



**BORLANMIŞ FARKLI KİMYASAL BİLEŞİME
SAHİP OLAN SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİKLERİNİN
AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Umutcan ÖZBAYRAK

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ekim 2023

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BORLANMIŞ FARKLI KİMYASAL BİLEŞİME SAHİP OLAN
SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİKLERİNİN
AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Umutcan ÖZBAYRAK

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EKİM 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Umutcan ÖZBAYRAK tarafından hazırlanan “Borlanmış Farklı Kimyasal Bileşime Sahip Olan Soğuk İş Takım Çeliklerinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” 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 **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir”.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER

Başkan :Doç. Dr. Yusuf KAYALI

AKÜ, Teknoloji Fakültesi

Üye :Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER

AKÜ, Teknoloji Fakültesi

Üye :Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÇOLAK

Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO

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

.....

Umutcan ÖZBAYRAK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BORLANMIŞ FARKLI KİMYASAL BİLEŞİME SAHİP OLAN SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİKLERİNİN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Umutcan ÖZBAYRAK

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş Böhler K340 ve 1.2990 kalitesinde soğuk iş takım çelikleri kutu borlama (KB) yöntemiyle borlanmıştır. Kutu Borlama işlemi 950 °C sıcaklığında 2, 4 ve 6 saat zaman diliminde Ekabor II tozu kullanılarak uygulama yapılmıştır. Ardından 750°C’de 3 ve 5 dakika, 800°C’de 3 ve 5 dakika oksidasyon işlemine tabi tutulmuştur. Uygulama sonrası optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu, X-ışını analizi, mikrosertlik testi ve aşınma testleri bulunmaktadır. Optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu, elde edilen borür tabakalarının yapısal özelliklerini incelemek için kullanılmıştır. Mikrosertlik testi, borür tabakalarının sertlik değerlerini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Aşınma testleri, elde edilen borür tabakalarının aşınma direncini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bilye-disk aşınma cihazı kullanılarak, 0,3 m/s kayma hızı, 5N yük ve 300 metre kayma mesafesiyle WC-Co bilyeye karşı aşınma testleri yapılmıştır. Bu testler sayesinde tabakanın aşınma davranışı ve aşınma direnci belirlenmiştir. 1.2990 çeliğinde KB ve oksidasyon numunelerinin mikrosertlikleri 1312-1669 HV_{0,2}, aşınma hızları da 4,92 ile 89,58x10⁻⁶ mm³/Nm aralığındadır. K340 çeliğinde KB ve oksidasyon numunelerinin mikrosertlikleri 1160-1653 HV_{0,2}, aşınma hızları da 0,628 ile 71,78x10⁻⁶ mm³/Nm bulunmuştur.

2023, x+51 sayfa

Anahtar Kelimeler: 1.2990, Böhler K340, Borlama, Aşınma, Oksidasyon İşlemi.

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOR OF BORONIZED COLD WORK TOOL STELLS WITH DIFFERENT CHEMICAL COMPOSITIONS

Umutcan ÖZBAYRAK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Şükrü ÜLKER

In this study, 1.2990 and Bohler K340 quality cold work tool steels produced by powder metallurgy method were borided using the box boriding method. Box Boriding process was applied using Ekobar-II powder at a temperature of 950 °C for 2,4 and 6 hours. Then, it was subject to oxidation at 750°C for 3 and 5 minutes, and 800°C for 3 and 5 minutes. After the application, there are optical microscopy, scanning electron microscopy, X-ray analysis, microhardness testing, and wear testing. Optical microscope and scanning electron microscope were used to examine the structural properties of the result boride layers. Microhardness test is a method used to determine the hardness values of boride layers. Wear test were carried out evaluate the wear resistance of the obtained boride layers. Using a ball disc wear device, wear test were carried out against WC-Co ball with a certain sliding speed of 0.3 m/s, 5N load and sliding distance of 300 meters. Thanks to these test, the wear behavior and wear resistance of the layer were determined. The microhardness of KB and oxidation samples in 1.2990 steel is between 1312-1669 HV_{0,2}, and the wear rates are between 4,92 and 89,58mm³/Nm. In K340 steel, was wound to be 1160-1653 HV_{0,2}, and the wear rates were found to be 0.628 and 71.78x10⁻⁶/Nm.

2023, x+51 pages

Keywords: 1.2990, Böhler K340, Boriding, Wear, Oxidation Process.

TEŞEKKÜR

Numunelerin temin edilmesinde desteğini esirgemeyen Optima Mühendislik A.Ş. Genel Müdür Yardımcısı Mehmet Özgür SARI Bey'e, numunelerin kesilmesi ve işlenmesinde yardım eden Optima Mühendislik A.Ş. CNC Operatörü Okan AYDIN' a, numuneler için gerekli olan Ekobar-2 tozlarının teminini sağlayan Hasan Vezneli Bey'e, numune yüzeylerinin temizlenmesi ve zımparalanmasında yardımcı olan Afyon Kocatepe Üniversitesi Arş. Gör. Mahmud YALÇIN hocama, araştırmanın konusunda, deneysel faaliyetlerin yönlendirilmesinde, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu çok önemli katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER hocama teşekkürlerimi sunuyorum.

Tezin araştırma ve yazım süresinde yardım ve desteklerinden dolayı değerli arkadaşım Tolgahan ÇALI, Tayfun ÇELİK'e ve Optima Mühendislik A.Ş. Yönetimine teşekkürlerimi borç biliyorum.

Bu çalışmamda maddi ve manevi anlamda desteklerini hiç bir şekilde esirgemeyen aileme tezimi armağan ediyorum.

Umutcan ÖZBAYRAK

Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	2
2.1 Bor.....	2
2.1.1 Borlama.....	3
2.1.2 Borür Yapısı, Borlama Kinetiği ve Karakteristiği.....	6
2.1.3 Borlama İşleminin Avantajları.....	7
2.1.4 Borlama İşleminin Dezavantajları.....	9
2.1.5 Borlama Yöntemleri.....	9
2.2 Oksidasyon.....	15
2.3 Borlama ve Oksidasyon ile İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	16
3. MATERYAL VE METOT.....	21
3.1 Böhler K340 Çeliği.....	21
3.2 1.2990 Çeliği.....	21
3.3 Numune Hazırlama.....	21
3.4 Kutu Borlama ve Oksidasyon İşlemi.....	22
3.5 XRD Analizleri.....	24
3.6 Mikroyapı İncelemeleri.....	25
3.6.1 Numune Kesiti Alma, Bakalitleme ve Parlatma İşlemleri.....	25
3.7 Mikrosertlik İncelemeleri.....	25
3.8 Aşınma Deneyleri.....	25
3.9 SEM ve EDS Analizi.....	27
4. BULGULAR.....	28
4.1 Mikroyapı İncelemeleri ve Tabaka Kalınlıkları.....	28
4.2 XRD Analizleri.....	33
4.3 Mikrosertlik Sonuçları.....	35

4.4 Kuru Kaymalı Aşınma Analizi	38
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	43
5.1 Sonuçlar.....	43
5.2 Öneriler.....	45
6. KAYNAKLAR	46
ÖZGEÇMİŞ.....	51



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C	Santigrat Derece
K	Kelvin Derece
V	Volt
µm	Mikrometre
mm	Milimetre
N	Newton
Pa	Paskal
Kpa	Kilopaskal
BN	Bornitrür
B ₂ O ₃	Bortrioksit
B ₂ H ₆	Diboran
B ₄ C	Borkarbür
FeB	Ferrobör
SiC	Silisyum karbür
Al ₂ O ₃	Alüminyum III oksit
Na ₂ CO ₃	Sodyum Karbonat
Na ₂ B ₄ O ₇	Boraks
KBF ₄	Potasyum bor florür
NaBF ₄	Sodyum bor florür
NaSO ₄	Sodyum sülfat
Ra	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü

Kısaltmalar

AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
HV	Vickers Sertlik
KB	Kutu Borlama
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X Işını Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Dünyadaki bor rezervleri (% olarak)	3
Şekil 2.2 Borlama işlemi ile yüzeylerde oluşan borür fazlarının görünümü	5
Şekil 2.3 Borür tabakaları ile geçiş bölgeleri temsili	6
Şekil 2.4 Kutu borlama işleminin şematik gösterimi	10
Şekil 3.1 Taylor Hobson marka yüzey pürüzlülük cihazı.....	22
Şekil 3.2 Ürünlerin borlama prosesi öncesi ve sonrası süreçleri.....	23
Şekil 3.3 Prother Furnaces endüstriyel fırını.....	24
Şekil 3.4 Kuru kaymalı aşınma testi.....	26
Şekil 3.5 Aşınma derinliği ve alanı ölçümü için kullanılan cihaz	26
Şekil 4.1 Borlama yöntemiyle elde edilen tabaka talınlıkları	29
Şekil 4.2 Kutu borlanmış 1.2990 numunelerin optik mikroskop görüntüleri.....	31
Şekil 4.3 Kutu borlanmış K340 numunelerin optik mikroskop görüntüleri.....	31
Şekil 4.4 1.2990 çeliğinin 950°C’de 2 ve 6 saat sürelerince borlanmış numunelerin SEM görüntüsü.....	32
Şekil 4.5 K340 çeliğinin 950°C’de 2 ve 6 saat sürelerince borlanmış numunelerin SEM görüntüsü.....	32
Şekil 4.6 1.2990 çeliğinin 950° C’ de 6 saat boyunca borlama işlemi sonrası XRD analizi	33
Şekil 4.7 K340 çeliğinin 6 saat boyunca 950° C’ de borlama işlemi sonrası XRD analizi	33
Şekil 4.8 1.2990 çeliğinin borlama işlemi sonrası 750°C 3 dakika oksidasyon XRD analizi	34
Şekil 4.9 K340 çeliğinin borlama işlemi sonrası 750° 3 dakika oksidasyon XRD analizi	34

Şekil 4.10 950 °C’de 6 Saat Borlama işlemi sonrası 750 °C’de 3 dakika oksitlenmiş 1.2990 çeliğinin mikrosertlik izleri.....	35
Şekil 4.11 2 saat borlanmış ve oksidasyon işlemi görmüş 1.2990 kalite çeliğin yüzeyinden sertlik ölçümleri.....	36
Şekil 4.12 4 saat borlanmış ve oksidasyon işlemi görmüş 1.2990 kalite çeliğin yüzeyinden sertlik ölçümleri.....	36
Şekil 4.13 6 saat borlanmış ve oksidasyon işlemi görmüş 1.2990 kalite çeliğin yüzeyinden sertlik ölçümleri.....	37
Şekil 4.14 2 saat borlanmış ve oksidasyon işlemi görmüş K340 kalite çeliğin yüzeyinden sertlik ölçümleri.....	37
Şekil 4.15 4 saat borlanmış ve oksidasyon işlemi görmüş K340 kalite çeliğin yüzeyinden sertlik ölçümleri.....	38
Şekil 4.16 6 saat borlanmış ve oksidasyon işlemi görmüş K340 kalite çeliğin yüzeyinden sertlik ölçümleri.....	38
Şekil 4.17 1.2990 çeliğinin aşınma hızı grafiği.....	40
Şekil 4.18 K340 çeliğinin aşınma hızı grafiği.....	41
Şekil 4.19 K340 çeliğinin 6s-7-3dk numunenin aşınma SEM Görüntüleri	42
Şekil 4.20 K340 çeliğinin 6s-7-3dk numunenin EDS analizi için belirlenmiş noktalar ve yüzdesel element dağılımı.....	42

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Bor elementinin kullanım alanları ve yerleri	2
Çizelge 2.2 Bor fazlarının bazı özellikleri.....	6
Çizelge 2.3 Uygun bor sağlayıcıları ve bazı özellikleri	12
Çizelge 2.4 Macun ile borlamada kullanılan koruyucu gazlar ve özellikleri.....	14
Çizelge 2.5 Oksidasyon'un kullanıldığı alanlar	16
Çizelge 2.6 Oksidasyon işleminin avantajları	16
Çizelge 3.1 K340 çeliğinin temel kimyasal bileşimi (ağırlıkça %).....	21
Çizelge 3.2 1.2990 soğuk iş çeliğinin temel kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)	21
Çizelge 3.3 Borlama ve oksidasyon işlemlerinin parametre kodları	24
Çizelge 3.4 Aşınma deneyi parametreleri.....	26
Çizelge 4.1 Borlanmış 1.2990 ve K340 çeliklerinin tabaka kalınlıkları	28

1.GİRİŞ

Takım çelikleri; kullanılacağı yere göre yüksek mukavemetli ve dayanıklı bir çelik çeşididir. Etkili olduğu endüstriyel uygulamalar başlıca kesici aletler, matkap uçları kalıplar ve dişli kesicilerdir. Takım çeliklerinin tercih edilme sebepleri yüksek sıcaklıklara ve aşınmaya karşı dayanma özelliğinin iyi olmasıdır. Uzun süre kullanım için uygundur. Dolayısıyla takım çelikleri genellikle yüksek hassasiyetli işleme uygulamalarında kullanılır. Özellikle havacılık, otomotiv, makine ve savunma sanayi gibi sektörlerde tercih edilir. Takım çeliklerinin işlemde geçerek nihai parçaya dönüştürülmesinde modern imalat ve geleneksel imalat metotları kullanılmaktadır. En fazla uygulanan metotların başında talaşlı imalat gelmektedir. Taşlama, frezeleme, tornalama gibi operasyonlar örnek olarak sıralanabilir (Gezgin 2007).

K340 çeliği, yüksek basınç ve aşınma direncinin üst düzey sertlikle birleşmesi istenen durumlardaki uygulamalarda, Böhler K340 tüm takım çeliklerine kıyasla bu özelliklerin tümüne sahip olduğu kanıtlanmıştır. K340 çeliği; endüstriyel bıçaklar, ekstrüzyon takımları, madeni para takımları, makine parçaları, derin çekme, endüstriyel bıçaklar, delme ve şekillendirme takımları, makine parçaları imalatında kullanılmaktadır. %8 krom çeliği olan Böhler K340 ISODUR, elektro cüruf yeniden üretme yöntemi kullanılarak üretilir. Böhler tarafından geliştirilen ve kanıtlanmış yeniden eritme teknolojisi, son derece düşük mikro ve makro ayrışmalar sağlar ve malzemeye pratikte mükemmel performans için gerekli saflığı ve homojenliği verir. Böhler K340'ın geniş yelpazede uygulanmasının temel nedenleri şöyledir:

- Yüksek Tokluk
- Mükemmel Basınç Dayanımı
- Homojen yapısı sayesinde kolay işlenebilirlik (İnt.Kyn.2)

1.2990 soğuk iş takım çeliği Cr, Mo, V alaşımlı ikincil sertleşebilen soğuk iş çeliğidir. Daha iyi kaynak yapılabilme, yüksek tokluk ve boyutsal değişiklik göstermeme özelliği vardır. Karbür açısından zengindir. PVD, Nitrasyon ve CVD kaplamalar için çok iyi bir temel malzemedir. Genellikle sertleştirilme işleminden sonra teslim edilir (İnt.Kyn.1).

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Bor

Dünyadaki bor mineralinin yaklaşık %72.8'i ülkemizdedir. Fakat bu kadar önemli yüzdeye sahip olan rezervin sadece %18'inden Borat üretilmektedir. Sektörde ileri teknolojiye sahip ülkeler boratlardan saf borun yanı sıra, bor nitrür (BN), bortrioksit (B_2O_3), diboran (B_2H_6), bor karbür (B_4C), ferrobör (FeB) gibi saf olan bileşikler elde etmek için de kullanılmaktadır (Özsoy 1991). Bor ve bileşiklerinin ana kullanım alanları; savunma sanayi, cam sanayi, seramik sanayi, tarım sektörü, otomobil sanayi, metalurji ve malzeme, nükleer uygulamalar, sağlık sektörü, inşaat sektörü, kimya sanayi, elektrik-elektronik, tekstil sektörü vb. olmak üzere oldukça geniş yelpaze kullanım alanları mevcuttur. Çizelge 2.1'de Bor elementinin kullanım alanları ve kullanım yerleri verilmiştir (İnt.Kyn.4).

Çizelge 2.1 Bor elementinin kullanım alanları ve yerleri (Yiğitbaşoğlu, 2004)

KULLANIM ALANI	KULLANIM YERLERİ
Askeri & Zırhlı Araçlar Cam Sanayi	Zırh levhaları, Seramik levhalar, Silah namluları vb., Borosilikat camlar, Uçak camları, Borcam, Cam Seramikleri, Şişe, İzole cam elyafı, Otomotiv camları vb.
Elektronik ve Bilgisayar Sanayi	İşlemciler, LCD ekranları, CD sürücüler, Akım levhaları, Yarı iletkenler, Vakum Tüpleri, Dielektrik malzemeler, Elektrik Kondansatörleri, Kapasitörler, Bataryalar
Enerji Sektörü	Güneş enerjisinin depolanması, Güneş Pillerinde koruyucu olarak, Hücre yakıtları
İlaç ve Kozmetik Sanayi	Dezenfekte ediciler, Diş macunları, Lens solüsyonları, Kolonya, Parfüm, Şampuan
İletişim Araçları	Cep telefonları, Modemler, Televizyonlar vb.
Kauçuk ve Plastik Sanayi	Naylon ve Plastik malzemeler vb.
Patlayıcı Maddeler	Fişek vb.
Makine Sanayi	Manyetik cihazlar, Zımpara ve aşındırıcılar
Tarım Sektörü	Gübreler, Böcek öldürücüler.

Bor, bilinen diğer elementler gibi dünyanın çeşitli bölgelerinde büyük kelimeler halinde dağılmamıştır. Dünyada 4 ana merkezde toplandığını söylemek mümkündür. Bunlar büyüklükleri ile orantılı olarak sıralanırsa Türkiye, Rusya, Amerika ve Çin olmaktadır. 2014 yılına ait verilere bakıldığında yukarıdaki ülkelerin sahip olduğu bor rezervlerinin toplam rezerve oranları sırasıyla %72.8, %7.6, %6.1 ve %3.6 olmaktadır. Geri kalan yaklaşık %10'lu rezerv ise Şekil 2.1'deki gibi çeşitli ülkelere dağılmıştır (İnt.Kyn.5).



Şekil 2.1 Dünyadaki bor rezervleri (% olarak) (İnt.Kyn.5)

2.1.1 Borlama

Borlama, malzeme yüzeyindeki bor atomlarının difüzyonu ile oksit tabakası oluşturma ve malzeme yüzeyini güçlendirme işlemidir. Borlama, demir ve çeliğin yüzey özelliklerini iyileştirmek için kullanılan termokimyasal yöntemlerden biridir (Turku vd. 2014).

Borlama, yüzey işlemlerinden biri olarak bilinir ve termokimyasal bir işlemdir. Bu işlem, metal ve alaşım malzemelerinin yüzeylerinde sertlik değerlerini artırmak ve korozyon direncini artırmak için kullanılır. Borlama, genellikle 700 ila 1000°C sıcaklık aralığında, 1 ile 12 saat süren bir süreçtir. Borlama işlemi farklı ortamlarda gerçekleştirilebilir. Bu ortamlar katı, sıvı, gaz veya plazma olabilir. Borlama ortamı, kullanılan malzeme ve uygulama amacına bağlı olarak seçilir. Bu işlemle, çeşitli endüstriyel malzemeler üzerinde etkili sonuçlar elde edilebilir. Metal ve demir tabanlı alaşımlar (örneğin, çelikler), takım çelikleri, paslanmaz çelikler ve döküm çelikleri gibi malzemeler borlama işlemine tabi tutulabilir. Ayrıca, bu malzemeler içerisinde alüminyum ve silisyum gibi

elementler bulunabilir. Borlama işlemi, malzeme yüzeyinde bir bor katmanı oluşturur. Bu katman, yüzey sertliğini artırırken, aynı zamanda korozyona karşı direnci de artırır. Borlama işlemi, yüksek sıcaklıklarda bile malzemenin özelliklerini koruyabilme özelliği nedeniyle tercih edilir. Bu yüzden borlama işlemi endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Malzeme yüzeylerinin dayanıklılığını artırmak, korozyona karşı direncini güçlendirmek ve yüksek sıcaklıklarda istenen özellikleri korumak için sıklıkla kullanılır (Yiğit 2021).

Borlama işlemi sonucunda bor yüzeylerinde bir borür tabakası oluşur. Borür tabakası, çeşitli üstün özelliklere sahip olan çok sert bir katmandır. Bu tabakanın bazı özellikleri şunlardır: (Yiğit 2021).

Yüksek sertlik: Borür tabakası, genellikle 1500 ila 2300 HV arasında çok yüksek bir sertlik değerine sahiptir. Bu, malzemenin yüzey sertliğini büyük ölçüde artırır ve aşınma direncini geliştirir.

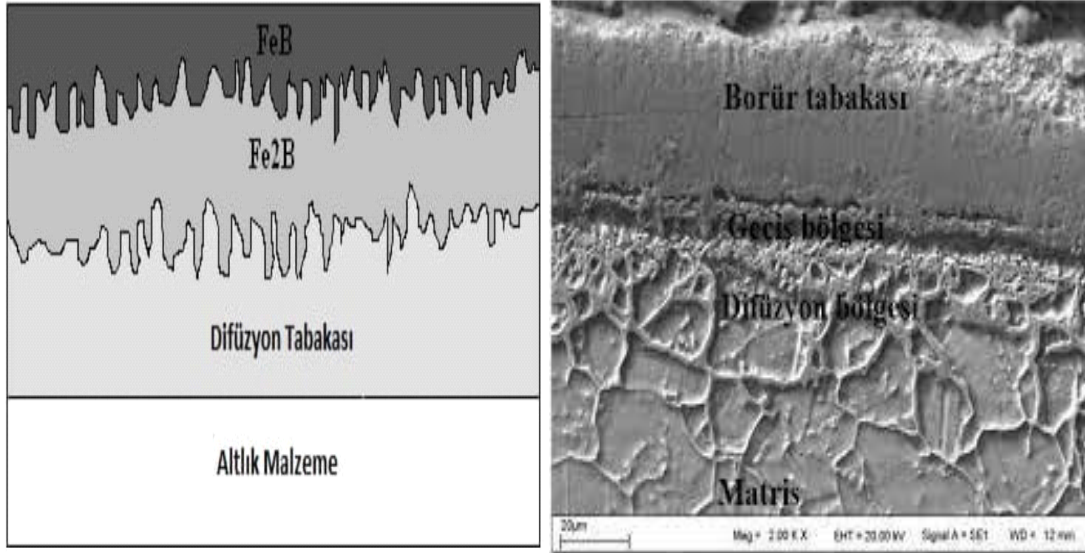
Yüksek ısı direnci: Borür tabakası, yüksek sıcaklıklara dayanabilme özelliğine sahiptir. Bu, malzemenin yüzeyinin, yüksek sıcaklıkta çalışan uygulamalarda stabil kalabilmesini sağlar.

Matrise yüksek tutunma özelliği: Borür tabakası, ana malzeme (matris) ile güçlü bir şekilde bağlanır. Bu tutunma özelliği, tabakanın aşınma veya soyulma riskini azaltır ve daha uzun ömürlü bir koruyucu kaplama sağlar.

Düşük sürtünme katsayısı: Borür tabakasının düşük sürtünme katsayısı vardır, yani yüzeyin kayganlığını artırır. Bu, sürtünmeye bağlı enerji kayıplarını azaltır ve uygulamalarda daha iyi bir performans sağlar.

Asidik ortamlara dayanıklılık: Borür tabakası, asidik ortamlara karşı yüksek dirence sahiptir. Bu, malzemenin korozyona karşı daha iyi korunmasını sağlar ve dayanıklılığını artırır. Borür tabakası ile ana malzeme arasında bir geçiş bölgesi bulunur. Bu bölge, tabakanın matris ile entegre olmasını sağlar ve bir geçiş yapısı oluşturur. Geçiş bölgesi,

katmanın mekanik olarak daha zayıf olabileceği bir alan olabilir, ancak yine de matris ile sağlam bir bağlantı sağlar. Sonuç olarak, borlama işlemiyle oluşturulan borür tabakası, malzeme yüzeyine üstün özellikler sağlar. Borlama sonrası yüzeylerde oluşan bor fazlarının görüntüsü verilmiştir. Şekil 2.2’de yer almaktadır.



Şekil 2.2 Borlama işlemi ile yüzeylerde oluşan borür fazlarının görünümü (İnt.Kyn.6)

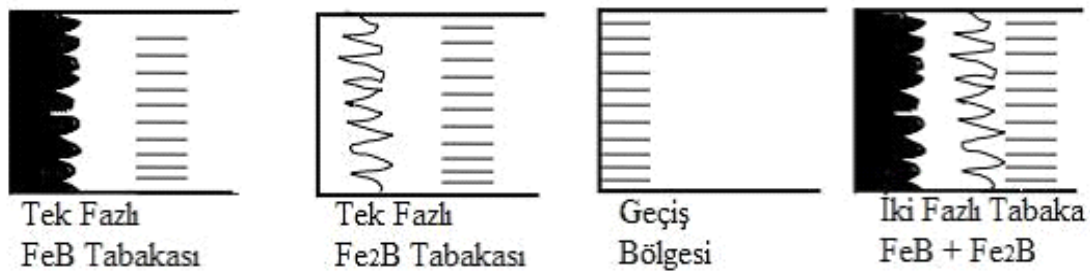
Fe_2B fazı, testere dişi şeklinde bir yapıya sahiptir ve bor tabakasında istenen tek fazdır. Bor açısından zengin olan Fe_2B fazı, FeB ve Fe_2B çift fazlı tabakaların oluşmasından daha fazla tercih edilir. FeB fazı, ağırlıkça yaklaşık olarak %16,23 oranında bor içerir. Ancak FeB fazı diğer demir-bor fazlarına kıyasla daha kırılgan bir yapıya sahiptir. Bu kırılganlık, FeB fazının oluşumunu istenmeyen hale getirir. Fe_2B fazının bor içeriği ise %8,93'tür. Fe_2B fazı, istenilen özelliklere sahip olduğu için tercih edilen bir fazdır. FeB ve Fe_2B fazları, termal genleşme katsayıları açısından birbirlerinden farklıdır. FeB fazının termal genleşme katsayısı α , $23 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ iken Fe_2B fazında ise α , $7,85 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ 'dir. Bu termal genleşme katsayısı farkı nedeniyle, FeB ve Fe_2B fazları birbirlerine basınç ve çekme gerilmeleri uygular. Bu durum, bor tabakasında kabuklanma, çatlama ve yırtılma gibi istenmeyen sonuçlara yol açar. İstenmeyen bu durumlar, uygulanan herhangi bir yük altında kaplama tabakasının yaprak ve pul pul şeklinde dökülmesine neden olur. Bu nedenle, FeB ve Fe_2B fazlarının bir arada bulunması, tek fazda bulunan Fe_2B 'ye kıyasla istenmeyen bir durumdur. İdeal olarak, bor tabakasında yalnızca Fe_2B fazının bulunması tercih edilir (Jain vd. 2002). Bor fazlarının bor özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Bor Fazlarının Bazı Özellikleri (Selçuk 1994)

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Ergime Noktası (HV)	1390	1550
Mikro Sertlik (HV)	1600-2000	1600-2400
Uzama Katsayısı (1000°C)	8.10 ⁻⁶ 1/	10-16.10 ⁻⁶ 1/°K
Termal İletkenlik (1000°)	0.2-0.3 W/(cm°C)	0.1-0.2 W/(cm°C)
Küri Noktası (°C)	742	325
Yoğunluk (gr/cm ³)	7	6.3
Kristal Sistem	Tetragonal hacim merkezli	Ortorombik
Kafes Parametreleri (Å°)	a:5.078, b:4.249	a:4.053, b:5.495, c:2.496

2.1.2 Borür Yapısı, Borlama Kinetiği ve Karakteristiği

Borür tabakasının özelliklerini etkileyen birkaç önemli faktör vardır. Bunlar; iş parçasının bileşimi, borlama prosesi, ortamı, ısıtılma sıcaklığı ve süresi olarak sıralanabilir. Borlanmış demir esaslı malzemelerin iç yapıları Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Bu malzeme FeB, Fe₂B veya FeB+Fe₂B ve geçiş bölgesi olmak üzere 3 ana bölümden meydana gelir (Tabur 2008). Bor elementinin çelik yüzeyinde oluşturduğu her iki katmanın da difüzyon doğrultusunda konumlanmış kolon biçimli kristal yapıya sahip olduğu bilinmektedir.



Şekil 2.3 Borür tabakaları ile geçiş bölgeleri temsili (Tabur 2008)

Borun çeliğe difüzyonu ile demir borürler (FeB, Fe₂B) oluşur ve borür tabakasının kalınlığı işlemin sıcaklığı ve süresi ile belirlenir. Her iki katmanda da difüzyon yönünde konumlandırılmış sütunlu bir kristal yapıya sahiptir. Ağırlıkça %8,83 B içeren FeB fazı, Fe₂B fazından daha kırılgan (Galibois ve Boutenko 1980) olduğu için genel olarak testere dişi morfolojisine sahip tek fazlı Fe₂B katmanının oluşturulması, FeB+Fe₂B içeren çift tabanlı

bir katmanın oluşturulmasına tercih edilir (Jain 2002). Borür tabakaları, mikroskop altında diş köküne benzer morfolojik görüntüler oluştururlar. Bu tabakalar, iş parçası yüzeyine paralel olarak oluşması yerine yüzeyin derinliklerine nüfuz ederek tutunma yüzey alanını artırır. Bu durum, yapısal mukavemetlerini artırır. Ancak borür tabakalarında bazı zorluklar da ortaya çıkabilir. Literatürde belirtildiği gibi, tabaka kalınlığı ve borür bileşiklerinin farklı ısıl genleşme katsayıları (FeB/Fe_2B) sebebiyle kırılmalar meydana gelebilir (Tabur 2008).

2.1.3 Borlama İşleminin Avantajları

Borlama işleminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Oksitleyici ve koroziif ortamlarda borlanmış malzemenin yorulma ömrü yüksektir: Borlama işlemi, malzemenin oksitleyici ve koroziif ortamlara karşı dayanıklılığını artırır. Bu da borlanmış malzemelerin yorulma ömrünün önemli ölçüde artmasını sağlar.
- Çoğu çelik türüne uygun bir yüzey sertleştirme işlemidir: Borlama, birçok çelik türüne uygulanabilen bir yüzey sertleştirme tekniğidir. Bu, geniş bir malzeme yelpazesinde uygulanabilme esnekliği sağlar.
- Hassas bir şekilde parlatılabilir: Borlama işlemi sonrasında, borlanmış yüzeyler çok hassas bir şekilde parlatılabilir. Bu, estetik gereksinimleri olan parçalar için önemli bir avantajdır.
- Yorulma ömrünü artırır: Borlama işlemine tabi tutulmuş işlenmiş parçaların yorulma ömrü özellikle koroziif ortamlarda %25 oranında arttırabilmektedir. Bu, malzemenin dayanıklılığını ve ömür boyu performansını önemli ölçüde artırır.
- Korozyon ve erozyon direncini artırır: Borlama, demir bazlı malzemelerin seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve erozyon direncini artırır. Borlama

işlemi, düşük alaşımlı çeliklerin H_3PO_4 , H_2SO_4 ve HCl gibi asitlere karşı dayanıklılığını artırabilir.

- Sürtünme katsayısını düşürür ve yağlayıcı kullanımını azaltır: Bor bileşikleri, sürtünme katsayısını düşürerek yağlayıcı kullanımını azaltır. Bu, sürtünme ve aşınma miktarını azaltır ve parçaların daha verimli çalışmasını sağlar. Ayrıca, soğuk kaynak yapma eğilimini de azaltır.
- Yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direnci sağlar: Borlanmış çelikler, yüksek sıcaklıklarda ($850^{\circ}C$) yüksek oksidasyon direncine sahiptir. Bu özellik, malzemenin yüksek sıcaklık uygulamalarında daha dayanıklı olmasını sağlar.
- Yüksek yüzey sertliği ve düşük yüzey sürtünme katsayısı: Çelik alaşımlarında borlama ile 1600-2800 Vickers Sertlik Değeri (VSD veya HV) aralığında yüksek sertlik değerleri elde edilebilir. Sadece karbon içeren çelikler üzerinde oluşan borür tabakalarının sertliği, semantasyon ve nitrürleme gibi diğer geleneksel sertleştirme yöntemlerine kıyasla çok daha yüksektir. Borlama işlemiyle elde edilen yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayısı, yüzey yorulması, aşınma ve yapışma yorulması gibi aşınma mekanizmalarına karşı direnç sağlar. Borlama işlemi, sürtünme katsayısını düşürerek yağlayıcı kullanımını en aza indirir. Parçalar arasındaki sürtünme ve aşınmayı azaltır ve enerji verimliliğini artırır. Bu, parçaların daha uzun ömürlü ve daha dayanıklı olmasını sağlar.
- Uygulama kolaylığı: Borlama, iş parçasının istenen bölgelerine ve düzgün olmayan karmaşık şekillere homojen olarak uygulanabilen bir işlemdir. Bu, çeşitli parça geometrilerinin borlanmasıyla kolaylaştırılır ve istenen sertlik özelliklerinin elde edilmesini sağlar.
- Sertlik stabilitesi: Bor tabakasının sertliği, yüksek sıcaklıklarda dahi stabil kalır. Bu, yüksek sıcaklık uygulamalarında bile borlanmış yüzeylerin dayanıklılığını korumasını sağlar.

- Yüksek sıcaklıkta sertlik stabilitesi: Borür tabakasının sertliği, yüksek sıcaklıklarda (650°C) bile sabit kalır. Bu, borlanmış parçaların yüksek sıcaklık uygulamalarında bile dayanıklılığını ve performansını korumasını sağlar (Yapar ve Taştan 2002).

2.1.4 Borlama İşleminin Dezavantajları

Borlama işleminin dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Genel olarak, borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri, yüksek basınçlı yüzeylerde karbürizasyon ve nitrürlemeye kıyasla çok zayıftır. Borlamanın bu özelliğinden dolayı dişli üretiminde bir sınırlama vardır.
- Borlama işleminden sonra genellikle parçanın nötr ya da vakum bir ortamda temperlenmesi ve sertleştirilmesi gerekir. Bu sayede borür tabakasının bütünlüğü ve mukavemeti artırılır.
- Süreç esnek değildir ve daha fazla özen gerektirir. Bu da prosesi pahalı hale getirir. İşçilik ve işletme maliyetleri, gaz halindeki plazma nitrürleme ve semantasyon gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerinden daha yüksektir.
- Çok düşük tolerans gereksinimleri için sadece elmas taşlama ile borlanmış yüzey sağlanmaktadır. Çünkü geleneksel yöntemler yüzeyde kırılmalara neden olur. Bu nedenle mükemmel borlama işlemleri çoğunlukla büyük kesitli parçalara uygulanmaktadır (Yapar ve Taştan 2002).

2.1.5 Borlama Yöntemleri

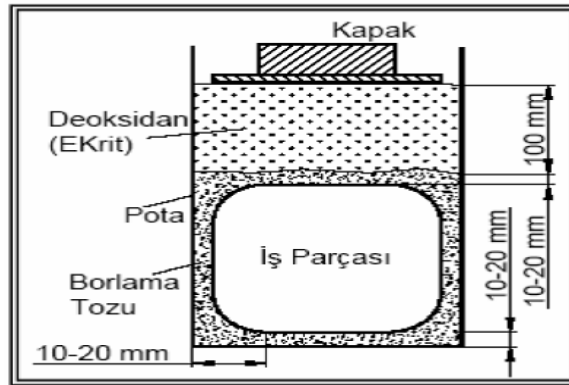
Borlama işlemi sırasında borun kaynağı ve bor sağlayan bileşikler farklı şekillerde kullanılabilir. Borlama işleminde borun katı, sıvı veya gaz fazında kullanılması mümkündür. Borür tabakalarının oluşumu için uygulanan yöntemleri şu şekilde sınıflandırabiliriz:

Termokimyasal Yöntemler: Termokimyasal bor kaplama yöntemleri: bor atomlarının metal içerisine difüzyonuyla bir kaplama tabakası oluşturan yöntemlerdir. Bu yöntemler genellikle yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilir ve farklı borlama ortamlarını içerir. Kutu borlama, sıvı borlama, gaz borlama ve pasta (macun) borlama olmak üzere termokimyasal bor kaplama yöntemlerinin dört ana grup altında toplanmıştır (Yapar 2003).

Termokimyasal Olmayan Yöntemler: Kimyasal buhar biriktirme (CVD), Plazma sprey kaplama ve iyon biriktirme, Fiziksel buhar biriktirme (PVD)' dir.

2.1.5.1 Kutu (Toz Ortamda) Borlama

Kolay uygulanabilirliği ve düşük maliyeti ile en yaygın borlama yöntemidir. Bu yöntemin avantajları, çeşitli malzeme türü için uygun olması, karmaşık bir mekanizma gerektirmemesi ve kullanılan toz bileşiminin değiştirilebilir olmasıdır. Şekil 2.4'de KB işleminin şematik gösterimi verilmiştir. Bu yöntemde bor donör malzeme içeren borlama tozu veya macunu, solventler, aktivatörler borlamanın yapılacağı bir kutu kullanılmaktadır (Davis 2002).



Şekil 2.4 Kutu borlama işleminin şematik gösterimi (Davis 2002).

Borlama yapılacak malzeme bor tozu içeren potaya yerleştirilir ve belirlenen sıcaklıkta aralığında (800°C-1050°C) ve sürede (1-8 saat) ısıtılır. Böylece bor atomlarının metal içerisine difüzyonunu sağlamak için gerekli olan sıcaklık ve süredir. Bor verici toz karışımı küçük boyutlu uygulamalarda daha kaliteli ve uygun borür tabakası verir (Sinha 1991).

Kutuda hazırlanan toz karışım borlama yapılacak parçayı en az 10mm-20mm arasında çevreleyecek şekilde kullanılır. Bor kaynağı olan bu toz karışımı içinde genellikle amorf-bor, bor-karbür (B_4C), ve ferrobör içerir. Çünkü amorf-bor ve ferrobör çok iyi bir bor donörleri oldukları için metal yüzeyinde kalın bir borür tabakası oluştururlar (Özbek 2002).

Borlama tozlarının üzerine dolgu malzemesi olarak SiC veya Al_2O_3 doldurulur. SiC ve Al_2O_3 çözünmeyi kolaylaştırır. $NaBF_4$, $(NH_4)_3BF_4$, KBF_4 aktivatör olarak kullanılır. Hava girişimini yani oksitlemeyi engellemek için potanın üzerine kapak kapatılmıştır. Kutunun hacmi, fırının hacminin % 60'ını geçmemelidir (Davis 2002).

Literatürde bor kaynağı olarak kullanılan toz karışımlar;

- % 84 B_4C , % 16 $Na_2B_4O_7$
- % (3-5) KBF_4 , % (95-97) Amorf Bor
- % 100 B_4C
- % (20-60) Fe_2O_3 , % (40-80) B_4C
- 15 Na_2CO_3 , %85 B_4C
- % 5 KBF_4 , % 50 B_4C , % 45 SiC
- % 90 SiC, % 5 B_4C , % 5 KBF_4

şeklinde kullanılmaktadır (Sinha 1991, Özbek ve Bindal 2002).

2.1.5.2 Sıvı Borlama

Sıvı borlama yöntemi, borlama banyosunun sıvı halde olduğu bir yüzey işleme yöntemidir. Bu işlem genellikle $670^{\circ}C$ ile $1000^{\circ}C$ arasında bir sıcaklıkta gerçekleştirilir. Sıvı borlama prosesi, elektrolitik ve elektroliz olmayan sıvı borlama prosesleri olmak üzere iki ana gruba ayrılır (Bozkurt 1984).

Elektrolitik Sıvı Borlama: Bu yöntemde, borlama banyosu bir elektrolit içerir ve elektroliz ile borlama işlemi gerçekleştirilir. Bir anot ve katot kullanılır ve elektrik akımı uygulanarak borlama banyosu içinde kimyasal reaksiyonlar gerçekleştirilir. Elektrolitik sıvı borlama işlemi, katot üzerinde oluşan borür tabakasının oluşumunu sağlar. Bu

yöntem, daha kontrollü bir kaplama sağlar ve daha homojen bir borür tabakası oluşturabilir (Yapar 2003).

Elektroliz sıvı borlama yöntemi; yüksek sıcaklıklarda tuz banyosu olarak elektrolit kullanan elektrolize benzer. Anot olarak grafit, katot olarak iş parçası tercih edilir. Akımın yoğunluğu genellikle 0.2-0.7 A/cm², voltajı ise çoğunlukla 2-14 V (Volt) arasındadır. İşlem 800 – 1000°C sıcaklık aralığında 30 – 60 dakika süreyle uygulanır.

Elektrolitik Sıvı Borlama Yöntemi; demir esaslı malzemeler için uygun bir yöntemdir. Boraks bazlı ergiyik içeren banyo içinde yapılır. Çizelge 2.3’de borlayıcı kaynaklar ve bazı özellikler görülmektedir. %30 B₄C banyoya ilave edilir. Borlama işlemi, B₄C’nin çok etkili bir indirgeyici olan ferro alüminyum ile değiştirilmesiyle de geliştirilebilir. En iyi sonuçlar %55 boraks, %40-50 ferro boron ve %4-5 ferro alüminyum içeren banyo ile elde edilir. Ayrıca %75 KBF₄ ve %25 KF tuz banyosu ile 670°C altındaki sıcaklıklarda nikel alaşımlarının borlanması kullanılır. Sıvı borlama ayrıca; boraks, ferro silis, borik asit ve sodyum sülfat (NaSO₄) esaslı tuz banyolarında da gerçekleştirilmektedir. Atmosfere açık olmamasından dolayı ortamdaki oksijenden etkilenmemesi prosesin avantajından birisidir. Tuz banyosu sıcaklığının 850°C’nin altına düşmesiyle banyo içindeki boraksın viskozitesi artar ve difüzyon mekanizması durur. Bu da prosesin en önemli dezavantajıdır (Yapar 2003).

Çizelge 2.3 Uygun bor sağlayıcıları ve bazı özellikleri (Matuschka 1980)

Bor Kaynağı	Kimyasal Bileşim	Molekül Ağırlığı (gr)	Yüzde Bor Miktarı	Ergime Sıcaklığı(°C)
Bor Karbür	B ₄ C	55,29	78,28	2450
Metabor Asidi	HBO ₂	43,83	24,69	-
Bor Oksit	B ₂ O ₃	69,64	31,07	450
Potasyum Bor Florür	KBF ₄	69,67	15,52	-
Susuz Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	201,26	21,50	741
Sodyum Bor Florür	NaBF ₄	109,81	9,85	-
Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	381,42	11,35	-

2.1.5.3 Gaz Borlama

Borlama ortamının gaz fazında olduğu borlama işlemidir. Bu işlemde kullanılan gaz karışımı H_2 ve Ar gazlarının belirli bir oranda karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Borlama işlemi buharlaştırıcıdaki gazlaştırılmış bor kaynağının (BCl_3) sızdırmaz paslanmaz çelik haznede numune üzerine püskürtülmesiyle yapılmaktadır. Borlama işlemi belirli bir sıcaklık ve basınç aralığı yapılır. Sıcaklık genellikle 700 -950 °C arasında olup ve basınç ise 67 kPa (0,67 Bar) değerindedir (Bayça 2008). Gaz borlaştırmada kullanılan bor içeren gazlar, bor halojenler veya bor hidritlerdir. Gaz borlaştırmada çoğunlukla kullanılan ortamlar aşağıda verilmiştir (Ersöz 2008):

- $(CH_3)_3B$ ve $(C_2H_5)_3B$ gibi organik bor bileşikleri
- Diboran (B_2H_6)- H_2 karışımı,
- Bor halid- H_2 veya (%75 - %25 N_2 - H_2) gaz karışımı

Gaz borlamada, gaz sirkülasyonu sonucunda daha uniform bir bor dağılımı elde edilir ve sonrasında temizlik gerektirmediğinden numune kolay elde edilir (Şahin 1999).

2.1.5.4 Pasta (Macun) Borlama

Borlama tozlarının macun kıvamına getirilerek kullanıldığı bir borlama yöntemidir. Bu yöntemdeki en önemli avantajlardan biri, kısmi borlama yapabilme yeteneğidir. Macun haline getirilen borlama maddesi, sertleştirilerek 3-6 mm kalınlığında kaplanacak yüzeye uygulanır ve kül fırınına konulmadan önce kurumaya bırakılır. Kurutma işleminden sonra, macunlanan bölgeler fırına yerleştirilir ve uygun sıcaklık sağlanarak borlama gerçekleştirilir. Bu yöntemde borlama işlemi mutlaka koruyucu bir gaz ortamında yapılmalıdır. Bu yöntemin işleme süresi, kutu borlama yöntemine kıyasla daha kısadır. Macunun borlama işleminden sonra numune yüzeyine yapışma eğilimi ise bir dezavantaj olarak gösterilebilir. Ancak bu etkiyi en aza indirmek için çeşitli önlemler alınabilir. Sulu sodyum silikat solüsyonu, organik solüsyonlar veya %3 polivinil alkol veya %0.5 metil selüloz içeren sulu solüsyonlar gibi maddeler kullanılarak yapışma azaltılabilir. Macun borlama yöntemi, özellikle karmaşık şekillere sahip parçaların belirli bölgelerini seçici olarak borlamak için uygundur. Kısmi borlama yapabilme yeteneği, iş parçasının yalnızca

belirli bölgelerinin borlanması gerektiren durumlarda kullanışlıdır. Bu yöntem, diğer borlama yöntemleriyle kıyaslandığında daha kısa sürede işlem tamamlama avantajı sunar. Ancak dikkat edilmesi gereken noktalar arasında yapışma problemleri ve uygun koruyucu gaz ortamının sağlanması bulunur. Macun ile borlama yönteminde kullanılan koruyucu gazlar ve yüzdesel kimyasal özellikleri Çizelge 2.4’de verilmiştir (Çalık 2005).

Çizelge 2.4 Macun ile borlamada kullanılan koruyucu gazlar ve özellikleri (Çalık 2005)

Koruyucu Gazın Adı	Kimyasal Bileşimi
Argon	% 99,996 argon
Kalıp gaz (formier gazı)	% 5-30 H ₂ kalanı N ₂
NH ₃ spalt gazı (Amonyak)	% 75 H ₂ , % 25 N ₂
Saf Azot	% 99 N ₂ , % 1 H ₂

2.1.5.5 Plazma (İyon) Borlama

Plazma borlama, 800-1100 °C sıcaklıkta, yaklaşık 10⁻² Pa düşük basınçta oluşan bir plazmada, bor bileşikleri olan BCl₃, BF₃, B₂H₆ ve trietil boran (TEB) ve hidrojen gazı kullanılarak yapılan borlama işlemidir (Barış 2007).

Plazma, iyonlar, elektronlar, uyarılmış atomlar, fotonlar, nötr atomlar veya moleküllerin bir karışımıdır. Plazma genellikle ısı enerjisi, radyasyon veya elektriksel boşalma gibi enerji kaynakları kullanılarak oluşturulur. En yaygın kullanılan plazma yöntemi ise elektriksel boşalmadır (Barış 2007). Elektriksel boşalma yönteminde, gaz ortamındaki iki iletken plaka arasına bir elektrik voltajı uygulanır. Belirli koşullar sağlandığında ve uygulanan voltaj gazın plakalar arasındaki kırılma gerilimini aştığında, plakalar arasında bir elektrik akımı oluşur ve plazma oluşumu gerçekleşir. Bu plazma, yüksek sıcaklıklarda ve yoğunluklarda iyonlar, elektronlar ve diğer parçacıklar içerir (Bayça 2004).

Plazma borlama işleminin son yıllarda diğer borlama yöntemlerine kıyasla daha yoğun olarak çalışmaktadır. Bunun nedeni, klasik borlama, tuz borlama ve gaz borlama gibi yöntemlerin çevreye olumsuz etkileri olabileceğidir. Plazma borlama ise daha çevre dostu bir yöntem olarak görülmektedir. Plazma borlama işlemi, daha az kirletici etkiye sahip olması ve daha iyi kontrol edilebilir özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Bu

yöntemde, plazma enerjisi kullanılarak yüksek sıcaklıklar elde edilir ve malzeme yüzeylerinde istenen kimyasal reaksiyonlar gerçekleştirilir (Bayça ve Şahin 2004).

2.2 Oksidasyon

Oksidasyon veya karartmanın metalin korozyon direncini arttıran bir uygulamadır. Bu uygulama yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir ve öncesinde metale yağlama işlemi uygulanması önerilir. İşlem sırasında, metale koyu siyah bir görüntü verilir ve koruyucu yağ ile işlem devam ettirilir (Travis 1984). Oksidasyon, metal enjeksiyon uygulamalarında kullanılan bir işlemdir. Bu işlemde, metale uygulanan yağlama işlemi sonrasında oksidasyon yapışma ve adhesif aşınma gibi sorunların yaşandığı durumlarda koruyucu bir oksit filmi oluşturulur. İşlem sonrasında, yüzeyde 2-5 µm kalınlığında Fe_2O_3 ve Fe_3O_4 demir oksit filmi oluşur. Bu film, ergimiş metal ile kalıp yüzeyi arasında bir bariyer oluşturarak mekanik ve intermetalik faz oluşumuna bağlı yapışmayı engeller (Travis 1984).

Özellikle karmaşık şekilli kalıplarda, soğutmanın yetersiz kalabileceği veya yağlayıcı ve soğutucu spreynin ulaşmasının zor olduğu durumlarda, ilk kullanımdan önce oksidasyon yapılması önemlidir. Oksidasyon, metalin adhezyon kalitesini artırır, boya ve diğer işlemlerin daha iyi tutunmasını ve daha uzun ömürlü olmasını sağlar. Ayrıca, boyama öncesi yapılan oksidasyon işlemi, siyah oksidasyon olarak da adlandırılır ve boyanın dökülmesini azaltır (Mahboubi 2004).

Sonuç olarak, oksidasyon uygulaması, metalin korozyon direncini arttıran bir işlemdir. İşlem öncesinde metale yağlama yapılması ve oksidasyon sonrasında ince bir yağla yağlanması önerilir. Oluşan Fe_3O_4 filmi genellikle 2-4 µm kalınlığındadır. Bu şekilde, metalin dayanıklılığı ve işlevselliği artırılarak daha uzun ömürlü ve koruyucu bir yüzey elde edilir (Mahboubi 2004).

Oksidasyon'un kullanıldığı alanlar Çizelge 2.5'de verilmiştir.

Çizelge 2.5 Oksidasyon'un kullanıldığı alanlar (İnt.Kyn.7).

Oksidasyon prosesinin kullanıldığı alanlar

Alüminyum Ekstrüzyon Kalıpları
Alüminyum Enjeksiyon Kalıpları
Plastik Enjeksiyon Kalıplar
Gaz Amortisör Milleri
Pompa Milleri
Tekstil Makineleri Parçalarında
Silah Parçalarında
Otomotiv Mekanik Parçalarında

Oksidasyon işleminin avantajları Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6 Oksidasyon işleminin avantajları (İnt.Kyn.7).

Oksidasyon prosesinin avantajları

Yapışmaya bağlı adhesif aşınmayı azaltır
Parça yüzeyini korozyona karşı korur
Üründe yapışmaya bağlı yüzey bozukluklarını azaltır
Dekoratif görüntü sağlar

2.3 Borlama ve Oksidasyon ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Diaz-Guillen vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, beyaz tabakalı ve beyaz tabakasız nitrülenmiş AISI D2 takım çeliğinin ve post oksidasyon dubleks işleminin aşınma performansı ve mekanik tepkisi üzerindeki etkisini araştırmışlardır (Diaz-Guillen vd. 2020). Plazma işleminden önce numuneler ön ısıtma (815°C-20 dk), östenitleme olarak (1000°C-28 dk), yağda su verme ve çift tavlama (her biri 200°C-60dk) ile ferrit-martensit yapısı oluşturulmuştur. Beyaz tabakasız nitrüleme işlemini 450°C'de 4 saat, beyaz tabakalı nitrüleme işlemini 550 °C'de 5 saat süreyle uygulamışlardır. Beyaz tabakalı ve tabakasız numunelere ilaveten 500°C'de 1 saat süreyle %30O₂+%70H₂ gaz karışımında plazma ortamında oksidasyon yapılmıştır.

Mikro sertlik ve nano sertlik plazma nitrülemeyle arttırılmış ancak oksidasyon sonrası işlemle hafif bir azalma meydana gelmiştir. Post oksidasyona maruz numunelerde magnetit ve hematit fazları oluşmuş, aşınma mekanizması da abraziv aşınmadan adhesiv aşınmaya değişmiştir. En düşük aşınma hızı; beyaz tabakasız nitrüleme + oksidasyon yapılmış numunede, sonra sırasıyla beyaz tabaka+oksidasyon, oksidasyon, beyaz tabakasız nitrüleme, beyaz tabakalı nitrüleme şeklinde olduğu tespit edilmiştir.

Wang vd. (2014) yaptığı çalışmada plazma elektrolitik borkarbürleme (PEB/C) işlemi uygulanan Q235 düşük karbonlu çeliğinin tüp fırında 500°C ve 600°C’de hava ortamında 100 saat oksidasyon davranışlarını incelemişlerdir. Çelik altlık ve PEB/C numunelerinin izotermal oksidasyon testlerinden sonra yüzey morfolojilerini, mikro yapılarını ve faz bileşenlerini araştırmak için SEM ve XRD gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, PEB/C çeliklerinin 500°C ve 600°C izotermal oksidasyon altında işlenmemiş alt tabakadan çok daha düşük ağırlık kazancına sahip olduğunu gösterdi. Farklı borür tabakası kalınlığına sahip PEB/C çeliğinin oksidasyon direnci benzerdi. 600°C ‘de PEB/C numunelerinin nihai ağırlık kazancı, işlemsiz çelikten 4-5 kat daha düşüktür. Bu, yüksek sıcaklık ortamında yüksek oksidasyon direncine sahip olan borür tabakasında iyi termal stabiliteye sahip Fe₂B fazının oluşumuna bağlandı. Plazma elektrolitik borkarbürleme, çeliklerin oksidasyon direncini geliştirmek için umut verici bir yöntemdir. Düşük karbonlu çelik için borür tabakası oksidasyonu aktivasyon enerjisini büyük ölçüde azalttığını tespit etmişlerdir.

Şen vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada borlanmış ve kısa süreli oksitlenmiş AISI 4140 çeliğinin aşınma davranışı incelenmiştir. Boraks, borik asit ve ferro silikondan oluşan tuz banyosunda borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca borlanmış çeliğe kısa süreli oksitleme işlemi uygulanmıştır. Numune üzerinde camsı yapıda bor oksit tabakası oluşmuştur. Kısa süreli oksitleme işlemi 750°C’de 3 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Oksit ve taramalı elektron mikroskobu borlanmış tabakanın SEM enine kesit incelemeleri, iğne şeklinde bir morfoloji ortaya çıkmıştır. Oksit işlemine tabi tutulmayan borür numunelerin yüzeyinde oluşan FeB ve Fe₂B, metalografik teknik ve X-ışını kırınımı (XRD) analizi ile yapılmıştır (Şen vd. 2006). Borlama borik asit ve ferro silikondan oluşan bir tuz banyosunda gerçekleştirilmiştir. Banyo sıcaklıkları 850°C ve 950°C ‘de, atmosferik basınçta borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. 2-6 saat borlamadan sonra kısa süreli oksitleme işlemi 750°C sıcaklıktaki fırında 3 dakika açık havada gerçekleştirilmiştir.

Borlanmış AISI 4140 çeliğinin enine kesitlerin optik ve SEM incelemeleri, iğne şeklinde kompakt ve gözeneksiz bir yapı ortaya çıkarmıştır. Alt malzemenin 202 µm derinliğe kadar yapı ve filmi iyi yapışmıştır. Borlanmamış ve borlanmış çeliklerin sürtünme

katsayısının 0,50 ile 0,60 arasında değiştiği ancak kısa süreli oksitleme işlemi sonrasında borlanmış çeliğin sürtünme katsayısının 0,12'ye düştüğü öngörülmüştür.

Kemin Li vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada ön oksidasyon işlemiyle Fe_2B 'nin tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Fe_2B , elektrikli kutu fırında $750^{\circ}C$ 'nin altında 9 dakikalık bir süreyle oksitlenmiştir. Deneyler UMT-Tribolab test cihazında gerçekleştirilmiştir. Oksit tabakası Fe, Fe_2O_3 , B_2O_3 ve H_3BO_3 'ten oluşmuştur. Fe_2B 'nin oksidatif yönü numune yüzeyine dik şekilde ve Fe_2B kristallerinin oksidatif yönü düzensiz olduğu görülmüştür. 0,1 m/s'de sürtünme katsayısı en düşük seviyede bulunmuştur. Oksitlenmiş Fe_2B 'nin aşınma mekanizmaları çoğunlukla adhezif (yapışma) ve abrazif aşınmalardır.

Kartal vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada boraks bazlı bir elektrolit içerisinde 1123 K ve 1273 K arasında değişen sıcaklıklarda 200 mA/cm^2 sabit akım yoğunluğunda gerçekleştirilen elektrokimyasal borlama sırasında düşük karbonlu çelik altlıklar üzerinde oluşan borür katmanlarının büyüme kinetiği araştırılmıştır. 5-120 dakikalık süreler için KB' dan sonra hem FeB hem de Fe_2B fazlarının varlığı X-ışınımı kırınımı (XRD) yöntemiyle tespit edilmiştir. Mikroyapısı incelendiğinde her iki borür fazı için de çok yoğun ve kalın bir tabaka oluşturduğu gözlemlenmiştir. Borlanmış çelik numunelerin mikro sertlik testi, borlanmış yüzeylerin sertliğinde önemli bir artış $1700 \pm 200 \text{ HV}$ gösterirken, borlanmamış çelik numunelerin sertliği yaklaşık $200 \pm 20 \text{ HV}$ göstermiştir. Uzun bir borlama süresi ve sıcaklık aralığı üzerinde yapılan sistematik çalışmalar, borür tabakası oluşum hızının borlama süresine bağlı olduğunu doğrulamıştır.

Juijerm ve Naemchanthara (2017) tarafından yapılan çalışmada martenzit yapıdaki paslanmaz çelik AISI 440C, $950^{\circ}C$ sıcaklıkta yaklaşık 4 saat borlama işlemine tabi tutuldu. Borür tabakasının FeB fazını ortadan kaldırmak için $850^{\circ}C$ sıcaklıkta yaklaşık 2-8 saat boyunca ısıtım işlemleri gerçekleştirilmiştir. Oksidasyon işlemleri, $900^{\circ}C$ 'lik belirli bir sıcaklıkta, farklı yüzey koşullarında gerçekleştirilmiştir. $850^{\circ}C$ sıcaklıkta yaklaşık 8 saat ısıtım işlemi sonrasında FeB fazının tamamen çözündüğü ve Fe_2B fazına dönüştüğü tespit edilmiştir. Borlanmamış, borlanmış ve 8 saatlik ısıtım işlemle borlanmış numunelerin oksidasyon davranışı parabolik bir davranış sergilerken, 2-6 saatlik ısıtım işlemle borlanmış numunelerin oksidasyon davranışı doğrusal bir davranış göstermektedir. Martensitik

paslanmaz çelik AISI 440C üzerindeki tek fazlı (Fe_2B) borür tabakası, incelenen diğer yüzey koşullarıyla karşılaştırıldığında en düşük oksidasyon oranına sahiptir.

Petrova vd. (2008) Düşük karbonlu çelik AISI 1018 üzerindeki bor kaplamanın yüksek sıcaklıkta oksidasyon davranışı havada 500, 600, 700, 800 ve 900°C’de incelenmiştir. Borlanmamış ve borlanmış numunelerin oksidasyon direnci, bir termogravimetrik analiz cihazında izotermal olarak incelenmiştir. Parabolik hız sabiti olarak temsil edilen oksidasyon hız sabiti parabolik hız yasasıyla değerlendirilmiştir. Borlanmamış ve borlanmış çelik numunelerdeki oksidasyonun aktivasyon enerjisi Arrhenius yasası ile belirlenmiştir. Yüzey karakterizasyonları için optik mikroskopi, XRD ve SEM kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar borlanmış kaplamanın düşük karbonlu çelik AISI 1018’in oksidasyon direncini yaklaşık 5 kat arttırdığını ve 900°C’nin altındaki sıcaklıklarda oksijenin çelik alt tabakaya nüfuz etmesini önlediğini göstermektedir.

Erdemir vd. (1999) tarafından yapılan bu araştırmada kısa süreli olması nedeniyle ‘flaş tavlama’ olarak adlandırılan basit bir tavlama prosedürüdür. Vanadyum diborür (VB_2) yüzeyleri üzerinde düşük sürtünmeli yüzey filmi oluşturmuştur. Bu tavlama kutu fırında 800°C’de gerçekleştirilir. 2.tavlama sırasında VB_2 ’nin açıkta kalan yüzeyi oksidasyona uğrar ve bir bor oksit (B_2O_3) tabakası oluşturur. Açık havada, B_2O_3 tabakası nem ile kendiliğinden reaksiyona girer ve bir bor oksit (H_3BO_3) filmi oluşturur. 440C çelik pimin sürtünme katsayısı H_3BO_3 filme karşı yaklaşık 0,05 iken, alınan VB_2 ’ye karşı 0,8’dir. Raman Spektroskopisi ve elektrona dayalı mikroskopi çalışmaları ile flaşla tavllanmış VB_2 ’nin ultra düşük sürtünme mekanizması anlatılmaktadır.

Erdemir vd (2004) tarafında yapılmış çalışmada borlanmış çelik malzemelerin yüzeylerinde ince bor oksit ve borik asit filmlerinin oluşumu ve kendi kendini yağlama mekanizmaları araştırılmıştır. Spesifik olarak, borlanmış çelik yüzeyler üzerinde cam benzeri bir bor oksit tabakasının oluşmasıyla sonuçlanan bir tavlama prosedürü geliştirilmiştir. Tavlama 750°C’de 5 dakika süreyle gerçekleşmiştir. Soğuma sırasında bor oksit tabakası çevredeki atmosferdeki nemle reaksiyona girerek ince bir borik asit filmi oluşturmuştur. Safir ve 440C çelik bilyaların borlanmamış ve borlanmış taraflara karşı ölçülen sürtünme katsayıları 0,4 ile 0,6 arasında değişmiştir. Ancak 750°C’de kısa süreli tavlama sonrasında borlanmış çelik yüzeylerin sürtünme katsayıları kararlı durumda

yaklaşık 0,05 olmuştur. Borlu yüzeylerdeki ince bor oksit ve borik asit filmlerinin oluşumunu ve kendi kendini yağlama mekanizmalarını belirlemek için kristal kimyasal bilgisi ve Raman spektroskopisi kanıtları kullanılmıştır.

Carbucicchio (1991) tarafından yapılan çalışmada termokimyasal ve kimyasal buhar biriktirme teknikleri kullanılarak çeşitli metaller üzerinde çok sert borik kaplamalar büyütülür. Bu şekilde birçok yüzey özelliği ve özellikle aşınma direnci önemli ölçüde iyileştirilebilir. Genellikle işlenen bileşenlerin korozyon davranışı da önemlidir. Özellikle oksitleyici atmosferler pek çok uygulamada söz konusu olduğundan kaplama çevre etkileşimleri önemli bir rol oynayabilir. Daha önceki bir çalışmada demir boritlerin oksidasyonunun erken aşamaları, tek fazlı sıkıştırılmış tozların 300-450°C düşük sıcaklıklarda akan oksijen içerisinde işlenmesiyle incelenmiştir. Bu makalede demir üzerinde termokimyasal olarak büyütülen hem tek fazlı hem de çok fazlı borür kaplamaların oksidasyonuna dikkat çekilmiştir. Tek fazlı halojenür kaplamalar Fe_2B katmanı ve tüm dış FeB taban katmanından oluşturulmuştur. Tüm borür katmanları tercih edilen güçlü kristalografik yönelimler sergilemiştir.

Dziarski (2021) tarafından yapılan çalışmada oksidasyon sıcaklığının tek fazlı borlanmış tabaka üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 1073-1273 K sıcaklık aralığında oksidasyon, iki bölge oksitlenmiş tabakanın oluşmasıyla sonuçlanmıştır. Dış bölge demir oksitler içermektedir ve iç bölge demir boratlardan oluşmaktadır. Fe_2B fazının yoğun çözünmesinin 1173 K sıcaklıkta başladığı ve borca zengin $FeBO_3$ fazının ortaya çıkmasının nedeni olduğu bulunmuştur. Sıcaklığın 1273 K'ye yükselmesi borlu tabakanın tamamen çözünmesiyle sonuçlanmıştır. 1073K'deki oksidasyonun demir borür Fe_2B 'nin nanomekanik özellikleri üzerinde olumsuz bir etkisi gözlenmemiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Böhler K340 Çeliği

K340 soğuk iş takım çeliğini Çağ Çelik A.Ş. firmasından Ø26x1000 mm boyutunda tedariki sağlanmıştır. Malzeme sertliği yaklaşık olarak 180 HRB' dir (İnt.Kyn.2). Böhler K340 çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 K340 çeliğinin temel kimyasal bileşimi (ağırlıkça %) (İnt.Kyn.3)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Diğer İlaveler
1.10	0.90	0.40	8.30	2.10	0.50	Kalan

3.2 1.2990 Çeliği

1.2990 soğuk iş takım çeliği Cr, Mo, V alaşımlı ikincil sertleşebilen soğuk iş çeliğidir. Daha iyi kaynak yapılabilme, yüksek tokluk ve boyutsal değişiklik göstermeme özelliği vardır. Karbür açısından zengindir. PVD, Nitrasyon ve CVD kaplamalar için çok iyi bir temel malzemedir. Genellikle sertleştirilme işleminden sonra teslim edilir (İnt.Kyn.1).

Yüksek mukavemetli sacların sıcak ve soğuk şekillendirilmesinde, çekme, zımba ve kesme kalıplarında vb. kullanım alanı bulmuştur. 1.2990 çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 1.2990 soğuk iş çeliğinin temel kimyasal bileşimi (ağırlıkça %) (İnt.Kyn.1)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0.99	0.94	0.34	0.022	0.001	7.61	1.03	1.58

1.2990 hammaddesi Çağ Çelik A.Ş. firmasından 32x32x250 mm boyutunda 4 adet temin edilmiştir ve Ø25x11mm ölçüsünde tornalanmıştır.

3.3 Numune Hazırlama

Dolu mil olarak gelen K340 çeliği Ø25-26 mm çapında ve 11 mm kalınlığında numunelere olarak hazırlanmıştır. 1.2990 hammaddesi ise kütük olarak gelmiş olup, Ø26

mm ve yaklaşık olarak 11 mm kalınlığında tornalanarak ayarlanmıştır. Kesilen yüzeylerin paralelliğinin sağlanması için numunenin iki yüzeyi de torna tezgâhıyla alın tornalama işlemine tabi tutulmuştur. Hazırlanan numuneler 120-240-400-600-800'lük zımpara kâğıtlarıyla kademeli bir şekilde Metkon Forcipol 2V Grinder-Polisher markalı cihaz kullanılarak metalografik olarak zımparalanmıştır. Zımparalanan yüzeylerin pürüzlülük değerlerini belirlemek amacıyla Şekil 3.1'de gösterilen Taylor Hobson marka yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır ve numunelerin Ra değerleri yaklaşık olarak 0,07-0,12 arasında ölçülmüştür.



Şekil 3.1 Taylor Hobson marka yüzey pürüzlülük cihazı

3.4 Kutu Borlama ve Oksidasyon İşlemi

Kutu borlama işlemi için Afyon Kocatepe Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarından yararlanılmıştır. Ø110 mm çapında 100mm yüksekliğinde olan 3 adet pota içerisine dökülen Ekabor-II tozunun içine numuneler gömüldükten sonra işlem sırasında iç kısma numunelerin oksitlenmemesi için, hava girişimi engellemek adına üst yüzeye Ekrit tozu ilave edilmiş ve potanın kapağı kapatılarak şamot çamuru ile sıvanmıştır. Üç pota olmak üzere potalar kuyu tipi fırının içine yerleştirilmiş ve ısıtma işlemi başlamıştır. İşlem 2 farklı numuneler üzerinde (1.2990 ve K340) 950 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat fırın içerisinde kalmıştır ve ardından soğumaya bırakılarak numunelere kutu borlama işlemi yapılmıştır. Fırın içindeki sıcaklık istenen değere ulaştıktan sonra borlama işlemi için gereken süre tutulmuştur. Çeliklerin borlama prosesi öncesi ve sonrası süreçleri Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Çeliklerin borlama prosesi öncesi ve sonrası süreçleri a) Numunelerin potaya yerleştirilmesi, b) Potanın şamot çamuru ile kapatılması, c) Borlama işleminin yapıldığı kuyu fırını, d) Numunelerin fırında çıkarılması, e) Soğumaya bırakılması, f) Bir sonraki işlem için hazırlanması

Oksidasyon işlemi, Şekil 3.3'de görülen Protherm Furnaces marka endüstriyel fırınında gerçekleştirilmiştir. Özel hava giriş ve çıkış sistemi, fırın için sirkülasyonu sağlamaktadır. Aynı zamanda fırındaki hava ısıtıldığı için fırın içerisindeki ısı dağılımını korumaktadır. İstenilen sıcaklıklara çıkış süresi olarak 1 dakika da 10°C'de artırılabilecek şekilde

ayarlanmıştır. Borlama işlemi yapılmış numuneler 750°C'de 3 ve 5 dakika, 800°C'de 3 ve 5 dakika bekletildikten sonra fırın dışına alınarak oksitlenmeleri sağlanmıştır.



Şekil 3.3 Prother Furnaces endüstriyel fırını

Çizelge 3.3'de borlama ve borlama sonrası oksidasyon işlemlerindeki deney parametrelerine verilen kodlama işlemleri verilmiştir.

Çizelge 3.3 Borlama ve oksidasyon işlemlerinin parametre kodları

Parametre	Kodu
2s-9	950°C-2 Saat borlama
2s-7-3dk	950°C'de 2 saat borlama sonrası 750°C 3 dakika oksidasyon
2s-7-5dk	950°C'de 2 saat borlama sonrası 750°C 5 dakika oksidasyon
2s-8-3dk	950°C'de 2 saat borlama sonrası 800°C 3 dakika oksidasyon
2s-8-5dk	950°C'de 2 saat borlama sonrası 800°C 5 dakika oksidasyon
4s-9	950°C'de 4 saat borlama
4s-7-3dk	950°C'de 4 saat borlama sonrası 750°C 3 dakika oksidasyon
4s-7-5dk	950°C'de 4 saat borlama sonrası 750°C 5 dakika oksidasyon
4s-8-3dk	950°C'de 4 saat borlama sonrası 800°C 3 dakika oksidasyon
4s-8-5dk	950°C'de 4 saat borlama sonrası 800°C 5 dakika oksidasyon
6s-9	950°C'de 6 Saat borlama
6s-7-3dk	950°C'de 6 saat borlama sonrası 750°C 3 dakika oksidasyon
6s-7-5dk	950°C'de 6 saat borlama sonrası 750°C 5 dakika oksidasyon
6s-8-3dk	950°C'de 6 saat borlama sonrası 800°C 3 dakika oksidasyon
6s-8-5dk	950°C'de 6 saat borlama sonrası 800°C 5 dakika oksidasyon

3.5 XRD Analizleri

Borlanmış yüzeylerdeki mevcut fazların analizi Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (TUAM) bulunan Shimadzu XRD-6000 cihazında

CuK_a ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılarak 2θ 10-100° arasında gerçekleştirilmiştir. 950 °C’ de 6 saat süreyle KB numuneleri ile 6 saat borlama sonrası 750C°’de 3 dakika oksidasyon işleminin XRD analizi yapılmıştır.

3.6 Mikroyapı İncelemeleri

3.6.1 Numune Kesiti Alma, Bakalitleme ve Parlatma İşlemleri

Numunelere borlama işlemi ve akabinde yapılan oksidasyon işlemi sonrası tabaka kalınlığını görüntülemek için Ankara’da bulunan SDT Su Jeti firmasında hassas kesim yapılmıştır. Numuneler kesim sonrası korozyonu engellemek için etil alkol ile temizlenmiştir. Kesiti alınan numunelerin parlatılması amacıyla kesit yüzeyi kalıp içerisine dış yüzeye temas etmesi suretiyle kalıplara yerleştirilmiştir. Bakalite alma işlemi sıcak kalıplama işlemi ile uygulanmıştır. Kalıbın içerisinden çıkartılan numuneler 80, 120, 240, 400, 600, 800, 1000, 1200'lük zımpara kağıtları ile metalografik olarak zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Zımparalanan numuneler, çuhaya 1 µm boyutundaki alümina süspansiyon dökülmesi ile parlama işlemi yapılmıştır. Daha sonra mikro yapılarının incelemesi için dağlama yapılmıştır. %3’ü nitrik asit ve %97’si etil alkolden oluşan çözelti oluşturulmuştur. Hazırlanan dağlayıcı numune üzerine 4-5 damla dökülerek 15-20 saniye bekletilmiştir.

3.7 Mikrosertlik İncelemeleri

Numunelerin yüzey sertliğini ölçmek için Afyon Kocatepe Üniversitesinde bulunan Teknoloji ve Uygulama Araştırma Merkezinde (TUAM) yapılmıştır. Ölçümler 200 gr yük ve 15 saniye bekletme süresinde uygulanmıştır.

3.8 Aşınma Deneyleri

Kuru kaymalı aşınma testi için Afyon Kocatepe Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Şekil 3.4’te görülen bilye disk aşınma cihazı kullanılmıştır. Deney düzeneği içerisinde gömülü yazılım ile sürtünme katsayıları (μ) deney boyunca süre ve yol grafikleri ile anlık olarak kaydedilmiştir.



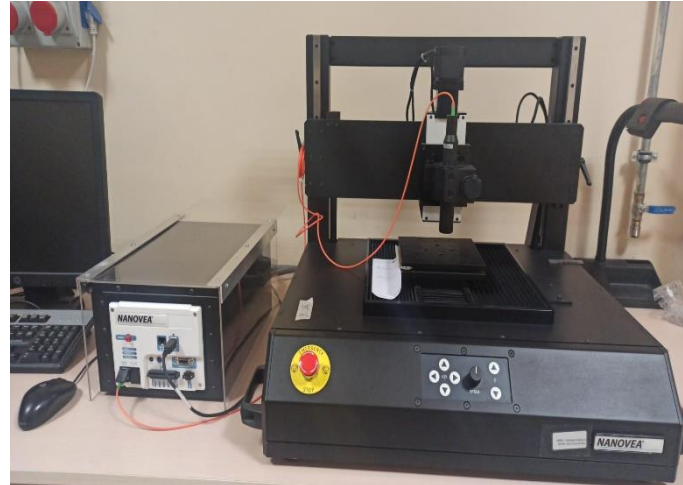
Şekil 3.4 Kuru kaymalı aşınma testi

Aşınma deneyleri için kullanılan parametreler Çizelge 3.4’ te verilmiştir.

Çizelge 3.4 Aşınma deneyi parametreleri

Kayma Mesafesi (m)	Yük (N)	İz Çapı (mm)	Kayma Hızı (m/s)	Devir Sayısı (d/dk)
300	5	15	0,3	382

Numunelerin aşınma alanı ve iz derinlikleri ölçümleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında Nanovea marka cihaz ile yapılmıştır. Aşınma derinliği ve alanı ölçümü için kullanılan cihaz Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Aşınma derinliği ve alanı ölçümü için kullanılan cihaz

Ölçümler sonrasında aşınma hızı 3.3 numaralı formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Aşınma\ hızı = \frac{Aşınma\ Hacmi}{Kayma\ mesafesi\ x\ Uygulanan\ yük} \quad (3.3)$$

Aşınma hacmi 3.4 ve 3.5 ile hesaplanır.

$$Aşınma\ hacmi = Aşınma\ alanı\ x\ Çevre \quad (3.4)$$

$$Çevre = \pi \times d \quad (3.5)$$

3.9 SEM ve EDS Analizi

Kutu borlama ve sonrasında yapılan oksidasyon işlemli numunelerin SEM ve EDS analizleri Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Merkez Laboratuvarında (AYBU) gerçekleştirilmiştir. SEM cihazı HITACHI SU5000 modelidir.

4. BULGULAR

4.1 Mikroyapı İncelemeleri ve Tabaka Kalınlıkları

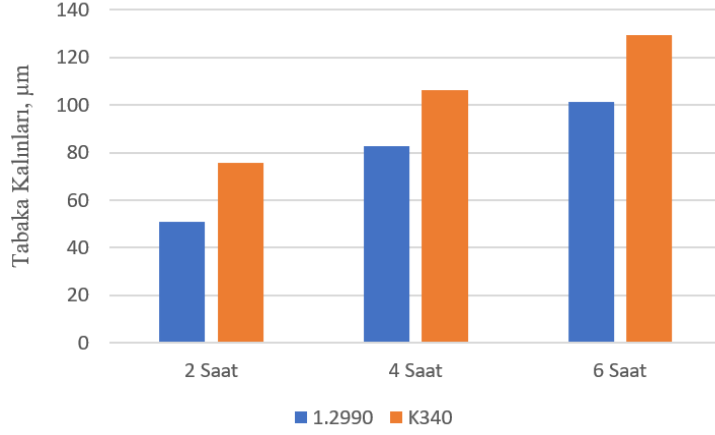
Çizelge 4.1’de borlanmış numunelerin tabaka kalınlıkları verilmiştir. Borlama işleminde malzemenin çeşitliliğine bağlı olarak aynı sıcaklıkta işlem sürelerinin artması borür tabaka kalınlığının da atmasına neden olmuştur. Bu durum literatürde gerçekleştirilmiş çalışmalar ile de uyumludur (Günen ve Kanca 2017). 1.2990 numunelerinde süre arttıkça tabaka kalınlıklarının arttığı gözlemlenmiştir. K340 numunelerinde de aynı sıcaklıkta işlem süreleri arttıkça tabaka kalınlıklarının arttığı gözlemlenmiştir. 1.2990 numunelerinde (2s-9, 4s-9) tabaka kalınlıklarında %61 oranında, (4s-9, 6s-9) %22 artış görülmektedir. K340 numunelerinde ise (2s-9, 4s-9) yaklaşık %40 oranında, (4s-9, 6s-9) %22 oranında artış görülmüştür. Borlama işleminde işlem sürelerine ve sıcaklıklara bağlı olarak tabaka kalınlıkları da değişmektedir. Bu çalışmada elde edilen veriler literatür ile uyumludur (Boztepe 2014).

Çizelge 4.1 Borlanmış 1.2990 ve K340 çeliklerinin tabaka kalınlıkları (μm).

Malzeme	2 saat	4 saat	6 saat
1.2990	51	82,86	101,38
K340	75,83	106,13	129,31

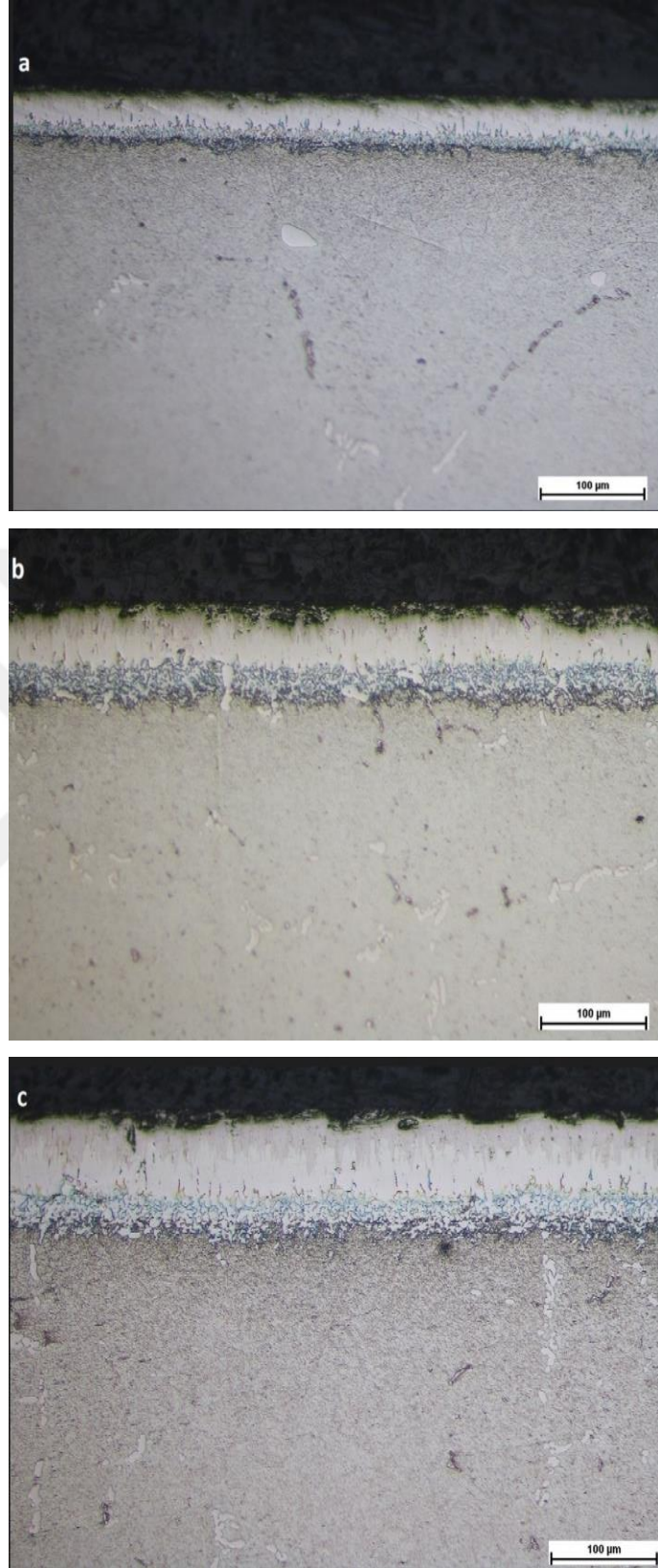
1.2990 ve K340 çeliklerini karşılaştırdığımızda; 2 saatlik borlanmış numunelerde K340 çeliğinin 1.2990 çeliğe göre %49’luk oranda tabaka kalınlığının fazla olduğu, 4 saatlik borlama işlemine tabi tutulmuş numunelerde K340 çeliğinin 1.2990 çeliğe göre %28’lik oranda bor tabaka kalınlığının fazla olduğunu, 6 saatlik borlanmış numunelerde ise K340 çeliğinin 1.2990 çeliğe göre %27,5’lik oranda bor tabaka kalınlığı daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. AISI 1050 çeliğini kullanarak borlama işlemi yapılarak 950°C’de 2,4 ve 6 saat süreyle bekletildikten sonra bor tabakasından tabaka kalınlıkları sırasıyla 68,2 μm, 75,1μm ve 108.71 μm’dir (Er ve Par 2004). 950°C’de 2,4 ve 6 saatte borlanan AISI 8620 çeliğin borür tabaka kalınlığı ortalama sırasıyla 65,02 μm, 180,52 μm ve 140,50 μm olarak ölçülmüştür (Efe 2022). AISI 1010 çeliğini 950°C sıcaklıkta 2,4 ve 6 saat sürelerde borlanmıştır. Borlanmış numune yüzeyindeki demir borür tabakasının kalınlığı sırasıyla 45 μm, 126 μm ve 155 μm olarak ölçülmüştür (Bayça ve Bican 2022).

Numune tabaka kalınlıklarının borlama işlemiyle olan ilişki Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Borlama süresinin artması tabaka kalınlıklarında artışa neden olmuştur.

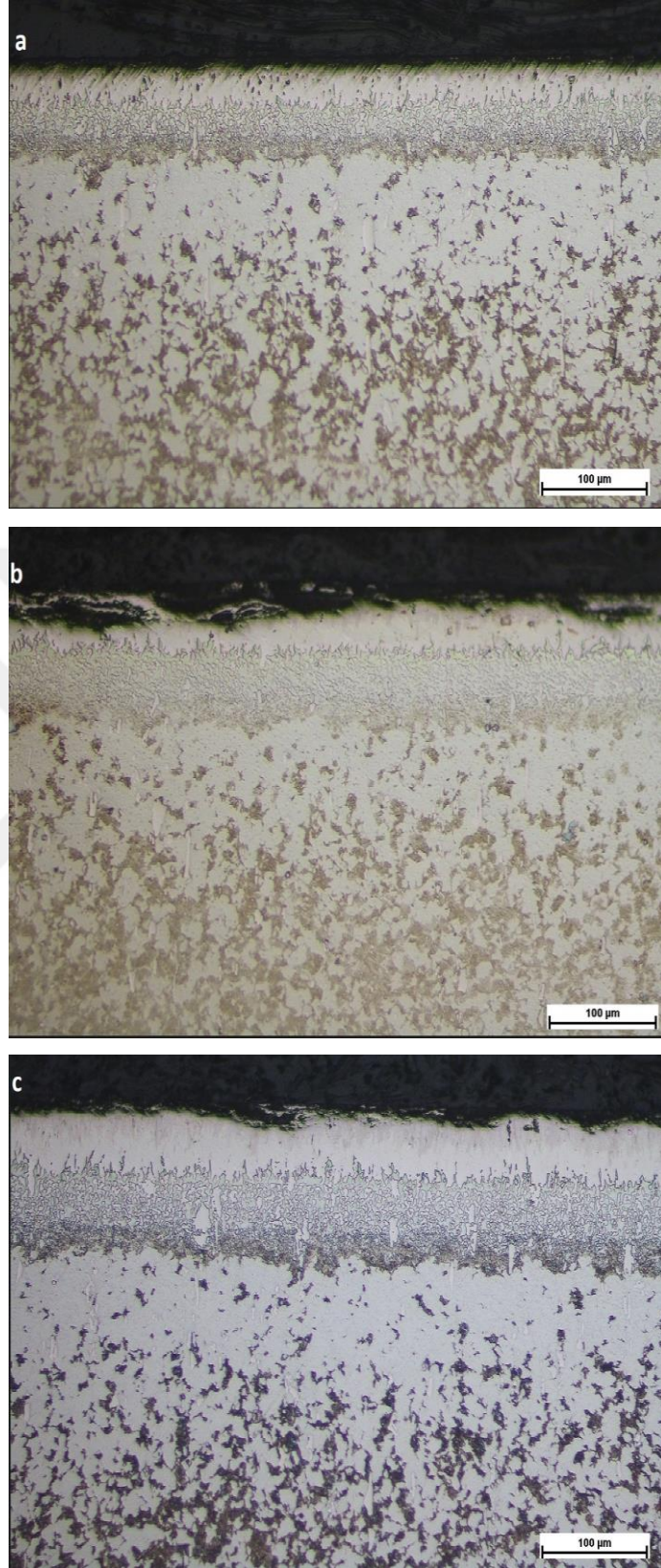


Şekil 4.1 Borlama yöntemiyle elde edilen tabaka kalınlıkları

Borlama sonrası numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 4.2 ve 4.3’te verilmiştir. Testere dişi yapısı borür tabakasının karakteristik bir özelliğidir. Diş şeklindeki geçişin oluşma miktarı sadece prosese bağlı değildir. Sıcaklık ve zamanın yanı sıra kaplama ve alt malzemenin içerisindeki alaşım elementleri de önemli rol almaktadır (Tabur 2008).

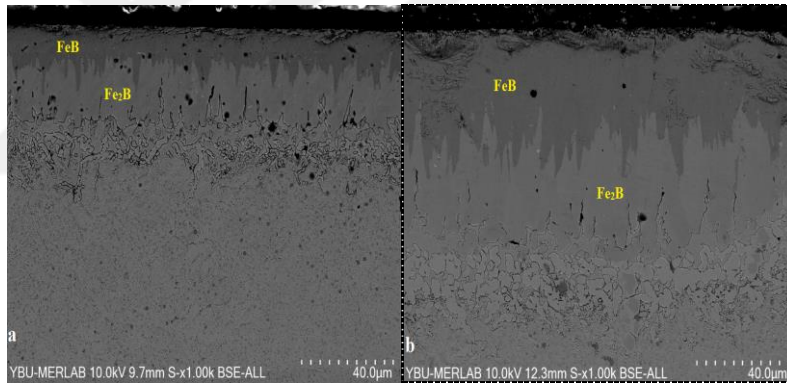


Şekil 4.2 Kutu borlanmış 1.2990 numunelerin optik mikroskop görüntüleri (a) 950 °C’de 2 saat (b) 950 °C’de 4 saat (c) 950 °C’de 6 saat

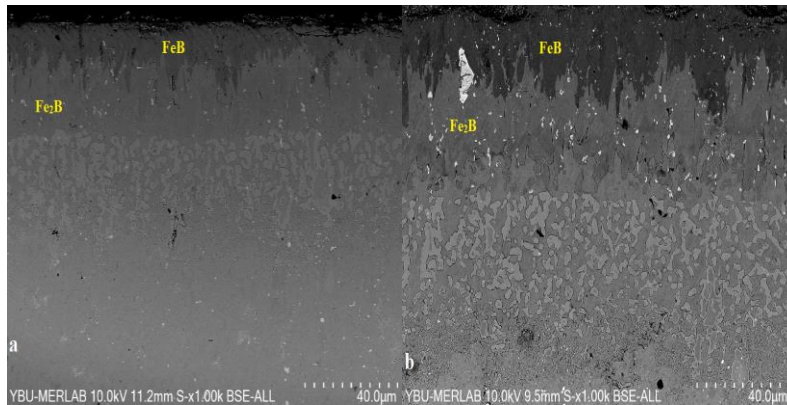


Şekil 4.3 Kutu borlanmış K340 numunelerin optik mikroskop görüntüleri (a) 950 °C’de 2 saat (b) 950 °C’de 4 saat (c) 950 °C’de 6 saat.

950°C’de 2 ve 6 saat sürelerince borlanmış kutu borlama numunelerinin üzerindeki bor tabakalarının SEM görüntüleri Şekil 4.4 ve 4.5’te gösterilmiştir. Kaplamaların görüntülerine baktığımızda testere dişine benzemektedir. 2 saat süre boyunca borlama işlemi uygulanmış numune de homojenliğin dışına çıkan siyah renkli çökelti şeklinde birikintiler oluşmuştur. Görülen bu yapıda dislokasyon yoğunluğunun artması yüzeyde oluşan deformasyon sonrası çatlakların oluştuğu görülmüştür (Bozkurt 2022). Yapılan çalışmada oluşan bor tabakasının kalınlıkları incelendiğinde borür tabakasının artması borlama süresinin uzunluğu ile paralellik gösterdiği tespit edilmiştir (Sarı 2019). Borlama işleminin yapıldığı sıcaklık ve süresinin artmış olması bor tabakası kalınlığının artmasına sebebiyet verdiğini tespit edilmiştir (Ünal 2013). 8620 kalite çeliğinin 950°C’de 6 saat borlanmış SEM görüntüsü incelendiğinde, 950°C’de 4 saat ve 900°C’de 6 saat yapılan borlama işlemlerine göre, metal borür tabakasının kalınlığının arttığı ve daha güçlü testere dişi şekli oluştuğu görülmüştür (Efe 2022).



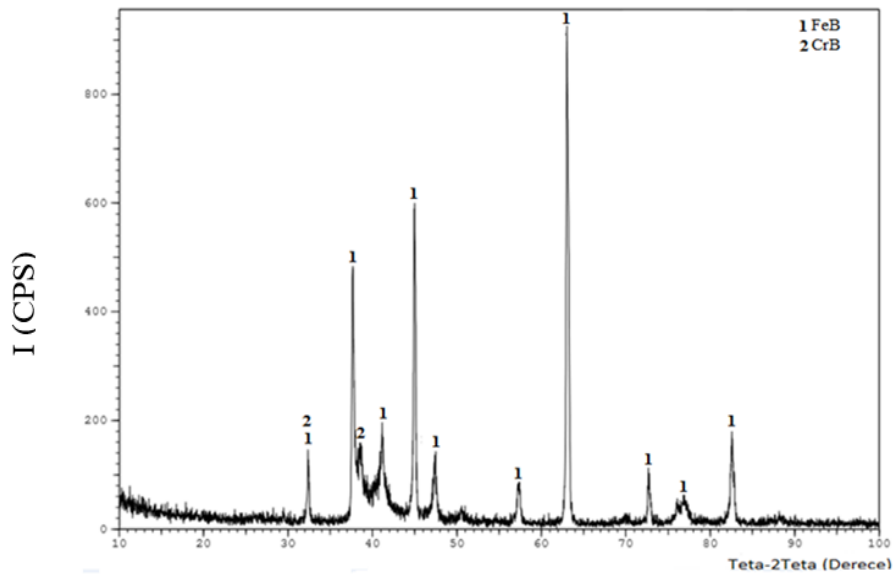
Şekil 4.4 1.2990 çeliğinin 2s-9 ve 6s-9 numunelerin SEM analizi (a) 1.2990 çeliğinin 2s-9 numunelerinin SEM analizi, (b) 1.2990 çeliğinin 6s-9 numunelerinin SEM analizi



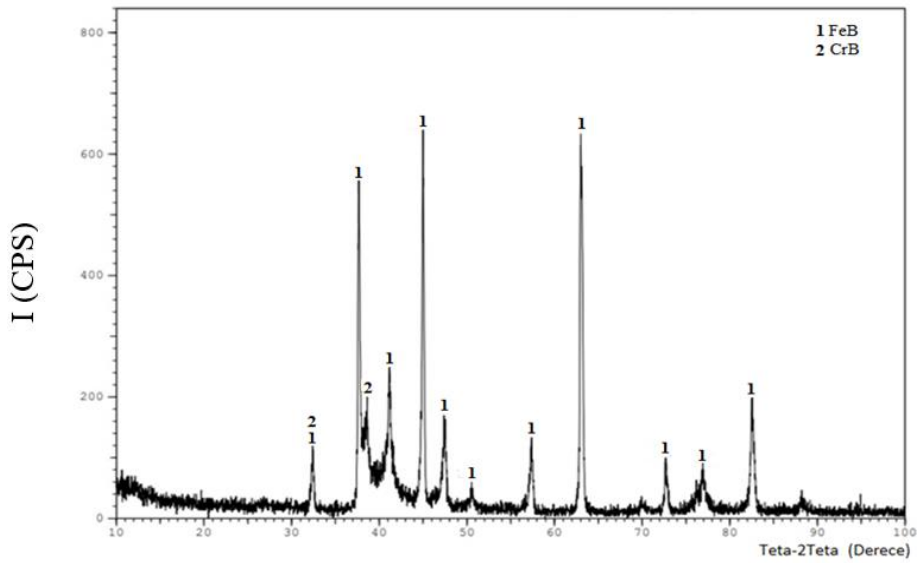
Şekil 4.5 K340 çeliğinin 2s-9 ve 6s-9 numunelerin SEM analizi (a) K340 çeliğinin 2s-9 numunelerinin SEM analizi, (b) K340 çeliğinin 6s-9 numunelerinin SEM analizi

4.2 XRD Analizleri

Şekil 4.6 1.2990 ve Şekil 4.7’de K340 çeliğinin 950° C’ de 6 saat borlama işlemi sonrası XRD analizleri verilmiştir. Alt malzeme içerisinde %7-8 oranında Cr olduğundan analizde 32°’de FeB yanında CrB fazı gözlemlenmiştir. Kondul ve Çetin (2022)’e göre 900°C’de borlama süresinin artmasıyla birlikte FeB yoğunluğu da artmaktadır. Yaptıkları çalışmada 900°’de aynı fazların oluştuğu ve FeB yoğunluğunun sıcaklığa bağlı olarak arttığı görülmüştür (Kondul ve Çetin 2022).

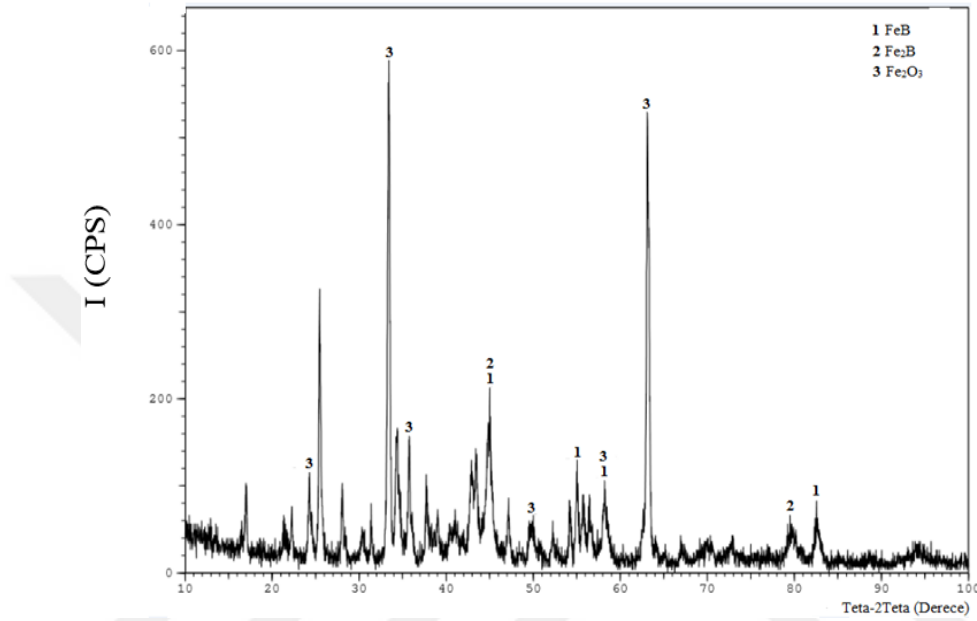


Şekil 4.6 1.2990 çeliğinin 950°C’de 6 saat boyunca borlama işlemi sonrası XRD analizi

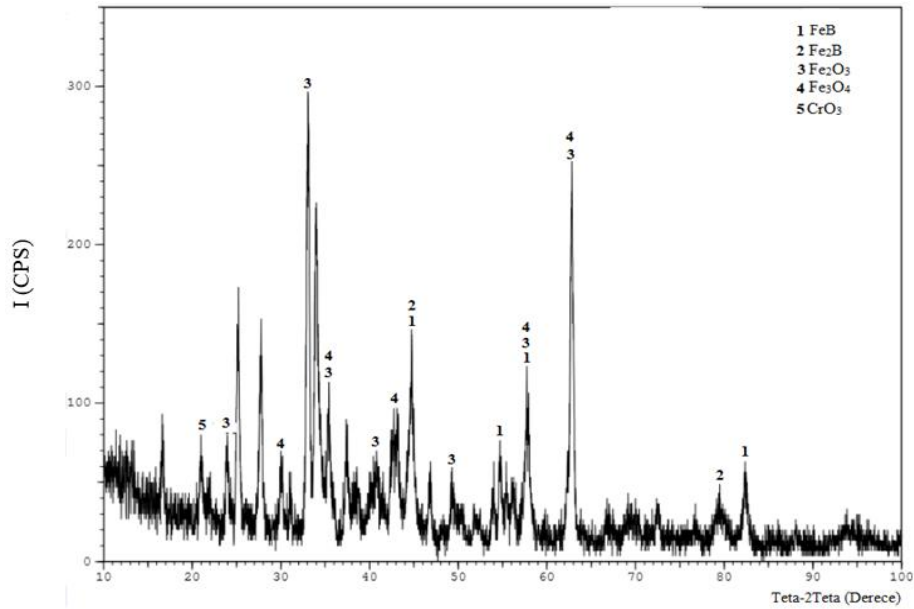


Şekil 4.7 K340 çeliğinin 6 saat boyunca 950°C’de borlama işlemi sonrası XRD analizi

6s-7-3dk numunelerin 1.2990 ve K340 çeliklerinin XRD analizleri Şekil 4.8 ve 4.9’da gösterilmiştir. 1.2990 çeliğinde FeB, Fe₂B ve Fe₂O₃ fazları tespit edilmiştir. Fe₂B ve Fe₂O₃ fazları baskın diyebiliriz. K340 çeliğinde ise FeB, Fe₂B, Fe₂O₃, Fe₃O₄ ve CrO₃ fazları görülmüştür. Fe₂O₃ ve Fe₃O₄ fazları baskın denilebilir.



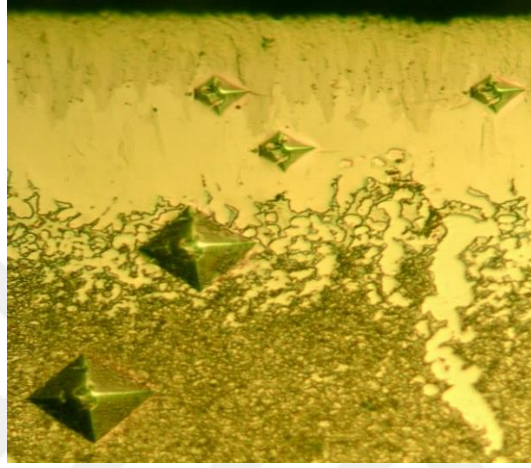
Şekil 4.8 1.2990 çeliğinin borlama işlemi sonrası 750°C-3 dakika oksidasyon XRD analizi



Şekil 4.9 K340 çeliğinin borlama işlemi sonrası 750°C-3 dakika oksidasyon XRD analizi

4.3 Mikrosertlik Sonuçları

1.2990 kalite çeliğin 950 °C’de 6 saat borlama işleminden sonra 750 °C’de 3 dakika oksitlenmiş numunenin mikrosertlik ölçümüne ait görüntü Şekil 4.10’da verilmiştir. Ölçülen numunelerde geçiş bölgesinde 325 HV_{0,2}, en sert yerinde ise 1461 HV_{0,2} değerleri ölçülmüştür.

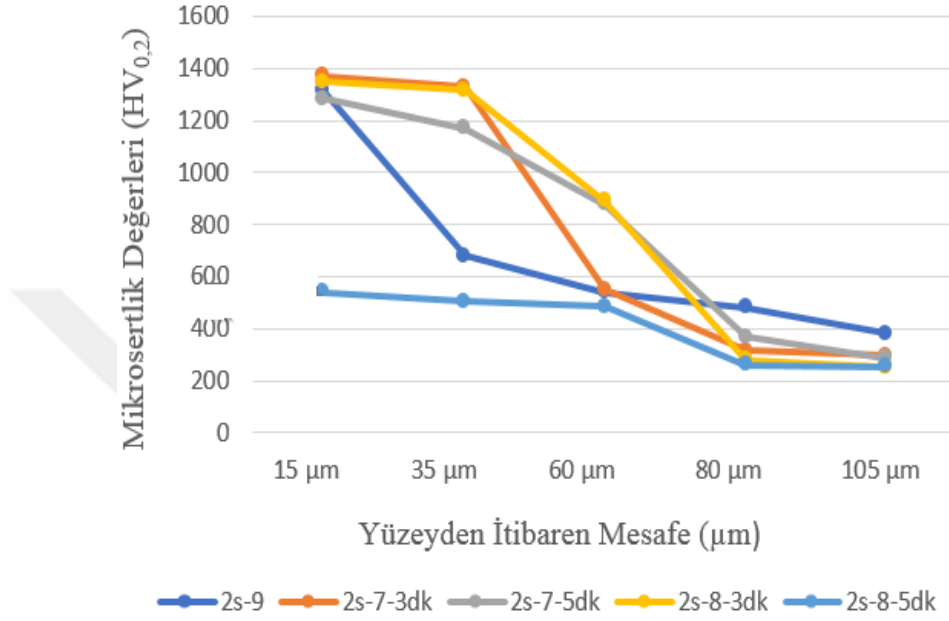


Şekil 4.10 950 °C’de 6 saat borlama işlemi sonrası 750 °C’de 3 dakika oksitlenmiş 1.2990 çeliğinin mikrosertlik izleri

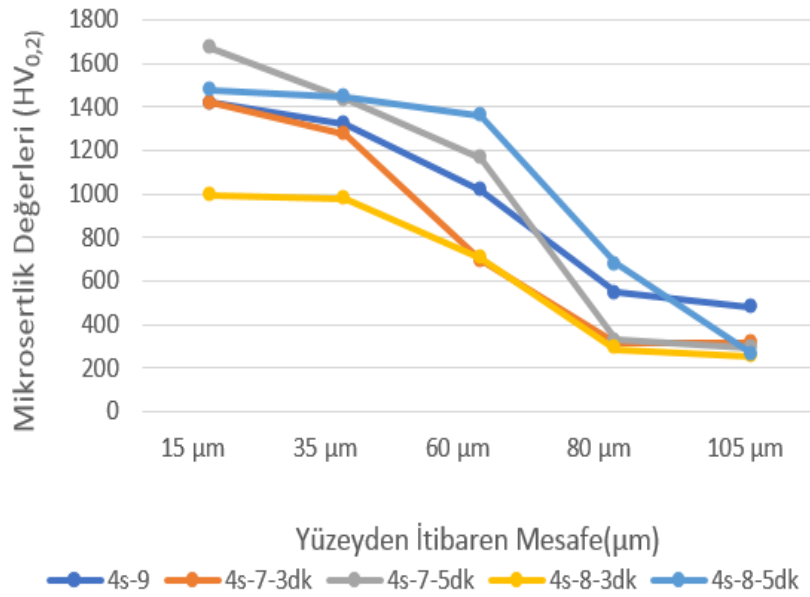
Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13’de mikrosertlik grafikleri verilmiştir. 4s-7-5dk numunesinde ölçümler sonrasında 1669 HV_{0,2} sertlik değerine kadar ulaşıldığı görülmüştür. Efe tarafından yapılan çalışmada 8620 kalite çeliklerde 950°C’de 2, 4, 6, 8 saat borlama işlemi yapılmıştır. Ölçümler her 20 µm aralıklarda Vickers sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Ölçümler neticesinde 950°C’de 6 saat borlanan numunede 2004 HV sertlik değerine ulaşıldı. Borlama sonrası oksidasyon işleminde numunelerinin sertlikleri artış gözlenmiştir (Efe 2022). Borlanmış numunelerde işlem süresinin artmasıyla orantılı mikrosertlik sonuçlarında da artış görülmektedir.

Kutu borlanmış numunelerde yüzeyde oluşan borür tabakası kalınlığının yüzey sertliğiyle ilişkili olduğu bulunmuştur (Günen ve Kanca 2017). Yüksek tabaka kalınlığına sahip numunelerin sertlik değerlerinin de yüksek olduğu ortadadır (Ülker vd. 2011, Günen vd. 2017, Günen 2020).

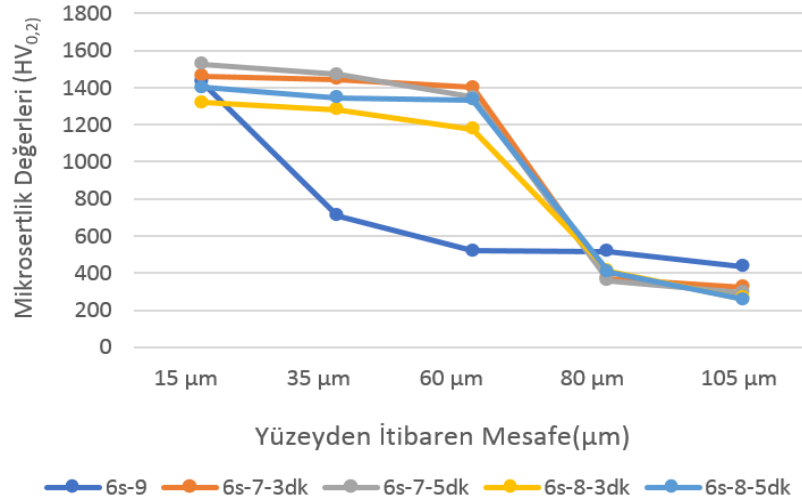
1.2990 çeliği ve K340 çeliğinin mikrosertlik değerleri ile kıyasladığımızda; 2s-9, 4s-9 ve 6s-9 numunelerde 1.2990 çeliğinin, K340 çeliğine göre tabaka kalınlığı daha düşük çıkmaktadır. Tabaka kalınlığının düşük olması mikrosertlik ölçümlerine tam tersi etki etmiştir. Ölçümlerde 1.2990 çeliğinin mikrosertlik değerleri daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 4.11 2 saat borlanmış ve oksidasyon işlemi görmüş 1.2990 kalite çeliğin yüzeyinden sertlik ölçümleri

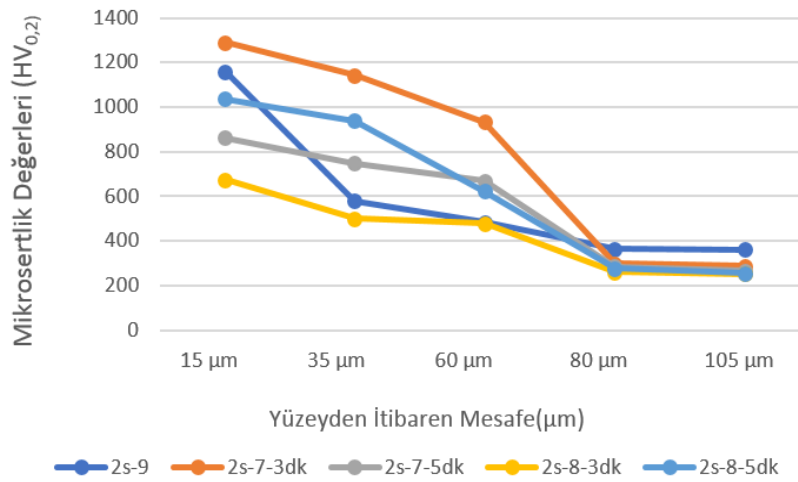


Şekil 4.12 4 saat borlanmış ve oksidasyon işlemi görmüş 1.2990 kalite çeliğin yüzeyinden sertlik ölçümleri

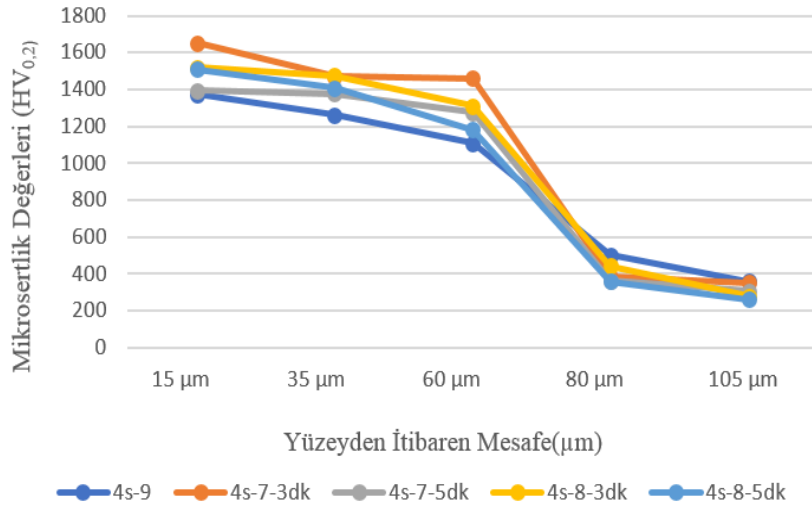


Şekil 4.13 6 saat borlanmış ve oksidasyon işlemi görmüş 1.2990 kalite çeliğin yüzeyinden sertlik ölçümleri

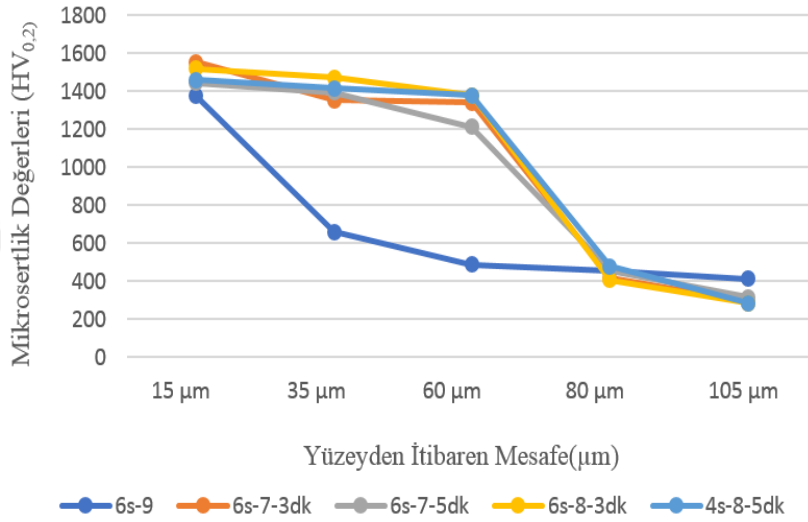
K340 kalite çeliklerin mikrosertlik grafikleri Şekil 4.14, 4.15 ve 4.16’da verilmiştir. 1.2990 kalite çelikte 2s-7-3dk numunenin mikrosertlik değerleri K340 kalite çeliğe göre daha yüksek, 4s-7-3dk ve 6s-7-5dk numunede daha düşük değerler çıkmıştır. 1.2990 kalite çelikte 2s-7-5dk, 4s-7-5dk ve 6s-7-5dk numuneler K340 çeliğine göre tüm mikrosertlik değerleri daha yüksek çıkmıştır. 1.2990 kalite çelikte 2s-8-3dk numunenin mikrosertlik değerleri K340 kalite çeliğe göre yüksek, 4s-8-3dk ve 6s-8-3dk değerlerine göre düşük çıkmıştır. 1.2990 kalite çeliğin 2s-8-5dk, 4s-8-5dk ve 6s-8-5dk numunelerinin K340 çeliğe kıyasla mikrosertlik değerleri düşük çıkmıştır.



Şekil 4.14 2 saat borlanmış ve oksidasyon işlemi görmüş K340 kalite çeliğin yüzeyinden sertlik ölçümleri



Şekil 4.15 4 saat borlanmış ve oksidasyon işlemi görmüş K340 kalite çeliğin yüzeyinden sertlik ölçümleri



Şekil 4.16 6 saat borlanmış ve oksidasyon işlemi görmüş K340 kalite çeliğin yüzeyinden sertlik ölçümleri

4.4 Kuru Kaymalı Aşınma Analizi

İşlem görmemiş, borlanmış ve borlama sonrası oksidasyon işlemi yapılmış numunelerin sürtünme katsayıları ve aşınma hızları arasındaki ilişki Şekil 4.17 ve 4.18’de verilmiştir. İşlem görmemiş numunelere kıyasla hem borlanmış hem de borlama sonrası oksidasyon işlemi görmüş numunelerde ortalama sürtünme katsayısının arttığını görmekteyiz. Bu da numunelerin aşınmasının daha geç olacağı anlamı taşımaktadır. 2s-9, 4s-9 ve 6s-9

numunelerde 1.2990 çeliklerinin borlanmış numunelerin ortalama sürtünme katsayıları, borlanmış ve oksitlenmiş numunelere göre tüm değerleri daha yüksektir. K340 eliğinde 2s-9 numunesinin ortalama sürtünme katsayısı, kalan borlanmış numunelerden ve borlama sonrası oksitlenmiş numunelerden daha fazla ortalama sürtünme katsayısı değerine sahiptir.

İşlem görmemiş 1.2990 kalite çeliğinin ortalama sürtünme katsayı değeri borlanmış ve borlama sonrası oksidasyon işlemine tabi tutulmuş numunelere kıyasla daha fazladır. K340 kalite çelikte ise tam tersi etki göstermiştir. İşlem görmemiş K340 kalite çeliğin ortalama sürtünme katsayı değeri borlanmış ve borlama sonrası oksidasyon işlemine tabi tutulmuş numunelere kıyasla daha azdır.

2s-7-3dk, 4s-7-3dk ve 6s-7-3dk numunelerini kıyasladığımızda; 1.2990 kalite eliğinin K340 eliğine göre 2s-9 numunede ortalama sürtünme katsayı değerinde daha yüksek, 4s-9 ve 6s-9 numunelerin ortalama sürtünme katsayıları daha düşük çıkmıştır. Dolayısıyla K340 eliği 4s-7-3dk ve 6s-7-3dk numunedeki aşınmaların daha geç olacağı anlamını taşır.

2s-7-5dk, 4s-7-5dk ve 6s-7-5dk numunelerini karşılaştırdığımızda; 1.2990 kalite eliğinin K340 eliğine göre 2s-9 ve 4s-9 numunelerde ortalama sürtünme katsayı değerlerinde daha yüksek, 6s-9 numunede ortalama sürtünme katsayı değerleri daha düşük çıkmıştır. Bundan dolayı K340 eliğinde 6s-7-5dk numunedeki aşınmanın daha geç olacağı anlamına gelmektedir.

2s-8-3dk, 4s-8-3dk ve 6s-8-3dk numunelerini kıyasladığımızda; 1.2990 kalite eliğinin K340 eliğine göre 2s-9 numune değerinde ortalama sürtünme katsayı değeri düşük, 4s-9 ve 6s-9 numunelerde ortalama sürtünme katsayı değerleri daha yüksek çıkmıştır. Dolayısıyla K340 eliğinde 2s-8-3dk numunedeki aşınma daha geç olacağını ifade etmektedir.

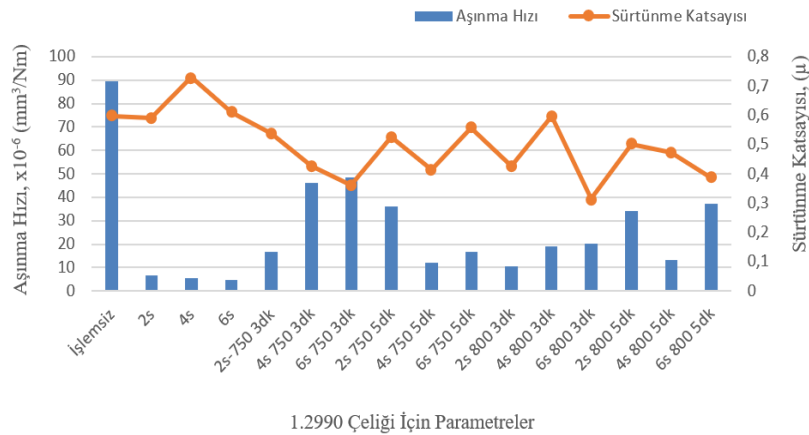
2s-8-5dk, 4s-8-5dk ve 6s-8-5dk numunelerini karşılaştırdığımızda; 1.2990 kalite eliğinin K340 eliğine göre 4s-9 numune değerinde ortalama sürtünme katsayı değeri daha

yüksek, 2s-9 ve 6s-9 numunelerde ortalama sürtünme katsayı değerleri daha yüksek çıkmıştır. Bundan dolayı K340 çeliğinde 2s-8-5dk ve 6s-8-5dk numunedeki aşınma daha geç olur. Böylece aşınma dayanımı daha iyidir. Sonuç olarak 1.2990 kalite çelikte işlem görmemiş numuneye göre borlama işlemine tabi tutulmuş ve borlama sonrası oksidasyon işlemine tabi tutulmuş tüm numunelerde aşınma dayanımında iyileşme söz konusudur. K340 kalite çelikte tam tersi etki göstermiştir. Borlanmış ve borlama sonrası oksitleme işlemine tabi tutulmuş numunelerde yukarıda detaylı belirttiğim gibi kıyaslama söz konusudur. Sıcaklık ve süreye bağlı ortalama sürtünme katsayılarında değişiklik olmuştur.

Numunelerde oksidatif aşınma mekanizması sonucu oluşan delaminasyon (kavkınma) aşınma mekanizmasının oluşturduğu aşınma izleri görülmüştür (Günen vd. 2020).

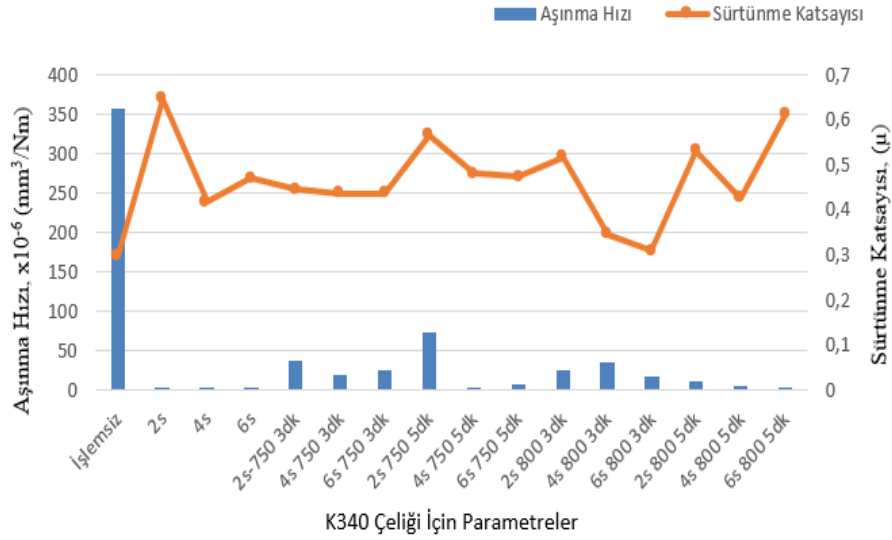
1.2990 kalite çeliklerde borlanmış numunelerin işlem görmemiş numuneye göre aşınma hızında 13 (2s-9) ile 18 kat (6s-9) aralığında bir iyileşme meydana geldiği, oksidasyon işlemi görmüş numuneler ile karşılaştırdığımızda 8 kat (2s-8-3dk) iyileştirme meydana gelmiştir.

K340 kalite çeliklerde ise borlanmış numunelerin işlem görmemiş numuneye göre aşınma hızında 379 kat (2s-9) ile 568 kat (6s-9) aralığında iyileştirme gözlemlenirken, oksidasyon işlemi görmüş numuneler ile karşılaştırdığımızda 5 kat (2s-7-5dk) ile 516 kat (4s-7-5dk) iyileştirme meydana gelmiştir.



Şekil 4.17 1.2990 çeliğinin aşınma hızı grafiği

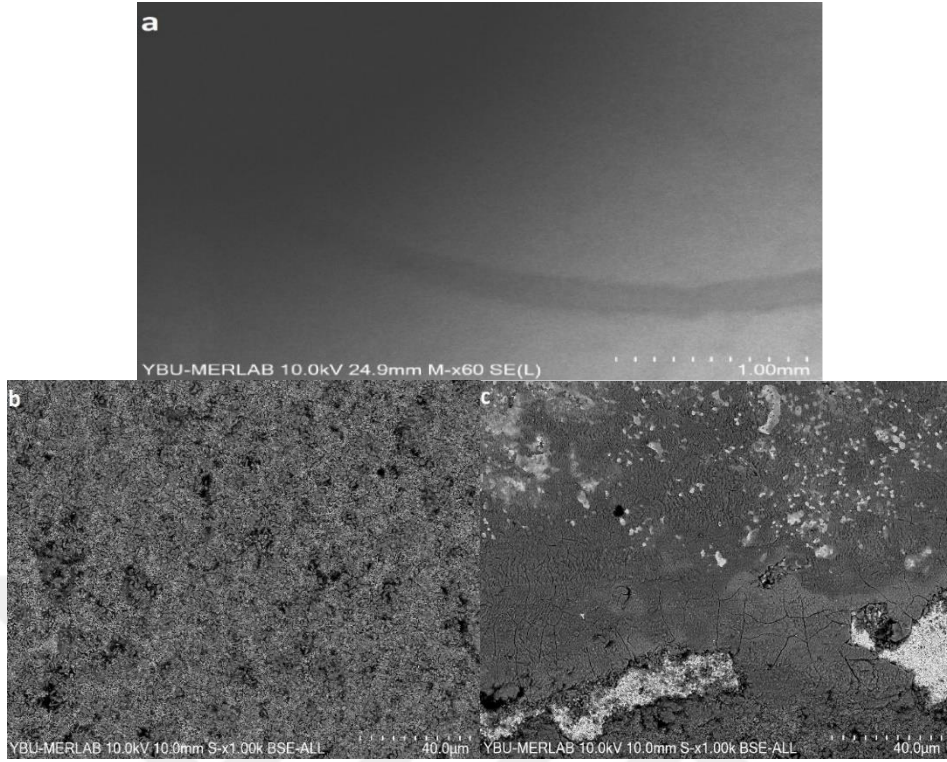
2 farklı numune de sadece borlanan numuneler ile borlama sonrası oksitlenmiş numuneleri karşılaştırdığımızda aşınma hızında iyileştirme söz konusu değildir. Borlanmış numunelerin işlem görmemiş numunelere göre aşınma hızında bir iyileşme artışı meydana gelmiştir (Ueda vd. 2000, Barış 2007, Işıtan vd. 2016, Ülker vd. 2011).



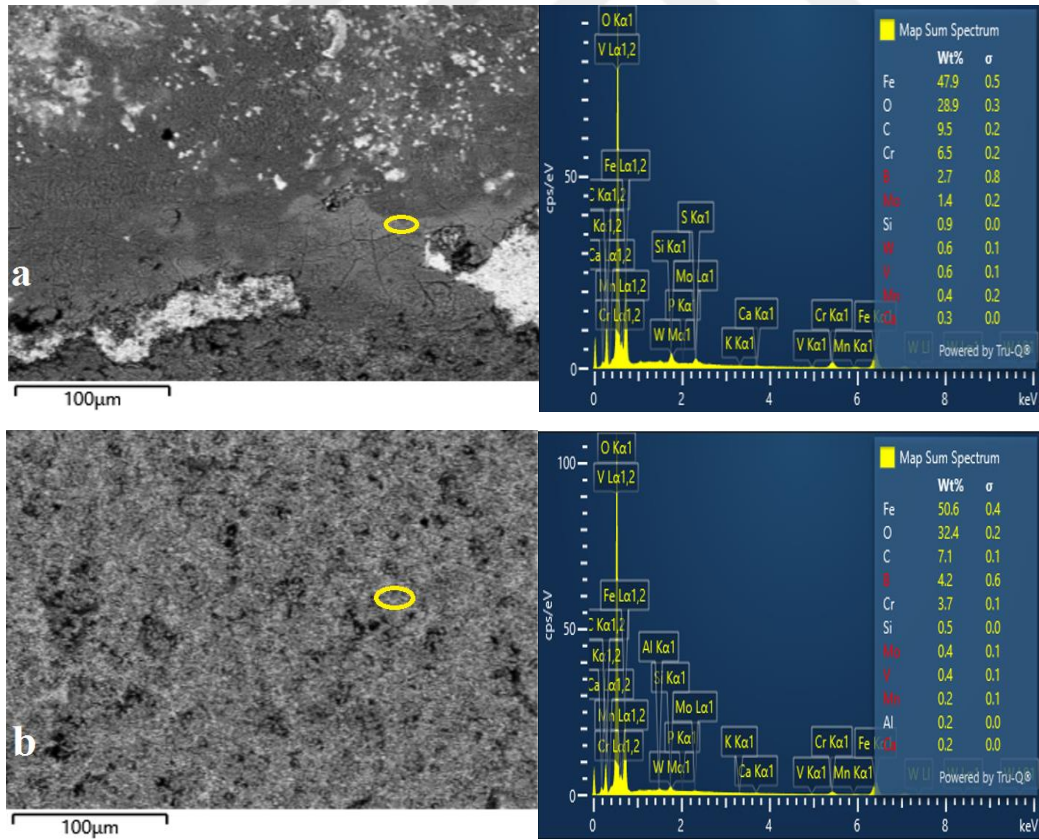
Şekil 4.18 K340 çeliğinin aşınma hızı grafiği

6s-7-3dk K340 çeliğinin Şekil 4.19a'da aşınma izi, Şekil 4.19b'de sağlam yüzeyi, Şekil 4.19c'de aşındıktan sonraki çatlak ve kopmuş yüzeyi SEM görselleri verilmiştir. K340 kalite çelikten EDS analizi için belirlenmiş noktalar ve yüzdesel element dağılımı Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Belirlenen noktalarda yapılan EDS analizi ile borun etkisinin azaldığının oksitlenmenin baskın olduğu ortaya konmuştur. Şekil 4.20a paritesinde belirlenmiş nokta bulunmaktadır. Şekilde %2,7 B, %28,9 O bulunmaktadır. Ayrıca Şekil 4.20b paritesinde farklı bir nokta belirlenmiştir. %4,2 B, %32,4 O olduğu gözlemlenmiştir. Numuneler için işaretlenmiş bölgelere ait elementel analiz sonuçları görsellerde yüzdesel olarak verilmiştir.

100 N yük altında, 900°C'de 6 saat borlanan aşınma sonrası R260 numunesinin çeşitli noktalarından alınan atom ağırlıkları dağılımı şu şekildedir. B elementi %2,31-3,70, O elementi %1,92-29,02 arasındadır (Yardım 2022).



Şekil 4.19 K340 çeliğinin 6s-7-3dk numunenin aşınma SEM görüntüleri a) Aşınma izi, b) Sağlam yüzey, c) Çatlak ve kopmuş yüzey



Şekil 4.20 K340 çeliğinin 6s-7-3dk numunenin EDS analizi için belirlenmiş noktaları ve yüzdesel element dağılımı

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu çalışmada 1.2990 ve K340 soğuk iş takım çeliklerinin yaklaşık olarak aynı yüzdesel oranda elementlere sahip malzemeler incelenmiştir. Kutu borlama yöntemi ile ürünler borlanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir.

1) Kutu borlama işleminden sonra yapılan XRD analizinde iki numunede de bor tabakasının FeB ve CrB fazından meydana geldiğini göstermiştir. Oksidasyon işlemi sonrasında 1.2990 çeliğinde FeB, Fe₂B ve Fe₂O₃ fazları gözlemlenirken, K340 çeliğinde FeB, Fe₂B, Fe₂O₃, CrO₃, Fe₃O₄ fazları gözlenerek numune de kompleks oksit bulunmaktadır.

2) Mikrosertlik ölçümleri neticesinde; Borlanmış 1.2990 çeliğinde 436 ile 1427 HV_{0,2} , K340 çeliğinde ise 411 ile 1375 HV_{0,2} değerleri bulunmuştur.

3) 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerde 1.2990 çeliğinin, K340 çeliğine göre tabaka kalınlığı daha düşük çıkmaktadır. Tabaka kalınlığının düşük olması mikrosertlik ölçümlerine tam tersi etki etmiştir. Ölçümlerde 1.2990 çeliğinin mikrosertlik değerleri daha yüksek çıkmıştır. 750°C-3 dakika oksitlenmiş numunelerde ise; 2 saat borlanmış numunelerden 1.2990 çeliğinde daha yüksek, 4 ve 6 saat borlanmış numunelerde daha yüksek çıkmıştır. 750°C-5 dakika oksitlenmiş numunelerde; 2 ve 4 saat borlanmış numunelerden 1.2990 çeliğinde daha yüksek, 6 saat borlanmış numune de daha düşük çıkmıştır. 800°C-3 dakika oksitlenmiş numunelerde; 2 saat borlanmış numunelerden 1.2990 çeliğinde daha yüksek, 4 ve 6 saat borlanmış numunelerde daha düşük çıkmıştır. 800°C-5 dakika oksitlenmiş numunelerde; 2, 4 ve 6 saat borlanmış numunelerden 1.2990 çeliği K340 çeliğine göre mikrosertlik değerleri düşük çıkmıştır.

4) Sıcaklık ve işlem süresinin artışı tabaka kalınlıklarında da artışa neden olmuştur. Bu sebeple borür tabaka kalınlığının artması yüzey sertliğini tetikleyerek artışına neden olmuştur. Dolayısı ile yüzey sertliğinin artışı da aşınma direncinin artmasına neden olduğunu söyleyebiliriz.

5) Kutu borlama işleminden sonra işlem süresinin artışı 1.2990 çeliğinde ki ortalama sürtünme katsayısını arttırırken, K340 çeliğinde işlem süresinin artması ortalama sürtünme katsayısında düşme olduğunu görüldü.

6) 1.2990 kalite çeliklerde borlanmış numunelerin işlem görmemiş numuneye göre aşınma hızında 13 (2s-9) ile 18 kat (6s-9) aralığında bir iyileşme meydana gelmiştir. K340 kalite çeliklerde ise borlanmış numunelerin işlem görmemiş numuneye göre aşınma hızında 379 kat (2s-9) ile 568 kat (6s-9) aralığında iyileştirme gözlemlenirken, oksidasyon işlemi görmüş numuneler ile karşılaştırdığımızda 5 kat (2s-7-5dk) ile 516 kat (4s-7-5dk) iyileştirme meydana gelmiştir. 2 farklı numune de sadece borlanan numuneler ile borlama sonrası oksitlenmiş numuneleri karşılaştırdığımızda iyileştirme söz konusu değildir. Borlanmış numunelerin işlem görmemiş numunelere göre aşınma hızında bir iyileşme artışı meydana gelmiştir.

7) İşlem görmemiş 1.2990 kalite çeliğin mikrosertlik değeri 207,7 HV ve aşınma hızı $89,49 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ olarak ölçülmüştür. KB numunelerinin tabaka kalınlıkları 950°C sıcaklık 2 saat süresinden 6 saat süresine kadar sırasıyla 15 μm 'den 105 μm 'ye, mikrosertlik değerleri 1312 HV_{0,2}'den 1427 HV_{0,2}'ye artış ve aşınma hızları $6,65 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'den $4,92 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye düşüş göstermektedir. 750°C-3 dakika oksitlenmiş numunede 1371 HV_{0,2}'den 1461 HV_{0,2}'ye artış ve aşınma hızları da $16,79 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'den $89,58 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye artış göstermiştir. 750°C-5 dakika oksitlenmiş numunede 1283 HV_{0,2}'den 1669 HV_{0,2}'ye artış ve aşınma hızları $36,11 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'den $16,86 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye düşüş göstermiştir. 800°C-3 dakika oksitlenmiş numunede 1349 HV_{0,2}'den 1321 HV_{0,2}'ye düşüş ve aşınma hızları $10,55 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'den $20,41 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye artış göstermiştir. 800°C-5 dakika oksitlenmiş numunede 541 HV_{0,2}'den 1477 HV_{0,2}'ye artış ve aşınma hızları $34,35 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'den $37,36 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye artış göstermiştir.

8) K340 kalite çelikte ise mikrosertlik değeri 234,50 HV ve aşınma hızı $357,04 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ölçülmüştür. KB numunelerinin tabaka kalınlıkları 950°C sıcaklık 2 saat süresinden 6 saat süresine kadar sırasıyla 15 μm 'den 105 μm 'ye, mikrosertlik değerleri

1160 HV_{0,2} ‘den 1375 HV_{0,2} ‘ye artış ve aşınma hızları $0,94 \times 10^{-6}$ mm³/Nm’den $0,62 \times 10^{-6}$ mm³/Nm’ye düşüş göstermektedir. 750°C-3 dakika oksitlenmiş numunede 1289 HV_{0,2}’den 1653 HV_{0,2}’ye artış ve aşınma hızları da $36,80 \times 10^{-6}$ mm³/Nm’den $24,49 \times 10^{-6}$ mm³/Nm’ye düşüş göstermiştir. 750°C-5 dakika oksitlenmiş numunede 863 HV_{0,2}’den 1444 HV_{0,2}’ye artış ve aşınma hızları $71,78 \times 10^{-6}$ mm³/Nm’den $6,75 \times 10^{-6}$ mm³/Nm’ye düşüş göstermiştir. 800°C-3 dakika oksitlenmiş numunede 674 HV_{0,2}’den 1520 HV_{0,2}’ye artış ve aşınma hızları $34,16 \times 10^{-6}$ mm³/Nm’den $15,85 \times 10^{-6}$ mm³/Nm’ye düşüş göstermiştir. 800°C-5 dakika oksitlenmiş numunede 1037 HV_{0,2}’den 1511 HV_{0,2}’ye artış ve aşınma hızları $11,74 \times 10^{-6}$ mm³/Nm’den $2,88 \times 10^{-6}$ mm³/Nm’ye düşüş göstermiştir.

5.2 Öneriler

- 1) Uygulanan sıcaklık ve sürelerde değişkenlik yapılarak sürtünme katsayıları iyileştirilebilir.
- 2) Plazma ortamında oksidasyon yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Bozkurt İ.B, 2022, 4340 Islah Çeliğinin Bilyalı Dövme ve Kutu Borlama Ardışık Uygulamaların Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 43s, Karabük
- Barış M, 2007, Farklı Borlama Sürelerinin Transmisyon Çeliğinde Abrasiv Aşınma Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 66s, Ankara.
- Bayça S.U ve Şahin S, 2008, (Borlama. Mühendis ve Makine, 532:51-59.) – Ersöz, A, “Elektrokimyasal Borlama ile Çeliklerin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, 91s, İstanbul.
- Bayça S.U, Bican O, 2022, Increasing of Corrosion Resistance of AISI 1010 Steel by Boride Coatings, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kırıkkale.
- Baştürk S ve Erten M, 2006, Borlama ile Yüzey Sertleştirme Çalışmaları, Mühendis ve Makina Dergisi, 47, 57-74.
- Bozkurt N, 1992, Bor Yayınımla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme, İstanbul Teknik Üniversitesi, 1984, M. Khoee, “Ergimiş Boraks Banyosunda Çeliklere Vanadyum Karbür Kaplama,” İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Boztepe M, 2014, Effect of Boronizing Temperature and Time on Abrasion and Corrosion Resistance of AISI 1050 Steel, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 81s, Adana
- Carbucicchio M, Palombarini G, Sambogna G, 1991, Surface Oxidation Phenomena of Boride Coatings Grown on Iron, Italy Institute of Metallurgy, University of Bologna, 69, 843-846.
- Çalık A, 2005, Termokimyasal Borlama Yöntemleri ve Önemi, 4th International Advaced, Konya, Technologies Symposium, 839-844,
- Davis J. R, 2002, Surface Hardening of Steels: Understandingthe Basics. ASM International Materials Park, Ohio, 349s,USA.

- Diaz-Guillen J.C, Naeem M, Hds-Garcia H.M, Acevedo-Davila J.I, Diaz-Guillen M.R, Khan M.A, Iqbal J, Mtz-Enriquez A.I, 2020, Dublex Plasma Treatment of AISI D2 Tool Steel by Combining Plasma Nitriding (With and Without White Layer) and Post-Oxidation, Surface and Coating Technology, 385, 215-219.
- Efe H, 2022, AISI 8620 Çeliğinin Korozyon Ömrünün Borlama Prosesi ile Artırılması, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 92s, Kırıkkale.
- Er U, Par B, 2004, Investigation of Abrasive Wear Resistances of AISI 1030 and 1050 Steels Whose Surfaces Were Hardened Via Boron Diffusion, Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi.
- Erdemir A, Halter M, Fenske G.R, 1997, Preparation of Ultralow-Friction Surface Films on Vanadium Diboride, Argonne National Laboratory, Energy Technology Division, 205, 236-239, USA.
- Erdemir A, Bindal C, 2004, Formation and Self-Lubricating Mechanisms of Boric Acid on Borided Steel Surfaces, Argonne National Laboratory, Argonne, USA
- Günen A, Kanca E, 2017, Farklı Bor Kimyasalları ile Borlanmış Inconel 625 Alaşımının Karakterizasyonu, Pamukkale Üniversitesi Müh. Bilimleri Dergisi, 4, 411-416
- Günen A, 2020, Properties and High Temperature Dry Sliding Wear Behavior of Boronized Inconel 718, Metallurgical and Materials Transactions A, 51 A, 939.
- Galibois B, Boutenko A, Voyzelle O, 1980, Mecanisme De Formation Des Couches Borurees Sur LesAciers A Haut Carbone Technique Des Pates, ActaMet., 28, 1753.
- Işıtan A, Armağan E, Kaplan Y, Onar V, 2016, Wear Behavior of Boronized AISI D2 Tool Steel, 16th International Materials Symposium, IMSP'2016, Denizli.
- Jain V, Sundararajan G, 2002, Influence of The Pack Thickness of The Boronizing Mixture on the Boriding of Steel, Surface and Coatings Technology, 149, 21 – 26.
- Kemin Li, Zhifu Huang, Hanwen Ma, Shaofei Wang, Chaofeng Qin ve Pengcheng Liu, 2020, The Tribological Properties of Bulk Fe₂B With Pre-Oxidation Treatment at 750°C in Air, State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, School

of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Cilt:72, Sayı:1, s:151-156, Çin.

Kartal G, Eryılmaz O, Krumdick G, Erdermir A, Timur S, 2011, Düşük Karbonlu Çeliğin Elektrokimyasal Borlama Kinetiği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Kartal G, Timur S, Sista V, Eryılmaz O.L, Erdemir A, 2011, The Growth of Single Fe₂B Phase on Low Carbon Steel Via Phase Homogenization in Electrochemical Boriding(PHEB), Surface Coating Technology, 206, 386-390.

Kondul B, Çetin MH, 2022, Increasing the Wear Resistance of Railway Wheels with Boron Coating and Analysis of Tribological Performance by ANOVA Method, Wear, 488, 488-489.

Matuschka A.G.V, 1980, Boronizing, Heyden, 97s, Londra.

Mahboubi, F. & Fattah, Majid, 2004, AISI 1045 Yumuşak Çeliğin Plazma Nitrürlenmesi ve Oksidasyon Sonrası Yüzey İşlemindeki Gelişmeler Uluslararası Konferansı Tutanakları: Araştırma ve Uygulamalar, ASTRA, 87-91.

Meriç N. S, Şahin C, Backır S, Köksal B, 2006, Investigation Of The Boronizing Effect On The Abrasive Wear Behaviour In Cast Irons, Mater. Des., vol. 27, 751–757.

Naemchanchana P, Juijerm P, 2017, Microstructural Alteration and Oxidation Behavior of boronized stainless steel AISI 440C after heat treatments, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand.

Özbek I, Bindal C, 2002, Mechanical properties of boronized AISI W4 steel. Surface and Coatings Technology, 154, 14-20.

Özkan M, Çebi H, Delice S, 1997, Bor Minerallerinin Özellikleri ve Madenciliği, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 224–228.

Petrova S. R, Suwattananont N., Oxidation Kinetics of Boronized Low Carbon Steel AISI 1018, 70, 307-315.

Sinha, A. K, 1991, Boriding (Boronizing). ASM Handbook, ASM International. Materials Park, Ohio, 4, 437–447, USA.

- Selçuk B, 1994, Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 103s, Kayseri.
- Şen S, Özbek I, Şen U, Bindal C, 2001, Mechanical Behavior Of Borides Formed On Borided Cold Work Tool Steel, Surf. Coat. Technol.,135, 173–177.
- Sarı M, 2019, Sementasyon Çeliğinin Kutu Borlama Yöntemiyle Kaplanması Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Adıyaman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 64s, Adıyaman
- Şahin S, 1999, Katı Borlama Yöntemi ile Ferrobor Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 87s, Manisa.
- Şen S, Şen U, Bindal C, 2006, Tribological Properties of Oxidies Boride Coatings Grown on AISI 4140 Steel, Sakarya Üniversitesi, Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Bölümü, 3481-3486, Sakarya.
- Tabur M, 2008, Bor Karbür Kaplanmış AISI 8620 Ve Hardox 400 Çeliklerinin Abrasiv Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 220s, Ankara.
- Turku Ş, Doğan N, Uçar N ,ve Çalık A, 2014, Borlama Süresinin Düşük Karbonlu Mikro Alaşımlı Çeliklerin Sertlik Değerleri Üzerine Etkisi, SDU J. Sci.,9,no. 2, 147–151.
- Travis C.E, 1984, The Tincal Trail: A History of Borax. London: London:Harraps Ltd,.
- Ueda N, Mizukoshi T, Demizu K, Sone T, Ikenaga A, Kawamoto M, 2000 Boriding of Nickel by The Powder-Pack Method, Surface and Coatings Technology 126, 25-30.
- Ünal F, 2013, Cam Kalıplarında Kullanılan Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Borlanması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tez,82s, İstanbul
- Ülker Ş, Güneş İ, Taktak Ş, 2011, Investigation of Tribological Behavior of Plasma Pasta boronized of AISI 8620, 52100 and 440C Steels, Indian Journal of Engineering&Materials Sciencesi,18, 370-376.

- Yapar U, 2003, Düşük Ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama İle Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Yapar U, Taştan İ, 2002, Çeliklerde Borlama Yoluyla Yüzey Sertleştirme, Metal Dünyası, 115, 69-74.
- Yardım Ü, 2022, Borlama Yöntemiyle Yüzeyi Sertleştirilmiş R260 Ray Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 74s, İzmir.
- Yiğitbaşıoğlu H, 2004, Türkiye İçin Önemli Bir Maden: Bor, Ankara Üniversitesi Coğrafi Bilimleri Dergisi, 2, 2, 13,25.
- Yiğit M, 2021, Borlama İşleminin 34CrNiMo6 Çeliğinin Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü”, Isparta.
- Yapar, U, 2003. Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama ile Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü,145s, İstanbul.
- Wang B, Xue W, Wu J, Jin X.Y, Hua M, Wu Z.L, Characterization of Surface Hardened Layers on Q235 Low-Carbon Steel Treated By Plasma Electrolytic Borocarburing, Alloys Compd J, 2013, 578, 162-169.

İnternet Kaynakları

- 1-<https://www.saglammetal.com/tr/urunler/soguk-is-takim-celikleri> 22.09.2021
- 2- <https://www.takımetal.com/urunler/soguk-is-takim-celikleri> 14.11.2021
- 3-<https://www.bohlerturkiye.com/tr/products/k340isodur> 14.10.2021
- 4- <https://tr.wikipedia.org/wiki/Bor> 15.01.2022
- 5- <https://www.boren.gov.tr/Sayfa/rezervler/> 26 26.06.2022
- 6- <https://malzemebilimi.net/yuzey-borlama-teknigi-nedir.html> 17.08.2022
- 7- <https://www.aht.com.tr> 12.04.2023