

**OSTENİTİK VE MARTENSİTİK PASLANMAZ
ÇELİKLERİN YÜKSEK SICAKLIK AŞINMA
DAVRANIŞLARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MURAT GÜRKAN

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. Şükrü TAKTAK

METAL EĞİTİMİ ANA BİLİM DALI

MAYIS 2007

“Bu tez çalışması “06.TEF.01” numaralı proje olarak AKÜ BAPK tarafından desteklenmiştir.”

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**OSTENİTİK VE MARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERİN YÜKSEK
SICAKLIK AŞINMA DAVRANIŞLARI**

MURAT GÜRKAN

DANIŞMAN
Yard. Doç. Dr. Şükrü TAKTAK

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

MAYIS 2007

ONAY SAYFASI

Yrd. Doç. Dr. Şükrü TAKTAK danışmanlığında,
Murat GÜRKAN tarafından hazırlanan
Ostenitik ve Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Yüksek
Sıcaklık Aşınma Davranışları
başlıklı bu çalışma, lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri
uyarınca
...../...../2007
tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
Metal Eğitimi Anabilim Dalında
Yüksek Lisans tezi olarak oybirliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

	Ünvanı, Adı, SOYADI	İmza
Başkan	Prof.Dr. Galip SAİD	
Üye	Yrd.Doç.Dr. Şükrü TAKTAK	
Üye	Yrd.Doç.Dr. Ahmet ÇETKİN	

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

Doç. Dr. Emine SOYTÜRK
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OSTENİTİK VE MARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERİN YÜKSEK SICAKLIK AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Murat GÜRKAN

Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şükrü TAKTAK

Ostenitik paslanmaz çelikler, genellikle korozyon dirençli uygulamalar için kullanılırlar. Yüzey sertliği ve yük taşıma kapasitesinin az olmasından dolayı aşınma gibi tribolojik uygulamalarda kullanımları sınırlıdır. Yüzey özelliklerini geliştirmek için değişik yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden biri de borlamadır. Bu çalışmada borlama işlemi uygulanmış AISI 420 ve 304 paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklık aşınma davranışları araştırılmıştır. Borlama işlemi katı borlayıcı bir ortam içerisinde 900°C’de 5 saat sürecinde gerçekleştirilmiştir. Metallerin yüzeylerindeki tabakaları tespit etmek için X-ışınları difraksiyon analizi (XRD) yapılmıştır. Ayrıca oluşan tabakaların yüzeyden içeriye doğru mikrosertlikleri bulunmuştur. Aşınma deneyleri oda, 300°C ve 600°C sıcaklıklarda kapalı fırın ortamına kurulmuş aşınma deneyi test düzeneğinde yapılmıştır. Aşınma deneyleri sonrası numunelerin hasar bölgeleri karakterize edilmiştir.

XRD sonuçlarına göre 304 çelik üzerinde FeB, Fe₂B, CrB, Cr₂B ve Ni₃B fazları, 420 çeliği üzerinde ise FeB, Fe₂B, CrB ve Cr₂B fazları bulunmuştur. Sıcaklığın artmasıyla borlanmış çeliklerde oksit oluşumu görülmüştür. Aşınma sıcaklığının artmasıyla borlanmamış çeliklerde oda sıcaklığına göre 7–8 kat artış görülürken, borlanmış çeliklerde bu artış 2-3 katıdır.

2007, 67 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Paslanmaz Çelik, Borlama, Yüksek Sıcaklık Aşınma

ABSTRACT

M.Sc.Thesis

HIGH TEMPERATURE WEAR BEHAVIOUR AUSTENITIC AND MARTENSITIC STAINLESS STEEL

Murat GÜRKAN

Afyonkarahisar Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metal Education

Supervisor: Asst. Prof. Şükrü TAKTAK

Stainless steels are mainly used for corrosion resistance applications. It is, however, rarely used for tribological applications such as wear because of poor surface hardness and low load bearing capacity. Great efforts have been made improve its surface properties. In this study, high temperature wear properties of borided AISI 420 and 304 stainless steels were investigated. Boriding heat treatment was carried out using a pack boriding method in an electrical resistant furnace at 900°C for 5 h. The morphology of boride layers formed on stainless steel was observed by use of an optical microscopy. The presence of borides formed in coating layer was confirmed by means of X-ray diffraction. Hardness of the boride layers were assessed by micro-Vickers indentations using a Vickers micro-hardness tester. High temperature wear tests were carried out into a furnace, which was placed on wear test setup, at room temperature, 300°C and 600°C. Wear tracks of the worn samples were examined.

X-ray diffraction results showed FeB, Fe₂B, CrB, Cr₂B and Ni₃B phases on 420 steel and FeB, Fe₂B, CrB and Cr₂B phases on 304 steel. Oxide forming was observed on borided and unborided steel with the increase in temperature. It is observed that wear rate of unborided steels increased 7 to 8 times at high temperature compared with room temperature, while this increase was 2 to 3 times for borided steels.

2007, 67 pages

Keywords: Stainless steel, boriding, High temperature wear

TEŐEKKÖR

Tez alıřmam sűresince benden bilgi ve deneyimlerini hiçbir zaman esirgemeyen tez danıřmanım ve deęerli hocam Yrd. Do. Dr. Őűkrű TAKTAK'a sonsuz teŐekkűrlerimi sunarım.

Tez çalıřmamda buldukları katkılarında dolayđ Arř Grv. Sinan ULU'ya teŐekkűrlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca tűm űęrenim hayatım boyunca maddi, manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme teŐekkűr ederim.

Murat GÖRKAN

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1 PASLANMAZ ÇELİKLER	4
2.1.1 Ostenitik Paslanmaz Çelikler	4
2.1.2 Ferritik Paslanmaz Çelikler	6
2.1.3 Martenzitik Paslanmaz Çelikler	7
2.1.4 Çift Fazlı (Duplex) Paslanmaz Çelikler	9
2.1.5 Çökeltme Yoluyla Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler	9
2.1.6 Paslanmaz Çeliklerin aşınma Davranışları	10
2.2 BORLAMA	11
2.2.1 Bor Mineralleri	13
2.2.2 Saf Borun Fiziksel Özellikleri	14
2.2.3 Çeliklerde Alaşım Elementi Olarak Bor	14
2.2.4 Borlama İşlemi	15
2.2.5 Borlama Yöntemleri	16
2.2.5.1 Katı (Paket) Borlama Yöntemi	16
2.2.5.2 Sıvı Borlama Yöntemi	17
2.2.5.3 Gaz Borlama Yöntemi	18
2.2.5.4 Plazma Borlama	19
2.2.6 Borür Tabaka Özellikleri	20

2.2.7 Borlu Tabakanın Tribolojik Özellikleri	22
2.2.8 Borür Tabaka Kalınlığını Etkileyen Faktörler	23
2.2.8.1 Borlayıcı Ortamın Bileşimi ve Konsantrasyonu	23
2.2.8.2 İşlem Sıcaklığı ve Süresi	24
2.2.8.3 Alt Tabaka Metal Bileşimi	24
2.2.9 Borür Tabakasının Sertliği	25
2.2.10 Borür Tabakasının Aşınma Dayanımı	26
2.2.11 Borür Tabakasının Korozyon Dayanımı	28
2.2.12 Borlamanın Endüstriyel Uygulamaları	28
2.2.12.1 Tekstil Endüstrisindeki Uygulamalar	30
2.2.12.2 Plastik Endüstrisindeki Uygulamalar	30
2.2.12.3 Cam Endüstrisindeki Uygulamalar	30
2.2.12.4 Seramik Endüstrisindeki Uygulamalar	30
2.2.12.5 Otomotiv Endüstrisindeki Uygulamalar	31
2.2.12.6 Kalıp Endüstrisindeki Uygulamalar	31
2.3 SÜRTÜNME ve AŞINMA	32
2.3.1 Sürtünme	32
2.3.2 Aşınma	33
2.3.3 Aşınmayı Etkileyen Faktörler	35
2.3.4 Aşınma Mekanizmaları	35
2.3.4.1 Adhezif Aşınma (Yapışma Aşınması)	35
2.3.4.2 Abrazif Aşınma	37
2.3.4.3 Yorulma Aşınması	38
2.3.4.4 Eroziv Aşınma	39
2.3.4.5 Öğütmeli Aşınma (Grinding Wear)	41
2.3.4.6 Oymalı Aşınma (Gouging Wear)	41
2.3.4.7 Kazımalı Aşınma (Fretting Wear)	42
2.3.4.8 Koroziv Aşınma	43
2.3.5 Malzemede Aşınmanın Ölçülmesi	44
2.3.5.1 Ağırlık Farkı İle Ölçme	44
2.3.5.2 Kalınlık Ölçme Metodu	44
2.3.5.3 İz Değişiminin Ölçülmesi Metodu	44

2.3.5.4 Radyo İzotoplarla Ölçme Metodu	45
3. MATERYAL ve METOD	46
3.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler	46
3.2 Paslanmaz Çeliklere Uygulanan Isıl İşlem ve Borlama İşlemi	46
3.3 Metalografik İnceleme	47
3.4 Tabaka Kalınlığı, Mikro Sertlik ve XRD Analizleri	47
3.5 Aşınma Deneyleri	47
4. BULGULAR	49
4.1 Metalografik Bulgular	49
4.2 XRD Analizi	49
4.3 Mikro Sertlik Analizi	52
4.4 Martenzitik 420 ve Östenitik 304 Paslanmaz Çeliklerin Yüksek Sıcaklık Tribolojik Özellikleri	53
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	61
6. KAYNAKLAR	63
7. ÖZGEÇMİŞ	67

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

1. Simgeler

Fs	Sürtünme kuvveti
Fn	Normal Kuvvet
HV	Vickers sertliği
HRC	Rockwel sertliği
T	Zaman
T	Sıcaklık
M	Sürtünme katsayısı

2. Kısaltmalar

Ar	Argon
Al	Alüminyum
B	Bor
Co	Kobalt
C	Karbon
Cr	Krom
Cl	Klor
Fe	Demir
Mo	Molibden
Pa	Paskal
St	Çelik(Alman normuna göre)
SiC	Silisyum Karbür
TMB	Trimetil Borat
TEB	Trietil Boran
Ti	Titanyum
V	Vanadyum
W	Wolfram

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 Demir Bor Diyagramı	13
Şekil 2.2 Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması	16
Şekil 2.3 Demir esaslı malzemelerin borlanması ile oluşan ferrobor tabaka çeşitleri	21
Şekil 2.4 Borür tabaka kalınlığının metalin bileşimine göre değişimi	25
Şekil 2.5 950 °C sıcaklıkta 90 dakika borlanmış çeliklerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımı	26
Şekil 2.6 Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterimi	34
Şekil 2.7 Adhezif aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi	36
Şekil 2.8 Yorulma aşınmasının şematik gösterilişi	39
Şekil 2.9 Erozyon aşınmanın şematik gösterilişi	40
Şekil 2.10 Öğütme aşınmanın şematik gösterilişi	41
Şekil 2.11 Kazımalı aşınmanın şematik gösterilişi	42
Şekil 3.1 Bilye disk aşınma cihazının şematik gösterimi	48
Şekil 4.1 Borlama işlemi sonrası a) AISI 420, b) AISI 304 paslanmaz çeliklerinin mikro yapısı	49
Şekil 4.2 Borlanmamış AISI 304 paslanmaz çeliğinin a) 300, b) 600 °C'lerde 1 saat ısıtılardan sonra yüzeylerinde oluşan fazlar	50
Şekil 4.3 Borlanmamış AISI 420 paslanmaz çeliğinin a) 300, b) 600 °C'lerde 1 saat ısıtılardan sonra yüzeylerinde oluşan fazlar	51
Şekil 4.4 Borlanmış AISI 304 paslanmaz çeliğinin X-ışınları grafikleri a) borlanmış halde, b) 300, c) 600 °C'lerde 1 saat ısıtılardan sonra yüzeylerinde oluşan fazlar	51
Şekil 4.5 Borlanmış AISI 420 paslanmaz çeliğinin X-ışınları grafikleri a) borlanmış halde, b) 300, c) 600 °C'lerde 1 saat ısıtılardan sonra yüzeylerinde oluşan fazlar	52
Şekil 4.6 Borlanmış AISI 304 ve AISI 420 çeliğinin yüzeyden itibaren mikro sertlik değerleri	53
Şekil 4.7 Isıl işleme tabii tutulmuş ve borlanmış numunelerin	

oda sıcaklığı, 300 ve 600 °C sıcaklıklardaki aşınma hızı değerleri	54
Şekil 4.8 Ostenitik, ısıl işlem görmüş AISI 304 paslanmaz çeliğinin oda sıcaklığında sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi	55
Şekil 4.9 Martenzitik, ısıl işlem görmüş AISI 420 paslanmaz çeliğinin 300°C sıcaklığında sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi	55
Şekil 4.10 Ostenitik, borlanmış AISI 304 paslanmaz çeliğinin 300°C sıcaklığında sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi	56
Şekil 4.11 Martenzitik, borlanmış AISI 420 paslanmaz çeliğinin 300°C sıcaklığında sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi	56
Şekil 4.12 Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucu numunelerin sürtünme katsayısı değerleri	57
Şekil 4.13 Borlanmış ve Isıl İşleme Uğratılmış Paslanmaz Çeliklerin Oda sıcaklığındaki Aşınma Deneyleri Sonrası Oluşan İzlerin Optik Görüntüleri a) Isıl İşlemlenmiş AISI 420 Çeliği, b) Isıl İşlemlenmiş AISI 304 Çeliği,	58
c) Borlanmış AISI 420 Çeliği, d) Borlanmış AISI 304 Çeliği	58
Şekil 4.14 Borlanmış ve Isıl İşleme Uğratılmış Paslanmaz Çeliklerin 300°C sıcaklığındaki Aşınma Deneyleri Sonrası Oluşan İzlerin Optik Görüntüleri	58
a) Isıl İşlemlenmiş AISI 420 Çeliği, b) Isıl İşlemlenmiş AISI 304 Çeliği,	58
c) Borlanmış AISI 420 Çeliği, d) Borlanmış AISI 304 Çeliği.	58
Şekil 4.15 Borlanmış ve Isıl İşleme Uğratılmış Paslanmaz Çeliklerin 600°C sıcaklığındaki Aşınma Deneyleri Sonrası Oluşan İzlerin Optik Görüntüleri	59
a) Isıl İşlemlenmiş AISI 420 Çeliği, b) Isıl İşlemlenmiş AISI 304 Çeliği,	59
c) Borlanmış AISI 420 Çeliği, d) Borlanmış AISI 304 Çeliği	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2.1 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Nominal Mekanik Özellikleri	5
Çizelge 2.2 Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Nominal Mekanik Özellikleri	6
Çizelge 2.2 (Devam) Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Nominal Mekanik Özellikleri	8
Çizelge 2.3 Çeşitli Malzemelerin Sertlik Değerleri	25
Çizelge 2.1 Adhezif Aşınmaya Malzeme Özelliklerinin Etkisi	37
Çizelge 2.1 Deneysel Malzemelerde Kullanılan Çeliklerin Kimyasal Analizleri	46

1. GİRİŞ

Bütün paslanmaz çelikler esas olarak demir alaşımlarıdır ve pasifleşme özelliği gösterirler. Bunu ifade etmek üzere İngilizce’de lekesiz anlamına gelen “stainless” kelimesi kullanılmıştır. Bu çeliklerde pasifleşmeyi sağlayan asıl metal kromdur. Alaşımı oluşturan diğer bileşenler paslanmaz çeliğin diğer yapısal özelliklerini geliştirmek içindir. Eğer yüzeyde pasif film oluşmaz ise, paslanmaz çelikler de diğer demir alaşımları gibi korozyona uğrayabilir. İlk paslanmaz çelikler demir içine %10-%18 krom katılarak elde edilmiştir. Başlangıçta elde edilen paslanmaz çelikler içerisindeki karbon yüzdesi oldukça yüksekti. Günümüzde karbon yüzdesi düşürülerek paslanmaz çelik teknolojisinde büyük gelişmeler olmuş ve üstün mekanik özelliklere sahip çelikler elde edilmiştir (Yalçın ve Gürü 2002).

Yüzlerce farklı kullanım alanlarına sahip olan bor ve türevi ürünlerin endüstriyel anlamda yeni sayılabilecek uygulama alanlarından biri de çeliklerde bir tür yüzey sertleştirme yöntemi olarak kullanımlarıdır (Anonim, 2001).

Göstermiş oldukları üstün özellikler nedeniyle bor kaplanmış malzemeler, çok geniş endüstriyel kullanım alanına sahiptir. Borlama işlemi; alüminyum ve silisyum ihtiva eden yatak çelikleri haricinde yüzeyi sertleştirilmiş, temperlenmiş takım çelikleri ve paslanmaz çelikler gibi birçok çelik grubuna, dökme demirlere ve bunlara ilaveten; nikel, kobalt, molibden ve titanyum esaslı alaşımlara uygulanmaktadır. Özellikle adhezif ve abrazif aşınma şartlarında birçok kullanım alanı mevcuttur (Sinha 1991).

Borlama aynı zamanda alaşımsız ve alaşımlı çeliklere, dökme demirlere, demir dışı metal ve alaşımlarına (Ni,Co,Mo,Ti) bu alaşımların toz metalurjisi yöntemiyle üretilen tozlarına, bazı süper alaşımlar ile sermetler gibi bir çok malzemeye uygulanabilir. İşlem şartları ana malzemeye bağlı olsa da genellikle 800-1500°C sıcaklıklar ve 1–8 saat arası değişen sürelerde uygulanır. Borlama, metal iş parçası yüzeyine bor atomlarının yayındırılarak sert borür tabakalarının oluşmasının sağlandığı bir termokimyasal yüzey sertleştirme işlemidir (Karasan ve Alsaran 2002).

Borlama işlemiyle elde edilen oldukça sert, yüksek korozyon ve aşınma dayanımlı borür tabaka veya tabakalar, ısı enerjisi yardımıyla iş parçası yüzeyindeki metalik latislere bor atomlarının yayındırılması ve burada esas malzeme atomlarıyla birlikte uygun borürlerin oluşturulmasıyla sağlanır. Eğer demir bazlı malzemeler borlanıyorsa demir borürler elde edilir (Fichtl vd. 1987).

Sürtünme birbirlerine göre izafi olarak hareket eden cisimlerin birbirlerine uyguladıkları direnç ile meydana gelir. Genelde sürtünme her türlü yabancı maddeden arındırılmış yüzeylerin mutlak vakumdaki hareketlerini ifade eder. Fakat mevcut sistemlerin çoğunluğu normal atmosfer şartlarında çalışmaktadır. Atmosfer şartlarında çalışan yüzeyler ne kadar temizlenseler dahi oksit tabakası içermektedir. Bu yüzden yabancı maddelerden arındırılmış yüzeylerin atmosfer şartlarındaki sürtünme hali kuru sürtünme kabul edilmektedir (Kayalı vd.1997).

Aşınma, mühendislikte düzenli olarak karşılaşılan üç problemten biridir. Diğer ikisi ise, kırılma ve korozyon'dur. Sürtünme ve aşınma yüksek mühendislik uygulamaları için malzeme seçiminde önemli parametrelerden biridir. Yüksek mühendislik uygulamaları için parçaların dizaynında, araştırmacılar doğru uygulamalar için doğru malzemelerin seçimine çok dikkat etmek zorundadırlar. Çoğu sürtünme malzemeleri genellikle kırılma dayanımı ve sertlikleri gibi mekanik özellikleri için optimize edilirler. Oysaki bu mekanik özellikler tek başına aşınma için güvenilir bir tercih değildir. Sürtünme esnasında malzeme yüzey ve yüzey altı çatlaklar oluşur, bu çatlaklar birleşir ve malzemedeki küçük parçacıklar ayrılır. Aşınma esnasında oluşan partiküllerin sürtünmesi sonucu ince tozlar oluşur. Bunun için metaller kırılmadan önce yüksek temas gerilmelerini azaltmak için plastik olarak deforme olurlar. Kayma çiftlerinin tribolojik davranışı, uygulanan yüke, çevre şartlarına ve mikroyapı gibi parametrelere bağlıdır. Bu demektir ki; kayma hızı, uygulanan yük, ortamın ısısı, kayma yüzeyinin son durumu, tane boyutu, tane şekli ve gözenek gibi birçok etken sürtünme ve aşınmada etkili olabilmektedir (Boz ve Kurt 2006).

Aşınma ve bununla ilgili olan sürtünme olayında cisimlerin yüzey durumunun büyük bir etkisi bulunduğu aşikârdır. Yüzeyler düzgün düzlem görünüşüne sahip bulunuyorsa da

gerçek durum bu değildir. Yapılan incelemelerde metallerin yüzeylerinde bir çok girinti ve çıkıntının bulunduğu saptanmıştır. Yapılan ölçülerde hiçbir yüzey işleme tabi tutulmamış yumuşak çeliklerde yüzeyin en yüksek noktası ile en düşük noktası arasındaki fark 230µm mertebesindedir. Çeliğin çok iyi bir şekilde tesviye edilmesi halinde bu fark 10µm düşebilir (Postacıoğlu 1981).

2. GENEL BİLGİLER

2.1 PASLANMAZ ÇELİKLER

Paslanmaz çelikler, içerisinde en az % 10,5 oranında (ağırlıkça) krom (Cr) içeren demir esaslı alaşımlar olarak tanımlanırlar. Paslanmaz çeliğin yüzeyinde oluşan ince fakat yoğun krom oksit tabakası korozyona karşı yüksek dayanım sağlar ve oksidasyonun daha derinlere doğru ilerlemesini engeller. İçerdikleri diğer katkı elementlerine göre değişen ve tamamen östenitik ile tamamen ferritik özellikler aralığında sıralanan beş farklı çeşit paslanmaz çelik türü vardır (Odabaş 2002).

Bunlar sırası ile;

1. Östenitik paslanmaz çelikler
2. Ferritik paslanmaz çelikler
3. Martenzitik paslanmaz çelikler
4. Çift fazlı (duplex) paslanmaz çelikler
5. Çökeltme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çelikler'dir.

2.1.1 Östenitik Paslanmaz Çelikler

200 ve 300 serilerini içerirler ve 304 bunların içinde en yoğun olarak kullanılanıdır. Temel alaşım elementi krom ve nikeldir (Odabaş 2002).

Östenit paslanmaz çelikler üç guruba ayrılabilir. (a) tip 201, 202, 301, 302, 303, 304, 305, 308, 309, 310, 316 ve 317 gibi normal stabilize edilmemiş bileşimler (b) başlıca örnekleri tip 321, 347 ve 348 olan stabilize bileşimler; (c) tip 304L ve 316L gibi çok düşük karbonlu bileşimler. Stabilize edilmemiş bileşimler ısı ile sertleştirilemezler fakat soğuk işleme ile sertleşirler (Çiğdemöğlu 1972).

Karbon miktarı % 0,03' den az ise karbür oluşmaz ve çelik oda sıcaklığında tamamen östenitik olarak kalır. YMK östenitik paslanmaz çeliklerin süneklik, şekillendirilebilirlik ve korozyon dirençleri mükemmeldir. Östenitik paslanmaz çelikler ferromanyetik değildirler. Yüksek nikel ve krom miktarı bu çeliklerin maliyetinin artmasına neden olur. %0,03 C' dan fazla karbon içeren östenitik paslanmaz çelikler, taneler arası korozyona karşı hassas olabilirler. Aşağıdaki Çizelge 2.1' de östenitik paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri verilmiştir (Askeland 2002).

Çizelge 2.1 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Nominal Mekanik Özellikleri (Odabaş 2002).

Çelik Türü	Isıl İşlem Şartı	Çekme Dayanımı daN/ mm ²	Akma dayanımı %0,2 daN/ mm ²	Uzama (%)	Kesit Daralması (%)	Sertlik (Rokwell)
201	Tavlı	793	379	55		B90
201	Tam sertleştirilmiş	1275	965	4		C41
202	Tavlı	724	379	55		B90
301	Tavlı	758	276	60		B85
301	Tam sertleşmiş	1275	965	8		C41
302	Tavlı	620	255	55	65	B82
302B	Tavlı	655	276	50	65	B85
303	Tavlı	620	241	50	55	B84
304	Tavlı	586	241	55	65	B80
304L	Tavlı	552	207	55	65	B76
304N	Tavlı	586	241	30		
304LN	Tavlı	552	207			
305	Tavlı	586	255	55	70	B82
308	Tavlı	586	241	55	65	B80
308L	Tavlı	551	207	55	65	B76
309	Tavlı	620	276	45	65	B85
310	Tavlı	655	276	45	65	B87
312	Tavlı	655		20		
314	Tavlı	689	345	45	60	B87
316	Tavlı	586	241	55	70	B80
316L	Tavlı	538	207	55	65	B76
316F	Tavlı	586	241	55	70	B80
317	Tavlı	620	276	50	55	B85
317L	Tavlı	586	241	50	55	B80
321	Tavlı	599	241	55	65	B80
347/348	Tavlı	634	241	50	65	B84

329	Tavlı	724	552	25	50	B98
330	Tavlı	550	241	30		B80
330HC	Tavlı	586	290	45	65	
332	Tavlı	552	241	45	70	
384	Tavlı	550				

Çizelge 2.1 (Devam) Östenitik Paslanmaz Çeliklerin
Nominal Mekanik Özellikleri (Odabaş 2002).

2.1.2 Ferritik Paslanmaz Çelikler

Sertleştirilemeyen Fe-Cr alaşımlarıdır. 405, 409, 430, 422, 446 bu grupta yer alan en tipik ürünlerdir (Odabaş 2002).

Tavlınmış durumda en yüksek işlenebilirlik, korozyon direnci ve yumuşaklıklarını kazanırlar. Bu sebeple ferritik paslanmaz çeliklere uygulanan tek ısıl işlem tavlama değildir. Bu işlem kaynak ve soğuk işlemlerden kalan gerilmelerin alınmasını ve daha homojen bir yapı elde edilmesini sağlar. Ferritik paslanmaz çelikler genellikle 475°C gevrekleşme bölgesinin üzerindeki sıcaklıklarda ve östenit teşekkül bölgesinin altındaki sıcaklıklarda tavlınırlar. Ferritik paslanmaz çelikler 400-525°C bölgesinde uzun süre kaldıkları veya bu bölgede yavaş soğutuldukları takdirde bir gevrekleşme olayı görülür. Isıl işlemlerle bu gevrekleşme durumu ortadan kaldırılabilir (Çiğdemoğlu 1972).

Ferritik paslanmaz çelikler % 30 kadar krom ve %0,12'den az karbon içerirler. Ferritik paslanmaz çelikler HMK yapılı olmalarından dolayı, iyi dayanım ve orta seviyedeki sünekliliğe sahiptirler. Karbon ve krom içeriği yüksek olduğunda, karbür parçacıklarının çökmesi kırılma hızına neden olur. Ferritik paslanmaz çelikler, mükemmel korozyon direncine, orta seviyede şekillendirilebilirliğe sahip ve nispeten ucuzdurlar (Askeland 2002).

2.1.3 Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Ferritik guruptaki paslanmaz çeliklere benzer kimyasal analizlere sahiptirler ancak daha yüksek oranda karbon ve daha düşük oranda krom içerirler. Bu nedenle ısıtma işlemi sertleştirilebilir. 403, 410, 416 ve 420 bu grupta yer alan en tipik ürünlerdir (Odabaş 2002).

Martenzitik paslanmaz çeliklerin ısıtma işlemleri düz karbon veya düşük alaşımlı çeliklere çok benzer; dayanım ve sertlik daha çok karbon yüzdesine bağlıdır. Paslanmaz çelikler ile diğer çelikler arasındaki tek fark paslanmaz çeliklerin sertleşebilme kabiliyetlerinin çok yüksek olması ve havada soğutma ile 300 mm kadar kalınlıktaki kesitlerin merkezlerinde azami sertlik sağlanabilmesidir. Martenzitik paslanmaz çelikler ısıtma işlemi değişkenlerine çok hassas olduklarından ısıtma işlemde yapılan hatalar dolayısıyla hurda yüzdesi de oldukça yüksektir. Bu çelikler çok pahalı olduklarından üstün korozyon direnci mutlak şart olmadığı takdirde kullanılmazlar (Çiğdemoğlu 1972).

Krom miktarı genellikle %17' den azdır. Aksi takdirde, östenit alanı çok küçülür. Düşük krom içeriği, karbon içeriği %0,1'den %1'e kadar değişen farklı sertlikteki martensitlerin oluşturulmasını sağlar. Kromun yüksek sertleşebilirlik sağlamasından dolayı, hava ve yağda soğutma ile martensit oluşturulabilir. Martensitik paslanmaz çeliklerin temperleme eğrileri yüksek alaşımlı takım çeliklerinin temperleme eğrilerine benzer. Temperleme sıcaklığı 500°C' ye erişinceye kadar çok az yumuşama olur. Temperlenmiş martensitik paslanmaz çeliklerde, düşük krom içeriği diğer paslanmaz çeliklerden daha az korozyon direncine sahip olmasına neden olur (Askeland 2002).

Aşağıdaki Çizelge 2.2' de martensitik paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.2 Martensitik Paslanmaz Çeliklerin Nominal
Mekanik Özellikleri (Odabaş 2002).

Çelik Türü	Isıl İşlem Şartı	Çekme Dayanımı daN/ mm ²	Akma dayanımı %0,2 daN/ mm ²	Uzama (%)	Kesit Daralması (%)	Sertlik (Rokwell)
403	Tavlı	517	276	30	65	B82
403	Temperlenmiş (427 °C) *	1344	1034	17	55	C41
410	Tavlı	517	276	30	65	B82
410	Temperlenmiş (427 °C) *	1344	1034	17	55	C41
410S	Tavlı	414	207	22		B95M
410Nb	Tavlı	483	276	13	45	
410Nb	Temperlenmiş (Ara Tav) **	862	689	13	45	
414	Tavlı	827	655	17	55	C22
414	Temperlenmiş (427 °C) *	1379	1034	16	58	C43
414L	Tavlı	793	552	20	60	
416 Plus X	Tavlı	517	276	30	60	
420	Tavlı	655	345	25	55	B92
420	Temperlenmiş (315 °C) *	1586	1344	8	25	C50
422	Temperlenmiş (Ara Tav) **	965	758	13	30	
431	Tavlı	862	655	20	60	C24
431	Temperlenmiş (427 °C) *	1413	1069	15	60	C43
440A	Tavlı	724	414	20	45	B95
440A	Temperlenmiş (315 °C) *	1793	1655	5	20	C51
440B	Tavlı	738	427	18	35	B96
440B	Temperlenmiş (315 °C) *	1931	1862	3	15	C55
440C	Tavlı	758	448	13	25	B97
440C	Temperlenmiş (315 °C) *	1965	1896	2	10	C57

2.1.4 Çift Fazlı (Duplex) Paslanmaz Çelikler

Diğer paslanmaz çelikler gibi bunlarda demir-krom-nikel alaşımlarıdır. Ancak çift faz içerirler. Bu tür çelikler korozyon ve mekanik özellikler açısından, faz yapıları gereği ferritik ve östenitik paslanmaz çelikler arasında yer alırlar. Gerilmeli ve taneler arası korozyona karşı dirençleri çok iyidir (Yalçın ve Gürü 2002).

Hemen hemen eşit miktarda östenit ve ferrit içeren bir mikro yapının oluşturulması ile elde edilirler. Bu çelikler tam olarak %24 krom ve %5 nikel içerirler. 200, 300 veya 400 ile tanımlanan gurupların hiç birisine girmez. Çift fazlı paslanmaz çelikler, daha yüksek akma dayanımına sahip olmaları nedeniyle östenitik ve ferritik paslanmaz çeliklere göre daha üstün avantajlar sunarlar. Çift fazlı mikro yapı, %21–25 Cr ve %5–7 Ni içeren çeliğin 1000-1050°C sıcaklıkta tavlınması ve ardından hızlı bir şekilde soğutulması ile elde edilir (Odabaş 2002).

2.1.5 Çökeltme Yoluyla Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler

Bu tip paslanmaz çelikler hem korozyona karşı dayanıklılıkları iyi, hem de mukavemet/ağırlık, oranı yüksektir (Yalçın ve Gürü 2002).

Çökeltme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çeliklerin özellikleri katı eriyik mukavemetleşmesi, pekleşme, yaşlandırma mukavemetleşmesi ve martensitik reaksiyondan kaynaklanır. Düşük karbon içerdiğinde bile, yüksek mekanik özellikler elde edilir (Askeland 2002).

Alüminyum gibi katı çözeltiliye girme ve yaşlandırma (çökeltme) ısıl işlemi ile çeliğe sertleşebilme olanağı sağlayan alaşım elementleri içerirler. Bu çelikler ayrıca martensitik, yarı östenitik ve östenitik tip çökeltme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çelikler olmak üzere alt guruplara ayrılırlar (Odabaş 2002).

2.1.6 Paslanmaz Çeliklerin aşınma Davranışları

Paslanmaz çeliklerin yüzey işlemleri ve aşınma davranışları üzerine araştırmacılar tarafından yapılmış farklı çalışmalar literatürde mevcuttur.

Sun ve Çimenoglu krom nikelli çeliklerde aşınma davranışlarını incelediler. Yüksek Cr ve Ni'li çeliklerin özelliklerinin matris, karbür ve intermetaliklerden oluşan mikroyapı ile yakından ilgili olduğu görüldü. Matris, bileşime bağlı olarak ferritik veya ostenitik olabilir. Bileşimde bulunan Cr, ferriti Ni ise östeniti kararlı hale getiren ana alaşım elementleridir. Bu çeliklere ilave edilen alaşım elementlerinin amacı mekanik özellikleri iyileştirmek, aşınma ve korozyon direncini arttırmaktır. Cr korozyon direncini geliştirirken, Ni yüksek sıcaklık direncini arttırmaktadır. Sun ve Çimenoglu tarafından incelenen çelikler içerisinde Cr oranı düşük ve Ni oranı yüksek çelikte, %20 oranında daha düşük sertlik ve %600 oranında daha yüksek darbe enerjisi gözlemlendi. Cr içeriğinin yüksek olması, mikroyapıdaki karbür miktarını artırdığına ve böylece sertliğin artmasına, tokluğun da azalmasına neden olduğu kanısına vardılar (Sun ve Çimenoglu2006).

Alphonsa vd. yaptıkları bir çalışmada AISI 420 paslanmaz çeliğinin yüzey aşınma özelliklerini arttırmak için plazma nitrüleme işlemi uygulamışlardır. Deneyler sonrası, yüzeyde oluşan sertlik, kristal yapı, mikroyapı, kimyasal bağ özellikleri X-ray diffraction (XRD), Scanning electron microscopy (SEM), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and Auger electron spectroscopy (AES) teknolojilerini kullanarak incelemişler. Yüzeyden iç kısımlara doğru yaklaşık 60 µm mesafede 1300 HV sertlik elde etmişler. Baskın faz Fe₃N olarak görülmüş bunun yanında CrN ve Fe₄N fazları da gözlemlenmiş. Aşınma özelliklerinin de belirgin şekilde arttığını Alphonsa vd. çalışmalarında gözlemlemişlerdir (Alphonsa vd. 2002).

Taktak bir çalışmasında AISI 440C ve 52100 çeliklerini kutu ortamında borlamış ve 600°C' ye kadar aşınma davranışlarını incelemiştir. Sıcaklığın artmasıyla sürtünme katsayısı ve aşınma hızında artışlar görmüştür (Taktak 2006).

2.2 BORLAMA

Borlu tabaka veya tabakaların özelliklerini; malzeme bileşimi, borlama ortamındaki bor atomlarının kimyasal aktiviteleri, borlama işlem sıcaklığı ve süresi, ilave ısıl işlemler ve seçilen borlama yöntemi etkiler (Tsipas ve Rus 1987).

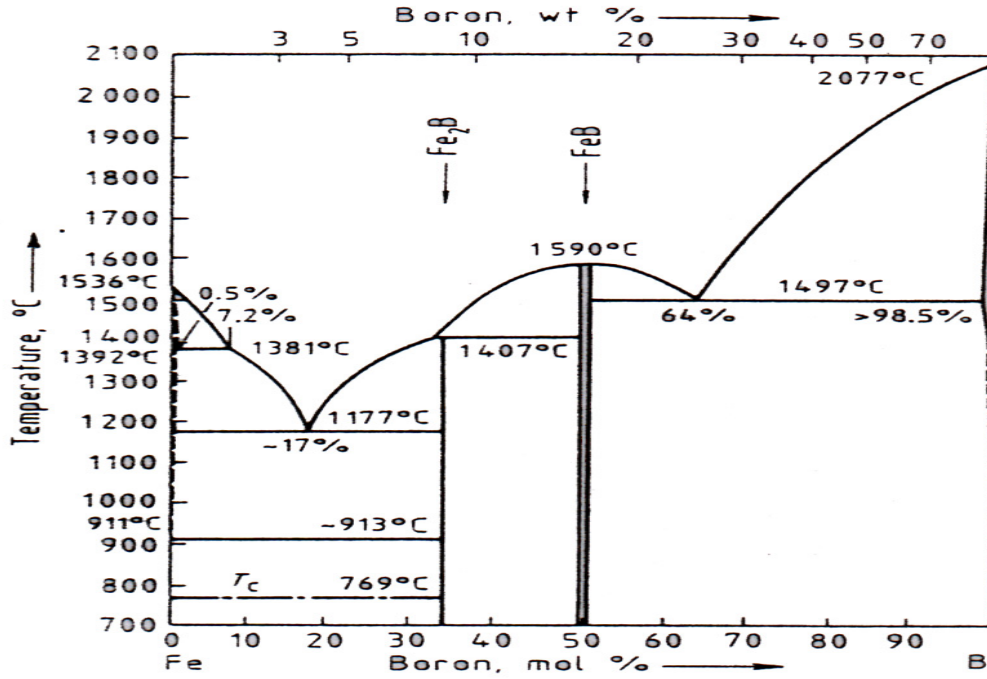
Borlama ile elde edilen en büyük kazanç sertliktir. Borlama ile karbon çeliklerinde 1800–2000 HV, alaşımlı çeliklerde 2500–2800 HV ve yüksek hız çeliklerinde 2800–3300 HV’lik yüzey sertlikleri elde edilir. Borun oksijene karşı ilgisi fazla olduğundan yüzeyde koruyucu ince bir oksit film tabakası oluşmakta ve bu oksit film tabakası yüzeyde katı yağlayıcı vazifesi görüp, sürtünmeli aşınma sırasında metal-metal temasını geciktirerek sürtünme katsayısını düşürmekte ve yüzeylerin birbirine kaymasını engellemektedir. Borlamayla Wolfram karbürün sertliğine eş değer bir sertliği elde edilir (Özsoy 1991).

Tüm yüzey özelliklerini iyileştirme yöntemlerinde olduğu gibi borlamada da işlem öncesi yapılması gereken bazı ön hazırlıklar söz konusudur. İşlemden önce iş parçasının üzerinde varsa bulunan yağ film tabakasının ve kesme sıvılarının tam anlamıyla temizlenmesi gerekir. İşlemin uygulanacağı yüzeyde paslanma varsa tel fırça ile parçanın temizlenmesi gerekir. Parça yüzeyinin düzgünlüğü borlama kalitesine etkisi olduğundan; yüzeyler mümkün olduğunca düzgün hale getirilerek işleme tabi tutulur. Borlama sonucu, parçaların boyutlarında, elde edilen borür tabakası kalınlığının %20-30’µm oranında bir büyüme olduğundan, borlanacak işlem parçasından bu durum göz önünde bulundurularak ilk ölçümlendirme yapılmalıdır (Hunger ve Trute 1994).

Borlama işlemi katı, sıvı gaz, plazma ve iyon implantasyonu gibi yöntemlerle yapılmaktadır. Katı borlama genellikle patentlerle korunan yaklaşık %5 B₄C, %5 KBF₄ ve %90 SiC içeren karışımlar ile yapılmaktadır. Bu yöntemde toz karışım sızdırmaz bir kutuya doldurulur ve içine numune yerleştirilir. Kutu gerekli sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu sıcaklıkta gerektiği kadar tutulur ve soğutulur. Sıvı borlamada boraks, borik asit ve ferro silis karışımından oluşan erimiş tuz banyosuna numune daldırılır ve bu sıcaklıkta gerekli bir süre bekletilir. Gaz ve plazma borlamada BCl₃, TMB (trimetil borat), TEB

(trietil boran) ve BF_3 gibi bor kaynakları ile H_2 ile Ar gazları kullanılmaktadır. Katı borlama ile C 45 çeliği borlanmış ve 170 mm kalınlığında ve 1600 HV sertliğinde borür tabakası elde edilmiş, borür tabakasının metal alt tabakaya göre 20 kat daha fazla aşınma direncine sahip olduğu gözlenmiştir. AISI 316L çeliği sıvı borlama işlemi ile borlanmış ve 12 – 14 μm kalınlığında ve 1500 HV sertliğinde borür tabakası elde edilmiştir. Düşük karbonlu çelik karbürledikten sonra BCl_3 ve H_2 gaz ortamında borlanmış ve 70 – 150 μm kalınlığında ve 1500 – 1800 HV mikro sertliğinde borür tabakası elde edilmiştir. Bu yöntemlerden sıvı borlamada erimiş tuz tabakası numune yüzeyine yapışır ve kalıntının temizlenmesi problem oluşturmaktadır. Katı borlamada numune yüzeyinin de temizlenmesi gerekir. Ancak yapışma tam olmadığından numune yüzeyi kolaylıkla temizlenir.

Gaz ve plazma borlamada malzeme yüzeyi temiz olmasına rağmen kullanılan gazların zehirli, pahalı ve patlayıcı olması dezavantajlarıdır. Yüksek sıcaklıkta ($850\text{-}1050^\circ\text{C}$) yapılan borlama işlemi ile demir yüzeyine bor yayılması gerçekleşir. Bu yayılma işlemi ile tek fazlı Fe_2B veya iki fazlı $\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$ den oluşan ferrobör tabakası elde edilir. Tek faz Fe_2B oluşumu, iki faz $\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$ nin oluşumundan daha fazla istenir. Çünkü borca zengin FeB fazının kırılabilirliği yüksektir; bu yüzden FeB fazının oluşması istenmez. FeB nin ısı genleşme katsayısı ($23.10^{-6}/^\circ\text{C}$), Fe_2B nin genleşme katsayısından ($7.85.10^{-6} /^\circ\text{C}$) büyüktür. İki fazlı sistemde oluşan Fe_2B ve FeB fazları arasındaki ısı genleşme farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlaklar oluşur. Bu çatlakları önlemek FeB fazını azaltmak veya FeB fazının oluşmasını önlemek ile mümkündür. Demir bor diyagramı Şekil 2.1’de görülmektedir (Bayça ve Şahin 2004).



Şekil 2.1 Demir Bor Diyagramı (Bayça ve Şahin 2004).

2.2.1 Bor Mineralleri

Bor yer kabuğunun bileşimine giren elementler içinde nadir olup doğada daha çok boratlar halinde bulunur. Tabiatta 60 kadar bor minerali olmasına rağmen, bunlardan sadece kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), Tinkal ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ve üleksit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) cevherlerinden ekonomik olarak bor ürünleri elde edilmektedir. Dünyada bor rezervi 1.6 milyar ton civarındadır ve bu rezervin %60'ı ülkemizedir. Boratlardan boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), borik asit (H_3BO_3) ve sodyum perborat ($\text{NaBO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) olmak üzere 3 ana ürün elde edilmektedir. Gelişmiş ülkelerde bu ana mamullerden yüzün üzerinde bor bileşiği elde edilerek sanayinin çeşitli alanlarında kullanılır. Bu ürünlerin en önemlileri bortrioksit (B_2O_3), saf bor (B), Bor karbür (B_4C), Bor-Nitrür (BN), Di-Boran (B_2H_6) ve Ferro-bor dur (Bozkurt 1984).

2.2.2 Saf Borun Fiziksel Özellikleri

Element olarak periyodik sistemin III. Gurubunda bulunan borun atom numarası 5, atom ağırlığı 10.82, Atom çapı 1.78 \AA ve ergime derecesi 2400°C dir. Bor $2.33 \pm 0.02 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluklu amorf olmak üzere iki şekilde bulunur. Bor bileşiklerinin bir kısmı katı, bir kısmı sıvı ve bir kısmı da gaz halindedir. Borlama işleminde bor ya saf halde yada bileşikleri şeklinde kullanılmaktadır (Bozkurt 1984).

2.2.3 Çeliklerde Alaşım Elementi Olarak Bor

Az alaşımlı çeliklerdeki bor, ostenitin dönüşümünü önemli derecede yavaşlatarak sertleşme kabiliyetinin yükselmesine ve çelik bünyesinde ince dağılmış olan tanecikleri azaltarak ostenit tane irileşmesine neden olur. Borlu çeliklerin özellikleri, bor elementinin bünyedeki dağılım şekli ve diğer alaşım elementleriyle olan etkileşiminin bir fonksiyonudur.

Borlu çelikler, düşük alaşımlı çeliklerle kıyaslandığında;

Avantajları

- a) Düşük fiyat
- b) İyi sertleşme kabiliyeti
- c) Sıcak şekillendirmeden sonra (dövme, haddeleme) sertliği düşük olduğundan talaş kaldırma işlemi için ilave ısı işleme gerek olmaması
- d) İyi darbe direnci

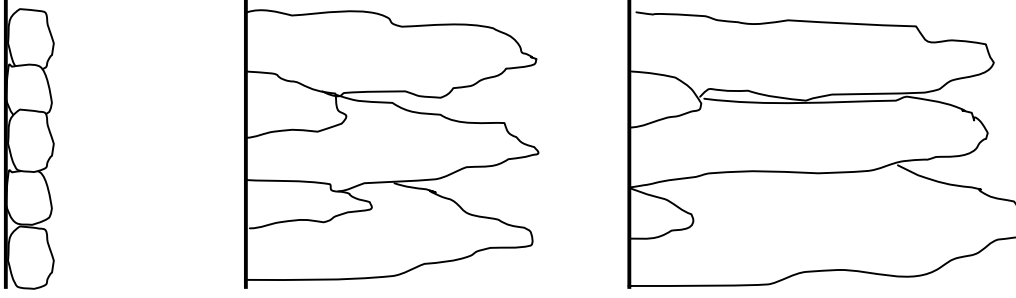
Dezavantajları

- a) Temperleme esnasında yumuşamaya karşı direnç
- b) Daha yüksek ostenitlenme sıcaklığı

c) İstense de belli bir sertleşme kabiliyetinden ileri gidememe(Bozkurt 1984).

2.2.4 Borlama İşlemi

Borlama; termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Borlama, bor elementinin yüksek sıcaklıkta metal yüzeyine yayılması ile yüzeyde borür tabakası elde etme işlemidir. Demir borürler termal ve elektrik iletkenliği gibi özelliklerinden başka yüksek sertlik gibi tipik seramik özellikleri de gösteren bileşiklerdir. Tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları gibi mikro hatalar ile yüzey pürüzlülükleri ve çizikler gibi yüzeyin daha reaktif olduğu yerler borür tabakası oluşumunun başlangıç noktalarıdır. Bu noktalarda Fe_2B çekirdekleri oluşur ve gelişir. Borlamanın birinci aşamasında borlayıcı ortam ve nesnenin yüzeyindeki reaksiyon partnerleri arasında reaksiyon oluşur. Taneler yüzeyde çekirdek oluşturmaktadır. Borlama süresi ile çekirdek oluşumu artar ve ince bir bor tabakası elde edilir. Bor, Fe_2B ve FeB yapısında çeliğin yüzeyine yayılır. Borlama işlemi sırasında, ilk borür çekirdeği numunenin yüzeyinde oluşmaktadır, (Şekil 2.2) oluşan ilk borür çekirdeği numune içinde büyür. Bor atomları kafes yapının 001 doğrultusunda daha hızlı yayıldığı için FeB ve Fe_2B 001 boyunca yönlenir. Bu yüzden borür taneleri 001 yönünde yüzeye dik daha hızlı büyür. Borür tanelerinin diğer yönlerde büyümesi daha yavaştır. Bu nedenle kolonsal yapı oluşur. Önce Fe_2B fazı oluşur, ortamda yeterince bor konsantrasyonu varsa FeB fazı da oluşur. İlk önce oluşan Fe_2B fazı uzun bir sürede büyümektedir. Borür tabakaları çeliğin yüzeyinden içeriye doğru FeB FeB Fe_2B yapısında oluşur. Borlamanın son aşamasında sadece FeB fazı oluşur. FeB fazı Fe_2B fazından daha kısa sürede büyür. Bu yüzden FeB fazının dokusu Fe_2B fazı kadar güçlü değildir (Bayça ve Şahin 2004).



Şekil 2.2 Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması (Bayça ve Şahin 2004).

2.2.5 Borlama Yöntemleri

2.2.5.1 Katı (Paket) Borlama Yöntemi

Borlama ortamı olarak katı maddelerin kullanıldığı yöntemdir. B_4C , KBF_4 ve SiC içeren toz veya granürden oluşan bir karışım ile malzemenin etrafı sarılır. Bu işlem koruyucu atmosfer altında veya sıkı kapatılmış kutularda yapılır. Burada amaç borlama ortamına dışarıdan oksijen akışını kesmektir. Böylece redüksiyon ortamı korunmuş olur. İşlem sırasında ısıya dayanıklı malzemeden yapılmış kutular kullanılır. Borlama $800 - 1100^\circ C$ sıcaklık aralığında ve 2 – 10 saat süreyle inert bir atmosferde yapılır.

Katı borlama yönteminde kullanılan bor bileşikleri; borkarbür, ferrobor, elementer bordur. Bunlardan en çok kullanılanı, borkarbürdür. Aktivatör olarak sodyum bor florür, potasyum bor florür, baryum florür, sodyum karbonat, amonyum klorür ve redükleyici olarak silisyum karbür, grafit ve sodyum klorür gibi maddeler kullanılır. Borlama maddesinin tane boyutu küçüldükçe temas yüzeyi artar. Temas yüzeyinin artması yayılımı kolaylaştırır, dolayısıyla borür tabakasının kalınlığı artar. Borlama, kaynaklı birleştirmelerde başarı ile uygulanabilir. AISI 1040 ve AISI 8620 çeliklerinde kaynak birleştirmelerde uygulanan katı borlama yöntemi ile kaynak bölgesinde de yeterli miktarda borür tabakası elde edilmiştir (Bayça ve Şahin 2004).

Demir dışı alaşımlardan Ti, Ni, Ta esaslı alaşımlar bu yöntemle borlanabilmekte ve bunların borürleri 3200 HV sertliğe kadar ulaşabilmektedir. Bu yöntemin işlem parametrelerinin kontrol yeteneği çok kötü olması, otomasyonun mümkün olmayıp elle çalışma mecburiyeti ve atık ürünlerin çevreye verdiği zarar gibi dezavantajları mevcuttur. En yaygın kullanım şekli olan paket borlama olarak bilinen katı borlamada paket karışımları malzemenin cinside dikkate alınarak farklılık arz eder. Borlama, borlama etkeni (SiC' le ince ince toz haline getirme), aktivatör (BF₃ gazı) ve bir oksit azaltıcı (silika: asitle sulandırılmış kum) aşamalarını içerir (Karakan vd 2002).

2.2.5.2 Sıvı Borlama Yöntemi

Metalik malzemelerin bor kompozisyonlu erimiş tuz banyosuna daldırılmalarıyla yapılmaktadır. Erimiş tuz banyosu değişik oranlarda B₄C, BaO, KCl, NaCl içerir. BaO ilavesi difüzyonu önemli ölçüde iyileştirir. Oluşan demirbor tabakalarının tipik kalınlıkları 100-200 µm' dır. Bu yöntemin zehirlilik, patlayıcı doğa ve çevresel kirlilik gibi dezavantajları, kullanımını sınırlamaktadır (Karakan vd 2002).

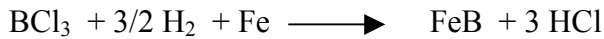
Daldırma süresi borlama süresidir. Borlama işlemi 900 – 1100°C sıcaklıkta ve 2 – 9 saat süre ile yapılır. Bu yöntemin dezavantajı sıcaklıktır. Sıcaklığın 850°C nin altına düşmesi durumunda erimiş boraksın akıcılığı azalacağından borlama imkânsız hale gelecektir. İşlemden önce susuz boraks (Na₂B₄O₇), susuz borik asit (B₂O₃), metaborik asit (HBO₂), boraks, bor karbür gibi bor bileşiklerini kullanılır. Silisyum karbür, ferrosilisyum, grafit, NaCl, Al gibi redükleyiciler kullanılır. Borlayıcı ortamın sıvı olması için bor bileşiklerinin veya NaCl gibi eriticilerin miktarı yüksek olmalıdır. Böylece eritici olan bu maddeler diğer maddeleri de eriterek sıvı eriyik oluşturur. Sıvı ortam borlaması sırasında borlanan metal ile redükleyici madde arasında galvanik pil oluşur. Aktif bor oluşumu sırasında metal yüzeyinde katodik bir reaksiyon olurken, redükleyici madde yüzeyinde anodik bir reaksiyon olmaktadır. Bu işlemin oluşması için; borlanacak metal ile redükleyici madde taneleri arasında elektrokimyasal farkın bulunması gerekir. Difüzyon reaksiyonu esnasında katot potansiyeli, yüzeyde oluşan fazın (FeB, Fe₂B) potansiyel değerini alır. Katı eriyik, oluşum esnasında yüzeyde yaygın elementin

konsantrasyonundaki değişimle birlikte sürekli değişir. Sıvı borlama yöntemi AISI 1040 çeliğine uygulamış, çelik 1000°C de erimiş %70 boraks, % 13 borik asit, %10 ferrosilisyum ve %7 Al içeren tuz banyosuna daldırılmıştır. 1000°C sıcaklıkta 7 saat borlama sonucu 150µm tabaka kalınlığı ve 2000 HV sertlikte borür tabakası elde edilmiştir (Bayça ve Şahin 2004).

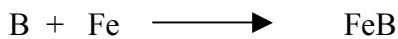
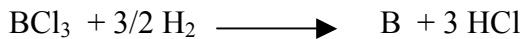
2.2.5.3 Gaz Borlama Yöntemi

Boron hidritlerin termal parçalanması sonucu elde edilen buharla yapılan borlama işlemidir. Bu işlemde sıcaklık yükseltilebilir ve daha homojen difüzyon tabakası elde edilebilir. İşlem özellikle karışık şekilli parçaların borlanması ve homojen tabaka elde edilmek istendiğinde tercih edilen bir yöntemdir. Ancak sıvı ortamda borlama işleminde mevcut olan zehirlilik, patlayıcı doğa ve çevresel kirlilik gibi dezavantajları kullanımını sınırlamaktadır (Karakan vd 2002).

Borlama işlemi Ar ve H₂ gazlarının ve bir evapotartörde gaz haline getirilmiş bir bor kaynağının (BCl₃ gibi) belirli karışımının, dış ortama kapalı paslanmaz çelik bir odadaki numune üzerine püskürtülmesiyle yapılır. Gaz borlamada gazlaştırılabilen BCl₃ (bor halitler), BF₃, B₂H₆ (diboran) ve TEB (trietil boran) gibi bor bileşikleri ve redükten olarak hidrojen gazı kullanılmaktadır. Gaz borlama işleminde genellikle bor halitler ve diboran kullanılmaktadır. Diboran ve bor halitlerin gazları zehirli ve patlayıcıdır; çevreyi kirletici etki yaptığından ticari kullanımı sınırlıdır. Gaz borlamanın avantajları gaz sirkülasyonu sonucu daha uniform bir bor dağılımın sağlanması, sonradan temizleme gerektirmediği için kolay elde edilmesidir. Gaz borlama reaksiyonları şunlardır. Gaz borlamada bor triklorür ısı ile aktive edilir.



Burada hidrojen BCl₃ ü redükler. Böylece bor, demire yayılır. Reaksiyon bileşenleri iki aşamada oluşur.

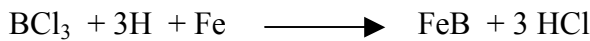


Gaz borlamada diboran ve bor klorür gazlarına alternatif olarak zehirsiz organik bor kaynakları trimetil borat, TMB, $B(OCH_3)_3$ ve trietil boran, TEB, $B(C_2H_5)_3$ boran trietil amin gibi maddeler kullanılmaktadır (Bayça ve Şahin 2004).

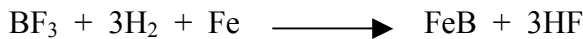
2.2.5.4 Plazma Borlama

Demir esaslı ve demir dışı metalik malzemelere uygulanan, Ar, H_2 gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl_3 , B_2H_6 , BF_3 , $B(OCH_3)_3$ (trimetilborat) kullanarak, $800-1000^\circ C$ sıcaklıkta, yaklaşık 10^{-2} Pa gibi bir düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan borlamadır. Mikroyapı ve demirbor tabakalarının büyümesi işlem sıcaklığı, gaz karışım oranları, malzeme kompozisyonları, işlem basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla kontrol edilebilmektedir (Karakan vd 2002).

Katı haldeki bir maddeyi enerji vererek sıvı, sıvı haldeki maddeyi enerji vererek gaz; ve gaz durumdaki maddeyi enerji vererek plazma haline getirmek mümkündür. Plazma, içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötral atom veya molekül içeren karışımdır. Uygulamada plazma, ısı enerjisi verilerek, ışınla veya elektriksel boşalma ile elde edilir. En yaygın kullanılan plazma yöntemi elektriksel boşalmadır. Bir elektrik gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa belirli şartlar gerçekleştiği takdirde uygulanan gerilim plakalar arasındaki gazın delinme geriliminin üzerinde ise, bu iki plaka arasında bir elektrik akışı olur. Klasik borlama, tuz borlama ve gaz borlama gibi işlemlerin çevreye kirletici etkisi nedeniyle son yıllarda plazma borlama işlemi daha yoğun olarak çalışılmaktadır. Plazma borlama reaksiyonları şunlardır.



Bor florür (BF_3) ile borlama reaksiyonu



Plazma borlamanın dezavantajları;

- a) BCl_3 ve B_2H_6 gazları kullanılması
- b) Bu gazlar pahalı, zehirli, patlayıcıdır ve korozyona neden olmaktadır (Bayça ve Şahin 2004).

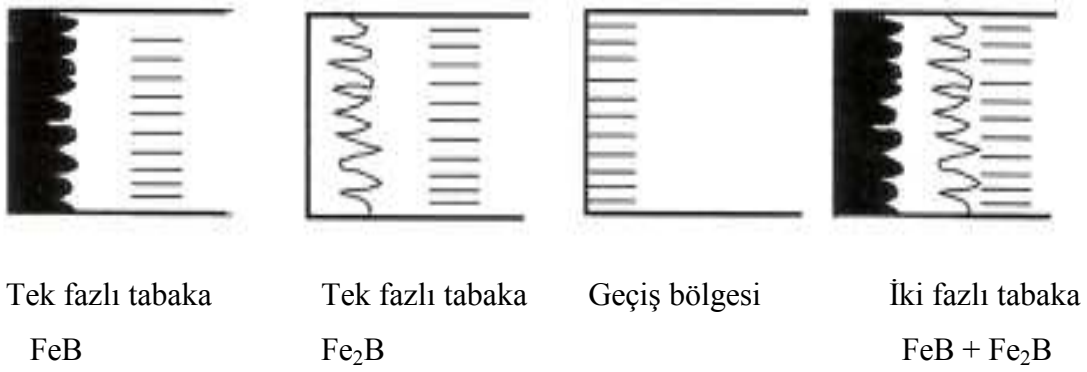
Plazma borlamanın avantajları;

- a) Bilinen borlama işlemlerinde (katı, sıvı, gaz) tabaka kalınlığı ve homojenliği kontrol edilemezken, plazma borlamada mümkündür.
- b) Kompleks parçalarda homojen difüzyon tabakası ve sertlik
- c) Daha düşük sıcaklık ve işlem süresi
- d) İşlem çok yoğun enerjide gerçekleştirilir.
- e) Bu yöntemle yüzeyde tek fazlı Fe_2B tabakası elde edilebilir.
- f) Daha büyük boyutlu (özellikle katı borlamaya göre) taban malzemeleri işleme tabii tutulabilir.
- g) Zehirlilik, patlayıcı yapı ve çevre kirliliğinin kontrol olanağı
- h) İşlem sonrası daha düşük distorsiyon (Karakan vd 2002).

2.2.6 Borür Tabaka Özellikleri

Borlama esnasında uygulanan yöntem, kullanılan borlama maddesi, borlanan malzemenin cinsi ve işlem parametreleri, oluşan borür tabakasının şekline ve özelliklerine etki eden faktörlerdir. Demir esaslı malzemelerin borlanması ile oluşan ferrobör tabaka çeşitleri Şekil 2.3' de görülmektedir.

Borür tabakası ile metal arasındaki geçiş bölgesinde de sertlik artışı meydana gelmektedir. Bu, bor elementinin metalde alaşım elementi etkisi göstermesinden kaynaklanır (Bayça ve Şahin 2004).



Şekil 2.3 Demir esaslı malzemelerin borlanması ile oluşan ferrobor tabaka çeşitleri (Bayça ve Şahin 2004).

Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertlikleri ve yüksek aşınma mukavemetleri ile karakterize edilirler. Eğer aşırı bor mevcut veya malzeme çok fazla alaşıma sahipse Fe_2B fazı (%8,84wt B) yanında borca zengin FeB (%16,25wt B) fazı meydana gelebilir. Yüksek iç gerilmeye sahip olduğundan ve Fe_2B tabakasından kavlayarak döküldüğünden FeB fazı arzu edilmez. Borlu tabakanın aşınma dayanımı, tabakanın tek veya çift fazlı olduğuna ve oluşum biçimine bağlıdır. En az aşınma Fe_2B fazında, en fazla aşınma ise daha sert (1800–2000 HV) FeB fazında olan tabakada meydana gelmektedir. Çünkü FeB fazı Fe_2B fazından daha gevrek bir yapıdadır. En yüksek aşınma dayanımının FeB içermeyen tabakalarda, yani sadece Fe_2B fazından oluşan tabakalarda elde edildiği deneylerle bulunmuştur. Borlama işleminde, borun yüzeye yayılması sonucu parçanın en üst yüzeyinde bileşik tabaka adı verilen borlu bölge, onun altında yayınma (difüzyon) bölgesi ve en iç kısımda ise çekirdek bölgesi yer alır. Yüzeyde borca zengin FeB en üstte oluşurken onun hemen altında daha homojen ve sünek olan Fe_2B olmak üzere iki demirborür fazı oluşur.

Termal uzama katsayıları farklı olan bu iki faz birlikte istenmezler. Yapıda bulunan Cr, W, Mo vs. alaşım elementleri tabaka kalınlığını (bora karşı afinitesinden dolayı) düşürürler. Paslanmaz çelik malzemeler üzerine yapılan borlamalarda, yüzey üzerinde nikelin düşük çözünürlüklü olduğu bor tabakası oluşur ve fazla nikel bor tabakasının altında nikelce zengin tabaka oluşturmak üzere yapıya difüze olur. Cr elementinin birazı

bor tabakasında çözünürken geri kalanı nikelce zengin tabaka ve bor tabakaları arasında kromca zengin bir tabaka oluşturmak üzere içeri difüze olur. Demir dışı alaşımlarda, örneğin titanyum ve alaşımlarının borlanması yüzeyde sertlik değeri 3200 HV' i bulan TiB ve TiB₂ tabakaları elde edilmektedir. Borlamanın yapıldığı plazma içerisinde yer alan B ve Cl iyonlarının işlem üzerinde çok önemli tesiri söz konusudur. En iyi işlem, düşük Cl iyonu yoğunluğu ve maksimum B iyonu yoğunluklarının olduğu plazmada ortaya çıkar. Yüksek Cl iyonu yoğunluğu plazma şiddetinde düşüşe, mikro yapıda gözenekliliğe ve demir bor tabakası üzerinde Cl ve B birikmesine (kaplanmasına) sebep olur. Klorun ayrıca difüzyonu engelleme etkisi de söz konusu olup, B/Cl oranı iyi özelliklere sahip demirbor tabakası elde etmede yüksek olması gerekmektedir. Gözeneksiz yapı eldesi bu şekilde mümkün olmaktadır (Karakan vd 2002).

2.2.7 Borlu Tabakanın Tribolojik Özellikleri

Borlanmış çelikler yüksek sertliklerinden dolayı abrasif aşınmaya karşı çok iyi direnç gösterirler. Abrasif aşınmanın meydana geldiği ve borlama ile önemli ölçüde düşürüldüğü sistemlere; pnömatik transport sistemleri, plastik işleme makinaları, haddeleme elemanları, pompalar, valfler vs. örnek olarak verilebilir. Adhezif aşınma mukavemeti bakımından diğer yöntemlerden oldukça üstün olduğu görülmektedir. Burada, yüksek sıcaklıklardaki mukavemeti özellikle ön plana çıkmakta olup, borlu tabakaların iyi aşınma özelliği göstermesi sebebi ile çok az ya da hiç yağlayıcı kullanmaksızın çevreyi korumak için gelecekte önemli bir etken olacaktır. Borun oksijene karşı ilgisi fazla olduğu için yüzeyde koruyucu ince bir oksit filmi oluşturmakta ve bu oksit filmi yüzeyde yağlayıcı vazifesi göstererek sürtünmeli aşınma sırasında, sürtünme katsayısını düşürürken, yüzeylerin birbirine kaynamasını önler. Kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı borlu tabakaları etkilemez. Adhezif aşınma mukavemetleri demirbor tabakalarında Cr ve Mo ilavesiyle iyileştirilebilir. Abrasif aşınma Cr, Mo, V veya bunların hepsi üzerine vanadyum karbidlerin solüsyonlarıyla düşürülür. Yüzey yorulmasına karşı düşük mukavemet Mo ve V' la yükseltilir.

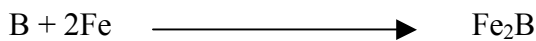
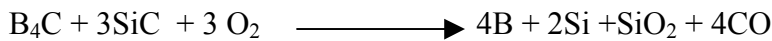
Tribooksidatif aşınma, alaşım elementleriyle çok az etkilenir. Demir dışı metallerin borlanması özellikler Ti, Ta ve Ni metallerinin abrasif aşınma özelliklerinde çok büyük iyileşme gözlenmektedir. Ti ve Ta' ın aşınma mukavemetine olumlu yönde etki ettiği saptanmıştır (Karakan vd 2002).

2.2.8 Borür Tabaka Kalınlığını Etkileyen Faktörler

Metal yüzeyinde borlama işlemi ile oluşturulan borür tabakasının kalınlığını etkileyen faktörler borlayıcı ortamın bileşimi ve konsantrasyonu, işlem sıcaklığı ve süresi, alt tabaka metal bileşimidir (Bayça ve Şahin 2004).

2.2.8.1 Borlayıcı Ortamın Bileşimi ve Konsantrasyonu

Bor kaynaklarının ortamda yeterince bulunması borür tabaka kalınlığını artırır. Ancak ortamda yeterince bor kaynağı yoksa yani borlama işlemi sırasında bor kaynağında bor kalmaz ise tabaka oluşumu durur. Böylece ince bir borür tabakası oluşur. B₄C den B'nin yalnız bırakılması için ortamda redüksiyonu sağlayacak bir madde (redüktan) bulunmalıdır. Böylece redüktan bir madde olan SiC ile B₄C bileşiminden B (elementel bor) elde edilir. Serbest kalan B'nin oksijene olan afinitesi çok yüksektir ve hemen oksijenle B₂O₃ oluşturur. Bunu önlemek için ortamda yeterince SiC bulunmalıdır. Redüksiyonu sağlayan SiC aynı zamanda demiri de redükler, böylece serbest kalan bor, demire yayılır. Böylece FeB ve Fe₂B tabakaları oluşur. Borun demire yayılmasını KBF₄ hızlandırır (Bayça ve Şahin 2004).

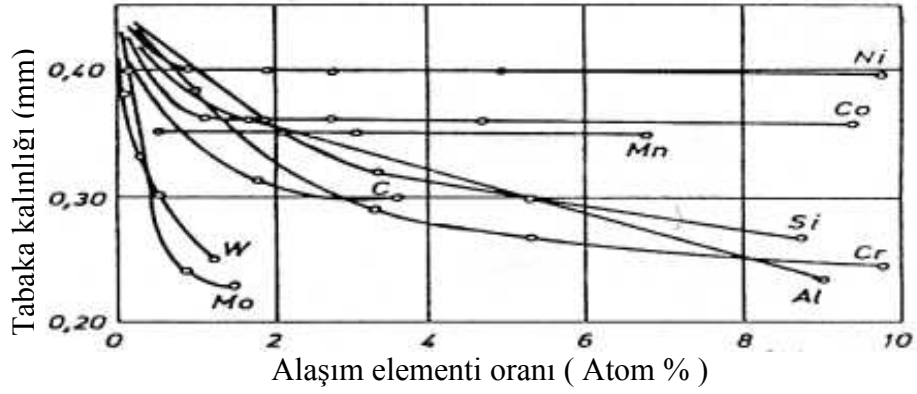


2.2.8.2 İşlem Sıcaklığı ve Süresi

Bor oksitten Bor elementinin serbest kalması için belirli bir sıcaklık gerekir. Demir ve bor oksidin birlikte redüksiyonu (koredüksiyonu) Fe_2B ve FeB borürlerinin oluşumundan dolayı tek tek redüksiyonundan daha hızlıdır. İşlem devam ettikçe çelik yüzeyine bor yayılması devam edecektir. Böylece borür tabaka kalınlığı artacaktır. Ancak işlem sırasında redüksiyon işlemi de devam etmelidir. Redüksiyon işlemi için borlama sıcaklığı gereklidir. Borlama süresi, borlama sıcaklığında bekleme süresidir. Borlama süresinin artması ile tabaka kalınlığı artar. İşlem sıcaklığını sınırlayan erimedir. FeB denge diyagramında ötektik sıcaklığın $1149^{\circ}C$ altında olması gerekir. Uygulamada bu sıcaklığın üzerinde çıkılırsa malzeme üzerinde lokal erimeler meydana gelerek malzeme yüzeyi bozulabilir. Sıcaklık artması tabaka kalınlığını artırması yanında poroziteyi de artırmaktadır. Porozitenin artması ise tabakanın gevrekleşmesine yol açmaktadır. Tabaka kalınlığını sınırlayan bir diğer faktör de kırılgenliktir. Tabaka kalınlığı arttıkça kırılgenlik da artacağı için özellikle çift fazlı tabakalarda kalınlığın fazla olmaması gerekir. Bor tabakasının kalınlığı kutudaki NH_4Cl miktarının artması ile artmaktadır .

2.2.8.3 Alt Tabaka Metal Bileşimi

Çelikte alaşım elementleri (C, Cr, W, Mo gibi) borür tabakalarının dişli yapısının düzleşmesine neden olur. Bu da borür tabakasının alt tabakaya zayıf yapışmasına yol açar. Metaldeki karbon miktarı borür tabaka kalınlığını etkiler. Metaldeki karbon miktarının artması ile borür tabaka kalınlığı azalır. Alaşım elementlerinin borür tabakasının gelişimine etkileri Şekil 2.4 de görülmektedir (Bayça ve Şahin 2004).



Şekil 2.4 Borür tabaka kalınlığının metalin bileşimine göre değişimi (Bayça ve Şahin 2004).

2.2.9 Borür Tabakasının Sertliği

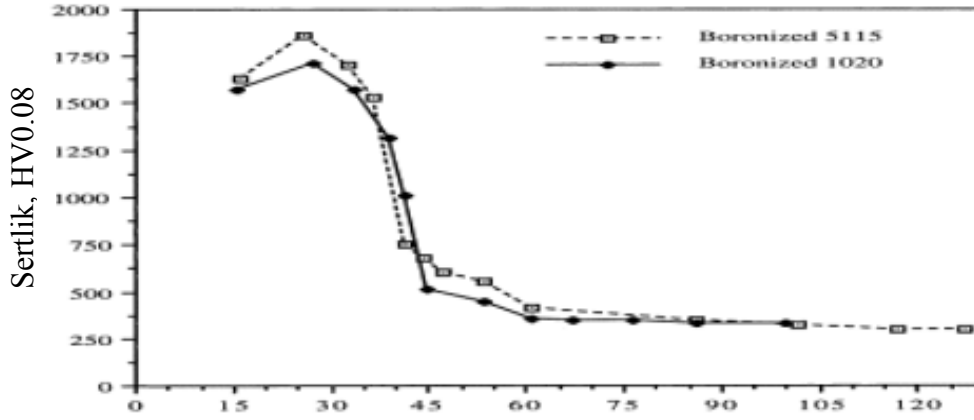
Takım çelikleri genellikle 120 – 200 HV sertliğindedir. Bu çelikler aşındırıcı ortamlarda kullanıldığında yüksek miktarda aşınır ve malzeme boyutları değişir. Takım çelikleri borlanırsa yüzeyde 10 – 200 μm kalınlığında demir borür tabakası elde edilir. Dış yüzeyinde demir borür tabakası oluşturulan çeliğin sertliği 1500 – 2200 HV ye ulaşır. Bor Fe_2B ve FeB yapısında çeliğin yüzeyine yayılır. Bu yapı Çizelge 2.3’ den de görüldüğü gibi karbürlü ve nitrürlü yüzeylerde daha serttir.

Çizelge 2.3 Çeşitli malzemelerin sertlik değerleri (Bayça ve Şahin 2004).

Malzeme	Mikro sertlik, kg/mm^2
Nitrürlenmiş yüzey	610 – 940
Karbürlenmiş yüzey	700 – 820
Sert krom kaplı yüzey	950 – 1100
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900

Borlama sonucu oluşan tek faz Fe_2B tabakası 1800 – 2000 HV arasında sertliğe sahiptir. Fe_2B ve FeB oluşan iki fazlı tabakanın sertliği 1900 – 2400 HV arasındadır. İki fazlı

tabakanın sertliği yüksektir. Borlanmış metallerde sertlik, yüzeyden içeriye doğru Şekil 2.5’ de görüldüğü gibi azalmaktadır.



Kesit boyunca yüzeyden itibaren içe doğru olan mesafe, µm

Şekil 2.5 950 °C sıcaklıkta 90 dakika borlanmış çeliklerin yüzeyden itibaren sertlik dağılımı (Bayça ve Şahin 2004).

2.2.10 Borür Tabakasının Aşınma Dayanımı

Makina parçalarının ve mekanizmaların ömrü ve güvenirliği yüzey özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Korozyon, aşınma ve yorulma kırılmasının oluşumu yüzeyden başlar. Aşınma dayanımı ve sürtünme katsayısı bir sistem özelliği olmakla beraber malzeme sertliği ile doğrudan ilgilidir. Borlanmış tabakanın aşınma dayanımı, tabakanın tek veya çift fazlı oluşuna ve oluşum biçimine bağlıdır. En az aşınma Fe₂B fazında, en fazla aşınma ise daha sert olan FeB fazında olmaktadır. Çünkü daha sert olan FeB fazı, Fe₂B fazından daha gevrektr. Bor elementinin oksijene afinitesi yüksektir. Bu nedenle bor, yüzeyde koruyucu bir oksit tabakası oluşurmakta, bu oksit filmi yüzeyde yağlayıcı vazifesi görüp sürtünme katsayısını düşürerek yüzeylerin birbirine kaynamasını da önlemektedir. Borlanmamış eliğin aşınma dayanımı 3,05 mg/devir iken borlanmış çeliğin aşınma dayanımı 0,0065mg/devir olarak bulunmuştur. Buna göre borlanmış çeliğin aşınma dayanımı 500 kat daha fazladır (Bayça ve Şahin 2004).

Borlanmış AISI 1020 çeliğinin erozif aşınma davranışı üzerine bir çalışma gerçekleştiren Yıldız ve arkadaşları, farklı sıcaklık ve sürelerde sıvı ortamda borlanan numunelerin aşınma testlerini 30 m/s püskürtme hızı ve 90° çarpma açısında, 420µm grit partikül püskürtülerek gerçekleştirmiştir. Deneyler ilk olarak numunelerin borlanma işlemlerinin yapılması ve ardından borlanan numunelerin aşındırma işlemlerine maruz bırakılması suretiyle iki aşamada yapılmıştır. Sonrasında ise normalize edilmiş numune de aynı koşullarda aşındırılarak, işlem gören numunelerle kıyaslanmıştır. Eşit sürelerde erozif aşınmaya maruz bırakılan çeliklerde borlanmış numunelerin üstünlüğü açıkça görülmektedir. Farklı borlama sıcaklıklarında borlanan numuneler erozif aşınmaya karşı değişik davranış göstermişlerdir. Ancak 1 saat borlama işlemi dahi malzemenin erozif aşınma direncinde yaklaşık 5 katlık bir artış sağlamıştır. Borlanan numuneler kendi aralarında değerlendirildiğinde ise en düşük aşınmayı 7 saat 950°C’de borlanan numunenin sergilediği açıkça görülmektedir. Bu kapsamda bakılırsa, AISI 1020 çeliğinin erozif aşınma davranışına bor tabakasının sertliğinden ziyade tabaka kalınlığının etkidiği kanaatine varılmıştır. Bununla birlikte diğer sürelerde borlanan numunelerde aşındırma süresi boyunca aşınma miktarlarında değişimlerin olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, 7 saat 950°C’de borlanan numunenin en düşük aşınmayı sergilediği ve borlanan numunelerin işlem görmeyen numuneye göre yaklaşık 9 kat daha fazla direnç gösterdikleri belirlenmiştir (Yıldızlı vd. 2003).

Er ve Par yaptıkları çalışmada, borlanmış sade karbonlu AISI 1030 ve 1050 çeliklerinin işlemsiz hallerine göre yüzey sertlik ve abrazif aşınma dayanımlarında oluşan değişimleri incelediler. Borlama sonucu malzemelerin yüzey sertlik değerlerinin işlemsiz hallerine göre yaklaşık 8 – 10 kat arttığı görülmektedir. Ortalama borlu tabaka kalınlıkları incelendiğinde ise aynı malzeme için artan işlem süresinin tabaka kalınlığının düzenli olarak artmasına neden olduğu gözlenmiştir. İncelemeye alınan sade karbonlu çelik malzemelerde artan karbon miktarının elde edilen borür tabaka kalınlıklarını belirgin bir şekilde azalttığı buna karşılık yüzey sertlik değerlerinde ise az da olsa artışa neden olduğunu tespit ettiler. Sade karbonlu çelik numunelerle (AISI 1030 ve 1050) yapılan abrazif aşınma deney sonuçları incelendiğinde borlanmış çeliklerin alüminyum oksit aşındırıcısına karşı çok büyük oranlarda abrazif aşınma dayanımı kazanmış oldukları belirlenmiştir. Bu malzemelerin işlemsiz hallerinin aşınma

davranışları incelendiğinde artan karbon miktarıyla artan yüzey sertliğinin abrazif aşınma dayanımını olumlu yönde etkilediğini gördüler. Aynı malzemede artan borlama işlem süresiyle, borlu tabaka kalınlığının artması aşınmanın azalmasına neden olurken; farklı karbon miktarına sahip iki malzeme karşılaştırıldığında elde edilen borür tabakalarının yaklaşık aynı aşınma davranışını sergiledikleri sonucuna vardılar (Er ve Par 2004).

2.2.11 Borür Tabakasının Korozyon Dayanımı

Borür tabakasının suya ve atmosfere karşı korozyon direncinin düşük olmasına karşılık, bazı asitlere ve sıvı metallere karşı direnci yüksektir. Özellikle HCl, H₂SO₄ ve H₃PO₄ gibi asitlere ve alüminyum, kurşun ve çinko gibi metallerin sıvı banyolarında borlu malzemelerin korozyon direnci çok yüksektir. Yüksek kromlu çeliklerde borlama ile koruyucu krom oksit yerine daha az koruyucu olan krom borür oluşur. Bu yüzden yüksek alaşımlı malzemelerin borlanmasıyla korozyon özelliği her zaman elde edilmeyebilir (Bayça ve Şahin 2004).

Yüzeyde korozyon, direncini iyileştiren borlu tabakada yer alan kromborid olduğu sanılmaktadır. Çünkü kromboritten dolayı yüzeyde oluşan kromoksit yüzeyi korozyon aşınmasına karşı pasifleştirmektedir (Karakan vd 2002).

2.2.12 Borlamanın Endüstriyel Uygulamaları

Adhezif ve Abrazif aşınma şartlarında bir çok kullanım alanı mevcuttur. Abrazif aşınmaya dirençli malzemeler olarak; vidalı sürücüler ve kovanlar, delinmiş veya dar ve küçük açılmış faturalar, makaralar, valf elemanları, şaftlar, tamamlayıcılar paslanmaz çelik malzemelerden üretilebilmekte ve ayrıca helikopter türbin çanakları borlanmış Ti-

6Al-4V malzemeden üretilmektedir. Bu katagoriler ile ilgili diğer uygulama alanları şunlardır (Sinha 1991) ;

- DIN St 37 çeliğinden üretilen tel çekme aletleri, ringleri ve kovanlarında,
- Tekstil makinelerinde kullanılan dökme demir dramlarda,
- Su ayar vanalarının dörtlü kavrama besleyicilerinde (AISI 316 Ti çeliğinden),
- Ateşleme nozülleri, girdaplı dönme elemanları ve kimya endüstrisinde petrol yataklı makinelerde enjektör başlarında,
- Çeşitli yüksek performanslı tekerlekler ve önemli motorlarda sürme, sonsuz vida ve helesel dişlilerde.
- Doldurma elemanlarının nozülleri,
- Ekstrüzyon sürücüleri, kovanlar, nozülleri, üretim makinelerinin dönüşümlü akım blokları (ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplı makinelerde),
- Plastik endüstrisinde, mineral takviyeli plastik granüllerin yükleme elemanları için kontrol plakaları ve bentleri, dövme kalıpları, basma ve sürme matrisleri, kavrama halkaları (takım çelikleri),
- Pres kalıpları, kesme şablonları, döverek kesme plaka muhafazaları(DIN St 37 çeliği),
- Seramik tuğla ve kapların kalıplanmasında kullanılan kalıplar, ekstrüzyon kovanları, iticileri ve ringleri (AISI 4140 çeliği),
- Ekstrüzyon tip'leri, geri dönüşümsüz valflar ve silindirler (Abrazif minerallerin ekstrüzyonu veya fiber glas takviyeli plastiklerin ekstrüzyonu için) (AISI 4150 çeliği),
- Demir dışı metallerin döküm besleyicileri (AISI H11 çeliği),
- Linyit kömür briketlerin taşıma levhaları.

Borlanan parçalar, basınçlı döküm kalıpları, blok bükücüler, blok sürücüler, boru klipsleri, presleme şekillendirme sürücüleri, çeşitli tipte basınçlı soğuk şekillendirme kafaları, bükme, ekstrüzyon, damgalama, presleme, dövme, çekme ve germe kafalarında kullanılır (A2, A6, D2, H10, H11, O2 ve diğer takım çelikleri) (Şen U. 1997).

2.2.12.1 Tekstil Endüstrisindeki Uygulamalar

Tekstil endüstrisinde St37' den imal edilerek 900°C'de 6 saat süre ile 160 µm tabaka kalınlığında borlanmış iplik kılavuzu fırçaları yüksek dayanım göstermektedir. Bu malzemeler seramik malzeme veya sert metalden yapılmış iplik kılavuzu fırçaları ile karşılaştırıldığında kullanım ömrü yaklaşık üç kat artmaktadır (Karaman 2003).

2.2.12.2 Plastik Endüstrisindeki Uygulamalar

Plastik üretiminde kullanılan ekstrüder mil ve kovanları plastiğin içerdiği mineral ve cam liflerinin yüksek aşındırıcı etkisi altında aşınmaya uğrarlar. Extrüder mil ve kovanları borlanarak çalışma ömürleri önemli ölçüde arttırılabilir. Borlanmış parçaların çalışma ömrü yüksek alaşımli çelik parçalardan daha yüksektir (Matuschka 1980).

2.2.12.3 Cam Endüstrisindeki Uygulamalar

Cam imali ve cam işleme endüstrisinde kullanılan kalıplar ve takımlar yüksek aşınmaya uğrarlar. Uygun bir borlama işlemi ile parçaların kullanım ömrü 10–20 kat arttırılabildiği, bundan dolayı da malzemedeki ve çalışma süresi kaybı masraflarından tasarruf edildiği görülmektedir. Cam sanayiinde kullanılan çeliklerden imal edilen koniler borlandığında aşınma dirençleri artmakla birlikte, erimiş camın üzerine yapışmasına izin vermezler (Karaman 2003).

2.2.12.4 Seramik Endüstrisindeki Uygulamalar

Seramik endüstrisindeki pres diskleri ve kesme kalıpları başarılı bir şekilde borlanmaktadır. Kesme kalıpları sert krom kaplandığında iyi sonuçlar vermemektedir. Diğer taraftan St37 çeliği kullanılarak imal edilmiş olan kesme kalıpları borlandığı zaman, aşınma direnci önceki metotlara oranla 3 misli artmıştır (Matuschka 1980).

2.2.12.5 Otomotiv Endüstrisindeki Uygulamalar

Almanyada borlamanın ilk uygulama alanı, içten yanmalı motor parçalarıdır. Yağ pompası dişlileri 900°C’de 1,5 saat borlanmıştır. Dişlilerin çalışma ömürlerinde oldukça yüksek başarılar sağlanmıştır. Süspansiyon parçaları 900°C’de 4 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulduğunda 200.000 km’den sonra da kullanım devam etmektedir (Alwart ve Ulrich 1998).

2.2.12.6 Kalıp Endüstrisindeki Uygulamalar

Borlanmış yüzeylerin soğuk kaynak eğiliminin çok düşük olması adhezif aşınmayı azaltmada önemli bir faktördür. Bu önemli özelliğinden dolayı sıvama, derin çekme ve benzeri soğuk metal şekillendirme işlemlerinde, öncelikle borlanmış takımlar tercih edilmektedir. Kalıp ömrü malzeme cinsine bağlıdır. Borlama ile bu kalıpların ömrü 10 kat artmaktadır (Karaman 2003).

2.3 SÜRTÜNME ve AŞINMA

Aşınma katı cisimlerin yüzeylerinden parçacıklar veya ince tabakaların ayrılması ile meydana gelen malzeme kaybı olarak tanımlanabilir. Aşınma mekanik bir etki sonucu meydana gelen ve yüzeyden ufak parçacıkların ayrılması olarak da tarif edilebilir. Yapılan tanımlamalara göre ortaya çıkan hasarın aşınma olarak değerlendirilebilmesi için aşağıdaki koşulları sağlaması gerekir (Keleştimur 1989).

- a) Mekanik bir etkinin olması
- b) Sürtünmenin olması
- c) Yavaş ve devamlı olması
- d) Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi
- e) İstenmediği halde meydana gelmesi

2.3.1 Sürtünme

Metaller arasındaki sürtünme olayları, basit görünmekle beraber, aslında çok karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu olayları, izah ve formüle etmek için tarihsel gelişim içerisinde, birçok teori ileri sürülmüştür (Moore 1975).

Amontons (1699), cisimleri rijit kabul ederek, sürtünmenin izahını, “Kayma esnasında parçaları, yüzey pürüzleri yüksekliğince kaldırmak için gerekli enerji” şeklinde yapmış ve bütün cisimler için sürtünme katsayısını $1/3$ olarak vermiştir (Ulukan 1993).

Coulomb (1785), Amontons’un bulduğu sonuçları doğrulamış ve ayrıca sürtünme katsayısının hızdan bağımsız olduğunu da gözlemlemiştir. Bunlara ilaveten Coulomb, statik sürtünme katsayısını kaymaya başlatma kuvveti ile kinetik sürtünme katsayısını da hareketi devam ettirme kuvveti ile tarif etmiştir. “Coulomb Kanunu” adı verilen bu teoriye göre (Hutchings 1992):

- a) Sürtünme kuvveti, normal yükü orantılıdır,

- b) Sürtünme kuvveti, geometrik temas alanına bağlı değildir,
- c) Sürtünme kuvveti, kayma hızına bağlı değildir,
- d) Statik sürtünme katsayısı, dinamik sürtünme katsayısından daha büyüktür.

Bu değerlendirmeler sonucunda aşağıdaki matematiksel ifade çıkarılmıştır:

$$\mu = F_s / F_n$$

Burada;

μ : Sürtünme katsayısı

F_s : Teğetsel kuvvet (Sürtünme kuvveti)

F_n : Normal kuvvet

Strang ve Lewis'in çalışmalarında ise, çok iyi işlenmiş yüzeylerde dahi sürtünme katsayısında artışlar olabildiği gözlemlenmiştir (Ulukan 1993).

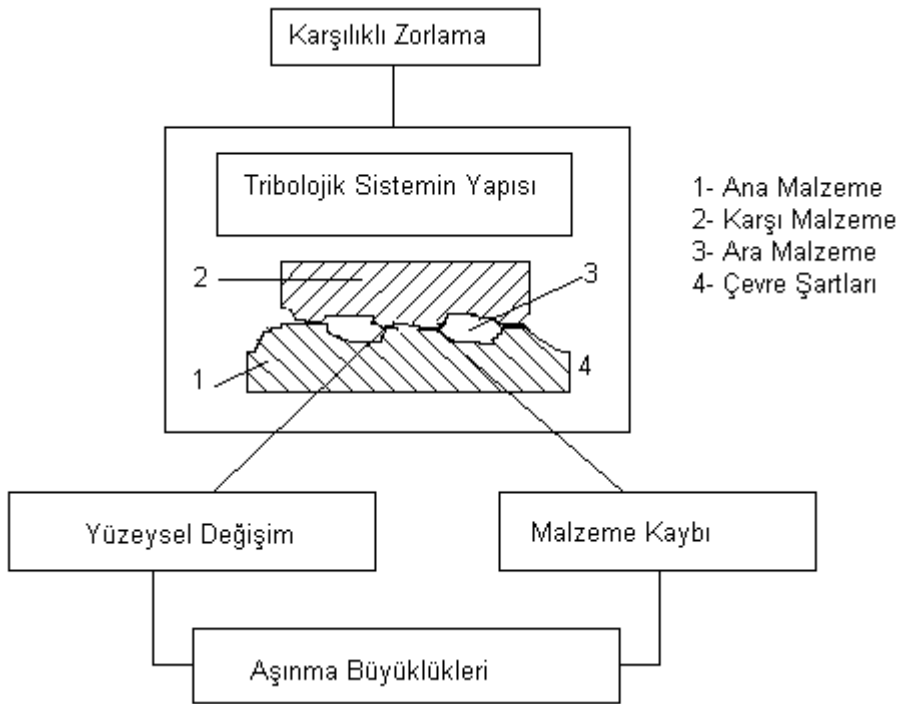
2.3.2 Aşınma

Aşınma genellikle temas eden yüzeylerden mekanik etkilerle malzeme kaybı olarak tanımlanır. Temas halinde bulunan katı yüzeylerde, malzeme kaybı üç şekilde gerçekleştirilebilir. Bunlar bölgesel erimeler, kimyasal çözünme ve yüzeyden fiziksel oluşan ayrılmalardır. Uygulamada aşınma kapsamına daha çok yüzeyden fiziksel anlamda ayrılan malzemenin sebep olduğu hasarlar dahil edilmektedir.

Bir aşınma sisteminde;

- Ana malzeme (aşınan),
- Karşı malzeme (aşındıran),
- Ara malzeme,
- Yük,
- Hareket,

aşınmanın temel unsurlarıdır. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte Tribolojik sistem olarak adlandırılır. Bu tribolojik sistemin standartlara uygun şematik olarak gösterimi Şekil 2.6’ da görülmektedir. Aşınma sistemindeki önemli etkilerden biride çevre şartlarıdır. Sistem elemanlarının nem veya korozif etkilerle karşı karşıya kalması, aşınmayı hızlandırır. Birbirleri ile temas eden malzemelerde, temas sonucunda oluşan sürtünme uygun yağlama, filtreleme, uygun malzeme seçimi ve uygun tasarım gibi faktörlerle en aza indirilebilir, fakat kesinlikle tümüyle önlenemez. Aşınma çeşitli yönleri ile korozyona benzer. Aşınma da korozyon gibi bir yüzey olayı olduğundan, yüzeyi etkileyen her şey aşınma davranışını da etkiler.



Şekil 2.6 Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterimi (Kayalı vd.1997).

Aşınma hasarları kapsamına giren yüzeyden malzeme kaybı, kayma, kırılma, talaş oluşumu, yorulma, kimyasal çözünme ve difüzyon yoluyla gerçekleşebilir. Aşınma parçacıkları 0,01 – 0,02 μm arasında ise hafif aşınma, 1 μm den büyük ise şiddetli aşınma olarak kabul edilir.

2.3.3 Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınmayı etkileyen çeşitli faktörler farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu faktörler, aşağıda dört grupta halinde verilmiştir:

1. Ana malzemeye bağlı faktörler;
 - a) Malzemenin kristal yapısı
 - b) Malzemenin sertliği
 - c) Elastisite modülü
 - d) Deformasyon davranışı
 - e) Yüzey pürüzlüğü
 - f) Malzemenin boyutu
2. Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi
3. Ortamın etkisi
 - a) Sıcaklık
 - b) Nem
 - c) Atmosfer
4. Servis koşulları
 - a) Basınç
 - b) Hız
 - c) Kayma yolu

2.3.4 Aşınma Mekanizmaları

2.3.4.1 Adhezif Aşınma (Yapışma Aşınması)

Yapışma aşınması olarak da adlandırılan adhezif aşınma, en sık rastlanan aşınma türü olmasına rağmen, genellikle hasarları hızlandırıcı etkide bulunmaz. Adhezif aşınma en genel olarak karşılıklı etkileşim içerisinde birbirlerine göre göreceli olarak hareket eden iki yüzeyin birisinden bir parçacığın koparak diğer yüzeye yapışması sonucunda, bir

yüzeyden diğer yüzeye olan malzeme taşınımı olarak tanımlanabilir. İki ayrı metal yüzeyi basınç altında Şekil 2.7’de olduğu gibi getirildiği zaman, iki ayrı yüzeyde bulunan karşılıklı çıkıntılar sürtünme, ısı, gerekse de soğuk kaynaklaşma etkisiyle birbirleriyle bağ yaparlar. Yüzeylerin birbirlerine karşı olarak yaptığı hareketin devam etmesiyle birleşen iki çıkıntı, bağ kuvvetinin en zayıf olduğu noktadan kopacaktır.



Şekil 2.7 Adhezif aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi (Kayalı vd. 1997).

Adhezif aşınma, şu önlemlerden bir tanesinin kullanılmasıyla azaltılabilir:

- **Yağlama:** Adhezif aşınma, sıcaklığın bölgesel olarak arttığı bölgelerde meydana geldiğinden, iyi bir yağlamanın yapılmasıyla hem yüzeyler arasında sürtünme azaltılabilir hem de yağlayıcılar sistemden ısıyı uzaklaştırabilir.
- **Birbirleri içerisinde çözünmeyen metaller kullanmak:** Birbirleri içerisinde çözünmeyen iki metalin bir arada kullanılmasıyla, adhezif aşınmanın meydana gelişi tamamen ortadan kaldırılabilir.
- **Düz yüzeyler kullanmak:** Eğer birbirleriyle etkileşen yüzeylerde soğuk kaynaşmayı meydana getirecek şekilde karşılaşacak çıkıntılar yok ise, adhezif aşınma meydana gelmeyecektir.
- **Metal metal temasını önlemek:** Metal yüzeylerde kimyasal filmler oluşturmak, aşınmayı engeller. Örneğin fosfat kaplamalar.

Adhezif aşınma yüzeye etkiyen normal yük, kayma yolu ve aşınan malzemenin yüzey sertliği ile orantılıdır. Çizelge 2.4' de adhezif aşınmaya malzeme özelliklerinin etkisi özetle verilmiştir (Kayalı vd.1997).

Çizelge 2.4 Adhezif Aşınmaya Malzeme Özelliklerinin Etkisi (Kayalı vd.1997).

ÖZELLİKLER	ADHEZİF AŞINMA
Oksitli yüzey	Az
Kübik kristal yapı	Çok
Hegzagonal kristal yapı	Az
Yüksek defarmasyon sertleşmesi	Çok
Yüksek sertlik	Az
Yüksek elastisite modülü	Az
Yüksek ergime sıcaklığı	Az
Yüksek yeniden kristalleşme sıcaklığı	Az
Küçük atom yarı çapı	Az

2.3.4.2 Abrazif Aşınma

Yırtılma ve çizilme aşınması olarak da isimlendirilen abrazif aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Abrazif aşınma en genel olarak, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan partiküllerle basınç altında etkileşmesiyle, sert partiküllerin malzeme yüzeylerinden parçalar koparması şeklinde tanımlanır. Bu mekanizmaya örnek olarak, sisteme dışarıdan giren toz parçacıklarının veya bir motorda oluşan yanma ürünlerinin sebep olduğu aşınma şekli verilebilir. Bu tip aşınmada sert ve keskin partiküller, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Bu aşınma iki elemanlı veya üç elemanlı olmak üzere ikiye ayrılır. İki elemanlı abrazif aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbirleriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abrazif aşınmada ise, ana ve karşı malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeyden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak

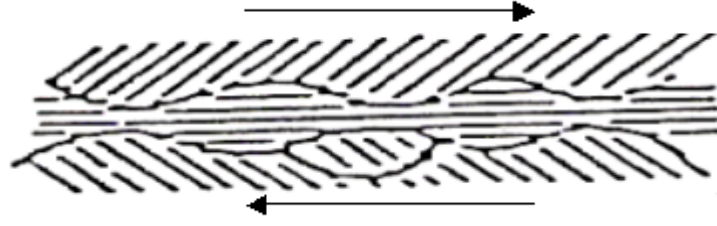
görev yapabilir. Abrazif aşınmayı etkileyen iki temel faktör, aşındırıcı partikül ile metal yüzeyi arasındaki sertlik farklılığı ve teması meydana getiren basıncın büyüklüğüdür. Abrazif aşınma hızı, malzeme yüzeyine etki eden normal yük azaltılarak düşürülebilir.

Abrazif aşınmanın engellenmesinde veya abrazif aşınma hızının en aza indirilmesinde aşağıdaki yöntemlere başvurulabilir:

- **Yüzey sertliğini arttırmak:** Abrazif aşınmanın engellenmesinde veya aşınma hızının azaltılmasında en etkili yol, malzeme yüzey sertliğinin artırılmasıdır. Ancak bu yöntemin bazı malzemelere uygulanmasıyla daha büyük problemlerle karşılaşılır. Örneğin gevrek kırılma.
- **Abrazif parçacıkları uzaklaştırmak:** Abrazif aşınmaya sebebiyet veren sert partiküllerin sistemden uzaklaştırılması ile abrazif aşınma engellenebilir.
- **Aşınmış parçaları değiştirmek:** Abrazif aşınmaya uğrayacak parçanın kolay bir şekilde değiştirilmesine imkan verecek dizaynlar geliştirmek ile pratikte en çok kullanılan yöntemlerden birisidir.

2.3.4.3 Yorulma Aşınması

Değişken, tekrarlı yüklemeler sonucu meydana gelir. Tribolojik zorlanmalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden, yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülür. Neticede malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur, bu ise yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur. Aşağıdaki Şekil 2.8' de yorulma aşınmasının şematik gösterilişi verilmiştir.



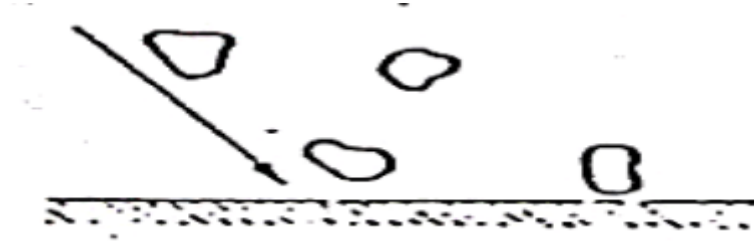
Şekil 2.8 Yorulma aşınmasının şematik gösterilişi (Kayalı vd. 1997).

Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde, plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelir. Bu boşlukların zamanla yüzeye doğru ilerleyerek büyümesi, yüzeyde küçük çukurların ortaya çıkmasına sebep olur. Bu tür aşınma daha çok dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeylerinde görülür (Kayalı vd.1997).

2.3.4.4 Eroziyon Aşınma

Bir sıvı ya da gaz akımı tarafından taşınan farklı geometrik boyut ve yapıdaki taneciklerin, temas da buldukları katı yüzeylerinde sürekli darbe etkisi yaparak oluşturdukları hasar erozyon aşınması olarak tariflenmektedir. Bununla beraber, eroziyon aşınma; aşındırıcı taneciklerin ve bunları taşıyan akımın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin farklılık göstermesi yanı sıra, sadece sıvı ya da gaz akımının kendisinin de aşındırıcı madde özelliği teşkil etmesi durumu sebebiyle bu mekanizmaların tek başına, kombineli ve yüksek sıcaklık uygulamalarında malzemede bıraktıkları hasar türleri farklılık göstermesi itibarıyla, püskürtme, yıkama, kavitasyon-erozyon, erozyon-korozyon, yağdırma ve termal aşınma mekanizmaları adları altında sınıflandırılmaktadır. Pratikte en çok bu aşınma türü, pnomatik iletim hatları ve ekipmanlarında, türbün çarklarında, hidrolik pompalarda, kumlama makineleri ekipmanlarında ve püskürtme lülelerinde karşımıza çıkar. Eroziyon aşınmaya maruz kalan parçaları korumak suretiyle işletme ömürlerinde kayda değer bir artış sağlamak mümkündür (Yıldızlı vd. 2003).

Sıcaklık ve akış hızı arttıkça, aşınma hızlanır. Akış halindeki sıvılarda ani basınç düşmesi ile oluşan gaz kabarcıkları da aşınmaya sebep olur. Örnek gemi pervanelerinde çok görülür. Şekil 2.9' da erozif aşınma gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Erozif aşınmanın şematik gösterilişi (Kayalı vd.1997).

Erozif aşınma, aşağıda belirtilen şekilde hasarların meydana gelmesi ile tanınabilir: (Kayalı vd.1997).

- **Sert olmayan malzeme yüzeylerinde oluşan kopma**

Örneğin fan pervanelerinin kullanımı sırasında, ortamda bulunan tozların ve sert partiküllerin pervanenin konkav tarafında hızlı bir şekilde yuvarlanmaları ve kaymaları sırasında bu aşınma türü oluşur.

- **Malzeme yüzeyinde kanalların veya yivlerin oluşması**

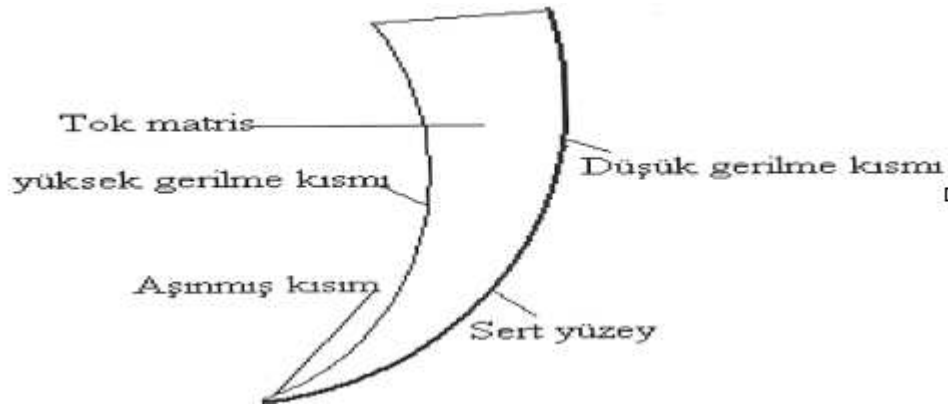
Bu tür aşınma hasarları, gazların veya sıvıların hızlı bir şekilde arttığı sistemlerde akış hızının veya yönünün değiştiği bölgelerde görülür.

- **Köşelerin yuvarlanması**

Erozif aşınma meydana geldiği pervane ve türbin kanatları gibi malzemelerin şekillerinde köşelerin yuvarlanması şeklinde değişiklikler meydana gelebilir.

2.3.4.5 Öğütmeli Aşınma (Grinding Wear)

Öğütmeli aşınma, yüksek basınçlar altındaki partiküllerin metal yüzeyleri ile düşük hızlarda karşılaşmaları sonucunda, metal yüzeyinden parçacıkların kesilerek veya çok sayıda ufak çizikler açılarak kopartılması ile meydana gelir. Bu yüksek basınç ve düşük hız kombinasyonu, genellikle kepçe gibi ağır iş makinelerinin çalışma koşullarında meydana geldiği için, bu araçların kesici uç yüzeylerinde Şekil 2.10'dan da görüldüğü gibi bu hasar türü meydana gelir.



Şekil 2.10 Öğütmeli aşınmanın şematik gösterilişi (Kayalı vd.1997).

Öğütmeli aşınmaya diğer bir örnek ise, bilyalı değirmenler olarak gösterilebilir. Öğütmeli aşınmayı engellemek için malzeme sertliğini arttırmak, akla gelen ilk çözümdür. Ancak sertlik artarsa gevrek kırılma şansı da artacağı için bu yöntemin uygulanması mümkün değildir. Bu tip aşınmayı engellemek için yapılan girişimlerin başarılı olması nedeniyle, malzemenin kontrollü olarak aşındırılması yoluna gidilmeye çalışılmıştır. Kontrollü aşınma ile malzeme kendi kendine bilenererek, körleme sebebiyle meydana gelen performans düşüklüğünden kurtulabilir (Kayalı vd.1997).

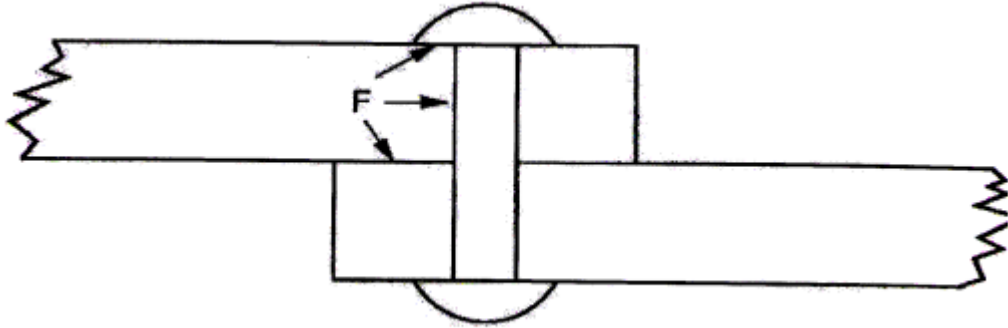
2.3.4.6 Oymalı Aşınma (Gouging Wear)

Oymalı aşınma malzeme yüzeyinin çok yüksek gerilmelerdeki çarpma durumlarında, yüzeyden bir parçanın kesilerek veya oyularak kopmasıyla meydana gelir. Bu tip aşınmaya genellikle hafriyat, madencilik, petrol kuyularını delme işlemi ve benzeri

koşullarda çalışan malzemelerin kesme ve delme görevi yapan kısımlarında görülür. Bu işlemler sırasında sert abrazif parçacıkların çok yüksek gerilmeler altında malzeme yüzeyine çarpmaları ile yüzeylerde hızlı bir şekilde hasar oluşumu meydana gelir. Oymalı aşınma diğer aşınma türlerine göre çok daha hızlı olarak geliştiğinden, bu aşınmaya uğrayan parçaların yenileriyle değiştirilerek kullanılması daha ekonomik olmaktadır (Kayalı vd.1997).

2.3.4.7 Kazımalı Aşınma (Fretting Wear)

Kazımalı aşınma, karşılaşılan yüzeylerde mikro kaynaşmanın meydana geldiği adhezif aşınmaya bir miktar benzemektedir. Aralarındaki fark ise, şu şekilde açıklanabilir: Adhezif aşınma, birbirleri üzerinde kayan yüzeylerde meydana gelirken, kazımalı aşınma birbirlerine göre hareket etmeyen yüzeylerde meydana gelir. Ancak kazımalı aşınma, çok düşük genlikteki hareketlerin (vibrasyon) meydana geldiği sistemlerde, Şekil 2.11'den de görüldüğü gibi mikro kaynaşmanın oluşması ile meydana gelir.



Şekil 2.11 Kazımalı aşınmanın şematik gösterilişi (Kayalı vd.1997).

Kazımalı aşınma vibrasyonlu ortamlarda çalışan somun, perçin gibi bağlantı elemanları ile birleştirilmiş sistemlerde, otomobil şaftlarının birleşme noktalarında ve yataklarda en yaygın olarak rastlanan hasar oluşum mekanizmasıdır. Kazımalı aşınmayı engellemek kolay değildir. Ancak bu aşınma mekanizmasının meydana getirdiği hasarlar, aşağıda verilen uygulamalarla en aza indirilebilir:

1. Vibrasyonun azaltılması veya giderilmesi
2. Ara yüzeydeki kaymaları azaltmak veya gidermek.
3. Bağlantı noktalarında elastomer kullanmak.
4. Bağlantı noktalarının yağlanması.
5. Kırılmayı engellemek.

2.3.4.8 Korozi Aşınma

Korozi aşınma olayında çalışma ortamıyla parça yüzeyleri arasındaki etkileşim etkin rol oynamaktadır. Korozi aşınmada, aşınma olayı iki kademe gerçekleşmektedir:

1. Temas halindeki yüzeyler ortamla reaksiyona girerler ve yüzeyde reaksiyon ürünlerinden oluşan bir tabaka meydana gelir.
2. Daha sonra, temas noktasında çatlak oluşumu veya abrazyon etkilerden dolayı reaksiyon tabakası hasara uğrar.

Tribooksidasyon aşınması adı da verilen korozi aşınma durumunda, ana malzeme ile karşı malzeme arasındaki tribolojik zorlanmalardan dolayı meydana gelen kimyasal reaksiyon etkindir. Malzeme yüzeylerinin hava ile reaksiyona girerek oluşturduğu yüzey tabakaları (oksit tabakası) aşınmayı azaltmasına rağmen, bu yüzey tabakalarının tribooksidasyon sonucu özelliklerinin değişmesi, aşınmayı hızlandırmaktadır. Yağ gibi kimyasal maddeler bulunan ortamda çalışan makine parçalarının yüzeylerinde oluşan yüzey tabakalarının bir kısmının tribolojik zorlamalar ile kırılması ve aşındırıcı parçacıklar oluşturması, aşınmayı artırır.

Tribooksidasyon aşınması, özellikle metalik malzeme yüzeylerinde görülür. Neticede malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur; bu ise, yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur. Büyük oranda aşınmaya sebep olan bu aşınma mekanizmaları dışında, “Tribosüblimasyon” ve “Yayınma” mekanizmalarından da bahsetmek mümkündür. Tribosüblimasyon, yüzeydeki sıcaklığın sürtünme ısıyla yükselmesi sonucu etkin hale geçer. Yayınma ise, tribolojik zorlanmada ama

malzemenin üst yüzeylerindeki atomların yayılma ile karşı malzemeye geçmesi sonucunda malzeme kaybının meydana gelmesidir (Kayalı vd.1997).

2.3.5 Malzemede Aşınmanın Ölçülmesi

2.3.5.1 Ağırlık Farkı İle Ölçme

Kullanılan ölçme aletinin hassas olması nedeniyle çok sık kullanılan metottur. Deney numunelerinin her ölçümü için, yerinden çıkarılıp ölçülmesi en büyük dezavantajdır. Ağırlık kaybının ölçülmesi için 10^{-4} veya 10^{-5} hassasiyetindeki teraziler kullanılır. Aşınma miktarı gram veya miligram olarak bulunur.

2.3.5.2 Kalınlık Ölçme Metodu

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değerinin karşılaştırılması ile elde edilir. Kalınlık olarak tespit edilen değer, hacimsel olarak tespit edilip birim hacimdeki aşınma miktarı elde edilir. Kalınlık hassas ölçme aletleri ile $\pm 1\mu\text{m}$ duyarlıkta ölçülebilir.

2.3.5.3 İz Değişiminin Ölçülmesi Metodu

Sürtünme yüzeyi bölgesi geometrisi belirli bir iz, plastik deformasyonla oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun değişimi ölçülür. Uygulamalarda en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme aletleridir.

2.3.5.4 Radyo İzotoplarla Ölçme Metodu

Sürtünmenin yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü α - parçacıkları ile bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınma miktarının yüksek derecede hassasiyetle ölçülmesi ve sistem içerisinde çalışma şartları değiştirmeden ölçü alınabilmesi en büyük avantajıdır (Keleştimur 1989).

3. MATERYAL ve METOD

3.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan östenitik ve martenzitik paslanmaz çeliklerin kimyasal içerikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan çeliklerin kimyasal analizleri.

Element%	C	Ni	Cr	Si	Mn	S	P	Cu	Mo	Nb
304	0,044	8,03	18,26	0,47	1,5	0,0003	0,032	0,38	0,38	0,022
420	0,30	-	12,5	0,75	1	0,03	0,04	-	-	-

Numuneler 5 mm kalınlığında ve 25 mm çapında kesilerek bor kaplama işlemi için 1200 grid’lik zımparalama kademesine kadar zımparalanmış ve sonra parlatılmıştır.

3.2 Paslanmaz Çeliklere Uygulanan Isıl İşlem ve Borlama İşlemi

Ostenitik ve martensitik paslanmaz çeliklerin borlama işlemi fırın ortamında 900°C’ de 5 saat süreyle kutu borlama yöntemiyle, ticari ekabor®-II tozu kullanılarak gerçekleştirildi. Aşınma deneyleri için borlanmış numunelerle karşılaştırma açısından çeliklere mekanik özelliklerini geliştirecek ısıl işlemler uygulandı. AISI 420 martensitik paslanmaz çeliği fırın içerisinde 1030°C’ ye kadar ısıtılıp yaklaşık 10 dk. kadar bekletildi, ardından fırın içerisinden alınarak havada soğutuldu. Numunenin tamamen soğuması gerçekleştiğinden sonra 500°C’ de temperleme işlemi yaklaşık 30 dk. süreyle gerçekleştirildi ve fırın ortamında soğutuldu. AISI 304 östenitik paslanmaz çeliği ise 1030°C’ ye kadar ısıtılıp 10 dk. kadar fırın içerisinde bekletilip ardından havada soğuma işlemi gerçekleştirildi.

3.3 Metalografik İnceleme

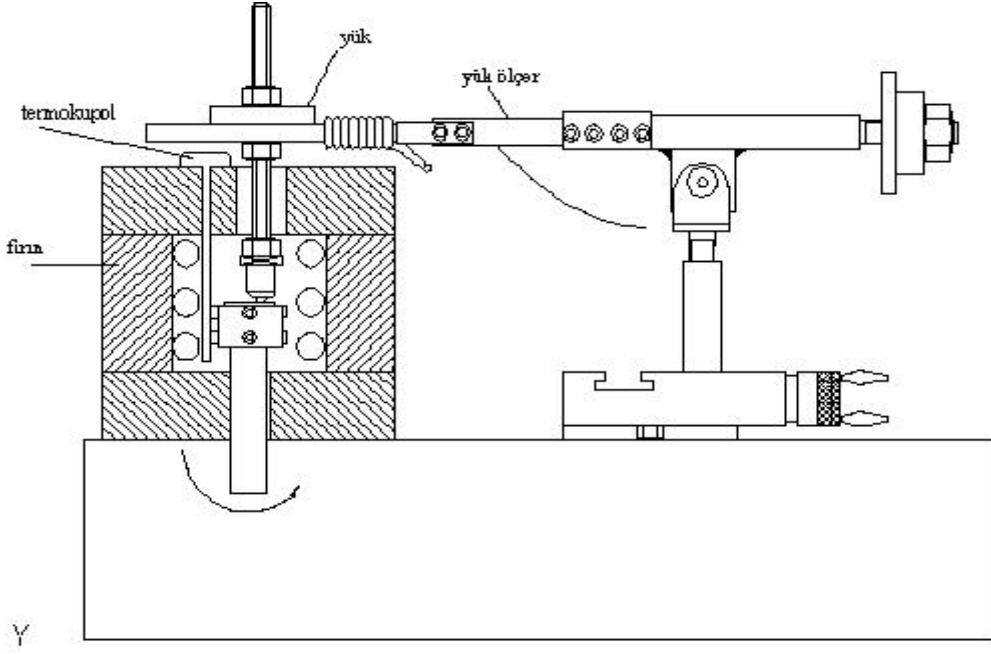
Borlama ve ısıl işleme tabi tutulan numunelerin kesitleri alınarak sırasıyla 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 no lu SiC zımparalardan geçirildikten sonra 1 µm' luk alumina süspansiyonu ile parlatılmıştır. Metalografik olarak parlatılmış numuneler 1 birim HNO₃, 1 birim HCL ve 1 birim su karşımı ile hazırlanan dağlayıcıyla dağlanarak mikro yapılar ortaya çıkarılmıştır. Metalografik olarak hazırlanan numuneler Olympus BX6 marka optik mikroskop ile incelenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir.

3.4 Tabaka Kalınlığı, Mikro Sertlik ve XRD Analizleri

Numunelerin tabaka kalınlıkları ise yine aynı optik mikroskoba takılı optik mikrometre yardımıyla ölçülmüştür. Mikrosertlik ölçümleri 50 gr yük altında ve 15 sn yükleme süresinde Shimadzu HMV-2L marka sertlik ölçme cihazı ile yapılmıştır. Borlanmış ve ısıl işleme uğratılmış numunelerde ve bu numunelerin 300 ve 600°C' deki aşınma deneyleri esnasında meydana gelen yapıları tespit etmek amacıyla, CuK α radyasyon kullanan X-Ray difraktometrede 20–90 derece 2 θ açısı arasında taratılmıştır.

3.5 Aşınma Deneyleri

Borlanmış, ısıl işlem görmüş ostenitik ve martenzitik paslanmaz çeliklerin tribolojik özelliklerini belirlemek için Şekil 3.1'de gösterilen bilye-disk aşınma cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.1 Bilye disk aşınma cihazının şematik gösterimi.

Numuneler oda, 300, 600°C sıcaklıklarda 10 N yük altında ve 0,3 m/s kayma hızında 18000 m aşındırılmıştır. Hazırlanan numuneler 8 mm çapında Al_2O_3 bilyeye karşı kuru sürtünme şartlarında aşındırılmıştır. Aşınma hızı, Perthometer M2 marka pürüzlülük cihazından elde edilen aşınma izleri kullanılarak aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

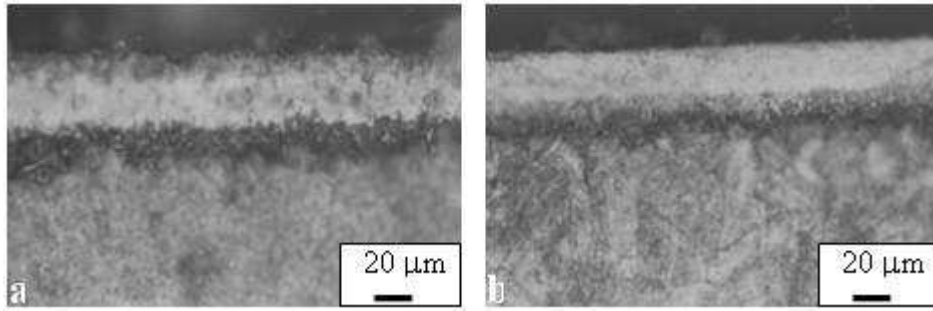
$$\text{Aşınma hızı} = \frac{\text{Aşınan hacim miktarı}}{\text{Uygulanan yük} \times \text{Kayma mesafesi}}, \text{ mm}^3/\text{Nm}$$

Her bir numune için aşınma izinin profili çıkarılmış ve milimetrik kâğıt üzerinden kesit alanları hesaplanmıştır. Kesit alanının aşınma izinin çevre uzunluğu ile çarpılması neticesinde aşınan hacim miktarı belirlenmiştir.

4. BULGULAR

4.1 Metalografik Bulgular

Şekil 4.1’de borlanmış numunelerin kesitten alınmış içyapıları görülmektedir. Her iki çelikte de kaplama tabakasının yaklaşık kalınlığı 45µm’ dur.



Şekil 4.1 Borlama işlemi sonrası a) AISI 420,
b) AISI 304 paslanmaz çeliklerinin mikro yapısı.

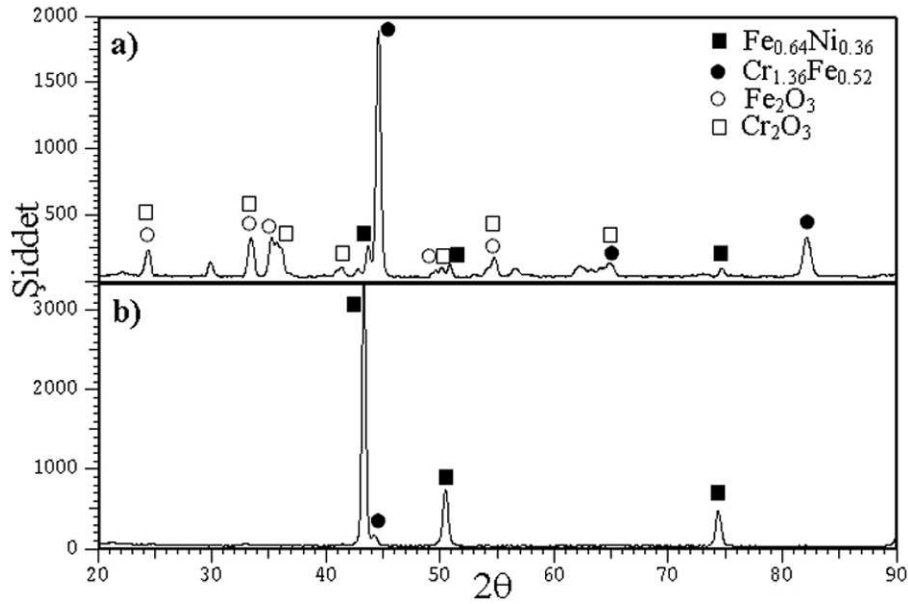
Borlama işlemi sonrası AISI 420 ve AISI 304 paslanmaz çeliklerinin içyapı ve bor tabakalarının birbirlerine benzerlik gösterdikleri görülmektedir.

4.2 XRD Analizi

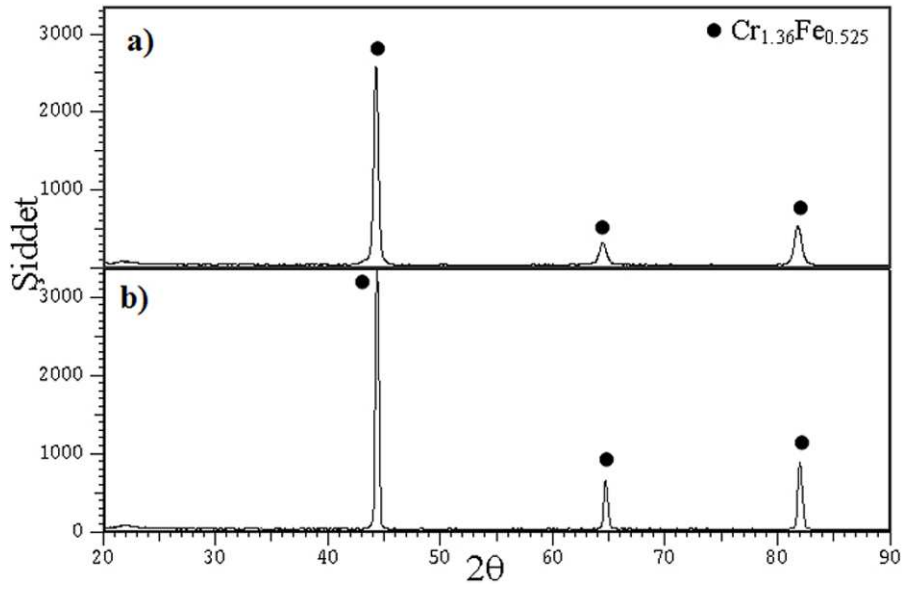
Borlanmış numuneler ile 300 ve 600 °C sıcaklıklarda 1 saat ısıtılma maruz bırakılmış hem borlanmış hem de borlanmamış numuneler X-ışınları cihazında yüzey analizine tabi tutulmuştur. Şekil 4.2 ve 4.3’de borlama işlemi yapılmadan 300 ve 600°C sıcaklıklarında 1 saat ısıtılma maruz bırakılmış numunelerin X-ışınları analizi görülmektedir. Şekil 4.2’ de görüldüğü gibi 300°C’ de 1 saat ısıtılma işleminden sonra 304 paslanmaz çelik üzerinde demir ve krom oksitler görülmüştür. Sıcaklık 600°C’ ye çıktığında sadece Fe-Ni fazı görülmüştür. Şekil 4.3’de 300 ve 600°C sıcaklıklarında 1

saat ısıtılardan sonra 420 paslanmaz çeliğinde hiçbir oksit görülmemekte sadece Fe-Cr fazı görülmektedir.

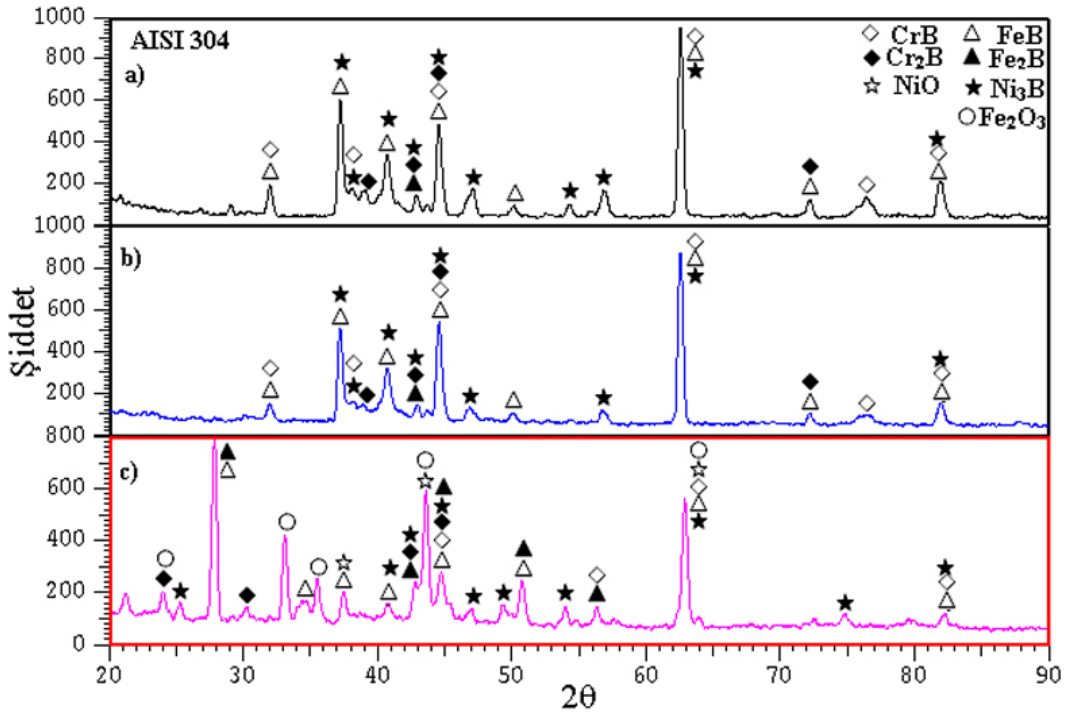
Şekil 4.4 ve 4.5’de AISI 304 ve 420 paslanmaz çeliklerin borlanmış ve 300, 600°C sıcaklıklarında 1 saat ısıtılardan yapıldıktan sonraki faz analizleri görülmektedir. Borlanmış 304 paslanmaz çeliğinin yüzeyinde FeB, Fe₂B, CrB, Cr₂B ve Ni₃B fazları mevcuttur. 300°C’de 1 saat ısıtılardan sonra mevcut fazlarda çok fazla değişiklik görülmemektedir. Fakat FeB, CrB fazlarına ait pik şiddetlerinde hafif azalmalar görülmüştür. 600°C’de 1 saat ısıtılardan sonra borür tabakalarında oksitlenmeler görülmektedir. NiO ve Fe₂O₃ borür tabakasında bulunan oksitlerdir. Bunun yanında Fe₂B fazına ait piklerde artış vardır.



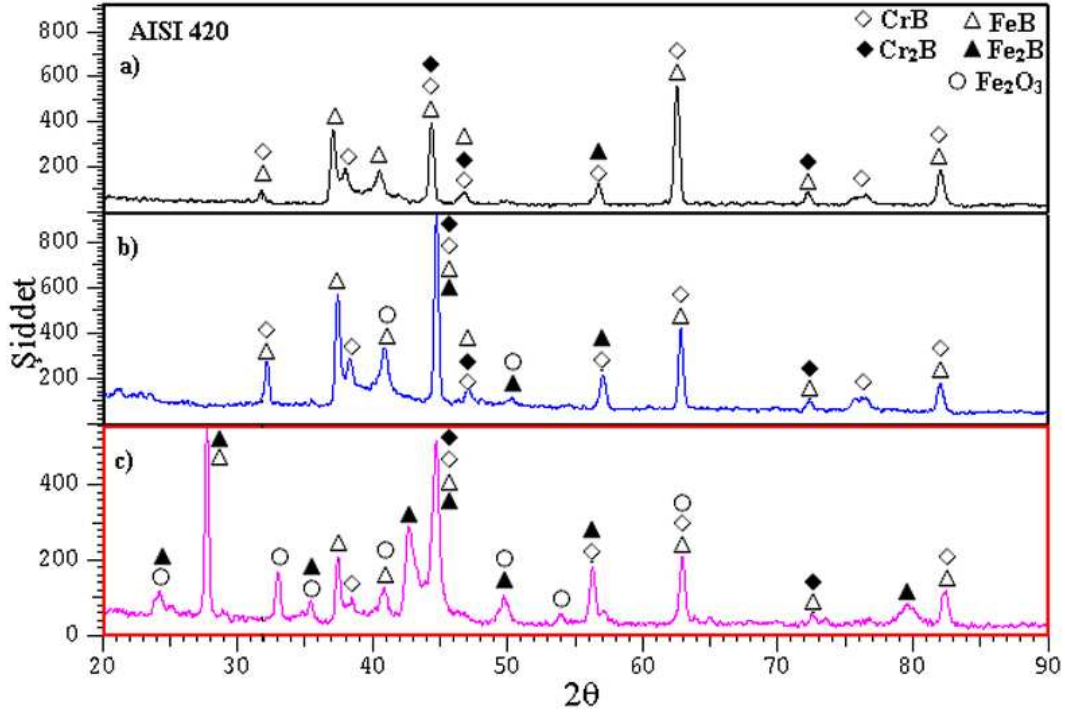
Şekil 4.2 Borlanmamış AISI 304 paslanmaz çeliğinin a) 300, b) 600 °C’lerde 1 saat ısıtılardan sonra yüzeylerinde oluşan fazlar.



Şekil 4.3 Borlanmamış AISI 420 paslanmaz çeliğinin a) 300, b) 600°C’lerde 1 saat ısıtıl işlemden sonra yüzeylerinde oluşan fazlar.



Şekil 4.4 Borlanmış AISI 304 paslanmaz çeliğinin X-ışınları grafikleri a) borlanmış halde, b) 300, c) 600°C’lerde 1 saat ısıtıl işlemden sonra yüzeylerinde oluşan fazlar.



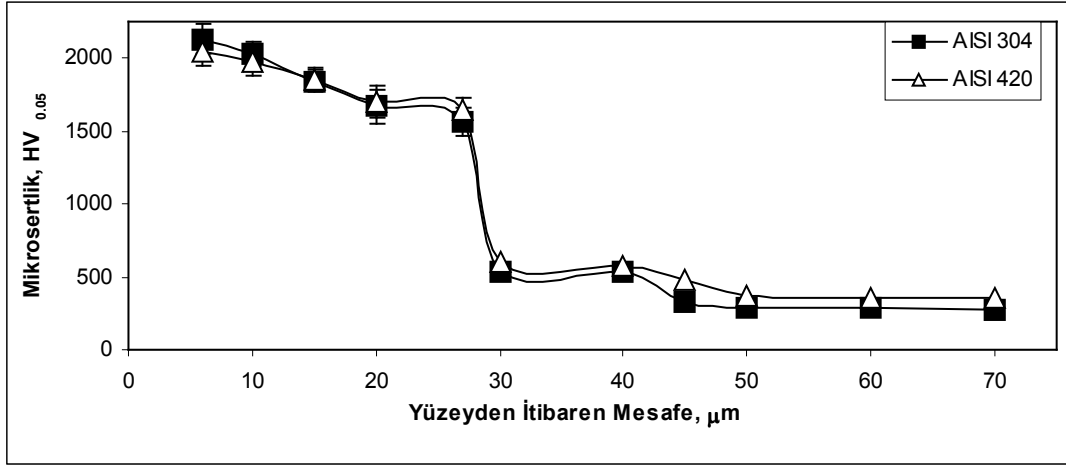
Şekil 4.5 Borlanmış AISI 420 paslanmaz çeliğinin X-ışınları grafikleri a) borlanmış halde, b) 300, c) 600°C’ lerde 1 saat ısıl işlemden sonra yüzeylerinde oluşan fazlar.

Borlanmış 420 paslanmaz çeliğinin yüzeyinde FeB, Fe₂B, CrB ve Cr₂B fazları mevcuttur. 300 °C’de 1 saat ısıl işlemden sonra FeB, CrB fazlarına ait pik şiddetlerinde azalmalar görülürken Fe₂B faz şiddetinde artma görülmektedir. 600°C’ de 1 saat ısıl işlemden sonra borür tabakalarında Fe₂O₃ fazı mevcuttur. Yine Fe₂B fazına ait piklerdeki artış daha da fazlaşmıştır.

4.3 Mikro Sertlik Analizi

Borlama işleminden sonra çalışmada kullanılan paslanmaz çeliklerin mikrosertlik değerleri Şekil 4.6’da görülmektedir. AISI 304 ve 420 çeliklerinin sertlik değerlerinin birbirine yakın olduğu grafikten gözlenmektedir. Yüzeyden itibaren 30µm’ luk mesafeye kadar (yaklaşık kaplama tabakası kalınlığı) sertlik değerleri 1600–2000 HV_{0,05} arasında değişirken, bu mesafeden sonraki sertlik değerlerinin ise keskin bir düşüş

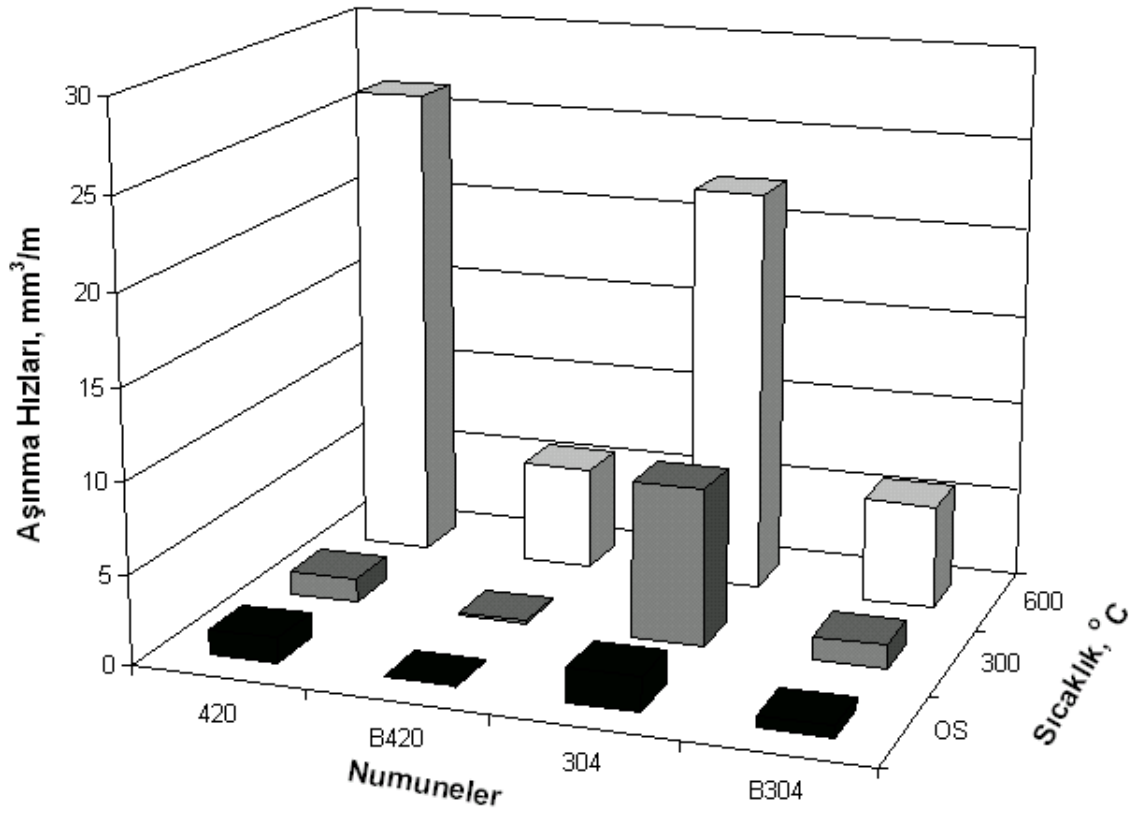
sergilediği görülmektedir. Yüzeyden 35µm mesafeden sonra paslanmaz çeliklerin sertliği esas metal sertliğine düşerek yaklaşık 350–400 HV_{0,05}'de sabit kalmaktadır. Grafikten de görüldüğü gibi paslanmaz elik numunelerin yüzeylerine borlama işleminin uygulanması sertlik değerlerini ana metale göre yaklaşık 4 kat arttırmaktadır.



şekil 4.6 Borlanmış AISI 304 ve AISI 420 eliğinin yüzeyden itibaren mikro sertlik değerleri.

4.4 Martenzitik 420 ve stenitik 304 Paslanmaz eliklerin Yüksek Sıcaklık Tribolojik zellikleri

AISI 304, 420 paslanmaz çeliklerinin deneylerden sonra elde edilmiş veriler neticesinde oluşturulan aşınma hızı grafiği şekil 4.7'de görüldüğü gibidir.

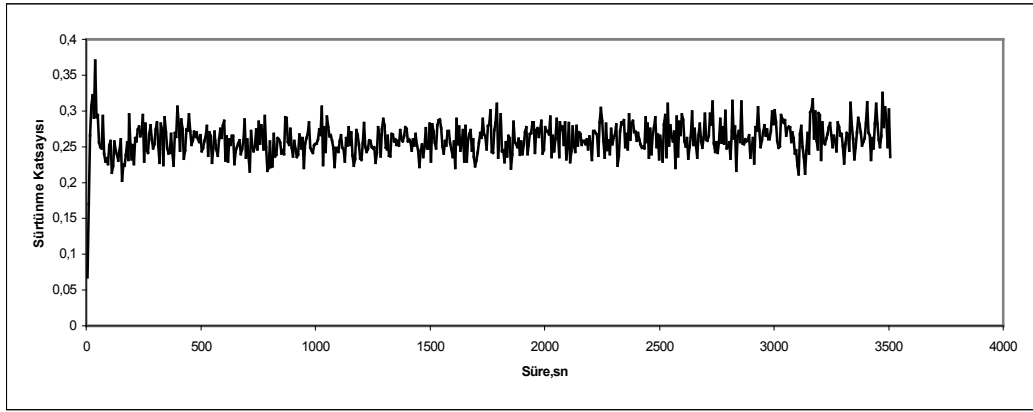


Şekil 4.7 Isıl işleme tabii tutulmuş ve borlanmış numunelerin oda sıcaklığı, 300 ve 600°C sıcaklıklardaki aşınma hızı değerleri.

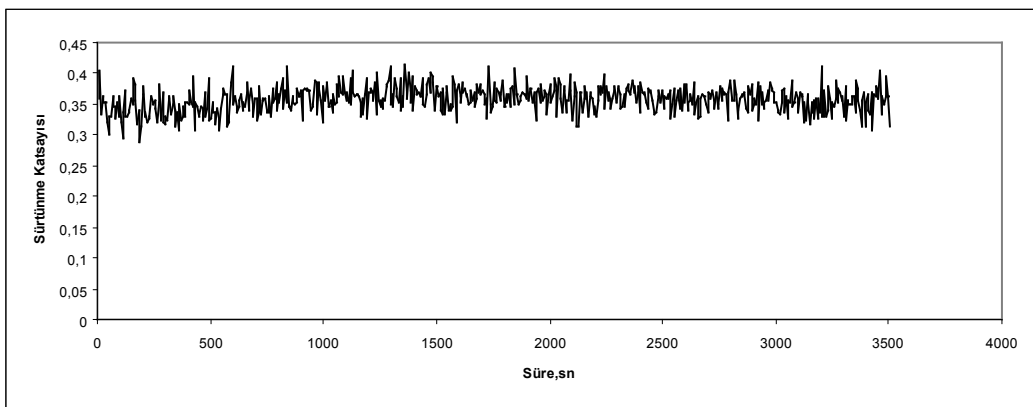
Şekil 4.7'den de görüldüğü gibi her bir numunenin oda sıcaklığında yapılmış aşınma deneyleri sonucu aşınma hızları düşüktür. Bu numuneler içerisinde ise borlanmış olanların ısıl işlemlilere göre daha düşük bir aşınma hızı değerleri sergilediği gözlenmiştir. 300°C'deki aşınma deneylerinde ise oda sıcaklığına göre aşınma hızlarının belirli bir miktar arttığı söylenebilir. Bu artış ısıl işlemlili 304 numunesinde yaklaşık 5 kattır. Oda sıcaklığında olduğu gibi 300°C sıcaklıkta gerçekleştirilen deneylerde de borlanmış numunelerin ısıl işlemlili numunelere göre daha az aşınma hızı değerleri sergilediği görülmektedir. Örneğin; ısıl işlemlili AISI 304 paslanmaz çeliğinin 300°C' deki aşınma hızı değeri, oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneyde elde edilen değere göre yaklaşık 5 kat artış gösterirken, aynı koşullardaki borlanmış AISI 304 paslanmaz çeliği 2 kat artış göstermiştir. Bu da borlama işleminin söz konusu çeliklerin yüzey özelliklerini özellikle aşınmaya karşı davranışlarını fark edilir biçimde değiştirdiğini bize göstermektedir. Aşınma ortamı sıcaklığını 600°C' ye çıkardığımızda

ise her bir numunenin aşınma hızları en üst değerlere ulaşmış ve bu değerlerin diğer ortamlarda elde edilen verilerden de kat kat fazla olduğu gözlenmiştir. Ayrıca borlanmış numunelerin ısıtılmış numunelere göre 600°C ve 300°C’deki aşınma hızlarını karşılaştırdığımızda borlanmış numunelerin daha yüksek artış hızları sergilediği görülmektedir. Buda yüksek sıcaklıklarda bor tabakasının aşınmaya karşı olan direncinin zayıfladığını işaret etmektedir.

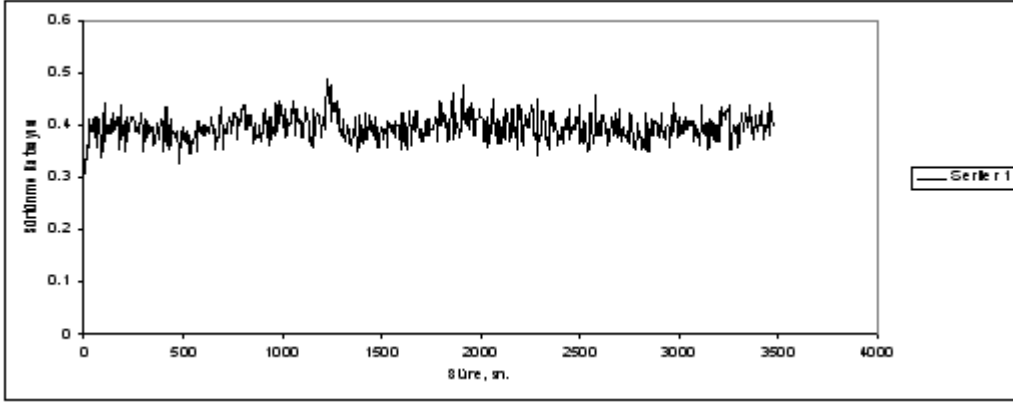
Aşınma deneyleri sonucu numunelerin sürtünme değerleri ise bilgisayar ortamında 650 değere düşürülerek grafikleri Excel programında çizilmiştir. Şekil 4.8–4.11 çeliklerin zamana bağlı sürtünme katsayısı örnek grafiklerini göstermektedir.



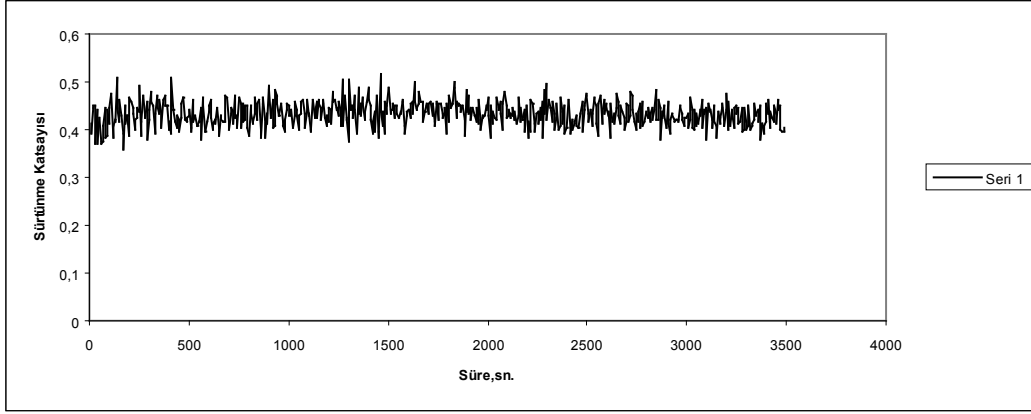
Şekil 4.8 Ostenitik, ısıtılmış AISI 304 paslanmaz çeliğinin oda sıcaklığında sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi.



Şekil 4.9 Martenzitik, ısıtılmış AISI 420 paslanmaz çeliğinin 300°C sıcaklığında sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi.

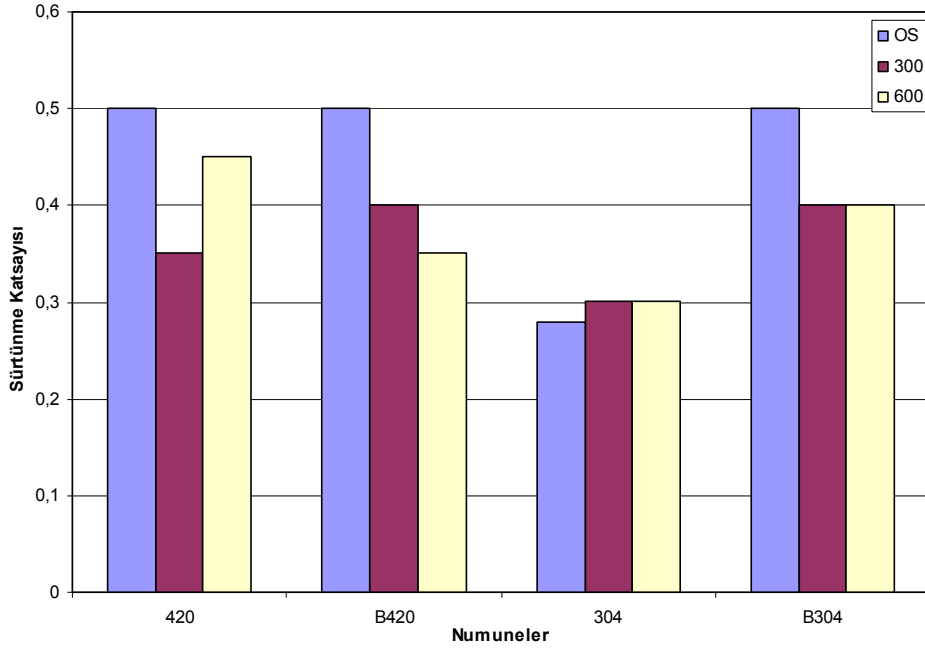


Şekil 4.10 Ostenitik, borlanmış AISI 304 paslanmaz çeliğinin 300°C sıcaklığında sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi.



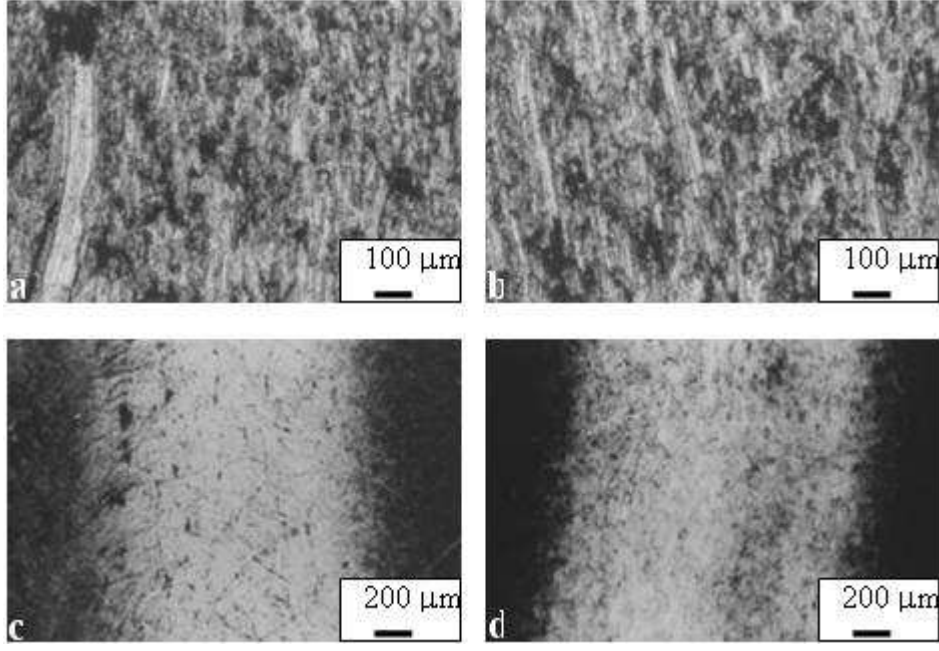
Şekil 4.11 Martenzitik, borlanmış AISI 420 paslanmaz çeliğinin 300°C sıcaklığında sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi.

Şekil 4.12 her bir deney parametresi sonrasında numunelerden elde edilen sürtünme katsayısı değerlerini vermektedir.



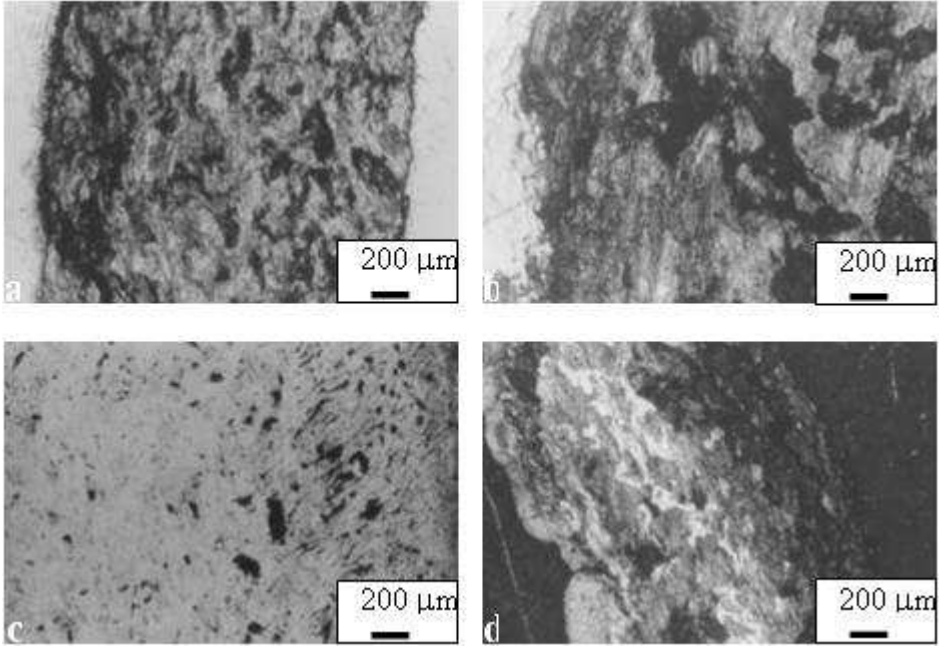
Şekil 4.12 Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucu numunelerin sürtünme katsayısı değerleri.

Östenitik, ısı işlem görmüş AISI 304 paslanmaz çeliğinin, borlanmış AISI 304 paslanmaz çeliğine göre oda sıcaklığındaki sürtünme katsayısının zamana bağlı değişim grafik değerlerinin düşük olduğu görülmektedir. Şekil 4.12’deki grafik incelendiğinde borlanmış her iki çelikte sıcaklığın artması ile sürtünme katsayısı düşmektedir. Borlanmış 304 numunesinin 300 den 600°C’ye sürtünme katsayısı düşüşü çok belirgin değilken borlanmış 420 numunede 300 den 600°C’ye sürtünme katsayısı düşüşü çok daha barizdir. Borlanmış 420 çeliğinin sürtünme katsayısı değerleri bütün sıcaklıklarda borlanmış 304’den daha yüksektir. Bu durum 304’deki nikel elementinin oksijen ile reaksiyonu sonucu oluşan nikeloksit filmlerinin oluşumuna bağlanabilir. Sürtünme katsayısı ile aşınma hızı arasında belirli bir ilişki olduğu bilinmesine rağmen, aşınma esnasındaki, ortam ve aşınma partikülleri gibi dış elementler bu ilişkiyi değiştirebilir. Metallerin tribolojik özelliklerinde diğer bir önemli husus ise numunelerin aşınma sonrası yüzeylerinde oluşan izlerin karakterize edilmesidir. Değişik koşullardaki aşınmalardan sonra yüzeylerdeki izlerin yorumlanması, metal parçaların aşınma davranışları hakkında değişik fikirler edinilmesine yol açabilmektedir. Şekil 4.13–4.15 numunelerin her bir deney parametresinden sonra yüzeylerinde oluşan izlerin optik görüntülerini içermektedir.



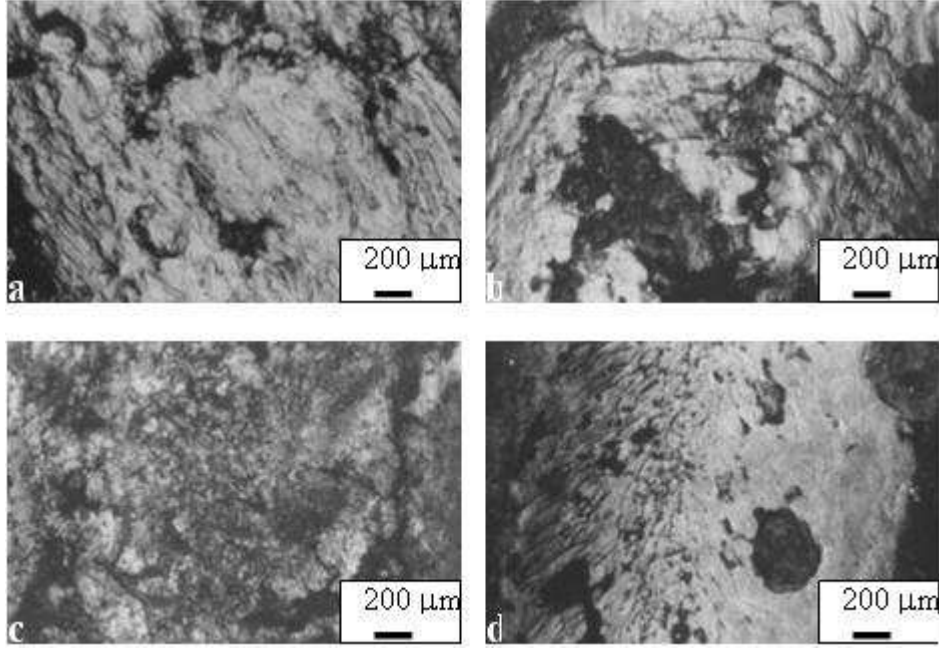
Şekil 4.13 Borlanmış ve Isıl İşleme Uğratılmış Paslanmaz Çeliklerin Oda sıcaklığındaki Aşınma Deneşleri Sonrası Oluşan İzlerin Optik Görüntüleri.

- a) Isıl İşlemlı AISI 420 Çeliği, b) Isıl İşlemlı AISI 304 Çeliği,
c) Borlanmış AISI 420 Çeliği, d) Borlanmış AISI 304 Çeliği.



Şekil 4.14 Borlanmış ve Isıl İşleme Uğratılmış Paslanmaz Çeliklerin 300°C sıcaklığındaki Aşınma Deneşleri Sonrası Oluşan İzlerin Optik Görüntüleri.

- a) Isıl İşlemlı AISI 420 Çeliği, b) Isıl İşlemlı AISI 304 Çeliği,
c) Borlanmış AISI 420 Çeliği, d) Borlanmış AISI 304 Çeliği.



Şekil 4.15 Borlanmış ve Isıl İşleme Uğratılmış Paslanmaz Çeliklerin 600°C sıcaklığındaki Aşınma Deneyleri Sonrası Oluşan İzlerin Optik Görüntüleri.

- a) Isıl İşlemlenmiş AISI 420 Çeliği, b) Isıl İşlemlenmiş AISI 304 Çeliği,
c) Borlanmış AISI 420 Çeliği, d) Borlanmış AISI 304 Çeliği.

Şekil 4.13–4.15’deki görüntülerden görüldüğü gibi kaplanmamış numunelerin oda sıcaklığındaki aşınma deneyleri sonucu yüzeyinde oluşan izlerin yüksek plastik deformasyon sergilediği gözlenmektedir. Bu numunelere göre borlanmış paslanmaz çelik numunelerdeki plastik deformasyonun derecesi daha azdır. Deneyde kullanılan bilyelerde de diğer aşınma rejimlerindeki bilyelere göre daha fazla aşınma gerçekleşmiştir. Bu da kuru sürtünmenin oda sıcaklığında daha fazla meydana geldiğini işaret etmektedir. Oda sıcaklığındaki deneyler sonucu borlanmış numunelerde daha çok adhezif aşınma mekanizması hakimdir ve pürüzsüz parlak bir yüzey görüntüsü görülmektedir.

Şekil 4.14’de sıcaklığın artmasıyla optik fotoğraftan ve XRD analizi sonucundan da görüldüğü gibi numune yüzeyinde oksit tabakaları meydana gelmiştir. İzlerin plastik deformasyon davranışı girintili çıkıntılı tarzdadır. Borlanmış 420 çeliğinin plastik deformasyon derecesi 304 çeliğine göre daha düşüktür. Genel olarak borlanmış numunelerdeki plastik deformasyon kaplanmamış numunelere göre daha azdır. Şekil

4.14’de sıcaklığın etkisiyle numune yüzeylerinde oluşan oksit tabakalarının bir miktar kırıldığı ve bu parçaların yine sıcaklığın etkisiyle numune yüzeyine yapıştığı gözlenmektedir. 300°C’ de gerçekleştirilen deneyler sonucu numune yüzeylerinde abrazyonun daha yoğun olduğu kanaatine varılmıştır.

Deney sıcaklığı 600°C’ ye çıktığında ise incelenen çeliklerde yüksek derecede plastik deformasyon gözlenmektedir. Deney esnasında kullanılan bilyeler üzerinde kayda değer bir aşınma fark edilmemiş fakat numuneden ayrılan parçaların sıcaklığın etkisiyle bilyeye yapıştığı gözlenmiştir. Borlanmış tabakaların 600°C’ de aşındırılması sonucu diğer sıcaklıklardaki deneylere göre daha fazla plastik deformasyon davranışı sergilediği dikkat çekmektedir. Şekil 4.15’den de görüldüğü üzere hem kaplanmış hem de kaplanmamış numune yüzeylerinde adhezyon ve abrazyon davranışlarının her ikisi de gözlenmektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada ostenitik AISI 304 ve martenzitik AISI 420 paslanmaz çeliklerine ısıtılma işlemi ve borlama işlemi başarıyla uygulanmıştır. Her bir çelik oda sıcaklığında, 300 ve 600°C sıcaklıklarda aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Çeliklerdeki aşınma hızı ve sürtünme katsayısı sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklığın artmasıyla aşınma hızının arttığı, fakat sürtünme katsayısının azaldığı, sürtünme katsayısının zamana bağlı değişim grafiklerinde görülmektedir. Borlanmış AISI 304 ve AISI 420 paslanmaz çeliklerinin ısıtılma işlemi uğramış AISI 304 ve AISI 420 paslanmaz çeliklere göre sürtünme katsayısı daha yüksek ve aşınmanın da az olduğu görülmüştür. Sıcaklığın artmasıyla borlanmış AISI 304 ve AISI 420 numunelerinde sürtünme katsayısı değerlerinin düştüğü görülmekte ve bu durum özellikle 600°C AISI 420 numunelerinde daha açık fark edilmektedir.

Bu çalışmada oda sıcaklığında borlanmış metallerin elde edilmiş sürtünme katsayı değerleri literatürle uyumludur (Eyre 1975). Sürtünme katsayısının düşüşü genelde aşınma hızını da düşürür fakat bazı durumlarda, genelde metallere göre seramiklerde aşınma hızı düşük olmasına rağmen sürtünme katsayısı yüksektir. Sürtünme katsayısı, temas alanının ve ara yüzey kesme mukavemetinin düşük olması durumunda düşük olur. Oda sıcaklığında borlanmış metallerin borlanmamış metale göre aşınma hızının düşük, sürtünme katsayısının yüksek olmasının nedeni ara yüzey kesme mukavemetinin yüksek olmasıdır. Sıcaklığın artmasıyla borür tabakalarında oksit filmler oluşmakta bu filmlerde ara yüzey kesme mukavemetini azaltmaktadır bu da sürtünme katsayısını düşürmektedir (Taktak 2006)

Mikro sertlik grafiğinde AISI 304 ve 420 çeliklerinin sertlik değerlerinin birbirine yakın olduğu grafikten gözlenmektedir. Yüzeyden itibaren 30µm'luk mesafeye kadar (yaklaşık kaplama tabakası kalınlığı) sertlik değerleri 1600–2000 HV_{0,05} arasında değişirken, bu mesafeden sonraki sertlik değerlerinin ise keskin bir düşüş sergilediği görülmektedir. Yüzeyden 35µm mesafeden sonra paslanmaz çeliklerin sertliği esas metal sertliğine düşerek yaklaşık 350–400 HV_{0,05}'de sabit kalmaktadır. Bu alanda

yapılan çoğu çalışmaların mikrosertlik değerleri için yapılan yorumlar yaptığımız çalışmayla paralellik taşımaktadır (Ulu vd. 2004).

Yüksek sıcaklıklarda borlanmış çeliklerin aşınma bölgeleri oksit içermektedir. Aşınma esnasında oluşan oksitler kırılarak sıcaklığın etkisiyle birleşmekte ve aşınma yüzeyine tekrar yapışmaktadır. Aşınma esnasında bu olay tekrarlanmaktadır. Borür tabakasındaki FeB ve Fe₂B sırasıyla 300 ve 400°C' de oksitlenmeye başlamaktadır (Corbucicchio vd. 1989).

Oda sıcaklığındaki deneyler sonucu borlanmış numunelerde daha çok adhezif aşınma mekanizması hakimdir. Sıcaklığın artmasıyla optik fotoğraftan ve XRD analizi sonucundan da görüldüğü gibi numune yüzeyinde oksit tabakaları meydana gelmiştir. Hem bor kaplanmış hem de kaplanmamış numune yüzeylerinde 600°C' de adhezif ve abrazif aşınma davranışlarının her ikisi de gözlenmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Askeland, D.R., 2002, Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri cilt 1 Çeviri:Dr. E. Mehmet.
- Anonim, 2001, “Bor Dosyası”, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni, Cilt1-2,ss. 6-25.
- Alwart, S. and Ulrich, C. P. , 1998, “Abrazife Resistant Hard Steel Surface Produced by Boriding”, Industrial Heating, October, pp. 47 - 50.
- Alphonsa, I., Chainani, A., Raole , P.M., Ganguli B., John, P.I., 2002, “A study of martensitic stainless steel AISI 420 modified using plasma nitriding.”, Institute for Plasma Research, Bhat, Gandhinagar”, 382 428 Gujarat, India, Surface and Coatings Technology 150 (2002) 263–268.
- Bayça,S.U., Şahin, Salim, 2004, Mühendis ve Makine, Mayıs, Sayı 532.
- Bozkurt, N., 1984, “Bor Yayınımlıyla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme” İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Boz, M., Kurt, A., 2006, “Malzemelerin Sürtünme ve Aşınma Özellikleri” Teknoloji, Cilt 9, Sayı 2, 79-90.
- Corbucicchio, M., Reverberi,R., Palobarini,G. Sambogna,G., 1989. “On The Early Stages Of Oxidation Of Iron Borides”, Hyp. Interact., 46 (1989), 473-479.
- Çiğdemoğlu, M., 1972, Makine Mühendisleri Odası Yayın No : 73 Metal Alaşımlarının Isıl İşlemleri, Sayfa 61-89.

- Er, Ü., Par, B., 2004, “Bor Yayınımıyla Yüzeyi Sertleştirilmiş AISI 1030 ve AISI 1050 Çeliklerinin Abrazif Aşınma Dayanımlarının İncelenmesi” Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi C.XVII, S.1
- Eyre,T.S.,1975, “Effect of Boronizing On Friction And Wear Of Ferrous Metal, Wear, 34(1975),383-397.
- Fichtl,W.,Trausner, N., Matuschka,a.G.von,1987, “Boronizing with Ekobar”, Elektroschmelzwerk Kempten GmbH.
- Hunger, H.J.and Trute, G. 1994, “Boronizing to Produce Wear - Resistant Surface Layers”, Heat Treatment of Metals, Vol.2, pp. 31-39.
- Hutchings, I.M., 1992, “Tribology: Friction and wear of Engineering Materials”, Edward Arnold, London.
- Kayalı, E.S., Prof.Dr., Eruslu, N., Prof.Dr., Ürgen, M., Prof.Dr., Taptık, Y., Prof.Dr., Çimenoğlu,H., Prof.Dr.,1997, Hasar Analizi Seminer Notları 07-11 Nisan, İstanbul.
- Keleştimur, M.H., 1989, Makine Yapı Çeliklerinde Abrasif Aşınma Direncine Yüzey Sertliğine Etkisi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Karasan, M., Alsaran, A. ve Çelik, A., 2002, “Plazma Borlama”, Mühendis ve Makine, Cilt43, Sayı 512,ss. 51-54.
- Karakan, M.,, Alsaran, A.,Çelik, A., 2002, Mühendis ve Makine, Eylül, Sayı 512.
- Karaman, Y., 2003, “Endüstriyel Borlama ve Tekstil Endüstrisinde bir uygulama”, Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,121s.

- Moore, D.F., 1975, “ Principles and Applications of Tribology”, Pergamon Press., Oxford.
- Matuschka, A. G. V. , 1980, “Boronzing”, München, Wien: Hanser, 100s.
- Odabaş, C., 2002, Paslanmaz Çelikler, Temel Özellikleri, Kullanım alanları, Kaynak Yöntemleri, 1. Baskı Askaynak, Eczacıbaşı.
- Özsoy, A., 1991, “Çeliğin borlanması borür tabakası, geçiş zonu ve ana matrisin özelliklerinin iyileştirilmesi”, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir.
- Postacıoğlu, B., 1981, Profesör Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri cilt 1 İç Yapı ve Mekanik Özellikler İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Sun, Y., Çimenoglu, H., 2006, “Krom-Nikelli Çeliklerin Aşınma Davranışları”, İtü Dergisi/d Mühendislik Cilt:5, Şubat Sayı:1, Kısım:1, 145-149
- Sinha, A.K., 1991, “Boriding (Boronising)”, ASM Handbook, Vol.4, J. Heat Treating, pp.437-447
- Şen, U., 1997, “Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Bor Kaplanması ve Kaplama Özellikleri”, Doktora Tezi İ.T.Ü., Fen Bil.Ens., İstanbul
- Taktak, Ş., 2006 , Tribological properties of borided bearing steels at elevated temperatures, Surface and Coating Technology, Vol ,201 , S. 2230-2239.
- Tsipas, d.N., Rus,J., 1987, ”Boronizing of Alloy Steels”, Journal of Materials Science Letters, Vol.6,pp.118-120.
- Ulukan,L., 1993, “Makina Elemanları III”, Ders Notu, İstanbul.

Ulu,S., Aytekin, H., Taktak, Ş., 2004, "Borlanmış ve Karbürleşmiş AISI 8620 Çeliklerinin Abrasif Aşınma Davranışı", 10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi, 14-16.04.2004, Denizli.

Yalçın, H., Prof. Dr. ,Gürü, M., Doç. Dr., 2002, "Malzeme Bilgisi", Ankara.

Yıldızlı, K., Odabaş D., NAİR F., 2003, "Borlanmış AISI 1020 Çeliğinin Erozyon Aşınma Davranışının İncelenmesi" Makine Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, 38039 , BAÜ Fen Bil. Enst. Derg. (2003) . 5.1, Kayseri.

7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	Murat GÜRKAN
Doğum Yeri	İstanbul
Doğum Tarihi	19.06.1977
Medeni Hali	Evli
Yabancı Dili	İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise	Uşak Merkez Endüstri Meslek Lisesi 1995
Lisans	Afyon Kocatepe Üniversitesi 2000
Yüksek Lisans	Afyon Kocatepe Üniversitesi --

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl aralığı

Milli Eğitim Bakanlığı	2000 --
(Metal İşleri Öğretmenliği)	