

BOR VE BORLAMANNIN KULLANIM ALANLARI

Bekir Sadık ÜNLÜ

Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

Selim Sarper YILMAZ

Celal Bayar Üniversitesi, Gölarmara Meslek Yüksek Okulu, Sıhhi Tesiat Programı

ÖZET

Borlama genellikle demir esaslı malzemelere uygulanan termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Bu işlem, bor elementinin yüksek sıcaklıklarda demir esaslı malzemelere yüzeyden difüzyonu ile gerçekleşir. Demir esaslı malzeme yüzeyinde ferro-bor fazları oluşarak malzemenin sürtünme katsayısı azalır, aşınma dayanımı artar. Ayrıca, malzeme yüzeyinde çok sert bir tabaka oluşur. Sonuç olarak, malzemenin özellikle tribolojik özellikleri iyileşir. Bu çalışmada; bor ve borlama işleminin sahip olduğu üstün özelliklerden dolayı tribolojik, mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerine yer verilmiş ve endüstrinin değişik alanlarında kullanım alanları belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bor, borlama

ABSTRACT

Boronizing generally is thermochemical surface hardening treatment apply to iron based materials. This treatment is formed boron element diffuses into ferrous based materials at high temperatures. Friction coefficient decreases and wear resistance increases by forming ferro-boron phases at material surface. In addition, very hard layer forms at material surface. As a result, tribological properties of ferrous materials improve. In this study, tribological, mechanical, physical and chemical properties and usage areas were pointed out boron and boronizing for have a superior properties at different areas

Keywords: Boron, boronising

GİRİŞ

Bor, yer kabuğunda nadir bulunan elementlerdendir. 150'den fazla mineralin bileşiminde bulunmasına rağmen tabiatta serbest olarak bulunmaz [1]. Türkiye bor mineralleri açısından oldukça zengindir. Dünya rezervinin yaklaşık % 62'si ülkemizde olmakla birlikte mineral çeşitliliği ve cevher tenörü açısından da doğal bir zenginliğe sahiptir. Bor bileşikleri gübreden ilaç sanayiine, temizlik sektöründen nükleer endüstriye kadar çok geniş alanlarda kullanılmaktadır [2].

Bütün demir esaslı malzemeler, örneğin yapı çelikleri, sementasyon çelikleri, işlah çelikleri, takım çelikleri, çelik döküm, gri dökme demir, sinterlenmiş demir ve çelikler borlama için uygundur. Demir esaslı malzemelere ek olarak başka element ve bileşikler de borlamak mümkündür [3]. Çelik ve dökme demir alaşımları yanında, demir dışı metal ve alaşımlarına (Ni, Co, Mo, Ti) başarı ile uygulanarak bor tabakaları elde edilmektedir. Titanyum ve titanyum alaşımlarında borlama sonucu aşınmaya dayanıklı TiB₂ tabakası elde edilmektedir [4].

Titanyum ve titanyum alaşımlarının borlanması

tercihen 1000-1200 °C arasındaki sıcaklıklarda yapılmalıdır. Titanyum ve refrakter malzemeler üzerinde oluşan borür tabakasının sertlik değeri nikel ve kobalt üzerinde oluşan tabakaya göre çok yüksektir [5]. Borlama işlemi bakır ve alaşımlarına da tatbik edilebilmektedir, fakat düşük ergime sıcaklığına sahip çinko ve alüminyuma uygulanamamaktadır [6]. Bahsedilen malzemelerin borlama işlemleri demir esaslı malzemelerin borlanmasıyla farklıdır [3].

BOR VE BORLAMANNIN KULLANIMI

Bor, genellikle demir esaslı malzemelerde alaşım elementi veya yüzey sertleştirme amacı ile kullanılır. Borlama işleminin mekanizması; bor atomları ısı enerjisi etkisiyle metal yüzeyine yayınırlar ve esas metal atomlarıyla uygun borürler oluştururlar. Bor kaynağının fiziksel durumu katı, sıvı ya da gaz olabilir. Borlama işlemi genel olarak 800 - 1000 °C sıcaklık, 1 - 8 saat süreyle yapılır. Dolgu malzemesi ve deoksidantlar ise borlama esnasında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluştururlar ve borlama malzemesinin ana malzemeye yapışmasını önlerler. Borlama işlemi esnasında kullanılan yöntem, borlama

malzemesinin kompozisyonu, borlanacak malzeme cinsi, işlem süresi ve işlem sıcaklığı elde edilen tabakaya etki eden faktörlerdir.

Borun Çeliklerde Yüzey Sertleştirici Olarak Kullanılması

Borlama, malzeme yüzeyi iyileştirme işlemlerinden biridir. Genellikle çeliklere uygulanır. Bor ile yüzey sertleştirme, termo-kimyasal bir işlem olup esas olarak borun yüksek sıcaklıkta çelik yüzeyine difüzyonudur. Bor verici olarak herhangi bir bor bileşiği kullanılabilir. Borlama ortamı diğer ilavelerle birlikte katı, sıvı veya gaz halinde olabilir. Son zamanlarda plazma borlama ve iyon implantasyon borlama yöntemiyle borlama yapılmaktadır. Bu ortamlarla çelik yüzeyinde tek fazlı Fe_2B (demir di borür) tabakası elde edilmesi amaçlanır. Borlanmış yüzeyler sürtünme katsayısı düşük, aşınma direnci yüksek hale gelir. Malzeme yüksek sıcaklıklarda sertlik ve tribolojik özelliklerini korur [3, 7, 8].

Borlama ile malzeme yüzeyinde sert bir seramik tabakası oluşur. Örneğin Fe yüzeyine uygulanırsa oluşan bu tabaka FeB tabakasıdır. Bor difüze edilmiş yüzeylerin aşınma direnci sertleştirilmemiş yüzeylere göre yaklaşık 10 kat fazladır. Ancak ağır yükler altında oluşan yüzey gerilmeleri ile pullanma ve çatlamalar olabilir. Ayrıca borlanmış tabakalar su ve atmosfer şartlarında kötü korozyon direncine sahiptir. Ancak oksitlenmeyen asitlere karşı iyi korozyon direnci gösterirler. Borür tabakasının önemli bir özelliği ise sahip olduğu yüksek sertlik değerini, 900-1000 °C 'ye ulaşan sıcaklıklarda dahi koruyabilmesidir. Bu sayede sahip olduğu tribolojik özellikleri kaybetmeden aşınma ve oksidasyona karşı direnç gösterebilmektedir [9].

Borlama ile diğer yüzey sertleştirme işlemlerine göre sürtünme katsayısı düşük, korozyon direnci yüksek yüzey tabakası elde edilebilmesinin yanında alaşımsız çeliklere de uygulanabilmesi, bu işlemin önemini ortaya çıkarmaktadır. Bor cevheri bakımından ön sıralarda olan ülkemizde, uygulama ve teknolojik üstünlüğü nedeniyle özellikle katı borlayıcıların üretimi üzerinde çalışmalar yapılması, darbesiz yüklemelere ve aşınmaya maruz kalan makina parçalarının borlanması ve matris malzemesine yapılacak uygun ısı işlemleri, bunların çalışma ömürlerini oldukça fazla artıracak ve ülkemiz ekonomisine büyük katkılar sağlayacaktır. Aşınma dayanımı ve sürtünme katsayısı bir sistem özelliği olmakla beraber malzeme

sertliği ile doğrudan alakalıdır. Borlanmış yüzeylerde yüksek sertlikle birlikte teflonun sürtünme katsayısına yakın sürtünme katsayısı elde edilmektedir [10].

Borlama işlemi ve elde edilen tabaka kalınlığı, işlem sıcaklığı ve süreyle de şöyle ilgilidir. Borlama işlemi, 800-1050 °C sıcaklıklarda ve 10 saate kadar yapılabilmektedir [3]. Fakat Yılmaz, yüksek lisans çalışmasında; SAE 1020 çeliğine 800-1050 °C de 1 saatten 5 saate kadar borlama işlemi uygulamıştır. Bu çalışmasında 950 °C nin altındaki sıcaklıklarda bor tabakasının çok az oluştuğunu, bu sıcaklığın üzerinde de bor tabakasının bozulduğunu belirlemiştir. En iyi bor tabakası kalınlığının da 950 °C de 4 saatte yeterli olduğunu tespit etmiştir [11]. Bor tabakasına C elementinin de etkisi vardır. Az karbonlu çeliklerde daha kalın bor tabakası elde edilmektedir. Ayrıca, borlama işlemi sonucu oluşan Fe_2B ve FeB fazları arasındaki ısıl genleşme farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlamalar meydana gelir. Bu durum bazı endüstriyel uygulamalar için borlamayı kabul edilemez kılar. Bu olumsuz etkiyi yok etmenin çaresi oluşan fazlardan birini azaltmak ya da ortadan kaldırmaktır. Bu faz FeB fazıdır. Bunun ortadan kaldırılması bazı aktivatörler ve dolgu malzemeleri kullanılması ile olur. Bu sayede tek fazlı (Fe_2B) borür tabakalar ya da FeB oranının önemli ölçüde azaldığı tabakalar elde edilmiştir [12].

Borlama ile demir esaslı malzemelerin çekme ve akma değerleri % 10-20, yorulma dayanımı % 25 ve korozyonlu yorulma ömrü % 200 artmasına karşın plastisite özellikleri azalır. Borlamadaki en büyük kazanç sertliktir. Çeliklerde 2000 HV dolayındadır. Borlu yüzeylerde teflonu yakın sürtünme katsayısı elde edilir. Bor tabakası alaşımsız çeliklerde alaşımlılara göre 1,5-2 kat fazladır [13].

Diğer bir çalışmada, toz metalurjisi alanında yaygın olarak kullanılan ASC 100.29 demir tozları borlanarak Fe_2B tozları elde edilmiştir [14]. Ayrıca, borlama yönteminde kullanılan tozların tane büyüklükleri de borlama tabakasını etkiler. En küçük tane boyutuna sahip toz ile daha fazla borlama kalınlığı elde edilmektedir [15].

Demir esaslı malzemelerden dökme demirler de borlanabilmektedir. 950 °C de 6 saat borlanarak yapılan bir çalışmada yaklaşık 120 m tabaka kalınlığı ve 2600 HV sertlik elde edilmiştir [16].

Borlama ile yüzeyde seramik yapıda bir ferro-bor tabakası elde edildiğinden adheziv aşınmanın azaltılması sağlanır. Bu nedenle, demir esaslı malzemelere borlama işlemi uygulanarak bunların da yatak malzemesi olarak kullanılabilmesi ve iyi bir aşınma direnci elde edilebilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, ferro-bor tozlarının toz metalurjisi alanında kullanılarak demir esaslı toz metal yatakların üretiminde kullanılabilmesi açısından önem teşkil etmektedir. [17].

Borlama işleminin fiziksel durumu katı, sıvı yada gaz olabilir. Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertlikleri ve yüksek aşınma dirençleri ile karakterize edilirler [18]. Bu nedenle borlanmış malzemelerde oluşan borür tabakasına ait çalışmalar daha çok sertlik, aşınma ve korozyon üzerine yoğunlaşmaktadır.

Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucu borlama şartlarına bağlı olarak malzeme yüzeyinde ferrobör fazlarından Fe_2B veya $(Fe_2B + FeB)$ meydana gelir. Borlama sonucu karbonlu çeliklerde 1800-2000 HV, alaşımli çeliklerde 2500 - 2800 HV ve yüksek hız çeliklerinde 2800-3300 HV yüzey sertliği elde edilmektedir. Borür tabakasının sertliği oluşan fazlara göre değişir. FeB fazı, Fe_2B fazından daha sert ve gevrekler. Borun oksijene karşı ilgisi yüksektir ve bütün borürler yüzeyde ince bir oksit filmi oluştururlar. Bu oksit filmi de sürtünme sırasında kaynak oluşumunu engelleyip yağlayıcı bir görev yapar [19].

1975 yılında ferrobör alaşımlarının üstün manyetik özelliklerinin keşfi, bu alaşımların elektrik sektöründe büyük kullanım alanı bulmasına sebep olmuştur. Özellikle % 3 B, % 5 Si içeren demir esaslı alaşımların, amorf metal (metalik cam) olarak sac haline getirilerek trafolarda kullanılabilmesi, konvansiyonel tane yönlenmiş silisyumlu saclara göre 1/3 oranında çekirdek kayıplarını azaltmıştır [20]. Bor, 1982 yılından beri tanınmakta olan Fe-R-B (R=nadir toprak metal) esaslı sürekli miknatısların önemli bir bileşenidir. Bu tip miknatısların üretiminde ferrobör kullanılmaktadır [21].

Endüstrinin değişik alanlarında yaygın olarak kullanılan bor bileşiklerinin kullanım alanları giderek artmaktadır. Gübre endüstrisinden ilaç endüstrisine, temizlik sektöründen nükleer endüstriye kadar çok çeşitli alanlarda kullanılan bor bileşiklerinin kullanım alanlarını başlıca şu gruplarda

toplamak mümkündür. Cam endüstrisi (izolasyon fiberleri, tekstil fiberleri), plastik endüstrisi, seramik endüstrisi, kalıp endüstrisi, lastik ve kağıt endüstrisi, temizlik ve beyazlatma (deterjanlar), yanmayı geciktirici maddeler, tarım (ilaç, gübre), nükleer uygulamalar olarak gruplandırılabilir. Ayrıca, borlama işlemi otomotiv ve uzay endüstrisi, pompalar, valfler, pnömatik transport sistemleri, plastik işleme makinaları ve haddeleme makinalarında kullanılır [2, 22, 23, 24].

Borun Çeliklerde Alaşım Elementi Olarak Kullanılması

Borlu çeliklerin özellikleri, bor elementinin yapıdaki dağılımı ve diğer alaşım elementleriyle olan etkileşiminin bir fonksiyonudur. Bu durumda bor, az alaşımli çeliklerde ostenitin dönüşümünü yavaşlatarak sertleşme kabiliyetini arttırdığı, bununla birlikte darbe direncini olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir [19].

Takım çeliklerine bor ilavesi sertleşme kabiliyetini arttırmaktadır. Paslanmaz çeliğe ppm mertebesinde bor ilavesi, kaynak kabiliyetini, sürtünme direncini, taneler arası korozyon direncini, nötron absorpsiyon kapasitesini arttırmakta, sıcak yırtılmaları önlemektedir. Krom, krom nikel kobalt gibi yüksek sıcaklık çeliklerine az miktardaki bor ilavesi bu malzemelerin kullanım ömrünü uzatmaktadır. Yüksek hız çeliklerine kullanımda sertleşebilen ve ısı işlem görebilen çeliklere bor ilavesi özellikle sürtünme mukavemetini arttırmaktadır [21].

Borlama işlemi esnasında borür tabakasının oluşumuna ana metaldeki alaşım elementlerinin etkisi büyüktür. Genel olarak bütün alaşım elementleri için tabaka kalınlığında bir azalma tespit edilmiştir [3]. Alaşım elementleri bor difüzyonunu azaltmakta, ana malzeme ve borür tabakasının özelliklerini değiştirmektedir [25].

Alaşım elementleri tabaka kalınlığını azaltırken, tabaka geometrisini de değiştirirler. Az karbonlu çeliklerde meydana gelen girintili çıkıntılı yapı borür tabakasının ana metale bağlantısını kuvvetlendirirken, ara yüzeyde meydana gelen iç gerilmelerin daha geniş bir alana yayılmasını sağlar. Ana metaldeki alaşım elementleri, özellikle karbon, krom ve nikel tabaka geometrisini değiştirerek ana metal-borür tabakası ara yüzeyini düzleştirir [6]. Alaşım elementlerinin başka bir etkisi de borür

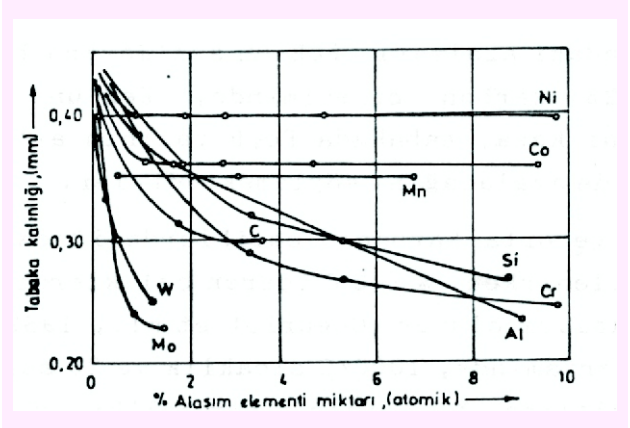
tabakasının sertliğini arttırması ve Fe- B denge diyagramındaki ötektik noktayı aşağı kaydırmasıdır [3].

Ana malzeme içerisindeki karbon oranının artması tabaka kalınlığını azaltmaktadır. Karbon FeB ve Fe₂B gibi fazlarda çözünmediğinden, karbon fazlalığının sonucu borür tabakası altında difüzyon bölgesi meydana gelmektedir. Manganez ve nikel borür tabaka kalınlığını fazla etkilememektedir [3]. Bu bölgedeki karbon, Fe₃C, Cr₃C, Fe₆C₃ gibi karbürler oluşturarak borlama mekanizmasını etkilediği ve borür tabakasını daha sıkı ve sert yaptığına inanılmaktadır [26]. Artan krom miktarı tabaka kalınlığında ve ara yüzeyde oluşan girintili çıkıntılı yapıda azalmaya sebep olur. % 4 Cr içeren çeliklerde kolonsal karakterde ve 25-30 µm kalınlıkta borür tabakası elde edilirken, % 12 Cr içeren çeliklerde ise 25 µm kalınlıkta, düz karakterde borür tabakası elde edilmiştir. % 26 Cr içeren çeliklerde ise borür tabakasının kalınlığı genel olarak 5 µm'yi aşmamaktadır. Buna karşılık yüksek nikel oranı borür tabakasının kolonsal yapısını azaltmakta, yüksek poroziteyi ve kötü mekanik özellikleri beraberinde getirmektedir [27].

Silisyum, borür tabakası sertliğini etkilemez, ancak geçiş bölgesinin sertliği Si artışı ile artar [28]. Silisyum, borür tabakasının gevrekliğini arttırdığı için % 1'in üzerinde silisyum içeren çelikler borlamaya uygun değildir [29].

Tungsten, molibden, vanadyum miktarının çelikte artmasıyla tabaka kalınlığı azalır ve kolonsal yapı düzleşir. Borlanacak malzemelerde vanadyum miktarının % 0,15'i geçmemesi istenir [3]. Titanyum, FeB'de çözünür ve FeB'nin sertliğini artırır. Ayrıca geçiş bölgesinde tane irileşmesini önleyici rol oynar [28].

Alaşımız çeliklerde borlama şartlarına bağlı olarak tek fazlı (Fe₂B) ya da çok fazlı (FeB + Fe₂B) borür tabakası oluşur. Borlama ortamındaki bor miktarı Fe₂B fazı oluşumu için gerekli olan miktardan fazla ise uygun sıcaklık ve zaman şartlarında borür tabakasında Fe₂B fazına ilaveten FeB fazı da oluşur [30]. Alaşım çeliklerde ise bunlara ilaveten alaşım elementine bağlı olarak Cr₂B, TiB₂, NiB₂, CoB gibi bileşiklerden biri ya da birkaçı oluşabilir [27]. Şekil 1'de alaşım elementlerinin borür tabakası kalınlığına etkisi görülmektedir.



Şekil 1. Alaşım Elementlerinin Borür Tabakası Kalınlığına Etkisi [3, 18, 26].

Borlanmış Malzemelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Tabaka Kalınlığı

Borlanan malzemenin cinsi, borlayıcı ortamın bileşimi, işlem şekli, sıcaklık ve süre borür tabakasının kalınlığına etki eden faktörlerdir. Teorik olarak tabaka kalınlığı sınırsızdır. Bu ise işlem sıcaklığı ve süresinin artmasıyla mümkündür. İşlem sıcaklığının Fe-B denge diyagramındaki ötektik sıcaklığın (1149 °C) altında olması gerekir. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda lokal erimeler meydana gelerek malzeme yüzeyini bozabilir [13]. Zaman faktörü ise ekonomik açıdan belli bir değeri aşmayacaktır.

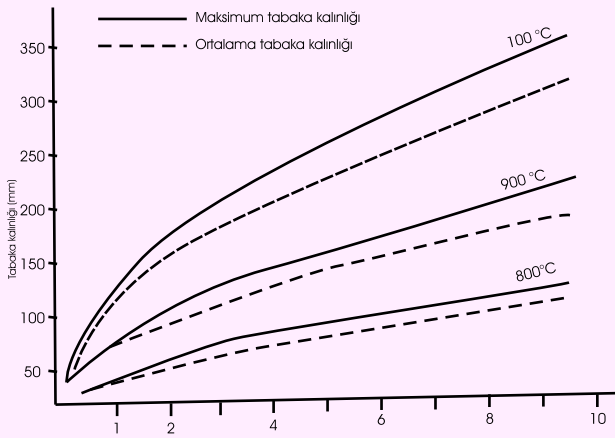
Tabaka kalınlığını sınırlayan bir diğer faktörde kırılmalıklıdır. Tabaka kalınlığı arttıkça kırılmalıklı da artacağı için özellikle FeB ve Fe₂B çift fazlı tabakalarda kalınlığın fazla olmaması gerekmektedir [29].

Çeliklerdeki alaşım elementi ve karbon miktarının artması ile bor difüzyonu azalmaktadır. Bunun sonucu olarak borür tabakasının hem kalınlığı azalmakta, hem de dış şeklindeki yapısı düzleşmektedir [13].

Çelik esaslı malzemeler için kullanım şartlarına göre 20-200 µm tabaka kalınlığı uygundur. Kırılmalıklı yönünden alaşım çeliklerde 100 µm, alaşımız çeliklerde 200 µm kalınlığa, hatta darbesiz aşınmaya maruz parçalarda su vermemek kaydıyla 400 µm kalınlığa çıkılabilmektedir. Borlama sıcaklığının artması tabaka kalınlığını arttırmasına ilaveten poroziteyi de arttırarak tabakanın gevrekliğine yol açar [31]. Şekil 2'de Ck 45 çeliği ve Ekabor-1 katı borlayıcısı kullanılarak yapılan çalışmada tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Tablo 1'de borlu tabakayı meydana getiren Fe₂B ve FeB bileşiklerinin bazı özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Fe₂B ve FeB'nin Bazı Özellikleri [3, 31].

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Ergime noktası (°C)	1390	1550
Mikro Sertlik (HV)	1600-2000	1600-2400
Uzama Katsayısı (1000 °C)	8.10 ⁻⁶ 1/°K	10-16.10 ⁻⁶ 1/°K
Termal İletkenlik (1000 °C)	0.2-0.3 W/(cm °C)	0.1-0.2 W/(cm °C)
Küri Noktası (°C)	742	325
Yoğunluk (gr/cm ³)	7.00	6.3
Kristal Sistem	Tetragonal hacim merkezli	Ortorombik
Kafes Parametreleri (Å)	a:5.078, b:4.249	a:4.053, b:5.495, c:2.496



Şekil 2. Ekabor-1 ile Borlanmış Ck 45 Çeliğinin Tabaka Kalınlığının Zaman ve Sıcaklıkla Değişimi [3].

Sertlik

Borlamanın en büyük etkisi sertlik üzerine olup, ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak borür fazlarına bağlıdır. FeB fazı Fe₂B'den daha sert ve gevrektr [10]. Borlama ile elde edilen sertlik; karbon çeliklerinde 1800-2000 HV [32], alaşımlı çeliklerde 2500-2800 HV [33], titanyumda ise 3000 HV civarındadır [34]. Tablo 2 de ise borlama ve diğer yüzey işlemleri ile elde edilmiş yüzeylerin sertlik kıyaslamaları yapılmıştır.

Sertlik ölçümleri, mikrosertlik yöntemi ile vickers veya knoop uçları kullanılarak yapılır [3]. Ölçümlerde büyük yüklerin kullanılması çatlama ve dökülme gibi nedenlerden dolayı hatalı sonuçlara sebep olur. Ayrıca büyük yükler tabakanın bozulmasına ve tabakanın altındaki bölgenin deformasyonuna sebep olabilir. Genel olarak 50-100 g'lık yüklerle ölçüm yapılır [19].

Tablo 2. Borlama ve Diğer İşlemlerle Elde Edilmiş Yüzeylerin Sertlik Değerleri [35].

Malzeme	Mikro sertlik (kg/mm ²)
Nitrürlenmiş yüzey	610-940
Gaz ile karbürize edilmiş yüzey	700-820
Sert krom kaplı yüzey	950-1100
WC+%13 Co Sinter malzeme	1300
Borlanmış karbon çeliği	1600
Borlanmış AISI H13 çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900

Aşınma

Sürtünme katsayısı ve aşınma dayanımı bir sistem özelliği olmakla birlikte, genellikle yüksek aşınma direnci için malzemenin aşındırıcıdan daha sert ve sürtünme katsayısının düşük olması istenir. Borlama ile bu özellikler büyük ölçüde sağlanır [10].

Borlama ile yüzeyde seramik yapıda bir ferro-bor tabakası elde edildiğinden adheziv aşınmanın azaltılması amaçlanır. Bu nedenle, demir esaslı malzemelere borlama işlemi uygulanarak bunların da yatak malzemesi olarak kullanılabilmesi ve iyi bir aşınma direnci elde edilebilmesi sağlanmıştır. Yağlı ortamda yapılan deneylerde, borlanmış demir esaslı yatakların borlanmamış demir esaslı yataklara göre aşınma dayanımlarında yaklaşık on kat iyileşme olmuştur. Borlanmış demir esaslı T/M yatak malzemelerinde ise yağlı ortamda yapılan deneylerde ise, aşınma dayanımlarında yaklaşık 5 kat iyileşme olmuştur [17].

Borun oksijene karşı ilgisi fazla olduğundan yüzeyde koruyucu, ince bir oksit filmi oluşturmakta, bu oksijen filmi

yüzeyde yağlayıcı vazifesi görerek sürtünme katsayısını düşürüp yüzeylerin birbirine kaynamasını önlemektedir [36]. Borlama ile WC'ün sertliğine eşdeğer sertlik, teflonun (PTFE) sürtünme katsayısına yakın sürtünme katsayısı elde edilir [37]. Tablo 3'te bazı malzemelerin borlanmış ve borlanmamış durumdaki sürtünme katsayıları gösterilmiştir.

Tablo 3. Bazı malzemelerin Borlanmış ve Borlanmamış Durumdaki Sürtünme Katsayıları [37].

Malzeme	Sürtünme	Katsayısı (Dinamik)
	Borlanmış	Borlanmamış
Düşük Karbonlu Çelik	0.17-0.19	0.585-0.595
Takım Çeliği	0.07-0.04	0.16-0.18
WC+Co Sinter malzeme	0.1939-0.2335	0.2617-0.2773

Borlanmış çeliklerin aşınma dirençleri sementasyon, nitrürasyon, sert krom kaplama ve su vererek sertleştirme ile elde edilen yüzeylere göre oldukça yüksektir.

Darbesiz aşınmanın söz konusu olduğu uygulamalarda, borlama ile yüzeyi sertleştirilmiş malzemeler başarı ile kullanılmaktadır. Paslanmaz çelik için derin çekme kalıbı sert krom kaplı AISI A6 çeliğinden yapıldığında 2000 parça üretilirken, aynı çelik borlandığı takdirde 50000 parça ürettiği belirtilmektedir [38].

Kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı, sementasyonda sertleştirilmiş tabakanın yumuşamasına sebep olurken borlu tabakaya etki etmez. Borlu tabakanın 900-1000 °C sıcaklıklara kadar sertliğini koruması, aşınma direncini yüksek sıcaklıklarda da muhafaza etmektedir [19].

İç Gerilmeler

Metallerde borlama işlemi sonrası borür tabakasında ve borür tabakası ana metal arasında iç gerilmeler oluşur. Malzemenin kimyasal bileşimi, borlama şartları ve uygulanan ısı işlemler iç gerilmelere etki eden faktörlerdir. Tabakanın faz yapısı (Tek fazlı veya çiff fazlı) ve geometrisi de (düz veya girintili çıkıntılı) iç gerilmelerin oluşumuna etki eder [13]. İdeal bir tabaka için tek fazlı ve tabaka geometrinin girintili çıkıntılı olması istenir. Borlamadan sonraki uygulanan ısı işlemler de iç gerilmelere etki etmektedir [39].

Korozyon Direnci

Borür tabakasının suya ve atmosfere karşı korozyon direncinin düşük olmasına karşılık, bazı asitlere ve sıvı metallerle karşı iyi bir direnç gösterir. Özellikle HCl, H₂SO₄ ve H₃PO₄ gibi asitlerle alüminyum, kurşun ve çinko gibi metallerin sıvı banyolarında borlu malzemelerin korozyon direnci çok yüksektir [3].

Yüksek kromlu çeliklerde borlama ile koruyucu krom oksit yerine daha az koruyucu olan krom borür meydana gelir. Bu bakımdan yüksek alaşımli malzemelerin borlanmasıyla daha iyi korozyon özelliği her zaman elde edilmeyebilir [13].

Yorulma

Borlama işleminin yorulma dayanımına da etkisi vardır. Borlama ile demir esaslı T/M malzemelerin yorulma dayanımı artmaktadır. Borlanmış demir esaslı FeCu-Grafit malzemesinden üretilen numunelerle yapılan yorulma deneylerinde yorulma dayanımlarında önemli ölçüde artış görülmektedir [40].

SONUÇ

Önemli bir termokimyasal yüzey sertleştirme işlemi olan borlama, bor elementinin yüksek sıcaklıklarda genellikle demir esaslı malzemelere yüzey difüzyonu ile gerçekleşir. Borlama işlemi ile demir esaslı malzeme yüzeyinde sert bir ferro-bor tabakası oluşur. Bu işlem ile, malzeme yüzeyinde yaklaşık olarak 2000 HV dolayında sertlik, düşük sürtünme katsayısı ve dolayısıyla çok iyi aşınma direnci elde edilir. Yüksek sıcaklıklarda da bu özellikler korunur. Bu gibi özelliklerinden dolayı gelişen endüstride önem kazanarak kullanılmaya başlamıştır. Bor ve borlama temel prensip olarak, özellikle çeliklerde yüzey sertleştirici ve alaşım elementi olarak da sertleşme kabiliyetini arttırmada kullanılmaktadır.

Bor elementinin ve borlama işleminin endüstrinin değişik alanlarında yaygın olarak kullanım alanları giderek artmaktadır. Gübre endüstrisinden ilaç endüstrisine, temizlik sektöründen nükleer endüstriye, cam, seramik ve plastik endüstrisinden demir-çelik endüstrisine, otomotiv endüstrisinden uzay endüstrisine birçok alanda

kullanılmaktadır. Bu çalışmada; bor ve borlamanın sahip olduğu belirtilen bu üstün özelliklerinden dolayı tribolojik, mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri ve kullanım alanları belirtilerek endüstrinin değişik alanlarında uygun ve doğru bir şekilde kullanılabilmesi sağlanacaktır.

KAYNAKÇA

1. Türkiye Sınai ve Kalkınma Bankası A.Ş., Bor ve Bor Bileşikleri, Kimya Sektörü Araştırması, Şubat 1980
2. **Postlu, K.**, "Bor Mineralleri ve Bileşiklerine Genel Bakış", Bor Mineralleri Zenginleştirme Semineri, D.E.Ü., İzmir, 1994
3. **Matuschka, A.G.**, "Boronizing", Carl Hanser Verlag, München Wien, 1980
4. **Karahan, M., Alasaran, M., Çelik, A.**, "Plazma Borlama", Mühendis ve Makina, Sayı 512, sayfa 51-54, 2002
5. **Sinha, A. K.**, "Heat Treating", ASM Handbook, 4: 437-446, 1982
6. **Bozkurt, N., Üçişik, A. H., Safoğlu, R. A.**, "Çeliklerde Bor ile Yüzeyleştirme", 3. Ulusal Metalurji Kongresi, O.D.T.Ü., 1979
7. **Bindal, C.**, "Az Alaşımli ve Karbon Çeliklerinde Borlama ile Yüzeyleştirilen Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tespiti", Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bil. Enst., İstanbul, 1991
8. **Bayça, S. U., Şahin, S.**, "Borlama", Mühendis ve Makina, Sayı 532, sayfa 51-59, Mayıs 2004
9. **Karamış, M. B., Nair, F., Selçuk, B.**, "Borlanmış Malzemelerin Tribolojik Özellikleri", 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, 1995
10. **Atik, E.**, "Çeliklerin Borlanarak Aşınma Dayanımlarının Arttırılması", Mühendis ve Makine, 445: 17-20, 1997
11. **Yılmaz, S. S.**, "Çeliklerin Borlanması", Yüksek Lisans Tezi, C. B. Ü. Fen Bil. Enst., 1997
12. **Göy, Z.**, Borlama, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bil.Enst., İstanbul, 1984
13. **Bozkurt, N.**, "Bor Yayınıyla Çeliklerde Yüzeyleştirme", Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bil. Enst., İstanbul, 1984
14. **Şahin, S.**, "Katı Borlama Yöntemi ile Ferrobör Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi", Doktora Tezi, CBÜ, Fen Bil. Enst., Manisa, 1999
15. **Meriç, C., Şahin, S., Yılmaz, S. S.**, "Investigation of The Effect on Boride Layer of Powder Particle Size Used in Boronizing With Solid Boron-Yielding Substances", Materials Research Bulletin 35, pp. 2165-2172, 2000
16. **Şahin, S., Meriç, C.**, "Investigation of the Effect of Boronizing on Cast Irons", Materials Research Bulletin 37, pp. 971-979, 2002
17. **Ünlü, B. S.**, "Kaymalı Yataklarda Tribolojik Özelliklerin ve Borlanmış Demir Esaslı Malzemelerin Yatak Olarak Kullanılabilirliğinin Belirlenmesi", Doktora Tezi, C. B. Ü. Fen Bil. Enst., Manisa, 2004
18. **Hunger, H. J., Trute, G.**, "Boronizing to Produce Wear Resistant Surface Layers", Heat Treatment of Metals, 2: 31-39, 1994
19. **Özsoy, A.**, "Çeliğin borlanmasında borür tabakası, geçiş zonu ve ana matrisin özelliklerinin iyileştirilmesi", Doktora tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bil. Enst., Eskişehir, 1996
20. **Yücel, O.**, "Kabotermik Ferrobör Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu", Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bil. Enst., İstanbul, 1992
21. **Werner, D. H.**, "Bor und borlegierte Stähle", Verlag Stahleisen GmbH, 1990
22. **Bhushan, B., Gupta, B. K.**, "Handbook of Tribology", McGraw-Hill, INC, 1991, USA
23. **Özsoy, A.**, "Borlamanın Endüstriyel Uygulamaları", 1. Ulusal Metalurji ve Malzeme Günleri, Sayfa: 1-10, Eskişehir, Mayıs 2004
24. **Açma, M. E., Duman, İ.**, "Bor", 1. Ulusal Metalurji ve Malzeme Günleri, Sayfa: 313-329, Eskişehir, Mayıs 2004
25. **Carbucchio, M., Palombarini, G.**, "Effect of Alloying Elements on the Growth of Iron Boride Coating", J. Mater. Sci. Let., 6: 1147-1149, 1987
26. **Badini, C., Gianoglio, C., Paradelli, G.**, "The Effects of Carbon, Chromium and Nickel on the Hardness of Borided Layers", Surfaces and Coatings Tech., 30: 157-170, 1987
27. **Goeuriot, P. Y., Fillit, P., Thevenot, F., Driver, S. H., Bruyas, H.**, "The Influence of Alloying Element Addition on the Boriding of Steels", Mat. Sci. And Eng. : 9 19, 1982
28. **Permyakov, V. G., Yakovchuk, Y. E.**, Cherepin, V. T., Amirhanova, T. V., Maifet, Y. P., Effect of "Silicon on Formation of Boride Coatings", Met. Sci. Heat Treat., 15: 251-253, 1973
29. **Fichtl, W.**, "Boronizing and its Practical Application", Materials in Engineering, 2:276-286, 1981
30. **Palombarini, G., Carbucchio, M.**, "High Boron Phases on Borided Iron and Iron Alloys", J. Materials Science Letters, 4: 170-172, 1985
31. **Selçuk, B.**, "Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", Doktora Tezi, E. Ü. Fen Bil. Enst., Kayseri, 1994
32. **Lakhtin, Y. M.**, "Engineering Physical Metallurgy and Heat Treatment", (Trans. Weinstein, N.), Mir Publishers, 426 p., Moscow, 1983
33. **Geller, Y.**, Tool Steels, (Trans. Afanasyev, V. V.), Mir Publishers, 666p., Moscow, 1978
34. **Bazille, P.**, "Connaissances Actuelles Sur La Boruration", Traitement Thermique, 111: 31-38, 1977
35. **Singhal, S. C., A.**, "Hard Diffusion Boride Coating for Ferro Materials", Thin Solid Films, 45: 321 329, 1977
36. **Biddulph, R. H.**, "Boronizing for Erosion Resistance", Thin Solid Films, 45: 341-347, 1977
37. **Linial, A. V., Lavella J. P.**, "New Proseses for Obtaining Increased Metal Hardness and Reduce Friction Properties by Boronizing-I", Industrial Heating, December 1974
38. **Andrew, V., Linial, A. V.**, "New Proseses for Obtaining Increased Metal Hardness and Reduce Friction Properties by Boronizing-III", Industrial Heating, December 1974
39. **Babushkin, B. V., Polyakov, B. Z.**, "Residual Stresses in Steel After Boriding From Melts", Met. Sci. Heat Treat., 15: 577-580, 1973
40. **Yılmaz, S. S.**, "Demir Esaslı T/M Parçaların Yüzeyleştirme İşlemlerinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi", "Doktora Tezi, C. B. Ü. Fen Bil. Enst., 2004