

ÇELİKLERİN BORLANMASI

Arzum ULUKÖY, Ahmet Çetin CAN

Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 20017/Çamlık/Denizli

Geliş Tarihi : 12.01.2005

ÖZET

Geleneksel sertleştirme yöntemlerine kıyasla, borlamanın pek çok avantajı vardır. Yüzeyde oluşan borür tabakası, yüksek sertlik değerleri ve yüksek sıcaklıklarda sertliğini koruması yanında, iyi aşınma, oksidasyon ve korozyon dayanımı gibi üstün özelliklere sahiptir. İşlem çelik, dökme demir, dökme çelik, nikel alaşımları, kobalt alaşımları, sermetler vb çok geniş bir malzeme grubuna uygulanabilir. Bu çalışmada borlama yöntemleri, çeliklerde oluşan bor tabakası ve özellikleri ile bor tabakasına etki eden faktörler incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Borlama, Çelik, Termokimyasal işlemler

BORONIZING OF STEEL

ABSTRACT

Boride layer has many advantages in comparison with traditional hardening methods. The boride layer has high hardening value and keeps it's hardness at high temperatures, and it also shows favorable properties, such as the resistance to wear, oxidation and corrosion. The process can be applied at variety of materials, for instance steel, cast iron, cast steel, nickel and cobalt alloys and cermets. In this review, boronizing process properties, boride layer on steel surfaces and specifications and the factors that effect boride layer are examined.

Key Words : Boronizing, Steel, Thermochemical process

1. GİRİŞ

Bor, periyodik tabloda B simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 olan geçiş elementidir. Bor tabiatta serbest halde bulunmaz. Doğada yaklaşık 230 çeşit bor minerali olduğu bilinmektedir. Çeşitli metal veya ametal elementlerle yaptığı bileşiklerin gösterdiği farklı özellikler, endüstride birçok bor bileşiğinin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bor, bileşiklerin elektrik iletkenliği azdır, ancak, farklı olarak saf bor, karbon iletkenidir. Kristalize bor görünüm ve optik özellikleri açısından elmas benzer ve neredeyse elmas kadar serttir (www.boren.gov.tr).

Bor amorf ve kristal olmak üzere iki şekilde bulunmaktadır; kristal bor ortorombik (FeB) ve

hacim merkezli tetragonal (Fe₂B) sistemlerde kristalleşir (Sinha, 1991).

Bor mineralleri ve bileşikleri çeşitli endüstri dallarında çok farklı malzeme ve ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır. Bor ve ürünlerinin kullanım alanları şöyle özetlenebilir: Cam sanayi, seramik sanayi, nükleer sanayi, askeri zırhlı araçlar, elektronik-elektrik ve bilgisayar sanayinde, iletişim araçlarında, inşaat-çimento sektöründe, metalürji sanayinde enerji sektörü, otomobil sanayi, tekstil sektörü, ilaç ve kozmetik sanayi, tıp, kimya sanayi, temizleme ve beyazlatma sanayi, tarım sektörü, kağıt sanayi, mknatıslar, fotoğrafçılık, kompozit malzemeler, spor malzemeleri, manyetik cihazlar, mummyalama (www.boren.gov.tr).

1. 1. Borlama ile Yüzey Sertleştirme

Borlama işlemi; yüzeyi sertleştirilmiş çeliklere, temperlenmiş çeliklere, takım çeliklerine, paslanmaz çeliklere, dökme çeliklere, dökme demirlere, sinterlenmiş metal tozlarına, nikel, kobalt, molibden ve titanyum gibi demir dışı metaller ve alaşımlarına uygulanabilmektedir (Özbek, 2000). İşlem; yüzeyi çok iyi bir şekilde temizlenmiş olan malzemelere, 700-1000 °C aralığında, tercihen 1-12 saat sürede, bor verici katı toz, pasta, sıvı veya gaz ortamlarda gerçekleştirilir. Ayrıca gaz ortam teknikleri altında da sıralayabileceğimiz plazma pasta borlama ve akışkan yataklı borlama, diğer termokimyasal yöntemlerdir.

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD), iyon implantasyonu veya plazma püskürtme gibi termokimyasal olmayan yöntemler ile de malzeme üzerinde bor tabakası oluşturulabilir.

Geleneksel sertleştirme yöntemlerine kıyasla, bor tabakasının sahip olduğu özelliklerden kaynaklanan avantajları vardır. Bor tabakasının en büyük avantajı çok yüksek sertlik değerine (1450-5000 HV) sahip olması ve yüksek sıcaklıklarda sertliğini korumasıdır. Borlanmış çeliklerde oluşan sertlik değerleri ile diğer yüzey sertleştirme işlemlerinde elde edilen sertlik değerleri Tablo 1'de karşılaştırılmıştır. Oluşan bor tabakasının sertliği ile geleneksel sertleştirme yöntemlerinde elde edilen sertlik değerleri arasındaki büyük fark açıkça görülmektedir. Borlama ile elde edilen değerler, sertleştirilmiş takım çeliğinden ve sert krom kaplamadan daha yüksek olup, volframkarbür ile eşdeğerdir (Matuschka, 1980; Sinha, 1991).

Yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayısı kombinasyonu, başta adezyon ve abrazyon aşınması olmak üzere korozyon ve yüksek sıcaklık oksidasyonu hasarına karşı önemli dayanıklılık sağlar. Az alaşımlı çeliklerin aside karşı dayanımlarını (örneğin sülfürik, hidroklorik ve fosforik asit) artırabilir. Ostenitik paslanmaz çeliklerin hidroklorik aside karşı dayanımını artırır (Özbek ve ark., 2004).

1. 2. Bor Tabakasının Diğer Üstünlükleri

- Yüksek sıcaklıklarda (nitrürleşmiş çeliklerin sertliğini koruyamadığı) bor tabakası sertliğini korur.
- Borlama, demir esaslı malzemelerin korozyon-erozyon dayanımını gerek alkali ortam gerekse seyreltik asit çözeltisi içerisinde korur ve bu özelliği sayesinde endüstride geniş bir uygulama alanı bulur.

- Borlanmış yüzey 850 °C'ye kadar oksidasyona dayanıklıdır.
- Oksitleyici ve korozif ortamlarda çalışan parçaların yorulma dayanımlarını artırır ve servis ömrünü uzatır.

1. 3. Borlamanın Bazı Sakıncaları Şöyle Sıralanabilir

- Gaz sementasyonu ve plazma nitrürasyonu işlemlerinin, borlama işlemine göre işletme giderleri daha azdır ve uygulanmaları daha kolaydır.
- Karbürleşmiş veya nitrürleşmiş çeliklere göre, borlanmış alaşımlı çeliklerin temas yorulma dayanımı (Pullanma dayanımı) düşüktür.
- İşlem sonucunda parçanın ölçülerinde (borlama tabakasında % 5-25'i kadar hacim genişlemesi olduğu için) değişimler olur (Sinha, 1991).
- Yüksek hız çeliklerinin sertleştirme sıcaklıkları genellikle 1150 °C'den fazla olduğu için, borlamaya uygun değildir (www.bortec.de).

Tablo 1. Çeşitli Yüzey İşlemleri ile Elde Edilebilecek Sertlik Değerleri (Sinha, 1991).

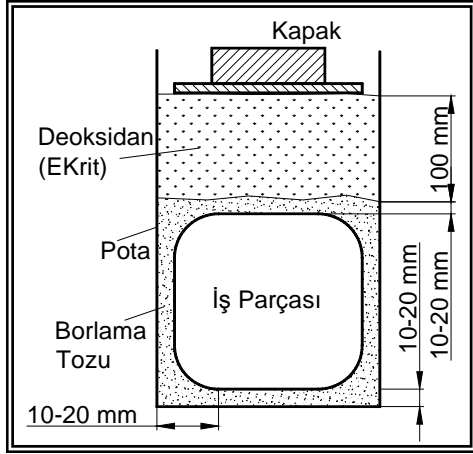
Malzeme	Mikrosertlik, HV
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 çeliği	630-700
Yüksek hız çeliği BM 42	900-910
Nitrürleşmiş çelik	650-1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
WC+Co	1160-1820
Al ₂ O ₃ +ZrO ₂ seramikler	1483
Al ₂ O ₃ +TiC+ZrO ₂ seramikler	1730
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Elmas	>10000

2. TERMOKİMYASAL BORLAMA YÖNTEMLERİ

2. 1. Katı Borlama

Uygulanmasının kolay olması, basit donanım gerektirmesi, ekonomik, güvenli ve kullanılan toz karışımının kimyasal kompozisyonunda değişiklik

yapılabilirliği nedeniyle en yaygın borlama tekniğidir. Kutu borlama, borlanacak malzemenin bor verici ortam olan toz karışımı içerisinde belirli sıcaklık ve sürelerde bekletilmesiyle gerçekleştirilir. Katı borlama işleminin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Katı borlama işleminin şematik gösterimi

Potanın (kutu) içerisinde, hazırlanan toz karışımı borlanacak parçanın etrafını en az 10-20 mm kaplayacak şekilde yerleştirilir. Borlama tozlarının üzerine SiC gibi bir dolgu malzemesi doldurulur. Üst kısma ise hava girişini dolayısıyla oksitlenmeyi engelleyecek şekilde bir kapak kapatılır. Pota hacmi, fırın hacminin % 60'ını geçmemelidir. Bunun nedeni ısıtıcılara yakın olması nedeniyle, potada meydana gelebilecek yüksek iç gerilmeler, çatlaklar ve pota yüzeyindeki malzeme dökülmelerini önlemek ve işlem sırasında yeniden toz ilavesinin (% 20-50) gerektiği durumlarda borlamaya devam edilebilmesi içindir. Yaygın olarak kullanılan bor bileşikleri bor karbür (B_4C), ferrobor ve amorf bordur. Ferrobor ve amorf bor çok iyi bor verici olup, kalın borür tabakası oluştururlar. SiC ve Al_2O_3 çözünmeye yardımcı olur. Aktivatör olarak $NaBF_4$, KBF_4 , $(NH_4)_3BF_4$, NH_4Cl , Na_2CO_3 , BaF_2 ve $Na_2B_4O_7$ kullanılır.

Pota olarak alaşımsız çelik, paslanmaz çelik veya alümina kutular kullanılabilir. Borlama kaynağı olarak literatürde verilen toz karışımları şöyledir (Sinha, 1991; Özbek, 2000):

- % 5 B_4C , % 90 SiC, % 5 KBF_4
- % 50 B_4C , % 45 SiC, % 5 KBF_4
- % 85 B_4C , % 15 Na_2CO_3
- % 95 B_4C , % 5 $Na_2B_4O_7$
- % 84 B_4C , % 16 $Na_2B_4O_7$
- Amorf bor (% 95-97), % (3-5) KBF_4
- % (40-80) B_4C , % (20-60) Fe_2O_3
- % 60 B_4C , % 5 B_2O_3 , % 5 NaF, % 30 demir oksit

- % 50 Amorf bor, % 1 $NH_4F.HF$, % 49 Al_2O_3
- % 100 B_4C
- % 20 B_4C , %5 KBF_4 , % 75 Grafit
- % 95 Amorf bor, % 5 KBF_4

Demir esaslı malzemelerde, işlem sıcaklığı 800-1050 °C arasında, borlama süresi ise 1-8 saat arasında seçilebilmektedir (Sinha, 1991; Özbek, 2000).

2. 2. Pasta Borlama

Kutu Borlamanın zor ve pahalı olduğu veya fazla zaman kaybının olduğu durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Karmaşık şekilli parçaların tamamen veya kısmen hızlı bir şekilde borlanması, borlama pastası ile yapılabilir. Bu işlemde % 45 B_4C ve % 55 kriyolit (Na_3AlF_6 ilaveli) veya geleneksel borlama toz karışımı $B_4C + SiC + KBF_4$ iyi bir bağlayıcı ajan ile (metil selülozun sulu çözeltisi gibi) uygulanmaktadır. Hazırlanan borlayıcı karışım yani pasta, malzemenin üzerine sürülerek veya püskürtülerek 1-2 mm civarında kalınlıkta tabaka oluşturulmakta ve kurutulmaktadır. İşlem, demir esaslı malzemelere geleneksel fırınlarda 800-1000 °C arasında 5 saat süreyle uygulanmaktadır. Bu işlemde koruyucu atmosfer olarak Ar, NH_3 veya N_2 kullanılmaktadır. Pasta borlama işleminde 1000 °C'de 20 dakika süre sonunda 50 µm kaplama kalınlığı elde edilebilmektedir. Büyük parçaların veya seçilmiş alanların borlanması için oldukça elverişlidir (Sinha, 1991; Özbek, 2000).

2. 3. Sıvı Borlama

Bu yöntemde borlama banyosu sıvı haldedir. Borlama işlemi 700-1000 °C aralığında gerçekleştirilmektedir. Sıvı ortamda borlama, elektrolitik olan ve olmayan sıvı borlama olarak iki ana grupta toplanmaktadır. Bu yöntemin birçok sakıncası vardır:

- Borlama sonrasında parça yüzeyinde tuz kalıntıları ve reaksiyona girmeyen bor vardır. Bunların giderilmesi zaman ve para kaybına yol açar.
- Borlamanın başarılı olabilmesi borlama sırasında banyo viskozitesi artmamalıdır. Bu nedenle sıvı banyoya tuz ilavesi yapılmaktadır. Bu da maliyeti arttırır.
- Korozyon ortamlara dayanıklı fırınlara ihtiyaç vardır.

Demir esaslı malzemelerin elektrolitik sıvı borlama işlemi, 900-950 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir.

Tablo 2. Literatürde Verilen Bazı Tuz Banyosu İçerikleri.

% Ağırlık Olarak Banyo İçeriği							Kaynak
Na ₂ B ₄ O ₇	B ₄ C	KBF ₄	B ₂ O ₃	SiC	Ferro-Si	Al	
66	---	---	14	---	20	---	Bindal, 1991
65	---	---	15	---	20	---	Şen, 1998
70	---	---	---	30	---	---	Yüksel ve ark, 1995
70	---	---	10	20	---	---	Yüksel ve ark, 1995
60	40	---	---	---	---	---	Yüksel ve ark, 1995
---	2.5	10	---	87.5	---	---	Yüksel ve ark, 1995

Tuz banyosunda elektrolitik borlama işleminde, katot olarak borlanacak demir esaslı malzeme, anot olarak grafit ve elektrolit olarak ise boraks kullanılmaktadır. Borlama işlemi, 900-950 °C sıcaklık aralığında 4-6 saat süre ile 0.15-0.20 A/cm² akım altında gerçekleştirilmektedir. Parçanın her tarafında homojen bir kaplama tabaka kalınlığı elde edilebilmesi için elektroliz sırasında parça döndürülmektedir. Düşük alaşımlı çeliklerde çok ince kaplamaların elde edilmesinde yüksek akım yoğunluğu kullanılarak çok kısa sürelerde borlama yeterli olmaktadır. Alaşımlı çeliklerde ise kalın kaplama tabakalarının elde edilmesi için düşük akım yoğunluğu ve uzun sürelerde borlama işlemi gerekmektedir (Sinha, 1991; Özbek, 2000).

2. 4. Gaz Borlama

Gaz borlama da en çok kullanılan ortamlar şöyledir :

- Diborane (B₂H₆)-H₂ karışımı
- Borhalid (iyonize bor)-H₂/veya (75/25 N₂-H₂) gaz karışımı
- (CH₃)₃B ve (C₂H₅)₃B gibi organik bor bileşikler

Gaz fazında borlama işlemi karmaşık ekipmanlar gerektirmektedir. Oysa ki proses kendi içerisinde oldukça basittir. Fakat sakıncalı iki durum vardır:

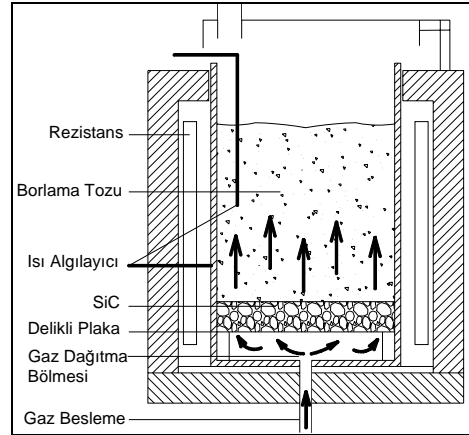
- a. Son derece tehlikeli olan siyanürün zehirlilik oranı sınırı 10 ppm iken, diboranın zehirlilik sınırı 0.1 ppm'den düşüktür.
- b. Hidrojen ile seyreltilse bile diboran oldukça pahalıdır.

(B₂H₆)-H₂ karışımı zehirli ve patlayıcı olma özelliği sebebiyle ticari olarak kullanılmamaktadır. Organik malzemeler kullanıldığı takdirde borür ve karbür bileşikler birlikte oluşmaktadır. BBr₃, çok pahalı ve suyla olan kuvvetli reaksiyonu ayrıca yüksek sıcaklıkta kararlılığının ayarlanması için BF₃'e ihtiyaç duyulması sebebi ile kullanım açısından tercih edilmemektedir. Gaz borlama için en çok BCl₃ tercih edilmektedir. Parça gaz borlamaya tabi tutulacağı zaman 1/15 BCl₃+H₂ gaz karışımında

700-950 °C arasında ve 67 kPa basınç altında (0.67 bar) borlanmaktadır. Son çalışmalar H₂ yerine 75 : 25 oranında N₂ : H₂ kullanılmasıyla FeB fazının azaldığını ve daha iyi kalitede tabakaların elde edildiğini göstermiştir (Sinha, 1991; Özbek, 2000).

2. 5. Akışkan Yataklı Fırınlarda Borlama

Katı ortamda borlamanın değişik bir uygulaması olan akışkan yataklı fırınlarda borlama yönteminde, akıcı ortam olarak özel borlama tozu (EKabor) kullanılabilir. Bu toz oksijensiz gaz (örneğin Ni₂/H₂) ile akıcı hale gelmektedir. Şekil 2'de işlemin şematik resmi verilmiştir.



Şekil 2. Akışkan yataklı borlama işleminin şematik gösterimi.

Bu işlemin sahip olduğu bazı üstünlükler şunlardır (Sinha, 1991; Özbek, 2000):

- İşlem sıcaklığına hızlı ısıtma ve daha kısa süre işlem görecektir parçaları doğrudan dışarıya alabilme mümkündür.
- Borlanan parça ve hareketli partiküller arasındaki çok yüksek ısı transfer hızı sebebi ile mükemmel termal kararlılığa sahiptir.
- Sürekli ve otomatik çalışma imkanı vardır. Borlanacak parçalar aralıklı bir şekilde şarj edilebilir ve fırından dışarı alınabilir.
- Borlama sonrasında parçaya doğrudan su verilebilir. Bu ise borlama ve su verme

işlemlerini tek bir işleme indirgeme demektir.

- Kitleselel üretilmiş parçaların işlemlerinde zaman ve enerji tasarrufu sağlar.

2. 6. Çok Bileşenli Borlama

Çok bileşenli borlama, bor elementi yanında alüminyum, krom, silisyum, vanadyum ve titanyum gibi metalik elementlerden bir veya birkaçının çelik yüzeyine aynı anda veya birbiri ardına yayındırılması esasına dayanan termokimyasal bir işlemdir. Katı ortamda yapılabildiği gibi sıvı boraks ortamında da yapılabilmektedir. Çok bileşenli borlama genellikle iki kademeli bir işlem olarak, 850-1050 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada borlama işlemi, geleneksel yöntemlerden biri ile yapılmaktadır ve daha çok kutu borlama tercih edilmektedir. FeB fazının oluşumu iyi sonuçlar vermekte ve 30 µm civarındaki kaplamalar yeterli olmaktadır. İkinci aşamada, elementin tabakaya difüzyonu gerçekleştirilmektedir. Kutu borlama sırasında oluşan sinterleşmeyi önlemek için ortamdan Ar veya H₂ gazı geçirilmektedir. Çok bileşenli borlama; bor-alüminyumlama, bor-silisyumlama, bor-kromlama, bor-krom-titanyumlama, bor-krom-vanadyumlama ve bor-vanadyumlama şeklinde altı gruba ayrılmaktadır.

Bor-silisyumlama ile işlem gören parçaların yorulmalı korozyon dirençlerinde artış sağlanırken, bor-alüminyumlama ile nemli ortamlarda daha iyi korozyon ve aşınma direncine sahip parçalar elde edilmektedir. Bor-kromlama işlemi ile bor-alüminyumlama işlemindekinden daha yüksek oksidasyon direncine ve geleneksel borlamadakinden daha iyi korozyon ve yorulmalı korozyon direncine ulaşılmaktadır. Bor-kromlanmış parçaların ısıl işlemleri, bu sebepten dolayı kontrollü atmosfer gerektirmeksizin yapılabilmektedir. Bor-krom-titanyumlama işlemi sonrasında parça yüzeyinde 5000 kg/mm² (HV) sertlik değerine sahip titanyumborür oluşmakta, bu da çok yüksek abrasif aşınma ve korozyon direnci sağlamaktadır. Bor-vanadyumlama ve bor-krom-vanadyumlama işleminde sertliği 3000 kg/mm² (HV) olmasına rağmen, oldukça sünek tabakalar elde edildiğinden bu işlem darbeli yüklemelere maruz kalacak olan parçalara uygulanabilmektedir (Sinha, 1991; Özbek, 2000).

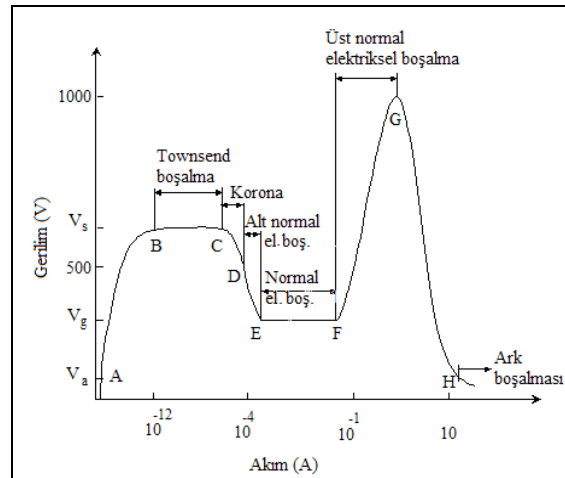
Son yıllarda yukarıda sayılan çok bileşenli borlama tekniklerine, bor-karbürleme (borocarbüring) ve bor-karbürleme-nitrürleme (borokarbonitrid) yöntemleri de eklenmiştir (Kulka ve Pertek, 2003; Pertek ve Kulka, 2003).

2. 7. Plazma Borlama

Bilinen yüzey sertleştirme yöntemlerine göre, plazma ile yüzey sertleştirme işlemleri önemli avantajlara sahiptir. Bunlar; güvenilirlik, çevresel temizlik, ekonomiklik, kısa işlem süresi, mükemmel aşınma direnci, minimum distorsiyon, mikro yapının kontrol edilebilirliğidir.

Maddenin katı, sıvı, gaz ve plazma olmak üzere 4 hali vardır. Bu haller arasındaki asıl fark sahip oldukları enerjidir. Yani maddenin konumunun değiştirilmesi, verilecek enerji ile ilgilidir. Örneğin katı haldeki bir maddeye, enerji vererek sıvı, sıvı halde iken enerji vererek gaz ve gaz durumundaki maddeye de belirli bir enerji vererek plazma haline geçirmek mümkündür. Bu işlemin terside yapılarak yani verilen bu enerjileri geri alarak tekrar plazma halinden gaz, sıvı ve katı hale geçirmek mümkündür.

Plazma, içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötral 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 elektriki boşalmadır. Elektriki boşalma mekanizması, bir elektrik gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa belirli şartlar gerçekleştiği takdirde, tatbik edilen gerilim plakalar arasındaki gazın delinme geriliminin üzerinde ise, bu iki plaka arasında bir elektrik boşalması olur ve bu iki iletken plaka arasında bir elektrik akımı akışı olarak gerçekleşir. Akan akımın büyüklüğüne göre ortaya çıkan elektrik boşalma sistemleri sınıflandırılabilir. Şekil 3'de (Çelik ve ark., 2002) gaz boşalma bölgeleri ve elektrik arkı boşalma bölgeleri ve tiplerinin voltaj-akım karakteristiği gösterilmiştir.



Şekil 3. Farklı Elektriki Boşalma (glow discharge) Tiplerinin Voltaj-Akım Karakteristiği (Çelik ve ark., 2002).

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. Mikroyapı ve demirbor tabakalarının büyümesi işlem sıcaklığı, gaz karışım oranları, malzeme kompozisyonları, işlem basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla kontrol edilebilmektedir. Bu yöntem Almanya’ da otomotiv sektöründe kullanılmaya başlanmasıyla üstün özellikleri nedeniyle endüstrinin dikkatini çekmiş ve artan ilgiyle araştırmalar yoğunlaşmıştır (Çelik ve ark., 2002).

2. 8. Plazma Pasta Borlama

Tuz banyosunda ve gaz ortamda borlamanın neden olduğu bazı problemlerden dolayı (örneğin çevre kirliliği, zehirli ve patlayıcı olma özellikleri gibi) değiştirilmiş, yenilenmiş borlama prosesleri geliştirilmektedir. Bunlardan bir tanesi de plazma borlama işlemidir.

Geleneksel borlama işlemlerine göre birçok avantajları vardır: Yüksek enerji verimliliği, işlem sıcaklığının düşük olmasından dolayı parçadaki çarpılmaların minimuma indirilebilmesi, yüksek sıcaklık fırınları ve ekipmanlarını gerektirmemesi, bor tabakasının kalınlığı ve kimyasal kompozisyonunun kontrol edilebilirliği bu avantajlar arasında sayılabilir.

Fakat bu yöntemde kendine ait sınırları vardır. B₂H₆ ve BCl₃ gazları, bor verici kaynak olarak kullanılır. Ancak bu gazlar son derece zehirli, pahalı ve patlayıcıdır. BCl₃’ün vakum odasında meydana getirdiği korozyon da önemli bir diğer problemdir. Bu problemi gidermek için plazma pasta borlama işlemi geliştirilmiştir. Pasta, amorf bor ve boraks ile hazırlanır. Pastadan plazma yöntemiyle elde edilen aktif bor, demirin içerisine yayılır (Sinha, 1991; Yoon et al., 1999).

3. BORLANMIŞ YÜZEYİN GENEL ÖZELLİKLERİ

3. 1. Demir Bor Bileşiklerinin Oluşumu

Demir alaşımlarında alaşım elementlerinin genellikle atom çaplarına bağlı olarak ara yer ve yer alan element olarak eriyebileceği bulunmuştur. Bu gerçekten hareketle, bor α-Fe’de hem yer alan hem de ara yer pozisyonunda olabilmektedir. Bor, çeliklerde katı halde, ppm mertebesinde çözünmektedir. Borun atom çapı demirin atom çapından % 27 daha küçük olduğundan bu element ile katı eriyik yapabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda

demir içerisinde borun çözünürlüğü mukayese edildiğinde 1/50 oranında ara yer atomu olarak erirken, büyük çoğunlukla yer alan atomu olarak erimektedir (Bindal, 1991).

Borlama sırasında, bor atomlarının difüzyonu ile yüzeyde metal kafesi içerisinde bor bileşikleri oluşur. Bu tabaka tek fazlı veya çok fazlı borürlerden oluşabilir. Bor tabakasının şekli, büyüklüğü ve oluşan fazların kompozisyonu ana malzemenin kimyasal kompozisyonuna, bor tabakasının sertliği, oluşan bor tabakasının şekline ve ana malzemenin kimyasal kompozisyonuna bağlıdır (Sinha, 1991).

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 faz geçiş bölgesinde dişe benzer morfolojiler oluşmaya başlar. Oluşan kolonsal borür kristalleri, borun difüzyonuna bağlı olarak, eşdeğer boyalarda 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 demir-bor 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 (Bindal, 1991).

3. 2. Bor Tabakasının Özelliklerine Etki Eden Faktörler

3. 2. 1. Borlayıcı Ortamın Bileşimi ve Konsantrasyonun Etkisi

Bor kaynaklarının ortamda yeterince bulunması borür tabaka kalınlığını artırır. Ancak ortamda yeterince bor kaynağı yoksa yani borlama işlemi sırasında bor kaynağında bor kalmaz ise tabaka oluşumu durur. Böylece ince bir borür tabakası oluşur. B₄C den B’nin yalnız bırakılması için ortamda redüksiyonu sağlayacak bir madde (redükta) bulunmalıdır. Böylece redükta bir madde olan SiC ile B₄C bileşiminden B (elementel bor) elde edilir. Serbest kalan B’nin oksijene olan afinitesi çok yüksektir ve hemen oksijenle B₂O₃ oluşturur. Bunu önlemek için ortamda yeterince SiC bulunmalıdır.

Tablo 3. 21NiCrMo2 (AISI 8620) Çeliği İçin Farklı Bileşimdeki Katı Borlama Şartlarında Elde Edilmiş Olan Değerler.

Toz Bileşimi	Sıcaklık, (°C)	Süre, (saat)	Sertlik, (HV)	Tabaka Kalınlığı, (µm)	Kaynak
% 5 B ₄ C, % 5 KBF ₄ , % 90 SiC	930	5	973	62	Mollaoğlu ve ark. 2004
Ekabor-2	950	2	1400	80	Çelebi ve ark. 2004
		4	1500	130	
		6	1600	190	
		8	1700	220	

Redüksiyonu sağlayan SiC aynı zamanda demiri de redükler, böylece serbest kalan bor, demire yayılır. Böylece FeB ve Fe₂B tabakaları oluşur. Borun demire yayılmasını KBF₄ hızlandırır (Sinha, 1991; Bayça ve Şahin, 2004).

Literatürde, plazma pasta borlama konusunda yapılan çalışmalarda (Yoon et al., 1999), maksimum tabaka kalınlığı için amorf bor ve boraks ile hazırlanan karışımda, % 20 veya % 70 borax kullanılması önerilmiştir.

Aktivatör olarak NH₄Cl kullanılarak yapılan çalışmada değişik toz karışımlarının, oluşan tabakanın özelliklerine etkileri incelenmiştir. NH₄Cl oranı arttıkça tabaka kalınlığının arttığı tespit edilmiştir. Ekabor3, NH₄Cl, kromlama tozu ve Al₂O₃ içeren toz karışımında yapılan borlama işlemi ile tabakada bor, krom, silisyum ve alüminyum bileşikleri oluşması sağlanabilmektedir: FeB/Fe₂B → Fe₂B → α/Fe₂B → Fe₂B/(Si, Al)₂(Cr, Fe). Bu reaksiyon, karışım içerisindeki NH₄Cl ve Ekabor3/kromlama tozu oranlarının artması ile değişmektedir. 900 °C ve 1000 °C arasındaki sıcaklıklarda, NH₄Cl oranının artması ile borun difüzyon için gerekli aktivasyon enerjisi azalmaktadır (Chen and Wang 1999). Katı borlamada kullanılan toz büyüklükleri azaldıkça mikro sertlikler ve tabaka kalınlıklarının arttığı tespit edilmiştir (Meriç ve ark. 2000).

3. 2. 2. Alaşım Elementlerinin Etkisi

Alaşım elementleri kaplama ile matris ara yüzeydeki kristallografik düzeni ve faz bileşenlerini etkilemektedir. Aynı şekilde alaşım elementleri borür tabakasının kalınlığını da etkilemektedir.

Nikel içeren alaşımlarda borür tabakası kalınlığındaki azalma krom içeren alaşımlardan daha azdır. Nikel demir borürler içerisinde çok düşük bir çözünme eğilimi gösterirken, krom matriksten tercihli olarak borürlerin içerisine girmektedir.

Nitekim saf demirde kaplama kalınlığı, alaşımli çeliklerdekinden daha yüksektir. Alaşım elementleri, bor difüzyonunu düşürmekte, matris ve kaplamanın özelliklerini değiştirmektedir.

Karbon, borlama sırasında borür zonundan matrise doğru yayılmaktadır. Karbon konsantrasyonunun artması ile sertlikte bir artış gözlenmiştir. Borun karbonla yaptığı B₄C en sert malzemeler arasındadır. % 0.4 karbon oranına kadar sertlik artışı devam etmektedir ve bu değer üzerinde ise daha fazla karbon oranları için hemen hemen sabit kalmaktadır. Çünkü FeB, Fe₂B, (Fe, Cr, Ni)B, (Fe, Cr, Ni)₂ B bileşiklerinde daha fazla karbon bulundurulması zor olmaktadır. Karbon konsantrasyonunun artması ile borür tabakasının azaldığı ve Fe₂B tipi faz ile matris ara yüzeyinin oldukça düzenli olduğu gözlemlenmiştir. Karbon FeB ve Fe₂B tipi fazlarda çözünmeyip Fe₃C, Cr₃C, Fe₆C₃ gidi karbürler şeklinde matris yakınındaki alanlarda biriktiğinden bunun borlama mekanizmasını etkilediği ve söz konusu tabakayı daha sıkı ve sert yaptığına inanılmaktadır. Bu karbon konsantrasyonu arttığında FeB'nin stabilitesinin azaldığı, Fe₂B'nin ise arttığı anlamına gelmektedir (Bindal, 1991; Sinha, 1991).

Silisyum ve alüminyum da karbon gibi davranarak, bor tabakası içerisinde çözünmezler. Bor atomları tarafından yüzeyden içeriye doğru itilirler. Yüksek miktarda Si ve Al içeren çelikler borlamaya uygun değildirler. Çünkü bor tabakasının altında yumuşak bir ferrit zonu oluştururlar. Bu da pullanma mukavemetini azaltır.

Krom çeliklerde borür tabakasının hem morfolojisine hem de derinliğine etki etmektedir. % 4 Cr içeren çeliklerde kolonsal (asiküler) karakterde ve derinliği 65-95 µm kalınlıklı borür tabakaları elde edilirken, % 12 krom içeren çeliklerde ise 65 µm kalınlığında ve düz karakterde borür tabakası elde edilmektedir. % 26 Cr içeren çeliklerde ise borür tabakasının kalınlığı birkaç tanesi hariç 5 µm'yi aşmamaktadır. Krom atom numarası demirden düşük bir element olduğundan borca en zengin olan (Fe, Cr)B'ye öncelikle ve

sistematiik olarak matristen faza girerek yüzeye doğru yayılmaktadır. Kromlu alaşımların borür tabakalarının karakterleri kromsuz alaşımlar ile mukayese edildiğinde, kromlu alaşımların karbon yüzdelereine bağı olarak borür tabakalarının çok daha ince oldukları ve oldukça düzgün bir borür tabakası/matris ara yüzeyine sahip oldukları görülmüştür. Çeliklerin borlanmış tabakalarında mevcut (Fe, Cr)B ve (Fe, Cr)₂B fazlarının sertliğı krom miktarının artmasıyla sistematiik olarak artar. Bu fazların sertliklerini ölçmek çok zordur. Ara yüzey bölgelerinde elde edilen sertlik ölçümleri kaplama tabakası sertliğinden daha düşük değerler vermektedir (Bindal, 1991; Sinha, 1991).

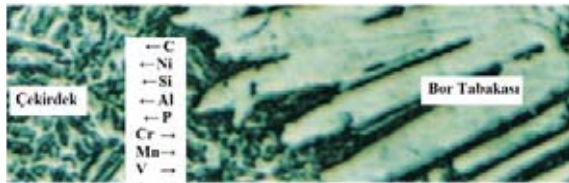
Borlanan numunelerde, borlu tabaka /matris ara yüzeyleri artan nikel miktarı ile daha da düzenli olmaktadır. Yüksek nikel oranı borür tabakasının kolonsal yapısını azaltmakta, yüksek poroziteyi ve kötü mekanik özellikleri beraberinde getirmektedir .

Krom, mangan atom numaraları demirden daha düşük olduğundan borlanan malzemenin içinden yüzeyine doğru yayılmaktadır. Oysa nikel ve karbon, krom ve manganezin tersi yönünde yayılmaktadır (Bindal, 1991; Sinha, 1991).

Ayrıca manganın kırılma tokluğuna olumlu, kromun ise olumsuz etki ettiği düşünülmektedir (Selçuk ve ark., 2003).

Vanadyum, kararlı bor bileşikleri yapar (VB ve V₂B₃ gibi). Vanadyum borürleri Ti, Cr ve Zr borürleri gibi yüksek ergime sıcaklığı, yüksek sertlik ve yüksek aşınma dayanımı gösterir (Şen, 2004).

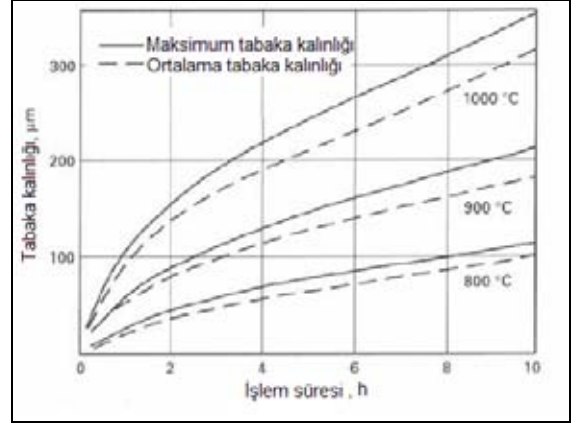
Şekil 4'te borlama işlemi süresince çelik içerisindeki alaşım elementlerinin literatürde verilen hareket yönleri gösterilmiştir (Uluköy, 2005).



Şekil 4. Alaşım elementlerinin borlama sırasındaki hareket yönleri (Uluköy, 2005).

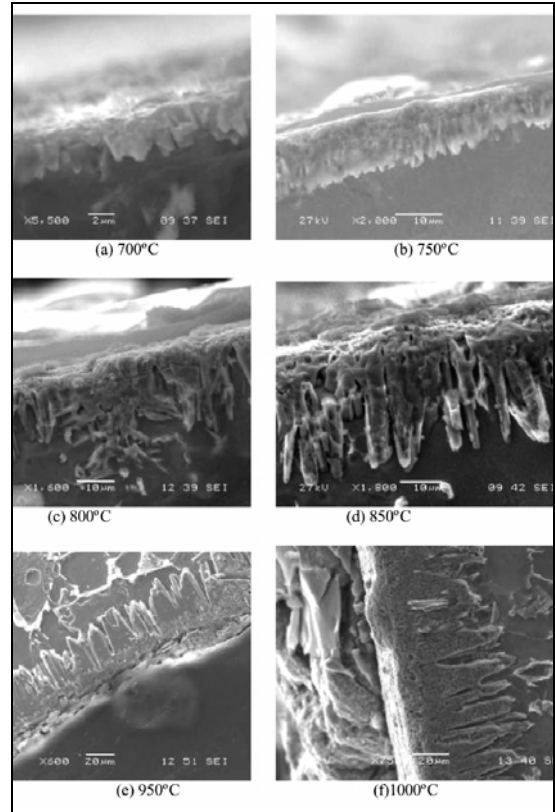
3. 2. 3 İşlem Sıcaklığı ve Zamanının Etkisi

İşlem sıcaklığı ve zamanı arttıkça, elde edilen tabaka kalınlığı da artmaktadır. Şekil 5'te C 45 çeliğine uygulanan kutu borlama işleminde sıcaklık ve zamanın etkisi görülmektedir (Sinha, 1991).



Şekil 5. C 45 çeliğine uygulanan kutu borlama işleminde sıcaklık ve zamanın etkisi.

Şekil 6'da % 0.2 C'lu yumuşak çeliğin 30 dakika süre ile değişik sıcaklıklarda plazma borlama yöntemiyle borlanması ile oluşan bor tabakaları görülmekte, sıcaklık artışı ile tabaka kalınlıklarının değişimi ise Tablo 4'de verilmektedir (Yu ve ark., 2002).



Şekil 6. % 0.2 C'lu yumuşak çeliğin 30 dakika süre ile değişik sıcaklıklarda plazma borlama yöntemiyle borlanması ile oluşan bor tabakası kalınlıklarının karşılaştırılması (Yu et al., 2002).

Tablo 4. Şekil 6'da Görülen Tabakaların Karşılaştırılması.

Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Tabaka kalınlığı (μm)
700	2
750	12
800	17
850	30
950	46
1000	59

İşlem sıcaklığının Fe-B denge diyagramındaki ötektik sıcaklığının (1149°C) altında olması gerekmektedir. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda lokal erimeler oluşmakta, bu da malzemenin yüzeyini bozmaktadır. Kalınlık arttıkça, kırılabilirlik artmaktadır. Borlama sıcaklığının artması, tabaka kalınlığını artırması yanında poroziteyi de artırarak tabakanın gevrekleşmesine yol açmaktadır (Bindal, 1991).

4. SONUÇ

Borlama, difüzyonla yüzeye bor yayındırma işlemidir. Yüzeyde oluşan bor tabakası FeB ve Fe₂B fazlarından oluşmakta, tabakanın altında testere dişi şeklinde Fe₂B fazı oluşmakta ve ana malzemeye bor tabakasının tutunmasını sağlamaktadır.

Borlama katı, sıvı, gaz, pasta gibi bor verici termokimyasal işlemler ile veya termokimyasal olmayan iyon implantasyonu gibi yöntemler ile yapılabilmektedir. Oluşan borür tabakasının özellikleri ana malzemenin alaşım elementlerine, işlem sıcaklık ve zamanına, bor verici ortamın bileşimi ve konsantrasyonuna bağlıdır.

İşlem sonucunda yüksek sertlik, iyi aşınma direnci, korozyon direnci, aside karşı dayanım gibi özellikler elde edilir.

5. KAYNAKLAR

Bayça, S. U., Şahin, S. 2004. Borlama, Mühendis ve Makina, Sayı 510.

Bindal, C. 1991. Az Alaşımli ve Karbon Çeliklerinde Borlama İle Yüzeye Kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tespiti, Doktora Tezi, İTÜ.

Chen, F. and Wang, K. 1999. The Kinetics and Mechanism of Multi-component Diffusion on AISI

1045 Steel, Surface and Coatings Technology, 115 C: 239248.

Çelebi, G., İpek, M., Yılmaz, Ş., Bindal, C. 2004. AISI 8620 Çeliği Üzerinde Oluşan Borürlerin Bazı Mekanik Özellikleri, 10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi, s. 25-29.

Çelik, A., Alsaran, A., Karakan, M. 2002. Plazma ile Termokimyasal Yüzey İşlemleri, Mühendis ve Makina, Sayı, 510.

<http://www.boren.gov.tr/kulyer.htm>

<http://www.bortec.de/boronizing.htm> (1 of 7)
24.12.2004 12 : 22 : 46.

Kulka, M., Pertek, A. 2003. Characterization of Complex (B +C+N) Diffusion Layers Formed on Chromium and Nickel-Based Low-Carbon Steel, Applied Surface Science, V218, s. 113-122.

Matuschka, A. G. Von. 1980. Boronizing, The Alden Pres Ltd., Oxford, England, s. 11-45.

Meriç, C., Şahin, S. ve Yılmaz, S. S. 2000. Investigation of The Effect on Boride Layer of Powder Particle Size Used in Boronizing with Solid Boron-yielding Substances, Materials Research Bulletin, 35C : 2165-2172.

Mollaoğlu, H., Topuz, A., Yalman, Y. O. 2004. Kutu Borlama Tekniği ile X210Cr12, 8620 Çelikleri ve KGDD'in Termokimyasal Borlanması, 10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi, Denizli, s. 319-324.

Özbek, İ. 2000. Borlama Yöntemi ile (AISI M50, AISI M2) Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi.

Özbek, İ., Sen, S., İpek, M., Bindal, C., Zeytin, S., Ucisik, A. H. 2004. A Mechanical Aspect of Borides Formed on the AISI 440C Stainless-Steel, Vacuum, V73, s. 643-648.

Pertek, A., Kulka, M. 2003. Two-step Treatment Carburizing Followed By Boriding on Medium-Carbon Steel, Surface and Coatings Technology, V173, s. 309-314.

Selçuk, B., İpek, R., 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, V141, s. 189-196.

Sinha, A. K. 1991. Boronizing, ASM Int, Heat Treating, bl. 2., s. 437-447.

Şen, Ş. 1998. Termokimyasal Borlama İşlemi ile AISI 5140, AISI 4140 ve AISI 4340 Çeliklerinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi.

Şen, Ş. 2004. The Characterization of Vanadium Boride Coatings on AISI 8620 Steel, Surface & Coatings Technology, C : xx, s. Xxx-xxx.

Uluköy, A. 2005. 21NiCrMo2 (AISI 8620) Çeliğinden Yapılmış Dişli Çarklara Karbürleme ile Beraber Borlama İşleminin Uygulanması, Y. Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi.

Yoon, J. H., Jee, Y. K., Lee, S. Y. 1999. Plasma Paste Boronizing Treatment of the Stainless Steel AISI 304, Surface and Coatings Technology, V112, s. 71-75.

Yu, L. G., Khor, K. A., Sundararajan G. 2002. Boriding of Mild Steel Using The Spark Plasma Sintering (SPS) Technique, Surface and Coatings Technology, V157., s. 226-230.

Yüksel, M., Can, A. Ç., Özmen, Y. 1995. X210Cr12 (1.2080) Takım Çeliğinin Tuz Banyosunda Borlanması, Tr. J. of Engineering and Environmental Sciences, V. 19, s. 97-101.