



BORLANMIŞ TUNGSTENİN AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Malik AŞGIN

Danışman

Doç. Dr. İbrahim GÜNEŞ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2018

Bu tez çalışması 16.FEN.BİL.11 numaralı proje ile AKÜ-BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BORLANMIŞ TUNGSTENİN AŞINMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ

Ahmet Malik AŞGIN

DANIŞMAN
Doç. Dr. İbrahim GÜNEŞ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2018

TEZ ONAY SAYFASI

Ahmet Malik AŞGIN tarafından hazırlanan “Borlanmış Tungstenin Aşınma Davranışının İncelenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 27 / 06 / 2018 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. İbrahim GÜNEŞ

İmza

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Mürsel EKREM
Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. İbrahim GÜNEŞ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

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

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

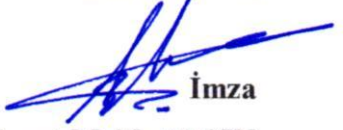
.....
Prof. Dr. İbrahimEROL
Enstitü Müdürü

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.

27.06/2018

İmza
Ahmet Malik AŞGIN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BORLANMIŞ TUNGSTENİN AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Ahmet Malik AŞGIN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İbrahim GÜNEŞ

Bu çalışmada borlanmış saf tungstenin aşınma davranışları incelenmiştir. Tungsten numuneler Ø20x8mm boyutlarında kesilerek gerekli zımparalama (120-180-240-320-400-600-800-1000 grid) işlemlerinden geçirilmiş ve 1 µm'lik Alümina solüsyon kullanılarak parlatılmıştır. Borlama işlemi katı ortamda, ticari Ekabor-II® bor tozu kullanılarak elektrik rezistanslı bir fırın içerisinde 900, 950 ve 1000°C'de 2, 4 ve 6 saat süresince gerçekleştirilmiştir. Borlanan numuneler kesitten kesilerek gerekli zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra elde edilen borür tabaka kalınlıkları Nikon MA100 marka optik mikroskop yardımıyla ölçülmüştür. Borlama işlemi sonucunda elde edilen borür fazları Shimadzu XRD 6000 marka XRD cihazı, mikro sertlik testleri ise Shimadzu HMV-2 marka test cihazı ile 100 gram yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Borlanmış tungsten numunelerinin XRD analizi sonucunda W₂B₅, WB, WB₂, WB₃ ve WB₄ fazları elde edilmiştir. Borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak saf tungsten numuneler üzerinde 18-184 µm arasında değişen kalınlıklarda borür tabakaları elde edilmiştir. Borlanmış saf tungsten numunelerinin mikro sertlik değerleri borlama sıcaklık ve süresine bağlı olarak 2182 ve 4292 HV_{0,1} arasında değiştiği görülmüştür. Borlanmamış numunenin sertliği ise 469 HV_{0,1} olarak elde edilmiştir. Aşınma testleri bilye disk cihazında, kuru ortamda, oda sıcaklığında, 10 N yük altında, 0.2 ve 0.4 m/s kayma hızında ve 1000 metre mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Aşınan tungsten numunelerinin aşınma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışınları enerji dağılımlı spektroskopisi (EDS) ile analiz edilmiştir. Aşınma testleri sonucunda borlama işleminin saf tungstenin aşınma direncini arttırdığı görülmüştür.

Borlanmış ve borlanmamış tungstenin aşınma oranlarının $3.86-42.75 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ arasında değiştiği tespit edilmiştir.

2018, xii + 50 sayfa

Anahtar Kelimeler: Tungsten, Borlama, Mikro sertlik, Sürtünme katsayısı, Aşınma



ABSTRACT

M.Sc.Thesis

INVESTIGATION OF WEAR PROPERTIES OF BORIDED TUNGSTEN

Ahmet Malik AŞGIN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. İbrahim GÜNEŞ

In the present study, tribological properties of borides formed on pure tungsten have been investigated. The tungsten specimens were cut into Ø20x8mm dimensions, ground up to 1000 grid and polished using 1 µm Al₂O₃ solution. The boriding heat treatment was carried out in a solid medium containing an Ekabor-II[®] powder mixture placed in an electrical resistance furnace operated at the temperature of 900 and 1000 °C for 2 and 6 h under atmospheric pressure. The microstructures of polished and etched cross-sections of the specimens were observed under a Nikon MA100 optical microscope. The presence of borides formed in the coating layer was confirmed by means of X-ray diffraction equipment (Shimadzu XRD 6000) using Cu K_α radiation. The hardness measurements of the boride layer on each steel and untreated steel substrate were made on the cross-sections using a Shimadzu HMV-2 Vickers indenter with a 100 g load. X-ray diffraction analysis of boride layers on the surface of the tungsten revealed the existence of W₂B₅, WB, WB₂, WB₃ and WB₄ compounds. Depending on the chemical composition of substrates and boriding time, the boride layer thickness on the surface of the pure tungsten samples ranged from 18 µm to 184 µm. The hardness of the boride compounds formed on the surface of the pure tungsten samples ranged from 2182 to 4292 HV_{0,1}, whereas Vickers hardness values of the untreated the steels was 469 HV_{0,1}. The wear tests were carried out in a ball-disc arrangement under a dry friction condition at room temperature with an applied load of 10N and with a sliding speed of 0.3 and 0.4 m/sec at a sliding distance of 1000m. The wear surfaces of the pure tungsten were analyzed using a SEM microscopy and X-ray energy dispersive spectroscopy (EDS). It

was observed that the wear rate of borided and unborided pure tungsten samples ranged from 3.86 to 42.75 mm³/Nm.

2018, xii + 50 pages

Keywords: Tungsten, Boriding, Micro-hardness, Friction coefficient, Wear.



TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç Dr. İbrahim GÜNEŞ'e, görüş, öneri ve katkılarından dolayı bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr. Şükrü TALAŞ'a, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma, deneysel çalışmalarımda yapmış olduğu destek ve yardımlarından dolayı Tuğçe KISIKÇILAR'a, maddi olarak desteklerinden dolayı 16.FEN.BİL.11 No'lu BAPK birimine, AKÜ. Fen Bilimleri Enstitüsüne ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

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

Ahmet Malik AŞGIN
AFYONKARAHİSAR, 2018

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
RESİMLER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Borlama ve Özellikleri.....	3
2.2 Borlamada Kullanılan Yöntemler	4
2.2.1 Katı Borlama	4
2.2.2 Alternatif Akım ile Borlama	7
2.2.3 Sıvı Borlama	8
2.2.4 Gaz Borlama	9
2.2.5 Plazma Pasta Borlama.....	11
2.3 Borlama İşleminin Avantaj ve Dezavantajları.....	11
2.4 Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulama Alanları.....	12
2.5 Tungstenin Borlanması İle İlgili Yapılan Çalışmalar	13
3. MATERYAL ve METOT	18
3.1 Deneylerde Kullanılan Hammaddeler.....	18
3.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar.....	18
3.3 Deney Parametreleri.....	22
3.4 Metalografik İşlemler.....	23
3.5 Tabaka Kalınlık Değeri Ölçümleri.....	23
3.6 Sertlik Değeri Ölçümleri.....	23
3.7 XRD Analizi	23
3.8 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	24
3.9 Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri	24
3.10 Aşınma Deneyleri	24
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	27
4.1 Borlanmış Saf Tungstenin Yüzey Karakterizasyonu	27

4.2 Saf Tungstenin Borlanması Sonucunda Elde Edilen Borür Tabaka Kalınlıkları	31
4.3 Borlanmış Saf Tungstenin X-Işınları Difraksiyon Analizi	32
4.4 Borlanmış Saf Tungstenin Mikrosertlik Sonuçları	35
4.5 Borlanmış Saf Tungstenin Aşınma Özellikleri	37
4.5.1 Borür Tabakalarının Yüzey Pürüzlülüğü ve Sürtünme Katsayısı	37
4.5.2 Borür Tabakalarının Aşınma Oranı	38
4.5.3 Borlanmış Saf Tungstenin Aşınma Bölgeleri SEM Mikroyapıları	38
5. SONUÇLAR.....	42
6. KAYNAKLAR	44
6.1 İnternet Kaynakları	49
ÖZGEÇMİŞ.....	50

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

μm	Mikrometre
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece

Kısaltmalar

WB	Tungsten bor
WB ₂	Tungsten diborür
CaWO ₄	Şelit
WO ₃	Tungsten trioksit
KBF ₄	Potasyum bor florür
CrB	Krom bor
SiC	Silisyum karbür
B ₄ C	Bor karbür
Na ₂ B ₄ O ₇	Susuz boraks
FeB	Demir bor
Fe ₂ B	Demir (II) bor
NaBF	Sodyum bor florür
NaF	Sodyum florür
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Bor-Tungsten denge diyagramı.....	3
Şekil 2.2 Katı borlama yöntemi (Dilektaşlı 2014).	6
Şekil 2.3 Gaz borlama birimi (Arat 2011).....	10
Şekil 2.4 Sıcaklık ile kalınlık arasındaki ilişki (Khor 2005).	14
Şekil 2.5 XRD sonuçlarının sıcaklıkla değişimi (Khor 2005).....	14
Şekil 2.6 Tavlanmış bor tabakasının XRD sonucu (Khor 2005).....	15
Şekil 2.7 XRD analiz sonucu (Chrzanowska 2018).....	16
Şekil 4.1 Katı borlanmış saf tungstenin XRD analizleri (900°C – 2, 6 saat).....	33
Şekil 4.2 Katı borlanmış saf tungstenin XRD analizleri (1000°C - 2, 6 saat).....	34
Şekil 4.3 Borlanmış saf tungstenin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımları.....	36
Şekil 4.4 Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış saf tungstenin, farklı kayma hızlarındaki aşınma oranları.....	38
Şekil 4.5 Borlanmamış saf tungstenin aşınma bölgesi SEM görüntüleri. a) 0.2 m/s, b) 0.4 m/s.....	39
Şekil 4.6 İşlemsiz tungstenin aşınma testi sonrası edx analizi.....	40
Şekil 4.7 Borlanmış saf tungstenin aşınma bölgesi SEM görüntüleri; a) 900°C-2 saat 0.2 m/s, b) 900°C-2 saat 0.4 m/s, c) 900°C-6 saat 0.2 m/s, d) 900°C-6 saat 0.4 m/s.....	40
Şekil 4.8 Borlanmış saf tungstenin aşınma bölgesi SEM görüntüleri; a) 950°C-2 saat 0.2 m/s, b) 950°C-2 saat 0.4 m/s, c) 950°C-6 saat 0.2 m/s, d) 950°C-6 saat 0.4 m/s.....	41

Şekil 4.9 Borlanmış saf tungstenin aşınma bölgesi SEM görüntüleri;

- a) 1000°C-2 saat 0.2 m/s, b) 1000°C-2 saat 0.4 m/s, c) 1000°C-6 saat 0.2 m/s,
d) 1000°C-6 saat 0.4 m/s..... 41



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Deneylerde kullanılan parametreler.	22
Çizelge 4.1 Saf tungstenin borlama sonucunda elde edilen tabaka kalınlıkları (μm)	31
Çizelge 4.2 Borlanmış saf tungstenin yüzey pürüzlülük değerleri ve 10 N yük altında sürtünme	37



RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 WB bor tabakasının SEM görüntüsü (Chrzanowska 2018).	16
Resim 3.1 Isıl işlem fırını.....	18
Resim 3.2 Metalografik numune zımparalama ve parlatma cihazı.	19
Resim 3.3 Optik mikroskop.	19
Resim 3.4 Mikrosertlik ölçüm cihazı.	20
Resim 3.5 X-ışınları Difraksiyon Analiz Cihazı (XRD).	20
Resim 3.6 Taramalı elektron mikroskobu (SEM).	21
Resim 3.7 Aşınma cihazının görünümü.	21
Resim 3.8 Borlama işleminin yapılışı.	23
Resim 3.9 Aşınma deney programı.	26
Resim 4.1 900°C sıcaklıkta borlanmış saf tungstenin SEM mikro yapıları, a)2 saat, b) 4 saat,	28
Resim 4.2 950°C sıcaklıkta borlanmış saf tungstenin SEM mikro yapıları, a) 2 saat,b) 4 saat,	29
Resim 4.3 1000°C sıcaklıkta borlanmış saf tungstenin SEM mikro yapıları, a) 2 saat, b) 4 saat,	30

1. GİRİŞ

Metal borürler, sahip oldukları birçok üstün özellikler nedeniyle (yüksek sıcaklık dayanımı, sertlik, yüksek çizilme ve genel olarak asitlere karşı direnç) günümüzde birçok kullanım alanına sahiptirler (Usta 2006).

Tungsten atom numarası 74 olan, "ağır taş" olarak da adlandırılan, simgesi "W" ile gösterilen ve sert molibdeni andıran bir metaldir. Tungsten, 19.25 g/cm^3 yoğunluğa, sıvı halde 17.6 g/cm^3 yoğunluğa, 19.3 g/cm^3 özgül kütleye sahiptir. Sırası ile erime, kaynama ve buharlaşma sıcaklıkları ise; 3400°C , 5650°C , 5830°C civarlarında yer almaktadır. Buharlaşma ısısı ise 806.7 kJ/mol değerine sahiptir. $(2,8,18,32,8)5d^46s^2$ elektron dizilimine sahip olan tungsten elementi +4 ve +6 yükseltgenme derecesine ve 183.35 atom kütesine sahiptir.

Tungsten borür bileşikler ise termal şok dayanımı, elektrik iletkenliği, yüksek sertlik değerleri ve kimyasallara karşı yüksek direnç gibi özelliklere sahiptir. Bu özellikleri sayesinde, çizilmeye karşı dirençli kaplama veya yarı iletken film, döküm metalürjisinde, ev aletlerinde, yüksek hız çeliği üretiminde filaman ve elektrot malzemesi üretiminde, kimyasallara karşı yüksek direnç malzemesi, termal şoklara karşı dayanımda kullanılmaktadır (Stadler *et al.* 2000, Stubicar *et al.* 1995). Tungsten borür olarak W_2B , WB , W_2B_{5-x} ve $W_{1-x}B_3$ olmak üzere dört bileşiği mevcuttur (Duschanek and Rogl 1995, Lassner 1999).

Tungsten üretimi dünyada farklı ülkeler tarafından yapılmaktadır. Tungsten üretimi dünyadaki arz ve talebe göre üretim yapılmakta olduğundan dolayı stratejik bir öneme sahiptir.

Bor atom numarası: 5, atom ağırlığı: 10.81 olan, periyodik çizelgenin III-A grubunun birinci elementidir. Periyodik çizelgede bulunduğu yere karşın amelatik özellik gösterir. Bileşikler ve bunlardan özellikle boraks binlerce yıldır bilinmekle birlikte elementel bor, saf olmayan bir biçimde ilk kez 1808'de Sir Humphry Davyce elektroliz yoluyla Gay Lussac ve Thenardca da oksidin elementel potasyumla indirgenmesiyle

elde edilmiştir. Günümüzde bor haloje-nürlerin elektrikle ısıtılan fitilleri üzerinde ayrıştırılması yoluyla çok saf olarak (% 99.9999 saflıkta olabilir) elde edilir (İnt. Kyn.1).

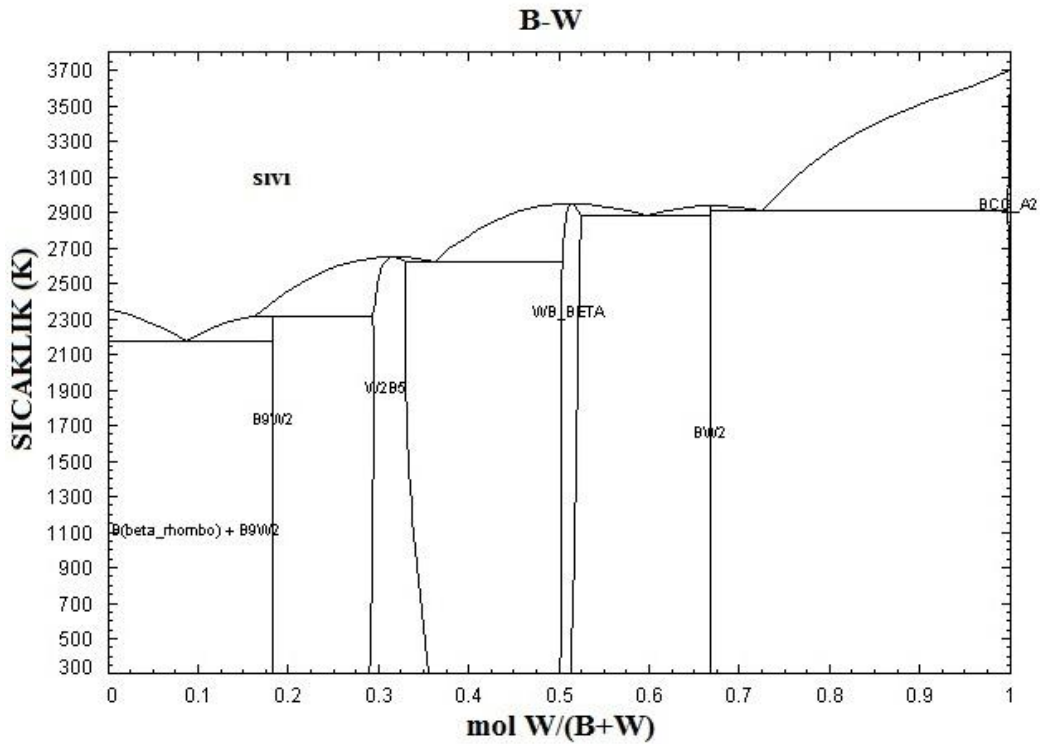
Ülkemiz, bor rezervleri açısından da oldukça zengin durumdadır. Dünya rezervinin %72.8'ine sahip olan ülkemizde, fiili bor üretiminde Dünya'da birinci sırada gelmektedir. Türkiye'de çıkartılan bor madeni genel olarak bor kimyasallarının üretiminde kullanılmakta olup, elde ettiğimiz bor kimyasalları ve ürünleri gerek yurt içi gerekse yurt dışı pazarda satılmaktadır. Türkiye, dünya genelinde %29,1'lik bir pazar payına sahiptir (İnt. Kyn.1, Lyday 2007).



2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Borlama ve Özellikleri

Borlama, sıcaklığın etkisi ile difüzyon mekanizmasıyla gerçekleştirilen yüzey sertleştirme işlemlerinden birisidir. Bir başka deyişle; metalik malzemelerin yüzeyine borun yayıldığı sıcaklığa bağlı bir yayılım işlemidir. Demir ve demir dışı birçok alaşım ile sinterkarbür ve seramik malzemelere de uygulanabilmektedir. Borlanacak malzemelerin istenilen özellikleri dikkate alınarak 750-1400°C sıcaklık değerleri arasında ve 1-16 saat zaman dilimleri arasında katı, sıvı, gaz, pasta, plazma pasta, elektrokimyasal, spark plazma sinterleme ve lazer plazma yöntemleri kullanılarak farklı ortamlarda borlanabilmektedirler (Çalık *et al.* 2002, Çalık and Özsoy 2002, Ünüvar 2013, Güneş 2010). Borlama işlemi sonunda oluşturulan borür fazlarının en önemli özellikleri yüksek ergime sıcaklığına (1400-1550°C) ve yüksek sertliğe (1420-5000HV) sahip olmasıdır (Sinha 1991, Maragoudakis 2002, Topuz 2009). Şekil 2.1’de B-W denge diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.1 Bor-Tungsten denge diyagramı (İnt. Kyn. 2).

2.2 Borlamada Kullanılan Yöntemler

Uygun sıcaklıklarda malzemenin yüzeyine yayılan bor, metalle bir ya da birkaç inert metalik fazdan meydana gelen tabaka oluşturur. Yapılan bu işlem esasen metal ile borun bir arada bulunduğu bor verici ortamda elektro-kimyasal veya kimyasal reaksiyonlar sonucunda metal yüzeyine borun yayılmasıdır. Borlama işleminin gerçekleştirildiği ortam ise; aktivatör, dolgu, deoksidant ve bor kaynağından oluşur. Tabakanın oluşumuna ve düzenli büyümesine aktivatörler etki eder. Borlama yapılan sıcaklıklarda oksijenin tutulmasını sağlayarak redükleyici bir ortam oluşturmasını ve borlama yapılan maddelerinin altlık malzemeye yapışmasını da dolgu ve deoksidantlar önlerler (Türktekin 1998).

Borlama sonucunda oluşan borür tabakasının özelliklerini sıralamak istersek; yüksek aşınma direnci, çok yüksek sertlik değerine, yüksek sıcaklık dayanımına, kaplanan yüzeye iyi tutunma, yüksek ısılarda dahi malzemenin sertliğini koruması, genleşme katsayısının demir malzemelerine oranla uygun olması gibi özelliklere sahiptir.

Borlamada kullanılan bazı yöntemler;

- a- Katı borlama
- b- Alternatif akım ile borlama
- c- Sıvı borlama
- d- Gaz borlama
- e- Plazma pasta borlama

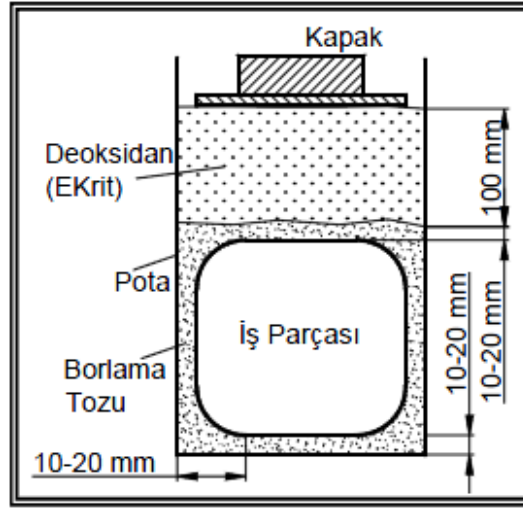
2.2.1 Katı Borlama

Katı (toz) ortamda borlama, kutu borlama olarak da adlandırılır. Bu yöntem; ekonomik yönden bir nebze de olsa daha ucuzdur. Toz bileşiminin kolayca değiştirilebilmesi, kullanılan cihazların ve donanım sisteminin basitliği gibi faktörlerden dolayı uygulama alanı geniştir. Bor verici bileşikler (bor karbür, amorf bor ve ferrobör gibi), alkali metaller, KBF_4 , AlF , NaCl , NH_4C_1 gibi aktivatörler, amonyum bor florürler, Al_2O_3 ve

SiC gibi dolgu maddelerinin veya reaktif olmayan bileşiklerin belirlenen oranlarda karıştırılması ile yapılır (Sorkun 2000, Demirel 2013).

Borlamada kullanılacak olan toz yüksek ısılara dirençli çelik sac kutu içerisine koyulur. Borlanacak malzeme tozun içerisine gömülür. Borlanacak numunenin etrafında borlama tozu minimum 10-20 mm kalınlıkta olmalıdır. Borlama tozunun üstüne SiC vb. bir dolgu malzemesi ilave edilerek kutu doldurulur.. Kutunun ağzı oksitlenmeyi engellemek amacı ile hava girişini kesen kapak yardımı ile kapatılır. Potanın hacmi, fırın hacminin % 60'ını geçmemesi sağlanmalıdır. Bu sayede ısıtıcılara yakın olmasından dolayı, potada meydana gelen veya potada gerçekleşebilecek yüksek iç gerilmeler, çatlaklar ve pota yüzeyindeki malzemenin dökülmesini önlemek amaçlanır. Ayrıca işlem sırasında yeniden toz ilavesi gerektiren durumlarda (toz ilavesi yaklaşık % 20-50) borlamaya devam edilebilmesini sağlar (Bindal 1991, Uluköy and Can 2005, Dilektaşlı 2014).

Hazırlanan paslanmaz çelikten yapılmış kutu borlama yapılmak istenen sıcaklığa (700-1400°C) ısıtılmış elektrik rezistanslı bir fırına yerleştirilir. 1-16 saat bekletilerek borlama işlemi yapılır. Bekletildikten sonra kutu fırından alınarak oda sıcaklığına kadar hava da soğutulur ve parça içinden çıkarılır. Bu esnada çelik kutunun kapağı açılmaz ve üzerinde kendi ağırlığı ile bekletilir. Karbürleme de olduğu gibi sıkı bir şekilde kapatılmasına gerek yoktur. Ancak işlem normal atmosfer de yapılacak ise kapak sıkıca kapatılır. Bu yöntem koruyucu argon gazı kullanılmıyorsa, kapağın sıkı bir şekilde kapatılması yada gerekli bazı önlemlerin alınması gereklidir. Yoksa numune borlama yerine oksitlenebilir. Yöntem ucuzdur, fakat Ekabor tozunun yaklaşık fiyatı 110 TL'dir ve özel bir teknik gerektirmez. Şekil 2.2'de katı borlama yönteminin şematik olarak gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.2 Katı borlama yöntemi (Dilektaşlı 2014).

Borlama ortamında ana bileşen olarak borkarbür, ferrobor ve amorf bor yer almaktadır. Borkarbür diğerlerine göre nispeten daha ucuz olanıdır. Ayrıca borkarbürün diğer bor verici ortam olan amorf bor ve ferroborun ucuz olmasının yanında borkarbürün bileşimi zamana göre de sabit kalmaktadır. Saf ferroborun endüstriyel olarak eldesinin çok zor olması ve saf amorf borun da çok pahalı olması bu metotların kullanılmamasına neden olmuştur.

Katı ortam borlamasında B_4C , $NH_4F.HF$, KBF_4 , $Na_2B_4O_7$, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiC gibi borlama bileşikler farklı ağırlık oranlarında kullanılmaktadır (Özsoy 1991).

Katı ortam borlama yönteminde kullanılan maddeleri kullanım alanlarına göre sınıflandırdığımızda;

En uygun tabaka kalınlığının elde edilmesi için ticari ekabor-I® tozu kullanılır. Kullanılan bu toz sayesinde yüzey pürüzlülüğünün yüksek kaliteye erişmesi sağlanır. Çelik ve demir malzemelerde kullanılır.

Düşük alaşımlı çeliklerde yüzey pürüzlülüğü kalitesini arttırmak için ekabor-II® tozu kullanılır. Granül haldedir.

Ekabor-III® tozu yüksek alaşımlı çeliklerde kullanılır. Ekabor-II® tozundan tane olarak daha büyüktür ve yüzey kalitesi daha iyidir.

Sert malzemelerin borlanması ekabor-HM ürünü kullanılır.

Nikel ve nikel esaslı alaşımların borlanması Ekabor-Ni ürünü kullanılmaktadır.

Macun şeklinde olan ekabor pasta; metalik malzemelerin borlama işleminde, borlanmak istenen bölgeye sürülerek uygulanır. Borlama yapılacak numune (Mavi renk) bor tozu içeren kutu içerisine konulur. Yan taraflarına elektrotlar yerleştirilir. Borlama işlemi için kutu içerisine farklı miktarlarda Amper akım verilerek farklı sıcaklık ve sürelerde borlama işlemi gerçekleştirilir (Fei 2018).

2.2.2 Alternatif Akım ile Borlama

Xie vd. (2018) AISI 1045 çeliğini alternatif akım kullanarak katı borlama işlemine tabi tutmuşlardır. Borlama kutusu içerisine 1, 2, 4 ve 6 Amperlik bir akım uygulamışlardır. Akım miktarının artmasıyla Bor kutusunun sıcaklık yükselme değerlerinde artışlar gözlemlenmiştir. Yüksek Amper uygulanmasında fırın sıcaklığını yaklaşık 100°C artırırken, düşük amper uygulamasında 20°C artırmıştır. 600°C'de geleneksel katı borlamada yaklaşık 4 µm, 600°C+ 6 Amper alternatif akım uygulandığında 15 µm, 600°C'de sadece 6 amper alternatif akım uygulandığında ise 102 µm borür tabakası kalınlığı elde etmişlerdir. Aynı işlemler 800°C'de gerçekleştirildiğinde geleneksel borlamada yaklaşık 60 µm borür tabakası kalınlığı, 800°C fırın sıcaklığı 88 µm, sadece 800°C'de 6 Amper alternatif akım uygulandığında ise yaklaşık 134 µm borür tabakası elde etmişlerdir. Uygulanan amper miktarının artmasıyla birlikte FeB ve Fe₂B faz şiddetlerinde artışlar tespit etmişlerdir. Alternatif akım ile borlama geleneksel borlama ile karşılaştırıldığında, alternatif akım borlama işleminde daha yüksek borür difüzyon bölgesi elde etmişlerdir (Xie 2018).

Türkmen ve Yalamaç (2017), SAE 1020 çeliğini H₃BO₃ ile katı ortamda bir kutu içerisinde bor kaplama işlemine tabi tutmuşlardır. Borlama işlemini 850, 900 ve

950°C’de 4, 8 ve 12 saat süresince elektrik rezistanslı bir fırın içerisinde gerçekleştirmişlerdir. Borlama sonucunda borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla birlikte borür tabaka kalınlıklarında artışların olduğunu tespit etmişlerdir. Borür tabaka kalınlığının 45 ile 216 μm arasında değiştiğini gözlemişlerdir. Borlama sonucunda Fe_2B fazı elde etmişlerdir. AISI 1020 çeliğinin farklı ortamlarda borlanması sonucunda 153 ile 183 kJ/mol bir aktivasyon enerjisine sahip olduğunu belirtmişlerdir (Türkmen ve Yalamaç 2017).

Joshi vd. (2014) yaptıkları çalışmada AISI 4140 çeliğini 950°C’de 2 ve 3 saat süresince farklı ebatlara sahip kutular içerisinde $\text{B}_4\text{C} + \text{KBF}_4 + \text{SiC}$ karışımından oluşan bir bor tozu karışımı kullanarak borlama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Borlama işlemi sonucunda 20-30 μm arasında borür tabakası elde etmişlerdir. Elde edilen borür tabakası sertliklerinin 952 ile 1253 HV arasında değiştiğini görmüşlerdir. Borlama sonucunda FeB ve Fe_2B fazlarını elde etmişlerdir. Yazarlar normalizasyon ve su verilip temperlenmiş olan çelikle borlanmış çeliğin mikro abrasif aşınma davranışlarını incelemişlerdir. En iyi sonucu borlanmış numunelerde elde etmişlerdir (Joshi 2014).

2.2.3 Sıvı Borlama

Bor verici ortam sıvıdır. Borlama işlemi 850 - 1100°C sıcaklıkta, 2 - 9 saat sürelerde yapılır. Sıcaklık değerinin 850°C nin üstünde olması istenir. Sıcaklık değerinin 850°C’nin altında olması durumunda erimiş boraksın akıcılığı azalmaya başlar ve borlama işlemini olumsuz yönde etkiler (Bayça ve Şahin 2004, Ayter 2005). İşlemde susuz borik asit (B_2O_3), susuz boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), metaborik asit (HBO_2), boraks, bor karbür gibi bor bileşikleri kullanılır. Redükleyici olarak silisyum karbür, ferro silisyum, grafit, NaCl, Al kullanılır. Erimiş tuz banyosunda değişik oranlarda boraks, susuz boraks, metabor asidi, sodyum bor florid, borik asit, bor karbür bulunur. Difüzyonu önemli ölçüde iyileştirebilmek için SiC eklenir (Ayter 2005). İşlem koruyucu atmosfere gerek kalmadan normal atmosfer altında yapılır (Özsoy 1991). Borlama işlemi sonunda oluşan demir bor tabakaları oluşmuştur. Oluşan demir bor tabakasının kalınlığı ise 50-250 μm değerleri arasında yer almaktadır.

Bu yöntemin; vakum, kontrollü atmosfer ve gaz koruması gerektirmemesi, uygulanabilirlik bakımından kolay olması, sarf malzemelerin ucuz ve temininin kolay olması, karmaşık donanımlara ihtiyaç duymaması gibi avantajları bulunmaktadır. Bu avantajların yanında ciddi dezavantajları da mevcuttur (Çalık 2005, Ünüvar 2013, Güneş 2010).

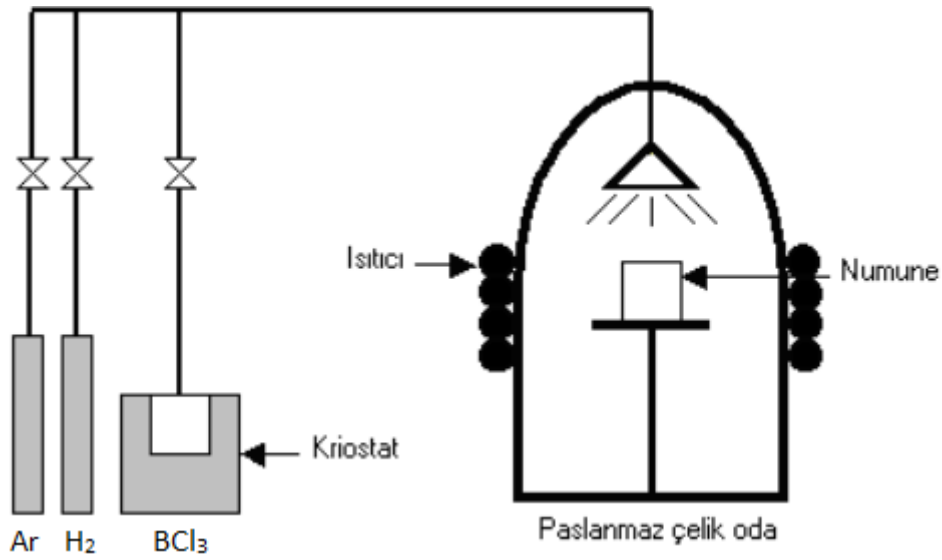
Dezavantajlarından bahsedecek olursak;

- Yüksek viskoziteli erimiş boraksla 850°C nin altında borlama yapmak kesinlikle imkansızdır. Bu sıcaklığın üzerinde bile bor banyosu içerisindeki sıcaklığın eşit dağılımına ulaşmak çok zordur.
- Özellikle kompleks parçalarda bu farklı yoğunluk akımları bor tabakasının farklı kalınlıklarda olmasına neden olmaktadır.
- Sıkı bir şekilde yapışmış tuz tabakası iş parçaları üzerinde oluşur ve bu oluşan tabakaların borlama işlemi tamamlandıktan sonra uzaklaştırılması maliyeti oldukça arttırır.
- Büyük boyutlu ve kompleks parçalara uygulanamaz (Baştürk ve Erten 20006).

2.2.4 Gaz Borlama

Borlama ortamı gaz fazındadır ve gaz ortamının bileşimi, gazın akış hızı, gaz ortamının basıncı borlamaya etki eden en önemli faktörlerdir. Bor verici ortam olarak bor halojenleri, organik bor bileşikleri, diboran B_2H_6 kullanılır.

Borlama işlemi, kapalı paslanmaz çelik haznedeki numune üzerine Ar ve H_2 gazlarının ve bi evapotartörde gaz haline getirilmiş olan bir bor kaynağının belirli bir mahlutun püskürtülmesiyle yapılır. İşlem 700-950°C sıcaklıklar arasında ve 67 KPa (0,67 bar), 1:15 $BCl_3 + H_2$ gaz mahlutunda gerçekleştirilir (Barış 2007, Taştan 2010, Bozkurt, 1984). Gaz borlama yönteminde kullanılan maddeler oldukça hassastır. BF_3 , BCl_3 , B_2H_6 , $(C_2H_3)_3B$ gibi. Bunlardan di boran (B_2H_6), H_2 ile beraber uygulandığında çok müspet sonuçlar alınabilmektedir (Arat 2011). Şekil 2.3’de gaz borlama yönteminin şematik olarak gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.3 Gaz borlama birimi (Arat 2011).

Gaz ortamında yapılan borlamanın olumlu ve olumsuz yönleri;

Olumlu yönleri;

- Gaz dolaşımının bir sonucu olarak borun daha iyi yayılması,
- Katı borlama işlemine oranla daha üstün sıcaklık kararlılığı ve daha kolay elde edilebilmesi,
- Eşit dağılmış kaplama avantajı,
- Parça boyutu diğer yöntemlere göre değişkenlik gösterebilmekte ve hazne kapasitesi müsaade ettiği boyutta parça işlenebilmesi.

Olumsuz sonuçları;

- $B(OCH_3)_3$ ise borlama işlemi sonucunda ortaya çıkan C yayını tabaka kalitesini olumsuz yönde etkiler ve bozar,
- Düzenek diğer sistemlere göre pahalıdır,
- Sistem içerisinde kullanılan gazlar zehirlidir,
- Sistem içerisinde oluşan gazların patlama riski bulunmaktadır.

Gaz ile borlama diğer metotlara nazaran daha homojen bir kaplama elde edilebilmektedir. Dezavantaj olarak bakacak olursak, gaz ile borlama prosesinin

kullanım alanları da sınırlı kalmaktadır. Gaz borlama yöntemi tüm olumsuzluklara rağmen diğer borlama yöntemleri ile kıyaslandığında daha iyi bir kaplama yüzeyi elde sağladığından ve gelişen teknolojinin katkısı ile daha yaygın kullanım alanı bulmaktadır (Arat 2011) .

2.2.5 Plazma Pasta Borlama

Plazma pasta borlama yöntemi plazma ortamında değişik gaz karışım ve oranlarında yapılmaktadır. Borlayıcı olarak boraks, borik asit, B_4C ve değişik bor mineralleri kullanılabilir. Güneş (2010) yaptığı çalışmada AISI 8620 çeliğini değişik boraks borik asit, B_4C ve SiC karışımları kullanarak plazma ortamında borlamıştır. Borlama işlemini geleneksel borlama yöntemlerine göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirmiştir. Plazma pasta borlama yöntemini katı borlama yöntemi ile karşılaştırmıştır. Plazma pasta borlama yöntemi ilk maliyetinin haricinde diğer yöntemlere göre daha düşüktür. Plazma ortamında borlama sonucunda katı borlamaya göre daha düşük sıcaklıkta daha büyük borür tabakası elde etmiştir (Güneş 2010, Güneş 2013).

2.3 Borlama İşleminin Avantaj ve Dezavantajları

Oluşan borür tabakasının avantajlarına değinmek istersek;

- Borlama işleminin en önemli hususiyeti, elde edilen borür tabakasının çok yüksek sertlik (1400-4900 HV) ve yüksek ergime sıcaklığına sahip olmasıdır. Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme yöntemleri olan karbürizasyon ve nitrürleme ile elde edilenlere göre çok daha yüksektir (Özbek 1999, Güneş 2010).
- Isıl işleme tabii tutulan malzemelerin özelliklerini en uygun seviyeye ulaştırabilmek için borlama işlemi sonrasında tamamen sertleştirmek mümkün olmaktadır
- Borlama yüzeyini istenilen hassaslıkta parlatılabilir (Petrova 2005).

- Borür tabakaları yüksek yüzey sertliğine ve düşük sürtünme katsayısına sahiptir. adhesiv, kimyasal, yüzey yorulması ve abrazif aşınma gibi aşınma sistemlerinin oluşumunu önleme üzerinde fayda sağlar. Bu özellikler sayesinde kalıp üreticileri, pahalı ve işlemesi zor olan takım çelikleri yerine, orijinal malzemeye oranla daha üstün özelliklere sahip ve de kolay işlenen çelik malzemeleri kullanabilmelerini mümkün kılmaktadır. Bu sayede kalıp maliyeti ve yağlayıcı kullanımını da azaltır (Sinha 1991).
- Borlama, malzemenin yapısı ne kadar karmaşık olursa olsun sertleştirilmek istenen yüzeylere homojen bir şekilde uygulanabilir (Ekmekçiler 2006).
- Borlanan malzemeler uzun kullanım ömrüne sahiptirler (Ekmekçiler 2006).
- Kontamine ihtimali olan ortamlarda malzemenin yorulma ömrünü artırır (Saygın 2006).
- Oluşan borür tabakası, malzemenin yüksek sıcaklıklarda kullanımında bile sertliğini korumasını sağlamaktadır.

Borlama işlemi avantajlarının yanında bazı dezavantajlara da sahiptir. Bunlardan birkaç örnek aşağıda verilmiştir;

- Borlama yöntemleri diğer yöntemlere göre değişken değildir. Gaz ortamda karbürleme ve plazma nitrürleme gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine kıyasla üretim maliyetleri daha fazladır. Daha esnek olan gaz sementasyonu ve plazma nitrürleme işlemleri borlamaya oranla daha avantajlıdır (Özbek 1999).
- Borlama yöntemi sonucunda oluşan borlanmış tabakalarda borlama yapılan alanın yapısına bağlı olarak tabaka kalınlığında boyutsal olarak % 5-25'i oranlarında artış gerçekleşir (Şen 1997).

2.4 Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulama Alanları

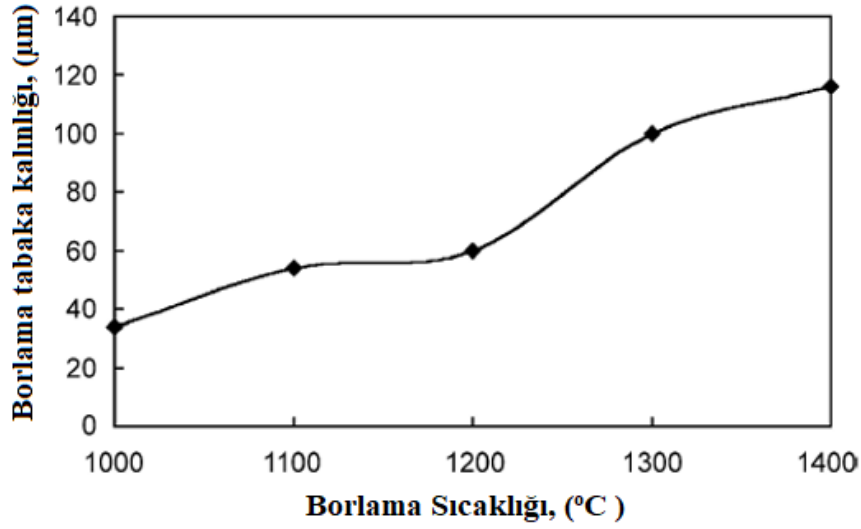
Bor ürünlerinin günümüzde kullanımı oldukça fazladır. Her geçen gün kullanım alanı daha da artmaktadır. Cam-seramik ve kimya sanayi, tarım, metalürji, enerji, sağlık, çimento gibi endüstrilerde kullanılmaktadır (Komisyon 2003, Özer 2011, İnt. Kyn. 1).

2.5 Tungstenin Borlanması İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Khor vd. (2008) isimli çalışmasında; %99 saflıkta 10 mm çapında tungsten çubuklar kullanılmıştır. Bu çubuklar 5mm kalınlıkta kesilerek diskler elde edilmiştir. Disklerin iki yüzeyi de düzeltilmiş ve asetonla temizlenmiştir. SiC çözücü ve B₄C bor kaynağı karışımından oluşan borlama toz karışımı bor kaynağı olarak kullanılmıştır. Tungsten diskler 20mm'lik borlama karışımına daldırılmıştır. Daha sonra Dr Sinter 1050 makinesinde farklı sıcaklıklarda (1000, 1100, 1200, 1300, 1400°C) 30 dakika işleme tabi tutulmuştur. Tungsten diskler iki tarafı 5mm olacak şekilde borlama paketi içerisine ilıştırılmıştır (Khor 2005).

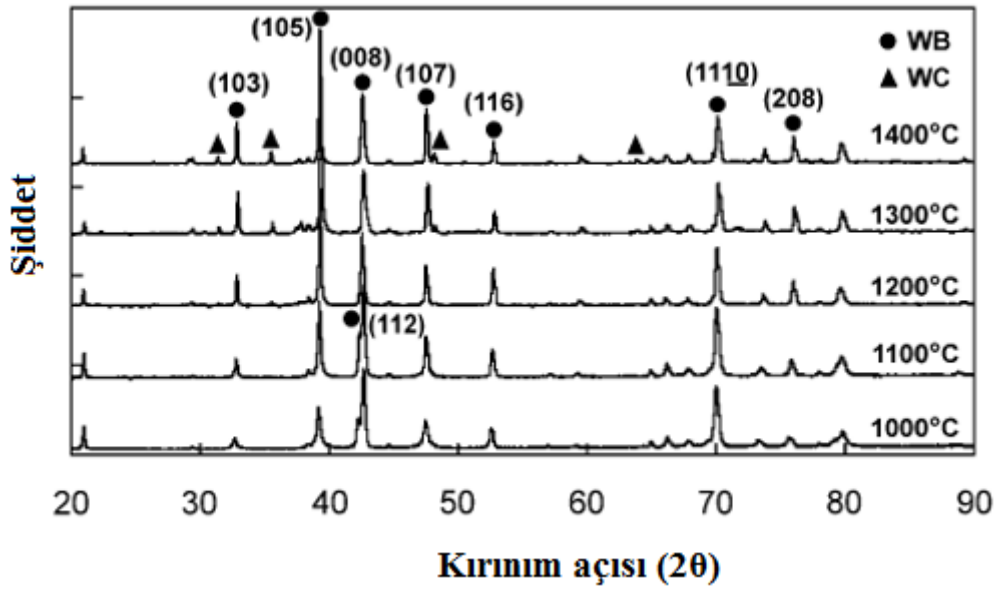
Borlama işleminden sonra diskler asetonla yıkanmıştır. Faz karakterizasyonu ve kristal yapı analizi için Philips MPD 1880 XRD sistemi kullanılmıştır (Khor 2005).

Tungsten bor'un (WB) farklı sıcaklıklardaki işlemleri sonucunda oluşan mikro yapısında; bor tabakası 1100°C'de çekirdeklenmeye başlamıştır ve sütunsu(testere dişi) görünümde büyümüştür. Sıcaklık arttıkça sütunsu yapı büyümesi artmaktadır. İşlem sıcaklığı arttıkça sütunsu büyümenin keskinliği de artmaktadır. 1300-1400°C'de parmaklı büyüme azalmıştır ve bilinmeyen bir tabaka altlık ve bor tabakası arasında sandviç olmuştur. 1100-1200°C arasında bor tabakası daha açık görülebilmektedir. 1000°C'den 1400°C'ye çıkıldıkça bor tabakasının artışı rahatlıkla gözlenebilmektedir. Bor kalınlığı 1000°C'den 1400°C'ye çıkarıldığında kalınlık 34 µm'ten 116 µm'ye ulaşmıştır. 1200-1300°C arasında borür tabaka kalınlığı artışı 40 µm olmuştur. Şekil 2.4'de bu görülmektedir (Khor 2005).



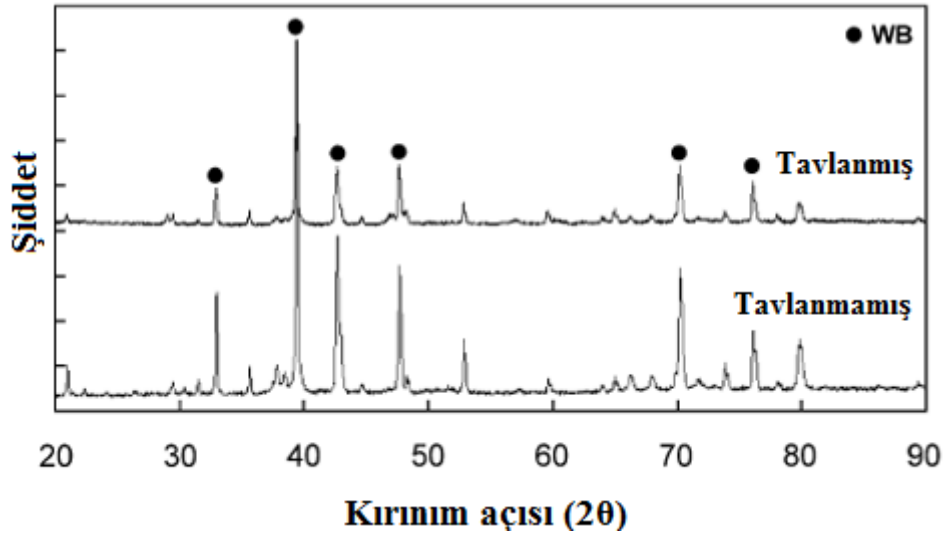
Şekil 2.4 Sıcaklık ile kalınlık arasındaki ilişki (Khor 2005).

Şekil 2.5’de XRD sonuçlarının sıcaklıkla değişimini göstermektedir. WB fazı 1000-1400°C arasında açıkça gözlenmektedir. WB tüm sıcaklıklarda görülmektedir. 1200-1400 arası WC gözlenmiştir.



Şekil 2.5 XRD sonuçlarının sıcaklıkla değişimi (Khor 2005).

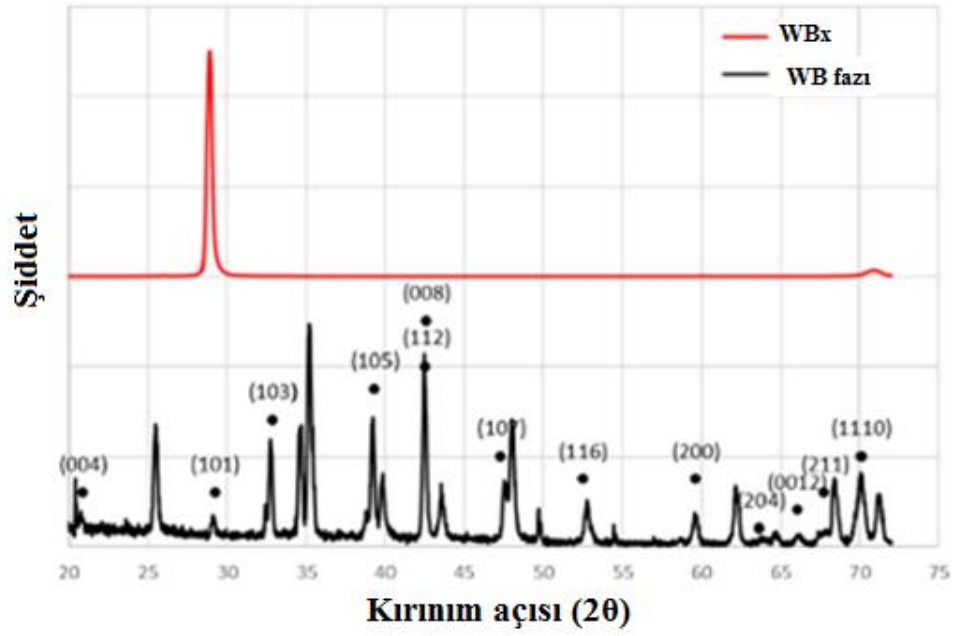
Şekil 2.6’da tavllanmış bor tabakasının XRD sonucunu vermektedir. Yoğunluğunda bir değişiklik gözlenmemiştir. Aynı şekilde mikro sertlikte de bir değişiklik gözlenmemiştir (Khor 2005).



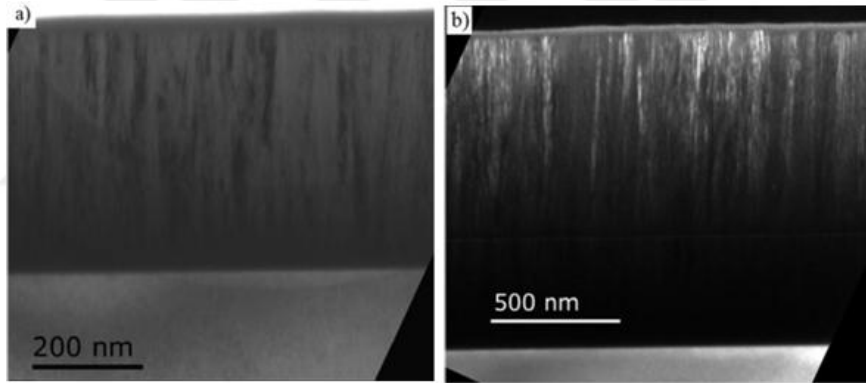
Şekil 2.6 Tavlanmış bor tabakasının XRD sonucu (Khor 2005).

Chrzanowska vd. (2018) ise yaptıkları çalışmada tungsten borürü spark plazma sinterleme yöntemi ile üretmişlerdir. Üretimde bor kaynağı olarak 625 mesh, 99.7% saflıkta bor (Sigma Aldrich) ve 625 mesh, 99.9% saflıkta tungsten (Sigma Aldrich) tozlarının molar olarak 2.5:1 oranında karışımı kullanmışlardır (Chrzanowska 2018).

Sonuç olarak; şekil 2.7’de XRD sonucu, resim 2.1’de SEM sonucu verilmiştir. Hedef WB (molar 57) ve WB₂ (molar 46) olarak iki fazda bulunmaktadır. Tungsten borun başka bir birleşimi görülmemiştir. WB hegzagonal yapıya sahiptir. $a=3.088 \text{ Å}$ ve $c=16.902 \text{ Å}$ olarak görülmüştür. Bu değer literatürle yaklaşık aynıdır. WB₂’de de hegzagonal yapı görülmektedir. $a=2.971 \text{ Å}$ ve $c=13.829 \text{ Å}$ sonuçları görülmektedir. Bu değer teorik hücre parametreleri ($a=2.983 \text{ Å}$ $c=13.879 \text{ Å}$) ile rahatlıkla karşılaştırılabilir. Bu değerler Scherrer formülü ile yapılan hesaplamayla doğrulanabilmektedir (Chrzanowska 2018).



Şekil 2.7 XRD analiz sonucu (Chrzanowska 2018).



Resim 2.1 WB bor tabakasının SEM görüntüsü (Chrzanowska 2018).

Yapılan diğer çalışmalarda;

Duan vd. (2018) Ti6Al4V alaşımını 900-1100°C sıcaklıkta, 5-30 dakika süresince katı borlama tekniği kullanılarak borlama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Borlama işlemi sonunda TiB+TiB₂'dan oluşan borür fazları elde etmişlerdir. Borür tabaka kalınlığının sıcaklık ve borlama süresine bağlı olarak 8-30 µm arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. (Duan *et al.* 2018).

Mohammadi vd. (2011) tungsten borürler üzerine yaptığı çalışmada %99,99 saf tungsten tozu ve amorf bor kullanarak tungsten borür malzemesi üretmişlerdir. Borlama

sonucunda WB_4 fazı elde etmişlerdir. WB_4 fazının sertlik ve tokluk özelliklerini araştırmışlardır. Tungsten bor fazının 4415 H_v sertliğe sahip olduğunu tespit etmişlerdir (Mohammadi et al.2011).

Yukio Shikada ve Mitsunori Yoshimoto (1973) elektrokimyasal olarak tungsten metalini 900°C’de 30 dakika süresince B_2O_3 ile borlamışlardır. Borlama sonucunda W_2B_5 borür fazını elde etmişlerdir (Shikada and Yoshimoto 1973).

Ingole vd. (2005) tungsten metalini 940 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süresince ekabor tozuyla borlamışlar ve sadece WB fazını elde etmişlerdir ve en yüksek 2500 H_v sertlik elde etmişlerdir (Ingole *et al.* 2005).

Usta vd. (2006) Tungsten metalini 940°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süresince Ekabor tozuyla borlamışlar, borlama sonucunda WB fazından dolayı yüksek sertlik değeri (2500 HV) elde etmişlerdir (Usta *et al.* 2006).

Nevill Gonzalez Szwacki vd. (2017) tungsten metalini grafen yapısına benzer 2 boyutlu bor kaynağı kullanarak borlamıştır. Borlama sonucunda 4000 H_v sertlik değeri elde etmiştir. Ayrıca borür tabakalarının WB_3 ve WB_4 fazlarından oluştuğunu gözlemlemiştir (Nevill Gonzalez Szwacki 2017).

3. MATERYAL ve METOT

Aşağıda tez çalışmasında deneylerde kullandığımız malzemenin özelliği, deney aşamalarında kullanılan cihazlar ve yöntemler ile ilgili bilgiler verilmiştir.

3.1 Deneylerde Kullanılan Hammaddeler

Bu çalışmada yapılan deneylerde Ø 20x8 mm boyutlarındaki %99.95 saflığında saf kullanılmıştır.

3.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Yapılan çalışmalarda kullanılan cihazların resimleri aşağıda yer almaktadır.

Borlama işleminin yapıldığı fırın resim 3.1’de verilmiştir.



Resim 3.1 Isıl işlem fırını.

Zımparalama işlemlerinin yapıldığı cihaz resim 3.2’de verilmiştir.



Resim 3.2 Metalografik numune zımparalama ve parlatma cihazı.

Mikro yapıların incelendiği optik mikroskop resim 3.3’te verilmiştir.



Resim 3.3 Optik mikroskop.

Numunelerin sertliklerinin ölçüldüğü mikrosertlik cihazı resim 3.4’te verilmiştir.



Resim 3.4 Mikrosertlik ölçüm cihazı.

Numunelerin minerolojik analizlerinin yapıldığı XRD cihazı resim 3.5’te verilmiştir.



Resim 3.5 X-ışınları Difraksiyon Analiz Cihazı (XRD).

Numunelerin mikro yapılarının incelendiği, tabaka kalınlıklarının ölçüldüğü ve EDX analizlerin yapıldığı SEM cihazı resim 3.6’da verilmiştir.



Resim 3.6 Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

Numunelerin aşınma testlerinin yapıldığı aşınma cihazı resim 3.7’de verilmiştir.



Resim 3.7 Aşınma cihazının görünümü.

3.3 Deney Parametreleri

Tez çalışmasında saf tungsten kullanılmıştır. Ø20x8 mm boyutlarında işlenen saf tungstene kaplama işlemi yapılmadan önce zımpara (sırası ile 120-180-240-320-400-600-800-1000 grid) işlemlerine tabi tutulmuş ve 1 µm alümina solüsyonunda zımpara sonrası parlatma yapılmıştır. Kutu borlama yöntemi ile borlama işleminin gerçekleştirilmesi için Ekabor-II® tozu paslanmayan çelik kutu içerisine belirli miktar koyulmuştur. Borlamak istediğimiz numuneler içerisinde toz bulunan kutu içerisine yerleştirilmiş ve üzerine ilave edilen Ekabor-II® tozu ile tamamen gömülmüştür. Isıl işlem sırasında oksijen giriş çıkışını kesmek ve oksitlenmeyi önlemek için yüzeye 2 mm kalınlığında ekrit tozu ilave edilerek potanın kapağı kapatmıştır. Kapatılan kapağın etrafı hava girişi önlenecek şekilde şamot çamuru ile örülerek kapatılmıştır. Sıcaklığın değişiminin $\pm 1^{\circ}\text{C}$ hassaslık derecesinde kontrol ve müdahale edilebildiği elektrik rezistanslı fırında sırayla 900,950 ve 1000°C’de 2,4 ve 6saat süreyle resim 3.8’de gösterilen ısıtma işlemi fırınında katı borlama işlemine tabi tutulmuştur. Katı borlama işlemi sonrasında numuneler fırın içerisinden alınarak dışarıda kutu içerisinde oda sıcaklığına kadar havada soğutulmuştur. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler çizelge 3.1’de görülmektedir.

Çizelge 3.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler.

DENEY PARAMETRELERİ		
Malzeme	Saf Tungsten	
İşlem Sıcaklığı, (°C)	900, 950 ve 1000	
İşlem Süresi, (Saat)	2, 4 ve 6	
Aşınma Deneyleri		
	900 ve 1000 (°C)	2 ve 6 saat
Uygulanan Yük	Aşınma Mesafesi	Kayma Hızı
10 N	1000 metre	0.2 ve 0.4



Resim 3.8 Borlama işleminin yapılışı.

3.4 Metalografik İşlemler

Ekabor-II® bor tozu ile borlama işlemine tutulan numuneler, kesitleri alınarak etrafi reçine ile kalıplanmış ve gerekli sırası ile 120-180-240-320-400-600-800-1000 grid zımparalar ile zımparalama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra 1µm alümina solüsyon ile parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Dağlama işleminde de % 4 içerikli nital dağlayıcı (% 4 nitrik asit, % 96 etanol) kullanılmıştır.

3.5 Tabaka Kalınlık Değeri Ölçümleri

Borlama işlemi sonrası numunelerin elde edilen tabaka kalınlık değerleri resim 3.3’de yer alan Olmypus BX-60 optik mikroskoba adapte edilen bir cihaz yardımı ile 20 farklı bölgeden alınan ölçüm değerlerinin ortalaması alınarak oluşan bor tabaka kalınlığı hesaplanmıştır.

3.6 Sertlik Değeri Ölçümleri

Numunelerin yüzeylerinde oluşan bor tabakalarının sertlik ölçümleri resim 3.4’te yer alan, AKÜ-TUAM’da bulunan SHIMADZU HMV-2 model sertlik ölçüm cihazı kullanılarak, 100 gr. yük uygulanarak Vickers sertlik ölçme yöntemiyle ölçülmüştür.

3.7 XRD Analizi

Borlama işlemi gerçekleştirilen numunelerin yüzeylerinde oluşan fazların analizi Afyon

Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde yer alan Shimadzu XRD-6000 marka ve modeli XRD cihazı (resim3.5'te görülmektedir) kullanılarak belirlenmiştir. XRD cihazında ışın olarak CuK_{α} radyasyonu kullanılarak numunelerin yüzeyleri, 20-90° aralığında analiz edilmiştir.

3.8 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Borlama işlemi sonrasında aşınma işlemine tabi tutulan malzemelerin aşınma bölgelerindeki mikro yapının analizi Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde yer alan LEO 1430 VP markalı taramalı elektron mikroskobu (Resim 3.6'da görülmektedir) ile gerçekleştirilmiştir.

3.9 Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

Numunelerinin yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçümü, Taylor-Hobson Rugosimeter olarak adlandırılan yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır.

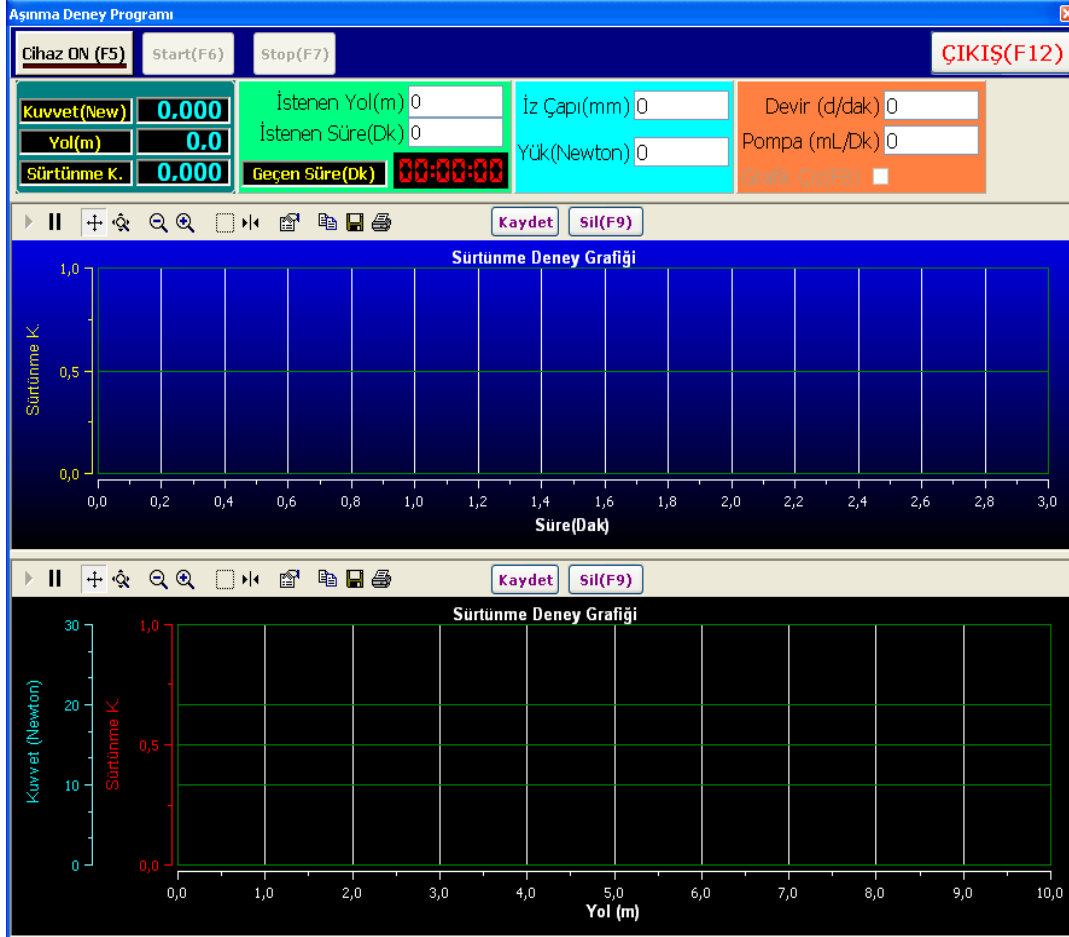
3.10 Aşınma Deneyleri

Borlanmış numunelere oda sıcaklığında aşınma testleri uygulanmıştır. Aşınma testlerinde ASTM G99'a uygun olarak tasarlanan bilye-disk aşınma cihazı kullanılmıştır (Resim 3.7). Bu sistemde, sabit duran ve yüklemenin üzerinden yapıldığı bilye tutucu ve bunun karşısında dönme hareketi yapan bir disk vardır. Diskin hareketi, 0.7 KW gücünde, dikey olarak yerleştirilen bir A.C motoru ile sağlanmıştır. Motora bağlanan kontrol ünitesi ile bilgisayar programından devir sayısı 0-1000 dev/dak. arasında ayarlanabilmektedir.

Aşınma işlemi sırasındaki sürtünme katsayılarının belirlenmesi amacı ile yükleme kolunda bilye tutucuya yakın olan bölüme yük ölçer (loadcell) bağlanmıştır. Standart olarak kullanılan uzama ölçerle (straingage) donatılmış ve Wheat stone köprü sistemine göre çalışan yük ölçer (loadcell) aracılığı ile bilye ve disk sistemindeki birbirine teğet olan kuvvetler saptanmıştır.. Yük ölçerden gelen sinyaller ADAM-3016 amplifikatörde

düzenlendikten sonra, I/O dönüştürücü kart (PCL-812PG) vasıtasıyla sanal ortamda bilgisayara aktarılmaktadır. Ortaya çıkan sürtünme katsayısını hesaplamak için Borland Delphi 5’de yapılan program, teğetsel kuvvetin yüke bölümü olan μ , sürtünme katsayısının zamana bağlı olarak değişen grafiğini vermektedir. Uygulanan test boyunca programa saniyede 15 veri aktarılmakta ve bu verilerin ortalamasını hesaplamaktadır.

Aşınma deneylerinde bilye olarak H.C. Starck Ceramics Gmbh firmasından alınan, çapı 8 mm ve ortalama sertliği 1895 HV değerine sahip WC-Co bilyeler kullanılmıştır. Her deneyde ayrı bir aşındırma elemanı kullanılarak, aşındırma elemanının yüzeyinde oluşabilecek bozulmalardan kaynaklanan hatalar ortadan kaldırılmıştır. Bilye-disk sisteminde uygulanan aşınma deneyleri, kuru sürtünme şartlarında, oda sıcaklık değerinde, 10 N yük altında, 0.2 ve 0.4 m/s kayma hızında ve 1000m mesafe boyunca gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyi uygulanmadan ve uygulandıktan sonra her numune ve aşındırma elemanı alkol ile yüzeyde oluşabilecek pisliklerden arındırılmıştır. Aşınma deneyinin sonunda numunelerin aşınma hacimleri Rugosimeter olarak adlandırılan cihazdan elde edilen veriler yardımı sonucunda; aşınma kesit alanlarının, oluşan aşınma izinin çevresiyle çarpımı işlemleri sonunda elde edilmiştir. Aşınma hızı, aşınan hacim miktarının uygulanan yük ile kayma mesafesinin çarpımına bölünmesi ile hesaplanmıştır.



Resim 3.9 Aşınma deney programı.

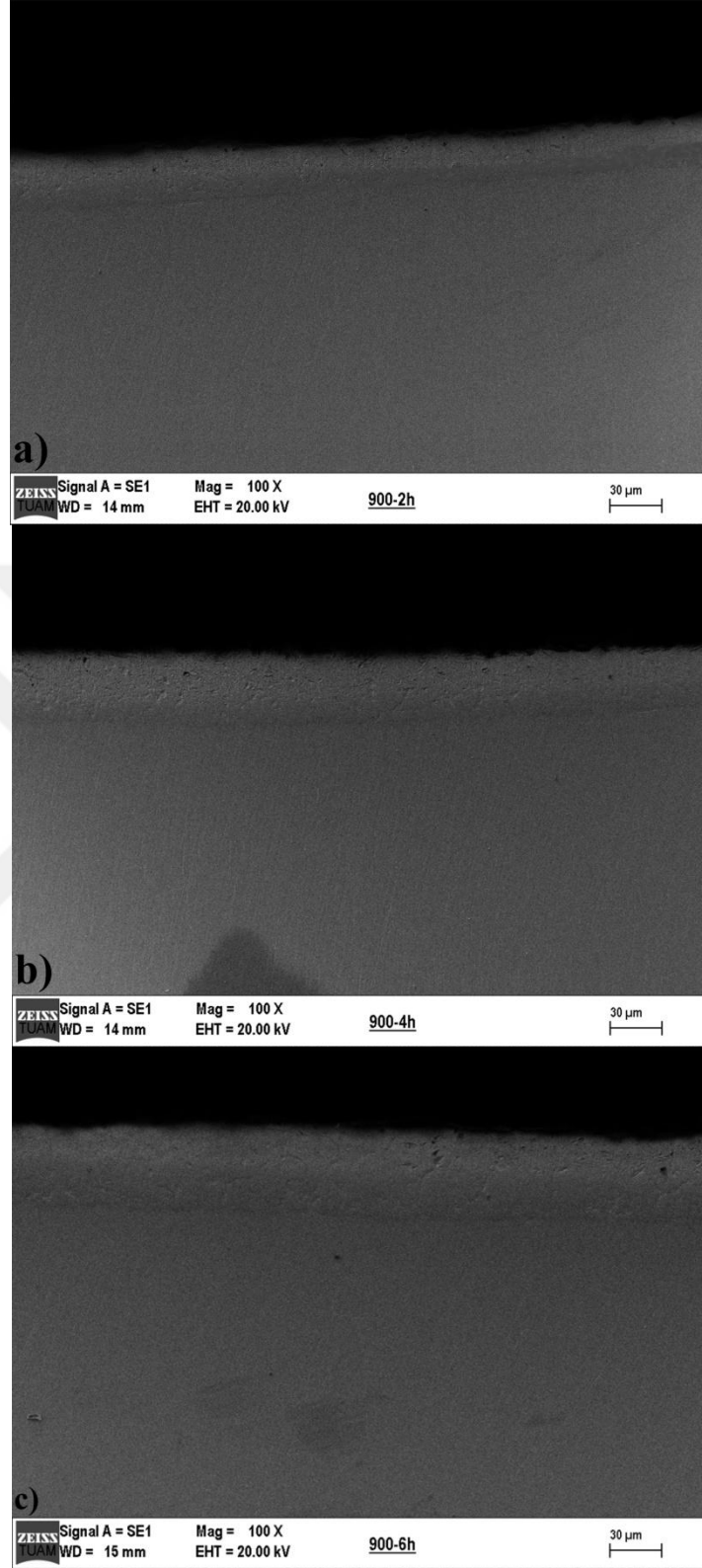
Sürtünme katsayısı programı vasıtasıyla kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Uygulanan aşınma deneylerinden elde edilen veriler sonucunda numunelerin borlama işlemi süresine ve kayma hızlarına bağlı olarak sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülüğü ve aşınma oranı grafikleri çizilmiştir.

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

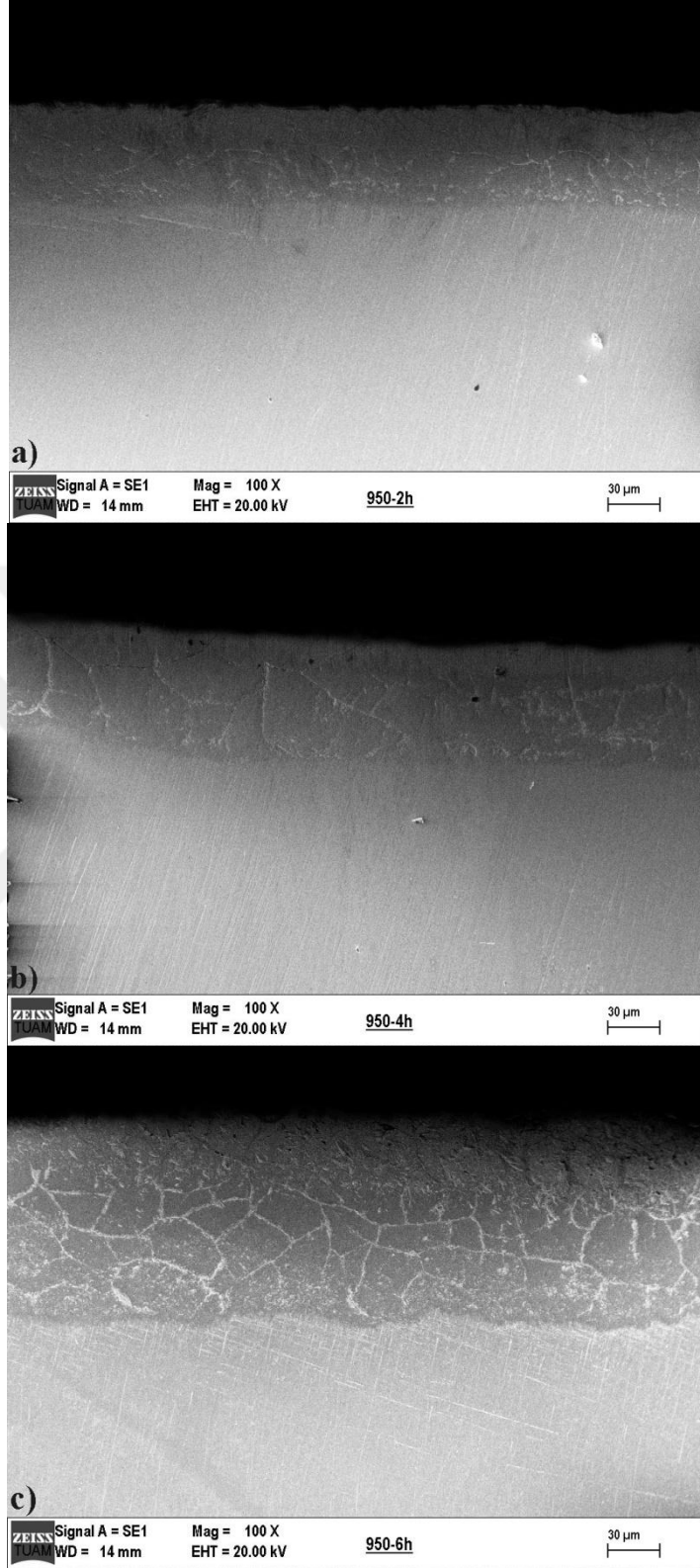
4.1 Borlanmış Saf Tungstenin Yüzey Karakterizasyonu

Resim 4.1’de 900°C’de, resim4.2’de 950°C’de, resim 4.3’te 1000°C’de 2, 4 ve 6 saat sürelerinde ticari Ekabor-II® tozuyla katı borlama işlemi uygulanmış olan saf tungstenin mikro yapı SEM görüntüleri verilmiştir. Borlama işlemi sonucunda numunelerde borür tabakaları elde edilmiştir ve borlama işlemi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen borür yapıları düz bir morfolojiye sahip olduğu görülmüştür. Literatürde de yer alan bilgilere baktığımızda, çelik malzemelerin borlanması sonucunda FeB ve Fe₂B fazlarının oluştuğu ve oluşan bu fazların mikro yapılarının incelemeler sonucunda belirgin bir şekilde ayrılmakta olduğu bilinmektedir (Culha *et al.* 2008, Gunes 2013). Fakat borlanmış tungsten metalinde böyle bir durum söz konusu değildir (Usta *et al.* 2006).

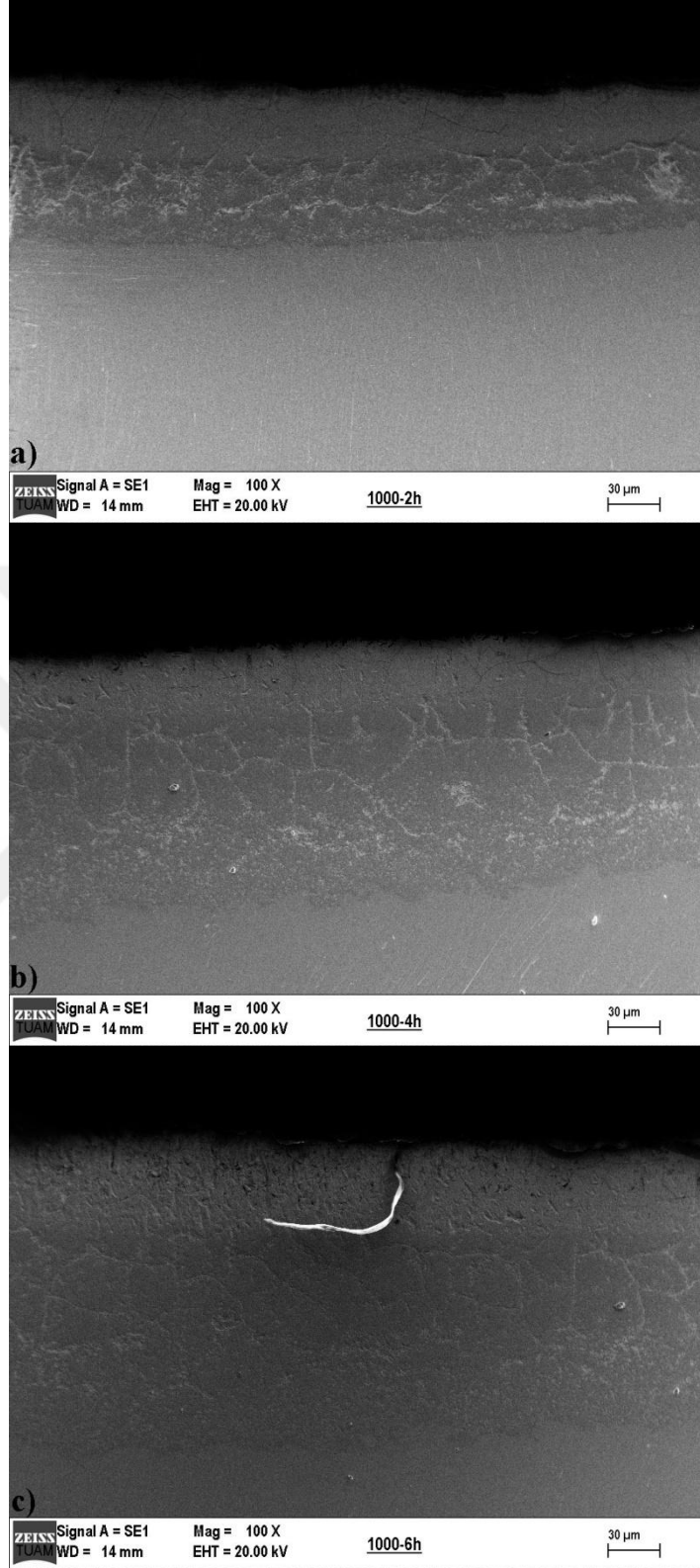
Borlama sıcaklığının ve süresinin artmasıyla birlikte borür tabaka kalınlıklarında artışlar gözlenmiştir. Borlama sıcaklığının artmasıyla bor atomlarının saf tungsten içerisine difüzyon işlemi hızlanmış ve daha büyük borür tabakaları elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda borlama işlem sıcaklığı ve süresinin artması ile beraber borür tabaka kalınlığının da arttığı bilinmektedir (Xie *et al.* 2018, Duan *et al.* 2018). Daha yüksek sıcaklık değerlerinde ve daha yüksek borlama sürelerinde daha yüksek tabaka kalınlıklarına ulaşılmaktadır (Di *et al.* 2018). Ortaya çıkan bu durum, difüzyonun kontrol altına alındığı tüm kaplama ve yüzey işlemlerinde beklenen ve hedeflenen bir sonuçtur. Mohammadi vd. (2011) tungsten borürler üzerine yaptığı çalışmada %99,99 saf tungsten tozu ve amorf bor kullanarak tungsten borür malzemesi üretmiştir. Borlama sonucunda WB₄ fazı elde etmişlerdir. WB₄ fazının sertlik ve tokluk özelliklerini araştırmışlardır. Tungsten bor fazının 4415 HVsertliğe sahip olduğunu tespit etmişlerdir (Mohammadi *et al.* 2011).



Resim 4.1 900°C sıcaklıkta borlanmış saf tungstenin SEM mikro yapıları, a)2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat.



Resim 4.2 950°C sıcaklıkta borlanmış saf tungstenin SEM mikro yapıları, a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat.



Resim 4.3 1000°C sıcaklıkta borlanmış saf tungstenin SEM mikro yapıları, a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat.

4.2 Saf Tungstenin Borlanması Sonucunda Elde Edilen Borür Tabaka Kalınlıkları

Çizelge 4.1’de Ekabor-II® tozu kullanılarak borlanmış saf tungstenin borür tabaka kalınlıkları Olmypus BX-60 optik mikroskoba adapte edilen bir aparat yardımı ile 20 farklı yerden alınan değerlerden elde edilen verilerin aritmetik ortalamasından bor tabakası kalınlıkları hesaplanmıştır. Borlama sıcaklığı ve borlama işlem sürelerinin artması ile doğru orantılı olarak borür tabaka kalınlıklarının da arttığı görülmüştür. Bu durum literatürle karşılaştırıldığında da uyum göstermektedir (Gunes. 2013, Gunes and Kayalı 2014). En düşük bor tabaka kalınlığı 900°C’de 2 saat borlanmış saf tungstende elde edilirken (18.65 µm), en yüksek bor tabakası (184.75 µm), 1000°C’de 6 saat süresince borlanmış saf tungstende elde edilmiştir. Moscicki vd. (2015) Spark plazma sinterleme yöntemiyle tungsten metalini borlamışlar, yaklaşık 3671 HV sertlik değeri ve WB₂, WB₃ fazları elde etmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen borür tabakalarının diğer yöntemlerde elde edilen tabaklara göre biraz daha yüksek olmasının nedeni çalışmada kullanılan Ekabor-II® bor toz boyutunun 150 µm’den daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Borlayıcı toz boyutu ne kadar küçük olursa numune yüzeyi ile daha fazla temas ettiğinden dolayı bor tabaka kalınlıklarını artırmaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürle uyumludur (Gunes. 2013, Gunes 2014, Kartal *et al* 2011, Moscicki *et al.* 2015, Makuch *et al* 2017, Chrzanowska-Gizyńska *et al* 2018).

Çizelge 4.1 Saf tungstenin borlama sonucunda elde edilen tabaka kalınlıkları (µm).

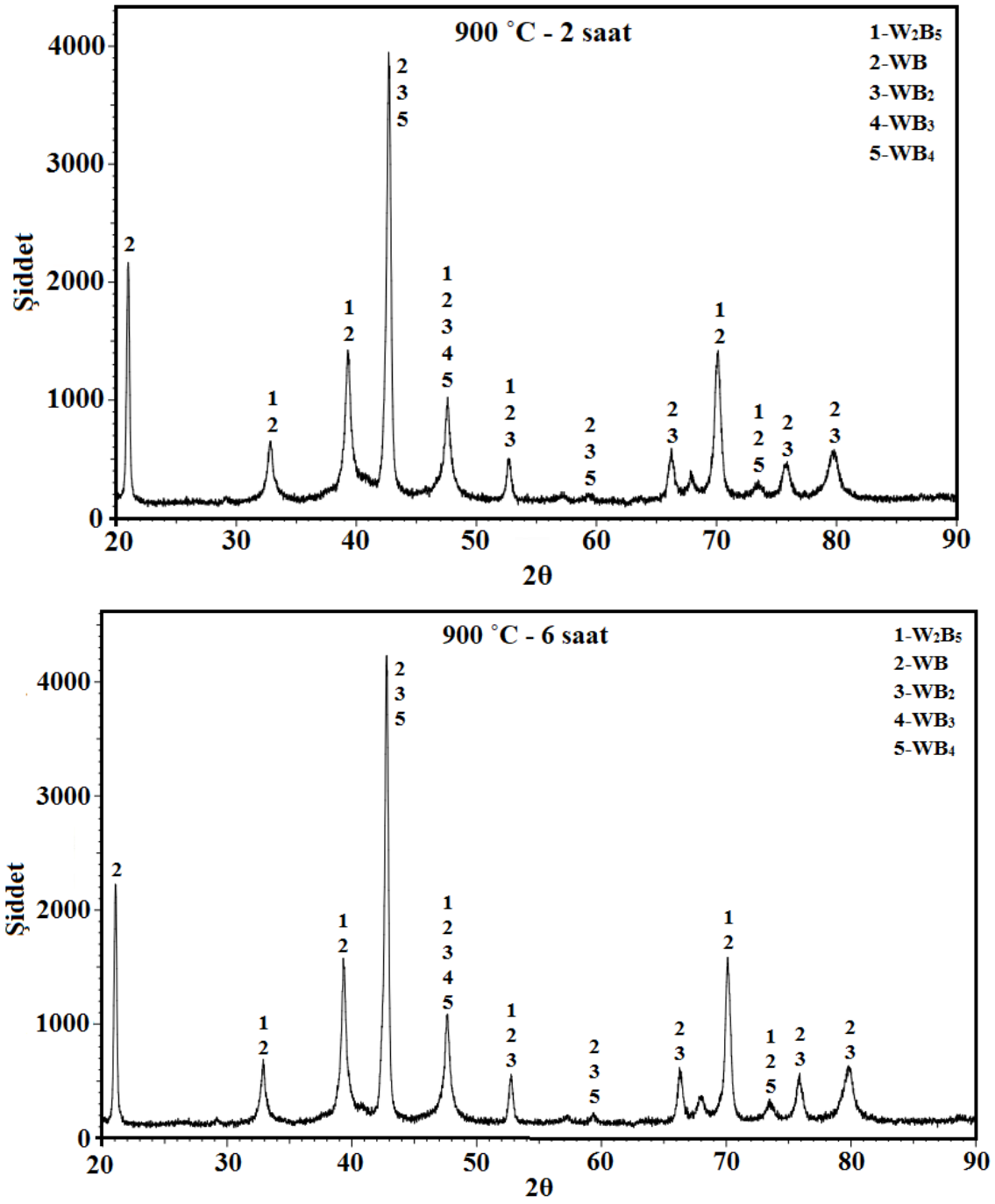
Borlama süresi, (saat)	Borlama Sıcaklığı		
	900 °C	950 °C	1000 °C
2	18,65	50,36	92,18
4	31,74	72,42	140,52
6	46,92	114,19	184,75

Duan vd. (2018) Ti6Al4V alaşımını 900-1100°C sıcaklıkta, 5-30 dakika süresince katı borlama tekniği kullanılarak borlama işlemini gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemi sonunda TiB+TiB₂’dan oluşan borür fazları elde etmişlerdir. Borür tabaka kalınlığının sıcaklık ve borlama süresine bağlı olarak 8-30 µm arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. (Duan *et al.* 2018). Chrzanowska-Gizynska vd. (2018) yaptıkları çalışmada tungsteni lazer puls yöntemi kullanarak 90 ile 180 dakika süresince borlamışlardır. Borlama

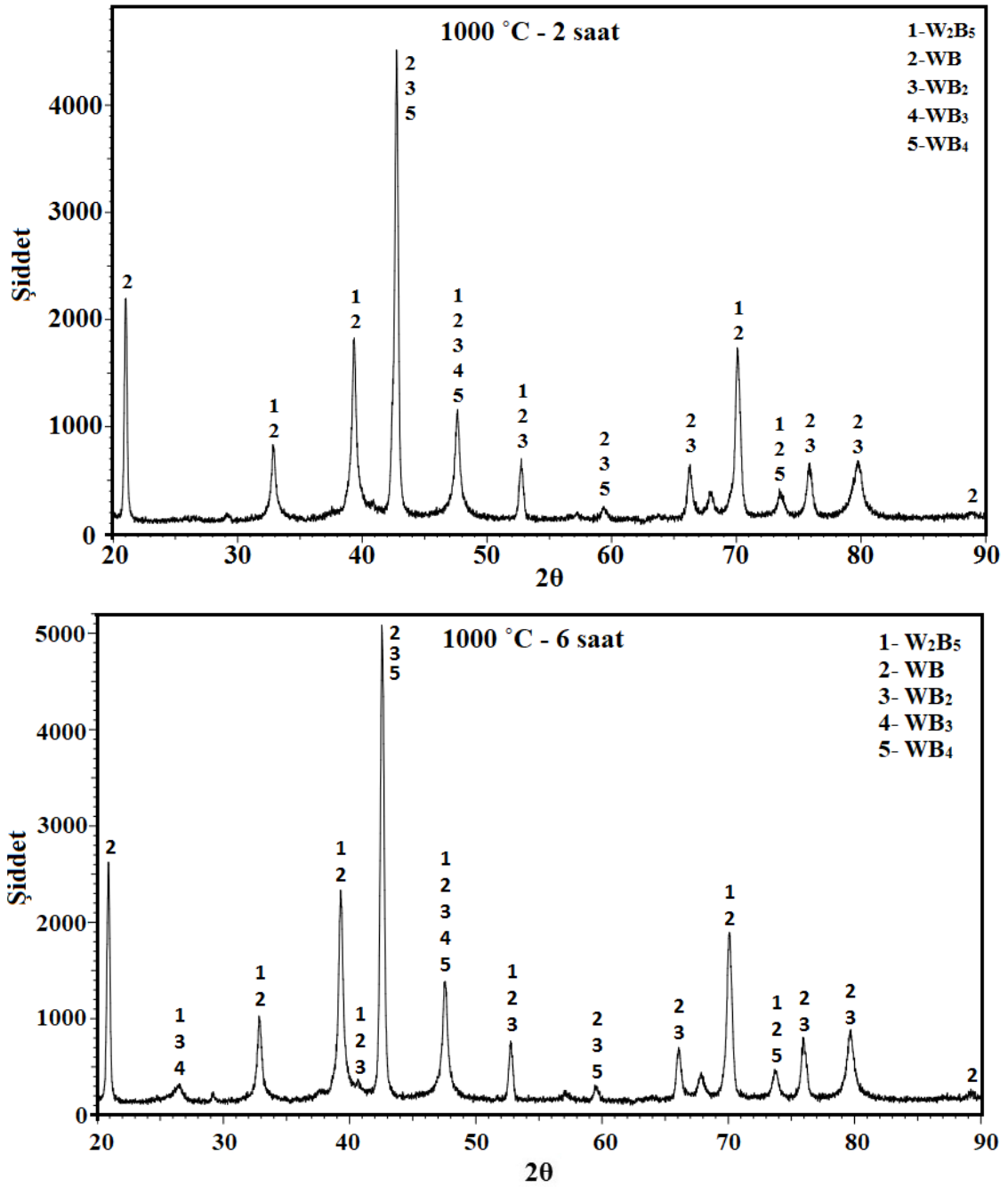
süresinin artmasıyla birlikte bor tabaka kalınlıklarının arttığını tespit etmişlerdir. Yaklaşık 10 µm'lik bir borür tabakası elde etmişlerdir (Chrzanowska-Gizynska *et al.* 2018).

4.3 Borlanmış Saf Tungstenin X-Işınları Difraksiyon Analizi

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de 900 ve 1000°C'de 2 ve 6 saat süresince katı borlama yöntemi ile borlanmış saf tungstenin XRD analizleri görülmektedir. Borlama işlemi sonucunda saf tungstende WB, W₂B₅, WB₂, WB₃ ve WB₄ fazları elde edilmiştir. Katı borlama sıcaklığının artmasıyla birlikte WB, W₂B₅ ve WB₂ faz şiddetlerinde artışlar görülmüştür.



Şekil 4.1 Katı borlanmış saf tungstenin XRD analizleri (900°C – 2,6 saat).



Şekil 4.2 Katı borlanmış saf tungstenin XRD analizleri (1000°C - 2,6 saat).

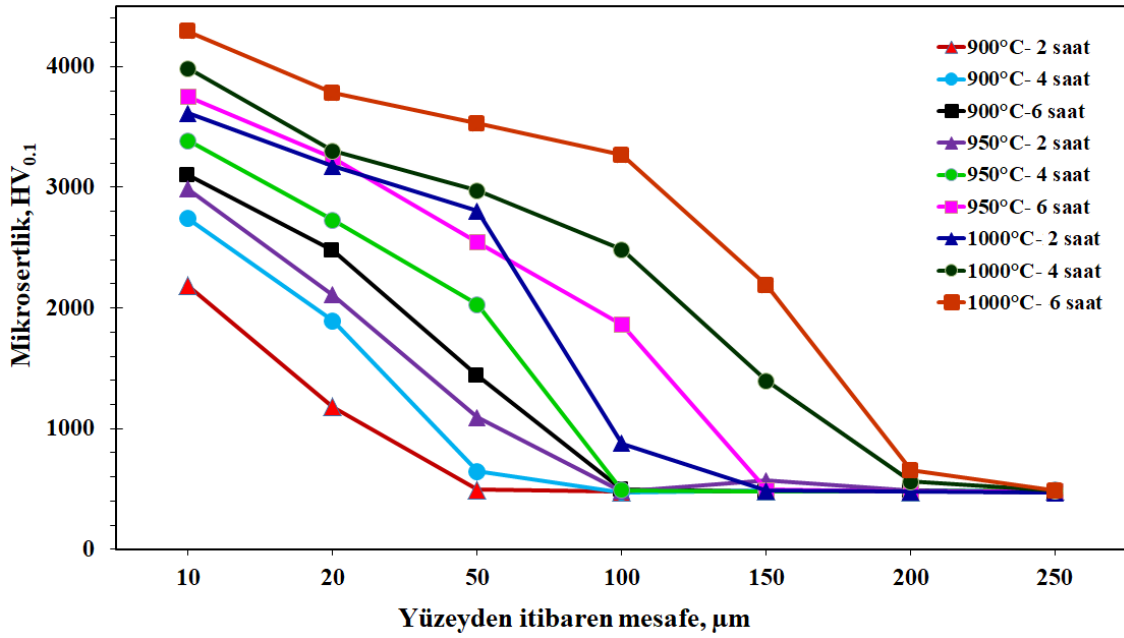
Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, alaşım elementi içeren çeliklerde farklı borür fazlarının (WB, W_xBy, CrB, Cr₂B, MnB, NiB, TiB, vs.) elde edildiği görülmüştür. Chrzanowska-Gizyńska vd (2018) tungsten alaşımını lazer yöntemiyle borlamışlar, XRD sonucunda borür tabakalarının WB, WB₂, α-WB, β-WB WB₃ fazlarından oluştuğunu bulmuşlardır.

Khor vd. (2005) spark plazma yöntemiyle tungsteni borlama işlemine tabi tutmuşlar ve WB ve WC fazları elde etmişlerdir (Khor *et al.* 2005). Yukio Shikada and Mitsunori Yoshimoto (1973) elektrokimyasal olarak tungsten metalini 900°C’de 30 dakika süresince B₂O₃ ile borlamışlardır. Borlama sonucunda W₂B₅ borür fazını elde etmişlerdir (Shikada and Yoshimoto 1973). Chrzanowska-Gizynska vd. (2018) yaptıkları çalışmada tungsteni lazer puls yöntemi kullanarak 90 ile 180 dakika süresince borlamışlardır. WB_{2,5} and WB_{4,5} fazlarını elde etmişlerdir (Chrzanowska-Gizynska *et al.* 2018). Ingole vd. (2005) tungsten metalini 940°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süresince Ekabor tozu ile borlama işlemine tabi tutmuşlar ve sadece WB fazını elde etmişlerdir (Ingole *et al.* 2005). Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında farklı W_xBy fazları elde edilmesinin nedeni bu fazların oluşması için hem gerekli aktivasyon enerjisi hem de borlamada kullanılan yöntem ve toz boyutundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.4 Borlanmış Saf Tungstenin Mikro Sertlik Sonuçları

Şekil 4.3’te Ekabor-II® tozuyla katı borlama yöntemiyle borlanmış saf tungstenin yüzeyden iç kısımlara doğru sertlik değerlerinin dağılımlarını gösteren grafikler verilmiştir. Ekabor-II® tozu kullanılarak yapılan katı borlama sonucunda oluşan WB, W₂B₅, WB₂, WB₃ ve WB₄ fazlarından dolayı yüzey sertliklerinin yüksek olduğu görülmektedir. WB, W₂B₅, WB₂, WB₃ ve WB₄ fazları FeB ve Fe₂B fazlarına göre daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu bilinmektedir (Gunes *et al.* 2011, Chrzanowska-Gizynska *et al.* 2018). Borlanmış saf tungstenin mikro sertlik değerlerinin 2185-4295 HV_{0,1} arasında değiştiği tespit edilmiştir. 900°C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlanması sonucunda sırasıyla 2185, 2742 ve 3098 HV_{0,1} sertlik değerleri elde edilmiştir. 950°C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlanması sonucunda sırasıyla 2986, 3385 ve 3751 HV_{0,1} sertlik değerleri elde edilmiştir. 1000°C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlanması sonucunda sırasıyla 3610, 3954 ve 4295 HV_{0,1} sertlik değerleri elde edilmiştir. Borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla birlikte bor tabakalarının sertlik değerleri artmıştır. Bu sonuç literatürle de bağdaşmaktadır (Usta *et al.* 2006, Gunes 2013, Nevill Gonzalez Szwacki 2017). Ingole vd. Tungsten metalini 940°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süresince Ekabor tozuyla borlamışlar ve en yüksek 2500 HV sertlik elde etmişlerdir (Ingole *et al.* 2005). Usta vd. (2005) Tungsten metalini 940°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süresince Ekabor tozuyla

borlamışlar, borlama sonucunda WB fazından dolayı yüksek sertlik değeri (2500 HV) elde etmişlerdir (Usta *et al.* 2006). Bu çalışmada elde edilen borür tabaka sertlik değerlerinin literatürde elde edilen değerlere göre biraz daha yüksek değerler çıkmıştır. Bunun nedeni diğer yöntemlerde elde edilen borür tabaklara göre biraz daha yüksek tabaka kalınlıkları elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen W_xB_y fazlarında ki bor oranının da bu sertlik değerlerini daha da yükselttiği düşünülmektedir.



Şekil 4.3 Borlanmış saf tungstenin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımları.

Khor vd.(2005) spark palzma yöntemi kullanarak tungsteni 1300 ve 1400°C’de 30 dakika süresince borlama işlemine tabi tutmuşlar 1826-1938 HV arasında sertlik değerleri elde etmişlerdir (Khor *et al.* 2005). Nevill Gonzalez Szwacki (2017) tungsten metalini grafen yapısına benzer 2 boyutlu bor kaynağı kullanarak borlamıştır. Borlama sonucunda 4000 HV sertlik değeri elde etmiştir. Ayrıca borür tabakalarının WB_3 ve WB_4 fazlarından oluştuğunu gözlemlemiştir (Nevill Gonzalez Szwacki 2017). Gu *et al.* (2008) tungsten metalini borlamışlar ve WB_4 fazının mekanik özelliklerini incelemişlerdir (Gu *et al.* 2008).

4.5 Borlanmış Saf Tungstenin Aşınma Özellikleri

4.5.1 Borür Tabakalarının Yüzey Pürüzlülüğü ve Sürtünme Katsayısı

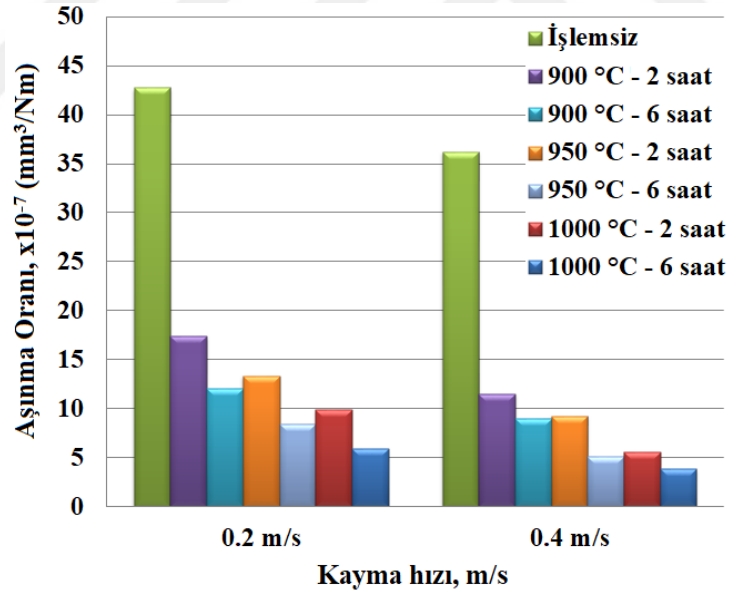
Çizelge 4.2’de borlanmış saf tungstenin yüzey pürüzlülük değerleri ve sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir. Borlama süresinde ki artmayla birlikte yüzey pürüzlülük değerlerinde artışlar gözlenmiştir. Kayma mesafesi ve borlama süresinin artmasıyla borlanmış saf tungstenin sürtünme katsayısı değerlerinde düşüşlerin olduğu tespit edilmiştir. Güneş ve Alper (2013), dişli çeliklerini farklı sıcaklıklarda Ekabor-II® bor tozuyla katı borlama yöntemi ile borlamışlar ve farklı kayma hızlarındaki sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Deney sonunda dişli çeliklerinde borür tabaka kalınlığı numune boyutlarında artışların olduğunu ve yüzey pürüzlülük değerlerini artırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca kayma hızının artmasıyla birlikte sürtünme katsayısında sıcaklığın etkili olduğunu ve sürtünme katsayısı değerlerinde düşüşlerin olduğunu gözlemlemişlerdir. Borlama sonucu elde edilmiş mikro sertlikler değerlerinin borlama sıcaklık ve süresine göre 1624 ve 2034 HV arasında değiştiğini söylemişlerdir. Sonuç olarak borlama işlem süresi ve sıcaklığının artmasıyla yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı sonucuna varmıştır (Gunes 2013, Gunes 2014). Duan vd. (2018) borlanmış Ti6Al4V alaşımının aşınma testi sonucunda sürtünme katsayısı değerlerini borlama işleminin düşürdüğünü tespit etmişlerdir (Duan *et al.* 2018).

Çizelge 4. 2 Borlanmış saf tungstenin aşınma oranı, yüzey pürüzlülük değerleri ve 10 N yük altında sürtünme katsayılarının değişimi.

Malzeme	Borlama sıcaklığı (°C) ve Süresi (saat)	Yüzey Pürüzlülük	Sürtünme Katsayısı		Aşınma Oranı	
		Ra(mµ)	Kayma Hızı (0.2 m/s)	Kayma Hızı (0.4 m/s)	mm ³ /Nm (0.2 m/s)	mm ³ /Nm (0.4 m/s)
Saf Tungsten	Borlanmamış	0,13±0,01	0,73	0,67	42,75	36,24
	900°C - 2 saat	0,24±0,01	0,56	0,53	17,41	11,52
	900°C - 6 saat	0,39±0,02	0,52	0,49	12,06	9,05
	950°C - 2 saat	0,42±0,02	0,51	0,46	13,38	9,29
	950°C - 6 saat	0,55±0,02	0,54	0,51	8,44	5,12
	1000°C - 2 saat	0,49±0,03	0,49	0,47	9,92	5,56
	1000°C - 6 saat	0,58±0,02	0,46	0,45	5,95	3,86

4.5.2 Borür Tabakalarının Aşınma Oranı

Şekil 4.4'te ve Çizelge 4.2'de farklı sürelerde borlanmış saf tungstenin aşınma oranlarının değişimi görülmektedir. Aşınma oranı borlanmamış numunede 0.2 ve 0.4 m/s kayma hızlarına göre sırasıyla 42.75 ve 36.24 mm³/Nm olarak elde edilmiştir. 900°C'de 2 ve 6 saat borlanmış numunelerde 17.41 ile 9.05 mm³/Nm arasında aşınma oranına sahip olduğu görülmüştür. 950°C'de 2 ve 6 saat borlanmış numunelerde 13.38 ile 5.12 mm³/Nm, 1000°C'de 2 ve 6 saat arasında ise 9.92 ile 3.86 mm³/Nm aşınma oranına sahip olduğu görülmüştür. Borlama süresinin artmasıyla birlikte saf tungstenin aşınma oranlarında azalmalar meydana gelmiştir. En düşük aşınma oranı 1000°C'de 6 saat borlanmış saf tungstende görülmürken, en yüksek aşınma oranı işlemsiz yani borlanmamış saf tungstende görülmüştür. Uzun borlama sürelerinde elde edilen sert borür fazlarından dolayı (WxBy) aşınma oranlarında düşüşler gözlenmiştir. Literatürde de benzer sonuçlar elde edilmiştir (Martini *et al.* 2004, Gunes 2013, Gunes 2014).

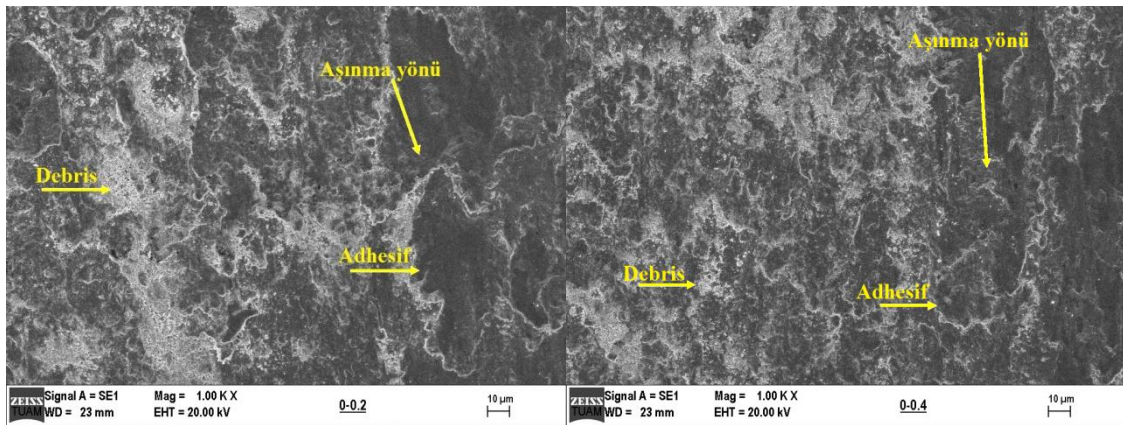


Şekil 4.4 Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış saf tungstenin, farklı kayma hızlarındaki aşınma oranları.

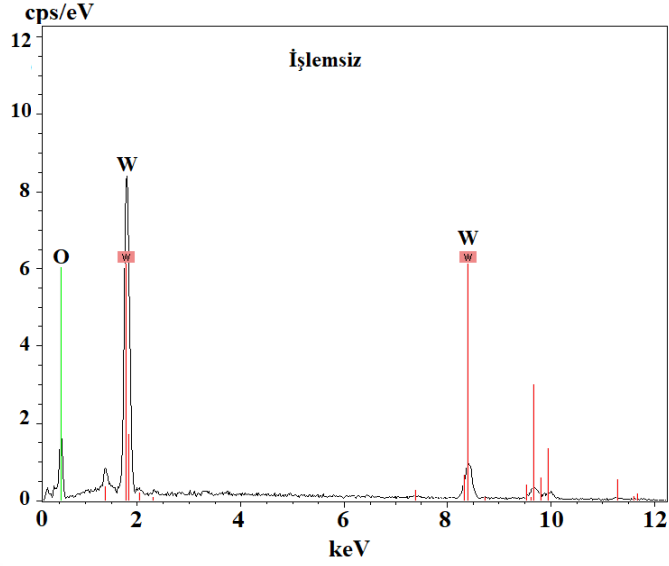
4.5.3 Borlanmış Saf Tungstenin Aşınma Bölgeleri SEM Mikroyapıları

Şekil 4.5-4.9'de farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış saf tungstenin farklı kayma hızlarında aşınması sonucunda elde edilmiş aşınma yüzeylerinin SEM mikroyapıları

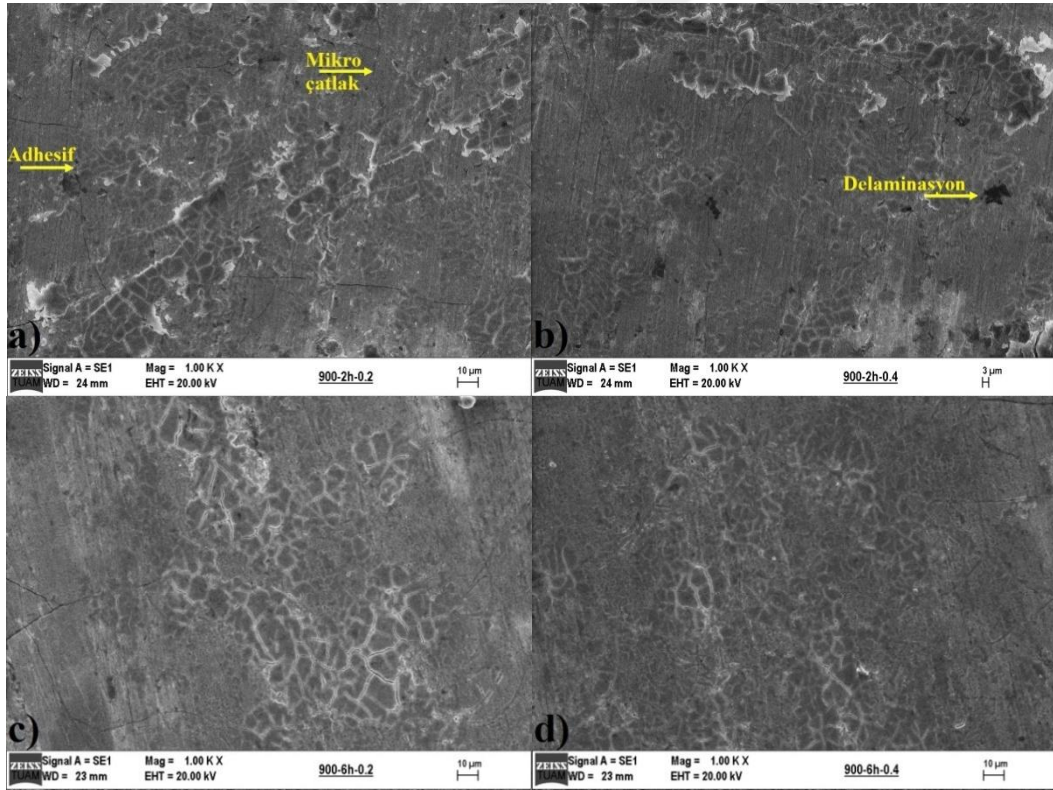
görülmektedir. Aşınma deney sonucunda borlanmamış numune yüzeyinde adhezif aşınma ve debrislerin olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.5). Şekil 4.5a ve 4.5b’de borlanmamış saf tungstenin aşınma bölgesinde abrazif ve adhezif aşınmalar meydana gelmiştir. Borlanmış saf tungsten numunelerinin aşınma bölgelerinde görülen debrisler, yüzey çizikleri, mikro çatlakların, adhezif ve abrazif aşınma olduğu görülmektedir (Şekil 4.7a-d). Ayrıca borlanmış numunelerin aşınma izlerinde, mikro çatlakların ilerlemesiyle oluşan aşınma yüzeylerinde pul pul dökülmelerin ve delaminasyon aşınmalarının olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.9’da aşınma sonucunda tabakalarda yorulmalar ile birlikte yüzeyde birçok mikro çatlaklar olduğu görülmüştür. Elde edilen çok yüksek sertliğe sahip numunelerin aşınma yüzeylerinde birçok mikro çatlak oluşmuştur. Bunda hem aşınma mesafesinin hem de borür tabaka sertliklerinin yüksek olmasının payı yüksek olduğu düşünülmektedir. Aşınma sonucunda borür tabakaların yorulması ve mikro çatlakların oluşması, bu çatlakların birleşerek ileride tabakalarda delaminasyon aşınmasına neden olabileceği görülmüştür. Güneş vd. (2011), plazma pasta yöntemi ile borlanmış olan AISI 52100, 440C ve 8620 çeliklerine aşındırma işlemi ve aşınma işlemi uygulamaları sonucunda borlanmış çeliklerin aşınma yüzeylerinde sürtünme ısısından dolayı meydana gelen oksit tabakalarının varlığından bahsetmişlerdir. Görülen bu oksit tabakalarının aşınma iz boyunca uzandıklarını ve borlanmış çeliklerin aşınma davranışlarını etkilediklerini tespit etmişlerdir (Gunes *et al.* 2011).



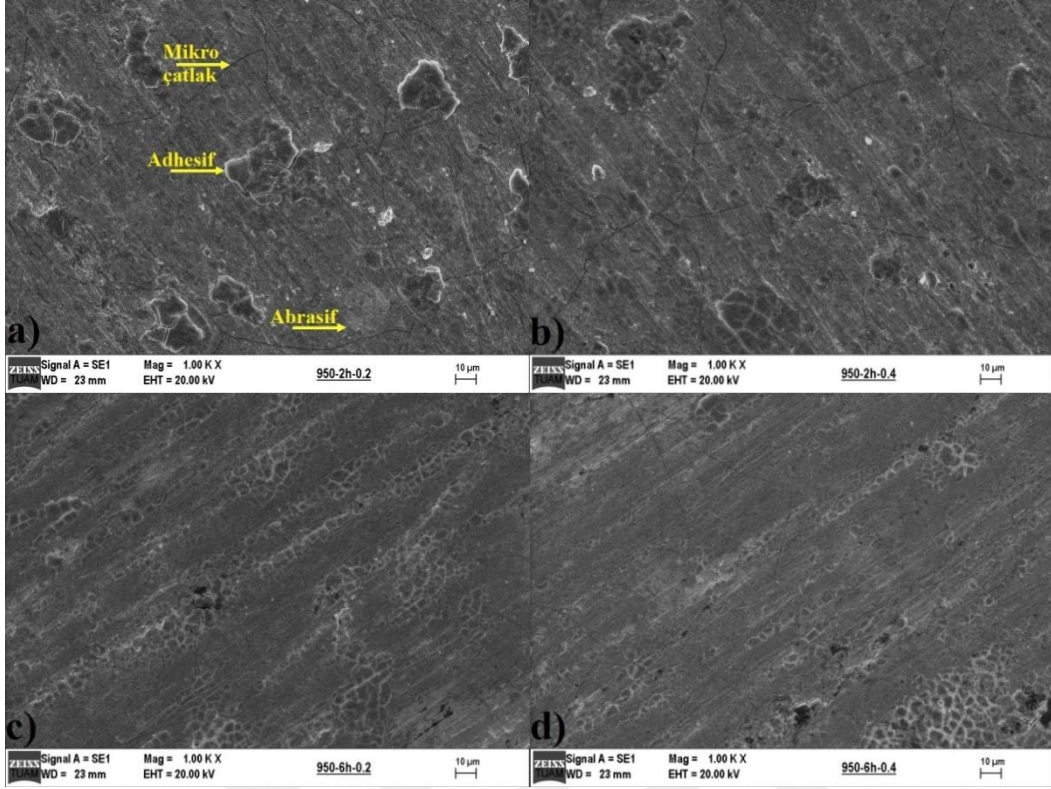
Şekil 4.5 Borlanmamış saf tungstenin aşınma bölgesi SEM görüntüleri.a) 0.2 m/s, b) 0.4 m/s.



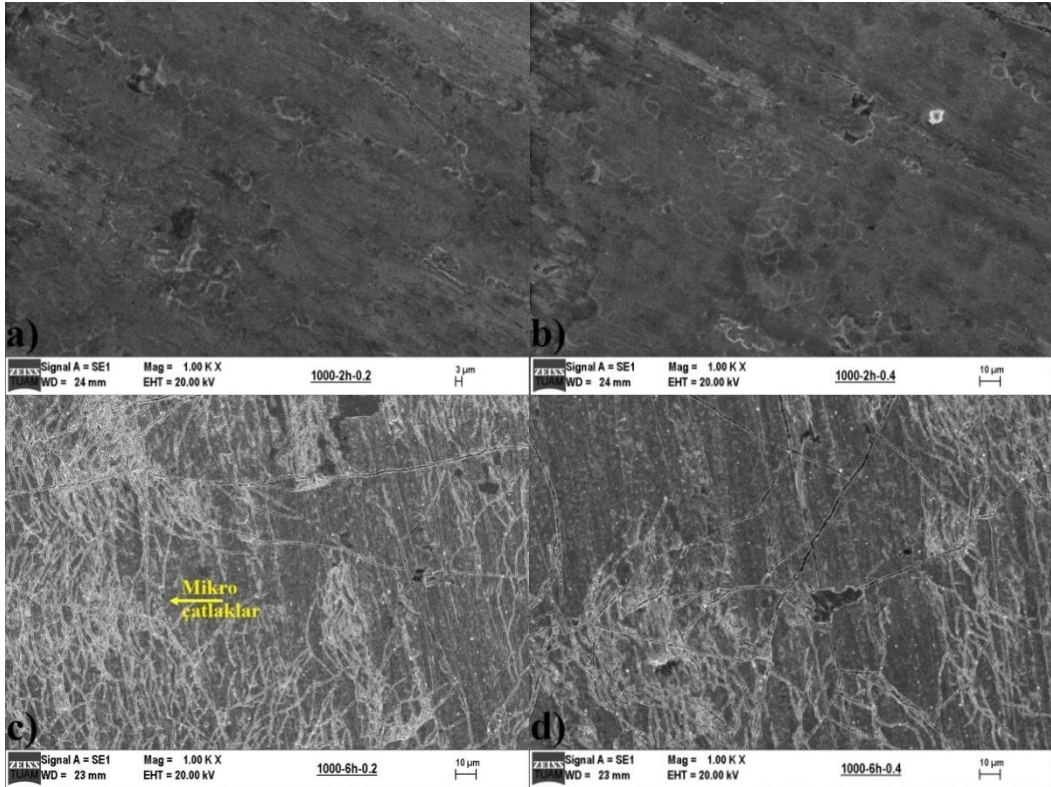
Şekil 4.6 İşlemsiz tungstenin aşınma testi sonrası edx analizi.



Şekil 4.7 Borlanmış saf tungstenin aşınma bölgesi SEM görüntüleri; a) 900°C-2 saat 0.2 m/s, b) 900°C-2 saat 0.4 m/s, c) 900°C-6 saat 0.2 m/s, d) 900°C-6 saat 0.4 m/s.



Şekil 4.8 Borlanmış saf tungstenin aşınma bölgesi SEM görüntüleri; a) 950°C-2 saat 0.2 m/s, b) 950°C-2 saat 0.4 m/s, c) 950°C-6 saat 0.2 m/s, d) 950°C-6 saat 0.4 m/s.



Şekil 4.9 Borlanmış saf tungstenin aşınma bölgesi SEM görüntüleri; a) 1000°C-2 saat 0.2 m/s, b) 1000°C-2 saat 0.4 m/s, c) 1000°C-6 saat 0.2 m/s, d) 1000°C-6 saat 0.4 m/s.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında saf tungsten 900,950 ve 1000°C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle ticari Ekabor-II® bor tozuyla borlanmıştır. Borlama işlemi sonucunda saf tungsten yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının mikro yapı, tabaka kalınlıkları, mikro sertlikleri, yüzey morfolojileri, XRD ve aşınma bölgelerinin SEM analizleri incelenmiştir.

Metalografik incelemeler sonucunda, kaplama/matris ara yüzeyi ve matrisin belirgin olarak birbirinden ayrılmadığı ve borür tabakasının düzgün bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Borlama sıcaklığı ve süresinin artmasıyla birlikte borür tabaka kalınlıklarında artışlar gözlenmiştir. Borlama sıcaklığının artmasıyla bor atomlarının saf tungsten içerisine difüzyon işlemi hızlanmış ve daha büyük borür tabakaları elde edilmiştir. En düşük bor tabaka kalınlığı 900°C’de 2 saat borlanmış saf tungstende elde edilirken (18.65 µm), en yüksek bor tabakası (184.75 µm), 1000°C’de 6 saat süresince borlanmış saf tungstende elde edilmiştir. 900°C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlanması sonucunda sırasıyla 18.65, 31.74 ve 46.92 µm borür tabaka kalınlıkları elde edilmiştir. 950°C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlanması sonucunda sırasıyla 50.36, 72.42 ve 114.19 µm, 1000°C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlanması sonucunda sırasıyla 92.18, 140.52 ve 184.75 µm borür tabaka kalınlıkları elde edilmiştir.

Borlama işlemi sonucunda saf tungstende WB, W₂B₅, WB₂, WB₃ ve WB₄ fazları elde edilmiştir. Katı borlama sıcaklığının artmasıyla birlikte WB, W₂B₅ ve WB₂ faz şiddetlerinde artışlar görülmüştür.

Ekabor-II® tozuyla katı borlama sonucunda oluşan WB, W₂B₅, WB₂, WB₃ ve WB₄ fazlarından dolayı yüksek yüzey sertlikleri elde edilmiştir. Borlanmış saf tungstenin mikro sertlik değerlerinin borlama sıcaklık ve süresine bağlı olarak 2185-4295 H_{v0,1} arasında değiştiği tespit edilmiştir. 900°C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlanması sonucunda sırasıyla 2185, 2742 ve 3098 HV_{0,1} sertlik değerleri elde edilmiştir. 950°C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlanması sonucunda sırasıyla 2986, 3385 ve 3751 HV_{0,1} sertlik değerleri elde edilmiştir. 1000°C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlanması sonucunda

sırasıyla 3610, 3954 ve 4295 HV_{0,1} sertlik değerleri elde edilmiştir. Borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla birlikte bor tabakalarının sertlik değerleri artmıştır.

Borlanmış saf tungstenin borlama öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ölçülerek borlama süresinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi incelenmiştir. Borlanmamış numunenin yüzey pürüzlülük değeri 0,13 µm iken, borlama sıcaklık ve süresiyle birlikte bu değer 0.24 ile 0.54 µm arasında değiştiği görülmüştür. Borlama süresinin artmasıyla birlikte sürtünme katsayısı değerlerinde düşüşler gözlenmiştir. Borlanmamış numunenin sürtünme katsayısı değeri 0,73 (0.2 m/s kayma hızında), 0.67 (0.4 m/s kayma hızında) elde edilmiştir. Borlama sıcaklık ve süresiyle birlikte sürtünme katsayısı değerinin 0.56 (0.2 m/s kayma hızında), ile 0.45 (0.4 m/s kayma hızında) arasında değiştiği görülmüştür. Kayma mesafesi ve borlama süresinin artmasıyla borlanmış saf tungstenin sürtünme katsayısı değerlerinde düşüşlerin olduğu tespit edilmiştir.

Borlama işlem süresinin artmasıyla birlikte saf tungstende meydana gelen aşınma oranlarında azalmalar görülmüştür. Aşınma oranı borlanmamış numunede 0.2 ve 0.4 m/s kayma hızlarına göre sırasıyla 42.75 ve 36.24 mm³/Nm olarak elde edilmiştir. 900°C’de 2 ve 6 saat borlanmış numunelerde 17.41 ile 9.05 mm³/Nm arasında aşınma oranına sahip olduğu görülmüştür. 950°C’de 2 ve 6 saat borlanmış numunelerde 13.38 ile 5.12 mm³/Nm, 1000°C’de 2 ve 6 saat arasında ise 9.92 ile 3.86 mm³/Nm aşınma oranına sahip olduğu gözlenmiştir. Tespit edilen en düşük aşınma oranı 1000°C’de 6 saat borlanmış saf tungstende görülürken, en yüksek aşınma oranı işlemsiz yani borlanmamış saf tungstende görülmüştür.

Aşınma SEM görüntülerinde borlanmış numunelerde adhezif, abrasif ve delaminasyon aşınması meydana gelmiştir. Ayrıca aşınma yüzeylerinde oksit tabakalarının kayma yönünde parçalandıkları görülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Akshay A., Joshi and Santosh S., Hosmani. (2014). Pack-Boronizing of AISI 4140 steel boronizing mechanism and the role of container design, materials and manufacturing processes, **29**: 1062–1072
- Arat, M. (2011). Paslanmaz çelik 310 ve 316 metalinin plazma borlama ve nitrürleme metodu ile mekanik özelliklerinin geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Ayter, T. (2005). Borlama işleminin çeliklerin yüzey kalitesi ve aşınma davranışına etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Barış, M. (2007). Farklı borlama sürelerinin transmisyon çeliğinde abrasiv aşınma davranışlarına etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Başman, G. (2010). AISI 316 L tipi paslanmaz çeliğin termokimyasal difüzyon yöntemi ile borlanması, borlama banyosu bileşenlerinin borür tabakası özelliklerine etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Baştürk S. ve Erten M. (2006). Borlama İle Yüzey Sertleştirme Çalışmaları. *Mühendis ve Makine Dergisi*, **47**:61
- Bayça, S.U. ve Şahin, S. (2004). Borlama. *Mühendis ve Makine Dergisi*, **45**: 51-59.
- Bindal, C. and Üçışık, A.H. (2008). Characterization of boriding of 0.3% C, 0.02% P plain carbon steel. *Vacuum*, **82**: 90-94.
- Bindal, C. (1991). Az alaşımlı ve karbon çeliklerinde borlama ile yüzeye kaplanan borürlerin bazı özelliklerinin tespiti. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bozkurt, N. (1984) Bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Campos I. (2005). Effect of boron paste thickness on the growth kinetics of Fe₂B boride layers during the boriding process. *Applied Surface Science*, **252**:2396-2403.
- Chrzanowska-Giżyńska, J., Denis, P., Hoffman, J., Giżyński, M., Mościcki, T., Garbiec, D. and Zygmunt, S. (2018). Tungsten borides layers deposited by a nano second

- laser pulse. *Surface and Coatings Technology*, **335**:181–187.
- Çalık, A. ve Özsoy, A. (2002). Termal çevirimli borlama işleminin Ç1010 çeliğine etkileri. 11. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, İstanbul.
- Çalık, A., Delikanlı, K. ve Uzun, A. (2002). Ç1040 Çeliğinin borlanması oluşun borür tabakasının özelliklerinin incelenmesi. 1.Uluslararası Bor Sempozyumu, 109–113, Kütahya.
- Çalık, A. (2005). Termokimyasal borlama yöntemleri ve önemi. 4th International Advanced Technologies Symposium, 839-844, Konya.
- Demirel, Ç. (2013). AISI 8640 ve GS 60 Çelik Malzemelerin Abrasif Aşınma Ve Korozyon Davranışına Borlama İşleminin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Dilektaşlı, E. (2014). Bazı alaşımlı çeliklerin yüksek sıcaklık aşınma davranışına borlama işleminin etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Duschanek H., Rogl P., (1995). Critical assessment and thermodynamic calculation of the binary system Boron-Tungsten (B-W). *J. Phase Equilibria* **16**: 150–161.
- Ekmekçiler, E. (2006). Borlanmış demir alüminat malzemenin kinetik ve mekanik özellikleri. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze.
- Fei, Xie., Jian, C. and Shuo, W. (2018). Effects and mechanisms of an alternating current field on pack boriding, *Vacuum*, **148**: 41-47.
- Gunes, I. And Kayali, Y. (2014). Investigation of mechanical properties of borided Nickel 201 alloy. *Materials & Design*, **53**: 577-580.
- Gunes, I., (2014). Investigation of tribological properties and characterization of borided AISI 420 and AISI 5120 steels. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **67(3)**:359-365.
- Gunes, I. (2013). Wear behaviour of plasma paste boronized of AISI 8620 steel with borax and B₂O₃ paste mixtures. *Journal of Materials Science & Technology*, **29 (7)**: 662-668.
- Gunes, I. (2013). A Dalar Effect of sliding speed on friction and wear behaviour of borided gear steels. *Journal of the Balkan Tribological Association*, **19 (3)**: 325-339.

- Güneş, İ. (2010). AISI 8620 Çeliğinin değişik pasta karışımlarında plazma pasta borlanması ve yüzey özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Gu, Q., Krauss G. and Steurer, W. (2008). Transition metal borides: Super hard versus ultra-incompressible. *Advanced Materials*, **20**:3620–3626.
- Ingole, S., Liang, H., Usta, M., Bindal C. and Ucisik A.H. (2005). Multi-scale wear of a boride coating on tungsten, *Wear*, **259**:849–860.
- Juan, D., Shun-sen, W., Lei, Z., Liu-xi, C. and Yong-hui X. (2018). Study on the erosion characteristics of boride coatings by finite element analysis, *Surface and Coatings Technology*, **333**: 115-124.
- Khor, K.A., Yu, L.G. and Sundararajan, G. (2005). Formation of hard tungsten boride layer by spark plasma sintering boriding. **478**: 1–2, Pages 232-237
- Komisyon, “Bor Raporu”. (2003). TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası. Ankara.
- Li, C., Shen, B., Li, G. and Yang, C. (2008). Effect of boronizing temperature and time on micro structure and abrasion wear resistance of $\text{Cr}_{12}\text{Mn}_2\text{V}_2$ high chromium cast iron. *Surface and Coatings Technology*, **202**: 5882-5886.
- Maragoudakis, N.E., Stergioudis, G., Omar, H., Pavlidou, E., Tsipas, D.N. (2002). Boronitriding of steel U_s 37-1. *Materials Letters*, **57**: 949-953.
- Makuch, N., Kulka M., Keddani M., Taktak S., Ataibis V. And Dziarski P. (2017). Growth kinetics and some mechanical properties of two-phase boride layers produced on commercially pure titanium during plasma paste boriding. *Thin Solid Films*, **626**:25-37.
- Mohammadi, R., Andrew, T., Lech, M.X., Weaver, B. E., Yeung, M.T., Tolbert, S.H. and Kaner, R.B. (2011). Tungsten tetraboride, an inexpensive super hard material, *PNAS*, **108**: 27-32
- Moscicki T., Radziejewska J., Hoffman J., Chrzanowska J., Levintant-Zayonts N., Garbiec D., Szymanski Z., (2015). WB_2 to WB_3 phase change during reactive spark plasma sintering and pulsed laser ablation / deposition processes. *Ceramics International*, **41**: 8273–8281
- Özer, M. (2011). Üç farklı çeliğe katı borlama işlemi yapılmasının içyapı ve sertlik üzerine etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

- Özbek, İ. (1999). Borlama yöntemi ile (AISI M50, AISI M2) yüksek hız çeliklerini ve AISI W1 çeliğinin yüzey performanslarının geliştirilmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Özsoy, A. (1991). Çeliğin borlanmasındaborür tabakası, geçiş zonu ve ana matriksin özelliklerinin iyileştirilmesi. Doktora Tezi, Anadolu Ü. Fen Bil. Ens., Eskişehir.
- Petrova, R. And Suwattananont, N. (2005). Surface Modification of Ferrous Alloys with boron, *Journal Elec. Mater*, **34**:575 - 582.
- Saygın, M. (2006). AISI 1020 çeliklerinde borlamanın yorulma dayanımına etkisi. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Sinha, A.K. (1991). Boriding (Boronizing), *Asm Handbook, J. Heat Treating*, Oh, Usa.,**4**:437-447.
- Shikada, Y. And Yoshimoto, M. (1973).Electrolytic Boriding of Tungsten, *Journal of the Metal Finishing Society of Japan*, **24**: 254-257.
- Sorkun, A. (2000). Metaller arası bileşik uygulamaları projesi.Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Eskişehir.
- Stadler S., Winarski R. P., MacLaren J. M., Ederer D. L., VanEk J., Moewes A., (2000). Electronic structures of the tungsten borides WB, W₂B and W₂B₅ , *J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom.*, **110**: 75–86
- Stubicar M., Tonejc A. and Stubicar N., (1995). X-Ray diffraction study of W–B elemental powder mixtures after high–energy ball–milling, *Fizika A*, **4**: 65-72.
- Szwacki, N.G.(2017). The structure and hardness of the highest boride of tungsten, a borophene-based compound, *Scientific Reports*, **7**: 1-6
- Taşcı A. (1993). Borlanmış çeliklerin aşınma ve korozyon dayanımları. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Taştan F. (2010). Farklı bileşimlere sahip çeliklerin borlama işlemi ile yüzey özelliklerinin incelenmesi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Türkmen İ. and Yalamaç E. (2018). Growth of the Fe₂B layer on SAE 1020 steel employed a boron source of H₃BO₃ during the powder-pack boriding method. *Journal of Alloys and Compounds*, **744**: 658-666

- Türktekin M., (1998). H13 Sıcak İş Takım Çeliklerine Borlama ve Nitrürleme İşlemlerinin Birlikte Uygulanması. Erciyes Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, 79s, Kayseri.
- Topuz, P. (2009). Akışkan yataklı fırında farklı çeliklerin borlanması ve borlama parametrelerinin geliştirilmesi. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uluköy, A. ve Can, A.Ç. (2006). Çeliklerin Borlanması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **12 (2)**:189-198.
- Usta, M.,Ozbek I.,Bindal C.,Ucisik A.H.,IngoleS. And Liang H. (2006). A comparative study of borided pure niobium, tungsten and chromium. *Vacuum*, **80**:1321–1325
- Ünüvar, F. (2013). Saf kobaltın borlama özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Yonghua, D., Ping, Li., Zhizhong C., Jian S. and Lishi, M. (2018). Surface evolution and growth kinetics of Ti6Al4V alloy in pack boriding. *Journal of Alloys and Compounds*,**742**: 690-701

6.1 İnternet Kaynakları

- 1) <http://www.boren.gov.tr/tr>,10.04.2018
- 2) http://www.factsage.cn/fact/documentation/SGTE/SGTE_Figs.htm, 10.04.2018



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ahmet Malik AŞGIN
Doğum Yeri ve Tarihi : YOZGAT/19.05.1990
Yabancı Dili :İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : (0555) 566 90 01 / ahmetmalikasgin@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Aydın Cumhuriyet Lisesi, (2004-2008)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, (2008-2012)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, (2015-2018)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl: Afyon Hisar OSGB (2014-devam ediyor)

Yayınları (SCI ve diğer) :

Hitit A., Öztürk P., Şahin H., Aşgın A.M. (2014). Effect of tungsten content on glass forming ability and micro hardness of Ni-Cr-B-W metallic glasses, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, **62**:5-9

Öztürk P., Hitit A., Şahin H., Aşgın A.M. (2014). Ni-Cr-B-W Metalik cam sisteminin camlaşma kabiliyetinin ve mikrosertliğinin tungsten içeriğine bağlı değişiminin incelenmesi, 15.Uluslararası Malzeme Sempozyumu, 15-17 Ekim 2014, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye

Hitit A., Şahin H., Öztürk P. and Aşgın A. M. (2015). A New Ni-Based metallic glass with high thermal stability and hardness, *Metals*, **5**: 162-171;