir. Korozyon deneyleri için en az 3 deney yapılmış ve aritmetik ortalamaları alınmıştır. Eşitlik 3.1’de ki bağıntı kullanılarak % kaplama verimliliği hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Kplama verimliliği} = \frac{I_{kor} (\text{işlemsiz}) - I_{kor} (\text{kaplanmış})}{I_{kor} (\text{işlemsiz})} \times 100 \quad (3.1)$$

3.3.8 Aşınma Deneyi

Kaplama ve borlama işlemine tabi olan AISI 8620 çelikler bilye-disk sisteminde kuru ortamda aşınma deneyine tabi tutulmuştur. 8 mm çapındaki WC-Co bilyeye karşı aşındırılan numuneler, 20 mm çapına sahiptir. Deneyler, oda sıcaklığında, sabit bir kayma

hızıyla (yaklaşık 0,3 m/s) ve 10 N yük altında gerçekleştirilmiştir. Aşınma hacmi, Rugosimeter marka pürüzlülük cihazıyla belirlenmiştir. Eşitlik 3.2’de ki bağıntı kullanılarak Aşınma hızları hesaplanmıştır. 3 kez tekrar edilen deneylerin ortalaması alınarak sonuca ulaşılmıştır. Resim 3.10’da aşınma deneylerinde kullanılan cihaz görülmektedir.

$$\text{Aşınma hızı} = \frac{\text{Aşınan hacim miktarı (mm}^3\text{)}}{\text{Uygulan yük} \cdot \text{Kayma mesafesi (J)}} \quad (3.2)$$

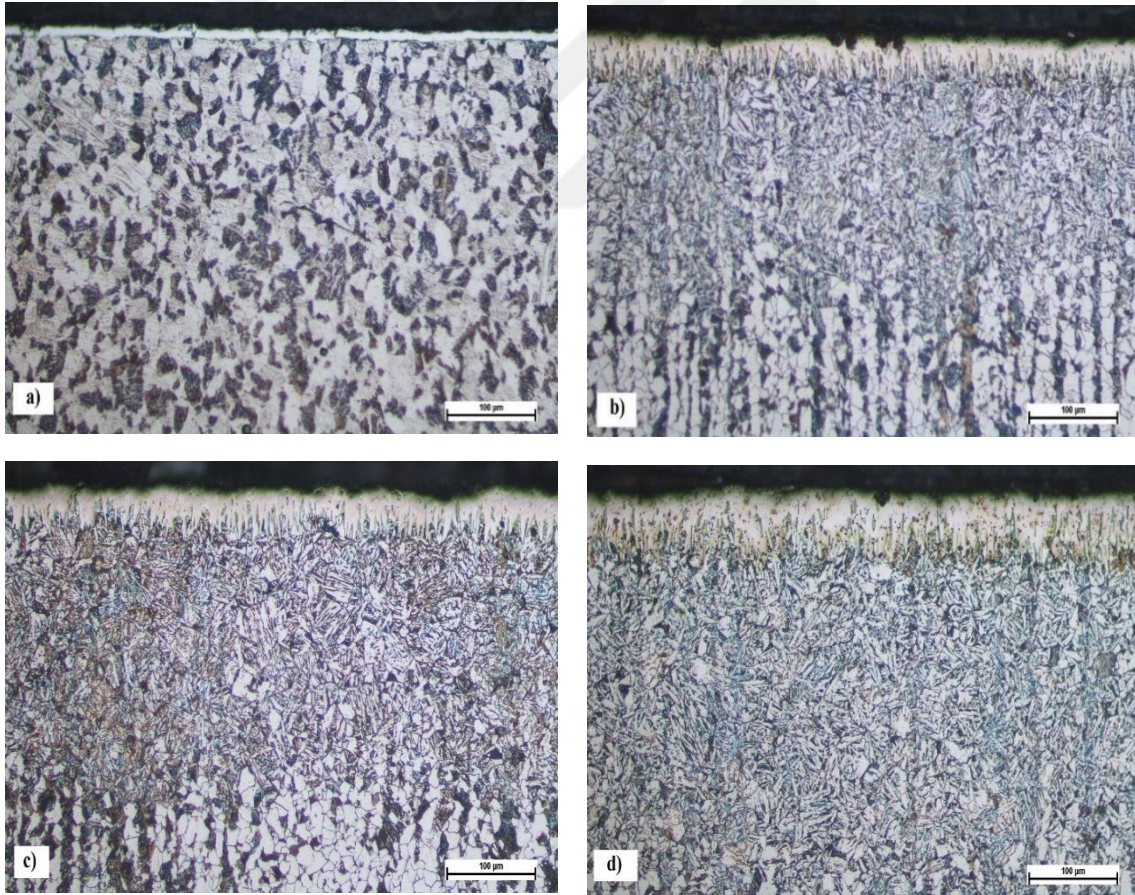


Resim 3.10. Aşınma deneyinde kullanılan cihaz

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELENMESİ

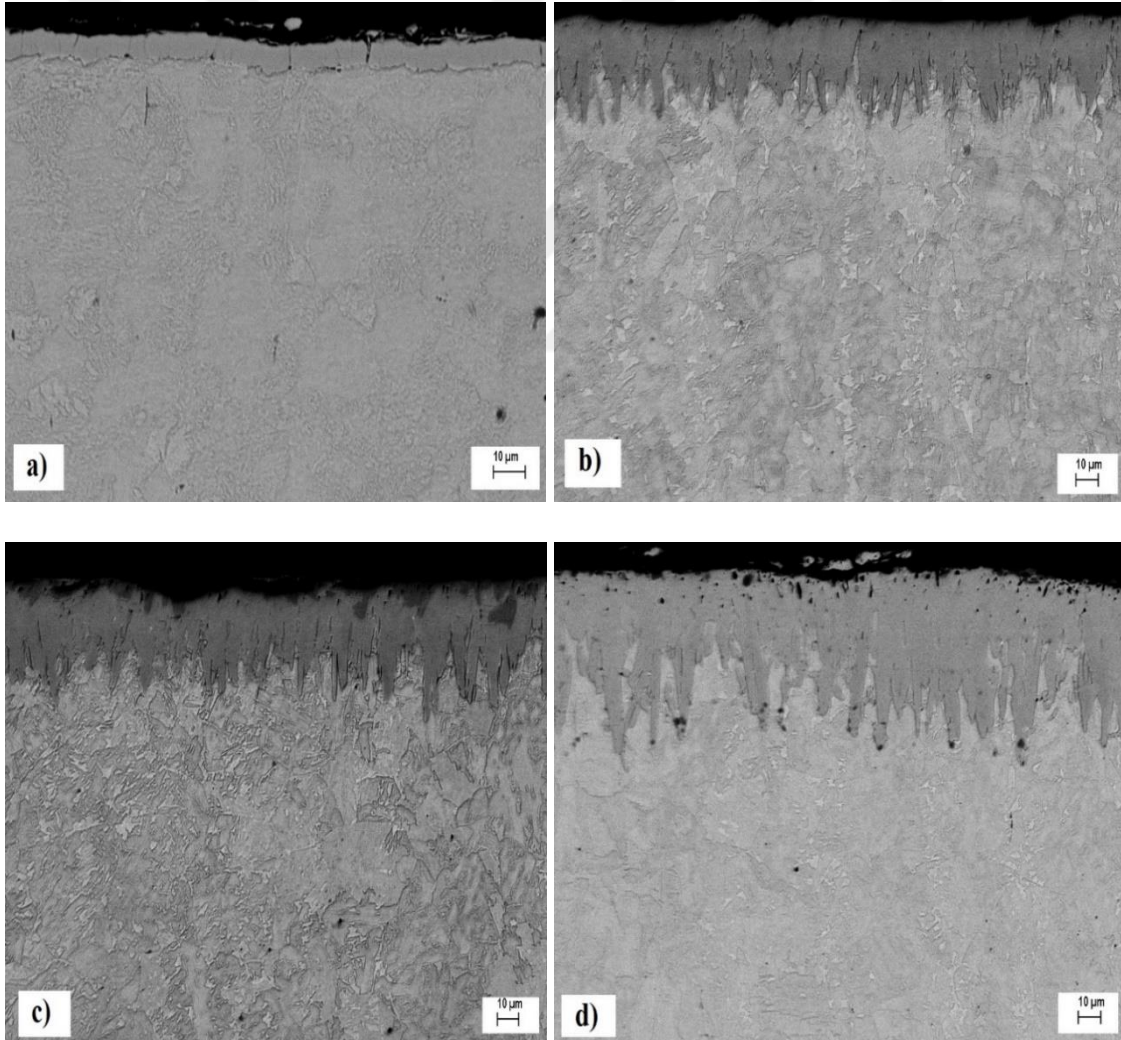
4.1 Mikroyapı Özellikleri

Şekil 4.1 ve 4.2’de AISI 8620 çeliğinin krom kaplanmış ve çeşitli sıcaklık ve sürelerde borlanmış durumdaki optik ve SEM mikro yapı resimleri verilmiştir. Krom kaplanmış numunenin yüzeyinde düz ve homojen bir krom tabakası görülmektedir. AISI 8620 borlanmış numunelerde testere dişi bir borür tabakası elde edilmiştir (Özbek vd. 2004, Çelikyürek vd. 2006, Kayalı ve Taktak 2015). Borlama sıcaklığı ve süresiyle bağlantılı şekilde tabaka kalınlığı artmıştır. Borür tabakası homojendir. AISI 8620 çeliğinin kimyasal bileşimine bağlı olarak elde edilen borür tabakasının kalınlığı diğer alaşımsız çeliklere nazaran daha azdır (Kayalı ve Kara 2021, Milinovic vd. 2022, Kayalı ve Kenar 2023).



Şekil 4.1 AISI 8620 çeliğinin a) Cr kaplanmış, b) 850 °C 3h, c) 900 °C 1h, d) 900 °C 3h numunelerin optik resimleri.

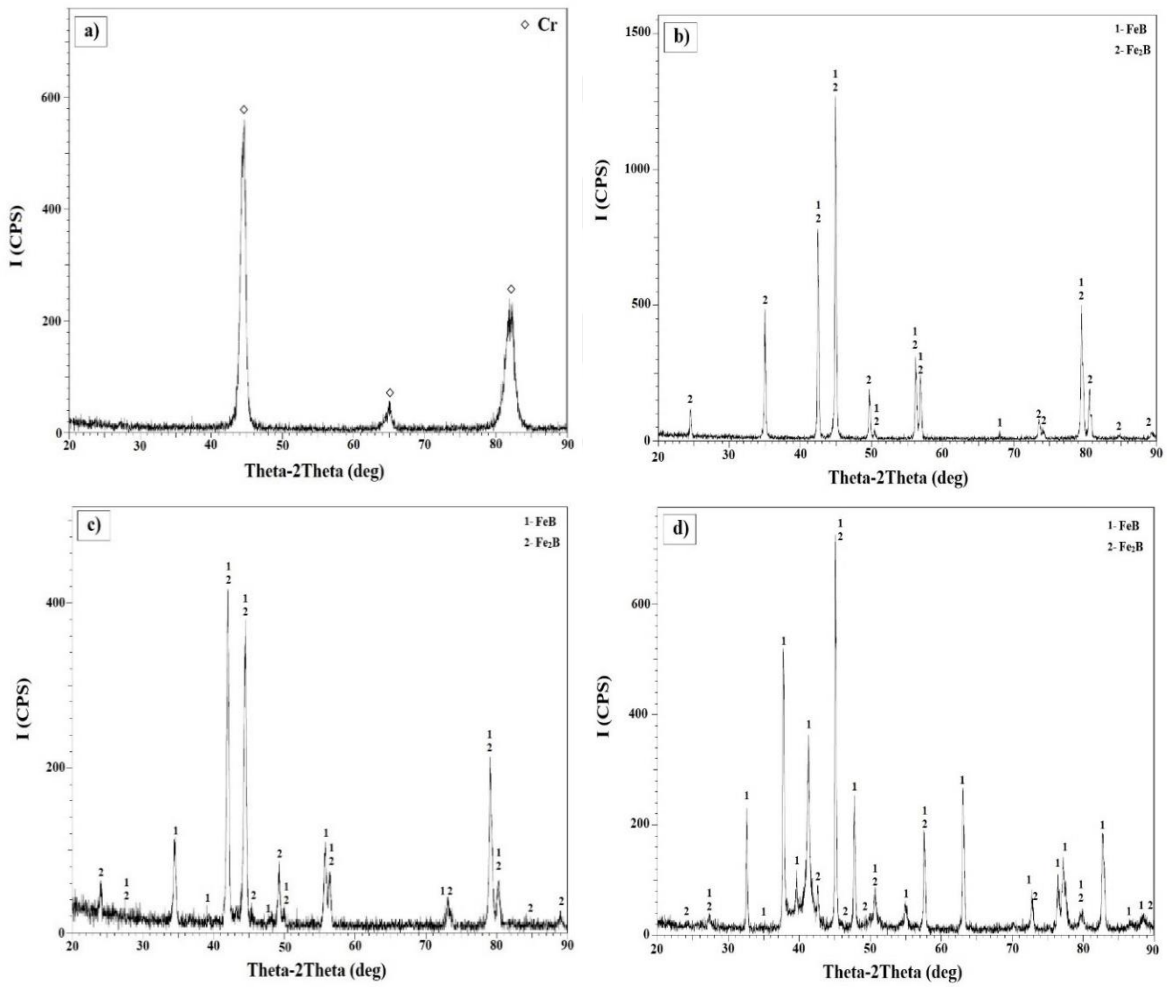
900 °C’de 1 saat borlanmış numunenin 850 °C’de borlanmış numuneye göre borlanmış tabaka kalınlığı daha yüksek olmasına karşın, çelik yapısının incelmeye başladığı derinlik hemen hemen 850 °C’de borlanmış numuneninkiyle aynıdır. 900 °C’de 3 saat borlanmış numunede ise borlama süresinin artmasıyla beraber borlanmış tabaka kalınlığında kayda değer bir artış gözlenmiş ve 60 µm derinliğe kadar çeliğin tüm içyapısının incelendiği görülmüştür (Şekil 4.2). Bu olayın gerçekleşmesi tabakanın büyümesi esnasında karbon ve alaşım elementlerinin tabakanın altına itilerek difüzyon bölgesinde bir bariyer oluşturmasıdır. Bu bariyer borun difüzyonunu engelleyerek daha ince ve daha az dışlı katmanların oluşmasına sebep olmaktadır (Milinovic vd. 2022).



Şekil 4.2 AISI 8620 çeliğinin a) Cr kaplanmış, b) 850 °C 3h, c) 900 °C 1h, d) 900 °C 3h numunelerin SEM resimleri.

4.2 X-ışını Difraktometresi Analizleri

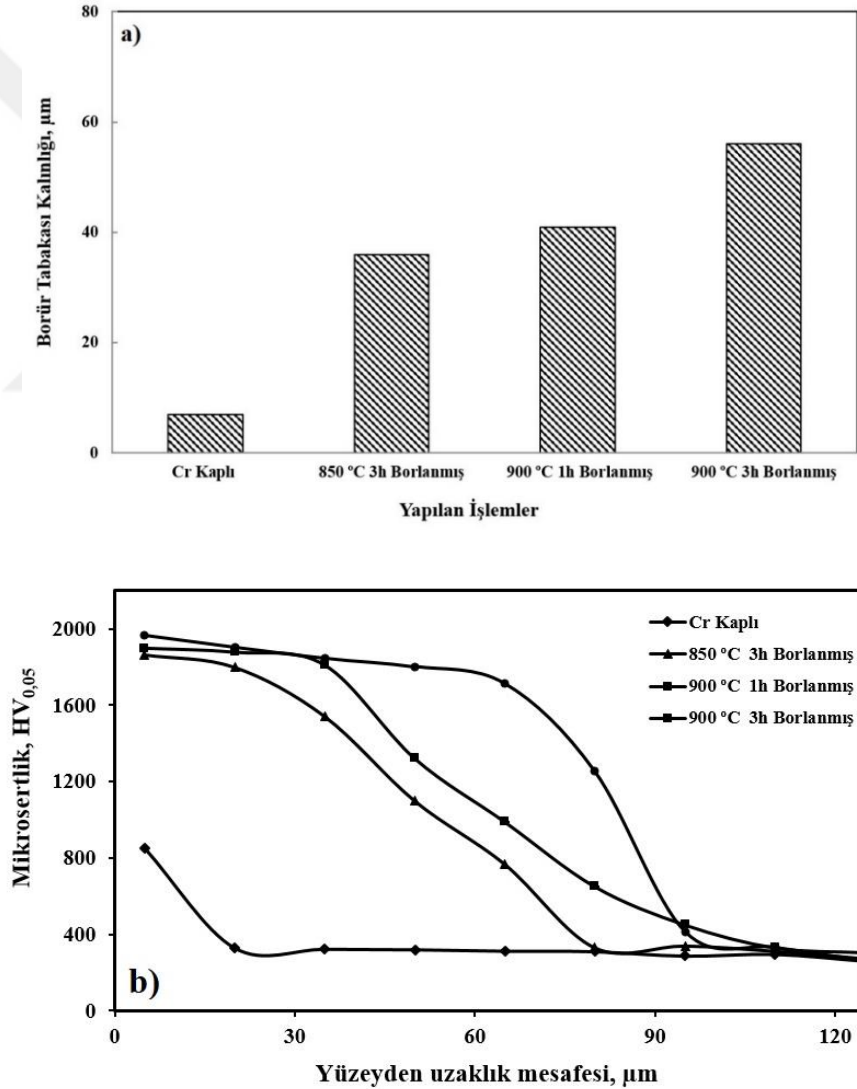
Şekil 4.3'te numunelere ait XRD analiz sonuçları verilmiştir. Krom kaplanmış numunenin XRD analizinde sadece Cr fazından oluştuğu görülmektedir. Borlanmış numunelerde elde edilen borür tabakası FeB ve Fe₂B fazlarından oluşmaktadır. 850 °C'de 3 saat borlanmış numunede Fe₂B fazı baskın iken borlama sıcaklığı ve borlama süresinin artmasıyla birlikte FeB fazı baskın hale gelmektedir. Bu da literatürle uyumludur (Tabur vd. 2009, Efe vd. 2008, Kayalı 2013, Kayalı ve Kenar 2023, Makuch vd. 2023).



Şekil 4.3 AISI 8620 çeliğinin a) Cr kaplanmış, b) 850 °C 3h, c) 900 °C 1h, d) 900 °C 3h numunelerin XRD analizleri.

4.3 Tabaka kalınlığı ve Sertlik Özellikleri

Şekil 4.4’de görüldüğü gibi artan borlama sıcaklığı ve artan borlama süresiyle beraber çeliğin yüzeyindeki borür tabakasının kalınlığı 36 μm -56 μm arasında artış göstermiştir. Bu olay tamamen bir difüzyon olayı olup, her difüzyon olayı gibi sıcaklık ve zamana doğrudan bağlıdır (Genel 2006, Tabur vd. 2009, Makuch vd. 2023). 900 C’de 3 saat borlanmış numunede borür tabakası kalınlığı 56 μm kadar çıkmıştır. Artan borür tabakasının kalınlığı ile beraber yüzeyden daha iç bölgelere sertlik artışı görülmüştür. Elektrokimyasal olarak yapılan Cr kaplama 7 μm kalınlık elde edilmiştir (Şekil 4a).



Şekil 4.4 AISI 8620 çeliğinin yüzeyine yapılan kaplamaların a) tabaka kalınlıkları ve b) mikro sertlik değişimi.

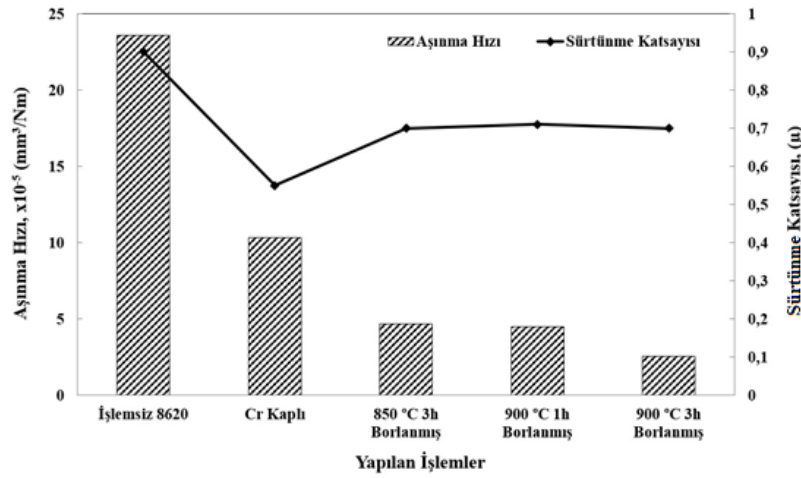
Şekil 4.4.b’de AISI 8620 çeliğine yapılan yüzey kaplama işlemleri sonucunda elde edilen mikro sertlik değerleri verilmiştir. Cr kaplanmış numunenin sertliği 852 HV_{0,05} iken borlanmış numunelerin sertliği sıcaklık ve süreye bağlı olarak 1965 ile 1321 HV_{0,05} arasındadır. FeB fazının baskın olmasından dolayı en yüksek yüzey sertliği 900 °C’de 3 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinde elde edilmiştir. Cr kaplama ve Borlama işlemi ile AISI 8620 çeliğinin yüzey sertliği artmıştır (Şen 2005, Tabur vd. 2009, Kayalı 2013).

4.4 Aşınma Karakterizasyonu

AISI 8620 çelik numunelerle, bilye-disk sisteminde kuru ortamda aşınma deneyleri gerçekleştirildi. 8 mm çapındaki WC-Co bilyeye karşı aşındırılan numuneler, 20 mm çapına sahiptir. Deneyler, oda sıcaklığında, sabit bir kayma hızı olan yaklaşık 0,3 m/s ve 10 N yük altında yapıldı. Aşınma hacmi, Rugosimeter marka pürüzlülük cihazı kullanılarak belirlendi.

Şekil 4.5’te numunelere ait aşınma hızları ve sürtünme katsayıları gösterilmiştir. Şekil 4.5’te görüldüğü gibi, borlanmış ve Cr kaplanmış AISI 8620 çeliğinin sürtünme katsayısı, İşlemsiz AISI 8620 çeliğe göre daha düşüktür. Krom kaplanmış numune de sürtünme katsayısı 0.55 iken borlanmış örneklerde borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak sürtünme katsayısı 0.70-0.71 arasındadır. Borür tabakasında oluşan FeB/Fe₂B faz oranının fazlalaşması nedeniyle fazlar arasında çekme ve basma gerilmelerinin artmasından dolayı sürtünme katsayısı artmıştır (Kayalı 2013, Çimenoglu vd. 2014, Ortiz-Dominguez vd. 2022). En yüksek aşınma hızının işlemsiz AISI 8620 çelikte olduğu görülürken, yapılan yüzey işlemleri ile birlikte AISI 8620 çeliğinin aşınma hızında çok fazla azalmalar görülmüştür. İşlemsiz AISI 8620 çeliğinde aşınma hızı $23.584 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ iken Cr kaplanmış numunenin aşınma hızı $10.324 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ kadar azalmıştır. 850 °C’de 3 saat borlanan numunenin aşınma hızının $4.7 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 900 °C’de 1 saat borlanan numunenin aşınma hızının $4.48 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ve 900 °C’de 3 saat borlanan numunenin aşınma hızının $2.54 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ kadar düşmüştür. AISI 8620 çeliğin aşınma direnci hem Cr kaplama hem de borlama işlemiyle artmıştır (Tabur vd. 2009, Gök vd. 2017, Kayalı ve Kenar 2023).

Kuru ortam aşınma testinin ardından, krom kaplanmış numunelerde aşınmanın tabakadan fazla olduğu ve matrisinde aşındığını göstermektedir. Borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak aşınma izi derinliklerinde ve alan değerlerinde düşüşler olmuştur. Kaplamasız AISI 8620 çeliğinde en yüksek aşınma izi derinliği gözlemlenirken, 900 °C’de 3 saat borlanmış numunede en düşük aşınma izi derinliği elde edilmiştir (Dongya vd. 2022). Borlama işleminin aşınma oranını azalttığı görülmüştür. Bulgular aşınmanın borür tabakasında meydana geldiğini göstermektedir (Çizelge 4.1).

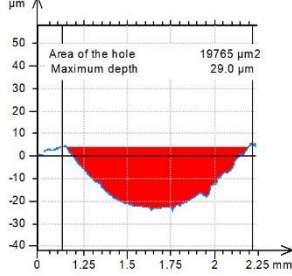
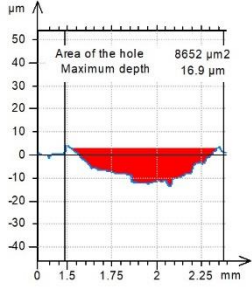
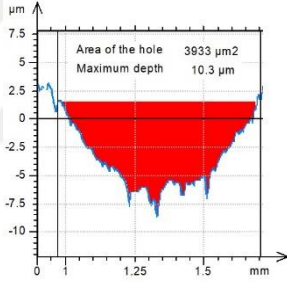
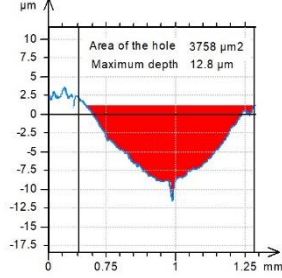
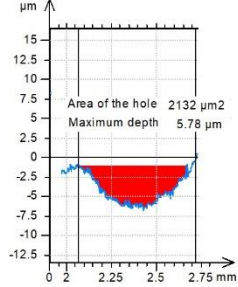


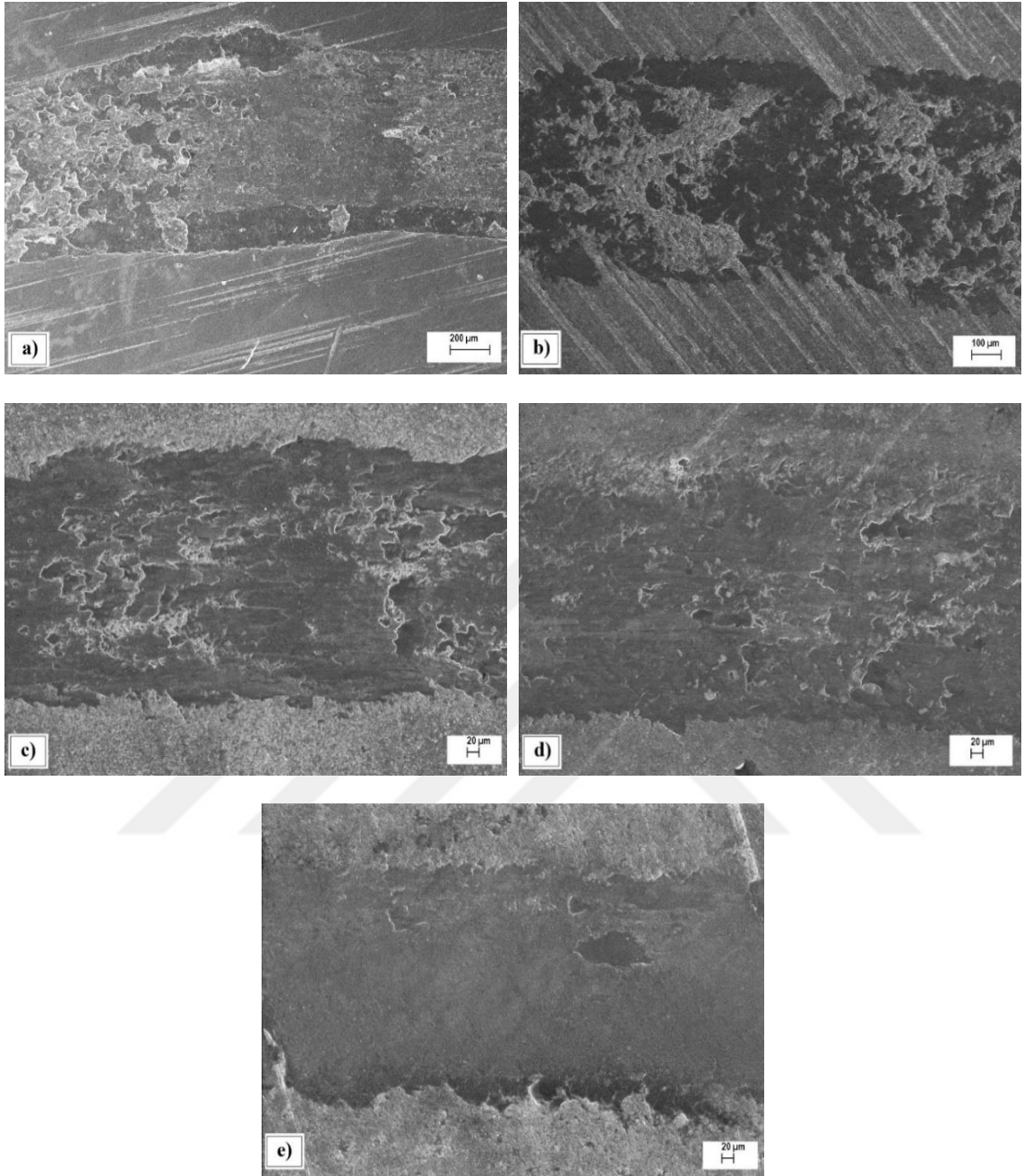
Şekil 4.5 Yüzey işlemi yapılan AISI 8620 çeliğin sürtünme katsayısı ve aşınma hızı

Şekil 4.6’da aşınma izleri incelendiğinde işlemsiz numunede adhesif aşınmanın olduğu, Cr kaplı ve borlanmış numunelerde ise hem abrasif hem de adhesif aşınmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Deney esnasında kazıma neticesinde derin izler daha çok işlemsiz ve Cr kaplı numunede görülmektedir. Bu durum aşınmanın bu iki numunede daha adhesif karakterliği olduğunu göstermektedir (De-yi vd. 2022).

Aşınma deneyleri sırasında sürtünme kaynaklı aşırı ısınma sebebiyle bor kaplamalar üzerinde oksitlenmenin olabileceği daha önceki çalışmalarda belirtilmiş ve bu oksitlenmenin aşınma hızını azalttığı da açıklanmıştır (Takeuchi vd. 1979, Erdemir 1991, Kayalı 2011, Kayalı vd. 2013a, Peng 2020). Bu yüzden çalışmamızda borlanmış numunelerde aşınma hızı düşük çıkmıştır.

Çizelge 4.1 Yüzey işlemleri yapılmış AISI 8620 çeliğin aşınma değerleri

Yapılan İşlemler	Kaplama Tabakası (μm)	Aşınma Profili (μm)	Aşınma Alanı (μm ²)	Sürtünme Katsayısı (μ)
İşlemsiz 8620	-		19765	0.9
Cr Kaplı	7		8652	0.55
850°C 3h	36		3933	0.7
900°C 1h	41		3758	0.71
900°C 3h	56		2132	0.7



Şekil 4.6 a) İşlemsiz 8620, b) Cr kaplanmış, c) 850°C 3h d) 900°C 1h e) 900°C 3h numunelerin aşınma izleri SEM resimleri.

4.5 Elektrokimyasal Korozyon Karakterizasyonu

Elektrokimyasal deneyler % 3.5 (wt/V) NaCl ortamında oda sıcaklığında 1 saat bekletilerek Tafel ve lineer polarizasyon yöntemleri kullanılarak uygulanmıştır. Sonuçta tespit edilen akım yoğunluğu potansiyel eğrilerindeki tüm potansiyeller doygun kalomel

elektrota (DKE) karşı ölçülmüş ve sonuçlar da bu elektrota göre belirlenmiştir.

İşlemsiz ve yüzey kaplama işlemi yapılan AISI 8620 numunelerin % 3.5 NaCl ortamında 1 saat bekleme süresi sonucunda; korozyon potansiyeli (E_{kor}), korozyon akımı (I_{kor}), korozyon hızı (CR), Polarizasyon direnci (R_p) dahil olmak üzere elektrokimyasal parametreler, ve kaplama verimliliği (% η) polarizasyon grafiğinden elde edildi. Çizelge 4.2’de polarizasyon Tafel eğrilerinin analiz sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.2 Yüzey işlemi yapılmış AISI 8620 çeliğinin % 3.5 NaCl ortamında elde edilen korozyon karakteristikleri.

	E_{kor} (mV)	I_{kor} (μA)	Korozyon Hızı (mpy)	R_p (kΩ)	% Kaplama verimliliği
İşlemsiz 8620	-703	55.60	25.66	0.940	
Cr Kaplı	-617	3.710	0.850	11.52	93
850 3h	-605	7.080	1.624	4.373	87
900 1h	-699	18.10	8.344	1.851	67
900 3h	-558	22.70	10.48	1.733	59

Çizelge 4.2 incelendiğinde kaplamalı AISI 8620 çeliğinin işlemsiz çeliğe göre 3.5 % NaCl ortamında kıyasla I_{kor} değerlerinin önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. Kaplanmamış numunenin akım değeri 55.60 μ A iken, Cr kaplı numunede 3.710 μ A ve borlanmış numunelerde işlem sıcaklık ve sürelerle bağlı olarak 7.080-22.700 μ A arasında değişmektedir. Buna karşın korozyon dirençleri de en yüksek Cr kaplanmış numunede 11.52 k Ω iken en düşük korozyon direnci işlemsiz AISI 8620 çeliğinde 0.940 k Ω olarak elde edilmiştir. Bu, çelik yüzey ile agresif ortam arasında bir tabaka oluşturan kaplamanın metal yüzeyine iyi yapıştığını gösterir. Borlama sıcaklık ve süresi arttıkça korozyon direncinin azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi tabaka kalınlığının artmasıyla birlikte tabakada boşlukların ve çatlakların artması olabilir (Campos vd. 2006, Asthana vd. 2007). Bu çatlaklardan içeri giren Cl^- iyonları çeliğin yapısında bulunan Fe ile çözünür. $FeCl_3$ ve $FeCl_2$ tuzları oluşturur. Nötr NaCl ortamında metalin çözeltiye değme noktasında oksijen sınır difüzyonu olur. Çünkü NaCl’ de oksijen bulunmaktadır.

Nötr ya da bazlı çözeltilerde katodik reaksiyon, oksijenin su ile reaksiyona girerek OH⁻ iyonu oluşturmastır.



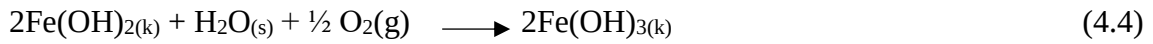
Anodik reaksiyon çelik içinde bulunan demirin yükseltgenmesidir.



Bu iki reaksiyon birleştirildiğinde ve elektron sayıları denkleştirildiğinde çelik yüzeyinde aşağıdaki reaksiyon gerçekleşir.



çözeltilen demir (II) hidroksit çökelir. Oysa bu bileşik oksijenli ortamlarda kararsız olduğundan demir (III) bileşiklerine yükseltgenir.



son ürün olan demir (III) hidroksit pas olarak bilinen bileşiktir.

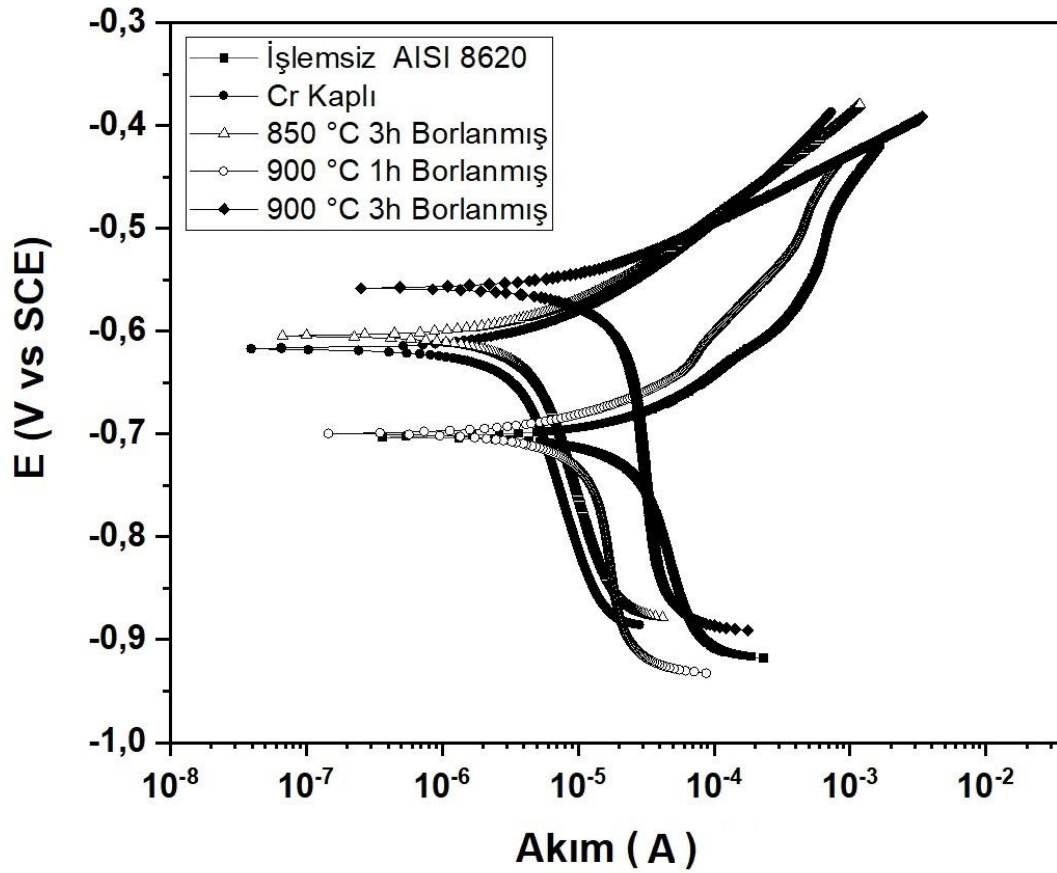
% 3.5 NaCl çözeltisinde bulunan Cl⁻ iyonları AISI 8620 çelik yüzeyinde çukur korozyonu oluşumuna neden olabilirler. Çukur korozyonu otokatalitik olarak ilerler. Hava içeren NaCl çözeltisinde (çünkü sistemden azot gazı geçirilmemiştir) AISI 8620 çelik yüzeyinde oluşan çukurcuk içinde demir hızla çözünürken, metal yüzeyinde oksijen hızla indirgenir. Bu olay kendiliğinden başlar ve genişler. Çukurcuk içinde metalin hızla çözünmesiyle çok miktarda artı yüklü Fe²⁺ iyonları olduğundan elektriksel nötrlük koşulunu korumak için çukurcuk içine klorür iyonları göç eder. Çukurcuk içinde FeCl₂ derişimi arttıkça hidroliz sonucu hidrojen iyonu derişimi artar.



Pasifleşme potansiyeli genel olarak yükselir. Hidrojen ve Cl^- iyonlarının her ikisi de birçok metal ve alaşımların çözünmelerini artırır. Oksijen indirgenmesi korozyonu azaltır yani bir anlamda metal yüzeyinde oluşan bu çukurcuklar metalin geri kalan kısmını katodik olarak korurlar.

Alaşımlı çelikler çukurcuk korozyonuna karşı diğer metal ve alaşım gruplarının herhangi birinden daha çok duyarlıdır. Bu nedenle bu çelikleri çukur korozyonundan korumak için daha dirençli duruma getirmek için içine Cr, Ni, Mo alaşım elementleri eklenir (Üneri 1998).

Yüzey işlemleri gerçekleştirilen AISI 8620 çeliğinin % 3.5 NaCl ortamında 1 saat süre bekletilmesi neticesinde Tafel polarizasyon yöntemi ile elde edilen Tafel eğrileri Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7 % 3.5 NaCl ortamında 1 saat bekletilmiş olan AISI 8620 çeliğinin Tafel eğrileri.

Şekil 4.7 incelendiğinde bor kaplanmış numunelerin işlemsiz numunelere göre korozyon hızlarında azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma % 3.5 NaCl ortamında 1 saat bekletmede işlemsiz numuneden 2.3 kata kadar artmakta ve oldukça yüksek korozyon direncine karşılık gelmektedir.

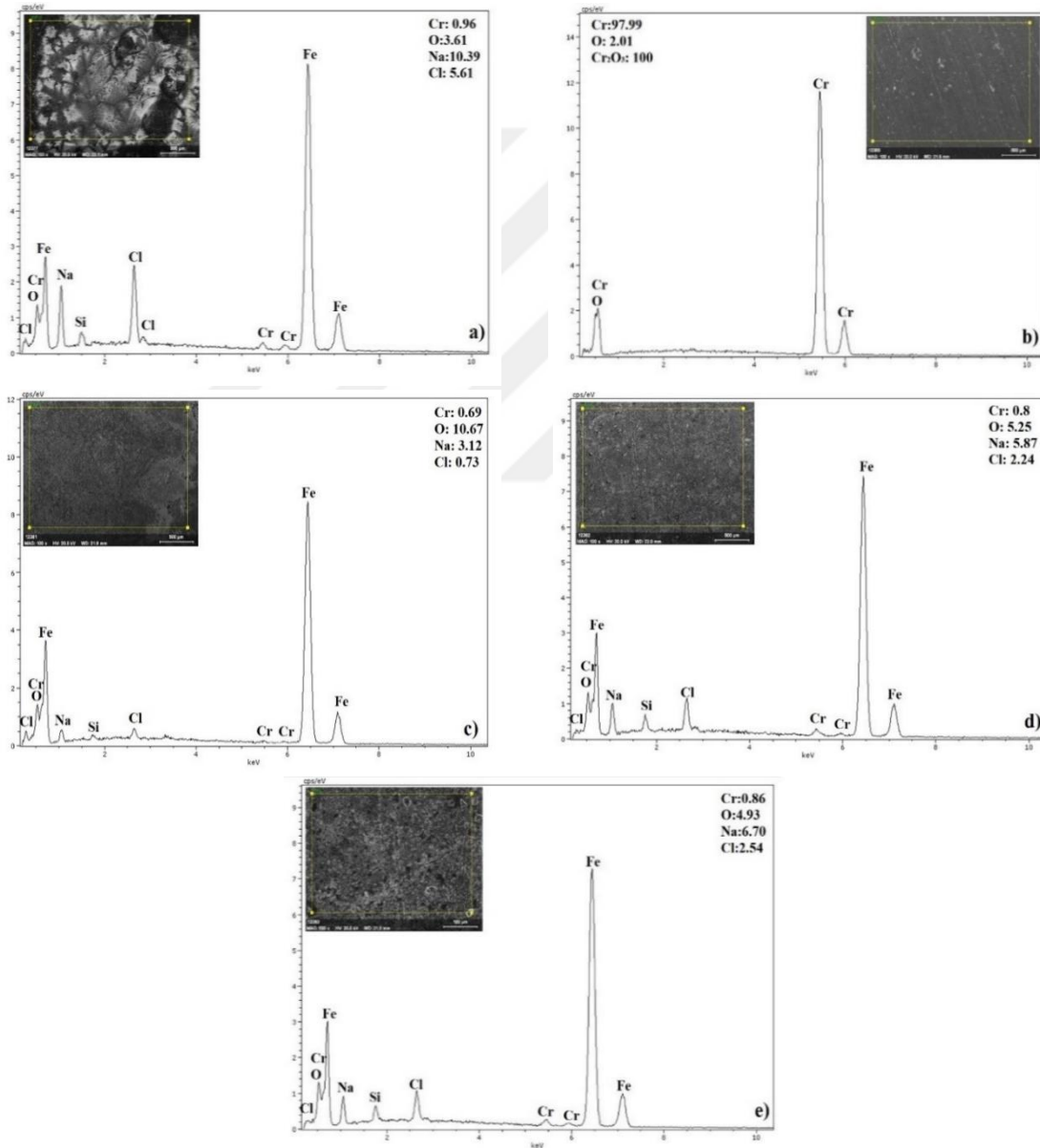
Bor kaplı Tafel eğrileri birbirine benzemektedir. Bu borlama sıcaklığı ve süresinin arttırılmasının korozyon mekanizmasını değiştirmediğini, anodik ve katodik reaksiyonları aynı ölçüde yavaşlattığını göstermektedir. Krom kaplama içinde aynı durum sözkonusudur. Her iki kaplamada aynı özellikleri göstermiştir. Korozyon mekanizması değişmemiştir.

Kaplanmış numuneler, işlemsiz çelik ile karşılaştırıldığında hem katodik hem de anodik polarizasyon eğrilerinde bir kaymaya neden olur, bu da kaplamaların her iki reaksiyonu da etkilediğini gösterir.

E_{kor} değerleri kaplamalı çeliklerde daha pozitif potansiyellere kaymıştır. Buda çelik yüzeyindeki kaplamaların anodik reaksiyon üzerinde daha etkin olduğunu göstermektedir. E_{kor} değerlerinin kaplamalı örneklerde daha pozitif olması kaplama yüzeyinde oksit oluşumlarının arttığını ve pasif bir film oluştuğunu düşündürmektedir.

Şekil 4.8’ de elektrokimyasal testler sonunda işlemsiz, Cr kaplı ve borlanmış AISI 8620 çeliğinin %3.5 NaCl ortamında 1 saat bekletme süresi sonunda alınan SEM-EDX analizleri verilmiştir. Endüşük korozyon hızı krom kaplamalı örnekte tespit edilmiştir. Bunun nedeni krom kaplamanın gözeneksiz ve çelik yüzeyine iyi kaplandığını, çelik yüzey ile kaplama arasında gözenek olmadığını gösterir. Bu nedenle NaCl çözeltisinde bulunan saldırgan klorür iyonları çelik yüzeyine giremediği için korozyon olmamaktadır. Ayrıca krom kaplama çelik yüzeyinde pasif bir film oluşturmuş olabilir. Buna göre Cr kaplanan numunelerin yüzeyinde %100 Cr_2O_3 tabakası oluşmasıyla birlikte korozyon direnci artmıştır (Soncu 2008, Kayalı 2011). Oluşan bu krom oksit tabakası koruyucu bir tabaka olduğu için AISI 8620 çeliğinin korozyon direncini artırmıştır. İşlemsiz AISI 8620 çeliğinin korozyon deneyi sonrası yüzeyde Na^+ ve Cl^- elementleri yapışması sonucunda korozyon hızı artırmıştır. Borlama işlemi ile bu elementler yüzeyde daha az tutunmuştur

ve böylece borlama işlemi ile birlikte işlemsiz numunelere kıyasla korozyon hızı düşmüştür (Kayalı 2011, Kayalı vd. 2013b, Peng 2020). Borlama süresi ve sıcaklığı arttıkça borlanan numunelerde korozyon hızında artmaktadır. Artan süre ve sıcaklık tabaka kalınlığını da artırmıştır. Borür tabakasının artmasıyla birlikte tabakada boşluklar ve çatlakların artması korozyon hızını bir miktar artırmıştır. Tabakada oluşan boşluklar ve çatlaklara Na ve Cl iyonları dolmuş ve korozyon hızını artırmıştır (Kayalı vd. 2013b, Peng 2020).



Şekil 4.8 a) İşlemsiz 8620, b) Cr kaplanmış, c) 850°C 3h, d) 900°C 1h, e) 900°C 3h numunelerin korozyon sonrası SEM-EDX analizleri.

5. SONUÇLAR, ÖNERİLER ve TARTIŞMA

AISI 8620 çeliğine Cr kaplama, 850 °C’ de 3 saat, 900 °C’ de 1 saat ve 900 °C’de 3 saat kutu borlama işlemleri sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- a) AISI 8620 çelik yüzeyinde yapılan borlama işlemi sonrasında, borür tabakasının homojen bir kalınlığa sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- b) Borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak, tabaka kalınlığı AISI 8620 çeliği üzerinde 36 µm ile 56 µm arasında değişkenlik göstermektedir.
- c) Bor kaplı AISI 8620 çeliğinin yüzey sertliği ile Cr kaplı numune yüzey sertliği arasında yaklaşık 2.3 kat fark olduğu tespit edilmiştir. Cr kaplı AISI 8620 çeliğinin yüzey sertliği 852 Hv_{0,05} iken borlanmış numunelerin sertliği sıcaklık ve süreye bağlı olarak 1321 ile 1965 Hv_{0,05} arasındadır.
- d) X-ışınları difraksiyon analiz sonuçlarına göre FeB ve Fe₂B fazları elde edilmiştir. Borlama işlemi sonrasında korozyon direncinin arttığı tespit edilmiştir.
- e) AISI 8620 çeliğine yapılan yüzey işlemleri ile birlikte aşınma hızı en az yaklaşık olarak %50 oranında azalmıştır. En düşük aşınma hızı 900 °C 3 saat borlanmış numune de elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı değeri kaplanmış numunelerde 0.55-0.71 arasında elde edilirken işlemsiz AISI 8620 çeliğinin sürtünme katsayı değeri 0.9 dür.
- f) Elektrokimyasal korozyon deneyleri sonucunda AISI 8620 çeliğinin korozyon direnci krom kaplama ile artırılmıştır. Ayrıca düşük sıcaklıklarda yapılan borlama işlemi korozyon direncini iyileştirmiştir.

6. KAYNAKLAR

- Albayrak M G, 2021, Düşük Karbonlu Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Borlama, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 213 s, Elazığ
- Arslan D, 2020, Mikrodalga Hibrit ve Konvansiyonel Isıtma İle Kutu Borlama Uygulanmış AISI 304L Çeliğinin Yüzey Karakterizasyonu ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 185s, Manisa
- Asthana, P., Liang, H., Usta, M., Üçışık, A. H. (2007). Wear and Surface Characterization of Boronized Pure Iron. *Journal of Tribology*, 129(1), 1-10.
- Barut N, 2018, Mikro Dalga Fırınında Borlanmış P20 Çeliğinin Elektrokimyasal Korozyon Davranışının İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 58s, Afyonkarahisar
- Bayatlı A, 2022, Elektrolitik Krom Kaplamada Organik Katalizör İlavesinin Ve Akım Yoğunluğunun Kaplama Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 70s, Konya
- Bozkurt İ B, 2022, 4340 Islah Çeliğinin Bilyalı Dövme ve Kutu Borlama Ardışık Uygulamaların Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 43s, Karabük
- Campos, I., Palomar, M., Amador, A., Ganem, R., Martinez, J. (2006). Evaluation of the corrosion resistance of iron boride coatings obtained by paste boriding process. *Surface & Coatings Technology*, 201, 2438–2442.
- Çelikyürek, İ., Baksan, B., Torun, O., Gürler, R. (2006). Boronizing of iron aluminide Fe72Al28. *Intermetallics*, 14(2), 136-141.
- Çetin D, 2007, Ham Petrol Sahalarından İzole Edilen Sülfat İndirgeyen Bakterilerin Korozyon Etkisinin Belirlenmesi ve Önlenmesi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 124s, Ankara

- Çimenoglu, H., Atar, E., Motallebzadeh, A. (2014). High temperature tribological behaviour of borided surfaces based on the structure of the boride layer. *Wear*, 309(1–2), 152–8.
- Çolak E, 2010, İyon Nitrülenmiş AISI 5140 Çeliğinin Korozyon Davranışının İncelenmesi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 47s, Erzurum
- Dongya, Z., Yue, L., Xin, D., Hongwei, F. ve Feng, G. (2022). Microstructure and Tribological Performance of Boride Layers on Ductile Cast Iron Under Dry Sliding Conditions. *Engineering Failure Analysis*, 134, 106080
- De-yi, Q., Dan, L., Xin-yu, W., Yong-hua, D. ve Ming-jun, P. (2022). Corrosion and Wear Properties of TB2 Titanium Alloy Borided by Pack Boriding With La₂O₃. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 32(3), 868-881
- Efe, G. Ç., İpek, M., Özbek, İ., Bindal, C. (2008). Kinetics of borided 31CrMoV9 and 34CrAlNi7 steels. *Materials Characterization*, 59(1), 23-31.
- Efe H, 2022, AISI 8620 Çeliğinin Korozyon Ömrünün Borlama Prosesi İle Artırılması, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 92s, Kırıkkale
- Ekinci, Ş. ve Akdemir, A. (2011). Nitrülenmiş AISI 4140 çeliğine uygulanan yükün aşınma hızına etkisi. *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergisi*, 10, 1, 38-52.
- Erdemir, A. (1991). Tribological properties of boric acid and boric acid forming surfaces. Part 1: Crystal Chemistry Mechanism of Self-Lubrication of Boric Acid, *J.Soc.Tri.& Lub. Eng.* 168-172.
- Erden, Mehmet A. (2016). Effect of C Content on Microstructure and Mechanical Properties of Nb-V Added Microalloyed Steel Produced by Powder Metallurgy Method . *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5 (9), 44-47.
- Genel, K. (2006). Boriding kinetics of H13 steel. *Vacuum*, 80(5), 451–457.
- Gerengi H, 2008, Tafel Polarizasyon (TP), Lineer Polarizasyon (LP), Harmonik Analiz (HA) ve Dinamik Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi (DEIS)

- Yöntemleriyle Düşük Karbon Çeliği (AISI 1026), Pirinç-MM55 ve Nikalium-118 Alaşımlarının Yapay Deniz Suyunda Korozyon Davranışları ve Pirinç Alaşımlarına Benzotriazol'ün İnhibitör Etkisinin Araştırılması, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 167s, Eskişehir
- Gödek B A, 2017, Bor Kaplama Yapılan St 50-2, AISI 1045 Ve C-22 Çeliklerinin Sertlik, Mikroyapı Ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi, Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 82s, Çorum
- Gök, M. S., Küçük, Y., Erdoğan, A., Öge, M., Kanca, E., Günen, A. (2017). Dry sliding wear behavior of borided hot-work tool steel at elevated temperatures. *Surface and Coatings Technology*, 328, 54–62.
- Güney F, 2021, AISI 8620 Çeliğinin Farklı Şartlar Altındaki Mekanik Özellikleri, Korozyon Direnci ve Mikroyapılarının İncelenmesi, Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 87s, Düzce
- Kahraman M, 2009, Yüzeyi Toz Alev Püskürtme Yöntemi İle Kaplanan (Wc, B4c, B4c - NiCrBsi) AISI 1040 Çeliğinin Aşınma Mekanizmalarının Deneysel Olarak İncelenmesi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 96s, İzmir
- Kayalı Y, 2011, Borlanmış AISI 316 L Paslanmaz Çeliğin Korozyon Ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 219s, Afyonkarahisar
- Kayalı, Y. (2013). Investigation of the Diffusion Kinetics of Borided Stainless Steels. *The Physics of Metals and Metallography*, 114 (12), 1061–1068.
- Kayalı, Y., Büyüksağış, A., Yalçın, Y. (2013a). Corrosion and Wear Behaviors of Boronized AISI 316L Stainless Steel. *Journal of Metals and Materials International*, 19(5), 1053-1061.
- Kayalı, Y., Büyüksağış, A., Güneş, İ., Yalçın, Y. (2013b). Investigation of Corrosion Behaviors at Different Solutions of Boronized AISI 316L Stainless Steel. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 49(3), 348-358.
- Kayalı, Y., Taktak, Ş. (2015). Characterization and Rockwell-C Adhesion Properties of Chromium based Borided Steels. *Journal of Adhesion Science and Technology*,

29(19), 2065-2075.

- Kayalı, Y., Kara, R. (2021). Investigation on Wear Behaviors and Diffusion Kinetic Values of Boronized Hardox-450 Steel. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 57(4), 771-778.
- Kayalı, Y., Kenar, A. (2023). Effect of Diffusion Annealing on Wear and Cohesion Behaviours of Boronized AISI 1040 Steel. *Tribology International*, 184, 108428.
- Kır, H. ve Apay, S. (2020). Elektrolitik Yöntemle Sert Krom Kaplanan Yapı Çeliğinde Kaplama Parametrelerinin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8-9.
- Makuch, N., Kulka, M., Keddarn, M. ve Piasecki, A. (2023). Growth Kinetics, Microstructure Evolution, and Some Mechanical Properties of Boride Layers Produced on X165CrV12 Tool Steel. *Materials* 2023, 16, 26.
- Milinovi'c, A., Stojšić, J., Kladari'c, I., Matijević, B. (2022). Evaluation of Boride Layers on C70W2 Steel Using a New Approach to Characterization of Boride Layers. *Materials* 2022, 15, 3891.
- Ortiz-Domínguez, M., Gómez-Vargas, O.A., Bárcenas-Castañeda, M., Castellanos Escamilla, V.A. (2022). Comparison and Analysis of Diffusion Models: Growth Kinetics of Diiron Boride Layers on ASTM A283 Steel. *Materials* 2022, 15, 8420.
- Özbek, İ., Sen, Ş., Ipek, M., Bindal, C., Zeytin, S., Ucisik, A. H. (2004). A mechanical aspect of borides formed on the AISI 440C stainless-steel. *Vacuum*, 73(3-4), 643–648.
- Peng C, 2020, The Effect Of Boronizing On Hardness, Wear and Corrosion Properties of AISI 1018 and AISI 316l Steels. University of Saskatchewan, Department of Mechanical Engineering, The Degree of Master of Science, 132s, Saskatoon.
- Soydan Y, 1996, Katı Ortamda Bor Yayınımı ile Sertleştirilen Çeliklerin Kuru Kayma Halinde Sürtünme ve Aşınma Davranışları, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 160s, İstanbul
- Soncu M, 2008, G-X10CrNiMoNb18-10 Östenitik Paslanmaz Çeliğin Asidik Çözeltilerdeki Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi, Kocaeli Üniversitesi, Fen

- Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 132s, Kocaeli.
- Şen, Ş. (2005). The Characterization of Vanadium Boride Coatings on AISI 8620 Steel. *Surface & Coatings Technology*, 190(1), 1- 6.
- Tabur, M., Izciler, M., Gulb, F. ve Karacanc, I. (2009). Abrasive wear behavior of boronized AISI 8620 steel. *Wear* 266, 1106–1112.
- Takeuchi, E., Fujii, K. ve Katakırı, T. (1979). Sliding Wear Characteristics of Gas Boronized Steel. *Wear*, 55, 121-130.
- Toğuşlu Ç, 2011, Cam Fiber ve Grafit Takviyeli Naylon 6 Matrisli Kompozit Malzemelerin Bazı Mekanik Özellikleri ve Aşınma Mekanizmalarının Deneysel Olarak İncelenmesi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 92s, İzmir
- Topbaş, M. A. (1998). *Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı*. İstanbul Prestij Yayıncılık.
- Uçgun, M C, 2022, Borlanmış Hastelloy C-276 Süper Alaşımının Aşınma Davranışının Deneysel İncelenmesi, Hitit Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 68s, Çorum
- Ulu, S., Aytekin, H. ve Said, G. (2006). 4 Farklı Çeliğin Bazı Mekanik Özelliklerine Fe-Fe₃c Faz Diyagramında A1-A3 Arasında Yapılan Isıl İşlemlerin Etkisi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 1-9.
- Uluköy A, 2005, 21NiCrMo₂ (AISI 8620) Çeliğinden Yapılmış Dişli Çarklara Karbürleme ile Beraber Borlama İşleminin Uygulanması, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 114s, Denizli
- Uluköy, A. ve Can, A. Ç. (2005). Çeliklerin Borlanması, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12, 189-198.
- Uzun H, 2002, Borlama ile Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 75s, Isparta
- Ünal O, 2022, Eklemeli İmalat İle Üretilmiş 18ni300 Maraging Çeliğinin Yüzey Özelliklerinin Termokimyasal Borlama Yöntemiyle Geliştirilmesi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 148s, Gebze

Üneri, S. (1998). Korozyon ve Önlenmesi, *Korozyon Derneği Yayınları*, 3, 141-143.

Yapar U, 2003, Düşük Ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama İle Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 145s, İstanbul

6.1 İnternet Kaynakları

- 1- (<https://www.onlinemetals.com/en/product-guide/alloy/8620>), 01.11.2022
- 2- <https://www.etimaden.gov.tr/>, 26.03.2023
- 3- <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/226225>, 26.03.2023
- 4- <https://malzemebilimi.net/>, 25.04.2023
- 5- <https://kar-tes.com.tr/blog>, 10/05/2023
- 6- <http://w3.bilecik.edu.tr/makine-en/wp-content/uploads/sites/119/2016/12/Korozyon-deney.pdf>, 29/08/2023