

**BORLANMIŞ DİŞLİ ÇELİKLERİNİN AŞINMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alper DALAR

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. İbrahim GÜNEŞ

Bu tez çalışması 12.FEN.BİL.19 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BORLANMIŞ DIŞLI ÇELİKLERİNİN AŞINMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ALPER DALAR

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. İbrahim GÜNEŞ

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

NİSAN 2013

TEZ ONAY SAYFASI

Alper DALAR tarafından hazırlanan “Borlanmış Dişli Çeliklerinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca/...../..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi **Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. İbrahim GÜNEŞ İmza

Başkan : Prof. Dr. Şükrü TAKTAK İmza
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,

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

Üye : Yrd. Doç. Dr. İsmail UCUN İmza
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi,

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

.....
Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

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

beyan ederim.

18.03.2013

Alper DALAR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BORLANMIŞ DIŞLİ ÇELİKLERİNİN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Alper DALAR

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metal Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. İbrahim GÜNEŞ

Bu çalışmada GS 18NiMoCr36, GS 22NiMoCr56 ve GS 32NiCrMo6.4 dişli çelikleri 950°C'de 2 ve 6 saat süreyle EKabor-II bor tozuyla borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarda çelikler yüzeyinde oluşan borür tabakalarının morfolojisi optik mikroskop ile incelenmiş, sertlikleri mikro-sertlik cihazıyla ölçülmüş ve XRD yöntemiyle tabakada oluşan fazlar belirlenmiştir. Aşınma deneyleri, kuru ortamda 10 N yük altında, 0.2, 0.3 ve 0.4 m/s kayma hızlarında ve oda sıcaklığında bilye-disk aşınma yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Çeliklerin yüzey pürüzlülükleri ve aşınma hacimleri Taylor-Hobson Rugosimeter cihazı yardımıyla hesaplanmıştır.

XRD analizleri sonucunda borür tabakalarında FeB, Fe₂B, CrB Cr₂B fazlarının bulunduğu tespit edilmiştir. Her üç çelikte borlama işlemi sonucunda, borlama süresinin artmasıyla borür tabaka kalınlıklarında artışlar gözlenmiştir. Ayrıca elde edilen borür tabakası kalınlığının çeliklerin kimyasal bileşimine göre değiştiği görülmüştür. Borlama işleminin çeliklerin yüzey sertliğini yaklaşık 5 kat arttırmıştır. Aşınma deneyleri sonucunda dişli çeliklerinin aşınma hızlarının, borlama süresinin artmasıyla azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca kayma hızının artmasıyla birlikte aşınma oranlarında düşüşler gözlenmiştir.

2013, xiii + 72 sayfa

Anahtar kelimeler: Dişli Çelikler, Borlama, Mikrosertlik, Kayma hızı, Aşınma.

ABSTRACT

Msc. Thesis

INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOR OF BORIDED GEAR STEELS

Alper DALAR

Afyon Kocatepe University

Institute for the Natural and Applied Sciences

Metal Education Department

Supervisor: Asst. Prof. İbrahim GÜNEŞ

In this study, GS 18NiMoCr36, GS 22NiMoCr56 and GS 32NiCrMo6.4 gear steels were subjected to boronizing at 950°C for 2 and 6 hours with EKabor-II boron powder. As a result of the experiments, the surface morphology of the boride layers formed on the steels was investigated by optical microscopy, their hardness values were measured by the micro-hardness device and the phases formed on the layer were determined by XRD technique. Wear tests were performed on a ball-disk wear instrument at 0.2, 0.3 and 0.4 m/s sliding speeds and load of 10 N, under dry conditions and at room temperature. The surface roughness and wear volumes of the steels were calculated using Taylor-Hobson Rugosimeter device.

As a result of XRD analysis, it was detected that FeB, Fe₂B, CrB and Cr₂B phases were formed on the boride layers. As a result of the boronizing process performed on the steels, it was observed that boride layer thickness increased with the increase in the boriding time. In addition, it was detected that the boride layer thickness varied according to the chemical composition of the steels. Boriding process increased the surface hardness of the steels approximately 5-fold. As a result of wear tests, the wear rates of the gear steels were observed to decrease with an increase in the boriding time. In addition, a decrease was observed in wear rates with the increase in the sliding speed.

2013, xiii + 72 pages

Keywords: Gear steels, Boriding, Microhardness, Sliding speed, Wear.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel alışmaların ynlendirilmesi, sonuların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolay tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. İbrahim GÜNEŞ'e teşekkür ediyorum.

Bu zamana kadar maddi, manevi desteğini hiçbir zaman üzerimden esirgemeyen annem Zeynep DALAR, babam Hacı DALAR ve tüm aileme teşekkür ediyorum.

Alper DALAR
AFYONKARAHİSAR, 2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
RESİMLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. BORLAMA HAKKINDA GENEL BİLGİLER	4
2.1 Bir Yüzey İşlemi Olarak Borlama	4
2.2 Borlama Yöntemleri.....	4
2.2.1 Kutu Borlama.....	4
2.2.2 Sıvı Borlama	8
2.2.3 Gaz Borlama	11
2.2.4 Pasta Borlama	12
2.2.5 Plazma Borlama	14
2.2.6 Plazma Pasta Borlama	16
2.3 Borür Tabakasının Özellikleri	17
2.4 Fe-B İkili Denge Diyagramı	19
2.5 Borlama İşleminin Avantaj ve Dezavantajları.....	20
2.6 Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulama Alanları.....	24
3. BORLANMIŞ ÇELİKLERİN AŞINMA VE SÜRTÜNME DAVRANIŞI	26
3.1 Aşınma.....	26
3.1.1 Adhezif (Yapışma) Aşınması.....	26
3.1.2 Abrazif Aşınma	29
3.1.3 Yorulma ve Delaminasyon Aşınması.....	32
3.1.4 Oksidasyon Aşınması	33
4. MATERYAL VE METOD	34
4.1 Deneyleerde Kullanılan Malzemeler	34
4.2 Deneyleerde Kullanılan Cihazlar.....	34

4.3 Borlama İşlemi.....	37
4.4 Metalografik İşlemler.....	37
4.5 Borür Tabaka Kalınlıkları.....	38
4.6 Mikro Sertlik Ölçümleri.....	38
4.7 X-Işınları Difraksiyon Analizi.....	38
4.8 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elementer Dağılım Analizi (EDX).....	38
4.9 Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri.....	38
4.10 Aşınma Deneyleleri.....	39
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	41
5.1 Borlanmış Dişli Çeliklerinin Yüzey Karakterizasyonu.....	41
5.2 Borlanması Sonucunda Elde Edilen Borür Tabaka Kalınlıkları.....	44
5.3 Borlanmış Dişli Çeliklerinin X-Işınları Difraksiyon Analizi.....	45
5.4 Borlanmış Dişli Çeliklerinin EDX Analiz Sonuçları.....	48
5.5 Borlanmış Dişli Çeliklerinin Mikrosertlik Sonuçları.....	49
5.6 Borlanmış Dişli Çeliklerinin Aşınma Özellikleri.....	51
5.6.1 Borür Tabakalarının Yüzey Pürüzlülüğü.....	51
5.6.2 Borür Tabakalarının Sürtünme Katsayısı.....	52
5.6.3 Borür Tabakalarının Aşınma Oranı.....	54
5.6.4 Borlanmış GS 18 Dişli Çeliğinin Aşınma Bölgelerindeki SEM Mikroyapıları.....	55
5.6.5 Borlanmış GS 22 Dişli Çeliğinin Aşınma Bölgelerindeki SEM Mikroyapıları.....	57
5.6.6 Borlanmış GS 32 Dişli Çeliğinin Aşınma Bölgelerindeki SEM Mikroyapıları.....	60
6. SONUÇLAR.....	62
7. KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ.....	72

SİMGELER DİZİNİ

1. Simgeler

CrB	: Krom bor
SiC	: Silisyum karbür
B ₄ C	: Bor karbür
Na ₂ B ₄ O ₇	: Susuz boraks
FeB	: Demir bor
Fe ₂ B	: Demir (II) bor
NaBF	: Sodyum bor florür
NaF	: Sodyum florür
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
Na ₂ CO ₃	: Sodyum karbonat
KBF ₄	: Potasyum bor florür
Fe ₂ O ₃	: Demir (II) Oksit
BCl ₃	: Bor klorür
BF ₃	: Bor florür

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Katı borlama işleminin şematik görünümü	5
Şekil 2.2 Borlanmış AISI 8620 çeliğinde oluşan bor tabakası.....	9
Şekil 2.3 Gaz Borlama Ünitesi	12
Şekil 2.3 Fe-B ikili denge diyagramı	20
Şekil 3.1 Adhezif aşınmanın temel mekanizması.....	27
Şekil 5.1 950°C’de 2 saat süreyle borlanmış dişli çeliklerinin optik mikroskop kesit mikro yapıları, a) GS18, b) GS 22, c) GS 32.....	42
Şekil 5.2 950°C’de 6 saat süreyle borlanmış dişli çeliklerinin optik mikroskop kesit mikro yapıları, a) GS18, b) GS 22, c) GS 32.....	43
Şekil 5.8 Farklı sürelerde borlanmış dişli çeliklerinin, farklı kayma hızlarına göre aşınma oranlarının değişimi	54
Şekil 5.9 Borlanmış GS 18 dişli çeliğinin, farklı kayma hızlarına göre SEM aşınma mikro yapıları	56
Şekil 5.10 Borlanmış GS 22 dişli çeliğinin, farklı kayma hızlarına göre SEM aşınma mikro yapıları	57
Şekil 5.11 Şekil 5.10a ve 5.10d’deki A ve B noktalarından elde edilen EDX analizleri.....	59
Şekil 5.12 Borlanmış GS 32 dişli çeliğinin, farklı kayma hızlarına göre SEM aşınma mikro yapıları	60

RESİMLER DİZİNİ

Resim 4.1 Isıl işlem fırını.....	34
Resim 4.2 Metalografik numune zımparalama ve parlatma cihazı	35
Resim 4.3 Optik mikroskop.	35
Resim 4.4 Mikrosertlik.	35
Resim 4.5 X-Işınları Difraksiyon Analiz Cihazı (XRD)	36
Resim 4.6 Taramalı elektron mikroskobu (SEM).	36
Resim 4.8 Aşınma deney programı	40

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Fe ₂ B ve FeB fazlarının tipik özellikleri.....	18
Çizelge 2.2 Farklı malzemelerdeki bor tabakalarının sertlikleri ve erime noktaları	21
Çizelge 2.3 Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması.....	22
Çizelge 2.4 Borlamanın uygulama alanları.....	25
Çizelge 4.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan dişli çeliklerinin kimyasal bileşimi.	34
Çizelge 4.2 Tezde gerçekleştirilen deney parametreleri.....	37
Çizelge 5.1 Borlanmış dişli çeliklerinin 10 N yük altında farklı kayma hızlarına göre sürtünme katsayılarının değişimi.....	53

1. GİRİŞ

Termo-kimyasal bir kaplama yöntemi olan borlama işlemi son 40 yıldır birçok araştırmacı tarafından çalışılmaktadır. Borlama termo-kimyasal bir difüzyon işlemi olup borun yüksek sıcaklıkta çeliğe yayınıdır. Borlama işlemi genellikle, 700-1100°C sıcaklık aralığında, 1-12 saat sürelerde katı, sıvı, gaz, pasta, plazma ve plazma pasta borlama ortamlarında gerçekleştirilmektedir. Borlama bütün çeliklere uygulanabildiği gibi demir dışı metal ve alaşımlarına da uygulanabilmektedir (Özbek *et al.* 2002, Gunes *et al.* 2011, Ulker *et al.* 2011). Katı borlama genellikle patentlerle korunan yaklaşık %5 B₄C, %5 KBF₄ ve %90 SiC içeren karışımlar ve ticari Ekabor tozları ile yapılmaktadır. Bu yöntemde toz karışım sızdırmaz paslanmaz çelik bir kutuya doldurulur ve içine numune yerleştirilir. Kutu gerekli sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu sıcaklıkta gerektiği kadar tutulur ve soğutulur (Özbek ve Bindal 2002). 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 (triethyl boran) ve BF₃ gibi bor kaynakları ile H₂ ile Ar gazları kullanılmaktadır (Yoon *et al.* 1999, Pertek *et al.* 2002, Gunes *et al.* 2011). Katı borlama işleminde kullanılan ticari ekabor tozlarının pahalı olmasına rağmen işlem sonrası ek bir yüzey temizleme masrafı içermemesinden dolayı günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Başka bir deyişle yapışma tam olmadığından numune yüzeyi kolaylıkla temizlenmektedir. Sıvı borlamada yönteminde erimiş tuz tabakası numune yüzeyine yapışmaktadır. Sıvı borlama işlem sonrasında numune yüzeyindeki artıkların temizlenmesi için ek bir masraf ve zaman gerekmektedir. Gaz borlamada gaz kaynağı olarak B₂H₆ ve BCl₃ gazları kimyasal olarak kararsız ve zehirleyici özelliğe sahip olmalarından dolayı problemlidirler (Nam *et al.* 2005). Pasta borlama, kutu borlamanın zor ve daha pahalı olduğu veya fazla zaman aldığı durumlarda kullanılır. % 45 B₄C ve % 55 kriyolit veya geleneksel borlama toz karışımı B₄C+SiC+KBF₄ iyi bir bağlayıcı ajan ile karıştırılarak hazırlanan pasta fırça veya spreysel yardımcıyla malzemenin tüm yüzeyine veya istenen bölümüne uygulanır. İşlem, argon, NH₃ veya N₂ gibi koruyucu bir atmosfer altında gerçekleştirilmektedir. Büyük parçaların ve seçilmiş alanların borlanması için oldukça ilgi çeken bir yöntemdir (Sinha 1991, Özbek 2000, Uluköy 2005). Plazma borlama Ar, H₂ gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl₃, B₂H₆, BF₃ veya B(OCH₃)₃ (trimetilborat)

kullanarak, 800-1000°C sıcaklıkta, yaklaşık 10^{-2} Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan borlamadır. Fakat bor klorür gazları plazma destekli borlama işlemlerinde vakum haznesini korozyona da uğratabilmektedirler (Küper *et al.* 2000, Nam *et al.* 2005).

Yüksek sıcaklıkta yapılan borlama işlemi ile demir yüzeyine bor yayılması gerçekleşir. Bu yayılma işlemi ile tek fazlı Fe₂B veya iki fazlı Fe₂B+ FeB den oluşan ferrobor tabakası elde edilir. Tek faz Fe₂B oluşumu, iki faz Fe₂B+ FeB nin oluşumundan daha fazla istenir. Çünkü borca zengin FeB fazının kırılabilirliği yüksektir; bu yüzden FeB fazının oluşması istenmez. FeB nin ısıl genişleme katsayısı ($23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), Fe₂B nin genişleme katsayısından ($7,85 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) büyüktür. İki fazlı sistemde oluşan Fe₂B ve FeB fazları arasındaki ısıl genişleme farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlaklar oluşur. Bu çatlakları önlemek FeB fazını azaltmak veya FeB fazının oluşmasını önlemek ile mümkündür (Jain and Sundararajan 2002). Borlamanın diğer yüzey sertleştirme işlemlerine üstünlüğü, yüzey tabakasının çok sert olmasının yanında yüksek aşınma, korozyon ve yüksek sıcaklıkta oksidasyon direncine sahip olmasıdır (Bindal 1991). Borlama işleminin en önemli karakteristik özelliği elde edilen borür tabakasının çok yüksek sertlik (1400-3000 HV), aşınma direnci, ergime sıcaklığı ve sürtünme katsayısına sahip olmasıdır (Sinha 1991).

Teknolojide birçok çelik grubu çok değişik amaçlar için kullanılmaktadır. Makine dişlilerinde, kam millerinde, şaftlarda, tanklarda, silahlarda, tarım makinelerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Rodriguez *et al.* 1999, Tabur *et al.* 2009). Bunun yanında, dişli çeliklerinde temas, genelde yüzeyde olduğundan ve yorulma ve aşınma hasarları yüzeyde başladığından dolayı dişli çeliklerinin yüzey özelliklerinin bu hasar oluşumlarını engelleyici nitelikte olması önem arz etmektedir. Genel olarak çeliklerin performansı, kütle ve yüzey özelliklerine bağlıdır. Yüzeydeki her hangi bir değişim malzeme özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Malzemelerin çevre ile etkileşimi doğrudan malzemenin yüzeyi ile gerçekleştiği için malzemenin yüzey özellikleri üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu çalışmaların başında malzemelerin yüzeyinde oluşturulan kaplamalar gelmektedir (Hocking *et al.* 1989, Gunes and Taktak 2012). Yüzey işlemlerini kaplama ve yüzey dönüşüm işlemleri olarak ikiye ayırmak

mümkündür. Kaplama, metal yüzeyine bir element veya bileşimin biriktirilerek bir tabaka oluşturulması işlemini kapsamaktadır. Yüzey dönüşüm işlemlerinde ise, yüzeyin içyapısı ve/veya bileşiminin değişmesi söz konusudur (Ögel 1993).

Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen ve termokimyasal bir yüzey işlemi olan borlama, çeliklerin yüzey özelliklerini geliştirmede kullanılan etkili kaplama yöntemlerinden birisidir. Borlama işlemi değişik yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir. Bunlar; katı, sıvı, gaz, plazma ve pasta yöntemleridir. Katı borlama çok yaygın bir borlama yöntemi olmasına rağmen kullanılan tozun nispeten pahalı olması bir dezavantaj olarak görülmektedir. Fakat borlama işlem sonrası ek bir yüzey temizleme masrafı içermemesinden ve uygulanabilirliğinin kolay ve basit olmasından dolayı günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

2. BORLAMA HAKKINDA GENEL BİLGİLER

2.1 Bir Yüzey İşlemi Olarak Borlama

Bor ile yüzey sertleştirme işlemi, termo-difüzyonal bir işlem olup esas olarak borun yüksek sıcaklıkta çeliğe yayınıdır. Borlamanın diğer yüzey sertleştirme işlemlerinden üstünlüğü; yüzey tabakasının çok sert olması, yüksek aşınma korozyon ve yüksek sıcaklıkta oksidasyon direncine sahip olmasıdır (Sinha 1991, Ulker *et al.* 2011). Borlama, alaşımsız ve alaşımlı çeliklere, dökme demirlere, demir dışı metal ve alaşımlarına, bu alaşımların toz metalurjisi yoluyla üretilen tozlarına, bazı süper alaşımlar ile sermetler gibi birçok malzeme grubuna uygulanabilmektedir (Saygın 2006).

2.2 Borlama Yöntemleri

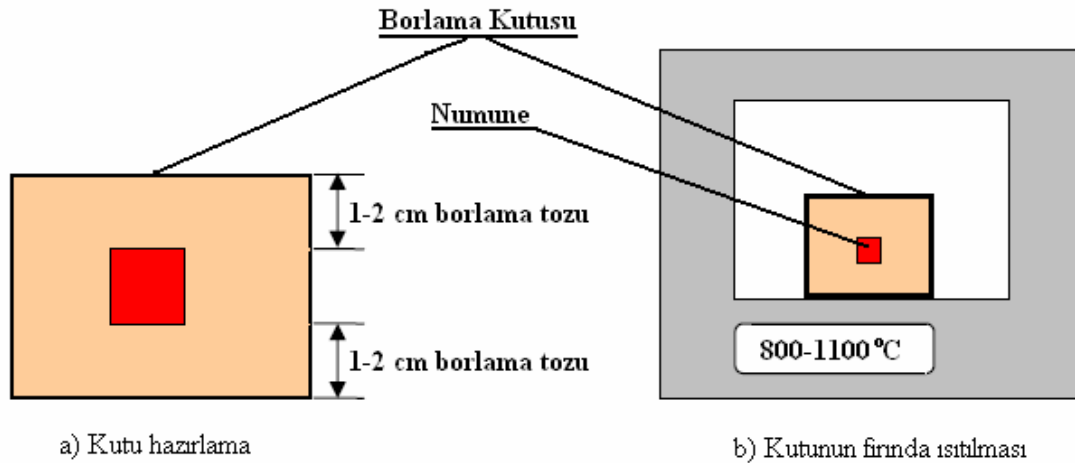
Borlama işlemi, yüzeyi iyice temizlenmiş malzemelerin 700-1000°C arasında bor sağlayıcı bir ortamda (katı, sıvı, gaz, pasta, plazma ve plazma pasta) 1-10 saat süre tutulmasıyla gerçekleştirilmektedir. Teknolojide uygulanma durumuna göre borlamayı iki ana grup altında toplamak mümkündür Termokimyasal yöntemler: kutu borlama, pasta borlama, sıvı borlama ve gaz borlama. Termokimyasal olmayan yöntemler: fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey kaplama vb. yöntemler (Sinha 1991, Güneş 2010).

2.2.1 Kutu Borlama

Yüzeyi borlanacak malzeme, toz halindeki bor verici ortam içinde 800-1000°C sıcaklıklarda 4-10 saat bekletilerek borlama işlemi yapılmaktadır. Borlama tozu ısıya dayanıklı çelik saç kutu içine konularak parça bor tozunun içine gömülerek borlama işlemi yapılmaktadır. Bu toz, parçanın tüm yüzeylerinde en az 10 mm kalınlığında kutuların ağzı bir kapak ile kapatılarak elektrik rezistanslı bir fırında kutu borlama işlemi gerçekleştirilmektedir. Yöntem ucuzdur ve özel bir teknik gerektirmemektedir (Uzun 2002).

Bir tür kutu sementasyona benzeyen bu yöntem, soy gaz atmosferinde yapılabileceği gibi, sıkı kapatılmış kutularda olmak şartı ile normal atmosferde de yapılabilmektedir. Şekil 2.1’de katı borlama işlemi şematik olarak görülmektedir. Aşağıda katı ortamda kullanılan bazı borlama bileşim örnekleri verilmiştir (Yurtseven 2008, Baştürk ve Erten 2006).

1. %85-90 Ferrobor +%10-15 NaBF
2. %95 B₄C +%5 NaF
3. %33 Amorf bor +%2 NHCl +%65 Al₂O₃
4. %80 B₄C +%20 Na₂CO₃
5. %98 B₄C +%2 KBF
6. %50 Amorf bor +%1 NH₄F.HF+%49 Al₂O₃
7. %(7,5-40) B₄C + %(2,5-10) KBF₄+% (50-90)+SiC
8. %84 B₄C +%16 Na₂B₄O₇
9. %95 Amorf bor +%5 KBF₄
10. %20 B₄C +%5 KBF₄+%75 Grafit
11. %(40-80) B₄C +% (20-60) Fe₂O₃
12. %100 B₄C (Yurtseven 2008)



Şekil 2.1 Katı borlama işleminin şematik görünümü (Yurtseven 2008, Bayça ve Şahin 2004)

Özbek ve Bindal (2002) W4 çeliğini Ekabor tozuyla 850, 950 ve 1050°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süreyle borlayarak mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Borlama işlemi sonucunda sıcaklık ve süreye bağlı olarak tabaka kalınlığının 8-386 µm, sertlik

değerlerinin ise 1407-2093 HV arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Kırılma tokluk değerlerinin 1,39-6,40 MPa m^{1/2} olarak bulmuşlardır. Borlama süresi ve sıcaklığının artmasıyla borür tabaka kalınlıklarının arttığını ve Fe₂B fazının kırılma tokluk değerinin FeB fazına göre yaklaşık 4 kat daha büyük olduğunu tespit etmişlerdir (Ozbek ve Bindal 2002).

Sen vd. (2001), arkadaşları soğuk iş takım çeliğini Ekabor I tozuyla 1000°C'de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlama işlemine tabi tutmuşlar ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Borlama sonucunda borür tabaka kalınlıklarının 70-140 µm, kırılma tokluğunun ise 3.07 ile 2,52 MPa m^{1/2} arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. En yüksek borür sertlik değerinin 1854 HV olduğunu saptamışlardır. Borlama süresinin ve sıcaklığının artmasıyla birlikte borür tabaka kalınlıklarının arttığını deneyler sonucunda bulmuşlardır (Sen *et al.* 2001).

Genel vd. (2002), AISI W1 çeliğini Ekabor I tozuyla 850, 900, 950, 1000 ve 1050°C sıcaklıklar arasında ve 1-8 saat arasında farklı sürelerde borlamışlar ve yüzey sertliklerini ölçmüşlerdir. Borlanmamış AISI W1 çeliğinin 260 HV olan sertliğinin borlama işlemi sonucunda serliği 1690-1800 HV' sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Borür tabaka kalınlığının sıcaklık ve süreye bağlı olarak bir amirik formül elde etmişlerdir (Genel *et al.* 2002).

Efe vd. (2008), 31CrMoV9 ve 34CrAlNi7 çeliklerini 850, 900 ve 950°C'de 2, 4, 6 ve 8 saat süreyle Ekabor II tozuyla borlamışlar ve kinetik özelliklerini incelemişlerdir. Borlama işlemi sonucunda sertlik değerleri 31CrMoV9 ve 34CrAlNi7 çeliklerinin sırasıyla 1672 HV ve 1600 HV sertlik değerlerine sahip olduklarını ve borür tabakalarının kırılma tokluklarının 3,93-4,48 ve 3,87-4,40 MPa m^{1/2} arasında değiştiği hesaplamalar sonucunda bulmuşlardır. Borlama sonucunda baskın olarak FeB ve Fe₂B fazları elde etmişlerdir. 31CrMoV9 ve 34CrAlNi7 çeliklerinin aktivasyon enerjilerinin 230 kJ/mol ve 270 kJ/mol olduğunu tespit etmişlerdir. 31CrMoV9 çeliğindeki borür tabakasının 34CrAlNi7 çeliğine göre daha yüksek olduğunu bununda aktivasyon enerjisinin düşük olmasının borür tabaka kalınlığını daha yüksek olması yani yüzeydeki borürlerin daha hızlı ve kolay büyüdüğünü ifade etmişlerdir (Efe *et al.* 2008).

Ozdemir vd. (2006), % ağırlıkça 99,97 saf demiri ekabor tozları ile 800°C’de 2, 4 ve 8 saat süresince borlamışlardır. Borlama işlemi sonucunda baskın olarak Fe₂B fazı bulmuşlardır. 130 HV olan sertliği borlama sonunda 1700 HV sertlik değerlerine ulaştığını tespit etmişlerdir. Borlama süre ve sıcaklığına bağlı olarak borür tabaka kalınlıklarının 22 ile 43 µm arasında değiştiğini gözlemlemişler ve kırılma tokluğu değerinin 4 ve 8 saat borlama sonucunda sırasıyla 3.59 MPa m^{1/2} ve 3.83 MPa m^{1/2} arasında değiştiğini tespit etmişlerdir (Ozdemir *et al.* 2006).

Campos vd. (2008), diğerleri M2 çeliğini 3-4 mm kalınlığındaki bor karbür pastasıyla 900°C ve 1000°C’de 4 saat süre ile borlamışlardır. Borlama sonucunda iç yapıda FeB ve Fe₂B fazları ve bor tabakası kalınlığının sıcaklık ve süreye bağlı olarak arttığını ve borür tabakasının kırılma tokluğu değerlerini incelemişler ve 2,1 ±0,3 MPa m^{1/2} olarak tespit etmişlerdir (Campos *et al.* 2008).

Li vd. (2008), Cr₁₂Mn₂V₂ çeliğini 900 ve 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süresince B₄C, KBF₄ ve SiC oluşan toz karışımlarında borlamışlardır. Borlama işlem sonunda Cr ve V’nin FeB oluşumuna yardımcı olduğunu ancak testere dişi görünümünün yani kolonsallığın azaldığını tespit etmişlerdir. Borür tabakalarının borlama sıcaklık ve süresine göre 8 ile 33 µm arasında ve borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla kırılma tokluk değerlerinde düşüşün olduğunu gözlemlemişlerdir. İşlem sonucunda FeB, Fe₂B ve CrB fazları elde etmişlerdir (Li *et al.* 2008).

Tabur vd. (2009), AISI 8620 çeliğini 850, 900 ve 950°C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle kutu borlamışlar ve farklı yüklemelerde aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Borlama sonucunda sertlik değerlerinin 1650-1850 HV arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Borlama süresinin ve sıcaklığın artmasıyla beraber borür tabaka kalınlıklarının arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca borlama süresinin artmasıyla aşınma direncinin arttığını bulmuşlardır. Aşınma işleminde uygulanan yük miktarının artmasıyla aşınma hızını arttığını tespit etmişlerdir (Tabur *et al.* 2009).

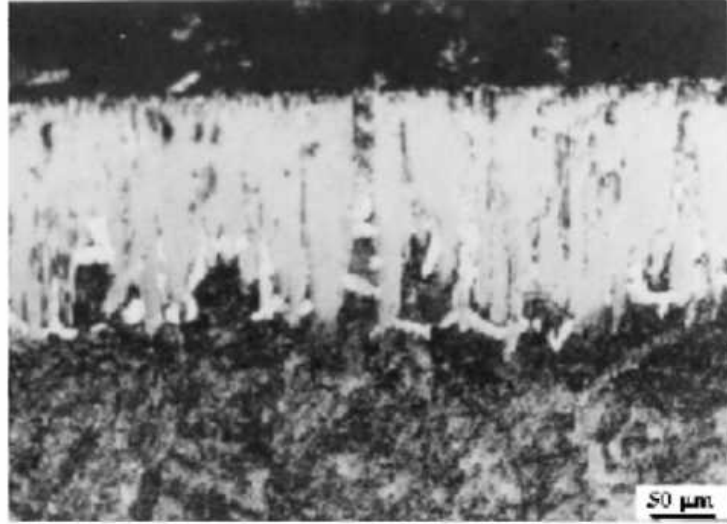
2.2.2 Sıvı Borlama

Bor bileşikleri, aktivatör ve redükleyici maddelerden oluşan erimiş tuza, iş parçasının daldırılması yöntemidir. 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 (Bayça ve Şahin 2004).

Sıvı borlama işleminde susuz boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), susuz borik asit (B_2O_3), metabolik asit (HBO_2), boraks, bor karbür gibi bor bileşikleri 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. 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 , Fe_2B) potansiyel değerini alır ve katı eriyik, oluşum esnasında yüzeyde yayınan elementin konsantrasyonundaki değişimle birlikte sürekli değişmektedir. (Bayça ve Şahin 2004).

Bindal, AISI 1020 (Ck20) ve AISI 1050 (C50) çelikleri %66 boraks, %14 kalsine borik asit , %20 ferro silisyum karışımında 940°C'de 5 ve 7 saat süreler ile atmosferik şartlarda borlamış ve işlem sonucunda numuneler potadan alınarak havada soğutmuştur. Borlanan parçaların sertlik, kırılma tokluğu ve korozyon özellikleri incelemiştir. 5 saat borlama sonucu elde edilmiş mikro sertlikler sırasıyla 1360 HV ve 1282 HV; elde edilen borür tabakasının ortalama kalınlıkları ise iki çelik için de yaklaşık olarak 130um bulmuştur. 7 saat borlama sonucu elde edilmiş mikro sertlikler sırasıyla 1450 HV ve 1703 HV; elde edilen borür tabakasının ortalama kalınlıkları ise sırasıyla yaklaşık olarak 16µm ve 180µm bulmuştur. Borlanmış yüzeylerde FeB ve Fe_2B fazlarına ilave olarak Fe_3C bileşiği tespit etmiştir. Bindal borlama süresi ve krom miktarına bağlı olarak, krom borürler tespit etmiştir ve kromun çok fazla olmasa bile, kırılma tokluğunu düşürdüğünü belirlemiştir (Bindal 1991).

Ulu vd. (2004), AISI 8620 (21NiCrMo2) çeliğini %65 boraks, %15 ferrosilisyum, %20 borik asit karışımından oluşan bir tuz banyosunda 900°C'de 5 saat süre ile sıvı borlanmışlar ve numuneleri havada soğutmuşlardır. Borlama işlemi sonucunda FeB ve Fe₂B fazlarından ve oluşan borür tabakası kalınlığının 200 µm civarında olduğunu tespit etmişlerdir. Oluşan borür tabakasının yüzey sertliğini 1600 HV_{0,1} olarak bulunmuşlardır. Aynı saat ve sürede karbürleme işlemi yapılmış ve borlanmış numunelerle karşılaştırma sonucunda karbürlenmiş numunelerin sertliği yaklaşık 900 HV civarında olduğunu belirtmişlerdir. Borür tabakasının kırılğan özelliğinden dolayı, aşınma hızında 15 N yükten fazla yüklerde sıra dışı bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir Şekil 2.2'de borlanmış AISI 8620 çeliğinde oluşan bor tabakası görülmektedir (Ulu vd. 2004).



Şekil 2.2 Borlanmış AISI 8620 çeliğinde oluşan bor tabakası (Ulu vd. 2004)

Demir esaslı malzemelerin elektrolitik sıvı borlama işlemi, 900–950°C sıcaklık aralığında, boraks esaslı eriyiklere %30 B₄C ilavesi yapılarak gerçekleştirilmektedir. Borlama işlemi aynı zamanda, %55 boraks, %40-50 ferrobor ve % 4-5 ferro-alüminyum ilavesiyle de yapılmaktadır. Nikel alaşımlarının borlanmasında, KBF₄/KF tuz banyosu, 670°C 'nin altındaki uygulamalarda 75/25 oranında kullanılarak düşünülen kalınlıkta bor tabakası elde edilebilmektedir. Aynı zamanda daha yüksek sıcaklıklarda demir esaslı malzemeler için de iyi sonuçlar sağlanmaktadır. %55 boraks, %45 B₄C karışımı ve 1/1 oranında NaCl ve BaCl₂ kullanılarak çok yüksek tabaka kalınlıkları elde edilmektedir. Sıvı borlama ayrıca, boraks, ferro-silis, borik asit ve sodyum sülfat (NaSO₄) esaslı tuz banyolarında da gerçekleştirilmektedir (Karslı 2005).

Şen vd. (2005), AISI 4340 (40NiCrMo6), AISI 5140 (41Cr4) ve AISI D2 (X155CrVMo12 1) çelikleri boraks, borik asit, ferro silisyum karışımında 850°C ve 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süreler ile atmosferik şartlarda borlanmış ve işlem sonucunda numuneler potadan alınarak havada soğutulmuştur. Elde edilen yaklaşık mikro sertlik değerleri sırasıyla 1077-1632HV, 1198-1739HV ve 1500-2140HV; tabaka kalınlıkları ise yine sırasıyla 36–213 µm, 45–238 µm ve 21–273 µm bulunmuştur. Çalışmada, matematiksel bağıntılarla deneysel olarak elde edilmiş tabaka kalınlıkları karşılaştırılmıştır ve oldukça yakın değerler bulunmuştur. AISI 5140 ve AISI 4340 çeliklerinde FeB, Fe₂B ve CrB fazları; AISI D2 çeliğinde FeB, Fe₂B, CrB ve Cr₂B fazları tespit edilmiştir (Şen *et al.* 2005).

Şen vd. (2006), borlanmış, borlanmış+kısa süreli oksitlenmiş 4140 çeliğinin aşınma davranışlarını incelemiştir. 850 ve 950 °C de 2 ve 6 saat süreyle boraks, borik asit ve ferro silisyum içerikli banyoda borlama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Borlamadan sonra kısa süreli oksitleme işlemini ise 750°C’de 3 dakika süreyle yapmışlardır. Pim şeklinde olan borlanmış ve kısa süreli oksitlenmiş numuneler 440C paslanmaz çelik diske (63 HRC) karşı pin on disk aşınma cihazında 20 N yük altında 1 m/s kayma hızında aşındırılmıştır. Borlanmış numunenin sürtünme katsayısı yaklaşık 0,5 iken borlanmış+kısa süreli oksitlenmiş numunenin sürtünme katsayısı yaklaşık 0.12 ye düşmüştür. Oksitlenmiş numunenin aşınma hızı 1.62×10^{-6} mm³/N m iken borlanmış numunelerin ise 3,23 den 7.54×10^{-6} mm³/N m ye kadar çıkmaktadır. (Şen *et al.* 2006).

Taktak (2007), AISI H13 ve 304 paslanmaz çeliğini %60 boraks, %20 kalsine borik asit, %20 ferro silisyum karışımında 800°C, 850°C, 900°C ve 950°C’de 3, 5 ve 7 saat sürelerde atmosferik şartlarda borlama yapılmış ve işlem sonucunda H13 ve 304 paslanmaz çeliğinin bazı mekanik özelliklerini incelemiştir. 900°C’de 5 saat borlama sonucunda AISI H13 ve 304 çeliğinde sırasıyla FeB, Fe₂B, CrB ve FeB, Fe₂B, CrB ve Ni₃B fazlarını tespit etmiştir. Bor tabaka kalınlıkları ise sırasıyla AISI H13 ve 304 çeliğinin 8-58µm, 4-42 µm bulmuştur. Borlama sonucu elde edilmiş mikro sertlikler sırasıyla 1860 ve 2150 HV olarak bulmuştur. Borlama sonucu elde edilmiş kırılma toklukları ise sırasıyla 4.46-3.12 ve 4.08-2.45 MPa m^{1/2} olarak tespit etmiştir. Sonuç

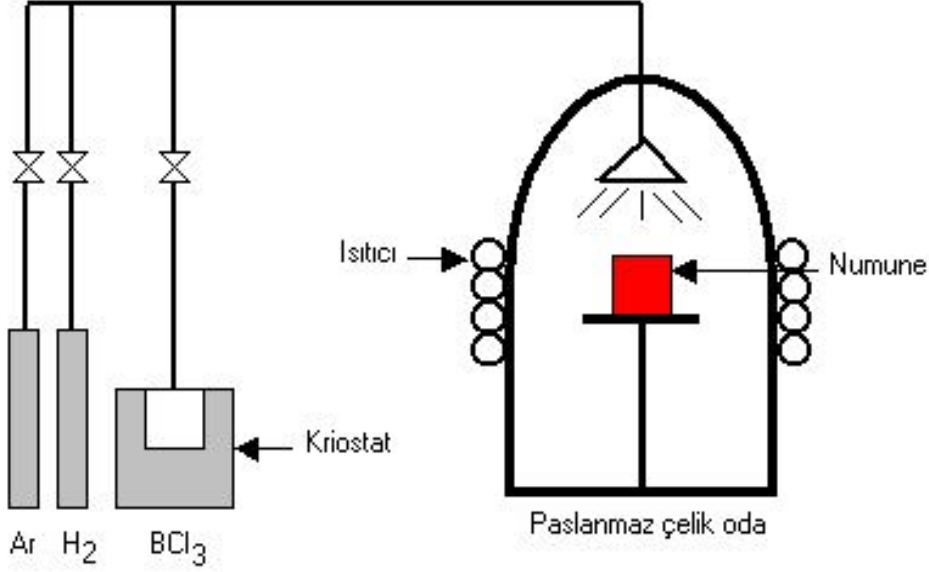
olarak borlama işlem süresi ve sıcaklığının artmasıyla kırılma tokluğu değerlerinin düştüğü ve yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı sonucuna varmıştır (Taktak 2007).

Bindal ve Üçışık (2008), %0.3 C ve %0.02 P içeren sade karbonlu çeliğini 940°C'de 30 dakika ve 10 saat süre boyunca boraks, borik asit ve ferro silisyumdan oluşan bir tuz banyosunda sıvı borlama yapmışlardır. Bor tabakası kalınlığının sıcaklık ve süreye bağlı olarak 30-160 µm arasında değiştiğini ve borlamanın sürtünme katsayısını azaltırken, aşınma direncini artırdığını tespit etmişlerdir. Borlama sonucu mikro sertlik değerini 1500 HV olarak bulmuşlardır (Bindal ve Üçışık 2008).

Oliveira vd. (2010), AISI D2 çeliğini 800 ve 1000°C'de 4 saat süreyle boraks, ferro titanyum ve alüminyumdan oluşan 3 farklı boraks banyosunda borlamışlardır. Üç farklı bu banyolarda borlama işlemi sonucunda 60-120 µm arasında borür tabaka kalınlıkların değişirken, sertlik değerlerinin 1596-1744 HV arasında değiştiğini tespit etmişlerdir (Oliveira *et al.* 2010).

2.2.3 Gaz Borlama

Gaz borlamada borlama gaz kaynağı olarak B₂H₆ ve BCl₃ gazları kullanılmaktadır. Fakat bu gazlar kimyasal olarak kararsız ve zehirleyici özelliğe sahip olmalarından dolayı problemlidirler. Borlama ortamının gaz fazında olduğu borlama işlemidir. 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 yapılmaktadır (Nam *et al.* 2005, Küper *et al.* 2000, Barış 2007). Gaz borlama işleminde kullanılan bor taşıyabilen gazlar, bor halojenler veya bor hidrürlerdir. (Sinha 1991, Özbek 2000). Aşağıda Şekil 2.3'te gaz borlama ünitesi görülmektedir.



Şekil 2.3 Gaz Borlama Ünitesi (Barış 2007)

Gaz borlamanın avantajları gaz sirkülasyonu sonucu daha üniform bir bor dağılımını sağlanması, sonradan temizleme gerektirmediği için kolay elde edilmesidir. 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 trietilamin gibi maddeler kullanılmaktadır. Gaz borlama diğer karbürleme nitrürleme gibi benzer termokimyasal ısıl işlemler olmasına rağmen ekonomik olarak çok daha verimlidir (Küper *et al.* 2000).

2.2.4 Pasta Borlama

Pasta borlama, kutu borlamanın zor ve daha pahalı olduğu veya fazla zaman aldığı durumlarda kullanılır. Bu yöntemin en önemli avantajı kısmi borlama yöntemidir (Baştürk ve Erten 2006). % 45 B_4C ve % 55 kriyolit veya geleneksel borlama toz karışımı $B_4C+SiC+KBF_4$ iyi bir bağlayıcı ajan ile karıştırılarak hazırlanan pasta fırça veya sprey yardımıyla malzemenin tüm yüzeyine veya istenen bölümüne uygulanır. İşlem tekrarlanarak kurutmadan sonra 1-2 mm civarında bir tabaka kalınlığı elde edilir. Sonra, demir esaslı malzemeler induksiyon, elektrik direnç veya geleneksel fırınlarda 800-1000°C arasında 5 saat ısıtılarak işlem gerçekleştirilir. İşlem, argon, NH_3 veya N_2 gibi koruyucu bir atmosfer altında gerçekleştirilir. Büyük parçaların ve seçilmiş

alanların borlanması için oldukça ilgi çeken bir yöntemdir (Sinha 1991, Özbek 2000, Uluköy 2005).

Nair (1996), AISI 1020 (Ck20), AISI 1040 (C40) ve AISI 4140 (42CrMo4) çelikleri EKabor pasta ile argon gazı altında, 900°C'de 2 ve 5 saat süre ile borlamıştır. 900°C'de 2 saat borlama ile elde edilen borür tabakasının ortalama kalınlığı sırasıyla 45µm, 43µm ve 35µm; mikro sertlikler ise sırasıyla 772 HV, 919 HV ve 919 HV olarak bulmuştur. 900°C'de 5 saat borlama ile elde edilen borür tabakasının ortalama kalınlığı sırasıyla 65µm, 56µm ve 60µm; mikro sertlikler ise sırasıyla 1350 HV, 1400 HV ve 1770 HV olarak bulmuştur (Nair 1996).

Nair ve Karamış (1997), katı borlama tekniklerinden biri olan; macun borlama ile farklı alaşım ve karbon oranlarına sahip çelikleri borlayarak yüzey sertlik özelliklerini incelemiştir. Mikrosertlik taramaları sonucunda, malzeme cinsine, borlama sıcaklığına ve borlama süresine bağlı olarak 700-1750 HV_{0.06} mikrosertlik değeri ve 30-60 µm arasında değişen tabaka kalınlıkları elde etmişlerdir. Farklı alaşım ve karbon oranına sahip numunelerin borlama sonucu farklı mikrosertlik değerleri vermesi yanında, sertlik dağılımlarının da farklı olduğunu belirlemiştir (Nair ve Karamış 1997).

Campos vd. (2006), AISI 304 paslanmaz çeliğini önce 650°C'de argon gazı atmosferi altında 1 saat boyunca tavlamışlar sonra Dur-ferrit bor pastasıyla numune üzerlerine 4 ve 5 µm'luk pasta oluşturmuşlardır. 900, 950 ve 1000°C'de 4 ile 6 saat süresince borlama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Borlama süresi ve sıcaklığının artmasıyla borür tabaka kalınlıklarının arttığını tespit etmişlerdir. AISI 304 çeliğinin polarizasyon direncinin borlanmış numuneye göre daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. En yüksek korozyon direnci 4 mm pasta kalınlığına sahip 1000°C'de borlanmış AISI 304 çeliğinde görülmüştür. Cr ve Ni gibi alaşım elementlerinin bor tabakası kalınlığını ve bor difüzyonunu sınırladığını tespit etmişlerdir (Campos *et al.* 2000).

2.2.5 Plazma Borlama

Plazma, içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötr atom veya molekül içeren bir karışımdır. Pratikte plazma, ısı enerjisi verilerek, ışınla veya elektriksel boşalma ile elde edilir. Plazma elde etme yöntemlerinin en önemlisi ve en yaygın olarak kullanılanı elektriksel boşalmadır. Bir elektrik gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa, belirli şartlar gerçekleştiği takdirde, tatbik edilen gerilim plakalar arasındaki gazın delinme geriliminin üzerine çıktığında, iki iletken plaka arasında bir elektrik boşalması olur ve plakalar arasında bir elektrik akımı akışı olur (Uluköy 2005).

Kaestner vd. (2001) saf Ti ve TiAl6V4 alaşımını Ar ve BCl₃ gaz karışımlarında 700°C, 800°C ve 900°C’de plazma borlamışlardır. XRD sonuçlarından borlama tabakasının TiB ve TiB₂ fazlarından ve 2800HK_{0.01} yüzey sertlik değerine sahip olduğunu bulmuşlardır. Bor konsantrasyonunun artmasıyla sadece kaplama tabakasında TiB fazının oluştuğunu, daha düşük sıcaklıklarda borlama sonucunda ise sadece TiB₂ fazının oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Titanyumun borlanması için minimum 700°C sıcaklığın gerektiğini ifade etmişlerdir (Kaestner *et al.* 2000).

Iakovou vd. (2002), takım çeliklerini plazma aktarımlı ark (plasma transferred arc) yöntemi ile borlamışlar ve bu yöntemin aşınma dayanımına etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak bu yöntemin 1.5 mm kalınlığında ve 1000-1300 HV sertliğinde üniform alaşımlanmış tabakalar oluşturulması için kolay ve etkili bir yöntem olduğunu belirlemişlerdir. Borlanmış tabakaların mikroyapılarına bakıldığında Fe B tabakası, borid ve martenzitin ötektik karışımından oluştuğu gözlenmiştir. Ötektik bölgede bazı çatlaklar görülmesine rağmen bunun kaplamanın adezyon aşınmasına karşı direnci üzerinde çok etkili olmadığını görmüşlerdir. Aşınma testi için kullanılan disk üzerindeki pimin aşınma oranı uygulanan yüke bağlı olarak değişmekle beraber kayma hızından hemen hemen bağımsız olduğunu görmüşlerdir ve aşınma oranının 0.13 ila 0.23 arasında değişen sürtünme katsayısına, sürtünme katsayısının da bor ve oksit tabakasına bağlı olduğu sonucuna varmışlardır (Iakovou *et al.* 2002).

Bourithis vd. (2002), plazma aktarımlı ark yöntemini kullanarak AISI 1018 çeliğini bor ve kromdiborit tozları kullanarak borlamışlardır. Bu çalışma sonucunda; bor tabakalarının bor veya kromdiborit tozları kullanılarak plazma aktarımlı ark yöntemiyle elde edilebileceğini, kaplama kalınlığının 1-1.5 mm kalınlığında, sertliğin de bor tozları için 1000 ila 1300 HV aralığında değiştiğini, kromdiborit tozları için de 900 HV değerinde olduğunu, bor tozları ile borlanmış yüzeylerin sürtünme katsayılarının uygulanan yüke göre 0.8 ila 0.2 arasında değiştiğini, kromdiborit tozları ile borlanmış yüzeylerin sürtünme katsayılarının uygulanan yüke çok fazla bağlı olmadığını ve 0.15'ten düşük değerde olduğunu, aşınma hızının her iki yöntem için de 10-15 mm /m gibi çok düşük bir değerde olduğunu göstermişlerdir (Bourithis *et al.* 2002).

Gopalakrishnan vd. (2002), orta karbonlu çelikleri sürekli ve aralıklı olarak borlamışlar, sonuçları karşılaştırmışlardır. Deney numunesi olarak %0.45 C, %0.2 Si, %0.7 Mn, %0.05 S ve %0.05 P'dan oluşan orta karbonlu çelik kullanılmıştır. Borlama yöntemi olarak da katı ve elektroliz yöntemiyle borlama yöntemleri kullanılmıştır. Numuneler 950°C'de 4 saat süreyle sürekli olarak katı ve elektroliz borlama yöntemiyle borlanmışlar ve daha sonra havada soğutulmuşlardır. Aralıklı borlamada ise, numuneler 1 saat süreyle 950°C'de borlanmışlar, daha sonra 600°C'ye kadar havada soğutulmuşlar ve tekrar 1'er saatlik sürelerle borlanmışlardır. Bu işlem dört defa katı ve elektroliz ile borlama yöntemi için tekrarlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda; aralıklı borlama ile mikroyapı morfolojisinde, artık gerilme dağılımında, tokluk ve kırılma gibi mekanik özelliklerde daha iyi sonuçlar vermiş, yüzey sertliği ise sürekli borlamaya göre daha düşük çıkmıştır. Bu çalışma sonucunda; ferrobora ve ferrosilikon gibi düşük maliyetli malzemeler kullanılarak bir maliyet-etkin borlama yöntemi geliştirilmiş, yüksek mikroyapı, mekanik özellikler ve korozyon dayanımlı yüzey oluşturan aralıklı borlama yöntemi geliştirilmiş, aralıklı borlama ile sürekli borlamaya göre bor tabakası içerisinde daha az çatlaklar oluştuğu gözlenmiş ve böylece aralıklı borlama ile kırılmanın azaltılabileceği belirlenmiş ve aralık borlama ile yüksek korozyon direnci oluşturulabileceği belirlenmiştir (Gopalakrishnan *et al.* 2002).

2.2.6 Plazma Pasta Borlama

Yeni bir borlama yöntemi olan plazma pasta borlama işlemi pasta borlama işleminin plazma ortamında 700-1000°C arasında Ar ve H₂ gibi gazlarla belirli bir vakum basıncı altında yapılmaktadır. İşlem vakum altında gerçekleştiği için herhangi bir koruyucu atmosfere gerek yoktur. Bor içerikli tozları pasta olarak kullanarak plazma pasta borlama yöntemiyle çeliklerin daha düşük sıcaklık ve sürelerde borlanması ve çelikler üzerinde kompleks borür tabakalarının oluşturulması sağlanabilmektedir. Plazmanın en önemli avantajlarından biri sıcaklığın etkisiyle termo-kimyasal biriktirmenin yanında, hızlandırılmış atom ve iyon hareketleri sayesinde fiziksel bir biriktirme mekanizması oluşturmasıdır. Plazma ortamı ve bor esaslı bir pastanın birleştirilmesiyle çeliklerin üzerinde son derece fonksiyonel tabakaların oluşturulabilmesi muhtemeldir. Ayrıca plazma borlamada bor kaynağı olarak kullanılan gazların (B₂H₆, BCl₃) pahalı, zehirli ve patlayıcı nitelikte olması bazı dezavantajlara da sahiptir. Plazma pasta borlama ile bu zararlı etkilerden kurtulmak mümkündür. Plazma destekli pasta borlama yüzey işlemi ile plazma borlama işlemindeki dezavantajlar yok edilebilmektedir. Kullanılan pastanın çevreye zararsız bor hammaddeleri olması, gazların ise genelde inert karakterde olan hidrojen, argon ve azot olması bu işlemi avantajlı kılmaktadır (Güneş 2010). Bu konuda yapılan çalışmada Yoon vd. (1999), boraks (Na₂B₄O₇) ve amorf bor karışımından oluşan pastayı 304 paslanmaz çeliğin üzerine sürerek Ar/H₂ plazmasında değişik sıcaklıklarda borlamışlar ve tabakanın difüzyon kinetiğini ve morfolojisini incelemişlerdir. Ayrıca, optimum borür tabaka kalınlığı için değişik boraks ve amorf bor bileşiklerini içeren pasta kullanmışlardır. Çalışmalar sonucunda %70 boraks ve %30 amorf bor içeren pastanın en yüksek kalınlığı verdiğini ve %100 boraks içeren pastanın da paslanmaz çelikte borür tabakası oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Güneş vd. (2013), yapmış oldukları çalışmada AISI 8620 çeliğini 700, 750 ve 800°C'de boraks ve borik asit bor pastaları kullanarak plazma pasta borlamışlardır. Borlama sonucunda plazma pasta borlama işleminin diğer geleneksel borlama yöntemlerine göre daha düşük borlama sıcaklık ve sürelerinde çelik yüzeylerinde borür tabakası oluşturulabildiğini tespit etmişlerdir (Gunes *et al.* 2013). Difüzyon kinetiği çalışmaları sonucunda plazma pasta borlama ile gerçekleştirilen borür tabakasının diğer borlama

ortamlarına nazaran daha kalın ve aktivasyon enerjisinin de daha küçük olduğunu vurgulamışlardır (Yoon *et al.* 1999, Gunes *et al.* 2011).

2.3 Borür Tabakasının Özellikleri

Demir esaslı alaşımların borlanması sırasında kaplama, genellikle demir borürlerin oluşum ve büyümesi ile olmaktadır. Demirin termokimyasal olarak borürlenmesi sırasında, kolonsal kümeler oluşturan borür kristallerinin FeB/Fe₂B ve Fe₂B/FeB geçiş bölgesinde dişe benzer morfolojiler oluşmaya başlar. Oluşan kolonsal borür kristalleri, borun difüzyonuna bağlı olarak, eşdeğer boylarda olmazlarsa bile bazı üstün mekanik özelliklere (sertlik gibi) sahip olabilirler. Yüzey pürüzlülükleri, çizikler gibi makro hatalar ve tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları gibi mikro hatalar demirbor bileşiklerinin çekirdeklenmesi için özellikle uygun yerlerdir; kitlesel çekirdekleşme olmasa bile bu bölgelerde çekirdekleşme ilerler ve küçük borür alanları oluşabilir. Çekirdekleşme prosesinin ilk adımı Fe₂B çekirdeğinin oluşumudur. Fe₂B çekirdekleşmesini borca daha zengin bileşiklerin çekirdekleşmesi takip eder. İlk oluşan Fe₂B alanlarının dış yüzeylerinde FeB ve FeB_n (n>1) bileşiklerinin meydana geldiği tespit edilmiştir (Uluköy 2005).

Bor elementinin α , γ ve δ -demir içindeki çözünürlüğü çok sınırlıdır ve uygulanan ısı işleme bakımından sadece Fe₂B kararlıdır (Cameron and Moral 1986, Keddani and Chentouf 2005). Fe-B ikili denge diyagramının α -Fe fazına yakın bölgesi birçok değişikliğe uğramıştır. Son çalışmalar bor'un östenit ve ferrit içindeki çözünürlüğünün önceden gözlenenenden çok daha düşük olduğunu, invariant reaksiyonun da $\gamma \rightarrow \text{Fe}_2\text{B} + \alpha$ şeklinde ötektoid olduğu belirlenmiştir. Üstelik ferrit içindeki bir bor atomu ve östenit içindeki arasında bulunan entalpi farkının önceki çalışmalarda öne sürülenenden çok daha küçük olduğu bulunmuştur (Cameron and Moral 1986). Borlama işlemi esnasında öncelikle Fe₂B fazı, daha sonra da FeB bileşiği meydana gelmektedir. Yaklaşık ağırlıkça % 4 bor oranında ergime sıcaklığı 1174°C olan ötektik faz oluşmaktadır. Dolayısıyla borlanmış yüzey bu sıcaklığa kadar ısıdan etkilenmemektedir. Sonuçta borlama ile malzemenin en dış yüzeyinde FeB ve altında Fe₂B fazlarından oluşan borür tabakası oluşmaktadır. Fe₂B ve FeB fazlarının tipik özellikleri çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Fe₂B ve FeB fazlarının tipik özellikleri (Sinha 1991).

Özellik	Fe₂B	FeB
Kristal yapı	Hacim merkezli tetragonal	Ortorombik
Latis parametresi (Å°)	a=5,078, c=4.28	a=4,053,b=5,495, c=2,94
Mikrosertlik (Gpa)	18 - 20	19 - 21
Elastisite Modülü (Gpa)	280 - 295	590
Bor içeriği (%)	8,83	16,23
Yoğunluk (gr/cm ³)	7,43	6,75
Termal Genleşme Katsayısı (ppm/°C)	7,65(200-600 °C)	23 (200-600 °C)
Ergime sıcaklığı (°C)	1389 - 1410	1540-1657
Termal iletkenlik (W/m.°C)	30,1 (20 °C)	12,0 (20 °C)
Elektriksel direnç(10 ⁻⁶ Ω)	38	80
Renk	Gri	Gri

Demir esaslı malzemelerin borlanması ile kaplama tabakası, işlem sıcaklık ve süresi, malzemenin kimyasal bileşimi ve ortamın bor potansiyeline bağlı olarak ya tek faz (Fe₂B) veya iki fazdan (FeB+Fe₂B) oluşur. İki fazlı tabaka FeB fazının çok kırılğan olmasından dolayı endüstriyel uygulamalarda istenmez. Ayrıca, FeB ve Fe₂B fazlarının ısı genleşme katsayılarının büyük ölçüde farklı olması iki faz arasında sık sık çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Bu çatlaklar mekanik bir yük uygulandığında kaplama tabakasının dökülmesine yol açabilmektedir. Bunun için borür tabakasında, FeB fazının oluşması ya tamamen engellenmeli ya da minimuma indirilmelidir (Sinha 1991, Özdemir *et al.* 2006).

Genellikle sade karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin termo-kimyasal yöntemlerle borlanması sırasında oluşan borürler kolonsal halde büyümektedir. Bor kaynağından borür ve ana metal ara yüzeyine sürekli olarak yayılan bor atomları, bor tabakasına dik doğrultuda Fe₂B kristalleri oluşturmakta ve bu kristaller kolonsal bir şekilde içeriye doğru ilerlemektedir. Demir esaslı malzemelerin borlama işlemi sonrasında çok fazlı borür tabakasında, FeB fazının büyüme mekanizması, matrisin hemen üzerinde oluşan Fe₂B fazı ile benzerlik göstermektedir. Aynı tabaka için FeB/Fe₂B ara yüzeyindeki kolonsallığın Fe₂B/matris ara yüzeyindekine nazaran daha az olması dikkate değerdir. Fe₂B fazı nispeten sünek olan bir malzeme üzerinde büyüyen bir faz iken, FeB fazı daha

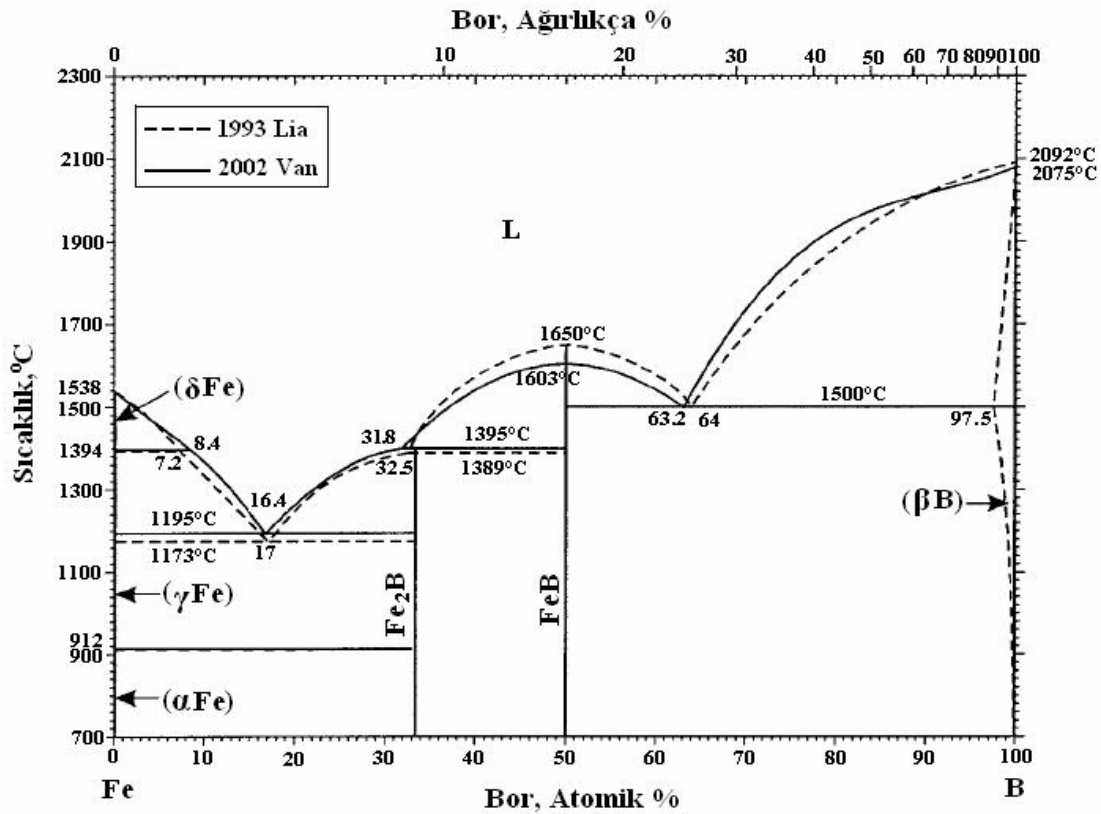
sert bir tabaka üzerinde büyükmektedir. FeB/Fe₂B ara yüzeyindeki kolonsallığın az olmasının nedeni buna bağlanmakta ve daha sert bir FeB fazı elde edilmektedir (Şen 1998).

Demir esaslı malzemenin bileşiminde bulunan C, Cr, Ni ve Si gibi alaşım elementleri borür tabakasının özelliklerini etkileyebilmektedir. Artan karbon içeriği ile kaplama tabakasının kalınlığı azalırken sertliği artmakta ya da önce düşmekte (%0,5 C'a kadar) sonra artmaktadır. Karbon, FeB ve Fe₂B içinde çözünmediği için borlanan tabakanın önünde sürüklenerek tabaka/matris arayüzeyinde karbürler ve borkarbürlerden oluşan bir çokfazlı bölge oluşturur. Yüksek karbonlu çeliklerde borür tabakasının çok kırılğan olması ve ana metale bağlanmanın zayıf olmasının nedeni bu oluşuma bağlanmaktadır. Krom, borür tabakasındaki FeB miktarını, tabaka sertliğini ve kırılğanlığını arttırırken, dışta çok yoğun olmayan bir tabaka üretir. Nikel miktarının artması daha düzenli ve daha ince tabakanın oluşmasını sağlar (Carbucicchio and Palombarini 1987, Badini *et al.* 1987). Silisyum, karbon elementi gibi borür tabakası içerisinde çözünmez. Borlama işlemi sırasında çeliğin iç kısımlarına itilerek borür tabakası ve metal ara yüzeyinde FeSi_{0.4}B_{0.6} ve Fe₄SiB₂ bileşiklerinin oluşmasına neden olur. Silisyum genellikle difüzyon bölgesinde bulunarak ferrit fazı meydana getirir. Bu yüzden, borür tabakasının mekanik özellikleri olumsuz yönde etkiler (Şen 1998).

2.4 Fe-B İkili Denge Diyagramı

Demir alaşımlarında alaşım elementlerinin, genellikle atom çaplarına bağlı olarak ara yer ve yer alan element olarak eriyebileceği bilinmektedir. Bu gerçekten hareketle, bor α -Fe'de hem yer alan hem de ara yer pozisyonunda olabilmektedir. Bor çeliklerde ppm mertebesinde çözünmektedir. Fe-B sisteminde borun atom çapının demirin atom çapından 2,69 kat (%27 oranında) daha küçük olması, bu elementle katı eriyik yapma imkânı sağlamaktadır. Düşük sıcaklıklarda demir içerisinde bor çözünürlüğü mukayese edildiğinde 1/50 oranında ara yer atomu olarak, büyük oranda ise yer alan atomu olarak eridiği görülmüştür. α -Fe'de borun difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjisi 62 kcal/mol olarak tespit edilmiştir (Şen 1998). Aşağıda şekil 2.3'te Fe-B ikili denge diyagramı görülmektedir. Bor atomları, oldukça küçük boyutları ve hareketli yapıları

sayesinde demir alaşımlarında kolaylıkla diffüze olurlar. Bor atomları, altlık malzemenin atomları ile borürleri oluşturmak için termal enerji ile iş parçasının yüzeyinde metal latisinin içerisine yerleşir. Borlayıcı bileşenlerden metalik kafese doğru bor atomlarının difüzyonu ve akabinde absorpsiyonu ile süreye bağlı olarak hem tek fazlı (Fe_2B) hem de çift fazlı (FeB ve Fe_2B) borür tabakaları meydana gelmektedir ve tabakanın özelliklerini büyük ölçüde bu iki borür belirlemektedir (Şen 1998).



Şekil 2.3 Fe-B ikili denge diyagramı (Okamoto 2004)

2.5 Borlama İşleminin Avantaj ve Dezavantajları

Borlanmış malzemelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakasının çok yüksek sertlik ve ergime sıcaklığına sahip olması önemli bir avantajdır. Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme yöntemleri olan sementasyon ve nitrasyona göre çok daha yüksektir. Aşağıda çizelge 2.2’de farklı malzemelerdeki bor tabakalarının sertlikleri ve erime noktaları görülmektedir (Sinha 1991).

Çizelge 2.2 Farklı malzemelerdeki bor tabakalarının sertlikleri ve erime noktaları (Sinha 1991).

Malzeme	Oluşan Bileşik	Sertlik (HV)	Ergime Noktası(°C)
Fe	FeB	1900-2100	1390
	Fe ₂ B	1800-2000	1390
	CoB	1850	1390
Co	Co ₂ B	1500-1600	1390
	Co ₃ B	700-800	1390
	CoB	2200	1390
Co-27.5Cr	Co ₂ B	1550	1390
	Co ₄ B	700-800	1390
	Ni ₄ B ₃	1600	1390
Ni	Ni ₂ B	1500	1390
	Ni ₃ B	900	1390
	Mo ₂ B	1660	2000
Mo	MoB ₂	2330	≈2100
	Mo ₂ B ₄	2400-2700	2100
W	W ₂ B ₅	2600	2300
Ti	TiB	2500	≈1900
	TiB ₂	3370	2980
Zr	ZrB ₂	2250	3040

Borlama işlemi ile sertleştirilmiş takım çeliklerinin yüzey sertlikleri, elektrolitik sert krom kaplamaların ve tungsten karbürün sertlik değerlerine ulaşabilmektedir. Bor kaplanmış çeliklerin tipik yüzey sertlikleri ve diğer sert metallerle karşılaştırılması çizelge 2.3'te verilmektedir (Sinha 1991).

Çizelge 2.3 Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması (Sinha 1991)

Malzeme	Mikrosertlik (Kg/mm² veya HV)
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 kalıp	630-700
Yüksek hız çeliği BM42	900-910
Nitrülenmiş çelik	650-1700
Sementastonlu düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
Sementit karbürler, WC+Co	1160-1820(30kg)
Al ₂ O ₃ +ZrO ₂ seramikler	1480(30kg)
Al ₂ O ₃ + TiC+ ZrO ₂ seramikler	1730(30kg)
Sialon seramikler	1768(30kg)
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Elmas	~10000

Borür tabakasının bazı avantajları aşağıda verilmektedir (Bindal 1991);

- Borür tabakasının sertliği yüksek sıcaklıklarda (550°C-600°C) korunmaktadır.
- Borlama, özellikle sertleşebilir birçok çelik grubuyla kıyaslanabilir yüzey özelliklerinin elde edilebildiği bir işlemdir.
- Borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin oksidan olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerin erozyon dirençlerini artırmaktadır.
- Bu özellikleri sebebiyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Borlama işlemi ile düşük alaşımlı çeliklerin, H₂SO₄, H₃PO₄ ve HCl gibi asitlere karşı direncini artırmak mümkündür. Örneğin; borlanmış ostenitik paslanmaz çeliklerin HCl asit ortamlarına karşı dayanıklılığı çok iyidir.
- Borlanmış yüzeyler çok yüksek sıcaklıklarda (850°C) orta özellikte oksidasyon direncine ve oldukça yüksek ergimiş metal korozyon direncine sahiptir.

- Borlanan parça, oksidan ve korozyon ortamlarda üstün bir yorulma ömrüne sahiptir.
- Borlama işlemi yağlayıcı kullanımını azaltmakta, soğuk birleşme eğilimini ve sürtünme katsayısını düşürmektedir.

Borlama işlemi, birçok avantajının yanında aşağıdaki dezavantajlara sahiptir (Bindal 1991);

- Borlama tekniği, esnek değildir ve gaz ortamında sementasyon ve plazma nitrasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre maliyeti daha yüksektir.
- Gaz karbürizasyonu ve plazma nitrasyonu daha esnek tekniklerdir. Bu teknikler, daha az işçilik ve daha düşük maliyet gerektirir. İşlemlerin kısa sürede ve daha kolay gerçekleşmesi de borlamaya göre daha avantajlıdır. Bu sebeple, yüksek sertlik, dış ortamlara karşı yüksek aşınma direnci ve yüksek korozyon direncinin arzu edildiği durumlarda borlama işlemi tercih edilmektedir.
- Borlamaya tabi tutulan malzemelerde bor tabaka kalınlığının %5-20'si oranında boyutsal olarak artış olmaktadır. Örneğin, 25 µm'lik bir tabaka kalınlığı, 1,25-6,25 µm'lik bir büyümeye neden olmaktadır. Bu kalınlık artışı borlanan malzemenin cinsine ve borlama şartlarına bağlı olarak değişir.
- Çok hassas toleranslarla çalışmak gerektiği zaman, kaplama tabakasının işlenmesi ancak elmas takımlarla mümkündür. Yüzeyin geleneksel tekniklerle işlenmesi kaplama tabakasında kırılmalara neden olmaktadır. Bu da kaplama kalitesinde bozulmalara ve çatlamalara yol açmaktadır.
- Çoğu çeliklerin borlanması eğme yorulma dayanımında çok az etkilidir. Ancak, korozyonlu yorulma direncinde bir miktar gelişme olabilmektedir.
- Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların yuvarlanma temas yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde sementasyon ve nitrasyonla kıyaslandığı zaman, çok zayıftır. Dişli üretiminde sınırlı kullanılmasının sebebi buna dayanmaktadır (Bindal 1991).

2.6 Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulama Alanları

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 adhesiv ve abrasiv aşınma şartlarında birçok kullanım alanı mevcuttur (Sinha 1991, Bindal 1991, Şen 1998). Bunlar;

- 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 helisel dişlilerde (Şen 1998).

Abrasiv aşınmaya dirençli malzemeler olarak vidalı sürücüler ve kovanlar, delinmiş veya dar ve küçük açılmış faturalar, makaralar, valf elemanları, şaftlar, tamamlayıcılar paslanmaz çelik malzemelerden, ayrıca helikopter türbin çanakları ise borlanmış Ti-6Al-4V malzemeden imal edilmektedir. Bu kategori ile ilgili diğer uygulama alanları şunlardır (Şen 1998);

- Doldurma elemanlarının nozülleri,
- Ekstrüzyon sürücülerini, kovanlar, 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),
- Demir dışı metallerin döküm besleyicileri (AISI H11 çeliği),
- Linyit kömür briketlerin taşıma levhaları (Şen 1998).

Görüldüğü gibi borlama, otomotiv, tekstil, kalıp, plastik, cam ve seramik endüstrisinde kullanılan birçok parçanın ısıl işleminde kullanılmaktadır (Gürkan 2007). Çizelge 2.4'te borlamanın uygulama alanları görülmektedir.

Çizelge 2.4 Borlamanın uygulama alanları (Karaman 2003)

Makine sanayinde	Mandrenler, torna aynaları, zımbalar, miller, helezon gövdeleri, koruma merdaneleri, yatak kovanları, sevk kızakları, bilyalı mafsallar, kızgın buhar memeleri, konik dişli çarklar (mahruti dişliler), sıkıştırma regletleri, kavrama (debriyaj) baskı plakaları, istinat plakaları, rulman hadde silindirleri, devir makaraları, delik ve kalıp zımbaları, ezici ve karıştırıcı diskler,
Otomobil endüstrisinde	Transmisyon parçaları, kumanda esnek kolları, supaplar
Tarım sanayinde	Pulluk demirleri
İnşaat sanayinde	Beton imal etme parçaları, beton sevk etme parçaları
Sentetik madde sanayi ve Tekstil sanayinde	Enjektör meme plakaları, memeler (ağızlıklar), iplik kılavuzları, vites kutuları, darbe plakaları, ince borular, yuvarlak çakılar, sonsuz dişliler, silindirler
Kimya sanayinde	Pompa muhafazaları, pompa gömlekleri (asitlere karşı), vida gövdeleri
Seramik sanayinde	Delikli plakalar, baskı halkaları, pres zımbaları, ince borular, sonsuz dişliler, kesme masterları, cıvata başları ve vida dişleri, cüruf filtreleri, somunlar
Döküm sanayinde (Demir olmayan metaller, örneğin; hafif metaller, çinko alaşımları)	Yataklar, torna aynaları, mandrenler, taraklar, döküm ağızları, dökme borular, döküm maşaları, kütük kalıplar, karıştırıcılar

3. BORLANMIŞ ÇELİKLERİN AŞINMA VE SÜRTÜNME DAVRANIŞI

3.1 Aşınma

Aşınma birbiriyle temas eden malzemelerin birbirine sürtünmesinden dolayı meydana gelmektedir. Aşınma sisteminin özelliğine göre çeşitli mekanizmalarla ortaya çıkmaktadır. Aşınma; malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması neticesinde, mekanik etkenler ile yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu istenmeyen yüzey bozulmasının meydana gelmesi şeklinde tanımlanmaktadır (Özbek 2000).

Makinelerde ortaya çıkan arızaların ve konstrüksiyon elemanlarının kullanım dışı kalmasının en önemli sebeplerinden birisi aşınmadır. Sürtünme nasıl bir enerji kaybı nedeni ise, aşınmada tekrar geriye kazanılamayan bir madde kaybı sebebidir. Bu yüzden dünyada her yıl önemli ölçüde ekonomik kayıplar meydana gelmekte buna paralel olarak kayıpların önlenmesi için çeşitli tedbirler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Endüstride aşınmadan dolayı meydana gelen hasarların aşınma tiplerine göre yaklaşık oranları şu şekildedir (Eyre 1975):

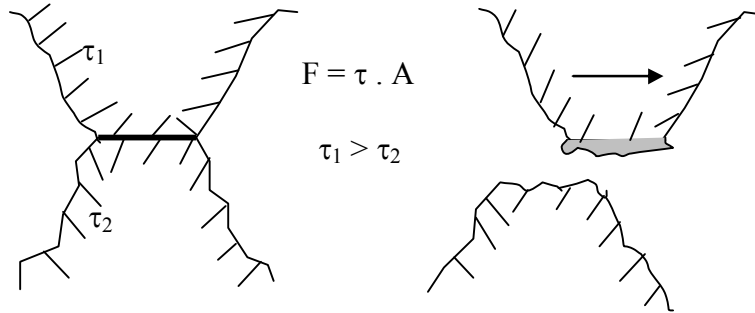
- Abrazif aşınma, %50
- Adhezif aşınma, %15
- Eroziv aşınma, %8
- Kimyasal aşınma, % 8
- Koroziv aşınma, %5
- Yorulma ve diğer aşınmalar, %14

3.1.1 Adhezif (Yapışma) Aşınması

Adhezif aşınma deneyleri özellikle vakum atmosferi altında yapılmaktadır. Çünkü temas yüzeylerinde oluşan tabii birikintiler ve oksidasyon ürünleri aşınmanın karakterini etkilemektedir. Aşınma deneyleri atmosferik şartlarda yağlamasız yapıldığında sürtünen yüzeyler arasında triooksidasyon ürünlerinin oluşturduğu bir

reaksiyon tabakası gözlenmiştir. Bu tabaka borlanmış tabakaları korurken, nitrülenmiş tabakaları tahrip etmektedir (Uzun 2002).

Adhezif aşınma en genel olarak, karşılıklı etkileşim içerisinde birbirlerine göre relatif hareket eden iki yüzeyin birisinden bir parçacığın koparak diğer yüzeye yapışması sonucunda, bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme taşınımı olarak tanımlanabilir. Basınç altında bir araya getirilmiş malzemelerde bulunan karşılıklı pürüzler, sürtünme ile oluşan ısı ve soğuk kaynaklaşma etkisi ile birbirlerine bağ yaparlar. Yüzeylerin relatif teğetsel hareketi, bağ kuvvetinin en zayıf olduğu noktadan kopmaya neden olur. Bunun neticesinde Şekil 3.1’de görüldüğü gibi bir yüzeyden diğerine malzeme transferi meydana gelir (Holberg and Matthews 1994).



Şekil 3.1 Adhezif aşınmanın temel mekanizması (Holberg, 1994).

Archard, adhezif aşınmanın ağırlıklı olduğu hallerde, bu aşınma tipi için aşağıdaki bağıntıyı deneylerden çıkarmıştır (Holberg and Matthews 1994):

$$V = \frac{K.W.s}{H} \quad (3.5)$$

Burada; V: Aşınma hacmi, K: Malzemeye ait bir sabit, W: Normal kuvvet (yük), H: Malzemenin sertliği, s: Kayma yolu.

Bu konuda yapılan teorik çalışmalar sonucunda, teorik yaklaşımlarda hemen hemen aynı sonuçlara varılmıştır. Bu sonuçlar şu şekilde özetlenebilir (Ulukan 1993):

- a) Adhezif aşınma miktarı, uygulanan yük ve kayma yolu ile doğru, malzemenin plastik akma mukavemeti ve sertliği ile ters orantılıdır.
- b) Sonuçlardaki farklılıklar, sadece malzeme sabitleri diyebileceğimiz katsayılarla olmaktadır.
- c) Yüksek hız, yüksek sıcaklık ve aşırı yükleme durumlarında, bu bağıntılarda sapmalar olabilir (Ulukan 1993).

Selçuk vd. (2003) AISI 1020 ve 5115 çeliklerini farklı sıcaklık (860, 930 ve 950°C) ve sürelerde (1,5, 3 ve 3,5 saat) karbürleme ve borlama işlemine tabi tutmuşlar ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Borlama sıcaklık ve süresine bağlı olarak 60-80 µm borür tabaka kalınlığı elde etmişlerdir. Borlanmış çeliklerde aşınma kaybının karbürlenmişlere göre daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Borlanan numunelerin yüksek yüklerde çatladığını, ince tabakalar halinde çatlamların olduğunu ve adhezif aşınmaların meydana geldiğini gözlemişlerdir (Selçuk *et al.* 2003).

Soydan vd. (2008), AISI 1050, 4140 ve 8620 çeliğini Ekabor I tozuyla 950°C'de 2 ve 8 saat süreyle kutu borlamışlardır. Borlama sonucunda süreye bağlı olarak 100 ve 200 µm borür tabakası elde etmişlerdir. Borlanmış çeliklerin aşınma direncinin borlanmamış çeliklere göre daha yüksek olduğunu gözlemişlerdir. Borlanmış her üç çeliğin aşınma oranlarında önemli bir farklılığın olmadığını tespit etmişlerdir. Yüksek yüklerde aşınma deneyleri sonucunda aşınma bölgesinde oksit yüzey filmlerinin kırıldığını ve yoğun adhezif aşınmaların meydana geldiğini görmüşlerdir. Önce borür tabakası üzerinde çok sayıda küçük çatlakların oluştuğunu, sonra bu çatlaklar kritik yoğunluğa ulaştıkça çatlamların ve bal peteği şeklinde kopmaların oluştuğunu da tespit etmişlerdir. Yüksek aşınma hızları sonucunda adhezif aşınmaların meydana geldiğini gözlemişlerdir (Soydan *et al.* 2003).

Ünlü ve Atik (2010) TS-DDK 40 dökme demir ve SAE 1020 çeliğini 950°C'de 4 saat süreyle kutu borlamışlar ve yağlı ortamda aşındırmışlardır. Borlama sonrasında sürtünme katsayılarının arttığını tespit etmişlerdir. Aşınma işlemi sonucunda yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma meydana geldiğini gözlemişlerdir. Borlanmamış numunelerde adhezif aşınmanın meydana geldiğini görmüşlerdir. Borlanmış çeliklerin

yağlı ortamda aşındırılmasının adhezif aşınmayı azalttığını tespit etmişlerdir. Borlanmamış numunelerin aşınma yüzeylerinin borlanmışlara göre daha pürüzlü olduğunu tespit etmişlerdir (Unlu and Atik 2010).

3.1.2 Abrazif Aşınma

Abrazif aşınma, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan partiküllerle temasta olması ve sert partiküllerin malzeme yüzeylerinden parçalar koparması ile meydana gelir. Sert partiküller ya dışarıdan sisteme girer veya adhezif aşınma ürünleri olarak sistem içinde meydana gelir. Buna göre, abrazif aşınma iki elemanlı veya üç elemanlı olarak meydana gelmektedir. İki elemanlı abrazif aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbirleri ile etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abrazif aşınma ise, ana ve karşı malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olacağı gibi, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilir (Ashby and Jones 1996). Sert bir yüzey yumuşak bir yüzey üzerine bastırıldığında, sert yüzey üzerindeki pürüzler yumuşak malzeme üzerinde lokal plastik akış meydana getirir. Teğetsel hareketin etkisiyle sert yüzey yumuşak yüzeyden malzeme kaldırır (Lipson and Colwell 1961). Abrazif aşınma mekanizmasında, sertlik aşındırıcı tane veya pürüzün boyut ve şekli, atak açısı, uygulanan normal yük, kayma hızı ve malzemelerin kırılma tokluğu önemli faktörlerdir.

Hutchings (1992), abrazif aşınma mekanizmasının plastik deformasyon veya gevrek kırılma olmak üzere iki şekilde meydana geldiğini belirlemiştir. Birinci durumda malzeme kaybı metallerdeki gibi plastik deformasyonla, ikinci durumda ise malzeme kaybı, özellikle seramiklerde ve düşük kırılma tokluğuna sahip malzemelerde olduğu gibi gevrek kırılma ile meydana gelmektedir. Çatlaklar, uygulanan yük kritik bir değeri (W^*) aştıktan sonra meydana gelmekte ve bu değer malzemelerin kırılma tokluğu ve sertliğine bağlı olarak

$$W^* \propto \left(\frac{K_c}{H}\right)^3 K_c \quad (3.1)$$

şeklinde değişim göstermektedir (Hutchings 1992).

Tabur vd. (2009), AISI 8620 çeliğini 850, 900 ve 950°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat süreyle borlayarak abrasiv aşınma davranışını incelemişlerdir. 10, 20 ve 30 N yük altında 80 ve 120 mesh lik Al₂O₃ abrazif ile 0.2 m/s hızda aşındırma işlemine tabi tutmuşlardır. Aynı borlama zamanında artan borlama sıcaklığıyla numuneleri aşınma direncinin azaldığını ve artan yükte birlikte aşınma hızının arttığını tespit etmişlerdir (Tabur *et al.* 2009).

Tabur vd. (2009), Hardox 400 çeliğini katı ortamda borlama tekniği kullanılarak borlanmıştır. Borlama malzemesi olara ticari şekilde piyasada bulunan EKabor® 2 tozunu kullanmışlardır. Borlama ısıl işlemi sırası ile her bir numuneye 2, 4 ve 6 saat sürelerde 850, 900 ve 950°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Farklı süre ve sıcaklıklarda borlanan numunelerin abrasif aşınma davranışları incelenmiştir. Borlanmış ve borlanmamış numuneler pin on disk aşınma cihazında 80 ve 120 mesh zımparalar ve 10, 20 ve 30 N yükler altında aşınma testine tabi tutulmuşlardır. Aşınma testleri 20 metre kayma mesafesinde ve 0,2 m/s kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mikroyapı görüntüleri ile aşınma yüzeyleri SEM ve optik mikroskop ile incelenmiştir. Daha uzun borlama süresinin daha kalın katman oluşmasını sağladığı görülmüştür. Aşınma testi sonuçlarında, 850°C' de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliği en iyi abrazif aşınma direnci göstermiştir (Tabur *et al.* 2009).

Er ve Par (2006) SAE 950C pulluk çeliğini 950°C'de 2, 4 ve 6 saat süreyle hem karbürlemişler hem de borlamışlardır. Karbürlenen ve borlanan numuneleri 42 N yük altında, 0,31 m/s kayma hızında aşınma işlemine tabi tutmuşlardır. Borlanan numunelerde aşınma kayıplarının karbürlenmişlere göre daha az olduğunu saptamışlardır. Ayrıca borlama sıcaklığının artmasıyla birlikte ağırlık kayıplarında düşüşlerin devam ettiğini gözlemişlerdir. Aşınma işlemi sonunda karbürlenmiş ve borlanmış SAE 950C çeliğinin aşınma bölgesinde çiziklerin, derin yarıkların, oyukların ve abrazif aşınmasının meydana geldiğini tespit etmişlerdir (Er ve Par 2009).

Ulutan vd. (2010), AISI 4140 çeliğininin yüzey özelliklerini su vererek, karbürleyerek, borlayarak ve plazma ark transferi (PTA) ile modifiye ederek aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Su verilmiş, karbürlenmiş ve borlanmış numunelerin aşınma yüzeylerinde abrazif çiziklerin oluştuğunu gözlemişlerdir. Herhangi bir işlem görmemiş

AISI 4140 çeliğinde yüksek miktarda aşınma enkazlarının, dar çiziklerin ve yüksek miktarda abrazif aşınmanın meydana geldiğini görmüşlerdir. Borlanmış numunelerde karbürleşmiş numunelere göre sertliğinin daha yüksek olmasına rağmen daha fazla ağırlık kaybı meydana geldiğini tespit etmişlerdir. En az ağırlık kaybı karbürleşmiş numunelerde sonra sırasıyla borlanmış, su verilmiş ve PTA ile yüzeyi modifiye edilen numunelerde meydana geldiğini ağırlık ölçümleri sonucunda elde etmişlerdir (Ulutan *et al.* 2009)..

Akbayır (2005) AISI 1030 çeliğini 900, 950, 1000 ve 1050°C’de 2, 4 ve 6 saat sürelerde, EKabor2 tozunda borlayarak numunelerin abrazif aşınma direncini incelemiştir. Borlanmış AISI 1030 çeliğinin Alüminyum Oksitli zımpara kâğıtları ile yapılan abrazif aşınma deney sonuçları incelendiğinde en az aşınmanın 950°C 6 saat, en çok aşınmanın da 1050°C 4 saat işlem uygulanmış numunelerde olduğu tespit edilmiştir. Borlanmış AISI 1030 çeliğinin silisyum karbürü zımpara kâğıtları ile yapılan abrazif aşınma deney sonuçları incelendiğinde en az aşınmanın 900°C 4 saat, en çok aşınmanın da 1050°C 2 saat işlem uygulanmış numunelerde olduğu tespit edilmiştir (Akbayır 2005).

Demirel ve Çetin (2011), AISI 8640 çeliğini Ekabor 2 tozu altında 850, 900 ve 950°C sıcaklıklarda 2, 4, 6, 8’er saat borlama işlemine tabi tutarak 10 ve 20 N yük altında 0,1 m/s kayma hızında 10 m kayma mesafesinde abrazif aşınma direncini belirlemişlerdir. En düşük aşınma kaybını 950°C’de 8 saat süreyle yapılan deneyler sonucunda elde etmişlerdir (Demirel ve Çetin 2011).

Yunker (2000), St 37-2, St 60-2, X155 CrVMo 12 1, X5CrNi 18 9 çeliklerini 900°C ‘de 2, 4, 6, 8 saat sürelerde ve katı ortamda Ekabor 3 tozu ile borlama, 565°C sıcaklıkta amonyak gazı atmosferinde gaz nitrürasyon işlemi, St 37-2 ve St 60-2 çeliklerine 930°C de tuz banyosunda sementasyon işlemi, X155 CrVMo 12 1 çeliğini de 1020°C sıcaklığa kadar ısıtıp yağda su vererek dönüşüm sertleştirme işlemi yapmıştır. Abraziv aşınma deneyleri yapmıştır. Aşındırıcı olarak ortalama 1 mm çapındaki 0,157 m/s hızla dönen kum içinde sabit duran numuneler her 5 saat süreler sonunda kumdan çıkararak alkolle temizlemiş ve ağırlık kayıplarını belirlemiştir. Her tartımdan sonra numuneler tekrar

aynı yüzeyi aşınacak şekilde aşınma kabına yerleştirilmiş ve toplam 40 saat boyunca aşındırma işlemine devam etmiştir. En iyi aşınma dayanımını borlanmış numunelerde elde etmiştir (Yunker 2000).

3.1.3 Yorulma ve Delaminasyon Aşınması

Delaminasyon aşınma teorisi ilk defa Suh tarafından açıklanmıştır. Bu teoriye göre, aşınma esnasında malzemenin yüzeyi veya yüzeyine çok yakın yerler yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip değildir. Kayma hareketinin devam etmesi ile, yüzeyden sonlu uzaklıktaki dislokasyonlar pekleşmeye uğrar. Bunun neticesinde küçük boşluklar oluşur. Malzeme içerisinde ikinci bir sert fazın olması bu boşlukların oluşumunu kuvvetlendirir. Zamanla, boşluklar büyür ve nihayetinde yüzeye paralel çatlaklar ortaya çıkar. Bu çatlaklar kritik bir kalınlığa ulaştıklarında, yüzey ile çatlak arasındaki malzeme, plaka şeklinde partiküller halinde kesilir. Bu partiküllerin şekli, uzunluğa ve iç gerilmelere bağlıdır. Suh, kendi teorisine dayanan aşınma denklemi de geliştirmiştir. Bu teoriye göre aşınma hızı, normal yük ve kayma uzunluğu ile doğru orantılıdır. Archard'ın aşınma denkleminin tersine sertliğe direk olarak bağlı değildir (Suh 1973).

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 bir çok aşınma prosesinde görülür. Neticede, malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur; bu ise, yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur (Holberg 1994).

Delaminasyon aşınması ise, birbiri üzerinde kayan yüzeylerde mikroskobik ölçekte ortaya çıkan bir çeşit yorulma aşınmasıdır. Temas bölgesinde oluşan basıncın sonucu yüzeyin hemen altında çatlaklar oluşur. Yükün daha fazla artması ve çatlağın deformasyonu, çatlağın yayılmasına ve diğer çatlaklarla birleşmesine neden olur. Çatlak yayılması yüzeye paraleldir. Nihayetinde plaka şeklinde yüzeyden kopmalar meydana gelir (Holberg and Matthews 1994).

3.1.4 Oksidasyon Aşınması

Oksidasyon aşınması, en yaygın karşılaşılan kimyasal aşınma proseslerinden biridir. Metallerin yüzeyinde ince bir oksit tabakası her zaman oluşabilmektedir. Bu tabaka aynı zamanda, sürtünme ve aşınmaya karşı koruyucu tabaka özelliğine sahip olabilir (Holberg and Matthews 1994). Oksidasyon aşınması teorisine göre, kayan iki yüzey arasında ortaya çıkan sürtünme ısı, metal yüzeyi üzerindeki oksit filminin kalınlığını artırmak için enerji sağlayabilir. Oksit filmi kritik bir kalınlığa ulaştığında çıkıntılar (asperities), aşınma partikülleri oluşturarak kırılırlar. Bu yığıntılar (debris) abrazyon aşınmayı başlatabilir. Oksidasyon aşınmasının adhezif aşınmadan bir derece daha düşük olduğu düşünülür. Bu şekilde aşındırıcı partikül oluşturma ihtimali temas basıncı, kayma hızı, sıcaklık ve çevre gibi aşınma ortamı özelliklerine ve korozyon potansiyeli, oksidasyon kinetiği, metalin oksijene afinitesi, mukavemet ve sertlik gibi aşınan metalin özelliklerine bağlıdır. Şartlar ince, sert ve yapışkan oksit filminin büyümesine izin verirse aşınma hızı, temas eden yüzeyler arasındaki adhezyonun azalmasına bağlı olarak azalabilir (Holberg and Matthews 1994).

Subrahmanyam ve Gopinath (1984) tek fazlı borür tabakasının çift fazlı borür tabakasından daha iyi aşınma direnci gösterdiğini belirlemişlerdir. FeB ve altlık malzemenin aşınma mekanizması abrazyon ve oksidatif, Fe₂B fazının ise oksidatif yorulma aşınma mekanizması olarak belirlemişlerdir (Subrahmanyam and Gopinath 1984).

Soydan vd. (2008), AISI 1050, 4140 ve 8620 çeliklerini Ekabor1 tozunda 950 °C de 2 ve 8 saat süreyle borladıktan sonra pin-on-disk aşınma cihazında 30-300 N yük altında 2 m/s kayma hızında aşındırmışlardır. Aşınma yükünün artmasıyla aşınma miktarının arttığı görülmüştür. Borlanmış çelikler oksidatif aşınma rejimi göstermiştir. Borlanmış tabakanın alt kısmındaki Fe₂B tabakalarında oksidatif yorulma aşınma mekanizması görülmüştür. Borlama adhezif aşınmayı minimize etmiştir. Borlanmış 8620 çeliğinin sertliği diğer iki çeliğe göre daha yüksek olmasına rağmen aşınma hızının en yüksek olduğunu tespit etmişlerdir (Soydan *et al.* 2008).

4. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan çelik malzeme, deney cihazları ve metotlar hakkında bilgiler verilmiştir.

4.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan $\varnothing 25 \times 8$ mm ebatlarındaki dişli çeliklerinin kimyasal analizi çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan dişli çeliklerinin kimyasal bileşimi.

Çelik Türü	Kimyasal Bileşim (% Ağırlıkça)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
GS18NiMoCr36	0,18	0,58	0,90	0,01	0,015	0,6	0,6	0,3
GS22NiMoCr56	0,22	0,60	0,92	0,01	0,005	0,9	0,6	0,9
GS32NiCrMo6.4	0,32	0,60	0,98	0,01	0,003	3,4	1,0	0,6

4.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Tez çalışmasında kullanılan cihazlar aşağıdaki resimlerde görülmektedir.



Resim 4.1 Isıl işlem fırını.



Resim 4.2 Metalografik numune zımparalama ve parlatma cihazı.



Resim 4.3 Optik mikroskop.



Resim 4.4 Mikrosertlik.



Resim 4.5 X-Işınları Difraksiyon Analiz Cihazı (XRD)



Resim 4.6 Taramalı elektron mikroskobu (SEM).



Resim 4.7 Aşınma cihazının görünüşü.

4.3 Borlama İşlemi

Deneyleerde makine parçalarında yaygın olarak kullanılan GS 18, GS 22 ve GS 32 dişli çelikleri kullanılmıştır. Ø25x8 mm boyutlarında işlenen dişli çelikleri kaplama işleminden önce gerekli zımpara işlemlerinden geçirilerek 1 µm Al₂O₃ solüsyonunda parlatılmışlardır. Deney numuneleri paslanmaz çelik kutu içerisinde Ekabor-II tozuna gömülmüştür. Dışarıdan oksijen akışını kesmek için yüzeye 2 mm civarında Ekrit tozu ile örtüldükten sonra potanın kapağı sıkıca kapatılarak, sıcaklığın ±1 °C hassasitle kontrol edilebilebildiği elektrik rezistanslı bir fırında 950 °C’de 2 ve 6 saat süreyle borlanmıştır. Borlama işlemi sonrasında numuneler kutu içerisinde oda sıcaklığına kadar havada soğutulmuştur. Aşağıda tezde gerçekleştirilen deney parametreleri çizelge 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.2 Deneyleerde kullanılan parametreler

DENEY PARAMETRELERİ				
Çelikler	18NiMoCr36, GS22NiMoCr56, GS32NiCrMo6.4			
Deney İşlem Sıcaklığı, (°C)	950			
Deney İşlem Süresi, (Saat)	2 ve 6			
Aşınma Deneyleeri				
Borlanmış dişli çelikler	950 (°C)	2 ve 6 saat		
Uygulanan Yük	Aşınma Mesafesi	Kayma Hızı		
10 N	500 metre	0.2	0.3	0.4

4.4 Metalografik İşlemler

Ekabor II bor tozuyla borlanan numuneler, kesitten kesilerek reçine ile kalıplanmış ve gerekli 240-1200 grid’lik zımparalama kademesinden geçirilmiştir. Parlatma işlemi 1µm alümina solüsyonun ile gerçekleştirilmiştir. Dağlayıcı olarak % 3’lük nital kullanılmıştır.

4.5 Borür Tabaka Kalınlıkları

Ekabor II tozuyla borlanmış numunelerin tabaka kalınlıkları Olmypus BX-60 optik mikroskoba bağlı bir aparat yardımıyla 20 farklı yerden alınan değerlerin aritmetik ortalamasından bor tabakası kalınlıkları hesaplanmıştır.

4.6 Mikro Sertlik Ölçümleri

Numunelerin yüzeylerinde oluşan bor tabakalarının sertlik ölçümleri SHIMADZU HMV-2 model sertlik cihazı ile yüzeyden merkeze doğru 50 gr. yük altında Vickers sertlik ölçme yöntemiyle ölçülmüştür.

4.7 X-Işınları Difraksiyon Analizi

Borlanmış dişli çeliklerinin yüzeylerinde oluşan fazların analizi Shimadzu XRD-6000 model X-ışınları cihazı yardımıyla tespit edilmiştir. X- ışını radyasyonu olarak CuK α radyasyonu kullanılmış olup numune yüzeyleri 2 θ , 20-90 derece arasında taranmıştır.

4.8 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elementer Dağılım Analizi (EDX)

Borlanmış numunelerin aşınma bölgelerinin mikro yapı analizleri LEO 1430 VP markalı taramalı elektron mikroskobunda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca borlanmış numunelerin mikro yapısındaki elementer dağılımları EDX yöntemiyle analiz edilmiştir.

4.9 Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

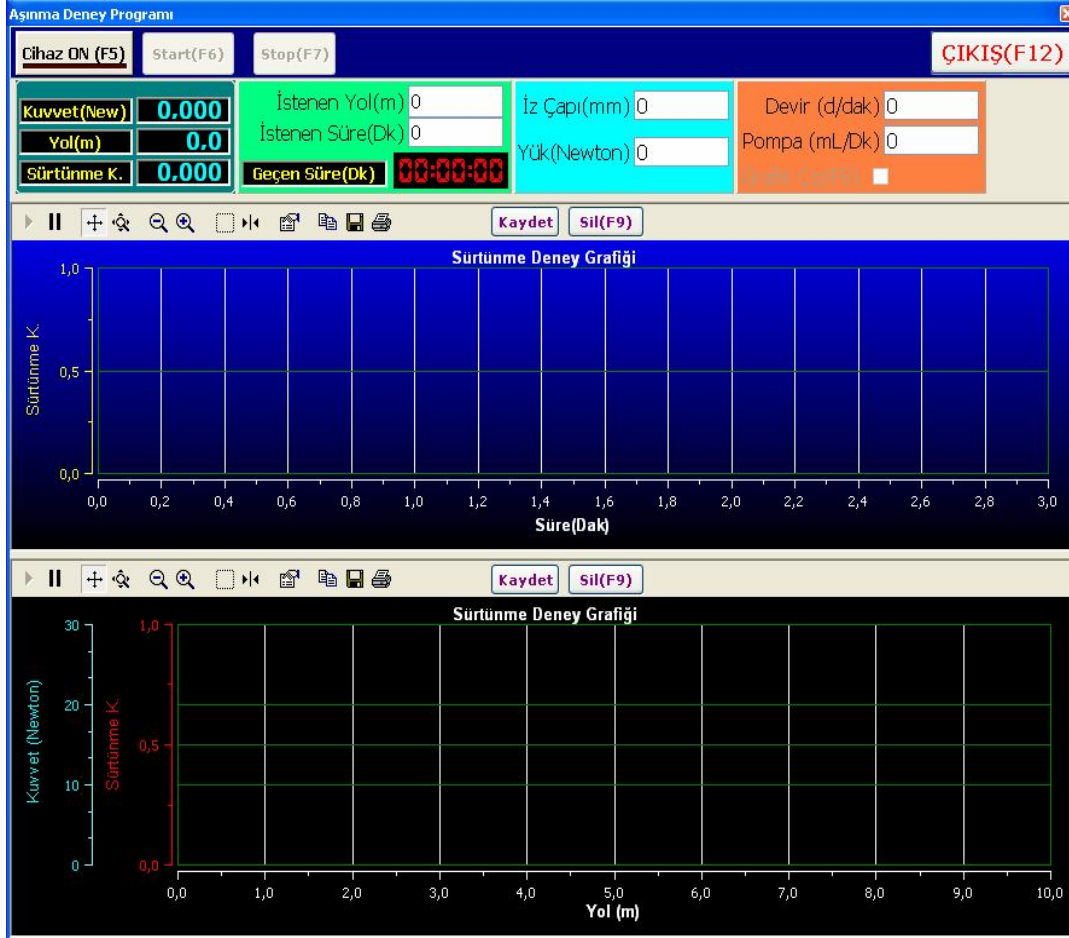
Deney numunelerinin yüzey pürüzlülük ölçümleri, Taylor-Hobson Rugosimeter taşınabilir yüzey pürüzlülük cihazı kullanılarak yapılmıştır.

4.10 Aşınma Deneyleri

Oda sıcaklığındaki aşınma testleri borlanmış numunelere uygulanmıştır. Aşınma testlerinde ASTM G99'a uygun olarak tasarlanan bilye-disk aşınma cihazı kullanılmıştır (Resim 4.7). Bu sistemde, sabit duran ve yüklemenin üzerinden yapıldığı bilye tutucu ve bunun karşısında dönme hareketi yapan bir disk vardır. Diskin hareketi, 0.7 KW gücünde, dikey olarak yerleştirilen bir A.C motoru ile sağlanmıştır. Motora bağlanan kontrol ünitesi ile bilgisayar programından devir sayısı 0-1000 dev/dak. arasında ayarlanabilmektedir.

Aşınma sırasındaki sürtünme katsayılarının belirlenmesi için yükleme kolunda bilye tutucuya yakın olan kısma yük ölçer (load cell) monte edilmiştir. Standart uzama ölçerle (strain gage) donatılmış ve Wheatstone köprü sistemine göre çalışan yük ölçer (load cell) vasıtasıyla bilye ve disk sistemindeki teğetsel kuvvetler tespit edilmiştir. Yük ölçerden alınan sinyaller ADAM-3016 amplifikatörde düzenlendikten sonra, I/O dönüştürücü kart (PCL-812PG) vasıtasıyla bilgisayara aktarılmaktadır. Sürtünme katsayısını ölçmek için Borland Delphi 5'de yapılan program, teğetsel kuvvetin yüke bölümü olan μ sürtünme katsayısını süreye bağlı olarak çizen bir grafik vermektedir. Program test boyunca, saniyede 15 veri almakta ve bu verilerin ortalamasını almaktadır.

Aşınma deneylerinde bilye olarak H.C. Starck Ceramics Gmbh firmasından temin edilen 8 mm çapında ve ortalama 1895 HV sertliğe sahip WC-Co bilyeler kullanılmıştır. Her deney için ayrı bir aşındırma elemanı kullanılarak, yüzeyin bozulmasından kaynaklanabilecek hatalar ortadan kaldırılmıştır. Aşınma deneyleri bilye disk sisteminde kuru sürtünme şartında oda sıcaklığında, 10 N yük altında, 0.2, 0.3 ve 0.4 m/s kayma hızlarında, 500 metre mesafe boyunca aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyi öncesinde ve sonrasında her bir numune ve aşındırma elemanı alkolle temizlenmiştir. Deney sonrası numunelerin aşınma hacimleri Rugosimeter cihazından elde edilen aşınma kesit alanlarının aşınma izi çevresiyle çarpımı sonucunda bulunmuştur. Aşınma hızı ise aşağıdaki formülle (4.1) hesaplanmıştır.



Resim 4.8 Aşınma deney programı

Aşınma hızı=Aşınan hacim miktarı/ (Uygulan yük x Kayma mesafesi), mm^3/Nm (4.1)

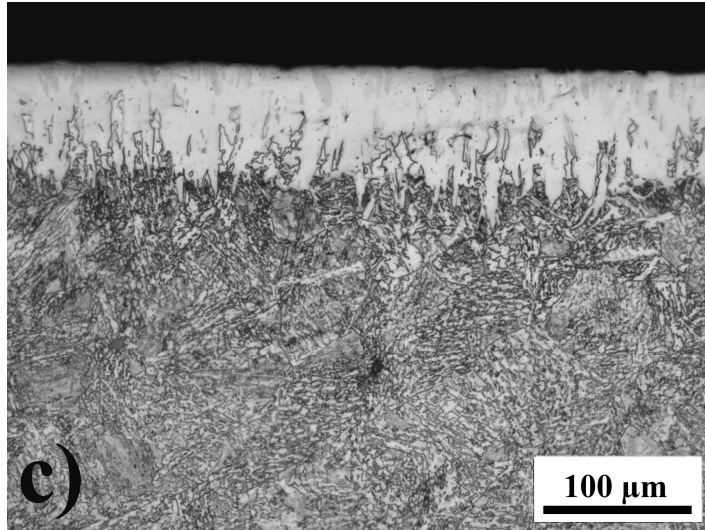
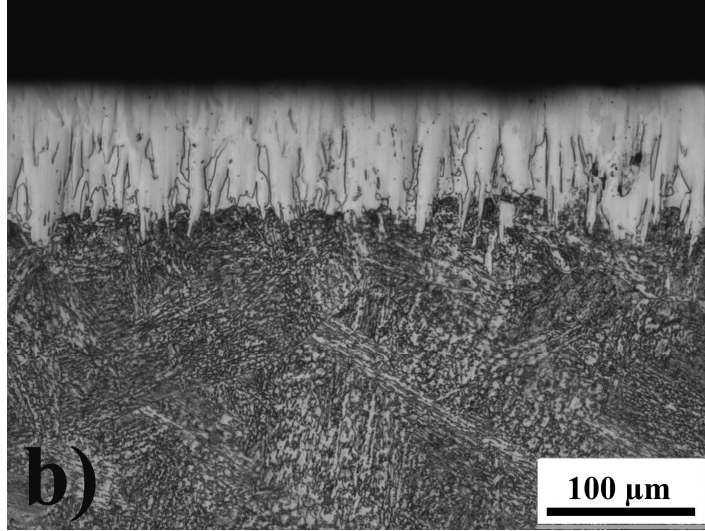
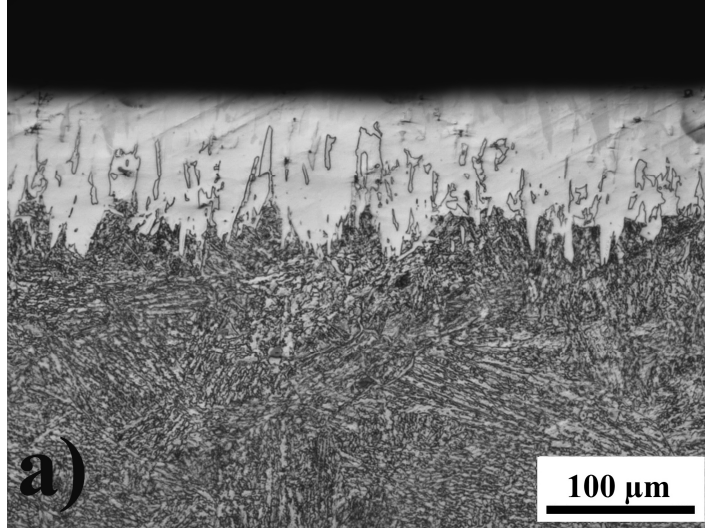
Sürtünme katsayısı programı vasıtasıyla kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda borlama süresine ve kayma hızlarına bağlı olarak sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülüğü ve aşınma oranı grafikleri çizilmiştir.

5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

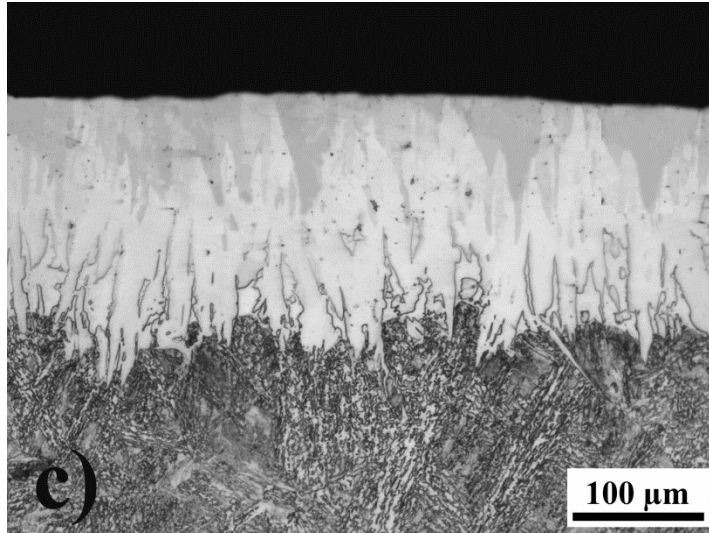
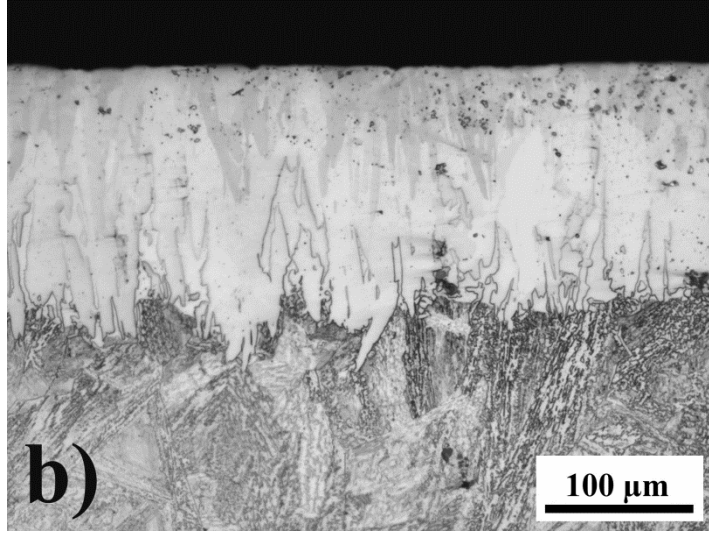
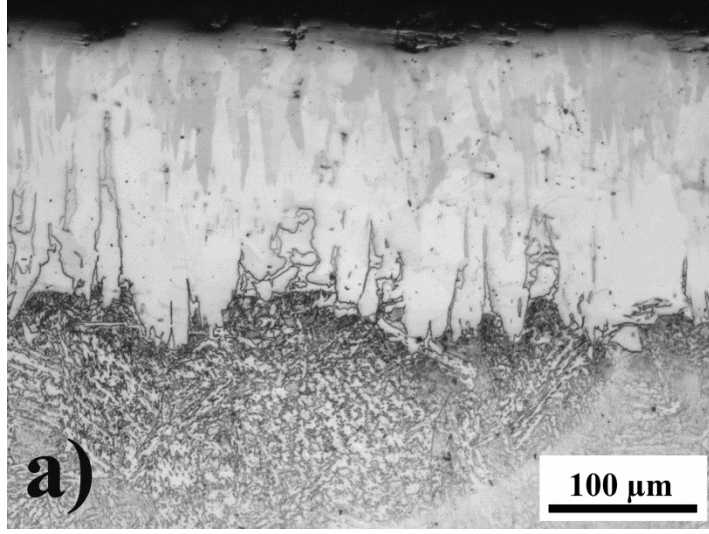
5.1 Borlanmış Dişli Çeliklerinin Yüzey Karakterizasyonu

Şekil 5.1’de 950°C’de 2 ve 6 saat süresince ticari Ekabor II tozuyla kutu borlanmış dişli çeliklerinin optik mikroskopta çekilen kesit mikro yapıları verilmiştir. Borlama işlemi sonucunda numuneler üzerinde borür testere dişi şeklinde borür tabalarının oluştuğu tespit edilmiştir. Optik mikroskop incelemelerinde koyu bölgeler FeB, açık renkteki bölgeler ise Fe₂B fazını göstermektedir. Literatürde de çeliklerin borlanması sonucunda FeB ve Fe₂B fazlarından meydana geldiği ve bu fazların mikroyapı incelemeler sonucunda belirgin bir şekilde ayrılmakta olduğu bilinmektedir (Culha *et al.* 2008, Campos-Silva *et al.* 2008, Gunes 2013).

Borlama sıcaklığı sabit, borlama süresinin artmasıyla birlikte borür tabaka kalınlıklarında artışlar gözlenmiştir. Literatürde de borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla borür tabaka kalınlığının arttığı bilinmektedir (Oliveria *et al.* 2010, Tabur *et al.* 2009). Daha yüksek sıcaklık ve borlama sürelerinde yüksek tabaka kalınlıklarına ulaşılmaktadır (Ozdemir *et al.* 2006). Bu durum difüzyon kontrollü tüm kaplama ve yüzey işlemlerinde beklenen bir sonuçtur (Şen 1998). Ticari Ekabor II bor tozuyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda FeB, Fe₂B, CrB ve Cr₂B fazları elde edilmiştir. Bu durum literatürde yer alan bulgularla uyum içerisindedir (Efe *et al.* 2008).



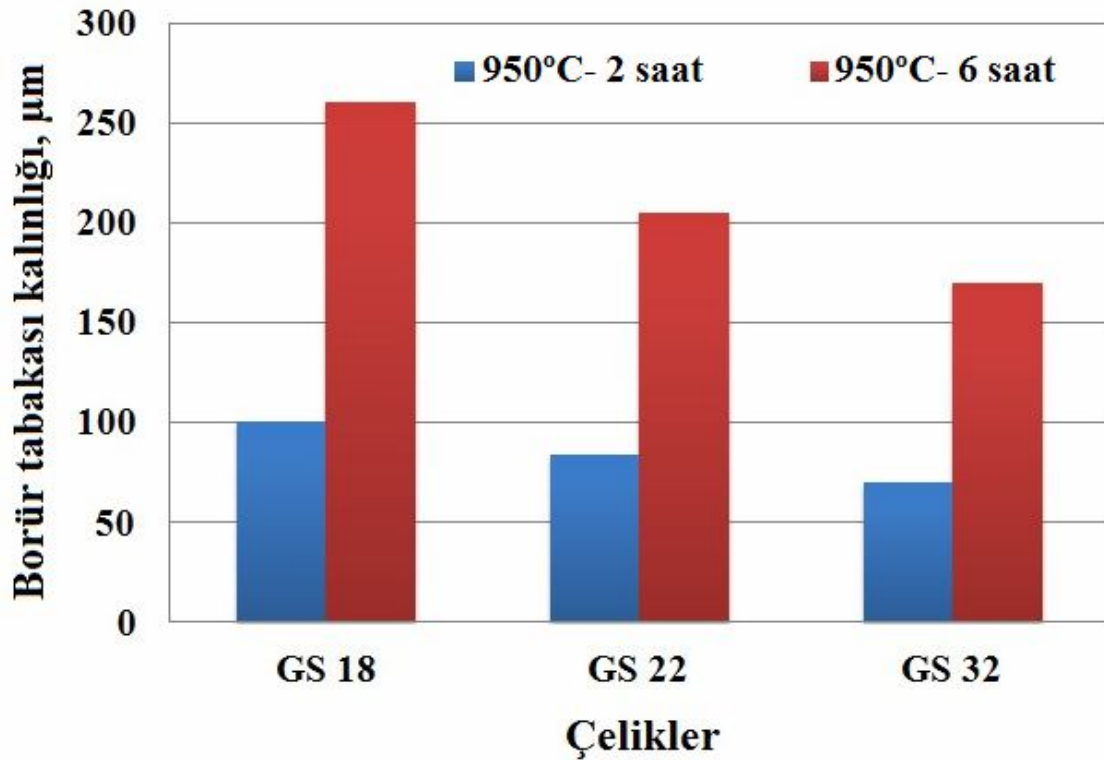
Şekil 5.1 950°C’de 2 saat süreyle borlanmış dişli çeliklerinin optik mikroskop kesit mikro yapıları, a) GS18, b) GS 22, c) GS 32.



Şekil 5.2 950°C'de 6 saat süreyle borlanmış dişli çeliklerinin optik mikroskop kesit mikro yapıları, a) GS18, b) GS 22, c) GS 32.

5.2 Borlanması Sonucunda Elde Edilen Borür Tabaka Kalınlıkları

Şekil 5.3'te Ekabor II tozuyla borlanmış dişli çeliklerinin borür tabaka kalınlıkları Olmypus BX-60 optik mikroskoba bağlı bir aparat yardımıyla 20 farklı yerden alınan değerlerin aritmetik ortalamasından bor tabakası kalınlıkları hesaplanmıştır. Borlama süresinin artmasıyla birlikte borür tabaka kalınlıklarının arttığı görülmüştür. Bu durum literatürle uyum göstermektedir (Ozdemir *et al.* 2006, Oliveria *et al.* 2010). En düşük bor tabaka kalınlığı 950°C'de 2 saat borlanmış GS 32 çeliğinde elde edilirken (70 µm), en yüksek bor tabakası (260 µm), 950°C'de 6 saat süresince borlanmış GS 18 çeliğinde elde edilmiştir. GS 32 çeliğinde alaşım elementleri ve karbon miktarının fazla olmasından dolayı oluşan borür tabaka kalınlıkları diğer GS 18 ve GS 22 çeliklerine göre daha düşüktür. Bu literatürle de uyumludur (Sinha 1991, Pertek *et al.* 2002, Campos *et al.* 2007, Taktak *et al.* 2006, Uslu *et al.* 2007, Ozbek *et al.* 2011, Kartal *et al.* 2011).

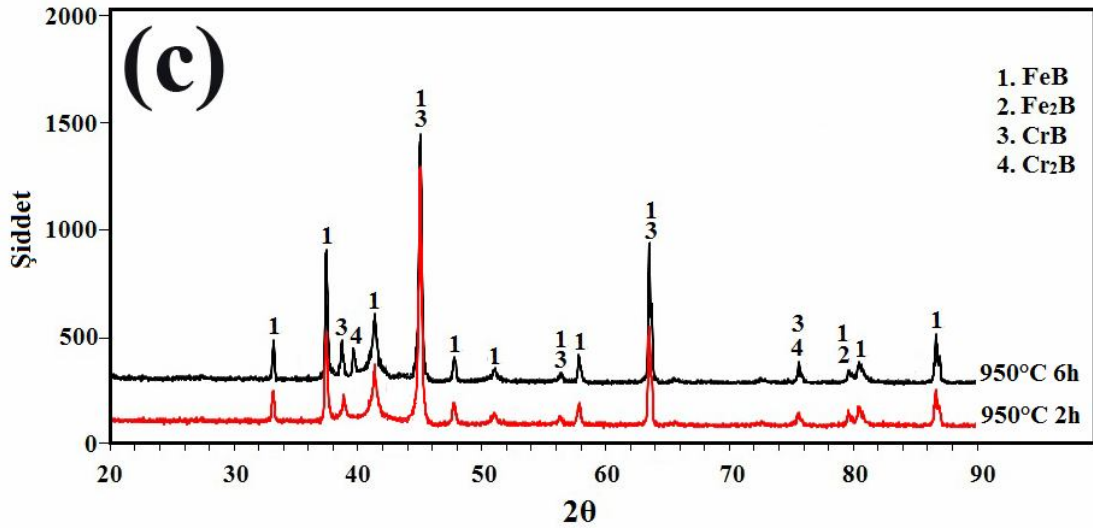
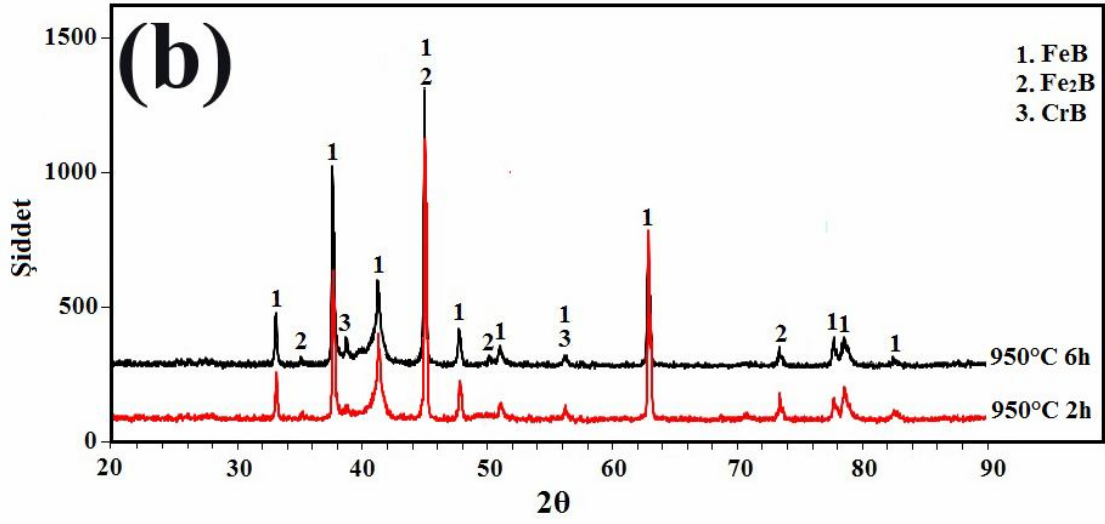
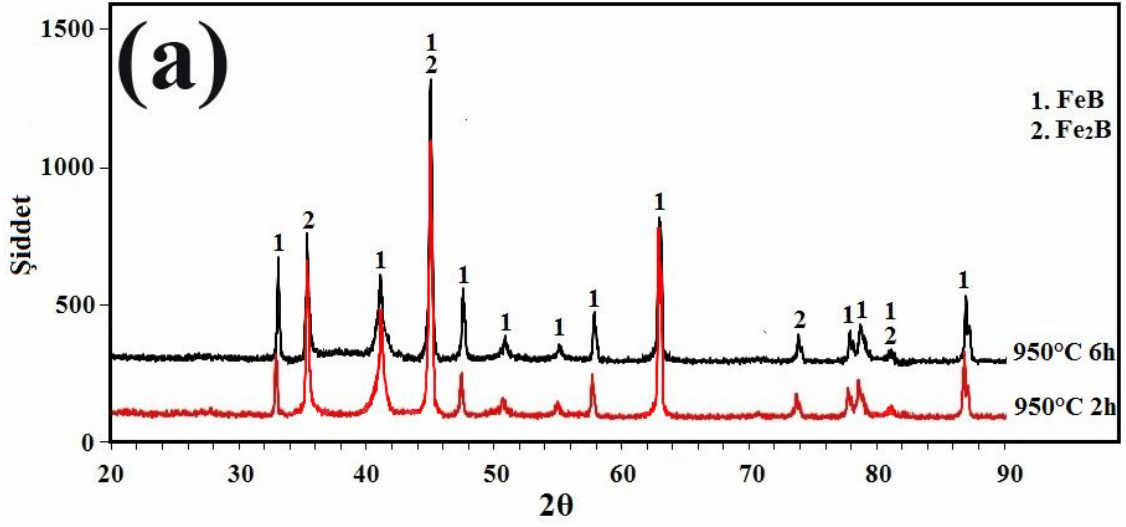


Şekil 5.3 Borlanmış dişli çeliklerinin borlama süresine göre borür tabaka kalınlıklarının değişimi.

Şen vd. (2001), arkadaşları soğuk iş takım çeliğini Ekabor I tozuyla 1000°C'de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlama işlemine tabi tutmuşlar ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Borlama sonucunda borür tabaka kalınlıklarının 70-140 µm arasında değiştiğini tespit etmişler ve borlama süresinin ve sıcaklığının artmasıyla birlikte borür tabaka kalınlıklarının arttığını deneyler sonucunda bulmuşlardır (Sen *et al.* 2001). Özdemir vd. (2006), % ağırlıkça 99,97 saf demiri ekabor tozları ile 800°C'de 2, 4 ve 8 saat süresince borlamışlardır. 130 HV olan sertliğin borlama sonunda 1700 HV sertlik değerlerine ulaştığını tespit etmişlerdir. Borlama süre ve sıcaklığına bağlı olarak borür tabaka kalınlıklarının 22 ile 43 µm arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir (Ozdemir *et al.* 2006). Ozdemir vd. (2008), AISI 316 paslanmaz çeliği 800, 875 ve 950°C'de 2, 4 ve 8 saat süreyle Ekabor tozuyla borlamışlar ve borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak borür tabakasının 7-87 µm arasında değiştiğini tespit etmişlerdir (Ozdemir *et al.* 2008). Campos vd. (2006), AISI 304 paslanmaz çeliğini önce 650°C'de argon gazı atmosferi altında 1 saat boyunca tavlamışlar sonra Dur-ferrit bor pastasıyla numune üzerlerine 4 ve 5 µm'luk pasta oluşturmuşlardır. 900, 950 ve 1000°C'de 4 ile 6 saat süresince borlama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Borlama süresi ve sıcaklığının artmasıyla borür tabaka kalınlıklarının arttığını tespit etmişlerdir (Campos *et al.* 2006). Oliveira vd. (2010), AISI D2 çeliğini 800 ve 1000°C'de 4 saat süreyle boraks, ferro titanyum ve alüminyumdan oluşan 3 farklı boraks banyosunda borlamışlardır ve borlama işlemi sonucunda borlama sıcaklığı artmasıyla birlikte borür tabaka kalınlıklarında artışların olduğunu gözlemlemişlerdir (Oliveira *et al.* 2006). Taktak (2007), AISI H13 ve 304 paslanmaz çeliğini %60 boraks, %20 kalsine borik asit, %20 ferro silisyum karışımında 800°C, 850°C, 900°C ve 950°C'de 3, 5 ve 7 saat sürelerde atmosferik şartlarda borlama yapmış ve borlama işlem süresi ve sıcaklığının borür tabaka kalınlıklarını ve yüzey pürüzlülük değerlerini arttığı sonucuna varmıştır (Taktak 2007).

5.3 Borlanmış Dişli Çeliklerinin X-Işınları Difraksiyon Analizi

Şekil 5.4'de kutu borlanmış dişli çeliklerinin XRD analizleri görülmektedir.



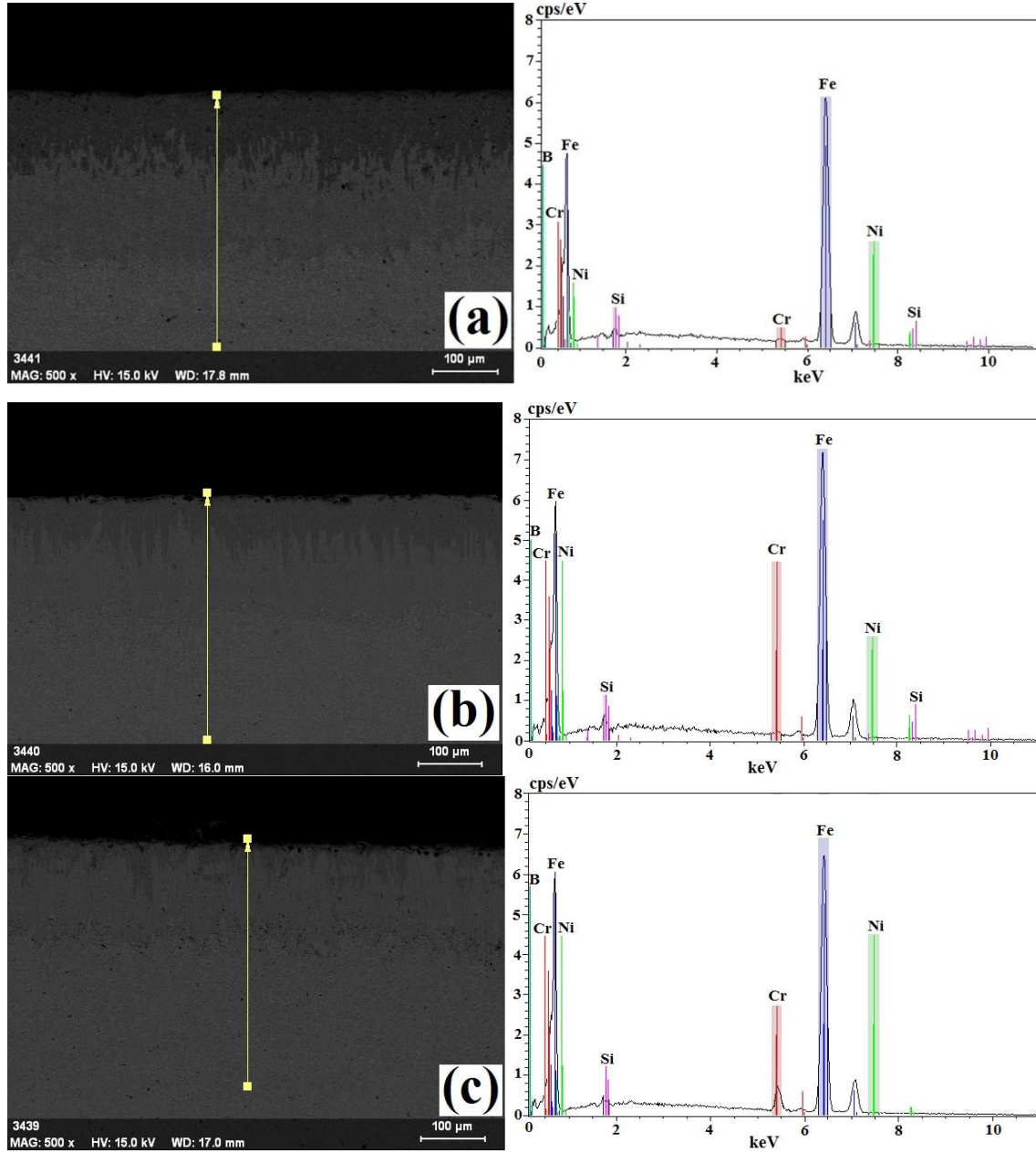
Şekil 5.4 Kutu borlanmış dişli çeliklerinin XRD analizleri, a) GS 18, b) GS 22, c) GS32.

Borlama işlemi sonucunda GS 18 çeliğinde çift fazlı (FeB+ Fe₂B) fazları, GS 22 çeliğinde FeB, Fe₂B, CrB ve GS 32 çeliğinde ise FeB, Fe₂B, CrB, Cr₂B fazları elde edilmiştir. Kutu borlama sıcaklığının artmasıyla birlikte CrB, Cr₂B ve FeB faz şiddetlerinde artışlar görülürken, Fe₂B faz şiddetinde ise azalma meydana gelmiştir. GS 32 çeliğinde Cr miktarının daha fazla olmasından dolayı CrB, Cr₂B fazlarının oluştuğu gözlenmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalarda alaşım elementi içeren çeliklerde, farklı borür fazları (CrB, Cr₂B, MnB, NiB, TiB, vs..) elde edilmiştir. Özbek vd. (2002), AISI 316L (X5CrNiMo17-12-2) çeliğini boraks, borik asit ve ferro-silisyum sıvı banyosunda 850°C, 900°C, 950°C ve 1000°C'de 2, 4, 6 saat sürelerde atmosferik şartlarda borlama yapılmışlar ve işlem sonucunda numuneleri havada soğutmuşlardır. Borlanmış yüzeylerin Fe₂B, CrB ve Ni₃B fazlarından meydana geldiği tespit edilmiştir. Özbek vd. (2004), AISI 440C (X105CrMo17) çeliğini Ekabor-2 tozu ile 950°C'de 2-8 saat sürelerde atmosferik şartlarda borlamışlar ve işlem sonucunda havada soğutma yapmışlardır. Borlanmış yüzeylerin FeB, Fe₂B, CrB, MnB ve Cr₂B fazlarından meydana geldiği tespit etmişlerdir (Ozbek *et al.* 2004).. Uslu vd. (2007), AISI 1040 ve P20 çeliklerini Ekabor II tozları kullanılarak 800, 875, 950°C sıcaklıklarda 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlamışlar ve AISI 1040 çeliğinde FeB ve Fe₂B fazları, AISI P20 çeliğinde ise FeB ve Fe₂B, MnB ve CrB fazlarını tespit etmişlerdir (Uslu *et al.* 2007). Taktak (2007), AISI H13 ve 304 paslanmaz çeliğini %60 boraks, %20 kalsine borik asit, %20 ferro silisyum karışımında 800°C, 850°C, 900°C ve 950°C'de 3, 5 ve 7 saat sürelerde atmosferik şartlarda borlama yapılmış ve işlem sonucunda H13 ve 304 paslanmaz çeliğinin bazı mekanik özelliklerini incelemiştir. 900°C'de 5 saat borlama sonucunda AISI H13 ve 304 çeliğinde sırasıyla FeB, Fe₂B, CrB ve FeB, Fe₂B, CrB ve Ni₃B fazlarını tespit etmiştir (Taktak 2007). Kaestner et al. (2001) saf Ti ve TiAl6V4 alaşımını Ar ve BCl₃ gaz karışımlarında 700°C, 800°C ve 900°C'de plazma borlamışlardır. XRD sonuçlarından borlama tabakasının TiB ve TiB₂ fazlarından oluştuğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca bor konsantrasyonunun artmasıyla sadece kaplama tabakasında TiB fazının oluştuğunu, daha düşük sıcaklıklarda borlama sonucunda ise sadece TiB₂ fazının oluştuğunu gözlemlemişlerdir (Kaestner *et al.* 2001).

5.4 Borlanmış Dişli Çeliklerinin EDX Analiz Sonuçları

Şekil 5.5'te kutu borlanmış dişli çeliklerinin EDX analizleri görülmektedir. Çizgisel EDX analizi sonucunda borlanmış GS 18, GS22 ve GS 32 dişli çeliklerinde Fe, Cr, Ni, ve az miktarda Si elementine rastlanmıştır.



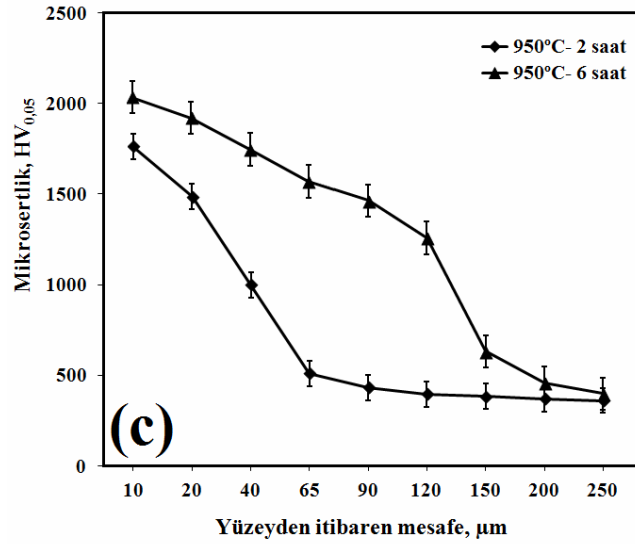
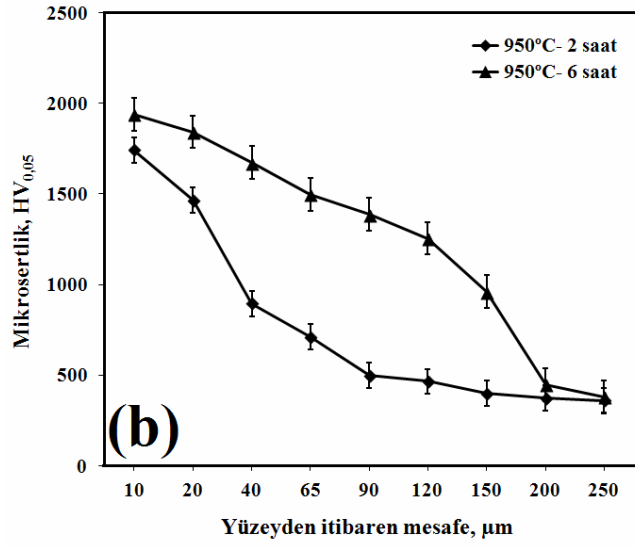
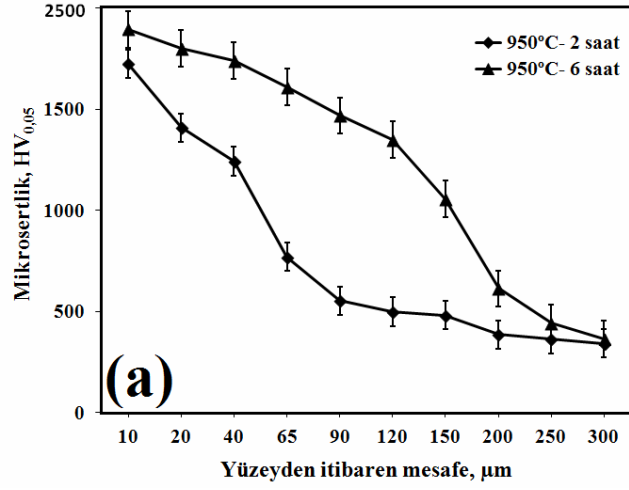
Şekil 5.5 Kutu borlanmış dişli çeliklerinin EDX analizleri, a) GS 18, b) GS 22, c) GS32.

Taramalı elektron mikroskobu ile dişli çeliklerinin yüzeyinde oluşan borür kaplama tabakasının yapısı ve elementlerin tabaka içerisinde dağılımları ve (SEM-BEI) görüntüleri lineer elementer analiz tekniğiyle (EDX) incelenmiştir. İncelemeler sonucunda mikroyapılarda testere dişi şeklindeki kolanlarda farklı bileşiklerin oluştuğunu görmek mümkün olmuştur. Kaplama tabakasının dış yüzeyinin SEM-BEI mikroyapılarında koyu renkli alanlar FeB fazının, daha iç kısımda ise açık renkli alanların Fe₂B fazının varlığını göstermektedir. Aynı zamanda x-ışınları ve lineer elementel analizler sonuçları, daha önce x-ışınlarında tespit edilmiş olan CrB ve Cr₂B fazlarının var oluşunu da destekler niteliktedir.

5.5 Borlanmış Dişli Çeliklerinin Mikrosertlik Sonuçları

Şekil 5.6'da Ekabor II tozuyla kutu borlanmış dişli çeliklerine ait yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımlarını gösteren grafikler görülmektedir. Ekabor II tozuyla kutu borlama sonucunda oluşan FeB, Fe₂B, CrB ve Cr₂B fazlarından dolayı yüzey sertliklerinin yüksek olduğu görülmektedir. CrB ve Cr₂B fazları FeB ve Fe₂B fazlarına göre daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu bilinmektedir (Taktak.2007, Gunes *et al.* 2011). Borlanmış GS 18, GS 22 ve GS 32 dişli çeliklerinde mikro sertlik değerlerinin sırasıyla 1624-1905 HV_{0,05}, 1702-1948 HV_{0,05}, ve 1745 to 2034 HV_{0,05} arasında değiştiği tespit edilmiştir. Herhangi bir işlem görmemiş GS 18, GS 22 ve GS 32 dişli çeliklerinin sırasıyla 335 HV_{0,05}, 358 HV_{0,05} ve 411 HV_{0,05} mikro sertlik değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Borlama süresinin artmasıyla birlikte bor tabakalarının sertlik değerleri artmıştır. Bu durum literatürle de uyumludur (Taktak *et al.* 2006, Gunes and Taktak 2012).

Genel vd. (2003), AISI W1 çeliğini 850, 900, 950, 1000 ve 1050°C'de 1-8 saat boyunca Ekabor I tozuyla kutu borlama sonucunda 1800 HV sertlik değeri elde etmişlerdir (Genel *et al.* 2003). Genel (2006), H13 çeliğini Ekabor I tozuyla 800, 900 ve 1000°C'de 1-5 saat süresince borlamış ve 1650-2000 HV arasında değişen sertlik değeri elde etmiştir (Genel 2006). Özdemir vd. (2008), AISI 316 paslanmaz çeliği 800, 875 ve 950°C'de 2, 4 ve 8 saat süresince Ekabor I tozuyla kutu borlamışlardır. Borlama sonucunda 1700 HV borür tabaka sertlik değeri elde etmişlerdir (Ozdemir *et al.* 2008).



Şekil 5.6 Borlanmış dişli çeliklerinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımları, a) GS 18, b) GS 22, c) GS 32.

Ozbek vd. (2002), AISI 316L paslanmaz çeliğini boraks, borik asit ve ferrosilisyumla 850, 900, 950 ve 1000°C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlamışlar ve 1500 HV sertlik değeri tespit etmişlerdir (Ozbek *et al.* 2002). Efe vd. (2008), 31CrMoV9 ve 34CrAlNi7 çeliklerini 850, 900 ve 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süreyle Ekabor II tozuyla borlamışlar ve kinetik özelliklerini incelemişlerdir. Borlama işleminin sonucunda sertlik değerleri 31CrMoV9 ve 34CrAlNi7 çeliklerinin sırasıyla 1672 HV ve 1600 HV sertlik değerlerine sahip olduklarını bulmuşlardır (Efe *et al.* 2008). Li vd. (2008), Cr12Mn2V2 çeliğini 900 ve 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süresince B₄C, KBF₄ ve SiC oluşan toz karışımlarında borlamışlardır. Borlama işlem sonunda Cr ve V’un FeB oluşumuna yardımcı olduğunu ancak testere dişi görünümünün yani kolonsallığın azaldığını tespit etmişlerdir. Borür tabakalarının borlama sıcaklık ve süresine göre 8 ile 33 µm arasında ve borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla sertlik değerlerinde artışların olduğunu gözlemlemişlerdir (Li *et al.* 2008).

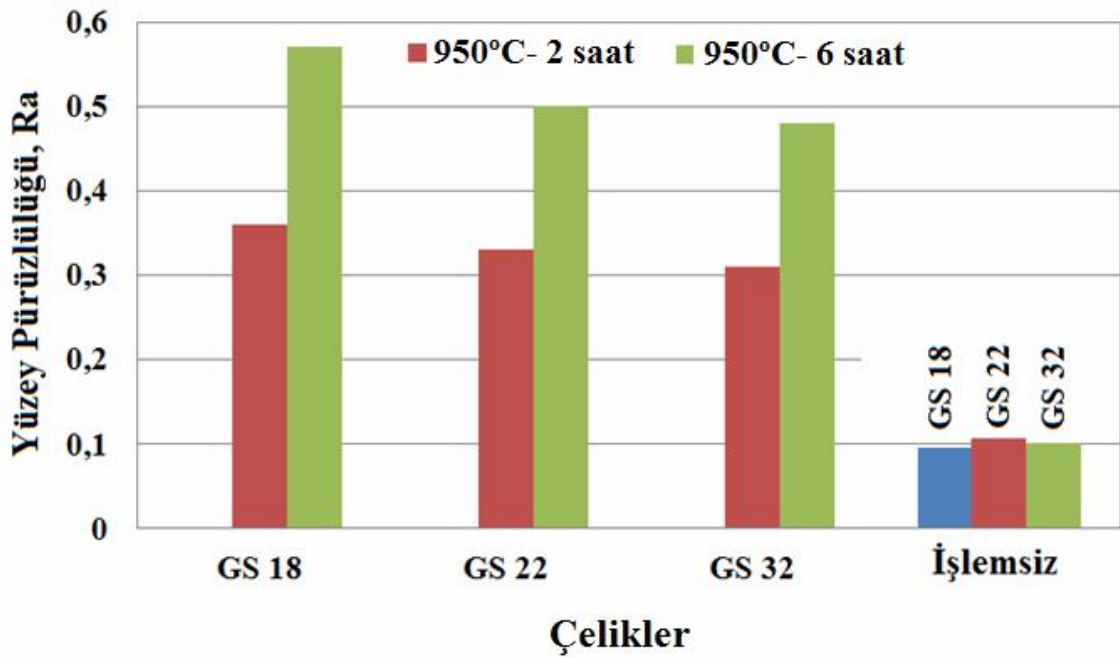
5.6 Borlanmış Dişli Çeliklerinin Aşınma Özellikleri

5.6.1 Borür Tabakalarının Yüzey Pürüzlülüğü

Şekil 5.7’de borlanmış dişli çeliklerinin borlama öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değerlerindeki değişimi görülmektedir. Borlama süresinin artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülük değerlerinde artışlar gözlenmiştir. Bu durum literatürlede uyumludur (Taktak 2007, Şahin 2009).

Şahin (2009), AISI 1020, 1040 ve 2714 çeliklerini 900°C’de 2 ve 4 saat süreyle Ekabor I tozuyla borlamışlardır. İşlem sonunda AISI 1020 ve 1040 çeliklerinde borür tabaka kalınlığı numune boyutlarında 1/50 oranında artış yaparken AISI 2714 çeliğinde 1/30 oranında artış meydana geldiğini bulmuşlardır. Borlama süresinin artmasıyla AISI 1020 ve 1040 çeliklerinde yüzey pürüzlülük değerlerinin artarken, AISI 2714 çeliğinde 2 saatten sonra sabit olarak devam ettiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca borlama süresinin artmasıyla her üç çeliğin boyutlarında artış meydana geldiğini ancak 2 saatten sonra boyutlarda artış hızının yavaş bir şekilde arttığını tespit etmişlerdir (Şahin 2009). Taktak (2007), AISI H13 ve 304 paslanmaz çeliğini %60 boraks, %20 kalsine borik asit, %20

ferro silisyum karışımında 800°C, 850°C, 900°C ve 950°C’de 3, 5 ve 7 saat sürelerde atmosferik şartlarda borlama yapılmış ve işlem sonucunda H13 ve 304 paslanmaz çeliğinin bazı mekanik özelliklerini incelemiştir. 900°C’de 5 saat borlama sonucunda AISI H13 ve 304 çeliğinde sırasıyla FeB, Fe₂B, CrB ve FeB, Fe₂B, CrB ve Ni₃B fazlarını tespit etmiştir. Bor tabaka kalınlıkları ise sırasıyla AISI H13 ve 304 çeliğinin 8-58µm, 4-42 µm bulmuştur. Borlama sonucu elde edilmiş mikro sertlikler sırasıyla 1860 ve 2150 HV olarak bulmuştur. Sonuç olarak borlama işlem süresi ve sıcaklığının artmasıyla yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı sonucuna varmıştır (Taktak 2007).



Şekil 5.7 Dişli çeliklerinin farklı borlama sürelerindeki yüzey pürüzlülük değerleri

5.6.2 Borür Tabakalarının Sürtünme Katsayısı

Çizelge 5.1’de farklı sürelerde borlanmış dişli çeliklerinin farklı kayma hızlarındaki sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir. Borlanmış dişli çeliklerinin sürtünme katsayıları GS 18, GS 22 ve GS 32 için sırasıyla 0.42-0.59, 0.41-0.56 ve 0.35-0.51 arasında değiştiği görülmüştür. Kayma hızının ve borlama süresinin artmasıyla

borlanmış dişli çeliklerinin sürtünme katsayısı değerlerinde düşüşlerin olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.1 Borlanmış dişli çeliklerinin 10 N yük altında farklı kayma hızlarına göre sürtünme katsayılarının değişimi.

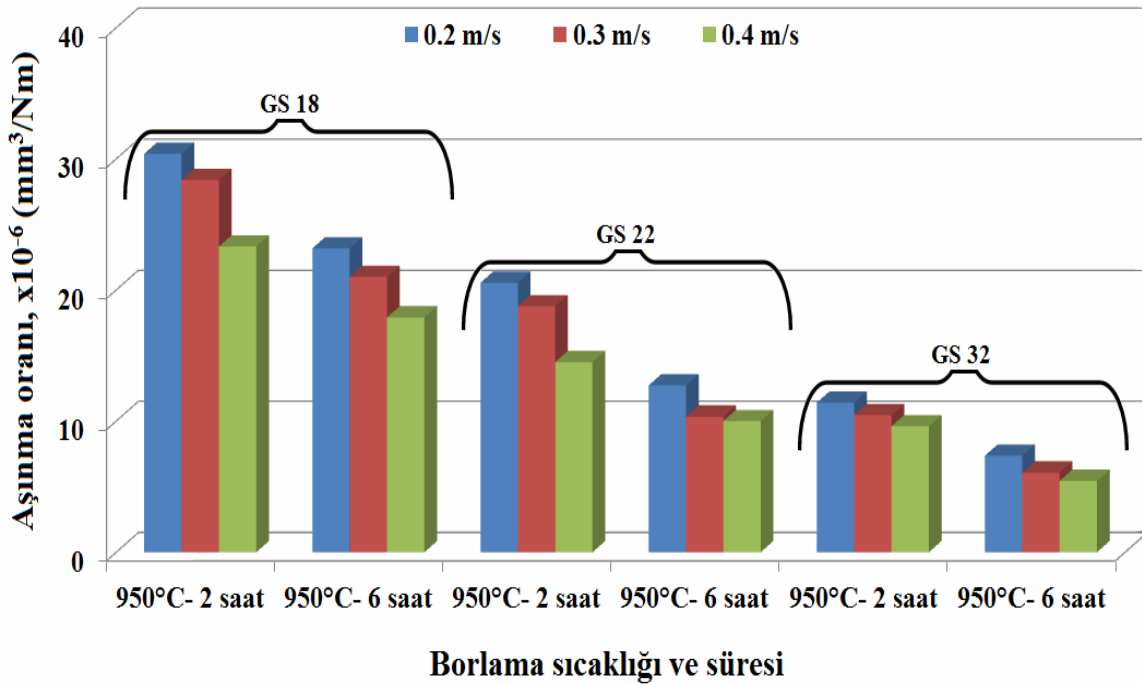
Çelikler	Borlama Sıcaklığı (°C) ve Süresi (saat)	Sürtünme Katsayısı		
		Kayma Hızı		
		0.2 m/s	0.3 m/s	0.4 m/s
GS18NiMoCr36	950°C - 2 saat	0.55	0.50	0.44
	950°C - 6 saat	0.59	0.55	0.42
GS22NiMoCr56	950°C - 2 saat	0.51	0.48	0.42
	950°C - 6 saat	0.56	0.53	0.41
GS32NiCrMo6.4	950°C - 2 saat	0.49	0.45	0.37
	950°C - 6 saat	0.51	0.46	0.35

Genel olarak 0.2 ve 0.3 m/s kayma hızlarında birbirine yakın sürtünme katsayıları elde edilirken, kayma hızının 0.4 m/s'ye yükselmesiyle sürtünme katsayısı değerlerinde büyük oranda düşüşler görülmüştür. Bunun durum yüksek kayma hızlarında sürtünmeden dolayı, numune yüzeylerinin ısınarak yüzeylerinde oksitlerin oluşmasından kaynaklanabilir. Yapılan çalışmalarda da sürtünme ısınından dolayı numune yüzeylerinde oksitlerin oluştuğu rapor edilmiştir (Ulutan *et al.* 2010, Erdemir 2005, Ahn *et al.* 1999). Ayrıca aşınma testi sırasında numune yüzeylerinde oluşan oksitlerin, sürtünme katsayısının düşmesine neden olmuş olabilir. Literatürde yapılan çalışmalarda numune yüzeylerinde oluşan oksitlerin aşınma işlemini etkilediği bilinmektedir (Subrahmanyam *et al.* 1984, Eyre 1975, Habig *et al.* 1991, Venkataraman *et al.* 1995). Straffelini vd. (2011), östemperlenmiş dökme demirin oksidatif aşınmasına kayma hızının ve temas basıncının etkisini araştırmışlar ve kayma hızının artmasıyla birlikte sürtünme katsayısının ve aşınma hızının düştüğünü tespit etmişlerdir (Straffelini *et al.* 2011). Das vd. (2009), kriyojenik işlem görmüş AISI D2 çeliğini 48 ve 98 N yük

altında, farklı kayma hızlarında (0,1 m/sn ve 0,2 m/sn), aşınma işlemine tabi tutmuşlardır. Aşınma işlemi sonucunda kayma hızının artmasıyla birlikte aşınma hızında azalmalar gözlemlenmiştir (Das et al. 2009).

5.6.3 Borür Tabakalarının Aşınma Oranı

Şekil 5.8’de farklı sürelerde borlanmış dişli çeliklerinin, kayma hızlarına göre aşınma oranlarının değişimi görülmektedir. Borlama süresinin artmasıyla birlikte her üç çeliğin aşınma oranlarında azalmalar meydana gelmiştir. Ayrıca kayma hızlarının artmasıyla aşınma oranlarında düşüşler meydana gelmiştir. En düşük aşınma oranı 950°C’de 6 saat borlanmış GS 32 çeliğinde görülürken, en yüksek aşınma oranı 850°C’de 2 saat borlanmış GS 18 çeliğinde görülmüştür. Uzun borlama sürelerinde elde edilen sert borür fazlarından dolayı (FeB, CrB) aşınma oranlarında düşüşler gözlenmiştir. Literatürde de benzer sonuçlar elde edilmiştir (Martini *et al.* 2004, Uslu *et al.* 2007).

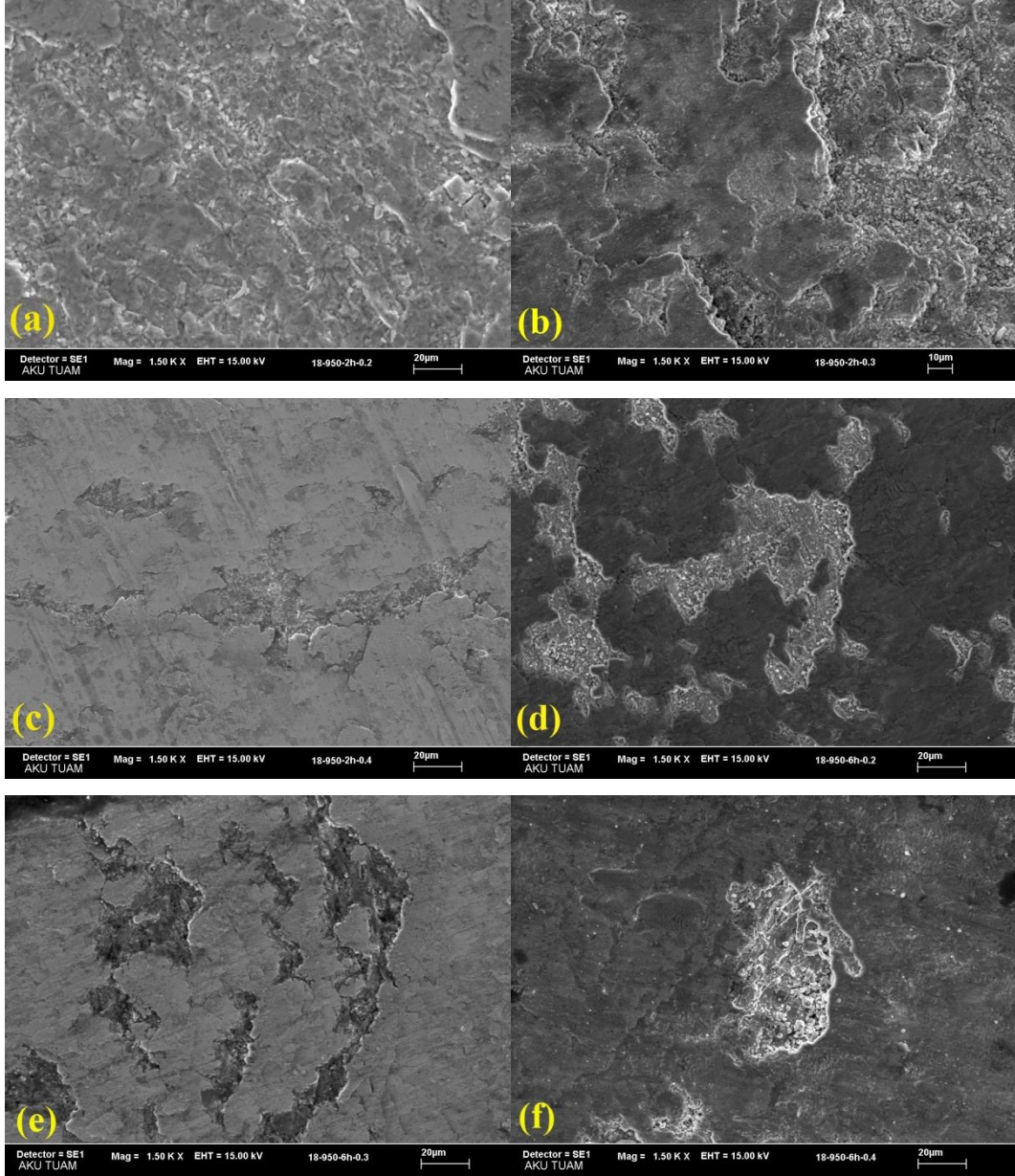


Şekil 5.8 Farklı sürelerde borlanmış dişli çeliklerinin, farklı kayma hızlarına göre aşınma oranlarının değişimi

Tabur vd. (2009), AISI 8620 çeliğini 850, 900 ve 950°C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle kutu borlamışlar ve farklı yüklemelerde aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Borlama sonucunda sertlik değerlerinin 1650-1850 HV arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Borlama süresinin ve sıcaklığın artmasıyla beraber borür tabaka kalınlıklarının arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca borlama süresinin artmasıyla aşınma oranının azaldığını gözlememişlerdir (Tabur *et al.* 2009). Er ve Par (2006), SAE 950C çeliğini 950°C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle Ekabor II bor tozuyla borlamışlar ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Deney sonucunda borlama süresinin artmasıyla birlikte aşınma miktarlarında düşüşlerin olduğunu tespit etmişlerdir. (Er and Par 2009).

5.6.4 Borlanmış GS 18 Dişli Çeliğinin Aşınma Bölgelerindeki SEM Mikroyapıları

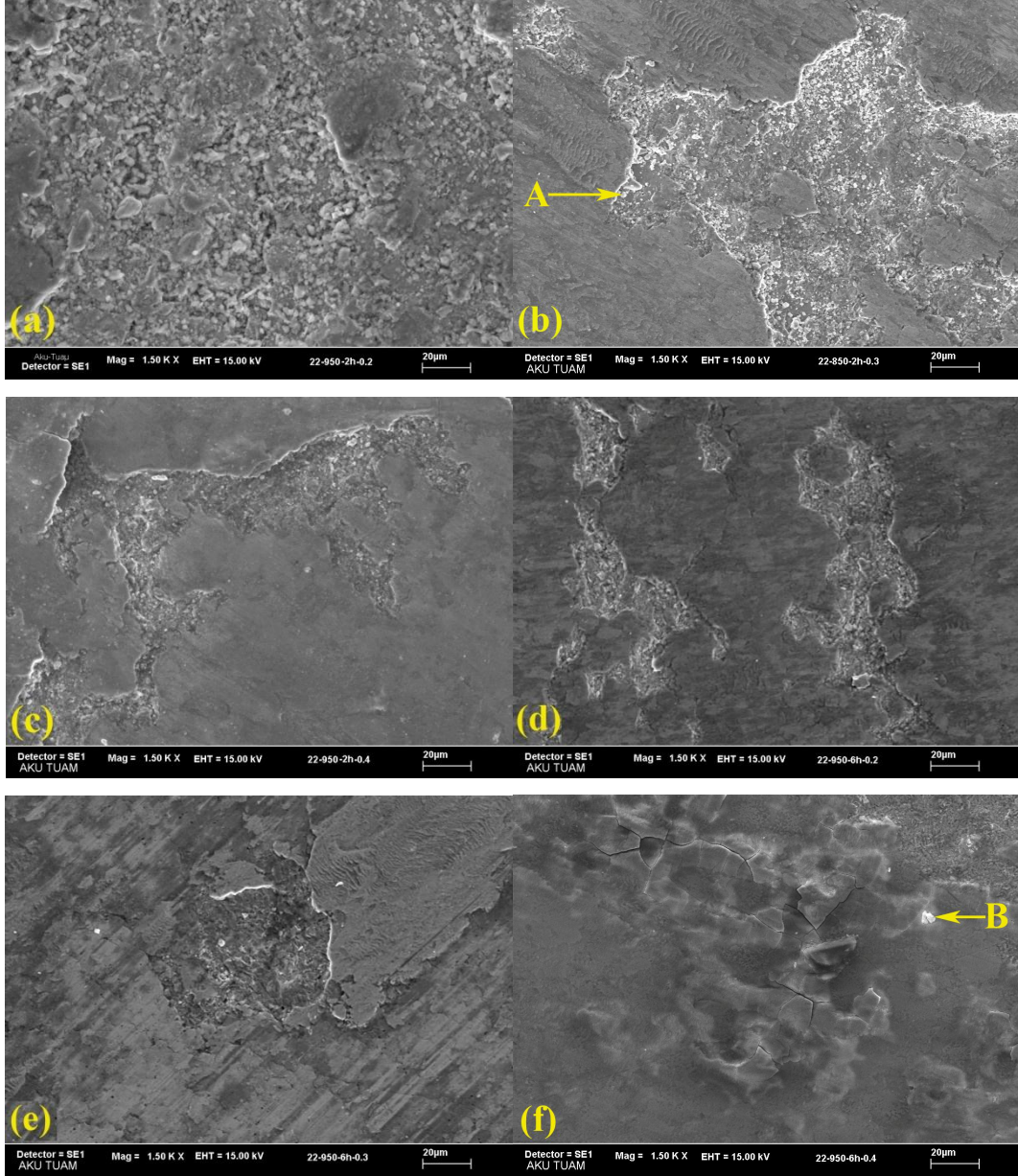
Şekil 5.9’da farklı kayma hızlarında aşınmış GS 18 çeliğine ait aşınma yüzeylerinin SEM mikroyapıları görülmektedir. Borlanmış numunelerin aşınma bölgelerinde debrisler, yüzey çizikleri ve mikro çatlakların olduğu görülmektedir (Şekil 5.9a-f). Ayrıca borlanmış numunelerin aşınma izlerinde, mikro çatlakların ilerlemesiyle oluşan delaminasyon aşınmalarının olduğu gözlenmiştir. Kayma hızının artmasıyla borlanmış numunelerin yüzeylerinde aşınma şiddetinin azaldığı görülmüştür (Şekil 5.9a-c ve 5.9d-f). Kayma hızının artmasıyla numune yüzeylerinde oksidasyon artmaktadır. Bu durum aşınma bölgesinde daha pürüzsüz bir yüzey görünümü sağlamaktadır (Şekil 5.9f).



Şekil 5.9 Borlanmış GS 18 dişli çeliğinin, farklı kayma hızlarına göre SEM aşınma mikro yapıları; a) 950°C-2 saat: 0.2m/s, b) 950°C-2 saat: 0.3m/s, c) 950°C-2 saat: 0.4m/s, d) 950°C-6 saat: 0.2m/s, e) 950°C-6 saat: 0.3m/s, f) 950°C-6 saat: 0.4m/s.

5.6.5 Borlanmış GS 22 Dişli Çeliğinin Aşınma Bölgelerindeki SEM Mikroyapıları

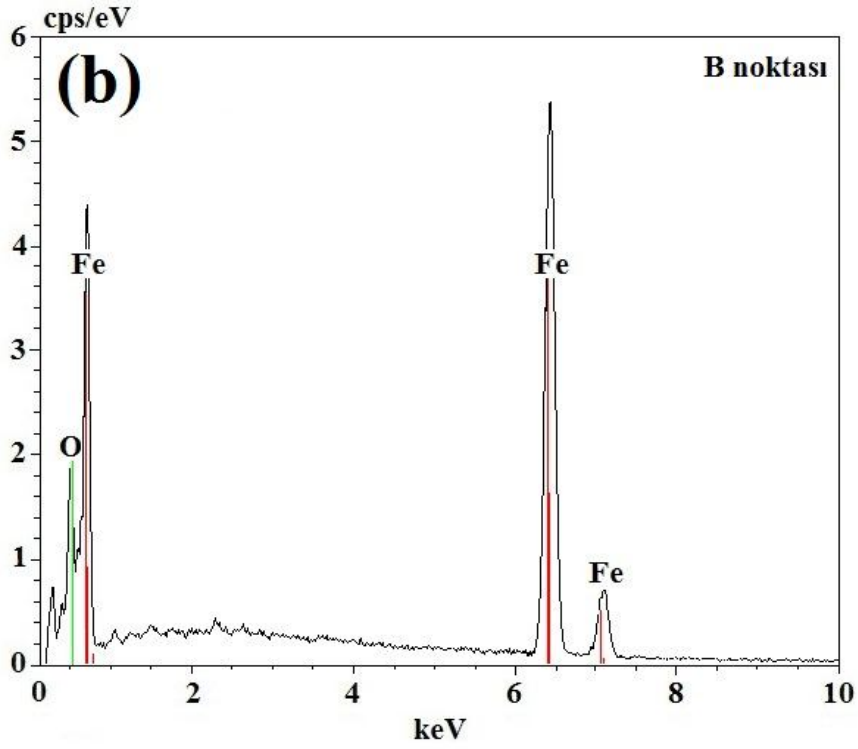
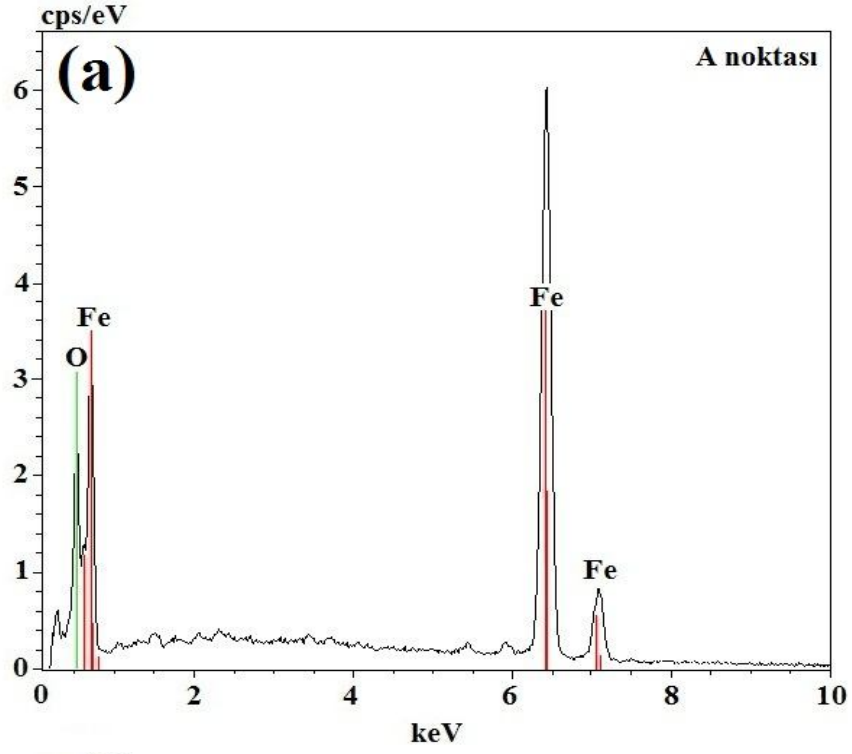
Şekil 5.10'da farklı kayma hızlarında aşınmış GS 22 çeliğine ait aşınma yüzeylerinin SEM mikroyapıları görülmektedir.



Şekil 5.10 Borlanmış GS 22 dişli çeliğinin, farklı kayma hızlarına göre SEM aşınma mikro yapıları; a) 950°C-2 saat: 0.2m/s, b) 950°C-2 saat: 0.3m/s, c) 950°C-2 saat: 0.4m/s, d) 950°C-6 saat: 0.2m/s, e) 950°C-6 saat: 0.3m/s, f) 950°C-6 saat: 0.4m/s.

Şekil 5.10a'da aşınma yüzeyinin pürüzlü ve kaba aşınma kalıntılarının partiküllerine sahip olduğu gözlenmiştir. Kayma hızının artmasıyla kaba partiküllerin ince partiküllere

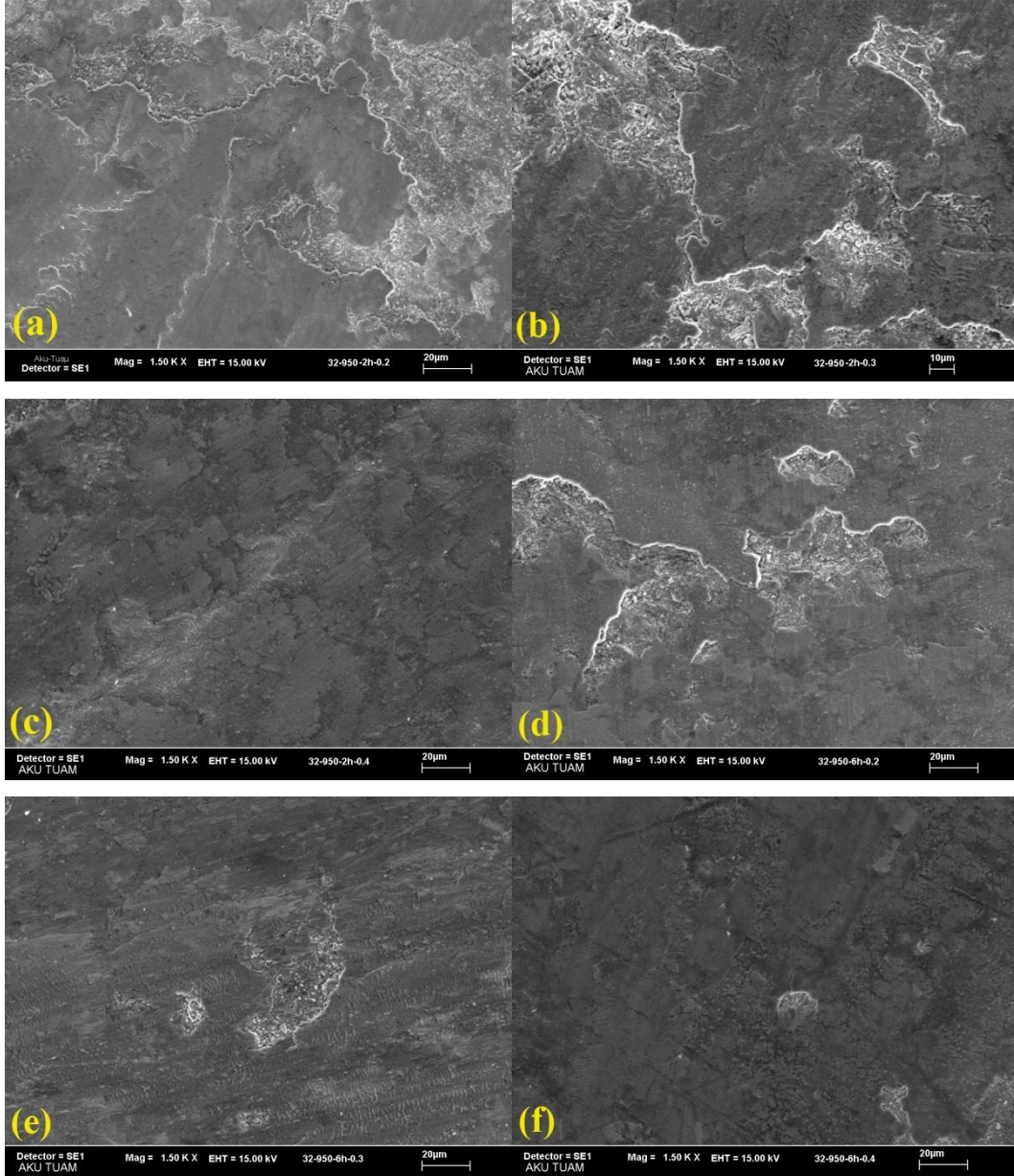
(debris) dönüşerek aşınma şiddetinin azaldığı görülmüştür (Şekil 5.10a-c). Şekil 5.10d ve e'de numunelerin aşınma yüzeylerinde oksit kalıntılarının ve abrasif çiziklerin olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.10f'de aşınma izi boyunca numunede mikroçatlakların olduğu görülmüştür. Şekil 5.11'de Şekil 5.10a ve 5.10d'den A ve B noktalarından elde edilen EDX analizleri verilmiştir. EDX analizlerinden aşınmış numune yüzeylerinde sürtünme ısısından dolayı Fe-bazlı oksit katmanlarının olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca aşınma izi boyunca kayma yönünde oksit tabakalarının uzanarak yönedikleri gözlenmiştir. Güneş vd. (2011), plazma pasta borlanmış AISI 52100, 440C ve 8620 çeliklerini aşındırmışlar ve aşınma sonucunda borlanmış çeliklerin aşınma yüzeylerinde sürtünme ısısından dolayı oluşan oksit tabakalarının varlığından bahsetmişlerdir. Oksit tabakalarının aşınma izi boyunca uzandıklarını ve borlanmış çeliklerin aşınma davranışlarını etkilediklerini tespit etmişlerdir (Gunes *et al.* 2011).



Şekil 5.11 Şekil 5.10a ve 5.10d'deki A ve B noktalarından elde edilen EDX analizleri

5.6.6 Borlanmış GS 32 Dişli Çeliğinin Aşınma Bölgelerindeki SEM Mikroyapıları

Şekil 5.12’de farklı kayma hızlarında aşınmış GS 32 çeliğine ait aşınma yüzeylerinin SEM mikroyapıları görülmektedir.



Şekil 5.12 Borlanmış GS 32 dişli çeliğinin, farklı kayma hızlarına göre SEM aşınma mikro yapıları; a) 950°C-2 saat: 0.2m/s, b) 950°C-2 saat: 0.3m/s, c) 950°C-2 saat: 0.4m/s, d) 950°C-6 saat: 0.2m/s, e) 950°C-6 saat: 0.3m/s, f) 950°C-6 saat: 0.4m/s.

Şekil 5.12a-f’de borlanmış numunelerin aşınma yüzeylerinde ince aşınma kalıntılarının ve debriserinin olduğu tespit edilmiştir. Muhtemelen gevrek ve kırılğan CrB fazından

dolayı ince delaminasyon atlaklıklarının oluştuğu gözlenmiştir. Borlama süresinin artmasıyla birlikte aynı kayma hızlarında GS 32 eliği daha fazla aşınma direnci göstermiştir (şekil 5.12a ve 5.12c). şekil 5.12d-f'de borlanmış numunelerin aşınmış yüzeyinde mikro çatlakların, debrilerin, delaminasyon aşınmasının oluştuğu grlmştir.

6. SONUÇLAR

GS 18, GS 22 ve GS 32 dişli çelikleri 950°C’de 2 ve 6 saat süreyle ticari Ekabor II bor tozuyla borlama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemi sonucunda oluşan çelik yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının mikroyapı, tabaka kalınlıkları, mikro sertlikleri, yüzey morfolojileri, XRD analizleri, aşınma bölgelerinin SEM ve EDX analizleri incelenmiştir. Borlanmış dişli çeliklerinin farklı kayma hızlarındaki aşınma davranışları araştırılmıştır.

Metalografik incelemeler sonucunda, kaplama/matris ara yüzeyi ve matrisin belirgin olarak birbirinden ayrıldığı ve borür tabakasının kolonsal bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Optik incelemeler sonucunda üç farklı bölge elde edilmiştir. (a) En üstte borür tabakası (CrB ve FeB fazı ve onun altında Fe₂B fazı), (b) Geçiş bölgesi (kaplama/matris), (c) Homojen bir yapının olduğu matris bölge bulunmaktadır. Borlama sonunda elde edilen borür tabaka kalınlıkları süreye bağlı olarak 70-260 µm arasında değiştiği tespit edilmiştir. Borlama süresinin artmasıyla birlikte daha kalın borür tabakaları elde edilmiştir.

Borlama işlemi sonucunda GS 18 çeliğinde çift fazlı (FeB+ Fe₂B) fazları, GS 22 çeliğinde FeB, Fe₂B, CrB ve GS 32 çeliğinde ise FeB, Fe₂B, CrB, Cr₂B fazları elde edilmiştir. Kutu borlama sıcaklığının artmasıyla birlikte CrB, Cr₂B ve FeB faz şiddetlerinde artışlar görülürken, Fe₂B faz şiddetinde ise azalma meydana gelmiştir. GS 32 çeliğinde Cr miktarının daha fazla olmasından dolayı CrB, Cr₂B fazlarının oluştuğu gözlenmiştir.

Ekabor II tozuyla kutu borlama sonucunda oluşan FeB, Fe₂B, CrB ve Cr₂B fazlarından dolayı yüzey sertliklerinin yüksek olduğu görülmektedir. Borlanmış GS 18, GS 22 ve GS 32 dişli çeliklerinde mikro sertlik değerlerinin sırasıyla 1624-1905 HV_{0,05}, 1702-1948 HV_{0,05}, ve 1745 to 2034 HV_{0,05} arasında değiştiği tespit edilmiştir. Herhangi bir işlem görmemiş GS 18, GS 22 ve GS 32 dişli çeliklerinin sırasıyla 335 HV_{0,05}, 358 HV_{0,05} ve 411 HV_{0,05} mikro sertlik değerlerine sahip olduğu gözlenmiştir. Borlama

süresinin artmasıyla birlikte borür tabakalarının sertlik değerlerinde artışlar görülmüştür.

Borlanmış dişli çeliklerinin borlama öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ölçülerek borlama süresinin çeliklerin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi incelenmiştir. Borlama süresinin artmasıyla birlikte çeliklerin yüzey pürüzlülük değerlerinde artışlar gözlenmiştir.

Borlama süresinin artmasıyla birlikte dişli çeliklerinin aşınma oranlarında azalmalar tespit edilmiştir. Ayrıca kayma hızlarının artmasıyla aşınma oranlarında azalmalar görülmüştür. En düşük aşınma oranı 950°C'de 6 saat borlanmış GS 32 çeliğinde görülürken, en yüksek aşınma oranı 850°C'de 2 saat borlanmış GS 18 çeliğinde olduğu gözlenmiştir.

Aşınma deneyleri sonucunda tüm numunelerde borür tabakası kalınlığının altına inilmediği ve borür tabakalarının ana malzeme üzerinden tamamen kalkmadığı aşınma iz derinliklerinden ve noktasal EDX analizlerinden tespit edilmiştir. Aşınma bölgesinden alınan noktasal EDX analizindeki A ve B noktalarının EDX analizleri sonucunda A ve B bölgesinin ise Fe ve Oksijen bakımından baskın olduğu gözlenmiştir. Aşınma SEM görüntülerinde oksit tabakalarının kayma yönünde parçalandıkları görülmektedir. Aşınma deneyi sonucunda Fe esaslı oksit tabakaları oluşmuştur. Oluşan oksit tabakalarının kayma yönünde parçalandıkları ve iz boyunca taşındığı tespit edilmiştir.

7. KAYNAKLAR

- Ahn, H-S. and Kwon, O-K. (1999). Tribological behaviour of plasma-sprayed chromium oxide coating. *Wear*, **225-229**: 814-824.
- Akbayır, Ö., (2005). Katı Ortamda Borlanmış AISI 1030 Çeliğinde İşlem Parametrelerinin Yüzey ve Aşınma Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ashby, F. and Jones, R.H. (1996). Engineering Materials, Butterworth / Heinemann, Oxford, 247-260.
- Badini, C., Cianoglio C. and Paradelli G. (1987). The effect of carbon and chromium on the hardness of borided layers. *Surface and Coatings Technology*, **30**: 157-170.
- Barış, M. (2007). Farklı Borlama Sürelerinin Transmisyon Çeliğinde Abrasiv Aşınma Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Baştürk, S. ve Erten, M. (2006). Borlama ile yüzey sertleştirme çalışmaları. *Mühendis Makine*, **47**: 57-74.
- Bayça, S.U. ve Şahin, S. (2004). Borlama. *Mühendis ve Makine Dergisi*, **45**: 51-59.
- Bindal C. (1991). Ticari Karbon Çelikleri ve Düşük Alaşımli Çeliklerin Yüzeyine Borlamayla Seramik Kompozit Kaplama ve Bazı Malzeme Özelliklerine Etkileri. Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Bindal, C. and Üçışık, A.H. (2008). Characterization of boriding of 0.3% C, 0.02% P plain carbon steel. *Vacuum*, **82**: 90-94.
- Bourithis, L., Papaefthymiou, S. and Papadimitriou, G.D. (2002). plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: microstructure and wear properties. *Applied Surface Science*, **200**: 203-218.
- Cameron, T.B. and Moral, J.E. (1986). The solubility of boron in iron. *Metallurgical Transactions A*, **17**: 1481-1483.
- Campos, I., Palomar, M., Amador, A., Ganem, R. and Martinez, J. (2006). Evaluation of the corrosion resistance of iron boride coatings obtained by paste boriding process. *Surface and Coatings Technology*, **201**: 2438-2442.

- Campos, I., Ramirez, G., Figueroa, U., Martinez, J. and Morales, O. (2007). Evaluation of boron mobility on the phases FeB, Fe₂B and diffusion zone in AISI 1045 and M2 steels. *Applied Surface Science*, **253**: 3469-3475.
- Campos, I., Farah, M., Lopez, N., Bermudez, G., Rodriguez, G. and VillaVela'zquez, C. (2008). Evaluation of the tool life and fracture toughness of cutting tools boronized by the paste boriding process", *Applied Surface Science*, **254**: 2967-2974.
- Campos-Silva, I., Balankin, A.S., Sierra A.H., Lopez-Perrusquia, N., Escobar-Galindo, R. and Morales-Matamoros, D. (2008) Characterization of rough interfaces obtained by boriding. *Applied Surface Science*, **255**: 2596-2602.
- Carbucicchio, M. and Palombarini G. (1987). Effect of alloying elements on the growth of iron boride coatings. *J.Mater. Sci. Let.*, **6**: 1147-1149.
- Culha O., Toparli, M., Sahin, S. and Aksoy, T. (2008). Characterization and determination of Fe_xB layers' mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*, **206**: 231-240.
- Das, D., Dutta, A.K., and Ray K.K. (2009). Influence of varied cryotreatment on the wear behavior of AISI D2 steel. *Wear*, **266**: 297-309.
- Demirel, Ç. ve Çetin, M. (2011). Borlanmış AISI 8640 Çeliğinin Abrasif Aşınma Davranışı, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 Mayıs, Elazığ, Turkey.
- Efe, G.Ç., İpek, M., Özbek, İ. and Bindal, C. (2008). Kinetics of borided 31CrMoV9 and 34CrAlNi7 steel. *Materials Characterization*, **59**: 23-31.
- Er, U. and Par, B. (2006). Wear of plowshare components in SAE 950C steel surface hardened by powder boriding. *Wear*, **261**: 251-255.
- Erdemir, A. (2005). Crystal chemical approach to the formulation of self-lubricating nanocomposite coatings. *Surface and Coatings Technology*, **200**: 1792-1796.
- Eyre, T.S. (1975). Effect of boronising on friction and wear of ferrous metals. *Wear*, **34**: 383-397.
- Genel, K., Ozbek, I., Kurt, A. and Bindal, C. (2002) Boriding Response of AISI W1 steel and use of artificial neural network for predictiyon of borided layer properties. *Surface and Coatings Technology*, **160**: 38-43.

- Genel, K., Ozbek, I. and Bindal, C. (2003). Kinetics of boriding of AISI W1 steel. *Materials Science and Engineering*, **347**: 311-314.
- Genel, K. (2006). Boriding kinetics of H13 steel. *Vacuum*, **80**: 451-457.
- Gopalakrishnan, P., Shankar, P., Palaniappa, M. and Ramakrishnan, S.S. (2002). Interrupted Boriding of Medium-Carbon Steels. *Metallurgical and Materials Transactions*, 33A,5, Academic Research Library, pp.1475-1485.
- Güneş, İ. (2010). AISI 8620 Çeliğinin Değişik Pasta Karışımlarında Plazma Pasta Borlanması ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Gunes, I., Ulker, S. and Taktak, S. (2011). Plasma paste boronizing of AISI 8620, 52100 and 440C steels. *Mater. and Des.*, **32**: 2380-2386.
- Gunes, I. and Taktak S. (2012) Kutu ve plazma pasta borlanmış 21NiCrMo2 çeliğinin yüzey karakterizasyonu. *J Fac. Of Eng. Architec. Of Gazi Univ.*, **27**: 99-108.
- Gunes, I. (2013). Wear behaviour of plasma paste boronized of AISI 8620 steel with borax and B₂O₃ paste mixtures. *Journal of Materials Science and Technology*, In Press.
- Gürkan, M. (2007). Östenitik ve Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Hocking, M.G., Vasantasree, V. and Sidky, P.S. (1989). *Metallic and ceramic coatings*. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Holmberg, K. and Matthews, A. (1994). *Coating Tribology*. Elsevier Science B.V., 45-74.
- Hutchings, I. M. (1992). *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. Adward Arnold, London.
- Iakovou, R., Bourithis, L., and Papadimitriou, G. (2002). Synthesis of boride coatings on steel using plasma transferred arc (PTA) process and its wear performance. *Wear*, **252**: 1007-1015.
- Jain, V. and Sundararajan, G. (2002). Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel. *Surface and Coatings Technology*, **149**: 21-26.
- Habig, K.H. and Chatterjee-Fischer, R. (1981). Wear behaviour of boride layers on alloyed steels. *Tribol. Int.*, **14**: 209-215.

- Kaestner, P., Olfe, J. and Rie, K.T. (2001). Plasma-assisted boriding of pure titanium and TiAl6V4. *Surface and Coatings Technology*, **142-144**: 248-252.
- Karaman, Y. (2003). Endüstriyel Borlama ve Tekstil Endüstrisinde Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Karlı, A.M. (2005). AISI 440C ve 52100 Yatak Çelikleri Üzerinde Oluşturulan Karbür ve Borürlerin Yüksek Sıcaklıklarda Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Kartal, G., Eryılmaz, O.L., Krumdick, G., Erdemir, A. and Timur, S. (2011). Kinetics of electrochemical boriding of low carbon steel. *Appl. Surf. Sci.* **257**: 6928-6934.
- Keddad, M. and Chentouf, S.M. (2005). A diffusion model for describing the bilayer growth (FeB/Fe₂B) during the iron powder-pack boriding. *Applied Science*, **252**: 393-399.
- Küper, A., Qiao X. and Stock, H.R. (2000). A novel approach to gas boronizing. *Surface and Coatings Technology*, **130**: 87-94.
- Li, C., Shen, B., Li, G. and Yang, C. (2008). Effect of boronizing temperature and time on microstructure and abrasion wear resistance of Cr₁₂Mn₂V₂ high chromium cast iron. *Surface and Coatings Technology*, **202**: 5882-5886.
- Lipson, C. and Colwell, L.V. (1961). Handbook of Mechanical Wear. University of Michigan, Michigan.
- Martini, C., Palombarini, G., Poli, G. and Prandstraller, D. (2004). Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings. *Wear*, **256**: 608-613.
- Nair, F. (1996). Koruyucu Gaz Atmosferinde Macun borlama Tekniği İle Çelik Yüzeylerinin Sertleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 37-62.
- Nair, F. ve Karamış, M.B. (1997). Borlanmış Çeliklerde Malzeme Bileşiminin Mikrosertliğe Etkileri, 7. Denizli Malzeme Sempozyumu, 354-360.
- Nam, K.S., Lee, K.H., Lee, D.Y. and Song Y.S. (2005). Metal surface modification by plasma boronizing in a two-temperature-stage process. *Surface and Coatings Technology*, **197**: 51-55.

- Oliveria, C.K.N., Casteletti, L.C., Lombardin, A., Totten, G.E. and Heck, S.C. (2010). Production and characterization of boride layers on AISI D2 tool steel. *Vacuum*, **84**: 792-796.
- Ögel, B. (1993). Metal Yüzeylerine Uygulanan İşlemler; Yöntem ve Malzeme Seçimi, *Metalurji Dergisi*, 14-29.
- Ozdemir, Ö., Usta M., Bindal C. and Üçışık A.H. (2006). Hard iron boride (Fe₂B) on 99.97 wt% pure iron. *Vacuum*, **80**: 1391-1395.
- Özdemir, Ö., Omar, M.A., Usta, M., Zeytin, S., Bindal C. and Ucisik, A.H. (2008). An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel. *Vacuum*, **83**: 175-179.
- Ozbek, I. and Bindal, C. (2002). Mechanical properties of boronized AISI W4 steel. *Surface and Coatings Technology*, **154**: 14-20.
- Ozbek, I. and Bindal, C. (2011). Kinetics of borided AISI M2 high speed steel. *Vacuum*, **86**: 391-397.
- Özbek, İ. (2000). Borlama Yöntemiyle (AISI M50 ve AISI M2) Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Özbek, İ., Konduk, B.A., Bindal, C. and Üçışık, A.H. (2002). Characterization of borided AISI 316L steel implant. *Vacuum*, **65**: 521-525.
- Özbek, İ., Şen, S., İpek, M., Bindal, C., Zeytin, S. and Üçışık, A.H. (2004). A mechanical aspect of borides formed on the AISI 440C stainless-steel. *Vacuum*, **73**: 643-648.
- Pertek, A. and Kulka, M. (2002). Characterization of complex (B+C) diffusion layers formed on chromium and nickel-based low-carbon steel. *Applied Surface Science*, **202**: 252-260.
- Rodriguez, C. E., Laudien, G., Biemer, S., Rie, K.-T. and Hoppe S. (1999). Plasma-assisted boriding of industrial components in a pulsed d.c. glow discharge. *Surface and Coatings Technology*, **116-119**: 229-233.
- Saygın, M. (2006). AISI 1020 Çeliklerinde Borlamanın Yorulma dayanımına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- Selçuk, B., İpek, R. and Karamış, M.B. (2003). A study on friction and wear behaviour of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115 steels. *Journal of Materials Processing Technology*, **141**: 189-196.
- Sinha, A.K. (1991). Boronizing, in: ASM Handbook, J. Heat Treat., USA.
- Soydan, Y., Köksal, S., Demirer, A. and Çelik, V. (2008). Sliding friction and wear behavior of pack-boronized AISI 1050, 4140, and 8620 steels. *Tribology Transactions*, **51**: 74-81.
- Subrahmanyam, J. and Gopinath, K. (1984). Wear studies on boronized mild steel. *Wear*, **95**: 287-292.
- Suh, N.P. (1973). The Delamination Theory of Wear. *Wear*, **25**: 111-124.
- Straffelini, G., Pellizzari, M. and Maines, L. (2011). Effect of sliding speed and contact pressure on the oxidative wear of austempered ductile iron, *Wear*, **270**: 714-719.
- Şahin, S. (2009). Effects of boronizing process on the surface roughness and dimensions of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2714. *Journal of Materials Processing Technology*, **209**: 1736-1741.
- Şen, Ş. (1998). Termokimyasal Borlama İşlemi ile AISI 5140, AISI 4140 Ve AISI 4340 Çeliklerinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Şen, Ş., Özbek İ., Şen U. and Bindal, C. (2001). Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel. *Surface and Coatings Technology*, **135**: 173-177.
- Şen, Ş. (2005). The characterization of vanadium boride coatings on AISI 8620 steel. *Surface and Coatings Technology*, **90**: 1- 6.
- Şen, Ş., Şen, U. ve Bindal, C. 2005. An approach to kinetic study of borided steels. *Surface and Coatings Technology*, **191**: 274-285.
- Tabur, M., İzciler, M., Gül, F. and Karacan, İ. (2009). Abrasive wear behavior of boronized AISI 8620 steel. *Wear*, **266**: 1106-1112
- Tabur, M., İzciler, M. ve Gül, F. (2009). Borlanmış Hardox 400 Çeliğinin Abrasiv Aşınma Davranışları, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, 13-15 Mayıs 2009.

- Taktak, S. and Tasgetiren, S. (2006). Identification of delamination failure of boride layer on common Cr-based steels. *J. Mater. Eng. Perform.*, **15**: 570-574.
- Taktak, S. (2006). A study on the diffusion kinetics of borides on boronized Cr-based steels. *J. Mater. Sci.*, **41**: 7590-7596.
- Taktak, Ş. (2007). Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels. *Materials and Design*, **28**: 1836-1843.
- Ulu, S., Aytakin, H. ve Taktak, Ş. (2004). Borlanmış ve Karbürlenmiş AISI 8620 Çeliklerinin Abrasif Aşınma Davranışı. 10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi, Denizli, 14-16 Nisan, 94-100.
- Ulutan, M., Çelik, O.N., Gasan, H. and Er, U. (2010). Effect of different surface treatment methods on the friction and wear behavior of AISI 4140 steel. *J. Mater. Sci. Technol.*, **26**: 251-257.
- Unlu, B.S. and Atik, E. (2010). Investigation of tribological properties of boronized Fe-based SAE 1020 and TS-DDK 40 journal bearings at high loads. *Materials and Design*, **31**: 2690-2696.
- Uzun, H.A. (2002). Borlama İle Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Ulker, S., Gunes, I. and S. Taktak. (2011). Investigation of tribological behaviour of plasma paste boronized of AISI 8620, 52100 and 440C steels, *Indian J. of Eng. and Mater. Sci.*, **18**: 370-376.
- Uluköy, A. (2005). 21NiCrMo2 (AISI 8620) Çeliğinden Yapılmış Dişli Çarklara Karbürleme ile Beraber Borlama İşleminin Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Uslu, I., Comert, H., Ipek, M., Ozdemir, O. and Bindal, C. (2007). Evaluation of borides formed on AISI P20 steel. *Mater and Des.* **28**: 55-61.
- Venkataraman, B. and Sundararajan, G. (1995). The high speed sliding wear behaviour of boronized medium carbon steel. *Surface and Coatings Technology*, **73**: 177-184.
- Yoon, J.H., Jee, Y.K. and Lee, S.Y. (1999). Plasma paste boronizing treatment of the stainless steel AISI 304. *Surface and Coatings Technology*, **112**: 71-75.

- Yunker, U. (2000). Borlanmış Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Yurtseven, R. (2008). Tel Çekme Sanayinde Borlamanın Endüstriyel Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Alper DALAR
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara – 21/08/1983
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Polatlı Süper Lisesi [2001]
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi
Metal Öğretmenliği [2007]
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Metal Eğitimi [2013]

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :

Çubuk End. Mes. Lisesi – 2009/2010 Öğretim Yılı
Haymana End. Mes. Lisesi – 2010/2011 Öğretim Yılı
Özel Sektör [Fabrika] – 25/06/2011 - Halen