

Borlanmış AISI M2 Çeliğinin Metalografik Özelliklerinin İncelenmesi

Mehmet Ali Yağcı

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran, 2009

Investigation Of The Metallographical Properties Of The Boronized AISI M2 Steel

Mehmet Ali Yağcı

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

June, 2009

Borlanmış AISI M2 Çeliğinin Metalografik Özelliklerinin İncelenmesi

Mehmet Ali Yağcı

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri Çelik

Haziran, 2009

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Mehmet Ali YAĞCI'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Borlanmış AISI M2 Çeliğinin Metalografik Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd.Doç.Dr. Osman Nuri ÇELİK

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Yrd.Doç.Dr. Osman Nuri ÇELİK

Üye : Prof.Dr. Macit YAMAN

Üye : Prof.Dr. Orhan Şerif KOMAÇ

Üye : Yrd.Doç.Dr. Nedret AYDINBEYLİ

Üye : Yrd.Doç.Dr. Ümit ER

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

BORLANMIŞ AISI M2 ÇELİĞİNİN METALOGRAFİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

MEHMET ALİ YAĞCI

ÖZET

AISI M2 çeliği sanayide oldukça geniş bir alanda kullanılan takım çeliği grubundandır. Bu çalışmada, AISI M2 (DIN 1.3343) çeliğine katı ortamda borlama yöntemi uygulanarak, işlem parametrelerinin yüzey özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Borlanan numuneler; mikroyapı incelemeleri, mikrosertlik ve tabaka kalınlığı ölçümleri ile karakterize edilmiştir. Borlama deneyleri 900, 1000 ve 1100 °C ile 2, 4, 6 ve 8 saatlik sürelerde, EKabor®-2 tozu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Borür tabakası fazları (FeB ve Fe₂B) ve geçiş bölgesinin varlığı, mikroyapı incelemeleriyle tespit edilmiştir. Yapılan sertlik ölçümleri sonucu 1000°C'de 6 saat borlanan numunede yüzeyden 10 µm mesafede 1895 HV ile en yüksek değeri elde edilmiştir. Ayrıca 1100°C'de 6 ve 8 saatlik sürelerdeki numunelerde FeB fazının aşırı kırılğan yapısı sebebiyle önemli derecede düşük sertlik değerleri ölçülmüştür. Borlanmış numunelerin sertliği yüzeyden içeriye doğru ilerledikçe azalmaktadır. Borlama sıcaklığına ve süresine bağlı olarak, borür tabakasının kalınlığı ise ortalama 14 µm ile 126 µm arasında değişmektedir. Sürenin uzaması ve sıcaklığın artması, borür tabakasının büyümesi ile sonuçlanmaktadır.

Genel olarak bakıldığında, çalışmanın sonunda AISI M2 çeliğinin yüzey özelliklerinin borlama ısıl işlemiyle iyileştiği söylenebilir. Buna karşın, borür tabakasındaki çatlaklar ve porozite ile FeB fazının aşırı kırılğan yapısı sebebiyle, yüksek sıcaklık ve uzun süreli borlama işlemlerinden kaçınılmalıdır.

Anahtar Kelimeler : Borlama, yüzey sertleştirme, tabaka kalınlığı, AISI M2

INVESTIGATION OF THE METALLOGRAPHICAL PROPERTIES OF THE BORONIZED AISI M2 STEEL

MEHMET ALİ YAĞCI

SUMMARY

AISI M2 steel belongs to the tool steel group, which is widely used in industry. In this study, the effect of treatment parameters on surface characteristics has been discussed, in the solid boriding method to AISI M2 (DIN 1.3343). The samples borided were characterized with microstructure analyses, microhardness and measurement of layer thickness. Boronizing tests were handled at 900, 1000 and 1100 °C for 2, 4, 6 and 8 hours using EKabor®-2 powder. Phases of boride layers (FeB and Fe₂B) and the existence of transition zone were detected with microstructure analyses. As a result of hardness measurements, for the sample borided for 6 hours at 1000°C, at the distance of 10 µm from the surface the highest value of 1895 HV was determined. Furthermore, for the samples borided for 6 and 8 hours at 1100°C, significantly low values of hardness were measured due to excessive fragile structure of FeB phase. Hardness of borided samples reduces from the surface to the inside. Depending on the boronizing temperature and time, thickness of boride layer ranges from 14 µm to 126 µm. Extension of time and increase of temperature result in expansion of boride layer.

Generally speaking, depending on our study it might be concluded that the surface characteristics of AISI M2 steel improve with heat treatment. On the other hand, owing to cracks and porosities on the boride layer and excessive fragile structure of FeB, high temperature and long time boronizing should be avoided.

Key words : Boronizing, surface hardening, layer thickness, AISI M2

TEŞEKKÜR

Günümüzde ülkemiz için önem taşıyan bor bileşiklerinin değerlendirilmesi konusunda çalışmamı sağlayan ve çalışma süresince beni yönlendiren danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK hocama; deney aşamasında tecrübelerinden ve bilgilerinden faydalandığım hocam Dr. Mustafa ULUTAN'a; Yüksek Lisansımı tamamlamada her türlü kolaylığı gösteren AY PLASTİK MAKİNA SAN. VE TİC. LTD. ŞTİ çalışanlarına sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak; tez çalışmalarım boyunca tek gün bile şikayet etmeden maddi ve manevi desteklerini üzerimden esirgemeyen ve tüm olumsuzlukları aşmamı sağlayan biricik eşim, annem, babam ve kardeşime teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm şehit ve gazilerimize...

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. BORLAMA.....	5
2.1. Bor Elementi.....	5
2.2. Borlama Isıl İşlemi.....	6
2.3. Borlama Yöntemleri.....	12
2.3.1. Katı ortamda borlama.....	12
2.3.1.1. Toz ortamda borlama.....	13
2.3.1.2. Bölgesel borlama.....	17
2.3.2. Sıvı ortamda borlama.....	18
2.3.2.1. Normal sıvı ortamda daldırma yöntemi.....	19
2.3.2.2. Elektroliz yöntemi.....	20
2.3.3. Gaz ortamda borlama.....	21
2.3.4. Plazma borlama.....	23
2.4. Borür Tabakası.....	25
2.4.1. Alaşım elementlerinin borür tabakasına etkisi.....	33
2.4.2. Borür tabakasının aşınma direnci.....	37
2.4.3. Borlanabilen malzemeler.....	38
2.4.4. Termokimyasal borlamanın uygulama alanları.....	38
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	41

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4. YÜKSEK HIZ ÇELİKLERİ.....	51
4.1. Yüksek Hız Çeliklerinin Sınıflandırılması.....	51
4.2. Yüksek Hız Çeliğinin İç Yapısı ve Alaşım Elementlerinin Etkisi....	54
4.3. Yüksek Hız Çeliklerinin Kullanım Alanları.....	56
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI.....	58
5.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme.....	58
5.2. Borlama İşlemi.....	58
5.3. Metalografik Çalışmalar.....	59
5.4. Borür Tabakası Kalınlığının Belirlenmesi.....	60
5.5. Mikrosertlik Ölçümleri.....	67
6. SONUÇLARIN İRDELENMESİ.....	71
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1	Endüstride Aşınma Tiplerinin Oranları.....	1
Şekil 1.2	Yüzey İşlemlerinin Sınıflandırılması.....	2
Şekil 2.1	Borür çekirdeğinin oluşumu ve büyümesi.....	8
Şekil 2.2	<001> düzleminde FeB'nin yapısı.....	9
Şekil 2.3	<001> düzleminde Fe ₂ B'nin yapısı.....	9
Şekil 2.4	Fe-B denge diyagramı.....	11
Şekil 2.5	Katı borlama için hazırlanan kutu.....	15
Şekil 2.6	Gaz borlama ünitesi.....	21
Şekil 2.7	Endüstriyel uygulamalarda kullanılan bir plazma borlama ünitesinin şematik gösterimi.....	24
Şekil 2.8	Borür tabakasının şematik gösterilişi a) Çift fazlı (Fe ₂ B+FeB) b) Tek fazlı (Fe ₂ B) tabaka.....	25
Şekil 2.9	Borür tabakası çeşitleri.....	29
Şekil 2.10	Değişik çeliklerde işlem zamanının borür tabakası kalınlığına etkisi a) (Özbek, 1999), b) (Matuschka, 1980).....	30
Şekil 2.11	Ck 45 çeliğinde borür tabaka kalınlığına işlem süresi ve sıcaklığına etkisi.....	31
Şekil 2.12	900 °C'de borlanan düşük, orta ve yüksek alaşımlı çeliklerin borlama zamanı ile borür tabakası kalınlığının değişimi.....	35
Şekil 2.13	Alaşım elementlerinin borür tabakası kalınlığına etkisi.....	36
Şekil 5.1.	Borlama işleminde kullanılan altlık malzemenin şematik gösterimi..	60
Şekil 5.2.	Tabaka kalınlığının ölçülmesi (a) Önceki çalışmalarda sıklıkla kullanılan yöntem (b) Bu çalışmada kullanılan alan yöntemi.....	60
Şekil 5.3.	900 °C'de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X).....	61
Şekil 5.4.	900 °C'de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X).....	61

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.5. 900 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X).....	62
Şekil 5.6. 900 °C’de 8 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X).....	62
Şekil 5.7. 1000 °C’de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X).....	63
Şekil 5.8. 1000 °C’de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X).....	63
Şekil 5.9. 1000 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X).....	64
Şekil 5.10. 1000 °C’de 8 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X).....	64
Şekil 5.11. 1100 °C’de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X).....	65
Şekil 5.12. 1100 °C’de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X).....	65
Şekil 5.13. 1100 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X).....	66
Şekil 5.14. 1100 °C’de 8 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X).....	66
Şekil 5.15. Borlanmış AISI M2 çeliğinin sıcaklık ve zamana bağlı borür tabaka kalınlığının değişimi.....	67
Şekil 5.16. 900 °C’de yüzeyden 20 µm aralıklarla zamana bağlı olarak elde edilen AISI M2 çeliğinin ortalama sertlik değerleri.....	68
Şekil 5.17. 1000 °C’de yüzeyden 20 µm aralıklarla zamana bağlı olarak elde edilen AISI M2 çeliğinin ortalama sertlik değerleri.....	68
Şekil 5.18. 1100 °C’de yüzeyden 20 µm aralıklarla zamana bağlı olarak elde edilen AISI M2 çeliğinin ortalama sertlik değerleri.....	69

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

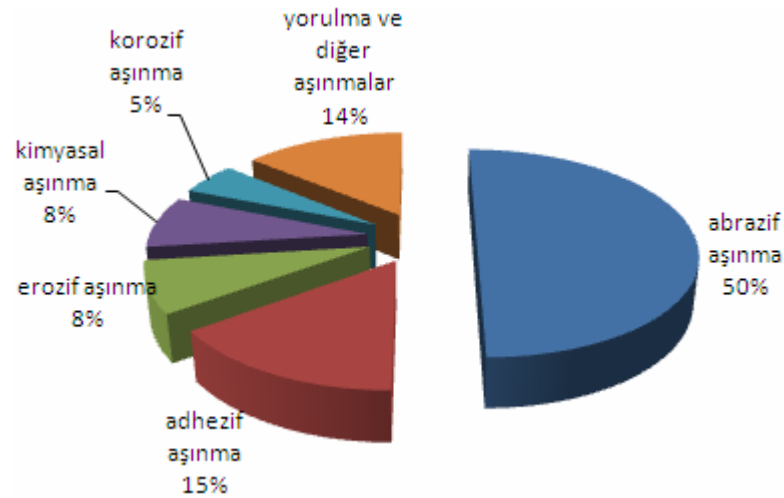
<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.19. Borlama süresine bağlı olarak farklı sıcaklıklar için yüzeyden 10µm mesafede elde edilen AISI M2 çeliğinin ortalama sertlik değerleri.....	69
Şekil 6.1. Genel ve arkadaşlarına göre sıcaklığın artmasına bağlı olarak sertlikteki düşüş değişimi.....	74
Şekil 6.2. Yüzeyden 10 µm mesafede 4 ve 6 saatlik işlem süreleri için sıcaklığına bağlı sertlik değişimi.....	74

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. Bor elementinin karakteristik özellikleri.....	5
Tablo 2.2. Endüstriyel açıdan önemli bor bileşikleri.....	6
Tablo 2.3. Fe ₂ B ve FeB fazlarının tipik özellikleri.....	10
Tablo 2.4. EKabor borlama ürünleri.....	13
Tablo 2.5. Katı ortam borlamada kullanılan maddelerin bazı özellikleri.....	14
Tablo 2.6. Borlama tozundaki B ₄ C miktarının çeşitli çeliklerde borür tabakasında FeB fazı oluşumuna etkisi.....	17
Tablo 2.7. Sıvı ortamda kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri.....	18
Tablo 2.8. Çeşitli metal borürlerin bazı özellikleri.....	26
Tablo 2.9. Borlama ve Diğer Yüzey Sertleştirme İşlemleri Sonucunda Oluşan Sertlik Değerleri.....	32
Tablo 4.1. Yüksek hız çeliklerinin Alman Standardına göre kimyasal bileşimleri.	52
Tablo 4.2. Yüksek hız takım çeliklerinin genel kompozisyonları.....	53
Tablo 4.3. Yüksek Hız Çeliklerinin Genel Kullanım Yerleri.....	57
Tablo 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan AISI M2 çeliğinin kimyasal bileşimleri.....	58
Tablo 5.2. AISI M2 malzemesinin farklı normlardaki gösterilişi ve numaralandırılması.....	59
Tablo 5.3. AISI M2 çeliğinin çalışmada belirlenen sıcaklık ve sürelerde borlanması sonucu elde edilen borür tabakasının ortalama kalınlık değerleri ve yüzeyden çekirdek bölgesine doğru ölçülen ortalama mikrosertlik değerleri.....	70

1. GİRİŞ

Makinelerin ve dolayısıyla makine elemanlarının verimli bir şekilde çalışmasına ve kullanım ömürlerine etki eden önemli faktörler aşınma, korozyon ve yorulmadır. Sürtünme nasıl bir ısı enerjisi kaybı ise, aşınma da geriye kazanılması neredeyse imkansız bir malzeme kaybı sebebidir. Bu nedenle dünyada her yıl aşınmadan dolayı özellikle endüstriyel uygulamalarda önemli malzeme kayıpları meydana gelmektedir. Wear Failures'e göre sanayileşmiş ülkelerde aşınma sebebiyle G.S.M.H' nın %7'sine varan bir harcamanın yapıldığı tahmin edilmektedir (Özbek, 1999). Khoe'e göre ise ülkelerin korozyon nedeniyle kayıpları gayri safi milli hasıllarının %3,5 – 5' i arasında değişmektedir (Delikanlı vd., 2003). Endüstride çeşitli hasarlara neden olan aşınma tiplerinin yaklaşık oranları Şekil 1.1'de verilmiştir.

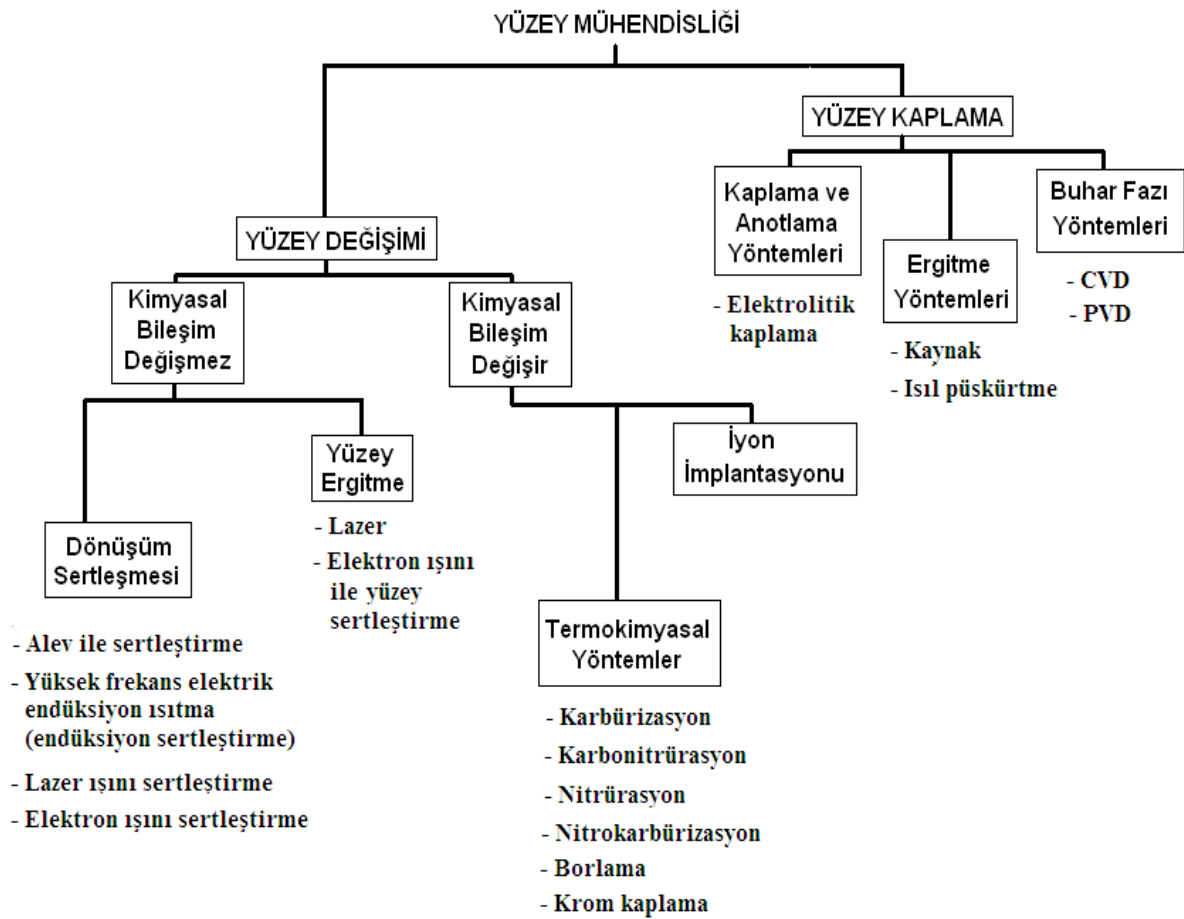


Şekil 1.1. Endüstride aşınma tiplerinin oranları (Özbek, 1999)

Mühendislikte aşınma ile mücadele için iki amaç hedeflenmektedir. Bunlardan birincisi malzeme yüzeyinin aşınma direncini arttırmak, diğeri ise, malzeme yüzeyinin sürtünme davranışını düzeltmektir. Dönüşüm sertleştirilmesi yapılabilir veya ergimeyi izleyen hızlı soğuma ile kimyasal bileşim değiştirilmeksizin malzeme yüzeyinin mikro yapısı değiştirilebilir. Zıt olarak da, difüzyon işlemleri yardımıyla kimyasal bileşim ve mikro yapının her ikisi de değiştirilebilir. Bu yöntemler ile kimyasal bileşimdeki ve

mikroyapıdaki değişiklikler kaçınılmaz olarak sınırlı olup, birçok amaç için tamamen farklı malzemelerden kaplamalar da uygulanabilmektedir (Sarı vd., 1997).

Şekil 1.2’de belirtilen yüzey işlemleri ve kaplamalar, yüzey sertleştirme işlemleri olarak isimlendirilen mühendislik ve bilim dalları tarafından ortak kabul gören bir tablodur. Kısaca, yüzey mühendisliği yöntemleri, malzemenin kullanım özelliklerini iyileştirmek için geliştirilmiştir. Bu yöntemler, malzemenin korozyon direncini, aşınma direncini, yorulma mukavemetini, fiziksel özelliklerini, estetik görünümünü veya bunların bileşimi olan özellikleri iyileştirmek için kullanılabilir (Sarı vd., 1997).



Şekil 1.2. Yüzey işlemlerinin sınıflandırılması (Sarı vd., 1997)

Malzemede hasar oluşturan sebeplerden olan aşınmaya karşı alınan önlemlerin en başında ise seramik kaplamalar gelmektedir. Metalik malzemelerin abrazif, adhezif ve erozif aşınmaya karşı çeşitli prosesler ile özellikle karbür, nitrür ve borür gibi sert kaplama da denilen seramik kaplamalar yapılarak çok başarılı sonuçlar alınmaktadır.

Ayrıca seramik kaplamalar, metalik malzemelerin korozyon dirençlerinin artırılması yanında yüksek sıcaklık uygulaması, enerji tasarrufu gibi amaçlar için de tatbik edilmektedir. Fakat bu proseslerin çoğunun uygulanabilirliği için yüksek teknolojiler ve dolayısıyla da yüksek maliyetler gerekmektedir. Buna karşılık, malzeme yüzeyinde pratik ve ekonomik bir şekilde termokimyasal işlemlerle oksit olmayan seramiklerden olan borür tabakasının oluşturulması oldukça avantajlıdır. Ayrıca borlama işleminin alaşımsız çeliklere uygulanabilmesi ekonomik açıdan bir üstünlüktür. Borlama ısıl işlemiyle metalik malzemenin yüzey sertliği, aşınma, oksidasyon ve korozyon direnci oldukça yüksek seviyelere çıkartılabilmektedir (Özbek, 1999).

Çeliklerde bor yayınımla yüzey sertleştirme işlemi, ilk olarak 1895 yılında Moissan tarafından yapılmıştır. 1970'li yıllardan itibaren borlama konusunda çalışmalar hızlanmıştır. Günümüzde ise borlama, sürtünme ve aşınmanın olumsuz etkilerinin azaltılması ve kontrol altında tutulması amacıyla yüzey mühendisliği ve yüzey kaplama teknolojileri başlıkları altında teknolojik olarak gelişmiş alternatif bir yüzey sertleştirme yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır (Özsoy, 1991; Delikanlı vd., 2003). Son yıllarda özellikle demir esaslı alaşımlar üzerine bor kaplamalar ilgi odağı olmuştur.

Termokimyasal bir kaplama işlemi olan borlama, yüksek sıcaklıkta metallerin yüzeyinde bor atomlarının difüzyonuyla borür tabakası oluşturma işlemidir. Bor verici olarak herhangi bir bor bileşiği kullanılabilir. Borlama, katı, sıvı, gaz ya da plazma ortamlarında yapılabilir (Atik, 1997). Borlanan malzeme demir esaslı ise Fe_2B ve FeB gibi bileşikler içeren demir borür tabakaları oluşur. Endüstriyel uygulamalarda, hem daha az gevrek olması ve hem de borlama sonrası ısıl işlemlere izin vermesi bakımından Fe_2B 'den oluşan tek fazlı borür tabakaları tercih edilir. Borür tabakasının önemli bir özelliği ise sahip olduğu yüksek sertlik değerini, 900 – 1000 °C' ye ulaşan sıcaklıklarda dahi koruyabilmesidir. Böylece aşınma ve oksidasyona karşı tribolojik özelliklerini kaybetmeden yüksek bir direnç gösterebilmektedir (Ayter, 2005).

Bu bağlamda yapılan çalışma, yüksek sıcaklık ve sürelerde gerçekleştirilen katı borlama işlemi sonrasında, AISI M2 (% 0.88 C, % 4.25 Cr, % 5.00 Mo, % 6.40 W, % 1.83 V, % 0.14 Co, % 0.45 Ni, % 0.22 Si, % 0.34 Mn, % 0.011 S, % 0.016 P)

malzemesinin yüzey kalitesindeki değişimi gözlemleyerek, sanayideki kullanım alanının ve süresinin hangi yönde değişeceğinin belirlenmesi amacıyla dayanmaktadır. Çalışma numunesinin özellikle matkap, freze, zımba gibi kesme ve delme gerektiren, yüksek çalışma sıcaklıklarına ulaşan talaşlı imalat operasyonlarında kullanılması sebebiyle malzemede olabilecek performans artışının önemli ekonomik kazançlar getireceği ortadadır. Ayrıca AISI M2 çeliği için en uygun borlama sıcaklığı ve süresi tespit edilmeye çalışılmıştır.

Borlama işlemi, 900, 1000 ve 1100 °C'lerde ve 2, 4, 6 ve 8 saatlik sürelerde, EKabor®-2 tozu kullanılarak katı ortamda atmosferik koşullarda gerçekleştirilmiştir. Borlanan numunelerin mikroyapıları optik mikroskopta metalografik olarak incelenmiş, borür tabakasının sertlik değerleri ve tabaka kalınlığı ölçümleri yapılmıştır.

2. BORLAMA

2.1. Bor Elementi

Kökene Arapça'da Buraq / Baurach ve Farsça'da Burah kelimelerinden gelen bor, kimyasal sembolü "B" olup periyodik cetvelin 3A grubunun metal olmayan tek elementidir (Delikanlı vd, 2003). Bor elementi genellikle hem tetragonal ve hekzagonal kristal hem de amorf yapıda olabilir. Amorf yapıdaki yoğunluğu $2,34 \text{ gr/cm}^3$ olan bor elementinin sertliği ise 9,3 Mohs'dur (Özbek, 1999). Vickers sertlik değeri 5000 HV, Knoop sertliği ise 2100-2850 HK değerlerindedir (Ersöz, 2008). Tablo 2.1'de bor elementinin bazı karakteristik özellikleri belirtilmektedir.

Tablo 2.1. Bor elementinin karakteristik özellikleri (Özbek, 1999)

	Atom Ağırlığı	Atom Numarası	Yoğunluğu	Ergime Noktası	Kaynama Noktası	Atom Yarıçapı	İyon Yarıçapı
Bor [B]	10,81 gr	5	$2,33 \text{ gr/cm}^3$	2092 °C	2550 °C	0,46 Å	0,23 Å

Tabiatta yaklaşık 230 çeşit minerale sahip bor elementi, genellikle başka elementlerle bileşikler halinde bulunur. Oksijene karşı afinitesi en yüksek element olan borun, (Delikanlı vd, 2003) oksijenle bağ yapmaya yatkın olması sebebiyle pek çok değişik bor-oksijen bileşimi bulunmaktadır. Endüstriyel açıdan önemli bor bileşikleri Tablo 2.2'de belirtilmiştir. Bor – oksijen bileşimlerinin genel adı borattır. Çeşitli metal veya ametal elementlerle yaptığı bileşiklerin gösterdiği değişik özellikler, endüstride bir çok bor bileşiği türünün kullanılmasına imkan sağlamaktadır. Bor madenlerinin değeri genellikle içindeki B_2O_3 (bor oksit) ile ölçülmekte, yüksek oranda B_2O_3 bileşiğine sahip olanlar daha değerli kabul edilmektedir (<http://www.dtm.gov.tr/dtmadmin/upload/EAD/KonjokturIzlemeDb/bor.doc>, Nisan, 2009).

Tablo 2.2. Endüstriyel açıdan önemli bor bileşikleri (Ersöz, 2008)

Mineral	Formülü	% B ₂ O ₃	% H ₂ O	Bulunduğu Yer
Boraks (Tinkal)	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	36,5	47,2	Kırka, Emet, Bigadiç, ABD
Tinkalkonit	Na ₂ B ₄ O ₇ .5H ₂ O	47,8	30,9	
Kernit	Na ₂ B ₄ O ₇ .4H ₂ O	50,9	26,4	Kırka, ABD, Arjantin
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ .8H ₂ O	43	35,6	Kırka, Emet, Bigadiç, ABD, Arjantin
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ .5H ₂ O	50,8	21,9	Emet, Bigadiç, Küçükler, ABD, Meksika
Pandermit (Priserit)	Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ .7H ₂ O	49,8	18,1	Sultançayırı, Bigadiç
Hidroborasit	CaMgBO ₁₁ .6H ₂ O	50,5	26,2	Emet, Rusya, Kafkasya
Inyonit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ .13H ₂ O	37,6	42,2	Kazakistan, Arjantin
Aşharit	Mg ₂ B ₂ O ₅ .H ₂ O	41,4	10,7	Sovyetler Birliği, Çin
Datolit	Ca ₂ B ₂ Si ₂ O ₉ .H ₂ O	21,8	5,6	Kazakistan
Meyerhofferite	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ .7H ₂ O	46,7	28,2	Türkiye
Inderite	Mg ₂ B ₆ O ₁₁ .15H ₂ O	37,3	48,3	Arjantin
Hovlit	Ca ₄ B ₁₀ Si ₂ O ₂₁ .5H ₂ O	44,4	11,5	Meksika, Türkiye
Probertit	NaCaB ₅ O ₉ .5H ₂ O	49,6	25,6	ABD
Sassolin	HBO ₃	56,3	47,3	İtalya
Borasit	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl	62,2		Türkiye

2.2. Borlama Isıl İşlemi

Oksit olmayan seramiklerden olan borürler, üstün özelliklere sahip olduklarından bor ve bor bileşikleri üzerine çok sayıda çalışmalar yapılmaktadır (Özbek, 1999). 1970'li yıllardan itibaren borlama konusundaki bu çalışmalar hız kazanmış katı, sıvı ve gaz olarak bilinen borlama yöntemleri geliştirilmiştir (Yıldızlı, 2002). O yıllardan bu zamana bor ve bileşikleri teknolojilerindeki ilerlemelerle birlikte işlem, çok çeşitli malzemelere uygulanabilir ve endüstride de geniş bir kullanım alanına sahip hale gelmiştir. Bor ve bileşikleri özellikle çelik üretiminde cüruf yapıcı, çeliklerde alaşım elementi olarak ve

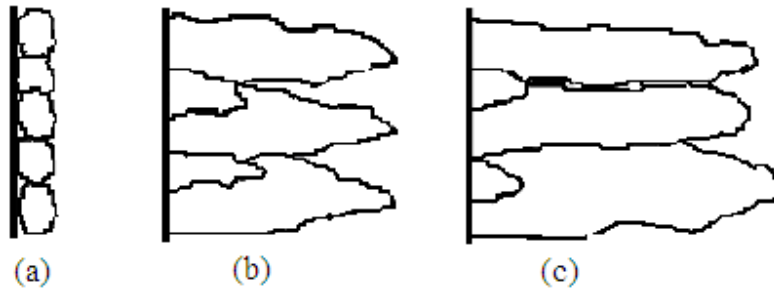
çeliklerde yüzey kaplama ve sertleştirme ısıl işlemi gibi işlemlerde önemli ölçüde kullanılmaktadır (Delikanlı vd, 2003).

Borlama temel olarak, yüksek sıcaklıkta metallerin yüzeyinde bor atomlarının difüzyonuyla, borür tabakası oluşturan termokimyasal bir yüzey sertleştirme ısıl işlemidir. Alman Endüstri Standardı DIN 17014'e göre ise, "termokimyasal işlem yoluyla iş parçası yüzeyinin bor atomlarıyla zenginleştirilmesi" olarak tarif edilmektedir. Yani termal enerji yoluyla bor atomlarının iş parçasının yüzeyindeki metal latisin içerisine yayınması ve orada ana malzemenin atomları ile borürlerin oluşturulmasıdır (Özbek, 1999). Bu işlem kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlara dayanmakta ve sabit sıcaklıkta veya termal çevrimli olarak uygulanabilmektedir (Er ve Par, 2004). Genel uygulamada ise 700 – 1050 °C sıcaklık aralıkları ve 1 – 12 saatlik işlem süreleri tercih edilmektedir (Boylu vd., 2003). Hutchings'e göre borlama yöntemine bağlı olarak ostenit dönüşüm sıcaklığı üzerinde 800 ile 1050 °C aralığında, 1 ile 8 saatlik işlem sürelerinde uygulanmaktadır (Hutchings, 1992). Matuschka (1980) ise yapılan deneyler sonucu optimum borlama sıcaklığını 2, 4 ve 6 saat için 900-950 °C arasında olduğunu belirtmektedir.

Bor kaynağı olarak amorf bor, B_4C (borkarbür), $Na_2B_4O_7$ (susuz boraks), H_2B_6 , tabakanın düzenli büyümesini sağlayan aktivatör (KBF_4), işlem sıcaklığında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluşturan ve ortamdaki malzemelerin ana malzemeye yapışmasını önleyen dolgu malzemesi ve deoksidanlardan (SiC , vb.) oluşan karışımlar kullanılır (Özbek, 1999).

Eğer demir bazlı malzemeler borlanıyorsa, demir borürler elde edilir (Er ve Par, 2004). Tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları gibi mikro hatalar ile yüzey pürüzlülükleri ve çizikler gibi malzeme yüzeyinin daha reaktif olduğu yerler borür tabakası oluşumunun başlangıç noktalarıdır. Borlamanın birinci aşamasında borlayıcı ortam ile nesnenin yüzeyindeki reaksiyon partnerleri arasında reaksiyon oluşur. Taneler yüzeyde çekirdek oluşturmaktadır (Şekil 2.1). Borlama süresi ile çekirdek oluşumu artar ve ince bir

bor tabakası elde edilir. Bor, Fe_2B ve FeB yapısında çeliğin yüzeyine yayılır. Bor atomları kafes yapının $[001]$ doğrultusunda daha hızlı yayıldığı için FeB ve Fe_2B , $[001]$ boyunca yönelir. Bu yüzden borür taneleri $[001]$ yönünde yüzeye dik olarak daha hızlı büyür. Borür tanelerinin diğer yönlerde büyümesi daha yavaştır. Bu nedenle kolonsal yapı oluşur. Önce Fe_2B fazı oluşur, ortamda yeterince bor yoğunluğu varsa FeB fazı da oluşur. İlk önce oluşan Fe_2B fazı uzun bir sürede büyümektedir. Borür tabakaları çeliğin yüzeyinden içeriye doğru FeB_x , FeB , Fe_2B yapısında oluşur. Borlamanın son aşamasında sadece FeB fazı oluşur. FeB fazı, Fe_2B fazından daha kısa sürede büyür. Bu yüzden FeB fazının dokusu Fe_2B fazı kadar güçlü değildir (Bayça ve Şahin, 2004; Barış, 2007; Ersöz, 2008).



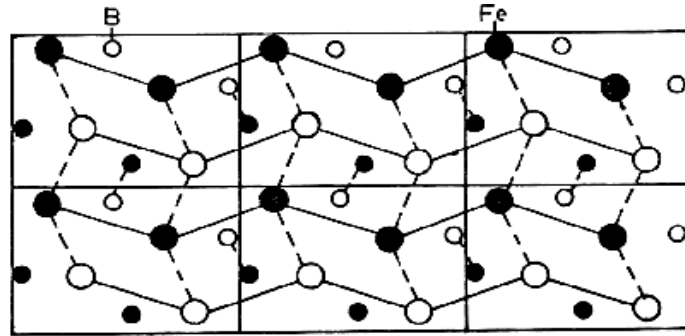
- a. Borür çekirdeği oluşumu
- b. Borür çekirdeğinin numune içinde ilerlemesi
- c. Borür çekirdeğinin numune içinde büyümesi

Şekil 2.1. Borür çekirdeğinin oluşumu ve büyümesi (Bayça ve Şahin, 2004)

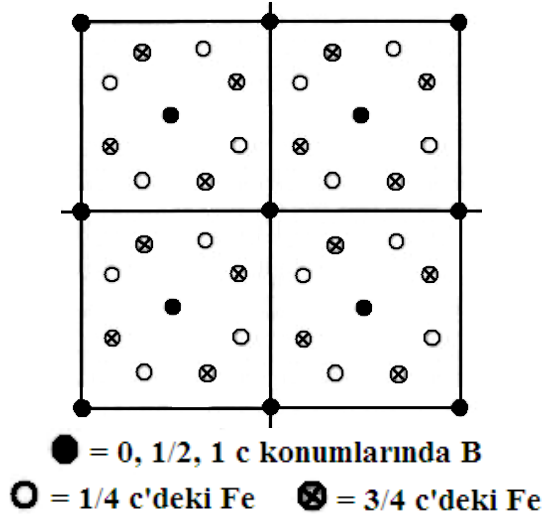
FeB latis parametreleri $a=0,4053$ nm, $b=0,5495$ nm ve $c=0,2946$ nm olan rombik yapıya sahiptir. Birim hücrede 4 demir ve 4 bor atomu bulunur ve atomların dizilişleri şekil 2.2'de gösterilmiştir. Bor atomları c aksisi yönünde zikzak zincirleri oluşturacak şekilde yerleşmiştir ve B-B atomlar arası mesafesi sadece $0,177$ nm'dir. Fe_2B latis parametreleri ise $a=0,5078$ nm ve $c=0,4249$ nm olan tetragonal yapıya sahiptir. Birim hücrede 12 atom vardır ve dizilişleri şekil 2.3'de gösterilmiştir (Matuschka, 1980).

Borun Fe_2B fazı içerisinde difüzyonu, $[001]$ düzlemine dik ve $[001]$ yönünde zincir oluşturarak, FeB fazında ise $[001]$ yönünde bir zikzak çizerek mümkün olmaktadır.

Kristallografik veriler doğrultusunda, B atomunun Fe_2B fazı içerisinde $\langle 001 \rangle$ düzlemine dik bir yol boyunca difüzyonu sırasında, demir ve bor atomları arasında katedilen en kısa mesafe yaklaşık olarak ≈ 0.191 nm olarak tesbit edilmiştir. Bu durumda, bor atomu 4 adet demir atomu ile çevrili durumdadır (Ersöz, 2008).



Şekil 2.2. $\langle 001 \rangle$ düzleminde FeB'nin yapısı (Matuschka, 1980)



Şekil 2.3. $\langle 001 \rangle$ düzleminde Fe_2B 'nin yapısı (Matuschka, 1980)

Bir alaşımda katı eriyik oluşum şartları arasında en önemli olanı, atomik boyut faktörüdür (Özbek, 1999). Bor atomları, göreceli olarak düşük atom boyutu ve yüksek mobilitesi ile demir esaslı alaşımlara kolayca difüze olarak Fe_2B ve FeB metaller arası bileşiklerini oluşturabilirler (Genel, 2002; Çelikyürek, 2006). Bor elementi α -Fe'de atom çapına bağlı olarak hem arayer hem de yer alan konumunda bulunabilmektedir. Fe-B sisteminde borun atom yarıçapının demirin atom yarıçapından 2,69 kat daha küçük olması,

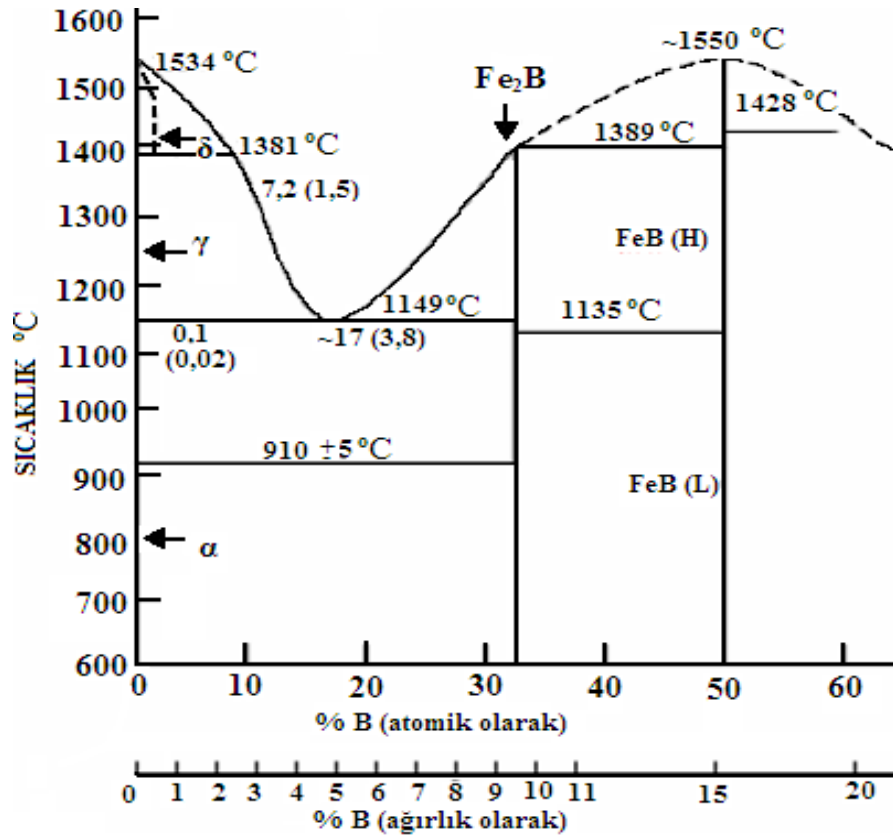
bu elementle katı eriyik yapma imkanı sağlamaktadır (Özbek, 1999). Demirde bor erirliği sıcaklığa bağlı olarak ferrit fazında 20 – 80 ppm, ostenit fazında ise 55 – 260 ppm kadardır. Demir – bor denge diyagramına bakıldığında (Şekil 2.4) ağırlıkça % 8,83 bor oranında Fe_2B , yine ağırlıkça % 16,23 bor oranında FeB ara bileşikleri meydana gelmektedir (Delikanlı vd, 2003). 1149°C’de, %3,8 bor bileşiminde bir ötektik nokta oluşmaktadır. Dolayısıyla borlanmış yüzey 1149°C sıcaklığına kadar ısıdan etkilenmemektedir. Fe-B sisteminde alaşım elementleri, örneğin %1 C ötektik sıcaklığını 50°C aşağıya düşürmektedir (Özsoy, 1991; Çalık vd, 2004; Şimşek, 2005) Ötektik yapısı ve özellikleri, bileşimin yanında sıvı tabakanın soğuma hızına da bağlıdır. Çeşitli araştırmacılar tarafından, Fe_2B fazının ergime sıcaklığının 1389–1410 °C arasında ve FeB fazının ise 1550–1657 °C arasında olduğu belirtilmektedir. Kubaschewski ise Fe_2B ’nin, peritektik reaksiyon sonucu 1407 °C’de meydana geldiğini ifade etmektedir (Özbek, 1999).

Tablo 2.3. Fe_2B ve FeB fazlarının tipik özellikleri (Özbek, 1999; Ersöz 2008)

Özellik	Fe_2B	FeB
Kristal Yapı	Hacim Merkezli Tetragonal	Ortorombik
Latis Parametresi (Å)	a=5.078, c=4.249	a=4.053, b=5.495, c=2.946
Mikrosertlik (GPa)	18-20	19-21
Elastite Modülü (GPa)	280-295	343
Bor İçeriği (%Ağırlıkça)	8.83	16.23
Yoğunluk (gr/cm^3)	7.43	6.75
Termal Genleşme Katsayısı ($ppm/°C$)	7.65 (200-600°C) 9.20 (100-800°C)	23 (200-600°C)
Ergime Sıcaklığı (°C)	1389-1410	1540-1657
Termal İletkenlik ($W/m.°K$)	30.1 (20°C)	12.0 (20°C)
Elektriksel Direnç ($10^6 \Omega.cm$)	38	80
Renk	Gri	Gri

Bu demir borürlerin (Fe_2B , FeB) oluşturduğu borür tabakası, termal ve elektrik iletkenliği gibi özellikleriyle birlikte daha çok yüksek yüzey sertliği, sürtünme katsayısının çok düşük olması, yüksek sıcaklık korozyonuna ve asit ve bazların oluşturacakları

korozyona dirençli olması gibi karakteristik özellikleri ile diğer pek çok sertleştirme yöntemine üstünlük sağlamaktadır (Delikanlı vd, 2003; Barış, 2007). Borlama işleminin en önemli karakteristik özelliği, elde edilen borür tabakasının çok yüksek sertlik (1450-5000 HV) ve ergime sıcaklığına sahip olmasıdır (Özbek, 1999; Akbayır, 2005). Borlama, karbürleme ve nitrürleme gibi geleneksel termokimyasal işlemlerle karşılaştırıldığında çok daha yüksek sertlik (>1500 HV), aşınmaya, oksidasyona, erozyona ve korozyona yüksek direnç ve oldukça düşük sürtünme katsayısına sahiptir (Er ve Par, 2004). Elde edilen bu sertlik, sertleştirilmiş takım çeliklerinin ve sert krom kaplamanın sertliklerinden daha yüksek, tungsten karbürüne ise eşdeğerdir (Özbek, 1999; Akbayır, 2005). Tabaka çok sert olduğundan dolayı da sementasyonda olduğu gibi ayrıca sertleştirmeye gerek kalmaz (Uzun, 2002).



Şekil 2.4. Fe-B denge diyagramı (Şimşek, 2005)

Borlama işlemi esnasında kullanılan yöntem, borlama malzemesinin bileşimi, borlanacak malzeme cinsi, işlem süresi ve işlem sıcaklığı elde edilen tabakaya etki eden faktörlerdir (Baştürk ve Erten, 2006).

2.3. Borlama Yöntemleri

Borlama ısı işleme, termokimyasal ve termokimyasal olmayan yöntemler olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Bu yöntemlerden termokimyasal yöntemler daha çok kullanılmaktadır. Termokimyasal bor kaplama yöntemleri sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak bor atomunun metale difüzyonu prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemler katı (kutu), sıvı, gaz ve plazma borlama olarak sıralanabilir.

Geleneksel yöntemlerin dışında çok bileşenli borlama, akışkan yatakta borlama ile termokimyasal olmayan fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey borlama, plazma sinter borlama (PSP), süperplastik borlama ve iyon biriktirme gibi farklı yöntemler de son yıllarda borlama işlemi için kullanılmaktadır.

2.3.1. Katı Ortamda Borlama

Borlama ortamı olarak katı maddelerin kullanıldığı yöntemdir. Uygulamanın kolay olması, basit donanım gerektirmesi, ekonomik, güvenli ve kullanılan toz karışımın kimyasal kompozisyonunda değişiklik yapılabilirliği nedenlerinden dolayı en yaygın borlama tekniğidir (Şimşek, 2005).

Katı ortamda borlama iki farklı şekilde yapılmaktadır. Bunun biri toz ortam (kutu veya paket borlama) diğeri ise bölgesel olarak yapılabilen macunlama (pastalama) yöntemidir. Her iki yöntemde de bor verici ortam aynıdır. Toz ortam, ince tanelerden oluşmakta; macunlamada ise aynı maddeler macun haline getirilerek kullanılmaktadır (Selçuk, 1994). Ekabor ticari adı ile pazarlanan ürünler, hem toz hem de macun borlamada yaygın olarak kullanılırlar. Ticari alanda Ekabor maddelerini kullanım alanlarına göre sınıflandırmak mümkündür (Tablo 2.4).

Yaygın olarak kullanılan bor bileşikleri bor karbür (B_4C), ferrobör ve amorf bördür. Bu ürünlerin bazı özellikleri Tablo 2.5’de belirtilmektedir. Ferrobör ve amorf bör çok iyi bör verici olup, kalın börür tabakası oluştururlar (Uluköy, 2005). Amorf bör aynı zamanda bör lanabilmeyi de artırır (Çelikyürek, 2006). Ancak amorf börün saf halinin çok pahalı oluşu ve saf ferrobörün eldesinin endüstriyel olarak çok zor olması bu bileşiklerin kullanıldığı metotların bırakılmasına neden olmuştur. Bör karbür ise diğerlerine göre daha ucuzdur ve bileşimi zamana göre sabittir (Uzun, 2002). Akışkan olarak SiC ve Al_2O_3 çözünmeye yardımcı olur. Aktivatör olarak $NaBF_4$ (sodyum bör florür), KBF_4 (potasyum bör florür), $(NH_4)_3BF_4$, NH_4Cl (amonyum klorür), Na_2CO_3 (sodyum karbonat), BaF_2 (baryum florür), ve $Na_2B_4O_7$ (susuz boraks) kullanılır. (Özbek, 1999; Uluköy, 2005)

Tablo 2.4. EKabor bör lama ürünleri (Özbek, 1999; Ulutan, 2007)

Tip	Tane Boyutu (μm)	Yoğunluk (gr/cm^3)	Özellik
EKabor 1	≤ 150	1,80	Yüzey kalitesi en yüksek tabaka oluşumlu; parça yüzeyine yapışmaya eğilimi yüksek
EKabor 2	≤ 850	1,50	Mükemmel yüzey kalitesi; işlem sonrası parçadan kolaylıkla ayrılma özelliği
EKabor 3	$\leq 1,400$	0,95	Çok iyi yüzey kalitesi; işlem sonrasında iyi toz akıcılığı
Ekabor HM	≤ 150	0,95-1,50	Çok iyi yüzey kalitesi; sert metal, küçük delik ve kalın tabakalar için uygun toz karışımı
Ekabor WB	220-350	0,95	Oksijensiz gaz atmosferinde, akışkan yatakta bör lamaya elverişli toz karışımı
Ekabor Pasta	-	1,90	Daldırma, fırça ile sürme ve püskürtme ile uygulanabilir, soy gaz altında çalışmayı gerektirir.
Ekrit	≤ 420	1,55	Örtü malzemesi olarak kullanılır, bör lama süresince toz bör lama ürünlerine oksijen sızmasını önler

2.3.1.1. Toz Ortamda Bör lama

Sementasyona benzeyen bu yöntem; işlem kolaylığı, toz bileşeninin kolayca değiştirilebilmesi, faz bileşenlerinin fazla değişime uğramaması, gerekli cihaz ve donanımın basitliği ve ekonomik yönden de ucuz olması gibi faktörler dolayısı ile geniş bir uygulama alanına sahiptir (Özbek, 1999).

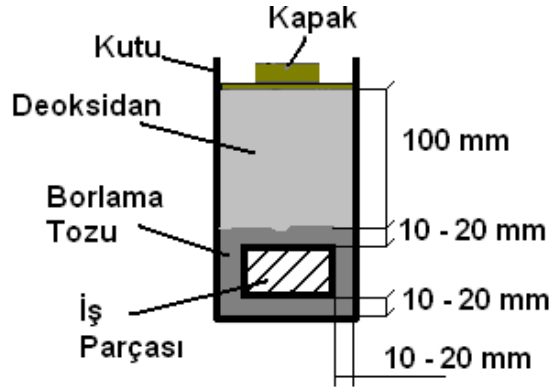
Kutu veya paket borlama olarak da adlandırılan bu yöntemde yüzeyi borlanacak malzeme, toz halindeki bor verici ortam içinde genellikle 800 – 1000 °C sıcaklıklarda 4 ila 10 saat bekletilerek borlama işlemi gerçekleştirilir. Borlama tozu ısıya dayanıklı bir kutuya konur ve borlanacak parça bu tozun içine gömülür (Şekil 2.5). Bu toz, parçanın tüm yüzeylerinde en az 10 mm kalınlığında olmalıdır (Uzun, 2002; Yıldızlı, 2002).

Tablo 2.5. Katı ortam borlamada kullanılan maddelerin bazı özellikleri (Ulutan, 2007)

Malzeme	Formülü	Molekül Ağırlığı	Teorik Bor İçeriği (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Amorf Bor	B	10.82	95-97	2050
Ferrobör	Fe-B	-	17-19	-
Borkarbür	B ₄ C	55.29	77.28	2450

Borlanacak yüzeylerin etrafında elde edilmek istenen borür tabakasının özelliklerine göre tozların tane büyüklükleri 5-10 µm olmalıdır (Barış, 2007). Üst kısma SiC gibi bir dolgu malzemesi doldurulur ve kapak hava girişini mümkün mertebe engelleyecek şekilde kapatılır (Özbek, 1999). Kutu, önceden belirli bir sıcaklığa ısıtılmış fırın içine konur ve fırın kapağı kapatılarak fırın içi sıcaklığı borlama sıcaklığına ısıtılır. Gereken borlama süresi kadar kutu fırında bekletildikten sonra alınarak soğutulur ve parça kutu içerisinden çıkarılır. Bu sırada kutunun kapağı, kutunun üzerinde kendi ağırlığında konulmalıdır. Yani sementasyonda olduğu gibi sıkıca kapatılmasına gerek yoktur (Selçuk, 1994; Uzun, 2002; Yıldızlı, 2002). Kutu olarak alaşımsız çelik, paslanmaz çelik veya alümina kutular kullanılabilir. Pota veya kutunun yüksek iç gerilmeler, çatlaklar ve kalkmalara sebebiyet vermemesi ve yeniden toz ilavesiyle (% 20 – 50) borlamaya devam edilebilmesi açısından fırın hacminin %60'ını geçmemesi tavsiye edilmektedir. Homojen bir ısı dağılımı için borlanacak parçaların şekli fırına uygun olmalı ve yerleştirme bu durum göz önüne alınarak yapılmalıdır (Özbek, 1999).

Borlama maddesinin tane boyutu küçüldükçe temas yüzeyi artar. Temas yüzeyinin artması yayılımı kolaylaştırır, dolayısıyla borür tabakasının kalınlığı da artar (Ayter, 2005).

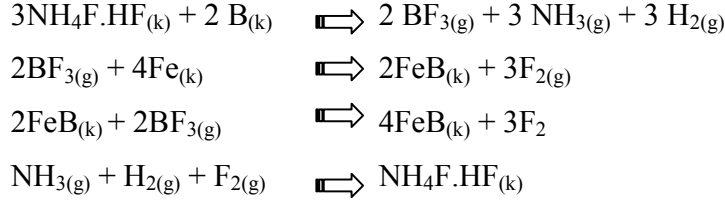


Şekil 2.5. Katı borlama için hazırlanan kutu

Aşağıda katı ortamda borlama bileşiklerine ait toz karışımlarının bileşimleri (% ağırlıkça) verilmiştir (Özbek, 1999; Uluköy, 2005) :

- %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

Katı ortam bileşiklerinden, metale bor geçişi mekanizmasının tam olarak açıklanamamış olmasına rağmen, gaz fazı reaksiyonlarının önemli olduğu bildirilmiştir. %50 (amorf) B + % 1 $NH_4F.HF$ + %49 Al_2O_3 bileşimindeki toz karışımı ile yapılan kutu borlama işleminde, kutu içerisinde aşağıdaki reaksiyonların meydana geldiği varsayılmaktadır (Özbek, 1999) :



Goeriot ve arkadaşları, ‘Boridif’ olarak isimlendirdikleri özel bir borlama işlemi geliştirmişler ve aktivatör olarak KBF_4 yerine BF_3 ve SiC ’ün kullanılmasını önermişlerdir. Böylece tek fazlı Fe_2B tabakasının elde edilmesinin kolaylaştığını iddia etmişlerdir. Ticari borlama tozlarının kullanımıyla %100 tek fazlı borür tabakası elde edilmesinin, özellikle yüksek alaşımlı çelikler için mümkün olmadığını belirtmiştir. Fakat Fichtl, düşük denebilecek sıcaklıklarda (~ 800 °C) ve kısa işlem sürelerinde (max 2-3 saat), FeB fazı içermeyen yaklaşık 40 μm kalınlığa kadar tek fazlı borür tabakası meydana getirilebildiğini, daha kalın tabakalarda ise tabakanın %50’den fazlasının FeB fazından meydana gelmesinin kaçınılmaz olduğunu ifade etmektedir (Özbek, 1999).

Altlık malzemenin borlanmasıdaki borlama sıcaklığı ve süresi ile ısıtma hızı önemli rol oynar. Özellikle 700-800 °C arasındaki bölge çok önemlidir. Çünkü alaşımlı ve düşük alaşımlı çeliklerde bile bor atomlarının difüzyon hızı 800 °C’nin yukarıdaki sıcaklıklarda teknik olarak kullanılacak borür tabakasının üretimi için yeterli bir büyüklüğe ancak erişir. Diğer taraftan 700 °C’nin üzerinde termokimyasal reaksiyonlar tarafından üretilen aktif borun konsantrasyonu sürekli bir şekilde artmaktadır. Bu nedenle hızlı ısıtma ile bu sıcaklık aralığının yukarısına hızlı bir şekilde geçilmedikçe, bor atomları parça yüzeyinde birikecek ve FeB fazının oluşumunu sağlayacaktır. İnce tabakalarda bazı sorunlar oluşturan bu FeB fazı ise borlamanın daha ileri safhalarında giderilemeyecektir. Termal iletkenliğinin kötü olmasından dolayı gerekenden daha fazla miktarda toz kullanımı bu sebeple tavsiye edilmemektedir. Tablo 2.6’da toz karışımındaki B_4C içeriğinin farklı yapıdaki çeliklerde borür tabakasına etkisi görülmektedir. B_4C miktarı %2,5’e düşürülerek FeB fazı ihtiva etmeyen borür tabakası elde edilebilir. Bu yöntem yüksek alaşımlı çeliklerde aynı ölçüde başarılı sonuçlar vermemektedir (Özbek, 1999).

Tablo 2.6. Borlama tozundaki B₄C miktarının çeşitli çeliklerde borür tabakasında FeB fazı oluşumuna etkisi (900 °C 5 saat borlanmış) (Özbek, 1999)

Çelik	% B ₄ C			
	2,5	5	7,5	10
C15				
C45				
42CrMo4				
61CrSiV5				
C100				
100Cr6				
145Cr6				
X40Cr13				
18/8 Paslanmaz				

FeB fazı oluşmamış
 Yalnızca köşelerde FeB oluşmuş
 Diş görünümünde FeB var
 FeB, tabaka yüzeyini tam örtememiş
 Tabaka yüzeyi tamamen FeB ile kaplanmış

2.3.1.2. Bölgesel Borlama

Kutu borlamanın zor ve pahalı veya fazla zaman kaybının olduğu durumlarda bölgesel borlama yöntemi bir diğer adıyla macun (pasta) borlama tercih edilmektedir. Karmaşık şekilli veya kitlesel üretilmiş parçaların tamamen veya kısmen seri bir şekilde borlanması borlama macunu ile yapılabilmektedir. Bu proseste %45 B₄C (200-400 mesh arası) ve %55 kriyolit (Na₃AlF₆, fluks ilaveli) veya geleneksel borlama toz karışımı B₄C + SiC + KBF₄ iyi bir bağlayıcı ajan ile (Bütül asetatta çözülmüş nitroselüloz, metil selülozun sulu çözeltisi veya hidrolize edilmiş etil silikat) uygulanmaktadır (Özbek, 1999).

Borlama için kullanılacak tozlar macun haline getirilir ve borlanacak parçanın üzerine 2 mm kalınlıkta sürülür. Parça yüzeyine sürülen macun derhal sıcak hava akımında, ön ısıtma odasında veya kurutma fırınında maksimum 150°C'de kurutulması gerekir. Gerekli takdirde macun üzerine tekrar birkaç kez daha sürülebilir. Kurutma işleminden sonra macun ile kaplanmış parçalar önceden ısıtılmış fırına konur ve fırın ağzı kapatılarak borlama sıcaklığına ısıtılır. Belirli süre bu sıcaklıkta tutulan parçalar dışarı

alınır ve soğumaya terk edilir. Parçalar soğuduktan sonra yüzeyinde yapışmış olan artıklar temizlenir ve böylece borlama tamamlanmış olur (Uzun, 2002; Şimşek, 2005).

Bu yöntemle borlama mutlaka koruyucu gaz ortamında yapılmalıdır. Aksi takdirde kötü bir borür tabakası oluşur. Bu yöntemde kullanılan koruyucu gazlar ve içerikleri; argon (%99,996 Ar), formier (kalıp) gazı (%5-30 H₂, geri kalanı N₂), NH₃ (%75 H₂, %25 N₂) ve saf azot (%99 N₂, %1 H₂) gazlarıdır (Selçuk,1994; Şimşek, 2005). Borlayıcı ürünün davranışı, gaz özellikleri tarafından büyük oranda etkilenir. Endotermik veya CO ihtiva eden gazlar bu yöntemde kullanılmazlar. Macun borlama işleminde 1000 °C'de 20 dakika süre sonunda 50 µm kaplama kalınlığı elde edilebilmektedir. Büyük parçaların ve seçilmiş alanların borlanması için oldukça elverişlidir (Özbek, 1999).

2.3.2. Sıvı Ortamda Borlama

Bu yöntemde borlama banyosu sıvı haldedir. Borlama işlemi 700-1000°C aralığında gerçekleştirilmektedir (Uluköy, 2005). İşlem normal atmosfer altında yapılır, koruyucu atmosfere gerek yoktur. Ayrıca işlemde kullanılan cihaz ve donanım basit olduğu gibi, gerekli kimyasal maddeler de ucuzdur. Borlama sonrası parçaların temizlenmesi ise önemli bir problemdir (Şimşek, 2005).

Tablo 2.7. Sıvı ortamda kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri (Ersöz, 2008)

Bor Sağlayıcılar	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı(gr)	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
Metabor Asidi	HBO ₂	43.83	24.69	-
Sodyum Bor Florür	NaBF ₄	109.81	9.85	-
Bor Oksit	B ₂ O ₃	69.64	31.07	450
Bor Karbür	B ₄ C	55.29	78.28	2450
Potasyum Bor Florür	KBF ₄	69.67	15.52	-

İşlemede susuz boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), susuz borik asit (B_2O_3), metaborik asit (HBO_2), boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), bor karbür (B_4C) gibi bor verici bileşikler kullanılır (Tablo 2.7). Silisyum karbür, ferrosilisyum, grafit, NaCl, Al gibi redükleyiciler kullanılır. Borlayıcı ortamın sıvı olması için bor bileşiklerinin veya NaCl gibi eriticilerin miktarı yüksek olmalıdır. Böylece eritici olan bu maddeler diğer maddeleri de eriterek sıvı eriyik oluşturur (Barış, 2007).

Sıvı borlama yöntemi ucuz ve fazla ihtisas istememesinin yanında aşağıdaki olumsuzluklara sahiptir:

- Borlama sonrasında parça yüzeyinde tuz kalıntıları ve reaksiyona girmeyen bor vardır. Bunların giderilmesi zaman ve para kaybına yol açar (Özbek, 1999).
- İşlemin başarılı olabilmesi, borlama sırasında banyo viskozitesinin artmamasına bağlıdır. Bu sebeple banyoya tuz ilavesi yapılmalıdır ki bu da maliyeti yükseltir (Özbek, 1999).
- Korozif ortamlara dayanıklı fırınlara ihtiyaç vardır (Özbek, 1999).
- Sıvı ortamdaki redükleyici maddeler zamanla banyonun dibine çökerek banyo akıcılığını olumsuz yönde etkiler (Barış, 2007).
- Büyük boyutlu kompleks parçalara uygulanamaz (Barış, 2007).

Borlama sırasında elektrik akımı uygulanıyorsa elektroliz yöntemi ile borlama (elektrolitik borlama), uygulanmıyorsa normal sıvı ortamda daldırma yöntemi ile borlama ismini alır (Barış, 2007).

2.3.2.1. Normal Sıvı Ortamda Daldırma Yöntemi

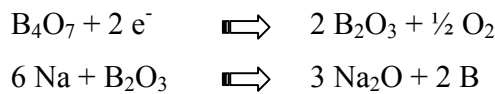
Elektrolizsiz ergitilmiş tuz eriyiği veya normal sıvı ortam borlaması olarak da adlandırılır. Bu yöntem genelde B_4C 'in katı fazı ile sıvı sodyum klorür (NaCl) den ibarettir. Bu da boraksın viskozite azaltma yöntemleriyle elektrolit olarak erimesi esasına dayanır (Selçuk, 1994; Şimşek, 2005).

Ortamın esas bileşeni boraks olup, aktivatör olarak B₄C, SiC, Zr, B, vs. kullanılır. Klorürlerin karışımı veya klorürler ile florürlerin karışımına bor karbür ilavesi ya da erimiş boraks banyolarına bor karbür ilave edilerek yapılır. Bu yöntem ucuz fazla ihtisas istemez. Fakat termal şok, borlamadan sonra parçanın temizlenmesi, büyük boyutlu ve kompleks parçalara uygulanmaması, metodun kötü yönleridir. Çalışma sıcaklığı 800-1000°C ve borlama süresi 2-6 saattir (Şimşek, 2005).

2.3.2.2. Elektroliz Yöntemi

Tuz banyosunda elektrolizle borlama işleminde, katot olarak borlanacak demir esaslı malzeme, anot olarak grafit elektrot ve elektrolit olarak ise boraks (Na₂B₄O₇) kullanılmaktadır (Özbek, 1999). Bu yöntem laboratuvar çalışmalarında gayet iyi sonuçlar vermiştir. Ancak ergimiş boraksın viskozitesinin çok yüksek olması, endüstriyel uygulamalarda sıcaklığın homojenliğini engeller yani boraks eriğinin yüksek viskozitesi 850°C'nin altında borlamayı pratik olarak imkansız kılar. 850°C'nin üzerinde ise banyodaki düzgün sıcaklık dağılımı oldukça güçleşir (Selçuk, 1994; Şimşek, 2005).

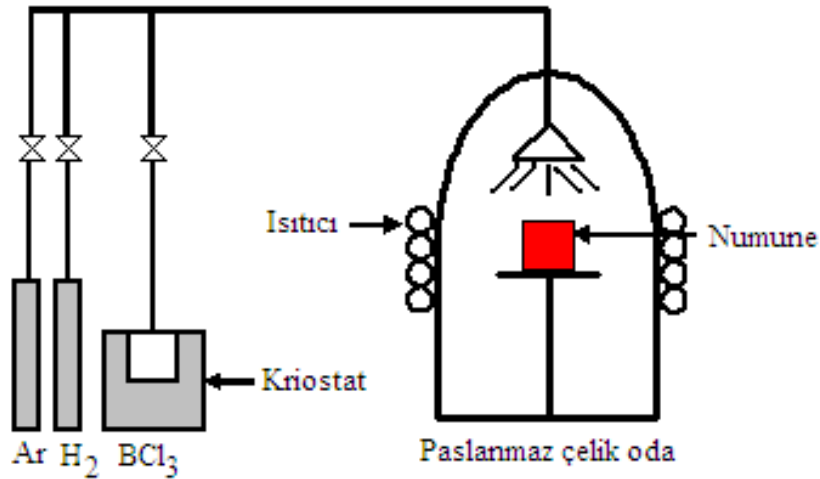
Borlama işlemi, 900 – 950 °C sıcaklık aralığında 4 – 6 saat süreyle 0,15–0,20 A/cm² akım altında gerçekleştirilmektedir. Parçanın her tarafında homojen bir kaplama tabaka kalınlığı elde edebilmek için elektroliz sırasında parça döndürülmektedir. Düşük alaşımlı çeliklerde çok ince kaplamaların elde edilmesinde, 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. Yapılan araştırmalarda borür tabaka kalınlığının borlama süresi, borlama sıcaklığı ve akım yoğunluğundaki artışa bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Ancak tabakanın yapısal karakteri bu durumdan etkilenmemektedir. Elektrolizle sıvı borlama sırasında, ergimiş haldeki tetraborat, borik asit ve elementel oksijene dönüşmektedir. Elektroliz banyosunda aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşmektedir (Özbek, 1999).



2.3.3. Gaz Ortamda Borlama

Borlama ortamının gaz fazında olduğu borlama işlemidir. Borlama işlemi Ar ve H₂ gazlarının ve bir evapotartörde gaz haline getirilmiş bir bor kaynağının (BCl₃ gibi) belirli karışımının, dış ortama kapalı paslanmaz çelik bir odadaki numune üzerine püskürtülmesiyle yapılır (Şekil 2.6) (Barış, 2007).

Gaz ortamda borlama için bor verici olarak kullanılan gazlar, bortriflorür (BF₃), bortriklorür (BCl₃), bortribromür (BBr₃), diboran (B₂H₆), trimetilborür (CH₃)₃B ve trietilborür (C₂H₅)₃B olarak sıralanabilir. Bunlardan diboran (B₂H₆) – H₂ karışımı, borhalid (iyonize bor) – H₂ veya (75/25 N₂ – H₂) gaz karışımı, (CH₃)₃B ve (C₂H₅)₃B gibi organik bor bileşikleri gaz ortamdaki borlamada en çok kullanılan bor vericidirler (Uluköy, 2005).

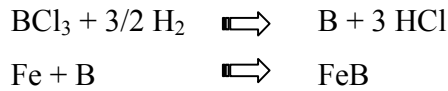


Şekil 2.6. Gaz borlama ünitesi (Bayça ve Şahin, 2004)

(B₂H₆) – H₂ karışımı zehirli ve patlayıcı olma özelliği sebebiyle ticari olarak kullanılmamaktadır (Özbek, 1999; Uluköy, 2005). Son derece tehlikeli olan siyanürün zehirlilik oranı sınırı 10 ppm iken, diboranın zehirlilik sınırı 0,1 ppm'den düşüktür (Uluköy, 2005). Ayrıca diboranın hidrojen ile inceltmesi çok pahalı olup 150°C'ye yakın sıcaklıklarda ayırır. Bu nedenle sıcak bir parça üzerine uygulamak için soğutmak gerekir. Bu da işlemi karmaşık hale getirir (Uzun, 2002). Organik malzemeler kullanıldığı takdirde ((CH₃)₃B ve (C₂H₅)₃B) borür ve karbür bileşikleri birlikte oluşmaktadır (Uluköy, 2005).

BBr_3 , çok pahalı ve suyla olan kuvvetli reaksiyona girmesi, ayrıca yüksek sıcaklıkta kararlılığının ayarlanması için BF_3 'e ihtiyaç duyulması sebebi ile kullanım açısından tercih edilmemektedir. Gaz borlama için en çok BCl_3 tercih edilmektedir. Parça gaz borlamaya tabi tutulacağı zaman 1/15 $BCl_3 + H_2$ gaz karışımında 700 – 950°C arasında ve 67 kPa basınç altında (0,67 bar) borlanmaktadır. Son çalışmalar H_2 yerine 75:25 oranında $N_2:H_2$ kullanılmasıyla FeB fazının azaldığını ve daha iyi kalitede tabakaların elde edildiğini göstermiştir (Özbek, 1999; Uluköy, 2005).

Bor klorür ve hidrojen gazı kullanılarak yapılan borlama işleminde aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşmektedir (Uluköy, 2005).



Gaz borlayıcıların en önemli üstünlüğü, gaz sirkülasyonunun sonucu olarak daha üniform bir bor dağılımının sağlanabilmesi ve elde edilmelerinin kolay olmasıdır. Prensip olarak gaz ortamda borlamada, bor potansiyelinin ayarlanabilmesinden dolayı, tek fazlı tabaka elde etmek mümkündür (Özsoy, 1991).

Gaz borlama bileşikleriyle çalışmak için karmaşık cihazlar gereklidir. Buna ilaveten bir takım sakıncalı tarafları daha vardır (Özsoy, 1991):

- Diboran, kullanılan temel bileşiktir ve çok zehirlidir. Diboran için en düşük zehirlilik sınırı 0,1 ppm'dir. Çok tehlikeli olarak bilinen hidrojen siyanür (prusik asit) için bile 10 ppm'e kadar müsaade edilmektedir.
- Diboran, hidrojen ile karıştırıldığında bile çok pahalıdır.
- Trimetilbor $[(CH_3)_3 B]$ ve trietilbor $[(C_2H_5)_3 B]$ ile yapılan gaz ortam borlamasında, bu bileşiklerin yüksek oranda karbon içermeleri sebebiyle karbürizasyon söz konusu olabilmektedir. Bu etki trietilborda, trimetilbordan daha kuvvetlidir.
- Bor halojenürleri korozyona sebep olabilirler. Gaz ortamın bileşimi, basıncı ve gazın tanktan akış hızı borlamayı etkiler (Şimşek, 2005).

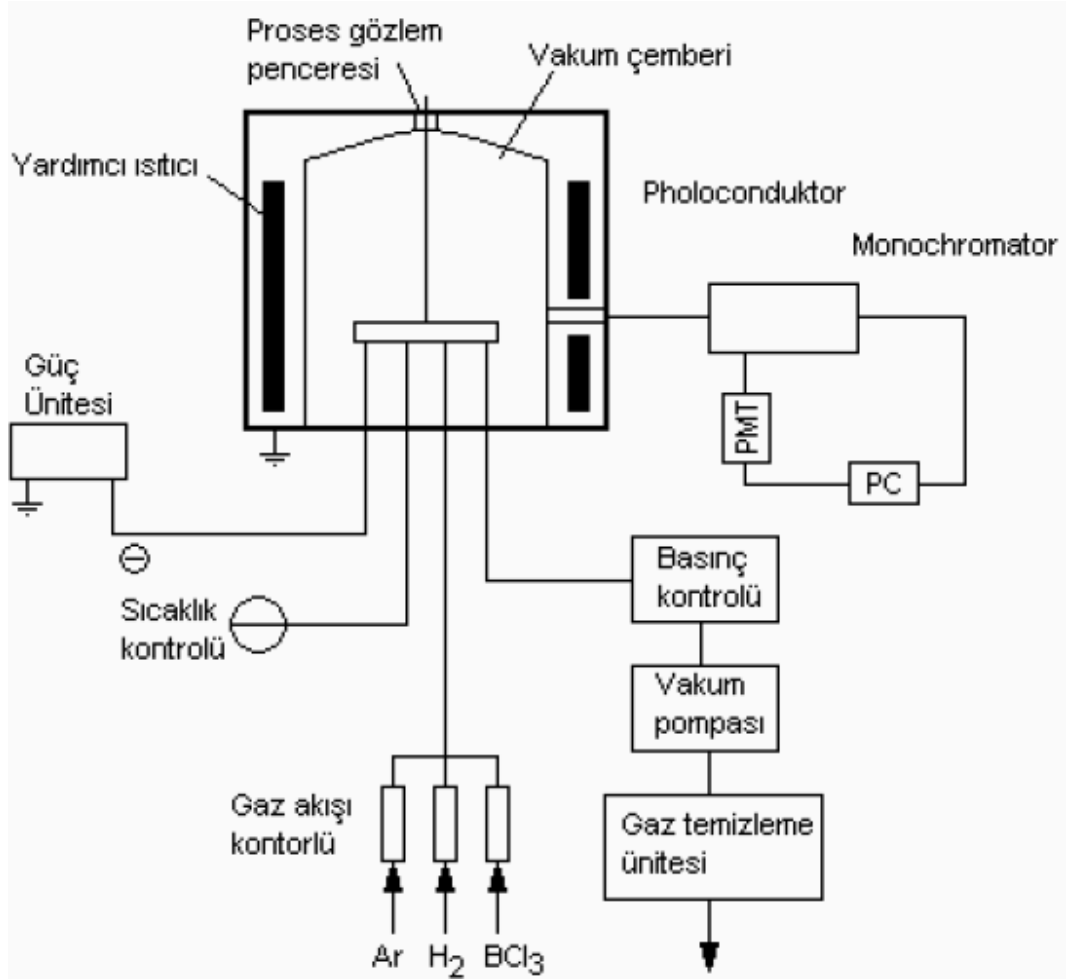
2.3.4. Plazma Borlama

Katı haldeki bir maddeyi enerji vererek sıvı, sıvı haldeki maddeyi enerji vererek gaz; ve gaz durumdaki maddeyi enerji vererek plazma haline getirmek mümkündür (Barış, 2007).

Plazma, içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötr atom veya molekül içeren bir karışımdır. Pratikte plazma, ısı enerjisi verilerek, ışınla veya elektriksel boşalma ile elde edilir. Plazma elde etme yöntemlerinin en önemlisi ve en yaygın olarak kullanılanı elektriksel boşalmadır. Bir elektrik gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa, belirli şartlar gerçekleştiği takdirde, tatbik edilen gerilim plakalar arasındaki gazın delinme geriliminin üzerine çıktığında, iki iletken plaka arasında bir elektrik boşalması olur ve plakalar arasında bir elektrik akımı akışı olur (Uluköy, 2005; Barış, 2007)

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 (Uluköy, 2005; Barış, 2007). 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 (Uluköy, 2005)

Klasik borlama, tuz borlama ve gaz borlama gibi işlemlerin çevreyi kirletici etkisi nedeniyle son yıllarda plazma borlama işlemi daha yoğun olarak çalışılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan bir plazma borlama ünitesinin şematik olarak şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan plazma borlama ünitesinin şematik gösterimi (Barış, 2007)

Plazma borlama yönteminin avantajları şunlardır (Barış, 2007) :

- Bilinen borlama işlemlerinde (katı, sıvı, gaz) tabaka kalınlığı ve homojenliği kontrol edilemezken, plazma borlamada mümkündür.
- Kompleks parçalarda homojen difüzyon tabakası ve sertlik.
- Daha düşük sıcaklık ve işlem süresi.
- İşlem çok yoğun enerjide gerçekleştirilir.
- Bu yöntemle yüzeyde tek fazlı Fe_2B tabakası elde edilebilir.

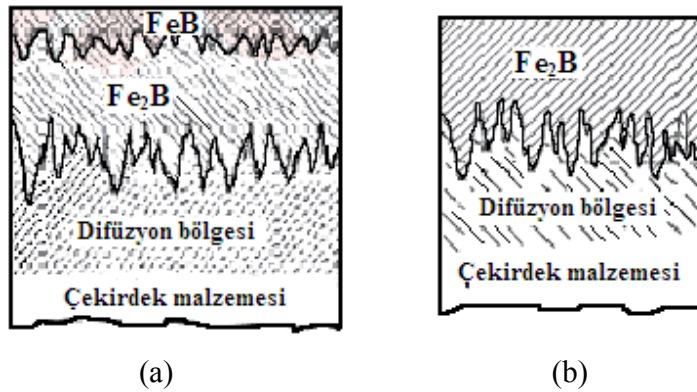
- Daha büyük boyutlu (özellikle katı borlamaya göre) taban malzemeleri işleme tabii tutulabilir.
- Zehirlilik, patlayıcı yapı ve çevre kirliliğinin kontrol olanağı.
- İşlem sonrası daha düşük distorsiyon .

Plazma borlama yönteminin dezavantajları şunlardır (Bayça ve Şahin, 2004; Barış, 2007) :

- Kullanılan gazlar pahalı, zehirli ve patlayıcıdır.
- Kullanılan gazlar vakum odasında korozyona neden olmaktadır

2.4. Borür Tabakası

Borlama işlemi sonunda oluşan tabakanın özellikleri, borlanacak malzemenin bileşimine, borlama yöntemine, borlama ortamına, ilave ısı işlemlere (Er ve Par, 2004), borlama sıcaklığı ve süresi gibi işlem şartlarına bağlı olarak, ya düz bir formda veya dişli/kolonsal formda olabilir. Çeliklerde başlıca iki tabaka meydana gelmektedir. Bunlar; borür tabakası ve geçiş zonedir (Özbek, 1999). Borür ve difüzyon tabakalarının altında, bir de içinde bor olmayan iç doku bulunmaktadır (Selçuk, 1994). Şekil 2.8'de tek ve çift fazlı borür tabakası görülmektedir.



Şekil 2.8. Borür tabakasının şematik gösterilişi a) Çift fazlı (Fe₂B+FeB)
b) Tek fazlı (Fe₂B) tabaka (Selçuk, 1994)

Tabaka Yapısı

Çeliğin borlanması neticesinde en üst tabakada sırasıyla FeB_x , FeB ve Fe_2B gibi çeşitli demir borür fazları oluşur. (Selçuk, 1994) Alaşımli çeliklerde ve diğer malzemelerde ise kendi alaşım elementlerinin borürleri oluşur (Ayter, 2005). Tablo 2.8’da çeşitli malzemelerde borlama ile elde edilen borürler ve mikrosertlik değerleri verilmiştir.

Tablo 2.8. Çeşitli metal borürlerin bazı özellikleri (Özbek, 1999)

Borür	Kristal Yapı	Teorik Yoğun. (gr/cm ³)	Ergim. Sıcak. (°C)	Termal Genleşme (10 ⁻⁶ /K)	Termal İletkenlik (W/m.K)	Sertlik (GPa)	Elastik Modül (GPa)	Elektrik Direnci (10 ⁸ Ω.cm)
Co ₃ B	Ortog.	8,13	1110	..	17	11,3	..	28
Co ₂ B	Tetra.	8,05	1260	..	14	11,3	..	33
CoB	Ortog.	7,32	..	..	17	11,3	..	76
Cr ₂ B	Ortog.	6,58	1870	14,2 (27-1027°C)	10,9 (20°C)	13,2	..	107
CrB	Tetra.	6,14	..	12,3 (27-1027°C)	20,1 (20°C)	11,8	..	46
Fe ₂ B	Tetra.	7,34	1410	8,9 (20-800°C)	17,4	13,1-17,7	284	38
FeB	Ortor.	6,73	1650	~12 (400-1000°C)	12 (20°C)	16,2-18,6	343	80
Mn ₂ B	Tetra.	7,18	1580	..	6,6	17,7	..	40
MnB	Ortog.	6,36	1890	..	7,7	20,1	..	57
Mo ₂ B	Tetra.	9,23	2280	5 (25-500 °C)	..	24,5	..	40
MoB ₂	Hegz.	7,99	2375	7,7 (300-900°C)	..	11,8	..	45
Mo ₂ B ₅	Ortog.	7,45	2140	8,6 (27-1027°C)	~ 50 (20°C)	23	672	26
NbB	Ortog.	7,57	2917	12,9 (27-1027°C)	15,6 (27°C)	21,5	..	40
NbB ₂	Hegz.	7,00	3036	8 (27-1027°C)	23,5 (1027°C)	25,5	637	26
Ni ₃ B	Ortog.	8,20	1175	..	41,8	11,7	..	21
Ni ₂ B	Tetra.	8,05	1225	..	54,8	14	..	14
NiB	Ortog.	7,17	1590	..	21,9	15,2	..	50
TiB	Ortog.	4,56	2190	..	..	22,7	..	40
TiB ₂	Hegz.	4,52	3225	..	64,4 (27°C)	33-25,5	551	9
VB	Ortog.	5,60	2570	..	..	..	..	35
VB ₂	Hegz.	5,07	2742	7,6 (27-1027°C)	42,3 (27°C)	20,6-27,5	268	23
W ₂ B	Tetra.	17,09	2670	6,7	..	23,7	..	..
WB	Ortog.	..	2665	~ 6,9 (20-2205°C)	..	36,3	..	..
W ₂ B ₅	Ortog.	13,17	2365	7,8 (27-1027°C)	~ 52 (20°C)	26,1	775	22
ZrB ₂	Hegz.	6,10	3245	55,9 (27-1027°C)	57,9 (27°C)	22,1-17,9	343-500	10

Ortog.: Ortogonal, Hegz.: Hegzagonal, Tetra.: Tetragonal, Ortor.: Ortorombik

Genellikle, borür tabakasında testere dişi şeklinde kolonsal bir yapı sergileyen tek fazlı Fe_2B fazının oluşumu istenir (Delikanlı vd., 2003). Çift fazlı $Fe_2B + FeB$ fazlarının birlikte oluşması tercih edilmez. Çünkü oluşum sırasında FeB ve Fe_2B fazları farklı termal katsayılarından dolayı birbirlerine basma ve çekme gerilmeleri uygulamakta ve çoğu zaman bu gerilmeler nedeniyle iki faz arasında çatlaklar oluşmaktadır (Saygın, 2006). α FeB fazının ısıl genişleme katsayısı $23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ iken, α Fe_2B fazınınki ise $7.85 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 'dir (Çelikyürek, 2006). Burada çekme gerilmesini FeB , basma gerilmesini ise Fe_2B fazı oluşturmaktadır. Dış etkenler, örneğin termal şok ve mekanik zorlamalar, bu yapıların zamanla ayrılmasına ve yüzeyden kopmalara neden olur. Farklı termal katsayılarından dolayı FeB ve Fe_2B çift faz tabakasının ara yüzeyinde çatlaklar oluşur. Bu durum nedeniyle mekanik yüke maruz kaldıklarında pul pul dökülmeler gerçekleşir (Saygın, 2006). Ayrıca tabaka ve borlamanın yapıldığı malzemenin termal genişleme katsayıları da mümkün olduğunca yakın olmalıdır ki, sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan genişleme farklarından dolayı ayrılma meydana gelmesin. Bu özellikle kaplanmış bir parçanın sonradan yapılan ısıl işleminde önemlidir (Çelikyürek, 2006).

Çift fazlı borür tabakalarında yüzeyin hemen altında porozite oluşumu görülür. Bor kaplamalarda borür tabakasının ince olması durumunda, porozite oluşumu ve tabakanın kalkma riskinin düşük olduğu düşünülmektedir. Eğer çift fazlı $Fe_2B + FeB$ borür tabakası, vakum veya tuz banyosunda $800 \text{ } ^\circ\text{C}$ sıcaklık civarında uzun süre ısıl işleme tabii, tutulursa, tek fazlı Fe_2B fazı elde etmek mümkün olmaktadır (Özbek, 1999). Daha geniş çaplı deneylerde bütün borlanan malzemelerde genellikle düşük sıcaklıklarda (yaklaşık 800°C) ve kısa işlem sürelerinde (2-3 saat) FeB 'nin oluşmadığı borür tabakalarının elde edildiği bulunmuştur. Bu şartlarda kalınlık yaklaşık $40 \text{ } \mu\text{m}$ 'dir. Sürenin uzaması ve sıcaklığın artması her zaman FeB oluşumuyla sonuçlanmıştır. Bu fazların yanında yüksek karbonlu çelik ve dökme demirlerde $Fe_3(B,C)$ ve $Fe_5(B,C)$ tipi fazlar da oluşabilir. Ayrıca yüksek alaşımlı çeliklerde alaşım elementlerine bağlı olarak Cr_2B , CoB , CoB_2 , TiB_2 , Ni_2B ve Ni_3B fazları da oluşabilir (Çelikyürek, 2006).

Çeşitli borlama yöntemleri ile 14 farklı yapıda borür tabakası elde edilebilmektedir. Kunst ve Schaaber tarafından geliştirilerek düzenlenen sistematik sınıflandırma Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Bu sınıflandırma sistemi borür tabakasının görünümü ve bir borlama prosesinin elverişliliğinin değerlendirilmesini mümkün kılar (Ersöz, 2008).

Endüstride Şekil 2.9'da verilen E ve F tipi yani tek fazlı borür tabakası (Fe₂B) tercih edilmektedir. Bu tabakalar, düşük kırılma değeri sahiptir ve ana malzemeye, borlu tabakanın özelliklerini olumsuz yönde etkilemeden; borlama sonrası işlemler uygulanabilir (Ersöz, 2008).

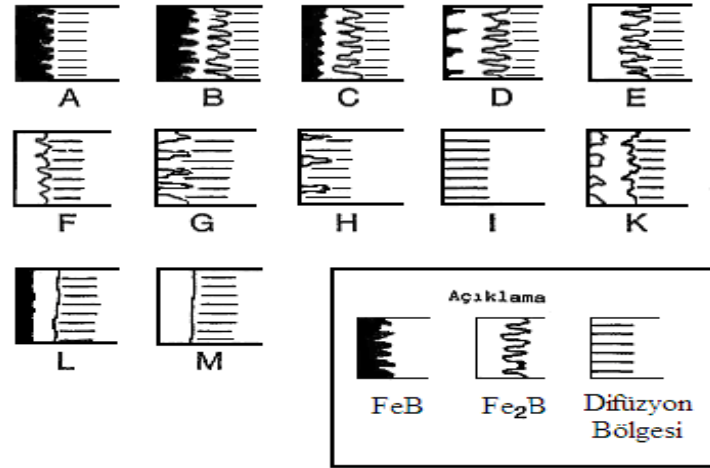
Geçiş Bölgesi

Borlama işlemi esnasında çelik bileşiminde bulunan elementler yeniden dağılırlar. Bu arada FeB ve Fe₂B tabakalarının, karbon ve silisyum çözündürme kabiliyeti olmamasından dolayı bor yayılımı esnasında karbon ve silisyum borür tabakasından içeriye doğru itilir. Bunun sonucu olarak borür tabakası ile borlanan metal matris arasında 'geçiş bölgesi' olarak adlandırılan bir yapı meydana gelir. Bu bölgede bulunan bor, borür oluşturamayacak miktardadır (Delikanlı vd., 2003). Geçiş bölgesindeki mikroyapı, matrisin mikroyapısından farklı bir görünüme sahiptir ve borür tabakasına göre daha kalındır (Özbek, 1999). Çelik malzemelerde borür tabakası tarafından karbonun içeriye doğru itilmesi sonucunda geçiş bölgesinde, esas malzemeye göre daha fazla perlit bulunacağı, çeşitli araştırmacılar tarafından ileri sürülmektedir. Bu bölgedeki bor dağılımını otoradyografi yöntemi ile inceleyen Bozkurt, geçiş bölgesinin borür tabakasından 10–15 kat kadar fazla bir kalınlığa sahip olduğunu tespit etmiştir. Genel olarak, geçiş bölgesindeki tane boyutu, ana malzeme boyutuna göre daha büyük olduğu halde, sinterlenmiş Fe-C alaşımlarında bu bölgede tane büyümesine rastlanmadığı ileri sürülmektedir (Bozkurt, 1984; Ersöz, 2008).

Tabaka Kalınlığı

Borür tabakasının kalınlığı borlanan parçanın kullanım şartlarına göre borlanan malzemenin cinsi, borlayıcı ortamın bileşimi, işlem süresi ve borlama sıcaklığına bağlı

olarak belirli sınırlar dahilinde istenilen kalınlıkta ayarlanabilir. Optimum borür tabaka kalınlığı mümkün olan en kalın tabaka demek değildir. Tabaka kalınlığı, daima amaca uygun olmalıdır. Eroziv aşınma için (seramik endüstrisinde kullanılan pres takımlarında olduğu gibi) kalın tabakalar uygundur. Adhezif aşınma için ise (zımba takımlarında olduğu gibi) ince tabakalar gereklidir. Teorik olarak borür tabakasının kalınlığı yaklaşık olarak 5 μm olması adhezif aşınmadan korunmak için yeterli olacaktır. Bununla beraber Fe_2B kristallerinin birbirine kenetlenen dişli bir yapıya sahip olmaları sebebiyle alaşımsız veya az alaşımlı çeliklerde bu kalınlıkta homojen bir tabaka üretmek mümkün değildir. Metallerin

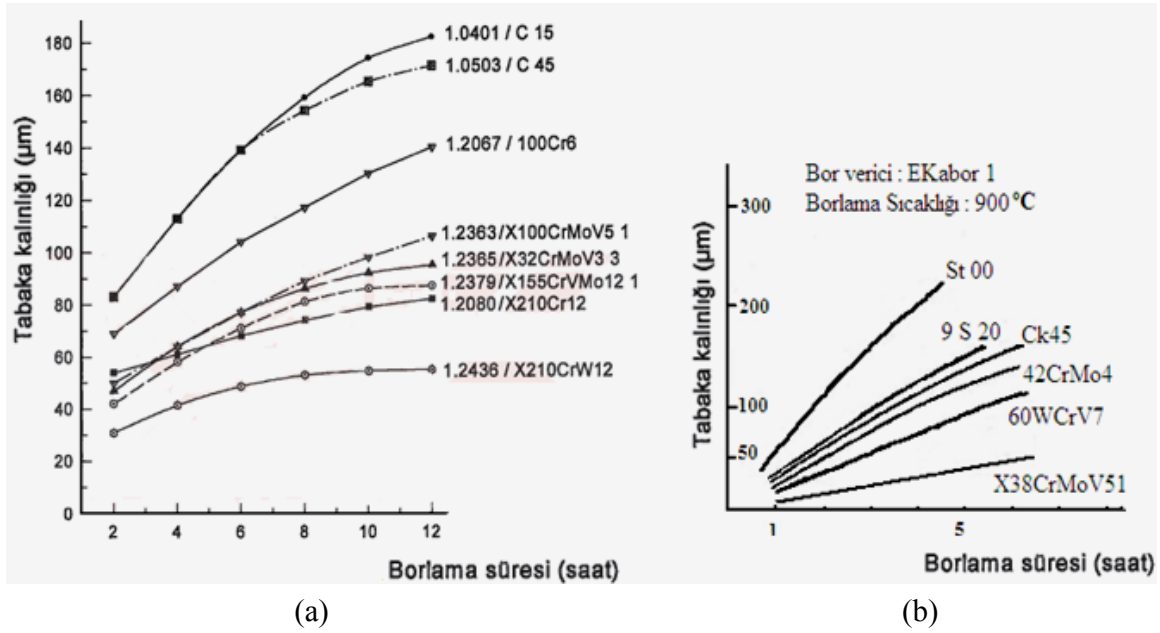


Şekil 2.9. Borür tabakası çeşitleri (Matuschka, 1980)

- | | |
|---|--|
| A : Özellikle FeB 'nin yoğun olduğu tek fazlı tabaka | F : Tek fazlı tabaka, özellikle Fe_2B ağırlıklı |
| B : Fe_2B ve FeB fazlı iki tabaka | G : Fe_2B diş yapısı |
| C : İki fazlı tabaka, tabaka B'den daha ince FeB tabakası | H : Çok izole Fe_2B diş yapısı |
| D : İki fazlı, izole FeB diş şeklindeki tabaka | I : Difüzyon bölgesi |
| E : Tek fazlı tabaka, özellikle Fe_2B ağırlıklı | L : Çift fazlı FeB ve Fe_2B tabakası |
| | M : Tek fazlı FeB ve Fe_2B tabakası |

talaşsız şekillendirilmesinde kullanılan yüksek alaşımlı takım çeliklerinde bu amaç için en iyi sonuç 15-20 μm tabaka kalınlığı elde edilmiştir (Özbek, 1999). Şekil 2.10 ve 2.11'de

bazı malzemelerin tabaka kalınlıklarının işlem süresine bağlı olarak değişimi görülmektedir.

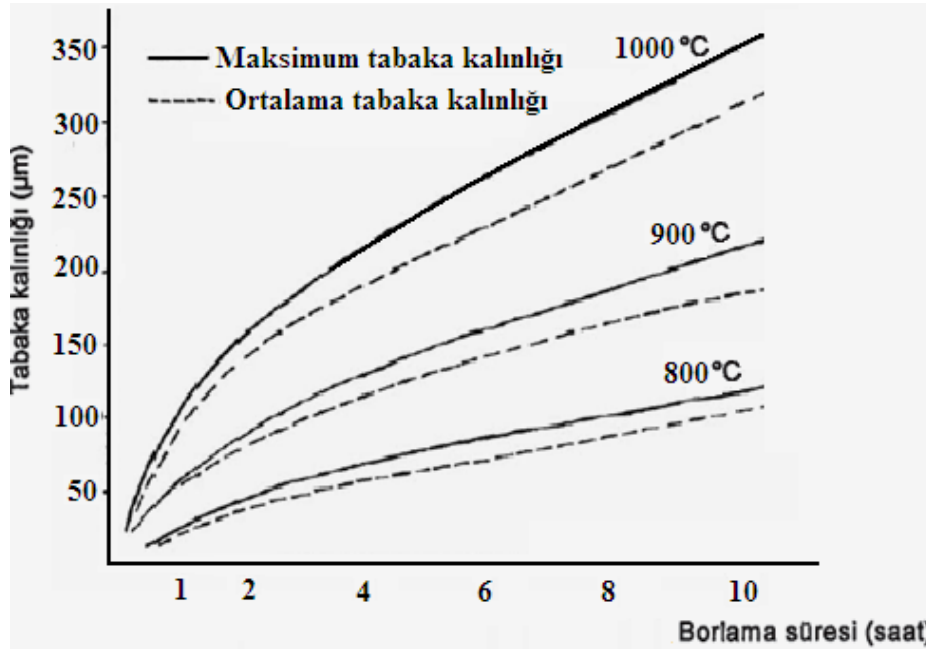


Şekil 2.10. Değişik çeliklerde işlem zamanının borür tabakası kalınlığına etkisi

a) (Özbek, 1999), b) (Matuschka, 1980)

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. B_4C den B'nin yalnız bırakılması için ortamda redüksiyonu sağlayacak bir madde (redükтан) bulunmalıdır. Böylece redükтан bir madde olan SiC ile B_4C bileşiminden B (elementel bor) elde edilir. Serbest kalan B'nin oksijene olan afinitesi çok yüksektir ve hemen oksijenle B_2O_3 oluşturur. Bunu önlemek için ortamda yeterince SiC bulunmalıdır. Redüksiyonu sağlayan SiC aynı zamanda demiri de redükler, böylece serbest kalan bor, demire yayılır. Böylece FeB ve Fe_2B tabakaları oluşur. Borun demire yayılmasını KBF_4 hızlandırır (Bayça ve Şahin, 2004).

Tabaka kalınlığı arttıkça tabakanın gevrekliği de artacağı için, özellikle çift fazlı (Fe_2B+FeB) tabakalarda, tabakanın çok kalın olmamasına dikkat edilmelidir. Alaşım elementlerinin oranı arttıkça çelik içerisine bor yayılımını daha zorlaştıracak, oluşan borür dişleri daha yoğun, daha üniform ve kapalı olacaktır (Özbek, 1999).



Şekil 2.11. Ck 45 çeliğinde borür tabaka kalınlığına işlem süresi ve sıcaklığına etkisi (Matuschka, 1980)

Borlama süresinin artması ile tabaka kalınlığı artar. İşlem sıcaklığını sınırlayan erimedir. FeB denge diyagramında ötektik sıcaklığın $1149^{\circ}C$ altında olması gerekir. Uygulamada bu sıcaklığın üzerinde çıkılırsa malzeme üzerinde lokal erimeler meydana gelerek malzeme yüzeyi bozulabilir. Sıcaklık artması tabaka kalınlığını artırması yanında poroziteyi de artırmaktadır. Porozitenin artması ise tabakanın gevrekleşmesine yol açmaktadır (Bayça ve Şahin, 2004).

Sertlik

Borlamanın en büyük etkisi sertlik üzerine olup, ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak borür fazlarına bağlıdır. FeB fazı Fe_2B 'den daha sert ve gevrektrir (Atik, 1997).

Borlama ile elde edilen sertlik, karbon çeliklerinde 1800-2000 HV, alaşımlı çeliklerde 2500-2800 HV, titanyumda ise 3000 HV civarındadır (Ayter, 2005). Ayrıca Tablo 2.9’da borlama ve diğer yüzey sertleştirme işlemleri sonucunda oluşan sertlik değerleri verilmektedir.

Tablo 2.9. Borlama ve diğer yüzey sertleştirme işlemleri sonucunda oluşan sertlik değerleri (Baştürk ve Erten, 2006).

Malzeme	Mikro Sertlik (kg/mm ² veya HV)
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 kalıp çeliği	630-700
Yüksek hız takım çeliği BM42	900-910
Nitritlenmiş çelik	650-1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
Sementit karbürler, WC+Co	1160-1820(30kg)
Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ seramikler	1483(30kg)
Al ₂ O ₃ + TiC + ZrO ₂ seramikler	1730(30kg)
Sialon seramikler	1768(30kg)
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Elmas	~10000

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

Borlama işlemi sonunda oluşan tabakaların özellikleri ana malzeme içindeki alaşım elementlerine bağlı olarak değişmektedir (Baştürk ve Erten, 2006).

Yapılan sertlik ölçümlerinde Rockwell ve Brinell sertlik yöntemlerinin kullanılması borür tabakasının bozulmasına ve tabaka altındaki bölgenin deformasyonuna sebep olacağından dolayı tercih edilmez (Barış, 2007). Sertlik ölçümleri mikrosertlik yöntemi ile Vickers veya knoop uçları kullanılarak yapılır (Matuschka, 1980). Ölçümlerde büyük yüklerin kullanılması çatlama ve dökülme gibi nedenlerden dolayı hatalı sonuçlara sebep olur. Ayrıca büyük yükler de tabakanın bozulmasına ve tabakanın altındaki bölgenin deformasyonuna sebep olabilir (Ayter, 2005).

2.4.1. Alaşım Elementlerinin Borür Tabakasına Etkisi

Yüksek oranda alaşım elementi barındıran çeliklerin mikroyapıları incelendiğinde, yapıda esas olarak α -ferrit, kompleks karbürler, (M_3C , M_7C_3 ve $M_{23}C_6$) alaşımlama kompozisyonuna bağlı olarak oluşur. Yüksek oranda karbon ve krom içerikli yapılarda ötektik karbürlerin (M_7C_3) bulunduğu ve bu karbürlerin ebatlarının farklılık gösterdikleri belirlenirken, alaşımsız yüksek karbonlu yapılarda M_3C karbürlerinin bulunduğu bildirilmektedir (Özenbaş ve Yılmaz, 2004).

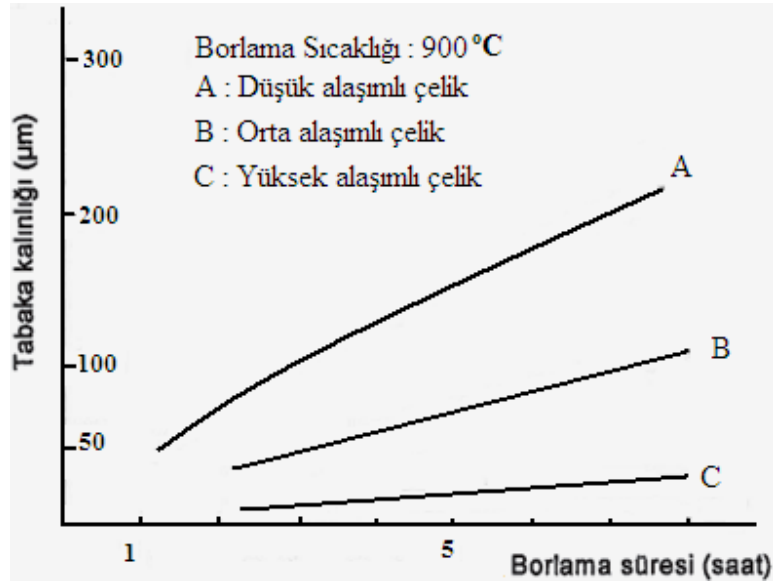
Alaşım elementlerinin miktarına bağlı olarak tabakanın ve asıl malzemenin dişlenme derecesi değişmektedir. Kuvvetli dişlenmeler, karbonlu çeliklerde ve düşük alaşımlı ıslah çeliklerinde ortaya çıkmaktadır. Alaşım elementi miktarı arttığında dişlenme azalmaktadır. Borürlü tabakalar, dişli şekilleri nedeni ile asıl metale daha iyi bağlanırlar. Alaşımlı çeliklerde bu tabaka daha incedir, hatta bazen hiç yoktur. Oluşan bu dişler yüzeye dik olduğu için, işlem öncesi parçanın çok iyi şekilde işlenmesi gerekir (Selçuk, 1994).

Paslanmaz çelik malzemeler üzerine yapılan borlamalarda, yüzey üzerinde nikelin düşük çözünürlüklü olduğu bor tabakası oluşur ve fazla nikel bor tabakasının altında nikelce zengin tabaka oluşturmak üzere yapıya difüze olur. Cr elementinin birazı bor tabakasında çözünürken geri kalanı nikelce zengin tabaka ve bor tabakaları arasında kromca zengin bir tabaka oluşturmak üzere içeri difüze olur. Demir dışı alaşımlarda, örneğin titanyum ve alaşımlarının borlanması yüzeyde sertlik değeri 3200 HV'i bulan TiB ve TiB₂ tabakaları elde edilmektedir (Karakan vd, 2002).

Bor çeliklerde alaşım elementi olarak da bulunabilir. Bu durumda da bor az alaşımlı çeliklerde ostenitin dönüşümünü önemli derecede yavaşlatarak sertleştirme kabiliyetinin yükselmesine ve çelik bünyesinde ince dağılmış olan partikülleri azalmasına neden olur. Borlu çeliklerin özellikleri bor elementinin bünyedeki dağılım şekli ve diğer alaşım elementleri ile olan etkileşiminin bir fonksiyonudur. Ostenitik paslanmaz çeliklere ve bazı süper alaşımlara az oranda bor ilave edilirse onların yüksek sıcaklık dayanımlarını iyi yönde etkiler (Selçuk, 1994).

Borlu alaşımların mekanik özellikleri güçlü bir şekilde bor tabakalarının yapısına ve bileşimine bağlıdır. Bor tabakasının tipik testere dişli görüntüsü saf demir, alaşımsız düşük karbonlu çelikler ve düşük alaşımlı çeliklerde hakim bir şekilde görülmektedir. Alaşım elementli ve karbon içerikli çeliklerde, bor / numune arayüzeyinin gelişiminin bastırılması ve yüksek alaşımlı çelikler için düzgün bir arayüzey oluşumu artmaktadır. Alaşım elementleri esasen bor yayılımını engelleyen oluşum sebebiyle çelik içerisine bor yayılımını kısıtlar ve bor tabaka kalınlığını (veya büyümesini) yavaşlatır (Sinha, 1991). Şekil 2.12'de düşük, orta ve yüksek alaşımlı çeliklerin borür tabakası kalınlığı değişimi ve Şekil 2.13'de ise bazı alaşım elementlerinin tabaka kalınlığına etkisi görülmektedir.

Karbon : Karbon, bor tabakası içerisinde eriyemez ve tabaka boyunca yayınamaz. Borlama boyunca karbon, bor tabakasından matrikse doğru bor, bor sementit Fe₃(B,C) [veya yaklaşık olarak Fe₃(B_{0.67} C_{0.33})] olarak Fe₂B ve matris arasında ayrı bir katman olarak yayılır (Sinha, 1991).



Şekil 2.12. 900 °C’de borlanan düşük, orta ve yüksek alaşımlı çeliklerin borlama zamanı ile borür tabakası kalınlığının değişimi (Matuschka, 1980, Çelikiyürek, 2006)

Silisyum ve Alüminyum : Karbon gibi silisyum ve alüminyum bor tabakası içerisinde çözünmez ve bu elementler bor tarafından yüzeyden itilerek demir silikoborürler ($\text{FeSi}_{0.4}\text{B}_{0.6}$ ve Fe_5SiB_2) olarak Fe_2B tabakasının altında bulunurlar. Çeliklerde bu ferrit oluşumlu element içerikleri, normal bor tabakasının aşınma direncini düşürdüğü ve bor tabakasının altında çekirdeğe göre önemli oranda yumuşak ferrit bölgesi oluşturduğundan dolayı kullanılmamalıdır. Yüksek yüzey basıncındaki bu tip bir tabaka, yumurta kabuk etkisini kuvvetlendirmekte; büyük kalınlıklardaki, son derece sert ve kırılğan bor tabaka, nispeten daha yumuşak orta tabaka içerisine nüfuz sonucu tahrip olmaktadır (Sinha, 1991).

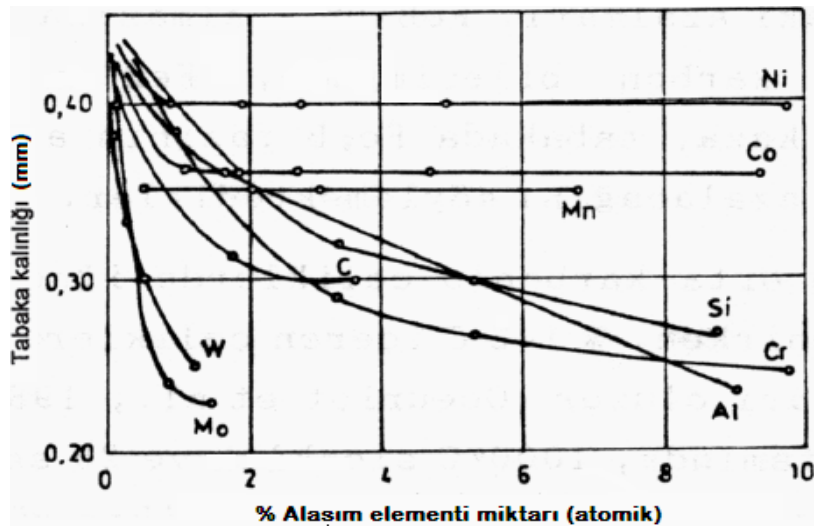
Kırılğan borür tabakaları oluşturmaları sebebiyle alüminyum alaşımlı çeliklerde ve ağırlıkça %0,5’ten daha fazla Si içeren çeliklerde borlama işlemi uygun sonuçlar vermemektedir. Bu malzemelerdeki Al ve Si borür tabakasında çözünemez ve bor atomlarının difüzyonu sırasında yüzeyden içerilere doğru itilirler. Difüzyon bölgesinde Fe_2B fazının önünde birikerek, ferritik yapıya sahip bir bölge oluştururlar. Bu ferritik bölge çok yumuşaktır ve sertleştirilemez. Oldukça sert borür tabakasının altında yer alacak taban malzemesinden daha yumuşak bir bölge, kaplanan malzeme yüksek gerilmelere maruz

kaldığında sert borür tabakası kuvvetin etkisiyle yumuşak ferrit bölgesine itilecek ve borür tabakasının parçalanmasına sebep olacaktır (Ersöz, 2008).

Nikel : Yüksek nikel içerikli çeliklerde iç içe geçmiş dişli yapıda ve bor kalınlığında bir azalma oluşabilmektedir. Bor tabakası altında nikel yoğun bir şekilde bulunur, Fe_2B tabakasından girer ve bazı durumlarda FeB tabakasından Ni_3B çökmesini iletir. Ayrıca Fe_2B tabakasına karşılık gelen alttaki bölgeden yüzeyi güçlü bir derecede ayırır. $Fe-14Ni$ ve östenitik paslanmaz çeliklerin her ikisindeki bu bölge oldukça belirgindir. Sonuç olarak östenitik paslanmaz çeliklerin gaz borlanması, gaz karışımlarının daha düşük bor aktivitesi sebebiyle az gözenekli, homojen, tek fazlı Fe_2B tabakası oluşumu için daha uygun görülmektedir. (Sinha, 1991)

Krom, demir boritlerin özelliklerini ve yapısını oldukça değiştirir. Esas malzemedeki krom içeriğinin artması şu ilerici gelişmeleri göstermektedir: Bor zengin reaksiyon oluşumunu sağlar, borit derinliklerini düşürür, kaplama/yüzey arayüzeyini düzleştirir veya yumuşatır. (Sinha, 1991)

Manganez, tungsten, molibden ve vanadyum da karbon çeliklerinde, bor tabakası kalınlığını azaltır ve dişli yapıyı düzleştirir (Sinha, 1991).



Şekil 2.13. Alaşım elementlerinin borür tabakası kalınlığına etkisi (Matuschka, 1980)

2.4.2. Borür Tabakasının Aşınma Direnci

Borlu tabakanın aşınma dayanımı, tabakanın tek veya çift fazlı olduğuna ve oluşum biçimine bağlıdır. En az aşınma Fe_2B fazında, en fazla aşınma ise daha sert (1800 – 2000 HV) ancak daha gevrek olan FeB fazındaki tabakada meydana gelmektedir. En yüksek aşınma dayanımının FeB içermeyen tabakalarda, yani sadece Fe_2B fazından oluşan tabakalarda elde edildiği deneylerle bulunmuştur. Bu nedenle minimum FeB fazı içeren tabakalar elde edilmeye çalışılmalıdır (Karakan vd., 2002; Saygın, 2006)

Borlanmış çelikler yüksek sertliklerinden dolayı abrasif aşınmaya karşı çok iyi direnç gösterirler. Bu özellik, nitrürlenmiş ya da karbürleşmiş çeliklerle kıyaslandığında onlardan, mükemmel derecede daha fazladır. Abrasif aşınmanın meydana geldiği ve borlama ile önemli ölçüde düşürüldüğü sistemlere; pnomatik transport sistemleri, plastik işleme makineleri, haddeleme elemanları, pompalar, vanalar vb. sistemler örnek olarak verilebilir (Ulutan, 2007).

Borlanmış tabakaların adhesif aşınma mukavemeti de diğer yöntemlerden oldukça üstündür. Burada, kaplanmış malzemelerin yüksek sıcaklıklardaki mukavemeti özellikle on plana çıkmaktadır. Borlu tabakaların iyi aşınma özelliği göstermesi, çok az ya da hiç yağlayıcı kullanmadan çalışmaya olanak sağlaması; yağlayıcı atıkların azalması nedeniyle, çevre etkileri açısından önemli bir tercih nedeni olacaktır (Matuschka, 1980; Ulutan, 2007). Aşınma direnci 650 °C'nin üzerinde mükemmeldir, çünkü bu sıcaklıkta metal yüzeyinde oksidasyon gerçekleşmekte ve bu oksit filmi metal-metal etkileşimini korumakta, sürtünme katsayısını azaltmaktadır (Çelikyürek, 2006).

Adhesif aşınma mukavemetleri demirborür tabakalarında krom ve molibden ilavesiyle iyileştirilebilirken; abrasif aşınma krom, molibden ve vanadyum elementleri katkısıyla da bunların hepsi üzerinde vanadyum karbürlerin oluşturulmasıyla düşürülür. Demir dışı metallerin borlanması; özellikle titanyum, tantal, niyobyum metallerinin, bu metallerin abrasif aşınma mukavemet ve özelliklerinde çok büyük iyileşme gösterdiği gözlenmiştir (Ulutan, 2007)

2.4.3. Borlanabilen Malzemeler

Endüstriyel olarak borlama işlemi daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi çok geniş bir yelpazedeki demir esaslı alaşımların hemen hepsine ve bazı demirdışı alaşımlara (Ersöz, 2008) bu alaşımların toz metalurjisi yöntemiyle üretilen toz metal ürünlerine, bazı süper alaşımlara ve sermetlere (Ulutan, 2007) uygulanabilir. Yapı çelikleri, sade karbonlu çelikler, paslanmaz çelikler, sementasyon çelikleri, temperlenmiş çelikler, takım çelikleri, korozyona dayanıklı çelikler, Armco demiri, gri dökme demir, küresel grafitli dökme demir, sinterlenmiş demir ve çelikler borlama işlemi için uygun malzemelerdir. Buna ilaveten, nikel, kobalt, molibden ve titanyum esaslı alaşımlara da uygulanmaktadır. Ayrıca, sinterlenmiş karbürlerin yüzeyleri borlanarak, aşınma dirençleri artırılabilir. Yumuşak kobalt ve nikel bağlayıcıların yüzeylerinde borür fazları oluşturmak mümkün olup, son yıllarda seramiklere de bor kaplamalar uygulanmaktadır (Ersöz, 2008).

Borlama işleminin ostenit fazında gerçekleşmesi sebebiyle havada sertleşen çelikler borlama sonrasında anında sertlik kazanırlar. Suda sertleşen parçalar borür tabakasının termal şoka maruz kalması sebebiyle su verilmesi gerekli olduğu durumlarda borlanmazlar. Kurşunlanmış ve sülfürlü çelikler yüzeyde çatlak oluşturma ihtimaline karşı nitrürlenmiş çelikler ise çatlak hassasiyetleri sebebiyle borlama işlemine tabi tutulmamalıdır. Kırılgan borür tabakaları oluşturmaları sebebiyle alüminyum alaşımlı çeliklerde ve ağırlıkça %0,5'ten daha fazla Si içeren çeliklerde borlama işlemi uygun sonuçlar vermemektedir (Ersöz, 2008). Alüminyum içeren çeliklerin (örneğin 34CrAlNi7 – 1.8550) borlanması tavsiye edilmemektedir. İçerisinde ağırlıkça yaklaşık %1'den fazla silisyum bulunan çelikler kalın borür tabakası için uygun olmayan malzemelerdir. Bakır atomları, bor atomlarının difüzyonuna engel olduğu için bakır ve alaşımları da borlamaya uygun değildir (Özbek, 1999).

2.4.4. Termokimyasal Borlamanın Uygulama Alanları

Bor kaplanmış malzemeler göstermiş oldukları üstün özellikleri sebebiyle, otomotiv, makine, kimya, tekstil ve gıda endüstrileri başta olmak üzere çok geniş bir endüstriyel

kullanım alanına sahiptir. Özellikle adhezif ve abrazif aşınma şartlarında bir çok kullanım alanı mevcuttur. Borlama işlemi parçaların kullanım ömrünü artırarak büyük ekonomik katkılar sağlamaktadır (Özbek, 1999).

Bu malzemelerden yapılan pimler, burçlar, fan kanatları, pompa milleri, püskürtme lüleleri, dökümle üretilmiş silindir gömlekleri, supaplar, pres kalıpları, enjeksiyon pistonları, soğuk haddeleme işlemlerinde kullanılan dökme kalıpları, rulman bilyaları, vanalar, elek sacları, vana gövdeleri, ekstrüzyon vidaları, dişli çarklar, tekstil makinesi parçaları ve bazı kalıplar; borlama işleminin başarıyla uygulandığı makine parçalarıdır (Ulutan, 2007).

Çeşitli aşınma durumlarındaki uygulamaları aşağıdaki gibidir (Sinha, 1991).

- ✚ Dönen çelik halkalar, çelik ip ve çelik iplik kılavuz kovanları (DIN St 37 çeliğinden)
- ✚ Tekstil makineleri için oluklu gri dökme demir varilleri
- ✚ Dört delikli besleme suyu düzenleme valfi (DIN 1.4571 veya AISI 316 Ti çeliğinden)
- ✚ Yakıcı ağızlıklar, helezon parçaları ve kimya sanayinde çelik yağ yakıcılar için enjektör kapakları
- ✚ Çeşitli yüksek performans araçlarındaki dönel ve helisel dişli çelik çarklar ve durağan makineler

Abrasif aşınma dirençli malzemeler için borlanmış paslanmaz çelikler, vida kutuları ve kovanları, delikli ve yarıklı çukur kafesler, bilyeler, valf elemanları, fittingsler, kılavuzlar, miller ve iğneler ve helikopterlerde keskin bıçak kaplamaları gibi uygulamalarda borlanmış Ti-6Al-4V kullanılır. Bu kategori için diğer uygulamalar aşağıda belirtilmiştir:

- ✚ Torba dolgu gereçlerinin ağızlıkları
- ✚ Plastik üretim makinelerindeki ekstrüzyon vidaları, silindirler, ağızlıklar, ters akım blokları

- ✚ Plastik sanayinde mineral katkılı plastik tanecikler için taşıma parçalarındaki düğüm ve engel plakaları
- ✚ Delme malzemeleri (otomobillerin aksesuar parçalarındaki delikleri açmak için), baskı ve resim matrisleri
- ✚ Pres malzemeleri, kesici şablonlar, delikli levha kafesleri (DIN St 37 çeliğinden)
- ✚ Vida ve tekerlek dişlileri, pahlı dişliler (AISI 4317 çeliğinden)
- ✚ Çelik kalıplar (seramik sanayinde seramik tuğla ve potaların üretiminde kullanılan), ekstruder namluları, pistonlar ve halkalar (4140 çeliğinden)
- ✚ Ekstruder başlıkları, çek valfler ve silindirler (abrasif minerallerin ve cam lif katkılı plastiklerin ekstrüzyonu için, 4150 çeliğinden)
- ✚ Demir dışı metallerin işlemleri için döküm katkıları (AISI H11 çeliğinden)
- ✚ Linyit kömür briketleri için taşıma kayışları

Borlanmış elemanlar ayrıca pres döküm kalıpları, bükme blokları, tel çekme blokları, boru klipsleri, basma ve biçimlendirme silindirleri, düzleştirme silindirleri, gravür silindirleri, soğuk şekillendirme için silindirlerde, millerde, pres elemanlarında, kovanlarda, kılavuz çubuklar, diskler, döküm elemanlarında, bükme, ekstrüzyon, damgalama, presleme, zımbalama, sıcak şekil verme, enjeksiyon kalıplama, demir işleme, kabartma gibi eleman ve işlemlerde de uygulama alanı bulmaktadır.

Borlanmış çelik parçalar ise alüminyum, çinko, kalay gibi erimiş demir dışı metallerin taşıma borularında (DIN St 37 çeliğinden), korozyon dirençli taşıma boru dirseklerinde vinil klorür monomeri için, öğütme disklerinde (DIN Ck 45 çeliğinden), pres döküm elemanlarında, hava erozyon dirençli kaplamalarda, veri çıkış bileşenlerinde (örneğin manyetik çekiçler, tel yazıcılar) ve makine manivelalarında da kullanılabilir (Sinha, 1991).

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu çalışmada Şen ve diğer araştırmacılar (2000), borlanmış soğuk iş düşük alaşımli takım çeliklerinin bazı mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Malzemenin kimyasal bileşimi 1.18 % C, 0.70 % Cr, 0.30 % Mn, 0.10 % V and 0.25 % Si şeklindedir. Borlama işlemi, Ekabor-I tozu içerikli katı borlama yöntemiyle 1000 °C sıcaklıkta ve 2, 4 ve 6 saatlik süreler için yapılmıştır. Çelik numune yüzeyi üzerindeki oluşan bor tabakaları dişli bir yapıya ve yüzeye iyi bağlı bir örtüye sahiptir. Soğuk iş takım çeliğinin işlem yüzeyinde FeB ve Fe₂B gibi çok önemli iki faz oluşumu gözlenmektedir. Ayrıca yüzeyde borürler, geçiş bölgesi ve çekirdek malzeme (matriks) olmak üzere 3 farklı bölge oluşumu mevcuttur. Borlama tabakaları 70 µm'den 140 µm'ye ulaşabilir. Uzun borlama süresi ile daha kalın bor tabakası sağlanır. Borlanmış çelik yüzeyinin sertlik değeri 1854, borlanmamış olanın ise 290 kg mm⁻²'dir. Yine uzun borlama süresi ile sert FeB fazının oluşumuna bağlı olarak düşük sürtünme dayanımı elde edilir. Buna göre kendi sürtünme dayanımı değerine sahip olacaktır; bununla birlikte farklı borürler arasında ne tür bir etkileşim oluştuğu bilinmemektedir ve bileşik bor tabakasının sürtünme dayanımı üzerindeki her birinin etkisini ayırt etmek zordur. Bor tabakasının sürtünme dayanımı değeri 3,02-2,52 MPa m^{1/2} arasındadır.

Özbek ve Bindal (2001) yaptıkları çalışmada, AISI W4 çeliğini katı ortamda EKabor 2 tozu ile borlamıştır. Çalışmasını 850-1050 °C ile 2-8 saat deney koşullarında yapan araştırmacılar, yüzey borür tabakası kalınlığının 8-386 µm arasında olduğunu ve sertliğin deney koşullarına bağlı olarak 1407-2093 HV arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Yüzeyde FeB ve Fe₂B fazlarının oluştuğunu ve bu fazlardan Fe₂B'nin çekme, FeB'nin ise basma gerilmeleriyle zorlandığını, bu durumun yüzeyde malzemeye paralel mikro çatlak oluşumuna neden olduğunu raporlamışlardır. Malzeme içeriği ise şöyledir: % 1.25 C, % 0.24 Si, % 0.26 Mn, % 0.27 Cr, % 0.001 S, % 0.018 P.

Özbek ve arkadaşları (2002), AISI 316L çeliğini; boraks, borik asit ve ferrosilisyum sıvı banyosunda 850, 900, 950 ve 1000 °C'de 2, 4 ve 6 saat sürelerde

atmosferik şartlarda borlanmış ve işlem sonucunda numuneler alınarak havada soğutulmuştur. Borlanmış yüzeylerin Fe_2B , CrB ve Ni_3B fazlarından meydana geldiği tespit edilmiştir. Elde edilen borür tabakasının kalınlıkları 12-40 μm arasında bulunmuştur. Dişli bir bor tabakası yerine düzgün bir difüzyon bölgesi oluşmuştur. Cr ve Mn, Fe_2B ve FeB 'deki demirin yerini almış, Ni bor tabakasının altında nikelce zengin bir bölge oluşturmuştur.

Genel ve arkadaşları (2002), çalışmalarında borlanmış AISI W1 çeliğini incelemiştir. Malzeme içeriği C % 0.85, Cr % 0.18, Mn % 0.36, Si % 0.24 şeklindedir. Borlama işlemi Ekabor I tozunda, 1123 K'den başlayıp 50 K aralıklarla 1323 K'e kadar, 1, 2, 4, 6 ve 8 saatlik sürelerde gerçekleştirilmiştir. Optik mikroskop incelemeleri sonucu düzgün ve yoğun bir bor tabakası tespit edilmiştir. Sertlik değeri 1690-1800 HV ve tabaka kalınlığı 178 \pm 8.8 μm olarak ölçülmüştür. Sertlik değerleri, 6 saate ve 1223 K'e kadar olan işlem şartlarında artmakta, ancak daha yüksek sıcaklıklarda azalma eğilimi göstermektedir. Bunun ise tane büyümesinden olabileceğini söylemektedirler. AISI W1 çeliği için 1223 K sıcaklığını 6 saatlik işlem süresini geçmediği takdirde Ekabor I tozu ile birlikte optimum işlem süresi olarak tayin etmektedir.

Selçuk ve arkadaşları (2003), karbürleme, karbonitrüleme ve borlama gibi çeşitli termokimyasal ısıl işlemleri kullanarak AISI 1020 ve 5115 çelik yüzeylerinin sürtünme ve aşınma özelliklerini inceledikleri çalışmalarında teste tabi tuttıkları numunelerini sıvı ve gaz karbürleme, gaz karbonitrüleme ve katı borlama yöntemlerini kullanmışlardır. Çalışmada borlamanın tüm demir alaşımları için en etkili termokimyasal işlem olduğu, fakat bor tabakalarının sığ ve kırılabilirliğinden dolayı sadece hafif yükler altında çok iyi aşınma direnci sağlayacağı vurgulanmaktadır. Bu işlemin özellikle düşük alaşımlı çelikler başta olmak üzere bütün çeliklere uygulanabildiğini ve hafif yük sürtünmelerinde, karbürlenmiş veya karbonitrülenmiş düşük alaşımlı çeliklerin yerine borlanmış düşük karbonlu çeliklerin kullanılabilirliğini belirtmişlerdir.

Martini ve arkadaşları (2003), % 99.9 saflıkta Armco demiri ve orta karbonlu UNI 38CrNiMo4 çeliklerini toz ortamda borladığı çalışmasında, aşağıdaki sonuçlara varmıştır: Demir ve yapısal çelik üzerindeki çok fazlı bor kaplamalarının termokimyasal büyümesi dıştaki FeB ve içteki Fe₂B tabakası tarafından, dış yüzeyden farklı derinliklerdeki bölgelere yerleşmiş, oldukça farklı olan kristalografik sıranın kapsamına bağlı olarak oluşturulmaktadır. Mekanik yoğunluk ve aşınma direnci bu sıraya bağlıdır.

Kaplamaların aşınma oranı, kayma ve abrazif şartların her ikisinde de dıştaki düzensiz kristallerin zayıf ve gevrek tabaka oluşumundan dolayı oldukça yüksektir. Daha sonra aşınma oranı, önce FeB ve sonra Fe₂B kristallerinin oluşturduğu direnç sebebiyle yüksek oranda düzgün sıralanmış Fe₂B kristallerinin oldukça sıkı olduğu iç bölgede minimum değeri bulana kadar azalmaktadır.

Çok fazlı bor kaplamalarının tribolojik davranışları FeB - Fe₂B fazlarının arayüzeyindeki şiddetli gerilim bölgeleri sebebiyle daha kötüye gidebilir. Burada sert ve aşındırıcı parçaların oluşumuyla birlikte arayüzey üzerindeki çatlakların yayılması ve oluşumu da bu durumu olumsuz olarak etkileyebilir.

Bejar ve Moreno (2004), önceden borlanmış 1020, 1045, 4140 ve 4340 çeliklerinin abrazif aşınma direnci üzerine çalışmışlardır. Borlama şartları kuru boraks ve SiC karışımından oluşan ortamda 1223, 1273 ve 1323 °K sıcaklıklarında ve 2, 4 ve 8 saat olarak tayin edilmiştir. Abrazif aşınma testleri ise (ASTM G65 standardına göre) kuvars kumu ile birlikte kauçuk lastik aparatı kullanılarak ve numune ile lastik arasında 130 N'luk yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. 1020, 1045, 4140 ve 4340 çelikleri, 1273 °K'de boraks ve SiC karışımı içerisinde tatmin edici şekilde borlanmışlardır. Her bir çelik yüzeyi üzerinde tek fazlı Fe₂B tabakası bulunmaktadır. Mikrosertlik değeri bütün çelikler için 2000 HV_{0.01} değerinin oldukça üzerindedir. Bütün çelikler içerisinde ise en iyi abrazif aşınmayı 1020 çeliği sergilemiştir.

Özbek ve arkadaşları (2004), tarafından borlanmış AISI 440 C paslanmaz çeliğinin bazı özelliklerinin incelendiği çalışma Ekabor tozuyla katı ortamda 950 °C'de 2 ve 8 saatlik sürelerde gerçekleştirilmiştir. XRD, SEM ve optik mikroskop analizleri

sonucunda FeB, Fe₂B, CrB, Cr₂B, Mn₂B ve MnB oluşumları gözlemlenmiştir. Altlık malzemelerin yüzeylerindeki bor oluşumları, tamamen esas çeliğin sahip olduğu alaşım elementlerine ve borlama süresine bağlı olarak pürüzsüz ve koyu, sıkı bir yapı sergilemektedir. Yine altlık malzemenin kimyasal içerikleri ve borlama süresine bağlı olarak bor bölgesinin kalınlığı 10 µm'den 50 µm'ye ulaşmaktadır. AISI 440 C çeliğinin sertliği ise 2500 HV değerinin üzerindedir.

Şen ve ekibi (2004), borlanmış küresel grafitli dökme demirin sürtünme dayanımını araştırmasını boraks, borik asit ve ferro-silikon içerikli tuz banyosunda borlama yöntemini kullanarak 850 ve 950 °C sıcaklıklarda ve 2 ile 8 saatlik sürelerde atmosfer basıncı altında gerçekleştirmişlerdir. Çeşitli analizler ve deneysel çalışmalar sonucu FeB ve Fe₂B gibi boritlerin oluşumları teyit edilmiş, uzun borlama süreleri için daha kalın bor tabakası sağlandığını ve dişsel bir tabaka yapısının oluştuğu tespit etmişlerdir. Bor tabaka kalınlıkları 45-185 µm arasında değerler almıştır. Borlanmamış malzemenin sertlik değeri 260 HV_{0.1} iken borlu tabakanın 2140 HV_{0.1} değerindedir. Sürtünme dayanımı değeri ise 2,19 ile 4,54 MPa m^{1/2} arasında ölçülmüştür. Netice olarak uzun borlama süreleri sonucunda, FeB fazının kalınlığının artmasına bağlı olarak sürtünme dayanımı değeri düşmektedir.

Meriç ve arkadaşları (2005), gri, sünek, küresel grafitli dökme demirlere Ekabor III tozu kullanarak 900°C'de 2, 3, 4, 5 ve saat sürelerle kutu borlama işlemini uygulamıştır. Dökme demirlerin dişli kolonsal görünümlü yüzeylerindeki bor tabakası oluştuğu borlama işlemi, farklı zaman dilimlerinde tatbik edilmiştir ve tabaka kalınlığının işlem sürelerine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmektedir. Numunelerin bor tabakalarındaki FeB, Fe₂B ve Fe₃B fazları araştırılmıştır. Borlama süresi içerisinde, borlanmış tabakalardaki ve dökme demirlerdeki grafit yapısı ne değişmiş ne de bozulmuştur. Üç dökme demir içindeki en kalın tabaka 900°C'de 6 saat borlanan gri dökme demirde 110 µm ile sertlikleri ise küresel grafitli ve sünek dökme demirde 2685 HV_{0.04} ve gri dökme demirde 2465 HV_{0.04} olarak ölçülmüştür.

Campos ve arkadaşları (2006), macun (bölgesel) borlama yaparak işlem boyunca AISI 1045 ve M2 çeliklerinin malzeme yüzeyleri üzerindeki bor tabakalarının kinetik

büyümesini incelerken, AISI M2 ve AISI 1045 çelikleri kıyaslandığında M2'deki testere dişli görüntünün daha az olduğunu buna sebep olarak da M2 çeliğindeki alaşım elementlerinin bor tabakalarının üst noktalarındaki yoğunluğu artırma eğiliminde olduğunu, bor akışını zayıflattığını ve düz yassı bir büyüme meydana getirdiğini vurgulamıştır. Campos 2006 yılındaki bu çalışmasını AISI 1045 için 1193 – 1223 – 1273 °K ile 2 ve 6 saatlik işlem sürelerinde ve AISI M2 için 1223-1253-1273°K ile yine 2 ve 6 saatlik sürelerde gerçekleştirmiştir. Malzemelerin kimyasal içerikleri ise AISI 1045 için; % 0.43-0.50 C, % 0.6-0.9 Mn, % 0.04 P, % 0.05 S, AISI M2 için; % 1 C, % 6 W, % 5 Mo, % 4 Cr, % 2 V şeklindedir.

Uslu ve arkadaşları (2006), AISI 1040 ve P20 çelikleri üzerinde 800, 875 ve 950 °C'lerde ve 2, 4, 6 ve 8 saatlik sürelerde EKabor-2 tozu ile borlama çalışması gerçekleştirmişlerdir. Borlama sonucu tabaka kalınlığını 10-180 µm ve sertliğini 1500 HVN civarlarında tespit etmişlerdir. Yaptıkları XRD analizinde AISI 1040 çeliğinde alaşım elementleri olmadığından dolayı sadece FeB ve Fe₂B fazları, P20 çeliğinde ise bunlara ilave olarak MnB ve CrB fazlarının da bulunduğunu ve SEM analizinde ise AISI 1040 çeliği sütunsal bir iç yapı, P20 çeliğinde ise sütunsal ve yoğun bir yapı gözlemlemişlerdir. AISI 1040 çeliğinin sürtünme dayanımı 3,2 ile 5,1 MPa m^{1/2} arasında, P20 çeliğinde ise 2,79 ile 4,79 MPa m^{1/2} arasında değişmektedir. 2006 yılında yapılan çalışma sertlik açısından incelendiğinde yüzeyden çekirdeğe doğru malzemeyi 3 bölüme ayırmışlardır. Birinci bölge borlu tabaka, ikinci bölge sertliği borlu tabakadan az çekirdekten fazla olan, borun katı çökelti olarak bulunduğu geçiş bölgesi (AISI 1040 da AISI P20'ye göre daha belirgin) ve üçüncü bölge bordan etkilenmeyen çekirdek bölgesi olarak belirlenmiştir.

Taktak (2006), boraks, borik asit ve ferro-silisyumdan oluşan sıvı banyosunda 800 ve 950°C'lerde 3, 5, ve 7 saat sürelerde yüksek krom içeren ve mühendislik uygulamalarında geniş ölçüde kullanılan AISI H13 sıcak iş çeliği ve AISI 304 paslanmaz çeliklerini borlama işlemine tabi tutmuştur. XRD analizinde çeliklerin yüzeylerinin üzerindeki bor tabakalarının çeşitli zirvelerinde FeB, Fe₂B, CrB ve Ni₃B oluşumları belirlenmiştir. Çalışmada krom ve nikel gibi alaşım elementlerinin çeliklerdeki bor tabakalarının yüksek sertlik değerlerine ulaşmasında önemli bir rol

oynadığını, FeB fazının kırılma ve derinliğindeki artışa göre borlama süresi ve sıcaklığının artmasıyla birlikte bor tabakasının sürtünme ve adhezif aşınma dayanımını azaltmakta olduğunu vurgulamıştır. Borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak elde edilen sertlik ve tabaka kalınlıkları AISI H13 için 1860 HV ve 8-58 μm , AISI 304 için 2150 HV ve 4-42 μm olarak ölçülmüştür.

Taktak diğer bir çalışmasında (2006), AISI 440C ve 52100 çeliklerini 950°C’de 2 saat süreyle kutu borlama işlemine tabi tutmuş ve borlanmış bu çeliklere oda sıcaklığı ve 600 °C’lerde kuru kayma aşınma testleri uygulamıştır. Netice olarak AISI 440C ve 52100 çelikleri üzerindeki çok fazlı bor kaplamalarının termokimyasal olarak büyümesi sırasıyla FeB–Fe₂B ve FeB–CrB–Fe₂B fazları tarafından sağlandığı, AISI 440C ve 52100 çelikleri üzerindeki bor tabakalarının kalınlık ve sertlikleri yine sırasıyla 56 ±6 ve 47 ±4 μm ve 1970 ve 2160 HK olarak ölçüldüğünü belirtmiştir. Ayrıca borlanmış rulman çeliklerinin devamlı durum sürtünme katsayısının değeri, sıcaklığın artmasıyla azalmaktadır. Borlanmış 52100 ve 440C çelikleri için oda sıcaklığında sürtünme katsayısı 0,68 ve 0,58’dir, halbuki 600 °C’de bu değerlerin sırasıyla 0,48 ve 0,36’ya düştüğünü, borlanmış çeliklerin aşınma dirençlerinin sıcaklığın artmasıyla az bir oranda düştüğünü ve borlanmamış çeliklere kıyasla her iki çelikte de bütün sıcaklıklarda oldukça düşük sürtünme oranı tespit edildiğini vurgulamıştır.

Özdemir ve arkadaşları (2006), ağırlık olarak %99,7 saflıktaki demir üzerindeki bor oluşumunun sertlik ve sürtünme dayanımı gibi bazı özelliklerinin araştırıldığı çalışmada, borlama işlemi katı ortamda 800°C’de 2, 4 ve 6 saatlik süreler için, %5 B₄C Ekabor tozu bor verici olarak, %5 KBF₄ aktivatör ve %90 SiC içerikli bir karışım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Altlık malzeme üzerindeki baskın faz oluşumu parmaksı bir yapıya sahip olan Fe₂B fazıdır. %99,7 saflıktaki borlanmış demirdeki sertlik değeri 1700 HV’nin üzerinde iken işlemsiz demir yapıdaki sertlik 130 HV değerindedir. Borlama süresine bağlı olarak sürtünme dayanımı 3,59-3,83 MPa m^{1/2} ve bor tabakası derinliği ise işlem süresi ve sıcaklığına bağlı olarak 22-43 μm arasında değerler almaktadır.

Atar ve arkadaşları (2007), çalışmalarında Ekabor II ticari tozu ile kutu borlama tekniğini kullanarak Ti6Al4V alaşım yüzeyine TiB₂ ve TiB fazlarından oluşan 10 µm kalınlığındaki üniform bir bor tabakası oluşturmuşlardır. Bu bor tabakasının altında ise 50 µm kalınlığında bor difüzyon alanı görülmektedir. Bor difüzyon alanının mikroyapısı, esas metal ile TiB fazının karışımı olarak nitelendirilebilir. Bor tabakasının sertliği esas metalle (315 HV) kıyaslandığında 2000 HV'in üzerinde oldukça yüksek bir değere sahiptir. Bor difüzyon alanındaki sertlik ise iç kısımlara doğru TiB parçacıklarının hacimsel olarak azalmasına bağlı olarak derece derece düşmektedir. Kuru ve yapışkan yağlama şartları altında borlanmış Ti6Al4V alaşımı, aşınma kaybı ve sürtünme katsayısının dikkate değer bir derecede düşmesiyle safir aşındırıcılara karşı üstün bir tribolojik performans sergilemiştir. İşlem 1100°C'de 2,5 saat süreyle uygulanmıştır.

Culha ve arkadaşları (2007), SAE 1020 ve SAE 1040 çeliklerini 900 °C'de 2, 4 ve 6 saatlik süreler boyunca borlamışlardır. XRD analizi, SAE 1020 ve SAE 1040 çeliklerinin yüzeylerinde (1 1 1), (2 1 0) ve (1 0 1) düzlemleriyle birlikte borca zengin FeB fazının oluşumu görülmektedir. Borlanmış çeliklerin SEM kesit araştırmasında çift fazlı tabaka oluşumları yüzeyden malzeme içerisine doğru görülmektedir. Tabakaların yapısal içerikleri sırasıyla borca zengin FeB ve demirce zengin Fe₂B fazlarından oluşmaktadır. Borlanmış bu çeliklerin 2, 4 ve 6 saatlik süreler için yüzey pürüzlülük değerleri 0,9 µm'den 0,05 µm'ye düşmüştür. SAE 1020 çeliğinin sertliği 1788 DHV ve tabaka kalınlıkları FeB için 23,6 – 42,5 µm arasında ve Fe₂B için 27,3 – 90,8 µm arasında, SAE 1040 çeliği için ise sertlik 2244 DHV'ye kadar ulaşmakta ve tabaka kalınlıkları FeB için 29,8 – 49,8 µm arasında ve Fe₂B için 56,8 – 69,7 µm arasında değişmektedir.

Campos ve arkadaşları (2007), bu çalışmada ise Fe₂B tabakasının sürtünme dayanımını değerlendirmişlerdir. Bunun için AISI 1045 çeliği, 1123, 1173, 1223 ve 1273 °K sıcaklıklarda 8 saat süreyle pasta borlama işlemine tabi tutulmuştur. Malzeme yüzeyine 4 mm'lik bor karbür uygulanmıştır. Vickers mikrosertlik testinde, demir bor tabaka kalınlığının sınırları içerisinde farklı çentik mesafelerindeki 1.9, 2.9, 4.9 ve 9.8 N'luk yükler uygulandığında mikro çatlaklar oluşur. Uygulanan yükler ve çatlak

uzunluklarının çentik köşelerinden oluştuğu deneysel çalışmalar sonucunda tespit edilmiştir. Tabaka kalınlıkları ise 1123 °K'de 46 ± 4 μm ve 1273 °K'de 141 ± 6 μm olarak elde edilmiştir.

Bindal ve Üçışık (2007), katkısız saf karbon çelik üzerine ve özellikle % 0,3 C, % 0,02 P içerikli çeliğin borlama sonucunda bazı mekanik özelliklerini araştırmışlardır. İlgili çelik üzerindeki bor oluşumu boraks, borik asit ve ferro-silikondan oluşan sıvı ortamında, 940 °C de ve $\frac{1}{2}$ ile 10 saat arasındaki çeşitli zaman dilimlerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucu bor oluşumunun sütunsal bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Tabaka derinliği ve işlem süresi arasında neredeyse parabolik bir ilişki bulunmaktadır ve bor tabakası kalınlığı 30-160 μm arasında değerler elde edilmiştir. Borlamanın sürtünme katsayısını düşürdüğü ve aşınma direncini artırdığı bulunmuştur. Malzeme yüzeyindeki baskın, oksit olmayan faz oluşumu XRD analizinde belirlenen Fe_2B 'dur. Tabaka sertliği borlanmamış çelik yüzeyinde 250, borlanmış çelik yüzeyinde ise 1500 HV değerinde elde edilmiştir.

Li ve arkadaşları (2008), söz konusu çalışmada $\text{Cr}_{12}\text{Mn}_2\text{V}_2$ yüksek kromlu dökme demire 900 ve 950 °C'lerde sırasıyla 2, 4, 6, ve 8 saatlik süreler içerisinde katı borlama işlemi uygulanmıştır. $\text{Cr}_{12}\text{Mn}_2\text{V}_2$ yüksek kromlu dökme demir yüzeyine geleneksel borlama işlemi uygulanarak elde edilen, koyu ve göreceli olarak pürüzsüz bir yapı olan oksitlenmeyen bor tabakasının gelişimi ve genişletilmesi mümkündür. 950°C'deki 8 saatlik işlemde FeB , Fe_2B , CrB fazlarının oluşumu, 900 °C'deki 8 saatlik işlemde ise ağırlıklı olarak Fe_2B fazının oluşumu gözlenmektedir. Yüzey mikrosertlikleri borlama süresi ve borlama sıcaklığı arttıkça artmaktadır ve buna paralel olarak 950 °C'deki sertlik 900 °C'de alınan değere kıyasla daha yüksek olduğu ölçülmüştür. Sürtünme dayanımı ise 2,85 ve 4,18 MPa $\text{m}^{1/2}$ oranları arasında belirlenmiştir.

Campos-Silva ve arkadaşlarının (2008), çalışmalarında sürtünme teorisine göre FeB ve Fe_2B tabakalarının arayüzeyi ve Fe_2B ile çelik malzeme arasındaki arayüzeylerin yapısı çalışılmıştır. Bunun için AISI M2 çeliğine 4 veya 5 mm'lik

kalınlıktaki borkarbit kullanılarak pasta borlama yöntemiyle 1253 ve 1273°K sıcaklıklarda 2 ve 6 saatlik sürelerde borlama işlemi yapılmıştır.

Her iki yüzeyde de tek taraflı ilgiden ziyade iki tarafından birbirine ilgili olduğu bir durum söz konusudur. Ara yüzey genişliği kadar iyi olan FeB ve Fe₂B tabakalarının genişliği, macun kalınlığı, sıcaklık ve zaman gibi işlem parametrelerine güçlü bir şekilde bağlıdır. Bununla birlikte FeB ve Fe₂B tabakaları arasındaki arayüzey, Fe₂B ile malzeme arasındaki yüzeyden daha çok boşluklara yayılması söz konusudur, yine de son oluşan daha geniş olmaktadır.

Çalışmasında borlanmış malzemelerin boyutsal değişimini ve yüzey pürüzlülüklerini araştıran Şahin (2008), AISI 1020, AISI 1040 ve AISI 2714 malzemelerine Ekabor I tozu kullanarak 900 °C’de 2 ve 4 saatlik sürelerde katı ortamda borlama işlemi uygulamıştır. Borlama işleminde düzgün yüzeyler için yüzey pürüzlülük değeri anlamına gelen “eşik pürüzlülük” (threshold roughness) adını verdiği kendi tanımını yapmıştır. Çalışmada şu sonuçlara varılmıştır: Yüzey pürüzlülüğü, yüzeyi pürüzlü yüzeyler için borlama ile birlikte azalırken düzgün yüzeyler için artmaktadır. Aynı malzeme ve aynı borlama şartları için borlamadan sonraki eşik pürüzlülük değerine, borlamadan önceki malzemenin yüzey pürüzlülüğü eşik pürüzlülük değerinden aşağıda olduğu zaman ulaşılabacaktır. Bununla birlikte malzemenin yüzey pürüzlülüğü, eşik pürüzlülük değerinden yüksek olduğu zaman yüzey pürüzlülük değeri borlama işlemiyle birlikte azalacaktır. Yüzey pürüzlülüğündeki değişimler bor tabakasının kalınlığına olduğu kadar bu tabakanın fazlarına ve miktarlarına da bağlıdır. Ayrıca en yüksek bor tabakası kalınlığı AISI 1020’de (2 saat için 84 µm ve 4 saat için 112 µm) ve sırasıyla AISI 1040 ve AISI 2714’de görülmüştür.

Tabur ve arkadaşları (2009), AISI 8620 çeliğine 850, 900 ve 950 °C’lerde 2, 4 ve 6 saatlik süreler içerisinde katı borlama yaptığı çalışmasında farklı şartlar altında abrazyon aşınma davranışlarını incelemiştir. Deneysel sonuçlar düzgün dallı bir yapının oluşumunu göstermektedir. Borlu tabakanın mikrosertlik değerleri, orijinal malzemeye göre oldukça yüksektir. Orijinal malzemenin sertlik değeri 220 HV0.1 iken, 850 °C’de 2 saatlik borlama sonundaki sertlik 1650 ve 950 °C’de 6 saatlik borlama sonundaki

sertlik ise 1850 HV0.1 değerindedir. SEM görüntüleri ve aşınma testi sonuçlarında, bulunan FeB tabakasının Fe₂B tabakasından sert ve daha kırılğan olduğu açıkça görülmektedir. Borlama süresi ve sıcaklığı arttıa bor tabakası kalınlığının da arttığı anlaşılmaktadır. Borlama süresi ile tabaka kalınlığı arasında parabolik bir ilişki bulunmaktadır. Numunelerin aşınma direnci, aynı borlama sresindeki borlama sıcaklığının artmasıyla birlikte azalmaktadır. Yivler veya dişli görüntü yüksek sıcaklıklarda daha geniş ve derin bir görüntü sergilemektedir.

4. YÜKSEK HIZ ÇELİKLERİ

Bu bölümde çalışmamızda deney parçası olarak kullanılan AISI M2 çeliğinin mensubu olduğu yüksek hız çelikleri (high speed steel – HSS) hakkında genel bir bilgi sunulmuştur. Yüksek hız çeliklerinin gelişimi, sınıflandırılması, bileşiminde bulunan elementler ve etkileri ile yüksek hız çeliklerinin kullanıldıkları alanlara kısaca değinilmiştir.

Yüksek hız çeliklerinin gelişimi Mushet'in 1860'da tungsten-manganez çeliğini sertleştirme yoluyla elde ettiği ürün ile başlar. Bu çeliklerin işlenebilme imkanları Taylor ve White'in yüksek hız çeliğinin müjdesini verdikleri 1900 yılına kadar tam olarak değerlendirilememiştir (Tayanç ve Zeytin, 2000).

Yirminci yüzyılın başından beri yüksek hız çelikleri, metal sanayinde kesici takım gereçlerinin temelini oluşturmuştur. HSS'ler diğer gereçleri verimli bir biçimde yüksek hızlarda kesmek için tasarlanmış yüksek alaşımlı çeliklerdir (Cerit, 1996). Yüksek hız çelikleri takım ağzı kızaracak ölçüde yüksek kesme hızlarında dahi talaş kaldıracak olan, yani bu koşullara rağmen yüksek sıcaklık sertliğini büyük oranda ve uzun süre koruyan malzemelerdir. Bu malzemeler yüksek sıcaklıklara ve aşınmaya karşı dayanımlıdır. Bu özellikleri çeliğe kazandırmak için bazı alaşım elemanlarının ilavesinin yanında uygun ısıtma işleminin de gerçekleştirilmesi gerekir. (Tayanç ve Zeytin, 2000)

4.1. Yüksek Hız Çeliklerinin Sınıflandırılması

Alaşım elementlerinin değişik yüzdelerde ilaveleri ile yüksek hız çelikleri M2, M42, M10, M7, T1, T6 gibi farklı şekillerde isimlendirilirler. Bu çelikler genel olarak iki ana grup altında incelenebilir. T harfi ile simgelenenler Tungsten Yüksek Hız Çeliklerini, M ise Molibden Yüksek Hız Çeliklerini ifade eder.

Tablo 4.1. Yüksek hız çeliklerinin Alman Standardına göre kimyasal bileşimleri (Cerit, 1996).

Yüksek hız çelikleri											
Gereç No	Sembol	B i l e ş i m %									
		C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Mo	V	W
1.3202	S 12-1-4-5 (EV4Co)	1.30-1.45	0.45	0.40	0.030	0.030	4.50-5.00	3.80-4.50	0.70-1.00	3.50-4.00	11.50-12.50
1.3207	SI04-3-IO(EW9CoIO)	1.20-1.35	0.45	0.40	0.030	0.030	9.50-10.50	3.80-4.50	3.20-3.90	3.00-3.50	9.00-10.00
1.3243	S6-5-2-5(EMo5Co5)	0.88-0.96	0.45	0.40	0.030	0.030	4.50-5.00	3.80-4.50	4.70-5.20	1.70-2.00	6.00-6.70
1.3246	S 7-4-2-5	1.05-1.15	0.45	0.40	0.030	0.030	4.80-5.20	3.80-4.50	3.60-4.00	1.70-1.90	6.60-7.10
1.3247	S 2-10-1-8	1.05-1.12	0.45	0.40	0.030	0.030	7.50-8.50	3.60-4.40	9.00-10.00	1.00-1.30	1.20-1.80
1.3249	S 2-9-2-8	0.85-0.92	0.45	0.40	0.030	0.030	7.75-8.75	3.50-4.20	8.00-9.20	1.80-2.20	1.50-2.00
1.3255	S 18-1-2-5 (E 18 Co 5)	0.75-0.83	0.45	0.40	0.030	0.030	4.50-5.00	3.80-4.50	0.5W)80	1.40-1.70	17.50-18.50
1.3257	S 18-1-2-15 (E 18 Co 15)	0.60-0.70	0.45	0.40	0.030	0.030	15.00-16.00	3.80-4.50	0.50-1.00	1.40-1.70	17.50-18.50
1.3265	SI8-1-2-IO(EI8CoIO)	0.72-0.80	0.45	0.40	0.030	0.030	9.00-10.00	3.80-4.50	0.50-0.80	1.40-1.70	17.50-18.50
1.3302	SI2-1-4(EV4)	1.20-1.35	0.45	0.40	0.030	0.030	—	3.80-4.50	0.70-1.00	3.50-4.00	11.50-12.50
1.3318	S 12-1-2 (D)	0.90-1.00	0.45	0.40	0.030	0.030	—	3.80-4.50	0.70-1.00	2.30-2.60	11.50-12.50
1.3333	S 3-3-2 (ABC III)	0.95-1.03	0.45	0.40	0.030	0.030	—	3.80-4.50	2.50-2.80	2.20-2.50	2.70-3.00
1.3342	SC 6-5-2	0.95-1.05	0.45	0.40	0.030	0.030	—	3.80-4.50	4.70-5.20	1.70-2.00	6.00-6.70
1.3343	S6-5-2(DMo5)	0.86-0.94	0.45	0.40	0.030	0.030	—	3.80-4.50	4.70-5.20	1.70-2.00	6.00-6.70
1.3344	S 6-5-3 (E Mo 5 V 3)	1.17-1.27	0.45	0.40	0.030	0.030	—	3.80-4.50	4.70-5.20	2.70-3.20	6.00-6.70
1.3346	S2-9-1(BMo9)	0.78-0.86	0.45	0.40	0.030	0.030	—	3.50-4.20	8.00-9.20	1.00-1.30	1.50-2.00
1.3348	S2-9-2(BMo9V)	0.97-1.07	0.45	0.40	0.030	0.030	—	3.50-4.20	8.00-9.20	1.80-2.20	1.50-2.00
1.3355	SI8-0-1 (B 18)	0.70-0.78	0.45	0.40	0.030	0.030	—	3.80-4.50	—	1.00-1.20	17.50-18.50

Molibden Yüksek Hız Çelikleri

Mo, W, Cr, V, Co ve C molibden yüksek hız çeliklerinin temel alaşım elementleridir. Bu çelikler özellikleri bakımından tungsten yüksek hız çeliklerine benzerler fakat genellikle aynı sertlikte biraz daha yüksek tokluğa sahiptirler. Molibden çeliklerinin esas avantajı aynı cinsteki tungsten çeliklerinden hemen hemen %40 daha düşük ilk maliyete sahip olmalarıdır. Yüksek karbon ve vanadyum miktarları aşınma dayanımını artırır; tungsten çeliklerindeki gibi kobalt miktarlarındaki artış kızıl sertliği yükseltir. M15, M grubunun aşınmaya en çok dayanımlı çeliğidir. M çelikleri, özellikle ısıtmada ve atmosfere bırakmada sertleştirme koşullarına T çeliğinden biraz daha fazla duyarlıdır, çünkü bunlar uygun olmayan işlem şartları altında kolaylıkla dekarbürize olurlar. Amerika'da üretilen bütün yüksek hız çeliklerinin yaklaşık olarak %90'ı molibden çeliğidir (Tayanç ve Zeytin, 2000).

Tungsten Yüksek Hız Çelikleri

Bu hız çeliklerinin bileşiminde tungsten, krom, vanadyum, kobalt ve karbon en temel alaşım elementleridir. Özellikle %1.5'tan fazla vanadyum ve %1.0'den daha çok karbon içeren cinslerinde yüksek alaşım ve karbon yüzdesi, mikroyapıda büyük miktarda sert ve aşınma dayanımlı karbürler meydana getirir. T15 yüksek hız çeliği, tokluğunun biraz düşük olmasına karşın tungsten çeliklerinin içinde aşınmaya en çok dirençli olanıdır. Kobalt ilavesi ile kızıl sertlik artırılır. Sert ve ısı dayanımlı bir matrix içinde bulunan aşınmaya dirençli karbürlerin varlığı, bu çeliklerin kesme takım malzemeleri olarak kullanılmalara olanak sağlar (Tayanç ve Zeytin, 2000).

Tablo 4.2. Yüksek hız takım çeliklerinin genel kompozisyonları (Subaşı, 2006).

AISI Tipi	UNS tasarımı	Kompozisyon, %						
		C	Si	Cr	V	W	Mo	Co
Molibden yüksek hız takım çelikleri								
M1	T11301	0,83	0,35	3,75	1,18	1,75	8,70	...
M2								
-Normal C	T11302	0,83	0,33	4,13	1,98	6,13	5,00	...
-Yüksek C	...	1,00	0,33	4,13	1,98	6,13	5,00	...
M3								
-Sınıf 1	T11303	1,05	0,33	4,13	2,50	5,88	5,63	...
-Sınıf 2	T11323	1,20	0,33	4,13	3,00	5,88	5,63	...
M4	T11304	1,33	0,33	4,25	4,13	5,88	4,88	...
M6	T11306	0,80	0,33	4,13	1,50	4,25	5,00	12,00
M7	T11307	1,01	0,38	3,75	2,00	1,75	8,70	...
M10								
-Normal C	T11310	0,89	0,33	4,13	2,00	...	8,13	...
-Yüksek C	...	1,00	0,33	4,13	2,00	...	8,13	...
M15	T11315	1,50	0,33	4,00	5,00	6,50	3,50	5,00
M30	T11330	0,80	0,33	4,00	1,25	2,00	8,00	5,00
M33	T11333	0,89	0,33	3,75	1,18	1,70	9,50	8,25
M34	T11334	0,89	0,33	3,75	2,10	1,75	8,48	8,25
M35	T11335	0,80	0,33	4,00	2,00	6,00	5,00	5,00
M36	T11336	0,85	0,33	4,13	2,00	6,00	5,00	8,25
M41	T11341	1,10	0,33	4,13	2,00	6,63	3,75	8,25
M42	T11342	1,10	0,40	3,88	1,15	1,50	9,50	8,25
M46	T11346	1,26	0,53	3,95	3,15	2,05	8,25	8,30
M48	T11348	1,50	0,33	3,88	3,00	10,00	5,13	9,00
M62	T11362	1,30	0,28	3,88	2,00	6,25	10,50	...
Tungsten yüksek hız takım çelikleri								
T1	T12001	0,73	0,30	4,13	1,10	18,00	...	...
T4	T12004	0,75	0,30	4,13	1,00	18,25	0,70	5,00
T6	T12006	0,80	0,30	4,38	1,80	19,75	0,70	12,00
T8	T12008	0,80	0,30	4,13	2,10	14,00	0,70	5,00
T15	T12015	1,55	0,28	4,38	4,88	12,38	1,00	5,00

4.2. Yüksek Hız Çeliğinin İç Yapısı ve Alaşım Elementlerinin Etkisi

Yüksek hız çelikleri ledeburitik iç yapıya sahiptirler. Bunlar yapılarında Fe_3C değil de, alaşım elementleri yüzünden özel karbürler bulundurulur. Bu karbürler sayesinde saf Fe-C alaşımı ledeburitinden daha yüksek sıcaklıkta ergirler.

İç yapıyı ve özellikleri önemli ölçüde değiştiren belli başlı alaşım elemanları C, Cr, Mo, V, W ve Co'tır. Co'nun dışındakiler iç yapıda çökerek karbür oluştururlar. Genel olarak yüksek hız çeliklerinde yedi grup karbür çökeler. Bunlar; 1) E- karbür: $Fe_{2,4}C$ (hcp), 2) θ - karbür: M_3C (Fe_3C), 3) MC ya da M_4C_3 : (V_4C_3), 4) M_2C : (W_2C ya da Mo_2C), 5) λ - karbür: M_7C_3 (Cr_7C_3), 6) γ - karbür: $M_{23}C_6$ ($Cr_{23}C_6$), 7) η - karbür: M_6C (Fe_3W_3C ya da Fe_4W_2C). Burada 'M' bir metale veya metal grubuna karşılık gelmektedir. M_6C özgün olarak yüksek hız çeliği olarak bilinir ve çeliğe kızıl sertlik özelliğini sağlar. $M_{23}C_6$ karbürü temelde krom-karbürdür ve ostenitleme sırasında kolayca çözünerek ostenitin oluşmasına büyük katkıda bulunur. Sertleştirme sonucu istenilen martenzitin oluşumuna da etkide bulunur. MC karbürü ya da vanadyum-karbür aşırı sertliğinden dolayı çeliğin aşınma direncini arttıran bir karbürdür (Tayanç ve Zeytin, 2000).

Karbon etkisi

Çeliğin mekanik özelliklerini en fazla etkileyen elemandır. Artan karbon oranı ile çeliğin dövme, kaynak, talaş kaldırma ve derin çekme ile şekillendirilme yeteneği azalırken, sertleşme kabiliyeti artar.

Krom etkisi

Cr, her %1 oranı için çeliğin mukavemetini 90 N/mm^2 artırır fakat kopma uzamasını %1,5 oranında azaltır. Kritik soğuma hızını küçültür ve böylece sertleşme derinliği artar. Demirin karbonu çözebilme kabiliyetini azaltır, bundan dolayı ostenitin doymuşluk sınırı (Acm) sola doğru fazlaca kayar ve çelikte karbürlerin ayrışmasına neden olur. Oluşturdukları krom karbürler ile çeliğin sertliği artar. Tufallaşmayan çeliklerin en önemli alaşım elemanı kromdur.

Molibden etkisi

Mo, özel karbür oluşturur, bu karbürler sıcakta mukavemeti uzun süre korurlar. Özellikle V, W ve Cr ile bileşim yaparak çeliğin kesme kabiliyetini artırır. Mo'nin çok az miktarı bile meneviş gevrekliğini giderir. Tane küçültücü etkisi vardır. Mo pratik olarak yanmaz, bu yüzden hurda demirin ergitilmesi esnasında büyük oranda geri kazanılabilir. Molibden ilavesi ile çelik dekarbürizasyona duyarlı hale gelir.

Vanadyum etkisi

Vanadyum, özel VC karbürünü oluşturur. Bu karbür, ostenit içinde Fe_3C 'den daha zor çözünebilir. Bu nedenle, sertleştirme sıcaklığı $1250^{\circ}C$ 'dir. Böylece, henüz çözünmemiş karbür, ostenitin sertleşebilmesi için gerekli karbonu çeker. Bu çelikler, yaklaşık $600^{\circ}C$ sıcaklığa kadar yapılan tavlamalara karşı dayanıklıdırlar. Menevişleme tavlama sırasında sertliğin fazlaca düşmesine Fe_3C 'nin ayrışması neden olur. Çok küçük miktarlardaki vanadyum bile, zor çözünebilir karbürler oluşturduğundan çeliğin aşırı ısıtmaya karşı hassasiyetini azaltır. Vanadyum takımın kesme kabiliyetini ve havada sertleşme özelliğini artırır.

Wolfram etkisi

W, çeliklerin aşınma dirençlerini, menevişleme tavlama dayanıklılığını ve sıcakta mukavemet değerlerini artırır. Ostenitin karbona doymuşluk çizgisini sola doğru kaydırır. W, çelikte zor çözünebilir $(FeW)_6C$ karbürünü oluşturur. Bu karbür, sertleştirme sıcaklığı arttırıldığında çözünebilir, böylece sertlik ve sertleşme derinliği artar. Karbürlerin çok küçük çözünme hızından dolayı W çelikleri, aşırı ısıtmaya karşı hassas değildirler.

Kobalt etkisi

Co, malzemenin kritik soğuma hızını artırır, bundan dolayı su vermede sertleşme derinliğini azaltır. Çeliğe ilave edildiğinde katılaşmanın tamamlanma sıcaklığını yükseltir, A_3 dönüşüm noktasını düşürür ve γ bölgesini genişletir. Co, ferriti sertleştirir ve böylece kızıl sıcaklıkta sertliğe yardım eder. Korozyon ve aşınma direncini artırır, çekme ve akma

mukavemetlerinde az bir artış sağlar fakat çekilebilme özelliğini azaltır (Tayanç ve Zeytin, 2000).

HSS takım çeliklerinin özellikleri ve üstünlükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Cerit, 1996) :

- ✚ Yüksek alaşımlanabilme yeteneği.
- ✚ Genellikle, 64 HRC ye kadar sertlik alabilecek kadar yeterli karbon içermeleri.
- ✚ Her tarafı üniform olacak biçimde sertlik alabilmeleri.
- ✚ Yüksek sıcaklıkta sertlik alabilmeleri ve küçük kesitlerde durgun hava ortamında soğutularak maksimuma yakın sertlikler alabilmeleri.
- ✚ Darbeye dayanımı ve kesintili yükleme dayanımının karbür gerece göre iyi olması.
- ✚ Yumuşak halde iken sıcak işlem, işlenebilme, taşlama gibi işlemlerle kolaylıkla kesici takım halinde şekillendirilebilmeleri.

HSS takımların zayıf tarafları ise şöyle sıralanabilir (Cerit, 1996) :

- ✚ HSS çeliğin yapısında bulunan karbürler yapı içinde uygun bir biçimde dağılmamışsa, fiziksel özellikler azalabilir ve taşlama çok zorlaşabilir. Taşlanabilme özelliği toz metal HSS lerin en önemli özelliğidir.
- ✚ HSS lerin bir diğer zayıf tarafı, işleme sıcaklıkları 538-593 °C yi geçtiği zaman, sertliklerinin çok hızlı olarak düşmesidir.

4.3. Yüksek Hız Çeliklerinin Kullanım Alanları

Bugün metal işlemede % 60 ile en fazla kullanılan kesici takım gereçleri yüksek hız çelikleridir (HSS). Pek çok matkap, rayba, kılavuz, vida açma uçları, parmak frezeler, dişli açma takımları (modül freze çakıları, azdırma çakıları) HSS malzemedен yapılmaktadır. Ayrıca, form çakılar gibi karmaşık şekilli takımlar, kesme çakıları da HSS malzemedен

yapılmaktadır. Pek çok broş, torna ve planya takımları da HSS'den yapılmaktadır. HSS takımlar, genellikle eski, rijit olmayan düşük güçlü tezgahlarla düzgün yüzey kalitesi istenen işlemlerde, düşük kesme hızı ile gerçekleştirilen işlerde tercih edilir. Bunlar, ısı işlem yapılmış çelikler, titanyum alaşımları ve refrakter malzemeler gibi işlenmesi zor malzemelerde sıkça kullanılır (Cerit, 1996). Tablo 4.3'de çeşitli hız çeliklerinin kullanım alanları belirtilmektedir.

Tablo 4.3. Yüksek hız çeliklerinin genel kullanım yerleri (Cerit, 1996)

Standart No	Kullanım Yerleri
1.3202	Yüksek dirençli sert metallerin yüzey düzeltme (zımparalama, eğeleme, raspalama) ve kesme işlemlerinde aşınma direnci yüksek takım gereci olarak
1.3207	Torna takımları, kesici takımlar, özellikle otomat torna işlemlerinde
1.3243	Yüksek gerilimli matkaplar, her çeşit ayrılabilir (sectional) takımlar
1.3246	Matkaplar, freze çakılan, raybalar, kılavuzlar, havsa matkapları
1.3247	Kalıp taşıyıcıları, oyma freze çakılan, otomatlar için küçük takımlar
1.3249	Freze çakılan, yüksek yüklerde kaba işleme takımları
1.3255	Çok büyük kesme direnci olan tornalama ve planyalamada
1.3257	Ağır iş torna ve planyalama takımları ve ağır işlerde
1.3265	Ostenitik çelikler dahil her türlü çelik, çelik döküm, gri döküm ve demir dışı metallerin işlenmesinde yüksek sıcaklık dayanımı yüksek torna, raspa ve freze bıçağı olarak
1.3302	Son tornalama ve freze takımları, pinyon tip kesiciler, kesme takımları, broşlar
1.3318	Torna takımları, freze bıçakları, sert malzemelerle çalışmak için
1.3333	Matkaplar, freze çakılan, broşlar vb.
1.3342	Ağır iş freze çakılan, matkaplar, kesme ve itme takımları
1.3343	Broşlar, matkaplar, freze çakılan, dairesel testere için takma ağızlar
1.3344	Ağır iş freze çakılan ve broşlar, raybalar
1.3346	Matkaplar, vida açma takımları, kesme dayanımı 880 N/mm ² den büyük malzemeler için freze çakılan
1.3348	Freze takımları, yüksek kesme sertlikleri için pinyon tip kesiciler vb.
1.3355	Matkaplar, vida açma takımları, freze çakılan, kağıt delme zımbalan

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

Bu çalışmada AISI M2 molibden esaslı yüksek hız çeliğinden hazırlanan numuneler 900, 1000 ve 1100 °C sıcaklıklarda 2, 4, 6 ve 8 saatlik sürelerde borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işlemi katı ortamda EKabor®-2 tozları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Borlama sonrasında oluşan borür tabakalarının morfolojileri optik mikroskop yardımıyla incelenmiştir. Ayrıca borür tabakasının zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kalınlıkları ve yüzeyden matrise doğru sertlik dağılımları tespit edilmiştir.

5.1. Deneyleerde Kullanılan Malzeme

Deneyleerde kullanılmak üzere özel bir işletmede zımba olarak kullanılan AISI M2 malzemesi temin edilmiştir. Malzemenin kimyasal bileşimi % ağırlık olarak aşağıdaki Tablo 5.1’de belirtilmiştir.

Tablo 5.1. Deneysel çalışmada kullanılan AISI M2 çeliğinin kimyasal bileşimleri (% ağırlık)

	C	Cr	Mo	W	V	Co	Ni	Si	Mn	S	P
AISI M2	0,88	4,25	5,00	6,40	1,83	0,14	0,45	0,22	0,34	0,011	0,016

AISI M2 malzemesinin çeşitli normlardaki gösterim şekli ve numaralandırılması ise Tablo 5.2’de gösterilmektedir.

5.2. Borlama İşlemi

Borlama işlemi katı – toz ortamda gerçekleştirilmiştir. Bor kaynağı olarak EKabor®-2 ve Ekrit toz karışımları kullanılmıştır (Bkz Tablo 2.4). Borlama işlemi 900, 1000 ve 1100 °C sıcaklıklarda; 2, 4, 6 ve 8 saatlik sürelerle yapılmıştır. Borlama işleminde AISI 304 malzemesinden 1,5 mm kalınlığında, 120×40 mm taban alanlı ve 80 mm yüksekliğinde ağzı kapaklı kutular kullanılmıştır. Borlama işlemine tabi tutulacak numuneler 10-12 mm çaplarında ve 8-10 mm yüksekliklerinde olacak şekilde erezyon makinesinde kesilerek yüzeyleri taşlama tezgahında zımparalanmıştır. Hazırlanan

kutular içerisine en alta 2 cm kalınlıkta EKabor®-2 tozu konulduktan sonra numuneler eşit aralıklarla (her kutuda üç adet numune bulunmaktadır) yerleştirilmiştir. Numunelerin üzerinde sırasıyla yine 1 cm kalınlıkta EKabor®-2 tozu ve 1 cm kalınlıkta Ekrit tozu olacak şekilde hazırlanan kutu, kapak ile sıkıca kapatılmıştır. Burada EKabor®-2 (tane büyüklüğü 75 – 106 µm) B₄C – SiC – KBF₄ içeren bir bor sağlayıcı bileşik olarak kullanılmıştır. Ekrit tozu ise deoksidan olarak, saf demir ve oksit tutucu bileşenlerden oluşmaktadır ve numunelerin hava ile temasa geçmemesi için kullanılmaktadır. Hazırlanan kutular fırın içersine yerleştirilerek, fırınla beraber ısıtılmıştır. Deney süresi, fırın istenilen sıcaklığa ulaştığı andan itibaren tutulmuştur. Borlama ısıl işleminden sonra fırından çıkarılan kutular laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan kutudan çıkarılan numuneler, temizlendikten sonra deneyler gerçekleştirilmiştir.

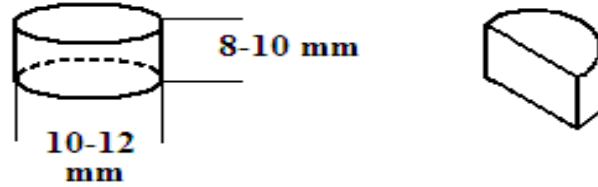
Tablo 5.2. AISI M2 malzemesinin farklı normlardaki gösterilişi ve numaralandırılması

DIN Normu	1.3343	SIS Normu	2722
	S 6-5-2	UNE Normu	6 - 5 - 2 F5603
AFNOR Normu	~ E-Z 85 WCDV6 (AIR)	AISI Normu	~ M2 reg.C
	~ Z 80 WDCV6	JIS Normu	SKH51
	~ Z 90 WDCV 06 - 05 - 04 - 02	GOST Normu	~ R 6 M 5
UNI Normu	HS 6 - 5 - 2	BS Normu	BM 2
	~ X 82WMoV6 5		

5.3. Metalografik Çalışmalar

Temizlenen numuneler laboratuvarda Struers Discotom-5 kesme cihazı kullanılarak düzlem yüzeylerine dik olarak ortadan iki parçaya ayrılıp kalıplanmışlardır. Daha sonra yeterli ve gerekli yüzey görüntüsünü sağlamak amacıyla sırasıyla zımparalanmış ve parlatılmıştır. % 2'lik nital ile dağlanarak hazırlanan numuneler, optik mikroskop cihazı ile birlikte bilgisayarda görüntü alma sisteminin yardımıyla 50X, 100X ve 200X büyüklüklerde incelenmiş ve resimleri alınmıştır. Borür tabaka kalınlıkları ise yine aynı cihaz yardımıyla alan yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Farklı

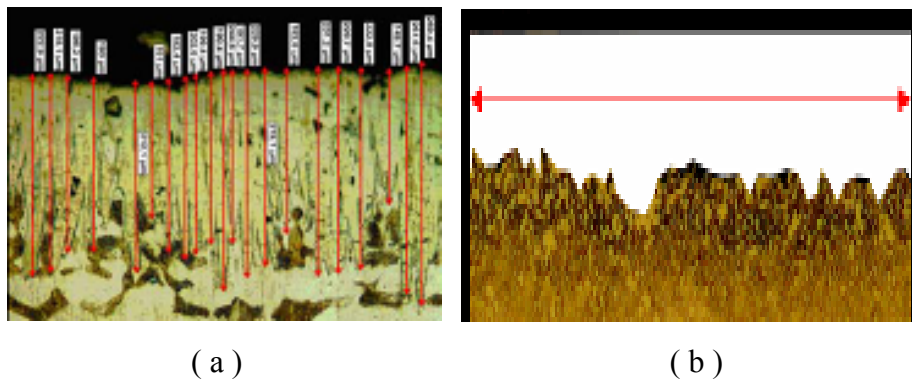
süre ve sıcaklıklarda borlanan AISI M2 çeliklerinin mikro yapılarının optik metalografi incelemelerinde elde edilen görüntüleri Şekil 5.3 – 5.14’de verilmektedir.



Şekil 5.1. Borlama işleminde kullanılan altlık malzemenin şematik gösterimi

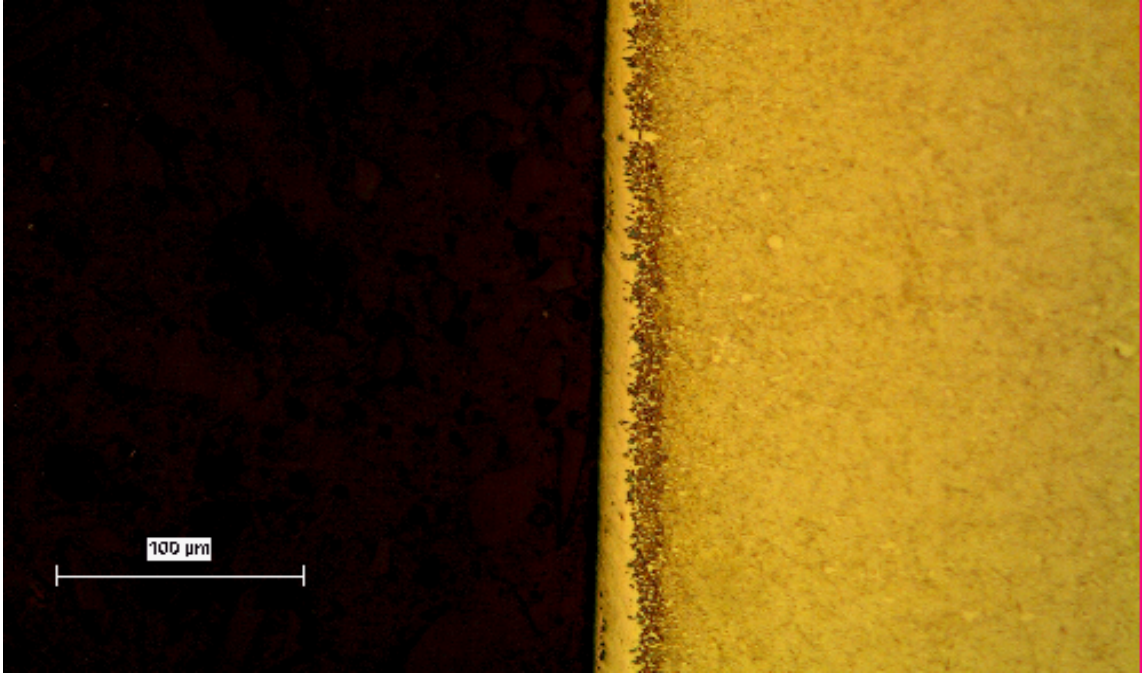
5.4. Borür Tabakası Kalınlığının Belirlenmesi

Yapılan çalışmada, önceki çalışmalarda çok fazla kullanılmayan alan yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin kullanılmasıyla daha doğru ve kesin bir tabaka kalınlığı ölçümü amaçlanmıştır. Önceki çalışmalarda genellikle Şekil 5.2.a’da görüleceği gibi borür tabakası yüzeyinden kolonsal kısmın tepe noktasına kadar düzgün doğrusal bir şekilde mesafe ölçülür ve bu şekilde ne kadar ölçüm yapılırsa ortalaması alınarak tabaka kalınlığı kabul edilir. Mevcut çalışmada ise borür tabakası, difüzyon tabakası arasındaki sınır takip edilerek Şekil 5.2.b’de görüldüğü gibi boyanır. Bu bölgenin boyanması için Photoshop programı kullanılmıştır. Daha sonra boyanan bölgenin, görüntü alma sistemiyle bilgisayarda alanı hesaplanır ve genişliği belirlenir. Bulunan bu alanı, genişliğine böldüğümüzde de ortalama tabaka kalınlığı elde edilmiş olur.

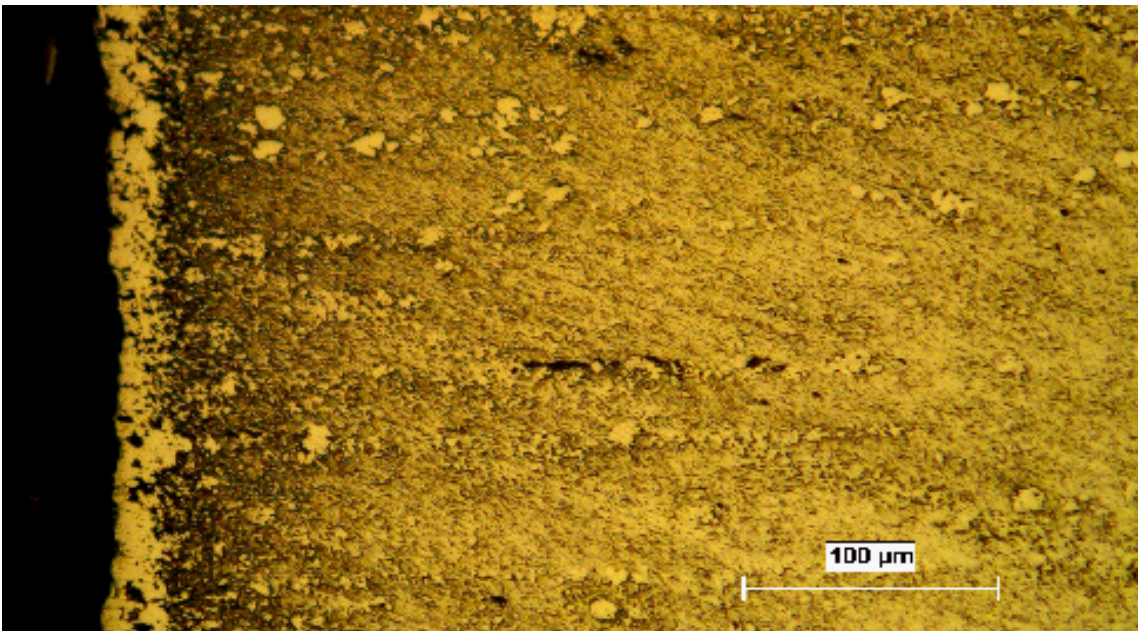


Şekil 5.2. Tabaka kalınlığının ölçülmesi (a) Önceki çalışmalarda sıklıkla kullanılan yöntem (b) Bu çalışmada kullanılan alan yöntemi

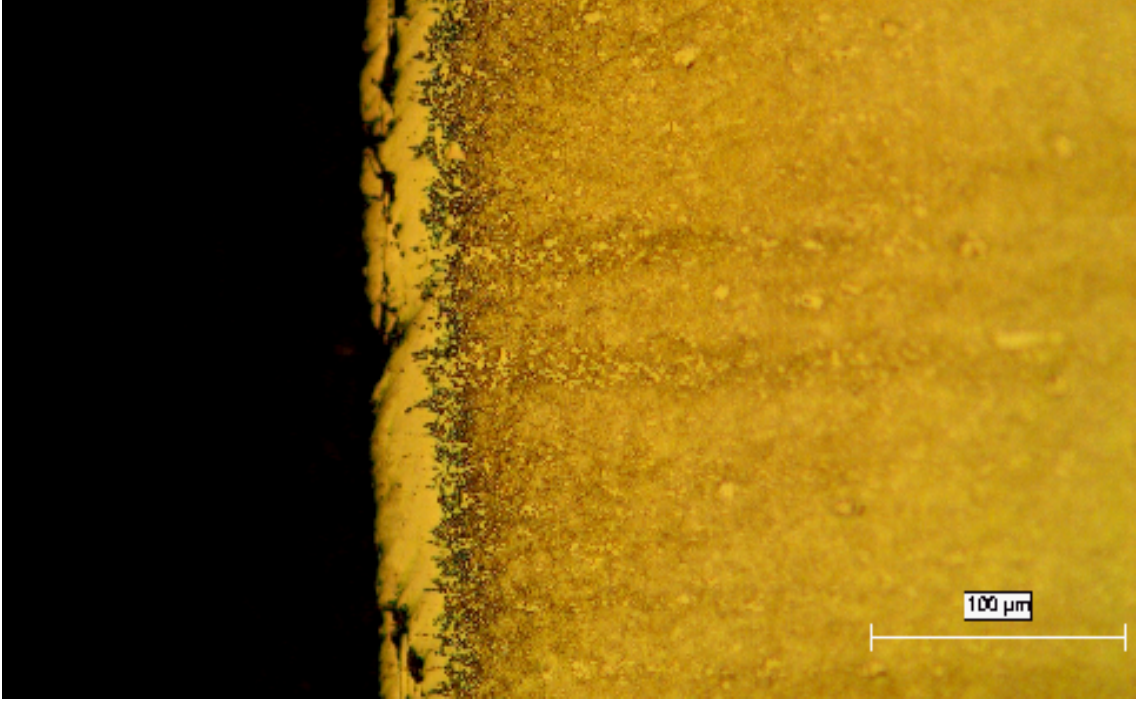
Mevcut çalışmada alan yöntemiyle belirlenen tabaka kalınlıkları değerleri Tablo 5.3 de belirtilmiş ve Şekil 5.15 de grafiklendirilmiştir.



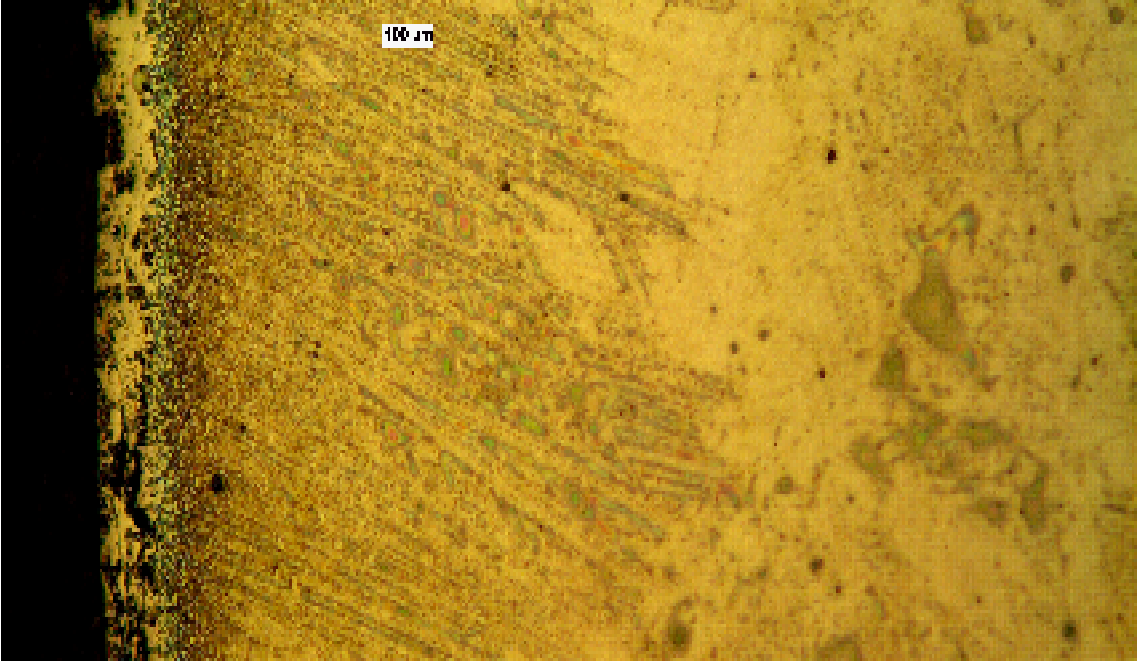
Şekil 5.3. 900 °C’de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X)



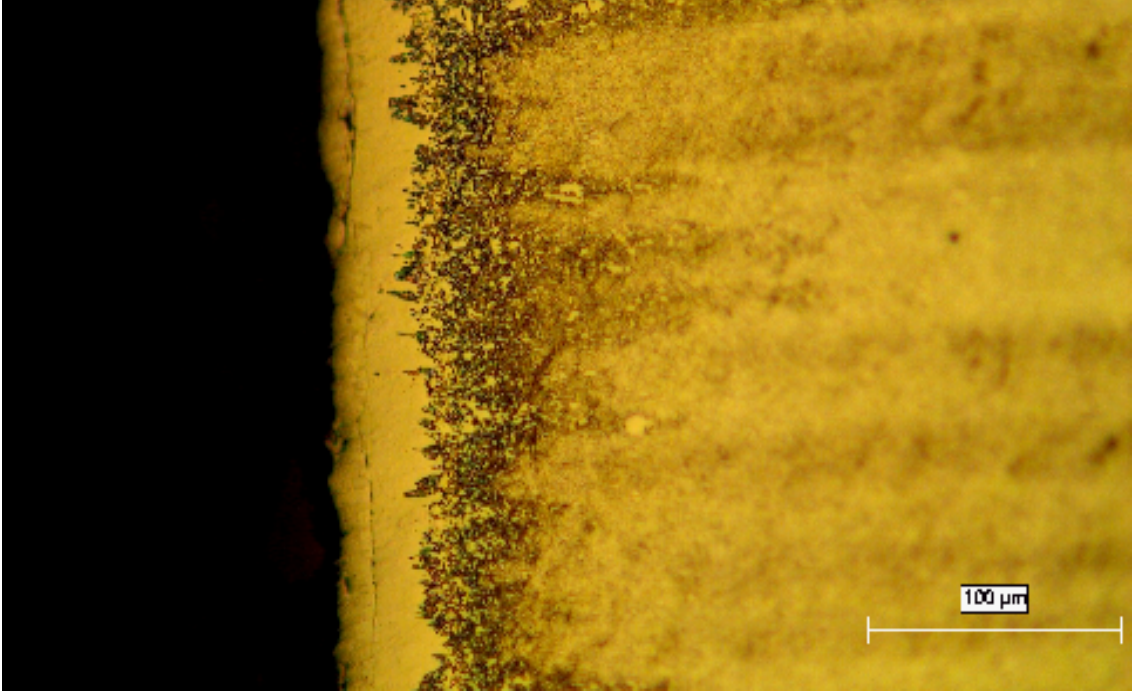
Şekil 5.4. 900 °C’de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X)



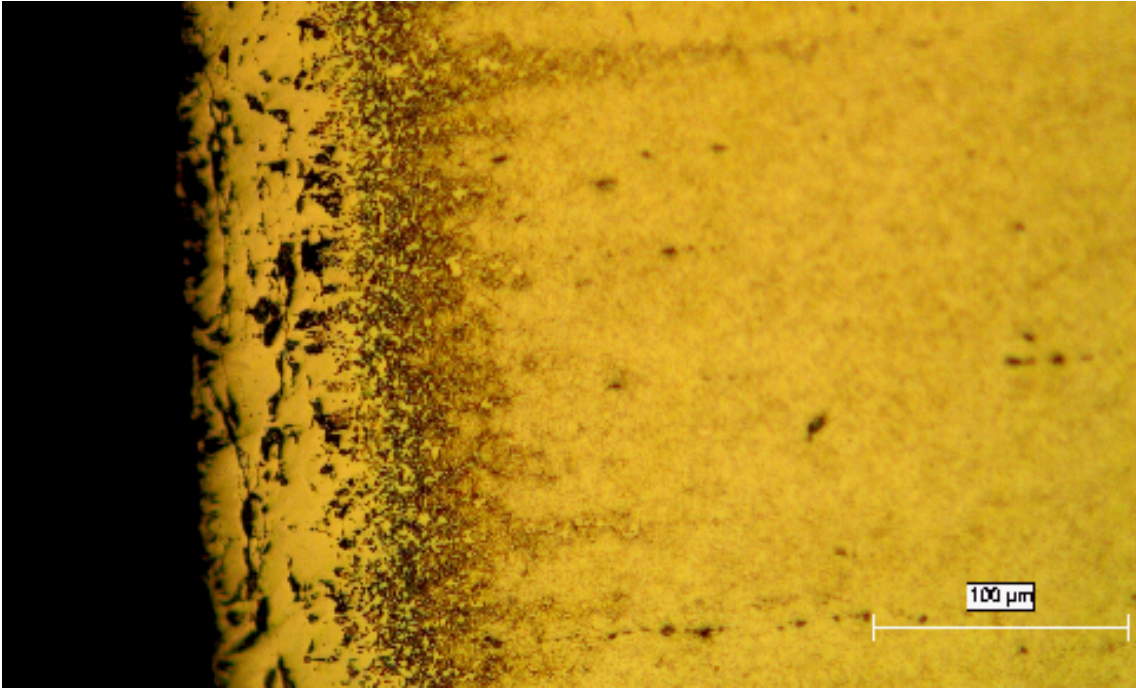
Şekil 5.5. 900 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X)



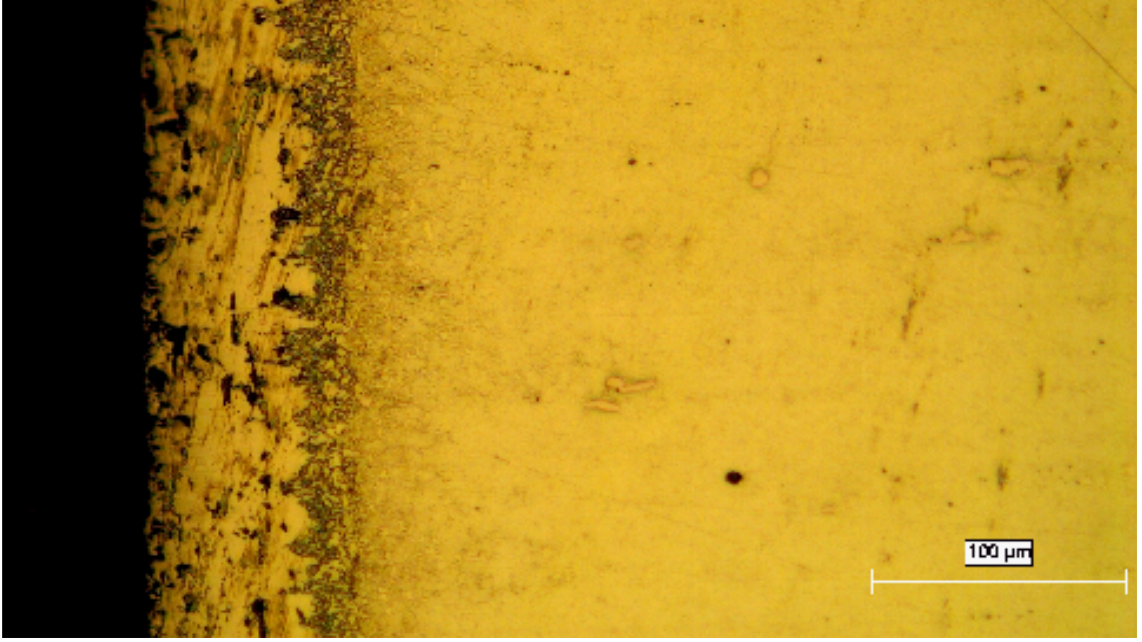
Şekil 5.6. 900 °C’de 8 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X)



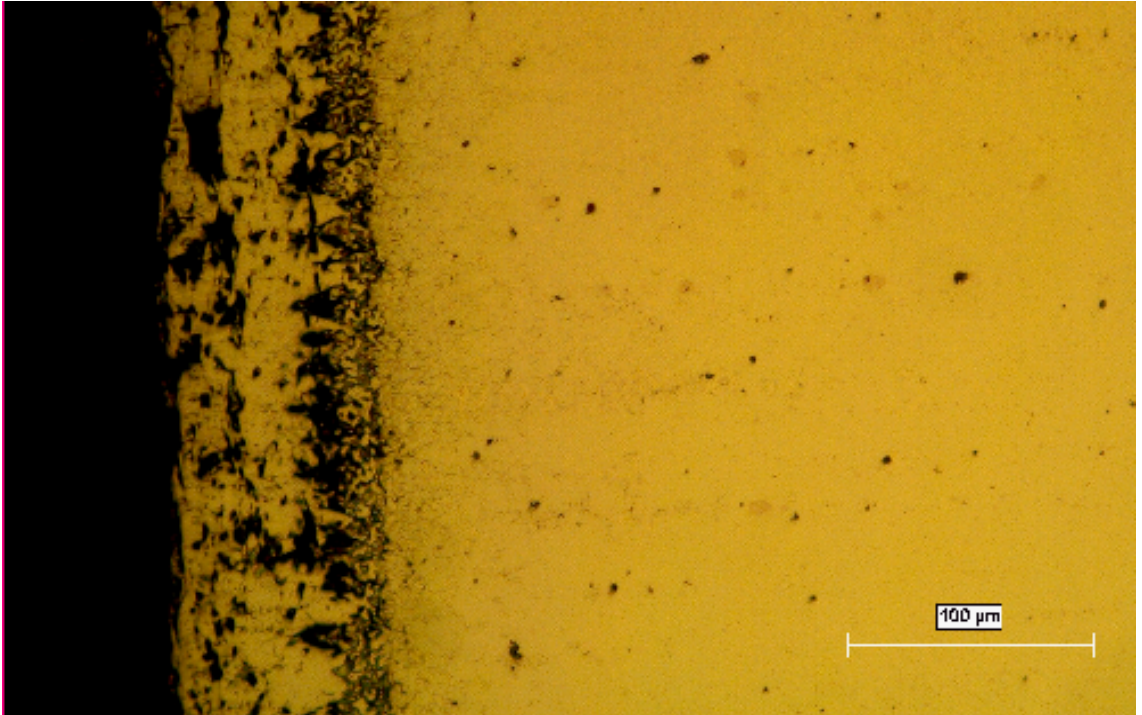
Şekil 5.7. 1000 °C’de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X)



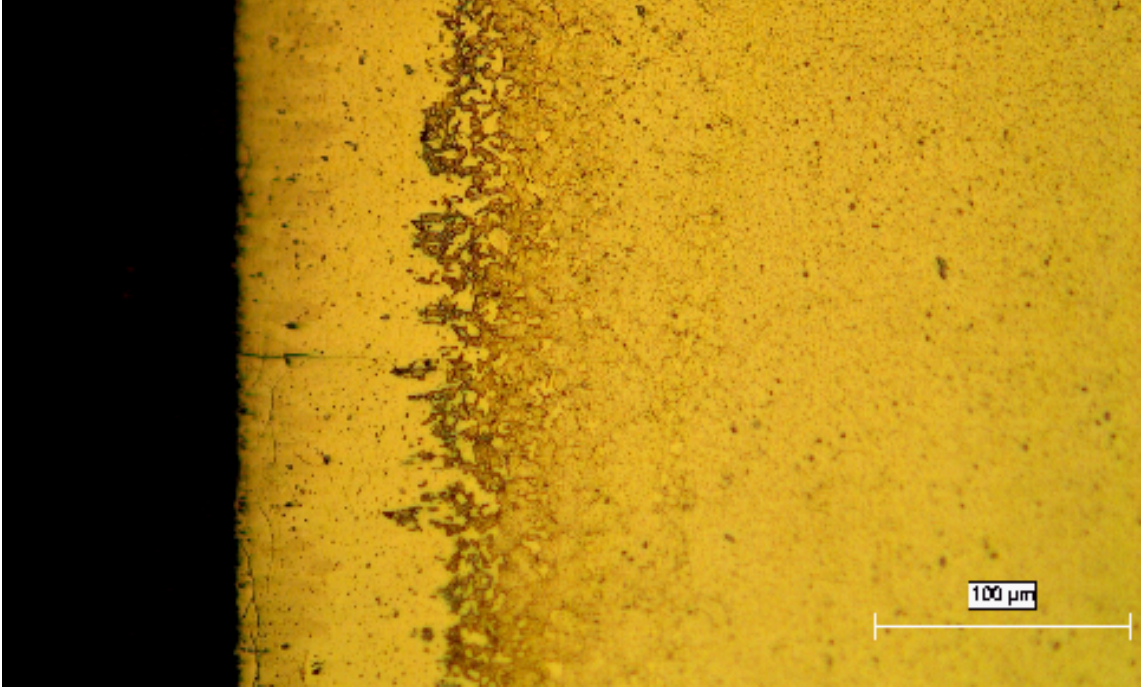
Şekil 5.8. 1000 °C’de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X)



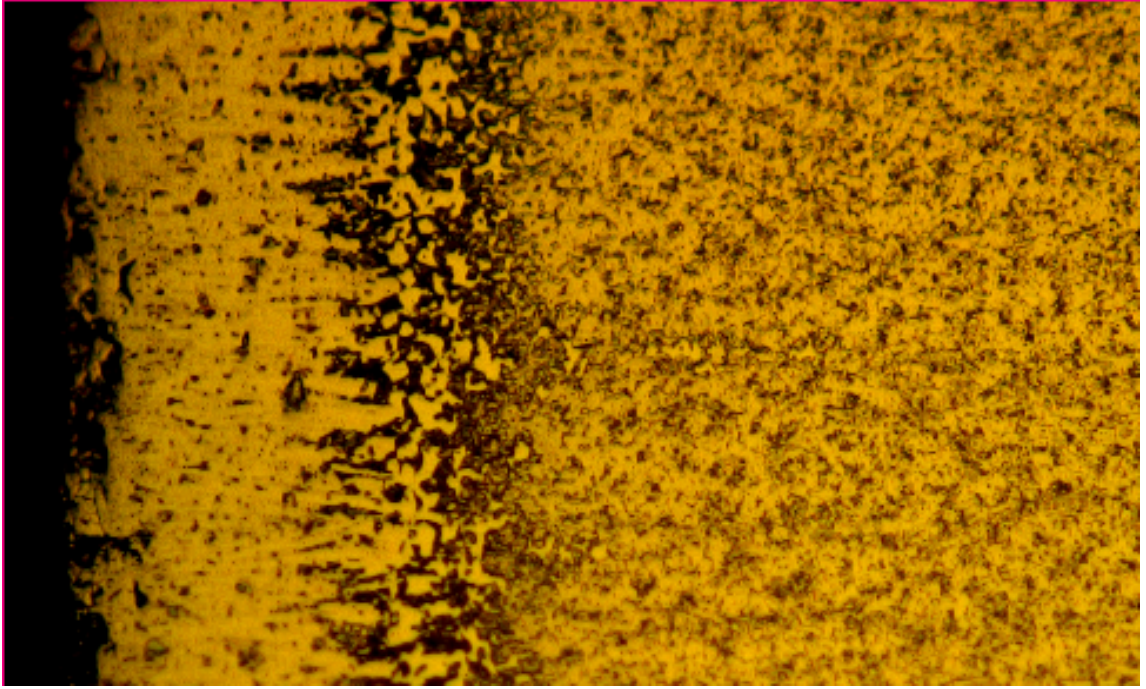
Şekil 5.9. 1000 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X)



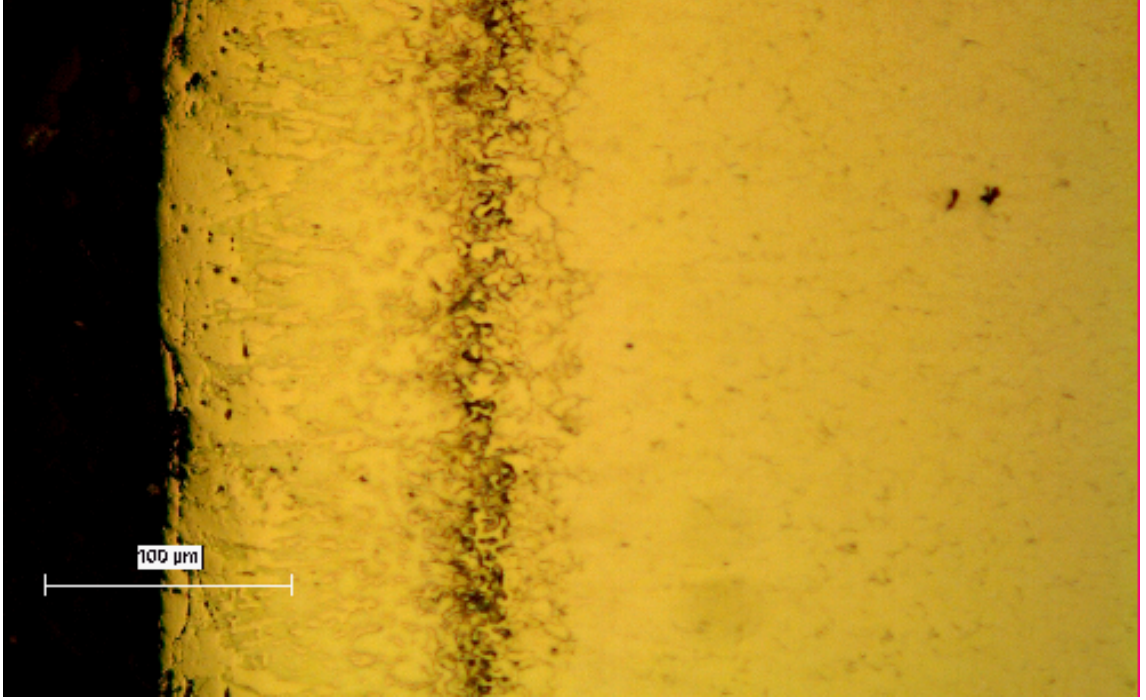
Şekil 5.10. 1000 °C’de 8 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X)



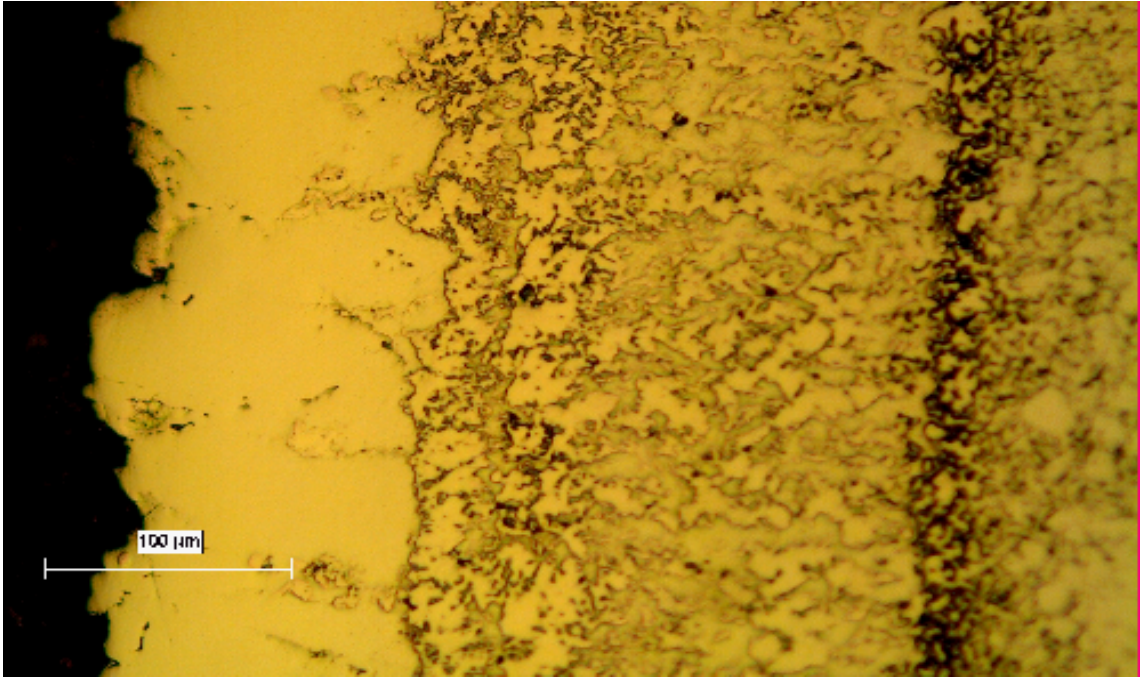
Şekil 5.11. 1100 °C’de 2 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X)



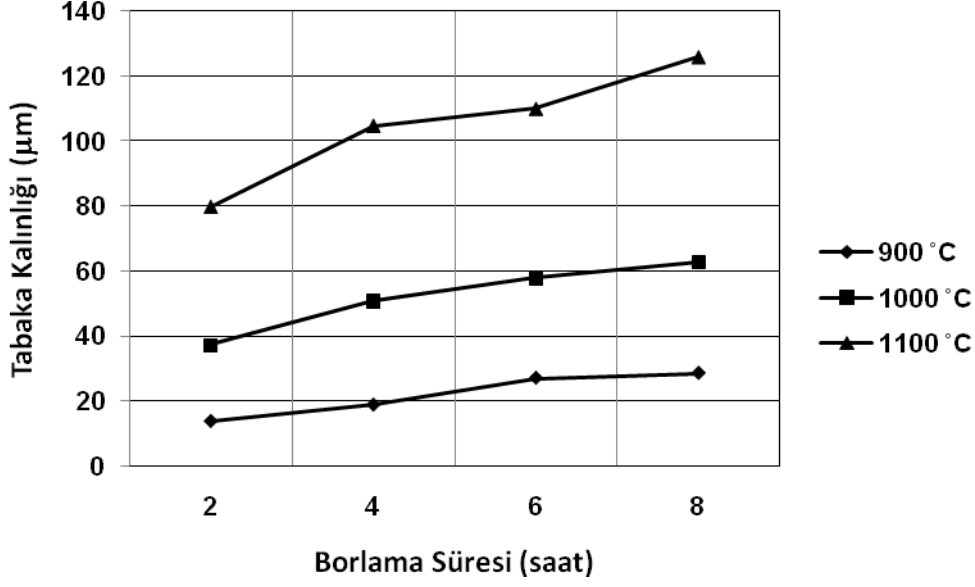
Şekil 5.12. 1100 °C’de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X)



Şekil 5.13. 1100 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X)



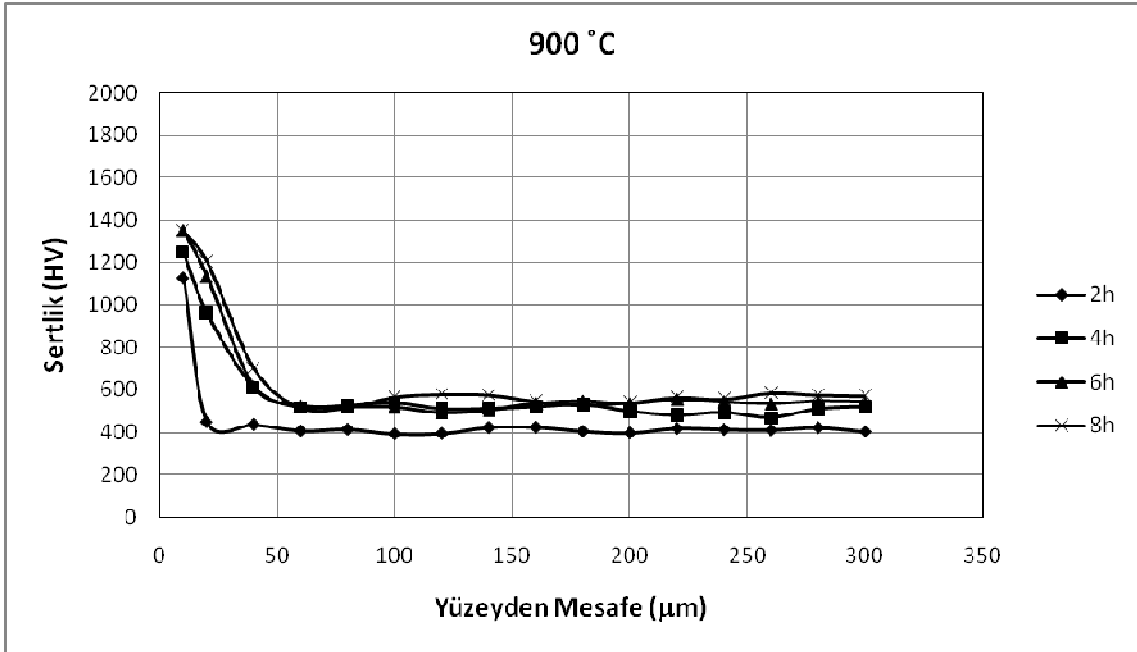
Şekil 5.14. 1100 °C’de 8 saat borlama işlemine tabi tutulan AISI M2 çeliğinin mikroyapısı (200X)



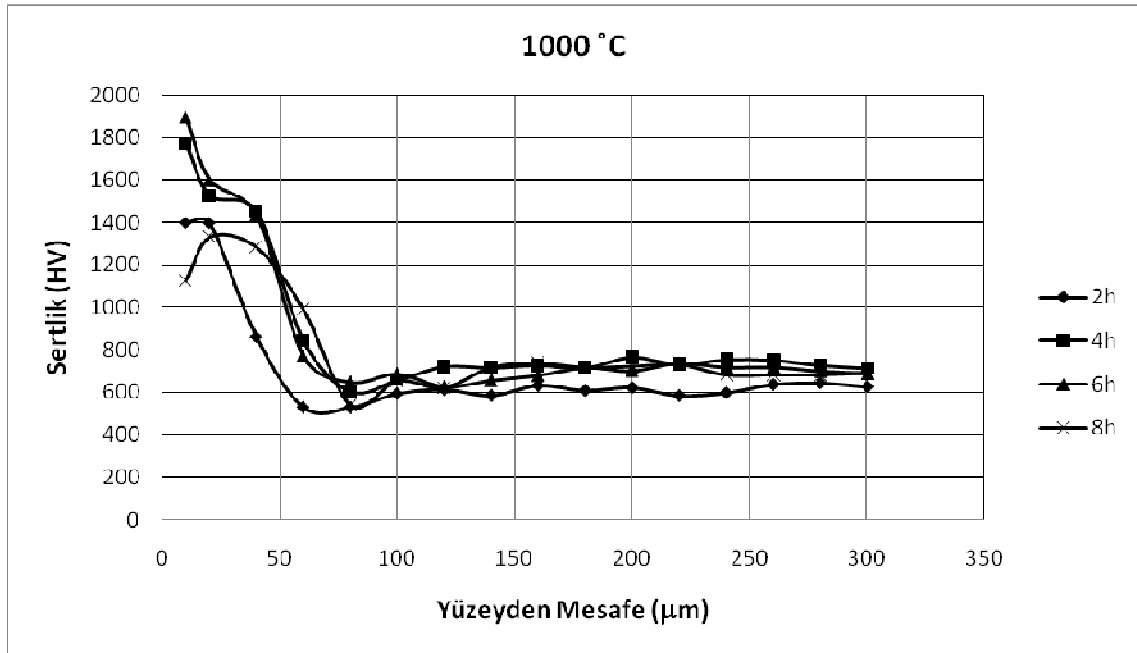
Şekil 5.15. Borlanmış AISI M2 çeliğinin sıcaklık ve zamana bağlı borür tabaka kalınlığının değişimi

5.5. Mikrosertlik Ölçümleri

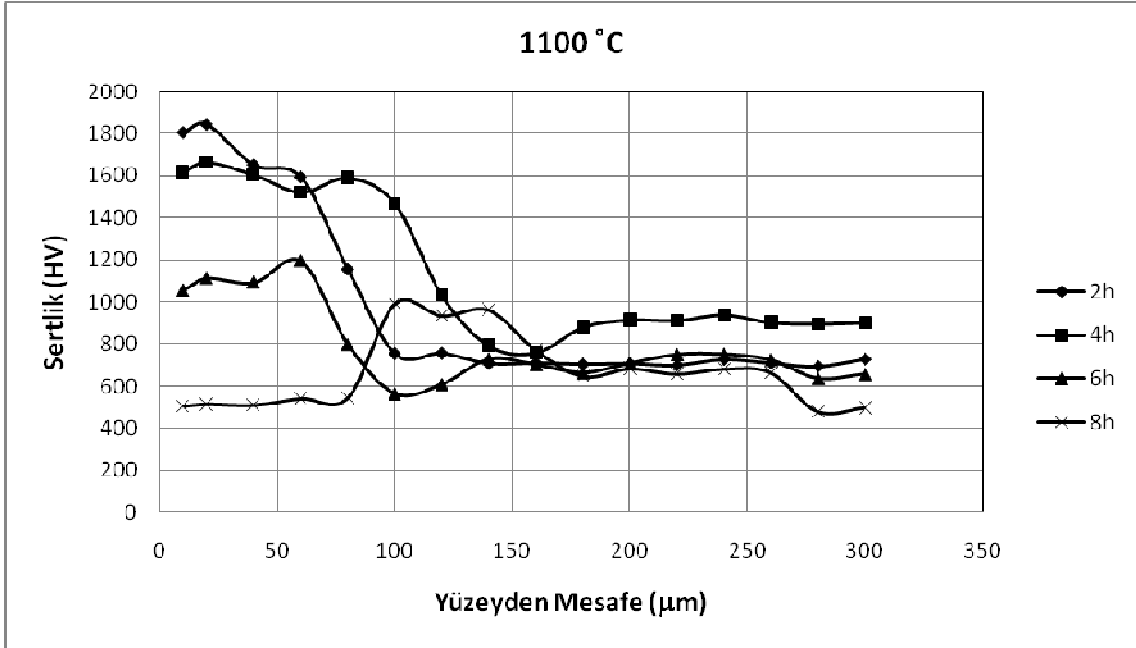
Borlanmış numunelerin sertlik ölçümleri; Future-tech FM-700 marka mikrosertlik cihazında Vickers uç kullanılarak, çekirdek bölgesine gelen ölçümlerde 50 gram, borür tabakası ve geçiş bölgesindeki ölçümlerde ise 25 gramlık yükler altında 10 saniye süre uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler borür tabakası boyunca yüzeyden itibaren matrise doğru 300 µm'lik mesafede, belirli bir doğrultuda ve 20 µm'lik sabit aralıklarla yapılmıştır. Tabaka kalınlığının sıra sertlik ölçümüne izin vermeyecek derecede ince ve tabakanın tahrip olduğu belli olduğu durumlarda düzgün doğrusal bir çizgi üzerinde değil, zikzaklar çizerek belli bir bölge üzerinde ölçümler yapılmıştır. Yüzeyden itibaren ölçülen sertlik dağılımları, kolonların boylarına göre değişmektedir. Ölçüm yapılan kısımlardaki kolon boyu her zaman gerçek tabaka kalınlığını temsil etmemekle birlikte, ortalama bir değer vermektedir. Sertlikteki değişim, borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sertlik değerleri Şekil 5.16 - 5.18 arasında gösterilmektedir. Ayrıca her sıcaklık ve süreler için yüzeyden 10 µm'lik mesafede alınan sertlik değerleri Şekil 5.19'da gösterilmektedir. Tüm sertlik değerleri Tablo 5.3' de ayrıca belirtilmiştir.



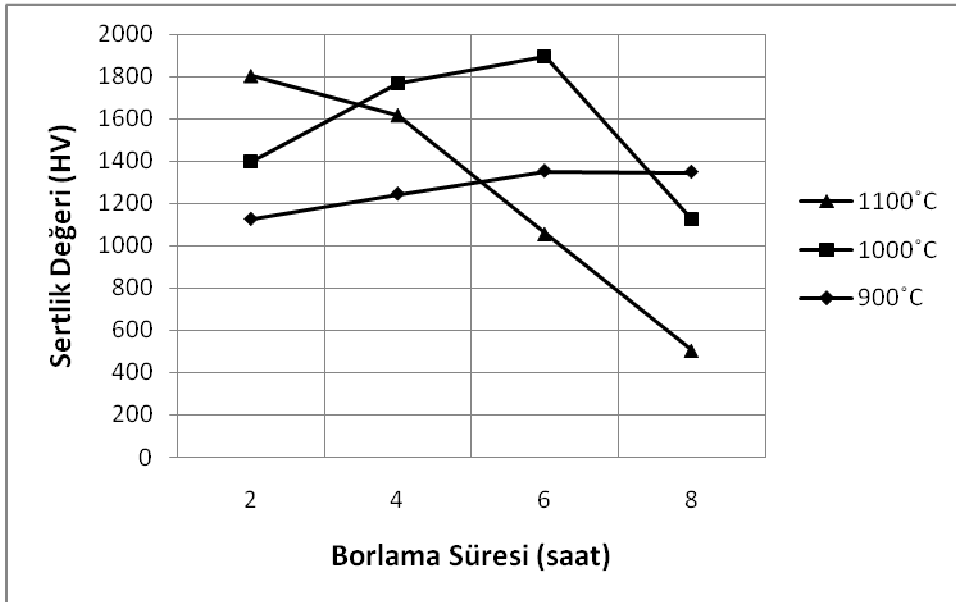
Şekil 5.16. 900 °C’de yüzeyden 20 μm aralıklarla zamana bağlı olarak elde edilen AISI M2 çeliğinin ortalama sertlik değerleri



Şekil 5.17. 1000 °C’de yüzeyden 20 μm aralıklarla zamana bağlı olarak elde edilen AISI M2 çeliğinin ortalama sertlik değerleri



Şekil 5.18. 1100 °C’de yüzeyden 20 µm aralıklarla zamana bağlı olarak elde edilen AISI M2 çeliğinin ortalama sertlik değerleri



Şekil 5.19. Borlama süresine bağlı olarak farklı sıcaklıklar için yüzeyden 10 µm mesafede elde edilen AISI M2 çeliğinin ortalama sertlik değerleri

Tablo 5.3. AISI M2 çeliğinin çalışmada belirlenen sıcaklık ve sürelerde borlanması sonucu elde edilen borür tabakasının ortalama kalınlık değerleri ve yüzeyden çekirdek bölgesine doğru ölçülen ortalama mikrosertlik değerleri

SICAKLIK [°C]	900 °C				1000°C				1100 °C			
SÜRE [saat]	2 h	4 h	6 h	8 h	2 h	4 h	6 h	8 h	2 h	4 h	6 h	8 h
Tabaka Kalınlığı [µm]	14	19	27	28	37	51	58	63	80	105	110	126
Yüzeyden İtibaren Mesafe [µm]	Yüzeyden Çekirdek Bölgesine Doğru Elde Edilen Mikrosertlik Değerleri [HV_{0.25}]											
10	1125	1291	1352	1348	1399	1769	1895	1128	1804	1618	1056	505
20	447	962	1134	1205	1398	1524	1599	1332	1843	1628	1113	514
40	435	612	616	700	861	1451	1433	1284	1650	1604	1093	510
60	406	519	527	516	529	844	770	990	1593	1522	1195	541
80	413	527	522	519	527	605	648	543	1156	1589	799	546
100	391	540	520	567	592	659	687	655	756	1467	565	993
120	393	511	493	579	612	721	627	624	758	1031	610	935
140	422	513	506	576	584	717	656	719	710	792	730	963
160	423	522	538	546	631	728	680	738	712	759	703	771
180	404	533	548	529	607	716	716	719	706	881	665	647
200	396	501	537	540	621	766	701	724	709	915	710	683
220	417	483	557	564	583	731	737	733	702	912	751	658
240	412	496	545	556	596	755	718	684	729	940	752	682
260	409	472	537	585	635	753	718	684	712	903	726	665
280	421	512	548	576	642	728	700	684	696	897	638	479
300	402	522	545	572	625	714	688	693	730	902	659	498

6. SONUÇLARIN İRDELENMESİ

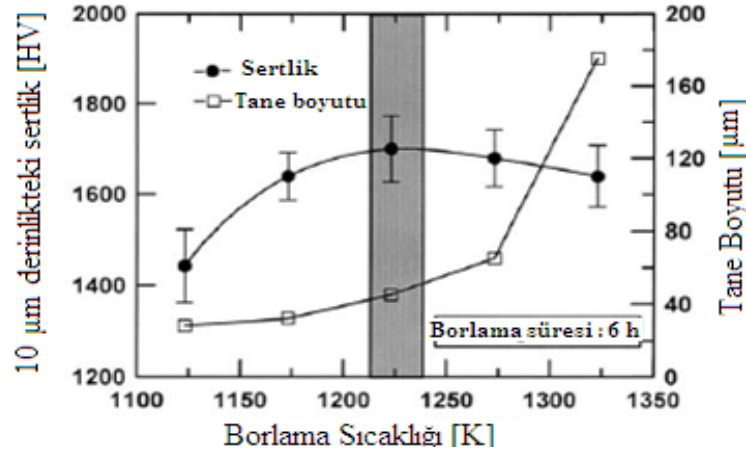
Yapılan çalışmada, molibden esaslı yüksek hız çeliği olan AISI M2 çeliği, 900, 1000 ve 1100 °C sıcaklıklarda ve 2, 4, 6 ve 8 saatlik sürelerde termokimyasal olarak katı borlama yöntemi ile EKabor®-2 toz ortamında borlanmıştır. Borlama işlemi sonrasında, borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak AISI M2 malzemesinin mikroyapı resimleri alınmış ve incelenmiş ve borür tabakasının kalınlığı ve yüzeyden itibaren belli aralıklarla 300 µm mesafeye kadar olan sertlik değerleri ölçülmüştür. Elde edilen verilere göre aşağıdaki sonuçlara varılabilmektedir.

- Yapılan optik incelemeler sonucunda borlama işlemi malzemede borür tabakası, difüzyon (geçiş) bölgesi ve bordan etkilenmeyen matristen (çekirdek) oluşan üç farklı bölgenin oluşumunu sağlamıştır ve bu bölgeler birbirinden belirgin bir şekilde ayrılmaktadır.
- İşlem şartlarına bağlı olarak hem tek fazlı Fe₂B, hem de çift fazlı FeB ve Fe₂B içerikli borür tabakalarının meydana geldiği görülmektedir. Dağlama ile elde edilen renk farkından dolayı yüzeye yakın olan tarafta FeB fazı (Fe₂B fazına göre daha koyu renkli), bunun altında yer alan kısım ise Fe₂B fazı (FeB fazına göre daha açık renkli) kalitatif olarak ayırt edilmektedir. Özellikle 1000 ve 1100°C’de borlanan numunelerde çift fazlı yapı daha belirgin olarak görülmektedir. Kaynaklar, sürenin uzaması ve sıcaklığın artmasının, her zaman yüzeyde FeB oluşumuyla sonuçlandığını belirtmektedir (Matuschka, 1980; Çelikyürek, 2006). Bununla birlikte alaşım elementlerine bağlı olarak krom borür, molibden borür gibi diğer borür bileşiklerinin oluşumu da tahmin edilmektedir.
- FeB ve Fe₂B fazlarından oluşan borür tabakasının dişli/kolonsal yapısı ve kalınlığı, alaşım elementlerinin etkisine bağlı olarak alaşımsız çeliklere göre diş derinliği daha az ve daha düz ve geniş, tabaka kalınlığı da daha ince bir görünümde dir. Söz

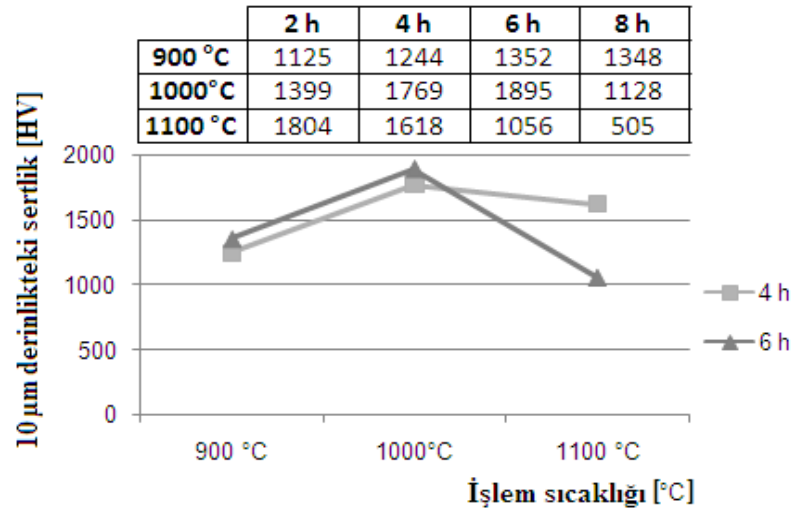
konusu malzeme için bu alaşım elementleri krom, molibden, vanadyum ve volframdır. Ayrıca Matuschka' ya göre karbon oranının da diğer çelik malzemelere kıyasla yüksek olması borür tabakasının dişli yapısını ve kalınlığını azaltmaktadır.

- Oluşum sertlik açısından incelendiğinde en sert kısmın, seramik esaslı olan borür tabakasında olduğu, geçiş bölgesinde önemli bir düşüştü sonra çekirdek bölgesi sertlik değerinin elde edildiği görülmektedir. Burada geçiş bölgesindeki sertlik değeri, nispeten çekirdek sertliğinin de altına inip tekrar çekirdek sertliğine ulaşmaktadır. Buna sebep olarak, geçiş bölgesinde alaşım elementleri miktarının artması ve yavaş soğuma nedeniyle bölgede kalıntı ostenit birikmesinin olduğu düşünülmektedir. Alaşım elementinin miktarının artmasıyla borür tabakası içerisinde çözünen alaşım elementlerinin borürleri, sertliğin artmasına sebep olduğu kaynaklarda belirtilmektedir. Özbek 1999 yılındaki AISI M2, AISI M50 ve AISI W2 çeliklerini kullanarak yaptığı çalışmasında, malzemede bulunan krom, molibden ve vanadyumun sertliği artırıcı etkisinin olduğunu belirtmektedir.
- Borlama süre ve sıcaklığının artmasıyla birlikte, borür tabakasında oluşan çatlaklar ve porozite (gözeneklilik) ile tane büyümesinin etkisiyle elde edilen borür tabakasının kalitesinde azalmalar görülmektedir.
- Özellikle FeB ve Fe₂B fazlarını içeren çift fazlı borür tabakasının yüzeyine paralel doğrultuda, bu iki fazın arayüzeyi boyunca çatlakların oluştuğu gözlenmektedir (Bkz. Şekil 5.2-5.13). Bu çatlaklar, FeB fazındaki çekme ve Fe₂B fazındaki basma gerilmeleri sebebiyle kalıntı gerilmelerden kaynaklanmakta ve tabakanın özellikle mekanik yüke maruz kalması halinde özelliklerini kaybetmesine sebep olduğu bilinmektedir.
- Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde 900 ve 1000 °C' lerdeki numunelerde, borür tabakasındaki porozitenin sıcaklık ve süre arttıkça sayısal ve boyutsal olarak arttığı görülmektedir.

- Özellikle 1100 °C'de yapılan çalışmaların geçiş bölgesi uzunluğuna etki ettiği ve geçiş bölgesinin bu numunelerde çok büyüdüğü görülmektedir. Bu büyüme, malzemede bulunan karbürlerin diğer işlem sıcaklıklarına göre daha fazla çözünerek, serbest kalan elementlerin matrise doğru daha fazla ve daha seri ötelenmesi ile açıklanabilir. Ayrıca 1100 °C'de 6 saat işlem gören numune görüntüsüne bakıldığında, diğer numunelerden farklı olarak fazlar arası kontrastın çok daha belirgin olarak ortaya çıktığı ve yüzeye yakın fazın 1100°C 8 saatte matrise doğru daha geniş bir alana yayıldığı görülmektedir.
- 1100 °C'de 6 ve 8 saatlik sürelerde borlanan numunelerin sertlik değerlerinde kayda değer bir düşüş görülmektedir. Bu düşüşün temel nedenlerinden biri borür tabakasında oluşan FeB fazının aşırı kırılmalı yapısı olduğu söylenebilir. FeB ve Fe₂B fazlarının farklı yönlerde gerilme ile yükleniyor olması nedeniyle fazlar arası çatlakların özellikle bu sıcaklıklarda artması da sertlik değerlerindeki düşüşte önemli rol oynamaktadır. Ayrıca 1100 °C gibi yüksek sıcaklıklarda, 6 ve 8 saat gibi uzun sürelerde borür tabakası yüzeyinde tamamen, çok sert ve oldukça kırılmalı olan FeB fazının oluştuğu bilinmektedir. Özbek 1999 yılındaki çalışmasında 1050 °C'de 8 saat borlanan M50 çeliği numunesine yapılan XRD analizi sonucu tabakada Fe₂B fazını tespit edememesi ve Çelikiyürek de 2006 yılındaki demir aluminatları borladığı çalışmasında 1000 °C'de 6 saatlik sürede işlem gören numunede yüzeyde sadece FeB fazının oluşumundan bahsetmesi bunu desteklemektedir.
- Bunlara ilave olarak Genel ve arkadaşları 2002 yılında AISI W1 (C % 0.85, Cr % 0.18, Mn % 0.36, Si % 0.24 içerikli) malzemesi için 1123 ile 1323 °K sıcaklıkları arasındaki çalışmasında yüksek sıcaklıklardaki ya da belli sıcaklık değerinin üzerindeki sertlik düşüşünün, tane büyümesine bağlanabileceğini ve bu düşüşün Şekil 6.1'de belirtilen grafikte olduğu gibi değişeceğini belirtmektedir. Mevcut çalışmada da 2 ve 4 saatlik sürelerde bu durumu destekleyen sertlik değerleri elde edilmiştir ve Şekil 6.2'de grafiklendirilmiştir.



Şekil 6.1. Genel ve arkadaşlarına göre sıcaklığın artmasına bağlı olarak sertlikteki düşüş değişimi (Genel vd, 2002).



Şekil 6.2. Yüzeyden 10 µm mesafede 4 ve 6 saatlik işlem süreleri için sıcaklığına bağlı sertlik değişimi

- Genel olarak bakıldığında elde edilen verilere göre, düşük işlem sıcaklığı ve uzun süreler ile yüksek sıcaklık ve düşük sürelerde, yüksek sertlik değerleri elde edildiği görülmektedir. En yüksek sertlik değerleri 1100 °C'de 2 saatlik numune için yüzeyden 20 µm mesafede 1843 HV_{0.25} ile ve 1000 °C'de 6 saatlik numune için yüzeyden 10 µm mesafede 1895 HV_{0.25} ile ölçülmüştür.

- Aynı cins borür tabakasındaki sertlik değerlerinde meydana gelen farklılıklar, borür tabakasındaki porozite ve çatlak oluşumuna, yoğunluklarına, borürlerin farklı elastik-plastik davranış göstermesine, yönlenme farklılıklarına, olası empüritelerin yoğunluğuna, kolon ve geçiş bölgesinin boylarına ve Vickers sertlik ucunun hangi tane üzerinden değer aldığına bağlı olarak değişmesi olasılıkları ile izah edilebilir.
- Tabaka kalınlığındaki artış, borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak değişme göstermektedir. Kısa süre ve düşük sıcaklıklarda elde edilen tabaka kalınlığı daha az iken, sıcaklık ve süre arttıkça tabaka kalınlığı artmıştır. Borür tabaka kalınlığı ise 14-126 µm arasında elde edilmiştir.
- Borür tabakasının hemen altında malzeme bileşimindeki oranlar ile işlem sıcaklığı ve süresine bağlı olarak, kalınlığı farklı değerler alabilen ve perlitçe zengin bir yapı olan (Özbek, 1999) geçiş (difüzyon) bölgesi gözlenmektedir. Borlama işlemi sırasında malzemenin bileşiminde bulunan elementler yeniden dağılmakta ve bu arada FeB ve Fe₂B tabakalarının bu elementleri çözündürmemesinden dolayı bor difüzyonu sırasında borür tabakasından içeriye doğru itilmekte ve böylece geçiş bölgesi oluşmaktadır. Borür tabakasından içeriye doğru yayılan karbon ve silisyum elementlerinin literatürden edinilen bilgilere göre (Matuschka, 1980) bu bölgede etkili olduğu düşünülmektedir.

Sonuç olarak, mevcut çalışmada AISI M2 malzemesinin borlama işleminden elde edilen veriler literatürde bahsi geçen verilerle genel anlamda özellikle de sertlik ve tabaka kalınlıkları açısından uygunluk göstermektedir. Ancak AISI M2 malzemesinin borlama işlemi sonucunda, büyük ölçüde tabaka yüzeyine hakim aşırı kırılğan FeB fazı ile kalıntı gerilmeler kaynaklı çatlaklar ve gözenekli yapının oluşumu sebebiyle yüksek işlem sıcaklığı ve süresinden kaçınılmalıdır.

Daha sonraki çalışmalar için, farklı ortam ve koşullarda gerçekleştirilecek borlama işleminin borlama tabakasının metalografik yapısı ve büyüme kinetiğinin yanında, aşınma,

sürtünme, korozyon ve oksidasyon gibi tribolojik özellikleri incelenebilir. Ayrıca tek fazlı (Fe_2B) borür tabakalarının oluşturulması dolayısıyla kalıntı gerilmeler kaynaklı çatlakların giderilmesi için çalışılabilir ve bunun için farklı borlama yöntemleri (termal çevrimli, CVD ve PVD kaplamalar gibi) uygulanabilir. Borür tabakasının oluşumunda hangi fazların meydana geldiğinin anlaşılması amacıyla da XRD ve SEM analizleri yapılabilir ve gözenekli yapının oluşum sebepleri ve önlenmesi için çalışılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akbayır, Ö., 2005, Borlanmış AISI 1030 çeliğinin bazı özellikleri, Yüksek lisans tezi, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 92 s.
- Atar, E., Kayali, E. S., Cimenoglu, H., 2007, Characteristics and wear performance of borided Ti6Al4V alloy, *Surface and Coatings Technology*, 202, 4583-4590
- Atik, E., 1997, Çeliklerin borlanarak aşınma dayanımlarının artırılması, TMMOB Makina mühendisleri odası, Mühendis ve makine dergisi, Cilt 38, Sayı 445, 17-20
- Ayter, T., 2005, Borlama işleminin çeliklerin yüzey kalitesi ve aşınma davranışına etkisinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, 99 s.
- Barış, M., 2007, Farklı borlama sürelerinin transmisyon çeliğinde abrasiv aşınma davranışlarına etkisinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Ankara, 66 s.
- Baştürk, S. ve Erten, M., 2006, Borlama ile yüzey sertleştirme çalışmaları, TMMOB Makina mühendisleri odası, Mühendis ve makine dergisi, Cilt 47, Sayı 563
- Bayça, S.U. ve Şahin, S., 2004, Borlama, Mühendis ve Makine, 532, 51-59.
- Bejar, M.A., Moreno, E., 2004, Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 173, 352-358
- Bindal, C., Ucisik, A.H., Characterization of boriding of 0.3% C, 0.02% P plain carbon steel, 2007, *Vacuum*, 82, 90-94
- Boylu, K.S., Varol, R., Pek, M.A., 2003, Tam yoğun ve T/M çeliklerde karbon miktarının borür tabakası kalınlığına etkisi, TMMOB Makina mühendisleri odası, 2. Makina, tasarım ve imalat teknolojileri kongresi, Bildiriler kitabı, Yayın no: E/2003/327, Konya, 59-67
- Bozkurt, N., 1984, Bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme, Doktora Tezi, İTÜ.
- Campos, I., Ramirez, G., Figueroa, U., Martinez, J., Morales, O., 2006, Evaluation of boron mobility on the phases FeB, Fe₂B and diffusion zone in AISI 1045 and M2 steels, *Applied Surface Science*, Volume 253, 3469-3475.

- Campos, I., Rosas, R., Figueroa, U., VillaVelazquez, C., Meneses, A., Guevara, A., 2007, Fracture toughness evaluation using Palmqvist crack models on AISI 1045 borided steels, *Materials Science and Engineering, A* 488, 562–568
- Campos-Silva, I., Balankin, A.S., Sierra, A.H., Lopez-Perrusquia, N., Escobar-Galindo, R., Morales-Matamoros, D., 2008, Characterization of rough interfaces obtained by boriding, *Applied Surface Science*, 255, 2596–2602
- Cerit, A.M., 1996, Üretim ve tasarım, Makina mühendisliği el kitabı, TMMOB Makina mühendisleri odası, Cilt 2, Yayın no:170, 253-257
- Culha, O., Toparli, M., Sahin, S., Aksoy, T., 2007, Characterization and determination of Fe_xB layers' mechanical properties, *Journal of Materials Processing Technology*, 206, 231-240
- Çalık, A., Delikanlı, K., Uzun, A., 2004, Ç1035 Çeliğin borlama özelliklerinin incelenmesi, II.Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir, 237-242
- Çelikyürek, İ., 2006, Demir aluminatların borlanması ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi, Doktora tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 174 s.
- Delikanlı, K., Ulusoy, N., Uzun, H.A., 2003, Yüzeyleri borlama ile yüzeyleri sertleştirilen Ç1040 çeliğinin abrasiv aşınma ve korozyona karşı dayanımı, TMMOB Makina mühendisleri odası, 2. Ulusal demir-çelik sempozyumu ve sergisi, Bildiriler kitabı, Yayın no: E/2003/336, Ankara, 59-66
- Er, Ü., 2003, Bor yayınımla yüzeyi sertleştirilmiş çeliklerin aşınmaya karşı dayanımlarının ve pulluk uç demirlerinde uygulama olanaklarının araştırılması, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 124 s.
- Er, Ü. ve Par, B., 2004, Bor yayınımla yüzeyi sertleştirilmiş AISI 1030 ve AISI 1050 çeliklerinin abrazif aşınma dayanımlarının incelenmesi, Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 17, 12 s.
- Ersöz, A., 2008, Elektrokimyasal borlama ile çeliklerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 91 s.
- Genel, K., Özbek, İ. and Bindal, C., 2002, Kinetics of boriding of AISI W1 steel, *Materials Science Engineering, A* 347, 311-314
- Hutchings, I.M., 1992, Surface engineering in tribology, chapter 8, In: *Tribology: Friction and wear of engineering materials*, Edward Arnold Pub., London, 273 p.

- Karakan, M., A. Alsaran ve A. Çelik, 2002, Plazma borlama, Mühendis ve Makine, 43, 512, 51-54.
- Li, C., Shen, B., Li, G., Yang, C., 2008, Effect of boronizing temperature and time on microstructure and abrasion wear resistance of Cr12Mn2V2 high chromium cast iron, Surface and Coatings Technology, 202, 5882-5886
- Martini, C., Palombarini, G., Poli, G., Prandstraller, D., 2003, Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings, Wear, 256, 608-613
- Matuschka, A.G., 1980, 'Boronizing' Carl Hanser Verlag, München.
- Meric, C., Sahin, S., Backir, B., Koksall, N.S., 2004, Investigation of the boronizing effect on the abrasive wear behavior in cast irons, Materials and Design, 27, 751-757
- Nair, F., 1996, Koruyucu gaz atmosferinde macun borlama tekniği ile çelik yüzeylerinin sertleştirilmesi, Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 65 s.
- Özbek, İ., 1999, Borlama yöntemi ile (AISI M50, AISI M2) yüksek hız çeliklerinin ve AISI W1 çeliğinin yüzey performanslarının geliştirilmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya, 161 s.
- Özbek, İ. and Bindal, C., 2001 Mechanical properties of boronized AISI W4 steel, Surface and Coatings Technology, 172, 14-20
- Özbek, İ., Sen, S., Ipek, M., Bindal, C., Zeytin, S. and Ucisik, H., 2004, A mechanical aspect of borides formed on the AISI 440C stainless-steel, Vacuum, 73, 643-648
- Özdemir, Ö., Usta, M., Bindal, C., Ucisik, A.H., 2006, Hard iron boride (Fe₂B) on 99.97 wt. % pure iron, Applied Surface Science, 255, 2596-2602
- Özenbaş, M. ve Yılmaz, O., 2004, FeCrC, WC ve B₂O₃ kullanılarak kaplanmış AISI 4340 çeliğinin aşınma karakteristiği, II. Uluslararası bor sempozyumu, 201-205
- Özmen, T., 2007, Katı ortamda borlanmış DDK 60 dökme demirin borür tabakası büyüme kinetiği ve aşınma özelliklerinin incelenmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, FBE Metalurji Müh. A. B.D, Y. Lisans tezi, 85 s.
- Özsoy, A., 1991, Çeliğin borlanması borür tabakası geçiş zonu ve ana matriksin özelliklerinin iyileştirilmesi, Yüksek lisans tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 91 s.

- Sahin, S., 2008, Effects of boronizing process on the surface roughness and dimensions of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2714, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 1736-1741
- Sarı, N.Y., Akay, S., Kaluç, E., 1997, Aşınmayı önlemede etkili yöntemler, *Makina mühendisleri odası, Mühendis ve makine dergisi*, Cilt 38, Sayı 450, 16-23
- Saygın, M., 2006, AISI 1020 çeliklerinde borlamanın yorulma dayanıma etkisi, Yüksek lisans tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 46 s.
- Selçuk, B., 1994 Borlanmış AISI 1020 ve 5115 çeliklerinin sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 156 s.
- Sen, S., Ozbek, I., Sen, U., Bindal, C., 2000, Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel, *Surface and Coatings Technology*, 135, 173-177
- Sen, U., Sen, S., Koksal, S., Yılmaz, F., 2004, Fracture toughness of borides formed on boronized ductile iron, *Materials and Design*, 26, 175-179
- Selçuk, B., Ipek, R. and Karamıs, 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*, Volume 141, Issue 2, 189-196.
- Sinha, A.K., 1991, *ASM Handbook*, Vol 4. Boriding (Boronizing).
- Soydan, Y., 1996, Katı ortamda bor yayınımlı ile sertleştirilen çelik yüzeylerinin kuru kayma halinde sürtünme ve aşınma davranışları, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 149 s.
- Subaşı, Y., 2006, Döküm yüksek hız çeliklerinde mikroyapısal karakterizasyon; mikroyapı-mekanik özellikler ilişkisinin belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 207 s.
- Şimşek, M., 2005, İçten yanmalı motorlarda borlama ile mukavemet özelliklerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 104 s.
- Tabur, M., Izciler, M., Gul, F., Karacan, I., 2009, Abrasive wear behavior of boronized AISI 8620 steel, *Wear*.
- Taktak, S., 2006, Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels, *Materials and Design*, 28, 1836-1843

- Taktak, S., 2006, Tribological behaviour of borided bearing steels at elevated temperatures, *Surface and Coatings Technology*, 201, 2230-2239
- Tayanç, M., Zeytin, G., 2000, Yüksek hız çeliklerinin iç yapı ve ısıtılma özellikleri, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Balıkesir, 20 s.
- Uluköy, A., 2005, 21NiCrMo2 (AISI 8620) çeliğinden yapılmış dişli çarklara karbürleme ile beraber borlama işleminin uygulanması, Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 114 s.
- Ulutan, M., 2007, AISI 4140 çeliğinin yüzey sertleştirme işlemleri ve kaplama yöntemleri sonrası mekanik davranışlarının araştırılması, Doktora tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 268 s.
- Uslu, I., Comert, H., Ipek, M., Celebi, F.G., Özdemir, O., Bindal, C., 2006, A comparison of borides formed on AISI 1040 and AISI P20 steels, *Materials and Design*, Volume 28, 1819-1826
- Uzun, H.A., 2002, Borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları, Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 75 s.
- Yıldızlı, K., 2002, Borlamanın çeliklerde eroziv aşınma davranışına olan etkilerinin deneysel olarak incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 154 s.
- <http://www.dtm.gov.tr/dtmadmin/upload/EAD/KonjokturIzlemeDb/bor.doc>, Nisan, 2009.