

BORLAMA İLE YÜZEY SERTLEŞTİRME ÇALIŞMALARI

Süleyman BAŞTÜRK

Hava Harp Okulu, HUTEN Müdürlüğü

Muzaffer ERTEN

İ.T.Ü. Makina Fakültesi, Gümüşsuyu/İstanbul

ÖZET

Borlama yöntemi özellikle son yıllarda araştırmacıların ilgisini çekmekte ve bu konuda oldukça yoğun ve ilginç araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada, özet olarak borlama yönteminin yüzey işlemleri arasındaki yeri ve borlama yöntemleri tanıtılmış, ardından da borlama ile ilgili yapılan geniş bir literatür taraması özet olarak sunulmuştur. Sonuç olarak yurtdışında oldukça yoğun bir şekilde araştırma yapılan bu alanda ülkemizde de yeni çalışmaların yapılması gerekliliği belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Borlama, yüzey sertleştirme, ısı işlem

ABSTRACT

Boroning method has attracted the attention of researchers especially in the recent years, and very intensive and interesting studies have been carried out in this subject. In this study, a summary of the place of boroning method in surface operations was introduced, and next, a brief review of the wide literature in boroning was presented. As a consequence, it was stressed that there is a need to carry out new studies in our country about the topic, which receives a lot of attention abroad.

Keywords: Boroning, surface hardening, heat treatment

Giriş

Bor ve bileşiklerinden faydalanılarak üretilen ürünlerle günlük hayatın hemen her noktasında karşılaşmak mümkün olmaktadır. Mutfak eşyalarından temizlik sektörüne, ilaç sanayisinden endüstrinin hemen hemen tüm dallarında bor ve bileşikleri kullanılmaktadır. Genel olarak bor ve bileşiklerinin en çok kullanıldığı tüketim alanları cam yünü, diğer camlar, yalıtım ürünleri, ateşe dayanıklı eşya, borosilikat camlar, sabun ve deterjanlar, porselen, emaye, sır (glazür), uçak ve otomotiv endüstrisi, tarım, metalurji, nükleer uygulama, inşaat, tekstil, ilaç ve kozmetik, fotoğrafçılık, yüksek enerji yakıtları, elektrik aygıtları, refrakter, elektro kaplama banyoları, boyalardır. En çok kullanılan alan ise metal endüstrisidir. Metalurjik reaksiyonlarda bir oksijen giderici ve gaz giderici olarak kullanılır. Borun diğer

önemli uygulama şekilleri; bazı özel alaşımlarda, yarı iletkenlerin yapımında, kataliz aracı olarak, aşındırıcılarda, metaller ve seramiklerde, kompozitlerde güçlendirici, ayrıca nükleer reaktörlerin konstrüksiyonunda yüksek-yoğunluklu betona bir katkı maddesi olarak, uranyum-grafit pillerinde bir kontrol aracı olarak nötronları absorblamak (bor çeliği veya B₄C) şeklindedir. Bor'un birçok önemli bileşikleri üretilmekte ve çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

Borlama işlemi, demir esaslı malzemelere, demir dışı malzemelere ve toz metalurjisi ile üretilen malzemelere çok geniş bir alanda uygulanabilen bir termo-kimyasal yüzey sertleştirme işlemidir. Bu işlem ile yüzeyde bor ve demir atomlarının sıcaklığın etkisi ile kimyasal bileşik oluşturarak yüzeyde FeB ve Fe₂B tabakalarının birinin veya her ikisinin aynı anda

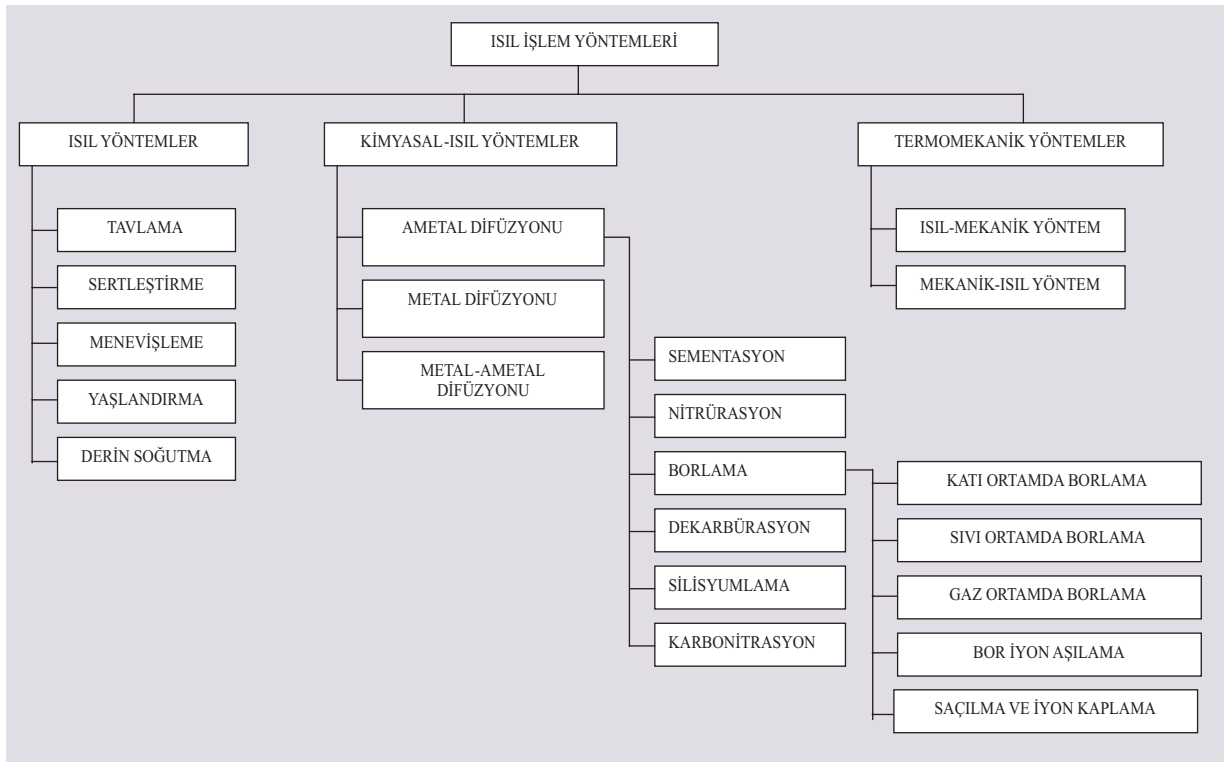
oluşması sağlanır. Oluşan bu tabakalar malzemeye korozyon direnci ile birlikte, aşınmaya karşı yüzeyde yaklaşık 2100 Vickers değerinde sertlik kazandırmaktadır.

BORLAMANIN ISIL İŞLEMLER İÇİNDEKİ YERİ

Isıl işlem; metal ile malzemelerde katı halde sıcaklık değişimleri ile bir ya da birbirine bağlı birkaç işlemle, amaca uygun olarak malzemenin özelliklerini değiştirme işlemi olarak tanımlanabilir. Isıl işlem prosesi, parçaların belli bir sıcaklığa kadar ısıtılması, bu sıcaklıkta uygun bir süre bekletilmesi ve belirli bir programa uygun olarak malzeme sıcaklığının oda sıcaklığına düşürülmesi şeklinde üç kademe gerçekleştirilir.

Özellikle ihtiyaçlar ve gelişen teknolojinin

sunmuş olduğu imkanlar sayesinde çok değişik ısıl işlem yöntemleri ortaya çıkmıştır. Örneğin malzemenin bütününe kimyasal bileşimini değiştirmek mümkün olduğu gibi, sadece yüzeyinin kimyasal bileşimini değiştirmek de mümkündür. Malzeme yüzeyinin sert ve aşınmaya dayanıklı, buna karşılık iç yapının sünek olması arzu edildiğinde sadece yüzeyin sertleştirilmesine gidilir. Bunun için, yüzeyde belli bir derinliğe kadar sertleşme sağlayan yöntemler geliştirilmiştir. Kimyasal-ısıl yöntemler adı verilen sementasyon, nitrürasyon, karbonitrürasyon, metal olan ya da olmayan element ya da bileşiklerin difüzyonu gibi yöntemlerle malzemenin iç yapısında bir değişim olmadığı halde yüzeyinde istenilen sertliği oluşturabilmek mümkündür. Şekil 1'de ısıl işlem yöntemleri ve çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 1. Isıl İşlem Yöntemleri

Malzeme yüzeyinin sertleştirilmesinde; yüzeye karbon verilerek sertleştirme yapılabilir (sementasyonla yüzey sertleştirme) ya da yüzeye sertlik artırıcı element atomları nüfuz ettirilebilir (nitürasyonla sertleştirme, borlama). Ayrıca; iyi sertleşme kabiliyeti olan çeliklerin yüzeyinde, arzu edilen sertleşme derinliğine kadar olan kısmı ostenitleştirme sıcaklığına kadar ısıtılarak ve ardından ani soğutma ile bu bölgenin sertleştirilmesi de sağlanabilir (alevle ya da indüksiyonla yüzey sertleştirme). Bu yöntemlerin dışında yüzeye çelik bilyalar püskürterek, özel haddeleme yöntemleri uygulayarak soğuk şekil değiştirmeye, metal püskürtme ya da elektro kaplama (kromlama) yöntemleriyle yüzeyde sert bir tabaka oluşturmak da mümkündür.

BORLAMA İŞLEMİ İLE YÜZEY SERTLEŞTİRME

Borlama termokimyasal bir yüzey sertleştirme yöntemi olup, esas olarak metal yüzeyine bor atomu difüzyonu olarak tanımlanabilir. [1] Borlama teknik olarak oldukça geliştirilmiştir. Bor atomları ısı enerjisi etkisiyle metal yüzeyine yayınırlar ve esas metal atomlarıyla uygun borürler oluştururlar. Aynı zamanda yaygın şekilde sert ve aşınma direnci fazla tabakalar elde etmede kullanılmıştır. Bu işlem bor atomlarının metalik malzemelerin yüzeyinden içeriye doğru difüzyonu ile olmaktadır. İnce tabakalı Fe borür (Fe_2B) fazı özellikle endüstriyel uygulamalar için istenmektedir.

Borlama ortamı, bor kaynağı (amorf bor, B_4C , $Na_2B_4O_7$, B_2H_6 ,...), aktivatörler (KBF_4 , NH_4F ,...), dolgu

ve deoksidanlardan (SiC , Al_2O_3) oluşur. Aktivatörler borür tabakasının düzenli gelişmesine etki ederler. 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 bileşimi, borlanacak malzeme cinsi, işlem süresi ve işlem sıcaklığı elde edilen tabakaya etki eden faktörlerdir. Genel olarak çelik borlama ortamında 850 - 1000 °C sıcaklıkta 2-8 saat bekletilerek borlama gerçekleştirilir. Borlama dört ana grupta incelenmektedir. Bunlar; katı, sıvı, gaz ve pasta halinde bor verici gereç (macun) ile yapılan borlama ortamlardır.

Katı Ortamda Borlama

Borlama işlemine tabi tutulacak parça, toz halindeki bor verici ortam içinde genellikle 900-1000°C sıcaklıkta 4-10 saat bekletilerek borlama işlemi gerçekleştirilir. Bir tür kutu sementasyona benzeyen bu yöntem, soy gaz atmosferinde yapılabileceği gibi sıkı kapatılmış kutularda olmak şartı ile normal atmosferde de yapılabilir. Borlanacak yüzeylerin etrafında elde edilmek istenen borür tabakasının özelliklerine göre tozların tane büyüklükleri 5-10 µm olmalıdır.

Borlama ortamının ana bileşeni bor karbür (B_4C), amorf bor ve ferro-bor olup bunların fiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. B_4C diğerlerine göre ucuz olduğundan tercih edilir. Ana borlayıcı kaynağa ilave olarak NH_4Cl , BaF , $NaBF_4$, NH_4F , Na_2CO_3 , KBF_4 ve Na_2AlF_6 gibi aktivatörler kullanılır.

Literatürde bulunan katı ortam borlama bileşiklerine ait bazı örnekler aşağıda verilmiştir.

Tablo 1. Katı Ortam Borlamasında Kullanılan Maddelerin Bazı Özellikleri [2].

Malzeme	Molekül ağırlığı	Teorik Bor Miktarı (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Amorf Bor	10.82	95 - 97	2050
Ferro-Bor	-	17 - 19	-
Bor karbür	55.29	77.28	2450

1. Ferrobor + %10-15 NBF₆ [3]
2. %95 B₄C + %5 NaF [4]
3. %33 Amorf bor + %2 NH₄Cl + %65 Al₂O₃ [5]
4. %80 B₄C + %20 Na₂CO₃ [6]
5. %98 B₄C + %2 KBF [7]
6. %50 Amorf bor + %1 NH₄F.HF + %49 Al₂O₃ [8]
7. %(7.5-40) B₄C + %(2.5-10) KBF₄ + %(50-90) SiC [9]
8. %84 B₄C + %16 Na₂B₄O₇ [10]
9. %95 Amorf bor + %5 KBF₄ [11]
10. %20 B₄C + %5 KBF₄ + %75 Grafit [12]
11. %(40-80) B₄C + %(20-60) Fe₂O₃ [6]
12. %100 B₄C [13]

Borlama işlemi sonucu oluşan Fe₂B ve FeB fazları arasındaki ısıl genişleme farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlamlar 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. Katı ortam borlamasının kullanılması bu sonucu mümkün hale getirmiştir. H. P. Kehler tarafından bor kaynağı olarak

B₄C, aktivatör olarak KBF₄, deoksidant ve dolgu malzemesi olarak SiC kullanılmıştır. Bu sayede tek fazlı (Fe₂B) borür tabakalar ya da FeB oranının önemli ölçüde azaldığı tabakalar elde edilmiştir [14].

Katı borlamanın avantajları:

- Sistem ucuzdur.
- Özel teknik gerektirmez.
- Kolay elde edilebilir.
- Toz ترکیbi değiştirilebilir.
- Minimum ekipman ve düşük maliyet olarak sıralanabilir.

Dezavantajları:

- Yüzeyde bor bileşimi homojen değildir. 15

Sıvı Ortamda Borlama

Bor verici ortam sıvıdır. Borlanacak malzeme, 800 - 1000 °C sıcaklıktaki bu ortamda 2 - 6 saat bekletilerek bor yayılımı gerçekleştirilir. Banyonun esas bileşenleri ve özellikleri Tablo 2' de verilmiştir.

Sıvı ortama elektrik akımı (elektroliz) uygulanarak da borlama işlemi yapılabilir. Buna göre

Tablo 2. Sıvı Ortam Borlamasında Kullanılan Ana Bor Kaynakları Ve Özellikleri

Malzeme	Formül	Molekül Ağırlığı	Teorik Bor Miktarı (%)	Ergime sıcaklığı (°C)
Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	381.42	11.35	-
Susuz Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	201.26	21.50	741
Meta bor asidi	HBO ₂	43.83	24.69	-
Sodyum bor florid	NaBF ₄	109.81	9.85	-
Borik oksit	B ₂ O ₃	69.64	31.07	450
Bor karbür	B ₄ C	55.29	78.28	2450

sıvı ortamdaki borlama “elektroliz” ve “normal sıvı ortam borlaması” olmak üzere ikiye ayrılır.

Normal Sıvı Borlama Yöntemi

Ortamın esas bileşeni boraktır. Aktivatör olarak B_4C , SiC , Zr , B kullanılır. Çalışma sıcaklığı $800 - 1000\text{ }^\circ\text{C}$ ve borlama süresi 2 - 6 saattir.

Elektroliz Yöntemi

İşlem yüksek sıcaklıkta tuz banyosu olarak elektrolit kullanılıp yapılan bir elektroliz uygulamasına benzer. Katot olarak iş parçası, anot olarak grafit kullanılır. Akım yoğunluğu $0.2-0.7\text{ A/cm}^2$, gerilim 2-14 volt olarak uygulanır. İşlem $800 - 1000\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 0.5 - 5 saat süreyle yapılır.

Elektrolitin ana bileşeni boraks ve borik asittir. Borik aside NaF , $NaCl$, $NaH + B_2O_3$; $B_2O_3 + Na_2CO_3$; Na_2PO_4 , Na_2SO_4 , $NaOH$; $B_4C+B_4C+NaCl$; $B_2O_3 + MF$, B_2O_3+MOH , $B_2O_3+M_2CO_3$ ($M=Li, Na, K$) gibi aktivatörler ilave edilir. Bu aktivatörlerden ayrıca banyonun akışkanlığını artırması istenir. Genel olarak her iki yöntemin (normal sıvı, elektroliz) avantajlarını ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

Avantajları:

- İşlem ucuzdur.
- Fazla ihtisas istemez.

Dezavantajları:

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

Gaz Ortam Borlaması

Gaz ortam borlamasında kullanılan maddelerin çoğu oldukça hassastır. Bunlar; BFe_3 , BCl_3 , B_2H_6 , $(C_2H_5)_3B$ dir. Bunlardan di boran (B_2H_6), H_2 ile beraber uygulandığında çok olumlu sonuçlar alınabilmektedir. Tablo 3’ de gaz halindeki borlayıcı bileşikler ve bazı özellikleri verilmiştir.

Gaz ortamında borlamanın avantaj ve dezavantajları incelenirse ;

Tablo 3. Gaz Halindeki Borlayıcı Bileşikler ve Bazı Özellikler

Malzeme	Formül	Molekül ağırlığı	Teorik Bor Miktarı	Donma Noktası ($^\circ\text{C}$)
Bor triflorid	BF_3	67.82	15.95	-128.8
Bor triklorid	BCl_3	117.9	9.23	-107.3
Bor tribromid	BBr_3	250.57	4.32	-46
Di - boron	B_2H_6	26.69	39.08	-165.5
Bor trimetil	$(CH_3)_3B$	55.92	19.35	-161.5
Bor trietil	$(C_2H_5)_3B$	98.01	11.04	-94

Avantajları:

- Gaz sirkülasyonunun bir sonucu olarak borun daha çok yayılması,
- Katı borlama işlemine göre gelişmiş sıcaklık kararlılığı ve elde etme kolaylığı.

Dezavantajları:

- Trimetil bor ($(\text{CH}_3)_3\text{B}$) ise ;borlama ile birlikte C yayınına da neden olarak tabaka kalitesini bozar.
- Tesisatı pahalıdır.
- Ortam zehirlidir.
- Patlama tehlikesi büyüktür.

Bu dezavantajlar gaz ortamda borlama uygulamalarını sınırlamaktadır.

Pasta ile Borlama

Katı ortam borlama yönteminde kullanılan tozların macun haline getirilerek kullanıldığı borlama yöntemidir. Bu yöntemin en önemli avantajı kısmi borlama yapılabilmesidir. Macun şeklindeki borlayıcı madde sertleştirilmek istenen yüzeye 2-5 mm kalınlıkta sürülür ve fırınlanmadan önce kurumasa sağlanır. Kurutma işleminden sonra macunlanmış parçalar fırına konur ve uygun sıcaklıkta borlama işlemi yapılır [16]. Bu yöntemde borlamanın mutlaka koruyucu gaz ortamında yapılması gerekir. Toz borlamaya göre işlem süresi oldukça kısadır [17].

Borlama işleminden sonra numune üzerine macunun yapışması bu yöntemin önemli sakıncasıdır. Bu etkiyi azaltmak için Konopelski ve Dibko tarafından sulu sodyum silikat çözeltisi

önerilmiştir. Ayrıca organik karakterli çeşitli çözeltiler ve %3 polivinil alkol ya da %0.5 metil selüloz içeren sulu çözeltiler de sözü edilen zorluğu azaltırlar [14].

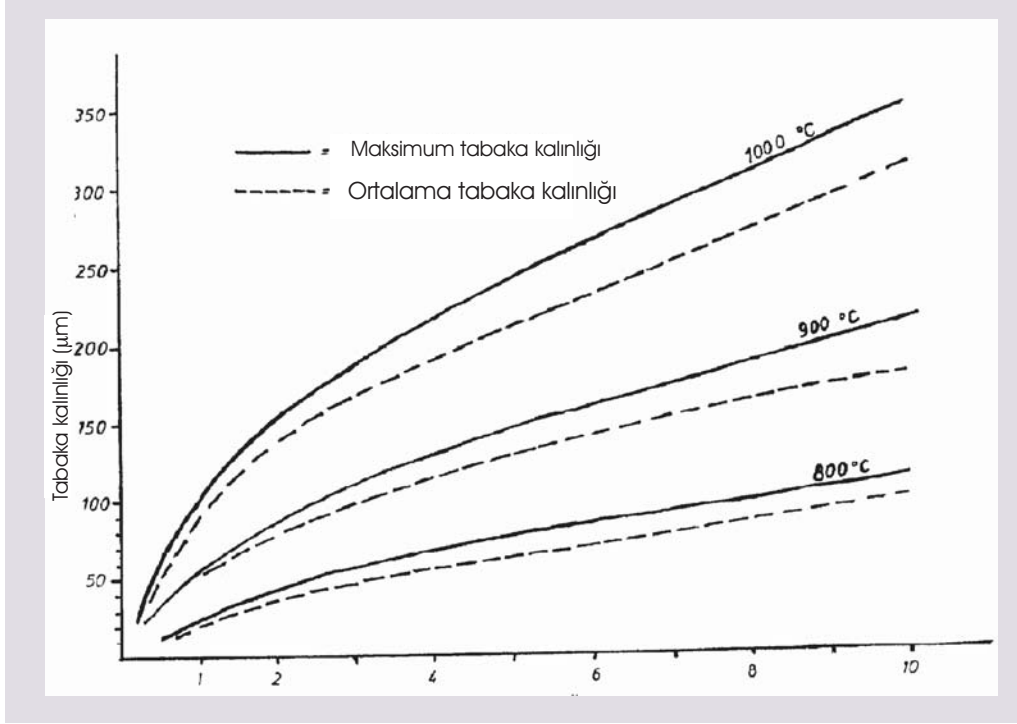
Borür Tabakasının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

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 durum ancak işlem sıcaklığı ve süresinin artmasıyla mümkündür. İşlem sıcaklığının Fe-B denge diyagramındaki ötektik sıcaklığın (1149°C) altında olması gerekir. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda bölgesel erimeler meydana gelerek malzeme yüzeyini bozabilir [2]. Zaman faktörü ise ekonomik açıdan belli bir değeri aşmayacaktır. Şekil 2'de Ck 45 çeliği ve Ekabor-1 borlayıcısı kullanılarak yapılan çalışmada tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklıkla değişimi görülmektedir.

Borlama sonucunda yüzeyde oluşan bor tabakası diş formunda oluşmaktadır. Oluşan bu tabaka yüzeyin kimyasal yapısının sıcaklığın etkisi ile değişmesi sonucu meydana gelmektedir. Yüzeyde FeB ve Fe_2B kimyasal yapısına sahip dişli tabaka oluşmaktadır. Bazen FeB bazen Fe_2B , bazen de her iki tabaka birlikte oluşur. FeB fazı Fe_2B fazından daha sert ve daha gevreklerdir.

Tabaka kalınlığını sınırlayan bir diğer faktör de kırılgenliktir. Tabaka kalınlığı arttıkça kırılgenliği de artacağı için özellikle çift fazlı tabakalarda kalınlığın fazla olmaması gerekmektedir [18].



Şekil 2. Ekabor-1 ile Borlanmış Çk 45 Çeliğinin Tabaka Kalınlığının Zaman ve Sıcaklıkla Değişimi [5].

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 [2].

Çelik esaslı malzemeler için kullanım şartlarına göre 20-200 µm tabaka kalınlığı uygundur. Kırılganlık yönünden alaşımlı çeliklerde 100 µm, alaşımsız 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 [19].

Sertlik

Borlu tabakanın özelliklerine ait çalışmalar daha çok sertlik, aşınma ve korozyon özellikleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Borlamanın en büyük etkisi

sertlik üzerine olup, ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak FeB ve Fe₂B fazlarına bağlıdır. FeB fazı, Fe₂B fazından daha sert ve gevrektr. Borlama ile elde edilen sertlik; karbon çeliklerinde 1800-2000 HV [20], alaşımlı çeliklerde 2500-2800 HV [21], titanyumda ise 3000 HV civarındadır [22].

Sertlik bakımından borlu tabakanın en önemli bir başka özelliği de daha sonraki ısıl işlemlerde bu sertliğini korumasıdır. Borlu tabakanın 900 °C' a kadar sertliğini koruması, matris malzemesine yapılacak ısıl işlemler için geniş bir sıcaklık aralığına izin verir.

Borlama işlemi sonunda oluşan tabakaların özellikleri ana malzeme içindeki alaşım elementlerine bağlı olarak değişmektedir. Tablo 4'te farklı malzemelerle oluşturulabilecek bor tabakalarının özellikleri verilmiştir.

Borlanmış çelikler ile diğer yöntemlerle sertleştirilmiş malzemelerin sertlik karşılaştırmaları Tablo 5'de görülmektedir.

Tablo 5 incelendiğinde, borlanmış çeliklerde elde

edilen yüzey sertlikleri, diğer yöntemlerle kıyaslandığında oldukça yüksek yüzey sertliği değerleri elde edildiği görülmektedir. Şekil 3'de borlu ve sementasyonlu tabakalardaki sertlik dağılımları görülmektedir.

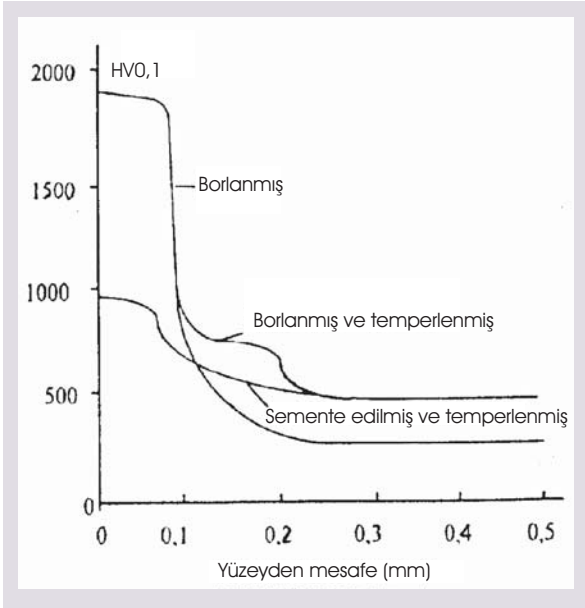
Tablo 4. Farklı Malzemelerle Oluşturulan Bor Tabakalarının Sertlikleri ve Erime Noktaları [23].

Malzeme	Oluşan Bileşik	Sertlik (HV veya kgf/mm ²)	Ergime Noktası (°C)
Fe	FeB	1900-2100	1390
	Fe ₂ B	1800-2000	1390
Co	CoB	1850	1390
	Co ₂ B	1500-1600	1390
	Co ₃ B	700-800	1390
Co-27.5Cr	CoB	2200	1390
	Co ₂ B	1550	1390
	Co ₄ B	700-800	1390
Ni	Ni ₄ B ₃	1600	1390
	Ni ₂ B	1500	1390
	Ni ₃ B	900	1390
Mo	Mo ₂ B	1660	2000
	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
Re	ReB	2700-2900	2100

Tablo 5. Borlama ile Diğer Yüzey Sertleştirme İşlemleri Sonucunda Oluşan Sertlik Değerleri [23].

Malzeme	Mikrosertlik (HV veya kgf/mm ²)
Borlanmış Yumuşak Çelik	1600
Borlanmış AISI H13 Kalıp Çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 Çeliği	1900
Su verilmiş Çelik	900
Sertleştirilmiş ve Temperlenmiş H13 Kalıp Çeliği	540-600
Sertleştirilmiş ve Temperlenmiş A2 Kalıp Çeliği	630-700
Yüksek Hız Çeliği (HSS) BM42	900-910
Nitrülenmiş Çelik	650-1700
Karbürleşmiş Düşük Alaşım Çeliği	650-950
Sert Krom Kaplama	1000-1200
Sinterlenmiş Karbürler, WC+Co	1160-1820
Al ₂ O ₃ +ZrO ₂ Seramik	1483
Al ₂ O ₃ +TiC+ZrO ₂ Seramik	1738
Sialon Seramik	1569
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Elmas	>10000

Sertlik ölçümleri mikrosertlik yöntemi ile vickers veya knoop uçları kullanılarak yapılır [5]. Ölçümlerde büyük yüklerin kullanılması çatlama ve dökülme gibi nedenlerden dolayı hatalı sonuçlara neden olur. Ayrıca büyük yükler tabakanın bozulmasına ve tabakanın altındaki bölgenin deformasyonuna neden olabilir. Genel olarak 50-100 gr'lık yüklerle ölçüm yapılır [12].



Şekil 3. Borlu ve Sementasyonlu Tabakalardaki Sertlik Dağılımları [5]

Aşınma

Sürtünme katsayısı ve aşınma dayanımı bir sistem özelliği olmakla beraber, genellikle yüksek aşınma direnci için malzemenin daha sert ve sürtünme katsayısının mümkün olduğu kadar düşük olması istenir. Borlama ile bu özellikler büyük ölçüde sağlanır. Borlanmış yüzeylerde teflona yakın bir sürtünme katsayısı elde edilebilir.

Tablo 6. Bazı Malzemelerin Sürtünme Katsayılarının Karşılaştırılması [2].

MALZEME	SÜRTÜNME KATSAYISI	
	BORLU	BORSUZ
Düşük karbonlu çelik	0.17 - 0.19	0.585 - 0.595
Takım çeliği	0.07 - 0.04	0.16 - 0.18
WC + Co T/M malzeme	0.1939 - 0.2335	0.2617 - 0.2773

Darbesiz yüklemenin söz konusu olduğu derin çekme kalıpları, dişli çarklar, tekstil makinelerinde kullanılan yönlendirme tamburları, abraziv aşınmaya maruz kalan çuval doldurma nozulları, plastik enjeksiyon makinelerinin helezonları gibi makine parçalarında borlanmış yüzeylerin diğer işlemlerle elde edilenden çok yüksek aşınma direncine sahip oldukları belirlenmiştir.

Ancak bu yöntem, özellikle doğru tribolojik sistem seçimleri yapılmadığı takdirde veya seçilen sistemde beklenen fonksiyona uygun borlama işlemi ve/veya uygun ek ısıtma işlemleri yapılmadığı takdirde sementasyon ve nitrürasyon işlemlerinden daha kötü sonuçlar verebilir. [2].

Paslanmaz çelik için derin çekme kalıbı 60 HRC sertlik ve yüzeyi 0.005 - 0.008 mm sert kromla kaplı AISI A6 çeliğinden yapıldığında tahrip olmadan 2000 parça, aynı çelik yüzeyi borlandığı zaman ise 5000 parça ürettiği belirtilmektedir. Başka araştırmacılar düşük karbonlu çeliklerin derin çekme işleminde kullanılan borlanmış kalıpların ömürlerinin, borlanmamış kalıplardan 85 defa daha fazla olduğunu ileri sürmüşlerdir [2].

Borun oksijene afinitesi fazla olduğundan yüzeyde koruyucu ince bir oksit filmi oluşturmakta, bu oksit filmi yüzey yağlayıcı vazifesi görerek, sürtünmeli aşınma esnasında sürtünme katsayısını düşürürken,

yüzeylerin birbirine kaynamasını önler. Kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı, sementle edilmiş tabakanın yumuşamasına neden olurken, borlu tabakaya etki etmez.

Artık Gerilmeler

Metallerde borlama işlemi sonrası borür tabakasında ve borür tabakası ana metal arasında artık gerilmeler oluşur. Malzemenin kimyasal bileşimi, borlama şartları ve uygulanan ısıl işlemler artık gerilmelere etki eden faktörlerdir. Tabakanın faz yapısı (Tek fazlı veya çift fazlı) ve geometrisi de (düz veya girintili çıkıntılı) artık gerilmelerin oluşumuna etki eder[2]. İdeal bir tabaka için tek fazlı ve tabaka geometrisinin dış formunda olması istenir.

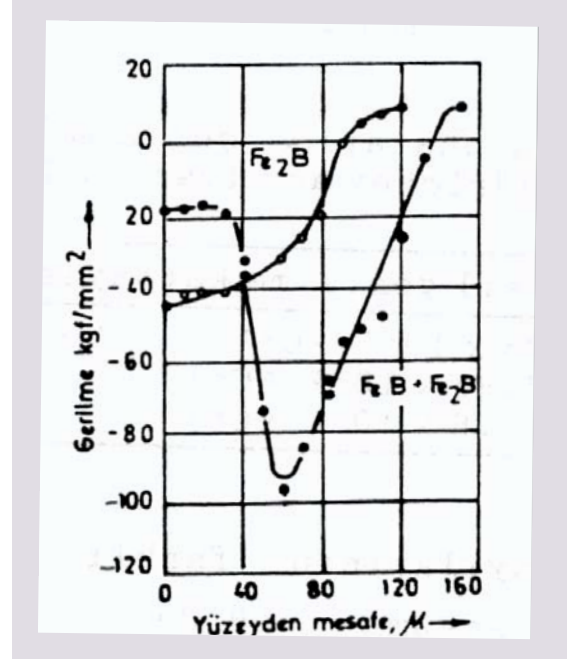
Artık gerilmeler, FeB, Fe₂B ve ana malzemenin ısıl genişleme katsayılarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Tablo 7’de borür tabakası ve saf demire ait ısıl genişleme katsayıları verilmektedir.

Tablo 7. Borür Tabakası ve Saf Demire Ait Isıl Genişleme Katsayıları [24].

Malzeme	Isıl Genişleme Katsayısı $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Saf Demir	15.6
FeB	23
Fe ₂ B	7.85

Çift fazlı borür tabakalarında borlama sonrası Fe₂B’de basma, FeB’de artık çekme gerilmeleri oluşur. Bu gerilmeler, tabakanın çatlamasına ve FeB fazının pullanarak dökülmesine neden olur. Tek fazlı ve çift fazlı tabakalardaki artık gerilme dağılımı Şekil 4’de görülmektedir.

Borlamadan sonraki uygulanan ısıl işlemler de artık gerilmelere etki etmektedir. Soğuma hızı arttıkça



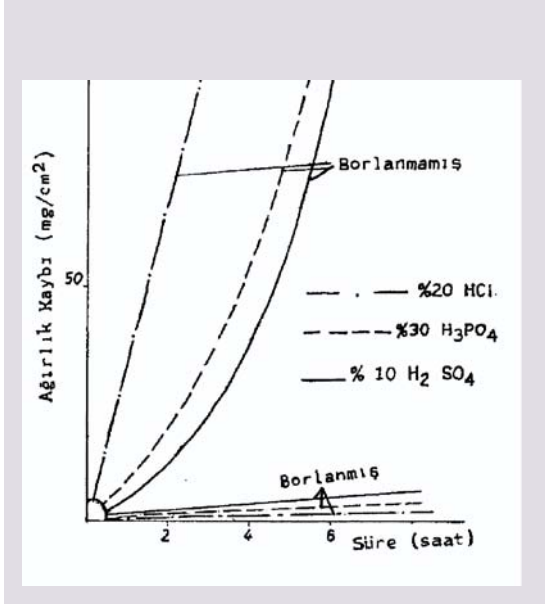
Şekil 4. Tek Fazlı ve Çift Fazlı Borür Tabakasındaki Artık Gerilme Dağılımı [25]

artık gerilmeler azalmakta ve en yüksek artık gerilmeler borlamadan sonra fırında soğutma şartlarında gerçekleşmektedir [25].

Korozyon Direnci

Borür tabakasının suya ve atmosfere karşı korozyon direncinin düşük olmasına karşılık, bazı asitlere ve sıvı metallere karşı iyi bir direnç gösterir. Özellikle HCl, H₂SO₄ ve H₃PO₄ gibi asitlerle alüminyum, kurşun ve çinko gibi metallere karşı sıvı banyolarında borlu malzemelerin korozyon direnci çok yüksektir. [5]. Borlanmış ve borlanmamış Ck 45 çeliğin bazı asit ortamındaki korozyon direnci Şekil 5’de verilmiştir.

Yüksek kromlu çeliklerde borlama ile koruyucu krom oksit yerine daha az koruyucu olan krom borür meydana gelir. Bu bakımdan yüksek alaşımlı malzemelerin borlanmasıyla daha iyi korozyon özelliği her zaman elde edilmeyebilir [2].



Şekil 5. Ck 45 Çeliğinin 56°C'de, Bazı Asitlere Karşı Korozyon Direnci [5].

Borlanabilen Malzemeler

Bütün demir-karbon esaslı malzemeler, örneğin yapı çelikleri, sementasyon çelikleri, ıslah çelikleri, takım çelikleri, çelik döküm, gri dökme demir dışında gerek toz, gerekse diğer yöntemlerle üretilen bütün ferro alaşımlara uygulanabilmektedir. Refrakter metaller (W, Ta, Mo, Zr, Hf, Nb), karbürler (özellikle Co ile bağlı WC) ve Ni esaslı alaşımlara başarılı bir şekilde uygulanarak özel yapıda borlu tabakalar elde edilebilmektedir. Ti ve Ti esaslı alaşımlara bor yayını ile aşınmaya dayanıklı TiB₂ tabakası elde edilebilmektedir [26]. Titanyum ve titanyum alaşımlarının borlanması 1000-1200 °C arasındaki sıcaklıklarda yapılmalıdır. Titanyum ve refrakter metaller üzerinde oluşan borür tabakasının sertlik değeri nikel ve kobalt üzerinde oluşan tabakaya göre çok yüksektir [23].

Borlama yeni geliştirilen yöntemlerle Cu ve alaşımlarına da uygulanabilmektedir. Fakat düşük ergime sıcaklığına sahip Zn ve Al

uygulanamamaktadır [2]. Bahsedilen malzemelerin borlama işlemleri demir esaslı malzemelerin borlanmasından farklı değildir [2].

Genel olarak Borlama işleminin avantajlarını aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür [23]:

- Özellikle nitrürleme ile karşılaştırıldığında borlanmış tabakaların sertliği yüksek sıcaklıklarda da korunmaktadır,
- Bu yöntemle çok geniş bir aralıktaki çelikler borlanabilmektedir,
- Borlanmış yüzeyler 850 °C'ye kadar oksitlenme direncine sahiptir,
- Borlanmış malzemeler, oksitlenme ve korozyon ortamı altında yüksek yorulma dayanımı ve servis ömrüne sahiptir.

Borlamanın dezavantajları ise [23]:

- Gaz karbürleme ve plazma nitrürleme işlemi ile kıyas edildiğinde, esnek olmaması ve yoğun işçilik gerektirmesi bu yöntemin daha pahalı olduğunu ortaya çıkarmaktadır,
- Borlama sonucu oluşan hacimsel büyüme, tabaka kalınlığının yüzde 5 ila 25'i arasında değişmektedir. (Örneğin 25 µm kalınlığındaki bir tabakada 1.25 ila 6.25 µm kalınlığında büyüme oluşmaktadır.) Bu büyümenin değeri temel malzeme kompozisyonuna bağlıdır ve belirli bir malzeme kombinasyonu ve yüzey sertleştirme prosesi için sabit kalmaktadır.
- Borlanmış malzeme yüzeyinden hassas işleme gerektiğinde, bu sadece elmas lepleme ile yapılabilmekte, çünkü konvansiyonel taşlama

yöntemleri borlanmış tabakaların çatlamasına yol açabilmektedir,

- Çoğu çeliğin borlanmasında korozyon-yorulma dayanımında artma gözlenmesine rağmen, eğilme-yorulma dayanımında çok az bir yükselme sağlanmaktadır,
- Genel olarak, borlanmış çelik alaşımlarının karbürleşmiş ve nitrürlenmiş çeliklere göre dönmeye çalışan ve noktasal yorulmaya çalışan parçaların dayanımlarının düşük olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple dişlilerin ve vidaların borlanması oldukça sınırlıdır.
- Çoğunlukla borlamadan sonra borlanmış tabakaların bütünlüğünü korumak için takımları temperlemek ve sertleştirmek gerekebilir.

BORLAMA İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirmek suretiyle yapılan yüzey sertleştirme işlemleri, katı, sıvı veya gaz fazında bulunan elementlerin yüksek sıcaklıkta malzeme yüzeyine yaydırılması esasına dayanır. Budisnski [27], yayınma işlemlerini değişik açılardan karşılaştırmıştır. Borlama işlemi sonucunda, nitrürlenme ve karbürleme gibi klasik yayınma işlemlerine göre oldukça yüksek yüzey sertliği elde edilmektedir. Ancak borlama işlemi, nitrürlenmeye göre oldukça yüksek bir sıcaklıkta gerçekleştirilmektedir.

Batı Avrupa'da, özellikle Almanya'da katı ortamda borlama işlemi tercih edilmekte ve yaygın olarak kullanılmakta iken, Doğu Avrupa ülkelerinde,

özellikle de Rusya'da sıvı ortamda borlama uygulanmaktadır. Gaz reaktif ortamda borlama ile ilgili Hegewaldt ve diğ. [28], alaşımsız çelikleri 650°C de gaz ortamda borladıklarını ve olumlu sonuç aldıklarını bildirmektedirler.

Bindal [29], borlama süresi ve krom miktarına bağlı olarak, krom borürler tespit etmiştir ve kromun çok fazla olmasa bile, kırılma tokluğunu düşürdüğünü belirlemiştir.

Eyre [30], karbürleme ve borlama işlemi uygulanmış malzemelerin aşınma davranışlarını karşılaştırmış ve borlamanın karbürlemeye göre özellikle geçiş bölgesi üzerindeki yüklemelerde adhezif aşınma dayanımı açısından çok daha iyi sonuçlar verdiğini ve bu özelliği yüksek sıcaklıklarda dahi muhafaza ettiğini belirlemiştir.

Hunger ve diğerleri [31], değişik sıcaklıklarda yaptığı aşınma testleri sonucunda, borlanmış yüzeylerin özellikle yüksek sıcaklıklarda, karbürleşmiş ve nitrürlenmiş yüzeylerden çok daha iyi aşınma dayanımı gösterdiğini belirlemiştir.

Genel ve diğerleri [32] AISI W1 çeliğini 1-8 saat aralığında Ekabor-I bileşikleri kullanarak borlama işlemine tabi tutmuşlar ve yüzey sertliklerini ölçmüşlerdir. Sonuç olarak borlanmamış çeliklerde yüzey sertliği 260 HV olmasına karşılık borlanmış AISI W1 çeliğinde 1690-1800 HV olduğu görülmüştür. Ayrıca bor tabakasının sertliği 950°C'ye kadar borlama sıcaklığına bağlı olarak azalan oranda artmaktadır. Bu sıcaklığın proses zamanı 6 saati geçmediği durumda optimum sıcaklık olduğu da

belirlenmiştir. Ayrıca tabaka kalınlığını proses zamanı ve sıcaklığına bağlı olarak belirlemek üzere bir ampirik formül elde edilmiştir.

M.Kulka ve A. Pertek [33] krom ve nikel esaslı düşük karbonlu çeliklerde borlama yapmış ve karbon miktarının aşınma dayanımına etkilerini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda karbon miktarı, %1.2 den düşük çeliklerde aşınma dayanımının en yüksek seviyeye geldiğini görmüşlerdir.

K. Genel ve diğerleri [34], borlama yapılmış AISI W1 çeliğinin bor tabakası, sertlik ve borlama prosesi parametrelerinin yapay sinir ağları ile tahmin edilebilirliğini incelemişler ve %95 oranında doğru sonuçlar elde etmişlerdir.

K.-T. Rie [35], plazma difüzyon proseslerindeki son gelişmeleri incelediği çalışmada; 750 °C'de BC₃ bileşiklerini kullanarak plazma (iyon) borürleme yapmış ve 20-30 µm kalınlığında ve 1500 kg mm⁻² sertliğinde tabakalar elde etmiş, bu yöntem ile otomobillerde kullanılan yağ pompası dişlilerinin sertleştirilebileceğini belirtmiştir.

J.A. Davis ve diğerleri [36], demir ve AISI M2 çeliğini iyon implantasyonu ile borlamışlar ve bunların aşınma karakteristiklerini incelemişlerdir. Demir için 600 °C, M2 çeliği için de 700 °C sıcaklıkta yapılan iyon implantasyonunun aşınmaya dayanıklı bir tabaka elde etmek için yeterli olduğunu göstermişlerdir.

K.S. Nam ve diğerleri [37], düşük karbonlu

çeliklerde plazma borlamanın etkilerini incelemişler ve borlanmış tabaka oluşum hızının ve sertliğin klasik borlamaya göre daha düşük olduğunu belirlemişlerdir.

P.J. Wilbur ve diğerleri [38], iyon borlanmış demir disklerin karakteristiklerini incelemiş ve 900 °C de oluşan α-Fe matrisindeki Fe₂B bileşiklerinin aşınmaya en dayanıklı yüzeyleri oluşturduğunu belirlemişlerdir.

P.X. Yan ve diğerleri [39], C45 çeliğine borlama ve N⁺ iyon implantasyonu uygulamışlardır. Bu işlem sonucunda bor tabakasının kırılabilirliğinin azaltılabileceği ve özelliklerinin artırılabilirliği görülmüştür.

L.G. Yu ve diğerleri [40], yumuşak çelikleri plazma sinterleme tekniği ile 700-1000 °C aralığında 30 dk ile borlamışlardır. Mikroyapı analizi sonucunda 700 °C'de yapılan borlamada 2-5 µm bor tabakası kalınlığı olduğu görülmüştür. Bu tabakanın genel olarak Fe₂B bileşiminden oluştuğu görülmüştür.

R. Iakovou ve diğerleri [41], 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 Fe₂B 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 olduğu görülmüştür. Aşınma oranının 0.13 ila 0.23 arasında değişen sürtünme katsayısına, sürtünme katsayısının da bor ve oksit tabakasına bağlı olduğu görülmüştür.

L. Bourithis ve diğerleri [42] de 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 mm³/m gibi çok düşük bir değerde olduğunu göstermişlerdir.

1975 yılında ferrobör alaşımlarının üstün manyetik özelliklerinin bulunması, bu alaşımların elektrik sektöründe büyük kullanım alanı bulmasına neden olmuştur. Özellikle %3 B, %5 Si içeren demir esaslı alaşımların, amorf metal (metalik cam) olarak sac haline getirilerek trafolarla kullanılabilmesi, konvensiyonel tane

yönlendirilmiş silisyumlu saclara göre 1/3 oranında çekirdek kayıplarını azaltmıştır [43].

Alaşımlı çeliklerdeki borlu tabaka, kafesteki Fe atomunun yerini alan alaşım elementlerini de içerebilmektedir [7]. Bu tür çelikler FeB ve Fe₂B bileşiklerinin yanında, alaşım elementlerine bağlı olarak Cr₂B, CoB, CoB₂, TiB₂, NiB₂ ve kafes parametresi 10.6 ± 20.02 Å olan kübik yapı M₂₃(B,C)₆ (M=Metal) bileşiklerini de içerirler. Bor aynı zamanda çelik içerisinde bulunan V₄C₃, NbC gibi karbürlerle de eriyik halde bulunabilir. Ni ve Cr, Fe₂B' de Fe atomlarının yerini alarak erir [44].

W. Muhammad ve diğerleri [45], INCONEL 722 Süperalaşımını katı borlama ile borlamışlar ve bor tabakası kalınlığı ile ısıl işlem uygulanmış ve ek olarak yaşlandırılmış INCONEL 722 süperalaşımının yüzey sertliğini ve aşınma dayanımlarını araştırmışlardır. 20x4x4 mm boyutlarındaki numune, öncelikle 1035 °C'de 30 dakika ısıl işleme tabi tutulmuş ve ardından havada soğutulmuştur. Bir diğer numune de bu ısıl işleme ek olarak 730 °C'de 18 saat yaşlandırılmış ve havada soğutulmuştur. Isıl işlem sonunda elde edilen yüzey sertliği 189 HV, ısıl işleme ek olarak yaşlandırma sonucunda elde edilen yüzey sertliği ise 331 HV olarak bulunmuştur. Bu ölçümler 10 saniye süresince 200 g yük uygulanmak suretiyle elde edilmiştir. Bu numunelere daha sonra argon atmosferinde, 900°C'de 10 saat süresince %50 B₄C, %45 SiC ve %5 KBF₄'ten oluşan karışım ile katı borlama uygulanmıştır. Bu işlemler sonucunda sadece ısıl işlem uygulanmış numune için bor tabakası kalınlığı 51 µm, ısıl işlem ve yaşlandırma uygulanmış numune için bor tabakası kalınlığı 57 µm olarak

ölçülmüştür. Yüzey sertliği değerleri için ise ısıtma işlemi uygulanmış numunede 189 HV sertliği 1187 HV'ye ve ısıtma işlemi ek olarak yaşlandırma uygulanan numunede ise 331 HV'den 1097 HV'ye çıktığı görülmüştür. Sonuç olarak, sadece ısıtma işlemi görmüş numunelerde yüzey sertliğinin ısıtma işlemi ve yaşlandırma yapılmış numunelere göre daha fazla olduğu, ayrıca ısıtma işlemi ve yaşlandırma yapılmış numunelerde yüzey tabakası kalınlığının daha fazla olduğu ve sadece ısıtma işlemi yapılmış numunelerin aşınma dayanımlarının ısıtma işlemi ve yaşlandırma yapılmış numunelere göre daha fazla olduğu görülmüştür.

Andrej Salak ve diğerleri [46], toz metalurjisi malzemeleri sinter borlama ile ilgili yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Böylece manganez temelli bor aktivatörler kullanarak toz metalurjisi malzemeleri eş zamanlı olarak sinterlemiş ve borlamışlardır. Karbon çeliği ile Ni-Mo ve Ni-Cu-Mo alaşımlı çelik parçalar hazırlanarak borlama tozları (ana element olarak demir bor (ferrobor), aktivatör olarak demir mangan (ferromangan) ve alüminyum-oksit) ile birlikte 650°C'de ve ardından 1120 °C'de 1 saat süreyle sinterlenmişlerdir. Bu işlem sonunda borlanmış çeliklerin 40 ila 180 µm kalınlık ve 1110 ila 1370 HV sertliğinde bor tabakalarına sahip olduğu görülmüştür.

W.D. Man ve diğerleri [47], kobalt eklenmiş tungsten karbür (WC-Co) malzemelere CVD yöntemiyle elmas kaplama işlemine bir ön hazırlık işlemi olarak H₂-CH₄ gaz karışımını Mikrodalga CVD kullanarak H₂-NH₃-B₂O₃ plazma oluşturmuşlar ve boro-nitrürleme işlemi uygulamışlardır. Bu işlem sonucunda; 800 °C'de 2 saatlik plazma boro-nitrürleme ile WC-Co malzemede elmas film elde

edilmiştir. Bu elmas filmin kalitesinin diğer konvansiyonel yöntemlerle elde edilenlerden daha iyi olduğu görülmüştür. Sinterlenmiş karbürün, H₂-B₂O₃ ortamına NH₃ ilave edilmesiyle, plazma tarafından oluşturulan olumsuz etkiden korunduğu görülmüştür. Plazma boro-nitrürleme, kobaltın malzeme yüzeyindeki aktivasyonunu pasifize ettiği, böylece kobaltın malzeme içinde karbon grafitlerinin oluşmasını sağlayan etkisini azalttığı görülmüştür.

P. Gopalakrishnan ve diğerleri [48], 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; ferroboron 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 kırılabilirliğin azaltılabileceği belirlenmiş ve aralıklı borlama ile yüksek korozyon direnci oluşturulabileceği belirlenmiştir.

C.L. Ge ve R.C. Ye [49], kendi kendine yayınan ötektik borlama üzerine araştırmalar yapmışlardır. Çalışmalarında C45, 40 Cr ve T10 çeliklerini, borlama için de boron-karbür (B₄C) kullanmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda, ötektik veya hipoötektik yapıya sahip bor tabakalarının malzeme yüzeyinde kendi kendine yayınma sonucunda oluştuğu gözlenmiştir. Bor tabakasında bazı Fe₂B ve Fe₂₃(C,B)₆ fazlarına ek olarak genelde α-Fe ve Fe₃(C,B) fazlarının oluştuğu gözlenmiştir.

N. Uzunov ve R. Ivanov [50], karbon ve alaşım çeliklerine değişik bor bileşimi toz karışımlarıyla 887°C'de 6 saat süreyle borlama yapmışlar ve tabaka kalınlığı ile yüzeyde oluşan sertliklerin incelemesini yapmışlardır. Sonuç olarak, bor atomlarının çelik yüzeyine difüzyonu boronflorit ve BF₃ bileşiğinin yardımıyla oluştuğu, bor tabakasına ait tabaka kalınlığı, sertlik, faz kompozisyonu, yüzey temizliği gibi özellikler dikkate alındığında bor oluşturucu aktivatör olarak en iyi kombinasyonun (NH₄)₂O-4BF₃ karışımının olduğu, bu karışımın düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler için uygun olduğu görülmüştür.

L.Lin ve K. Han [51], çelikleri alev spreyle kaplama yapmış ardından da borlama yaparak mekanik özelliklerdeki değişimi incelemişlerdir. Sertlik açısından incelendiğinde Fe esaslı kaplamanın Ni esaslı kaplamaya göre daha yüksek sertliğe ulaştığı görülmüştür. Co esaslı kaplamanın ardından yapılan

borlama ile diğer bütün kaplamalara nazaran en yüksek sertlik elde edilmiştir. A3 çeliğinin Fe esaslı toz ile kaplanmasının ardından yapılan borlama sonrasındaki aşınma, C1045 çeliğindeki aşınmadan daha yüksek bulunmuştur. Bunun yanında A3 çeliğinde kaplama ve borlama yaptıktan sonra normalde düşük olan korozyon dayanımının mükemmel seviyeye çıktığı görülmüştür.

SONUÇ

Yukarıda belirtildiği üzere, dünyada borlamanın değişik yöntemleri üzerinde özellikle son yıllarda artan bir şekilde araştırmalar yapılmaktadır. Cevher olarak dünya bor rezervinin yaklaşık %63'üne sahip olan ülkemizde ise borlama işleminin teknolojik altyapısını oluşturan araştırmaların oldukça az olduğu gözlenmektedir. Özellikle ileri malzeme biliminin ilgi alanına giren ve uydu ve uzay çalışmalarında da gerek malzeme, gerekse de yakıt olarak geniş bir kullanım yelpazesi olan bor ve bor bileşikleri ile ilgili araştırmaların artması gerektiği değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

1. Sarper, S.S., "Borlamanın Demir Esaslı T/M Parçaların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi", Doktora Tezi, CBÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, Aralık 2004.
2. Bozkurt, N., "Bor Yayınımlarıyla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme" Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bil. Enst., İstanbul, 1984
3. Venkatasubramanian, S.R., Iyer, K.J.L., "Boronizing of Steel, Tool Alloy Steel" Vol 11 453 455 p., 1977
4. Alimov, Y.U.A., "Distribütüyon Between the Diffusion Layers of Borided KhVG Type High Carbon Steels" Met.Abst.Sept.1975

5. **Matuschka, A.G.**, "Boronizing" Carl Hanser Verlag München, 1980
6. **Yakhnina, V.D., Kozlov, A.M., Luk'yanitsa, A.Ö.**, "Physicochemical Characteristics of Powder Boronizing" Sov. Powder Metall. Met. Ceram., Vol18 237 240 p., 1979
7. **Epik, A.P., VI.** "Borid Coatings, Protective Coatings on Metals" Vol.2, Consultants Bureau, New York, 1970
8. **Singhal, S.C.**, "A Hard Diffusion Boride Coating for Ferro Materials, Thin Solid Films" Vol45 321 329p., 1977
9. **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
10. **Vasil'eva, E.V., Yukov, I.I., Urlapov, A.M., Mel'nichuk, G.A.**, "Structure and Properties of Borided Chromium Stainless Steel" Met.Sci. Heat Treat., Vol 27 391 394p., 1985
11. **Knotek, O., Lugscheider, E., Leuschen, K.**, "Surface Layers on Cobalt Base Alloys by Boron Diffusion, Thin Solid Films" Vol45 331 339p., 1977
12. **Özsoy, A.**, "Çeliğin Borlanması Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi" Doktora tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bil. Enst., Eskişehir, 1996
13. **Permyakov, V.G., Loskutov, V.F., Trush, I.K., Pisarenko, V.N.**, "Boriding of Tool Steels in Commercial Boron Carbide" Met.Sci. Heat Treat., Vol 16 160 162 p., 1974
14. **Göy, Z.**, "Borlama" Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bil.Enst., İstanbul, 1984
15. **Pengxun, Y.**, "Gaseous Boronizing With Solid Boron-yielding Agents" Thin Solid Films., Vol 214, 44-47 p., N-1 Jun 301992
16. **Şahin, S.**, "Katı Borlama Yöntemiyle Ferrobor Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi" Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1999
17. **Kunst, H., Schaaber, O.**, "Beobachtungen Beim Oberflächen Borieren Von Stahl III" HTM.22 Heft Vol 4 275 292 p., 1967
18. **Fichtl, W.**, "Boronizing and its Practical Applicatiyon" Materials in Engineering, 2:276-286, 1981
19. **Selçuk, B.**, "Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi" Doktora Tezi, E. Ü. Fen Bil. Enst., Kayseri, 1994
20. **Lakhtin, Y. M.**, "Engineering Physical Metallurgy and Heat Treatment" (Trans. Weinstein,N.), Mir Publishers, 426 p., Moscow, 1983
21. **Geller, Y.**, "Tool Steels" (Trans. Afanasyev, V. V.), Mir Publishers, 666p., Moscow, 1978
22. **Bazille, P.**, "Connaissances Actuelles Sur La Boruratiyon" Traitement Thermique, 111: 31-38, 1977
23. **Sinha, A. K.**, "Heat Treating" ASM Handbook, Vol 4, pp 437-447, 1991.
24. **Rile, M.**, "Reasons for the Formatiyon of Cracks in Boride Coatings on Steel" Met. Sci. Heat Treat., 16. 836-839, 1974
25. **Babushkin, B. V.**, "Polyakov, B. Z., Residual Stresses in Steel After Boriding From Melts" Met. Sci. Heat Treat., Vol 15 577-580 p., 1973
26. **Krzyminski, H., Kunst, H. T.**, "Borieren Refraktärer Metalle, Harterei Technische Mitteilungen" Vol 28 100-112 p., 1973
27. **Budinski, K.G.**, "The Wear fo Diffusion Treated Surfaces", Wear, 162-164, 757-762, 1993.
28. **Hegewaldt, F., Singheiser, L., and Türk, M.**, "Gasborieren", HTM, 39,1,7,15, 1984.
29. **Bindal, C.**, "Az Alaşımlı Karbon Çeliklerinde Borlama ile Yüzeve Kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tespiti", Doktora Tezi, İTÜ, 1991.
30. **Eyre, T.S.**, "Effect of Boronizing on Frictiyon and Wear of Ferrous Metals", Wear, 33, 383-397, 1975.

31. **Hunger, H.-J. And True G.**, “Boronizing to Produce Wear-resistant Surface Layers”, Heat Treatment of Metals, 2, 31-39, 1994.
32. **Genel, K., Ozbek, I. and Bindal, C.**, “Kinetics of Boriding of AISI W1 steel”, Materials Science and Engineering A 347, 311-314, 2003.
33. **Kulka, M. and Pertek, A.**, “The Importance of Carbon Content Beneath Ironborides After Boriding Of Chromium and Nickel-based Low-carbon Steel”, Applied Surface Science (Article in Press), 2003.
34. **Genel, K., Özbek, I., Kurt, A. and Bindal, C.**, “Boriding Response of AISI W1 Steel and Use of Artificial Neural Network for Prediction of Borided Layer Properties”, Surface and Coatings Technology 160, 38-43, 2002.
35. **Rie, K.-T.**, “Recent Advances in Plasma Diffusion Processes”, Surface and Coatings Technology 112, 56-62, 1999.
36. **Davis, J.A., Wilbur, P.J., Williamson, D.L., Wei, R., and Vajo, J.J.** “Iyon Implantasyon Boriding of Iron and AISI M2 Steel Using a High-Current Density, Low Energy, Broad-Beam Iyon Source”, Surface and Coatings Technology 103, 52-57, 1998.
37. **Nam, K.S., Lee, K.H., Lee, S.R., and Kwon, S.C.**, “A Study on Plasma-Assisted Boriding of Steels”, Surface and Coatings Technology 98, 886-890, 1998.
38. **Wilbur, P.J., Davis, J.A., Williamson, D.L., Vajo, J.J. and Wei, R.**, “High-Current Density Broad-Beam Boro Iyon Implantasyon”, Surface and Coatings Technology 96, 52-57, 1997.
39. **Yan, P.X., Wei, Z.Q., Wen, X.L., Wu, Z.G., Xu, J.W., Liu, W.M. and Tian, J.**, “Post Boronizing Iyon Implantasyon of C45 Steel”, Applied Surface Science 195, 74-79, 2002.
40. **Yu, L.G., Khor, K.A., and Sundararajan, G.**, “Boriding of Mild Steel Using the Spark Plasma Sintering (SPS) Technique” Surface and Coatings Technology 157, 226-230, 2002.
41. **Iakovou, R., Bourithis, L., and Papadimitriou, G.**, “Synthesis of Boride Coatings on Steel Using Plasma Transferred Arc (PTA) Process and its Wear Performance”, Wear 252, 1007-1015, 2002.
42. **Bourithis, L., Papaefthymiou, S. and Papadimitriou, G.D.**, “Plasma Transferred Arc Boriding of a Low Carbon Steel: Microstructure and Wear Properties”, Applied Surface Science 200, 203-218, 2002.
43. **Yücel, O.**, “Kabotermik Ferrobör Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu” Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bil. Enst., İstanbul, 1992.
44. **Goeriot, P.Y., Fillit, P., Thevenot, F., Driver, S. H., Bruyas, H.**, “The Influence of Alloying Element Additiyon on the Boriding of Steels” Mat. Sci. and Eng. 9 19p., 1982.
45. **W. Muhammad, K. Hussain, A. Tauqir, A. UI Haq and A.Q. Khan** “Evaluation of Halide-Activated Pack Boriding of INCONEL 722” , Metallurgical and Materials Transactions, 30A,3, Academic Research Library, pp. 670-675, Mar 1999.
46. **Andrej Salak, Herbert Danninger and Marcela Selecka**, “Powder Metallurgy Steels can be Borided”, Advanced Materials&Processes, Vol. 156, Issue 2, PH5, 1p, Aug 1999.
47. **W.D. Man, J.H. Wang, Z.B. Ma and C.X. Wang**, “Plasma Boronitriding of WC(Co) Substrate as an effective Pretreatment Process for Diamond CVD”, Surface&Coatings Technology, 171, pp. 241-246, 2003.
48. **P. Gopalakrishnan, P. Shankar, M. Palaniappa and S.S. Ramakrishnan**, “Interrupted Boriding of Medium-Carbon Steels”, Metallurgical and Materials Transactions, 33A,5, Academic Research Library, pp. 1475-1485, May 2002.
49. **C.L. Ge and R.C. Ye**, “Research on Self-Propagating Eutectic Boriding”, Journal of Materials Perocessing Technology, 124, pp. 14-18, 2002.
50. **Nikolay Uzunov and Radoslav Ivanov**, “Aluminothermic Powder Boriding of Steel”, Applied Surface Science, 225, pp- 72-77, 2004.
51. **L. Lin and K. Han**, “Optimization of Surface Properties by Flame Spray Coating and Boriding”, Surface&Coatings Technology, 106, pp. 100-105, 1998.