

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**16MnCr5 ÇELİĞİNİN BORLAMA VE TERMAL ÇEVİRİMLİ BORLAMA
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Ahmet KOÇASLAN

**Danışman
Prof. Dr. Adnan ÇALIK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2016**



©2016 [Ahmet KOÇASLAN]

TEZ ONAYI

Ahmet KOÇASLAN tarafından hazırlanan "16MnCr5 Çeliğinin Borlama ve Termal Çevrimli Borlama Özelliklerinin Araştırılması" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Prof. Dr. Adnan ÇALIK
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Abdullah ÖZSOY
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi

Doç. Dr. M.Serdar KARAKAŞ
Çankaya Üniversitesi

Enstitü Müdürü

Doç.Dr. Yasin TUNCER

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Ahmet KOÇASLAN



İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	i
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Borlama Nedir?	2
1.2. Borlamanın Avantajları	4
1.3. Borlamanın Dezavantajları	4
1.4. Termal Çevrimli Borlama	5
2. BORLAMA YÖNTEMLERİ.....	8
2.1. Kutu (Toz Ortamda) Borlama	8
2.2. Sıvı Borlama	10
2.3. Gaz Borlama.....	10
2.4. Pasta (Macun) Borlama.....	11
2.5. Plazma (İyon) Borlama	12
2.6. Fe-B İkili Denge Diyagramı	12
2.7. Borür Tabakası	14
2.8. Geçiş Bölgesi	15
2.9. Borür Tabakası Özellikleri.....	16
2.9.1. Borür tabakasının kalınlığı.....	16
2.9.2. Borür tabakasının sertliği	17
2.9.3. Borür tabakasının korozyon dayanımı	19
4. MATERYAL VE YÖNTEM	26
4.1. Borlama İşlemi	26
4.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	27
4.3. Borlama İşlemi	27
4.4. Karakterizasyon Çalışmaları	30
4.4.1. Metalografik inceleme	30
4.4.2. Mikro yapı incelemeleri	30
4.4.2.1. Optik mikroskop incelemeleri.....	30
4.4.2.2. SEM mikroskobu incelemeleri.....	31
4.4.3. Mikro sertlik ölçümü.....	32
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME	33
5.1. Mikro Yapı (Optik Mikroskobu) İnceleme Sonuçları.....	33

5.2. Mikro Sertlik Sonuçları.....	34
5.3 Mikro Dağlama Sonuçları.....	41
5.4. Çekme Testi Sonuçları.....	42
5.5. SEM-EDS Analiz Sonuçları.....	43
6.TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	47
KAYNAKLAR.....	49
ÖZGEÇMİŞ.....	52



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

16MnCr5 ÇELİĞİNİN BORLAMA VE TERMAL ÇEVİRİMLİ BORLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Ahmet KOÇASLAN

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Adnan ÇALIK

Bu çalışmada borlanan numune olarak 16MnCr5 sementasyon çeliği seçilmiştir. Bu çelik amaca uygun olarak 10x10 mm ebatlarında giyotin makasıyla kesilmiştir. Kesilen numunelerin borlama ısıl işlemi katı ortamda Ekabor-1 tozu kullanılarak 1000 °C'de 16 saat yapılmıştır. Bunun yanında termal çevrimli borlama ile karşılaştırma yapılması için 1000°C'de 5'er saat bekletilerek 3 defa termal çevrimli borlama işlemi yapılmıştır. İki farklı yöntem kullanılarak borlama yapılan numune birbirleriyle mikro yapısal ve mekanik açıdan karşılaştırılmıştır. Daha önceki akademik çalışmalarda oluşan borür tabakalarına sıcaklığın, sürenin, borlama sonrası ısıl işlemlerin ve borlayıcı tozlara alüminyum, krom, titanyum, silisyum ve vanadyum bileşiklerinin ilavesinin etkisi incelenmiştir. Ancak son yıllardaki çalışmalara bakıldığında 16MnCr5 sementasyon çeliğinin borlanması sonucunda oluşan borür tabakasının bileşimine, kalınlığına etkisini inceleyen çalışmaların varlığı gözlenmemiştir. Dolayısıyla bu çalışmanın yapılmasıyla literatüre katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

Dünyanın en zengin bor rezervelerine sahip olan ülkemizde borlama, önümüzdeki yıllarda muhtemelen en çok kullanılacak yüzey sertleştirme yöntemi olacaktır.

Borür katkısının oluşan kaplamanın özelliklerine etkisi incelenmiştir. Mekanik özellikleri standart kaplamalara göre üstün olan bir borlama yönteminin geliştirilmesi halinde bu yöntemin daha yaygın kullanım alanı bulacağı düşünülmektedir. Borlama işlemine tabi tutulmuş karbon çelikleri, çok pahalı olan bazı süperalaşım, titanyum alaşımları gibi malzemelerin yerini alabilecek potansiyeldedir. Uygulandıkları sahalarda performans artışı sağlayacak daha uzun ömürlü, daha dayanıklı borür kaplamalarının oluşturulması tezin özgün değerinin yüksek olduğunu gösterir.

Anahtar Kelimeler: Çelik, Borlama, Termal Çevrimli Borlama.

2016, 52 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF 16MnCr5 STEEL FOR BORING AND THERMAL INTERRUPTED BORIDING PROPERTIES

Ahmet KOÇASLAN

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Manufacturing Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Adnan ÇALIK

In this study, samples to boriding as 16MnCr5 carburizing steel was chosen. In pursuance of this objective it has been cut with a guillotine in steel 10x10 mm. boriding heat treatment of 1000 °C for 16 h interrupted sample was performed using gentry-1 powder in solid medium. In addition, thermal cycle at 1000 ° C for 5 h to 3 times a thermal cycle for a comparison was made with boriding boriding. Boriding made using two different methods were compared with each other in terms of microstructural and mechanical. The temperature of the pipe layer formed in earlier academic study period, boriding and borlayıc powder after heat treatment of aluminum, chromium, titanium, the effect of addition of silicon and vanadium compounds have been studied. However, when we look at the work in recent years 16MnCr5 steel cementation of boriding the result of the composition of the boride layer formed, the existence of studies examining the effect of thickness was observed. Therefore it thought to contribute to the literature by conducting this study.

The world's richest boron reserves in our country with the boriding, surface hardening methods will probably be used much in the coming years.

The effect on the properties of the coating formed boride contributions will be examined. Improving the mechanical properties of a boriding method is superior to the standard coating of this method is expected to find more widespread use. subjected to boriding carbon steels, superalloys are some very expensive, the potential to replace materials such as titanium alloys. They are applied in the field to provide increased performance last longer, creating more resistant boride coating shows that the high value of the original thesis.

Keywords: Steel, Boronizing, Thermal Boronizing.

2016, 52pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kutu borlama işlemi a) Numune kutusunun hesaplanması, b) Numunenin fırınlanması (Uluköy ve Can 2006, Barış, 2007)	9
Şekil 2.2. Fe-B ikili denge diyagramı (John and Sammels 1981, Özbek 1999).	13
Şekil 2.3. Borür tabakası çeşitleri (Yapar vd. 2002).	14
Şekil 2.4. Ekabor-1 ile borlanmış Ck 45 çeliğinin, tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklığa bağlı olarak değişimi (Matuschka 1980, Ayter 2005	17
Şekil 2.5. Borlu ve sementasyonlu tabakalardaki sertlik dağılımları (Matuschka 1980, Yurtseven 2008).....	18
Şekil 2.6. Ck 45 çeliğinin 56 °C 'de, bazı asitlere karşı korozyon direnci (Matuschka 1980).	19
Şekil 4.1. Deneyde kullanılan ekipmanlar: (a) Nüve marka kül fırını (b) Seramik potalar ve Ekabor-1 tozları (c) Numunelerin üst kısmının Ekrit tozu ile kapatılması (d) Potaların kapaklarının kapatılması (e) Fırın içerisindeki seramik potalar (f) Numunelerin seramik pota içerisindeki görüntüsü	29
Şekil 4.2. Numune parlatması için kullanılan parlatma cihazı30	
Şekil 4.3. Olympus marka (GX51) optik mikroskob	31
Şekil 4.4. Taramalı elektron FEI Quanta FEG 650 mikroskobu31	
Şekil 4.5. Mikro sertlik ölçüm cihaz	32
Şekil 5.1. Sol sütunda (a ve b) 16MnCr5 çeliği, 1000°C'de Ekabor-1 ile borlanmış 5'er saat bekletilerek 3 defa termal çevrim yapılmış 5x,10x yaklaştırılmış optik mikro yapı görüntüsü sağ sütunda (c ve d) 16MnCr5 çeliği, 1000°C'de 16 saat Ekabor-1 ile borlanmış, 5x,10x yaklaştırılmış optik mikro yapı görüntüsü.....	33
Şekil 5.2. Sol sütunda (a ve b) 16MnCr5 çeliği, 1000°C'de Ekabor-1 ile borlanmış 5'er saat bekletilerek 3 defa termal çevrim yapılmış 20x,50x, yaklaştırılmış optik mikro yapı görüntüsü sağ sütunda (c ve d) 16MnCr5 çeliği, 1000°C'de 16 saat Ekabor-1 ile borlanmış 20x,50x, yaklaştırılmış optik mikro yapı görüntüsü.....	34
Şekil 5.3. 1000°C'de 5 saat bekletilerek 3 defa termal çevrim yapılmış 16MnCr5 çeliğini yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak mikro sertlik değişimi	35
Şekil 5.4. 16MnCr5 çeliği, 1000°C'de Ekabor-1 ile borlanmış 5'er saat bekletilerek 3 defa termal çevrim yapılmış (1,3,5,7,9,11). Ölçüm mikro sertlik izlerinin görüntüsü	36
Şekil 5.5. 16MnCr5 çeliği, orijinal işlem görmemiş (1,3,5,7,9,11). Ölçüm mikro sertlik izlerinin görüntüsü	38
Şekil 5.6. 1000°C'de normal borlama yapılmış 16MnCr5 çeliğinin yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak mikro sertlik değişimi.....	39
Şekil 5.7. 16MnCr5 çeliği, normal borlama yapılmış (1,3,5,7,9,11). Ölçüm mikro sertlik izlerini görüntüsü.....	40
Şekil 5.8. 16MnCr5 çeliğinin termal (a,b,c) ve normal (d,e,f) borlama yapılmış mikro dağlama görüntüleri	41
Şekil 5.9. 1000°C 5 er saat bekletilerek 3 defa termal çevrimle borlanmış numunenin çekme testi grafik sonuçları.....	42

Şekil 5.10. 1000 °C normal normal borlanmış numunenin çekme testi grafik sonuçları	43
Şekil 5.11. (a,b) 16MnCr5 çeliği 1000°C’de borlanmış 5’er saat bekletilerek 3 defa termalçevrim yapılmış ve (c,d) 1000°C’de 16 saat normal borlanmış numunenin SEM görüntüleri	44
Şekil 5.12. 16MnCr5 çeliğin yüzeyden derinliğe göre yoğunluk şematik gösterimi.	44
Şekil 5.13. (a,b) 16MnCr5 çeliği 1000°C’de borlanmış 5’er saat bekletilerek 3 defa termal çevrim yapılmış ve (c,d) 1000°C’de 16 saat normal borlanmış numunenin SEM görüntüleri	45
Şekil 5.14. 1000°C’de 16 saat borlanmış x-ışınları difraktogramı	46
Şekil 5.15. 1000°C’de borlanmış 5’er saat bekletilerek 3 defa termal çevrim yapılmış x-ışınları difraktogramı	46



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.%0,45 C’lu çelikte, borlama sonrası uygulanan ısıt işlemlerle matris malzeme özgül hacminin değişimi (Liliental, W.and Tacikowski, J. 1980)..	5
Çizelge 2.1. Sıvı ortam borlamasında kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri (Matuschka 1980)	10
Çizelge 2.2. Macunla borlamada kullanılan koruyucu gazlar ve özellikleri (Çalık 2005).....	12
Çizelge 2.3. Borlama ve diğer işlemlerle elde edilmiş yüzeylerin sertlik değerleri (Bozkurt 1984, Yurtseven 2008).....	18
Çizelge 4.1. 16MnCr5 çeliğinin kimyasal bileşimi. @kalitemetalurji.com.tr,(2016).....	26
Çizelge 4.2. (16MnCr5) ısıt işlem bilgileri. @kalitemetalurji.com.tr,(2016)	27
Çizelge 5.1.16MnCr5çeliği, 1000°C’de Ekabor-1 ile borlanmış 5’er saat bekletilerek 3defa termal çevrim yapılmış mikro sertlik borür tabaka kalınlıkları ve tabaka kalınlıklarına ait sertlik değerleri	35
Çizelge 5.2. 16MnCr5çeliği orijinal işlem görmemiş mikro sertlik değerleri	37
Çizelge 5.3. 16MnCr5 çeliği, 1000°C’de Ekabor-1 ile normal borlanmış mikro sertlik borürtabaka kalınlıkları ve tabaka kalınlıklarına ait sertlik değerleri	39
Çizelge 5.4. 1000 °C 5 er saat bekletilerek 3 defa termal çevrimle borlanmış numuneninçekme testi sonuçları.....	42
Çizelge 5.5. 1000°C normal borlanmış numunenin çekme testi sonuçları	42

TEŐEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Adnan ÇALIK'a teőekkür ederim.

4077-YL1-14 numaralı projem için maddi ve manevi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na en kalbi duygularıyla teőekkürü bir borç bilirim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ahmet
KOÇASLAN
ISPARTA, 2016

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AISI	AmericanIronand Steel Institute
B	Bor
Fe	Demir
FeB	Demir Borür
Fe ₂ B	Demir İki Borür
B ₄ C	Bor karbür
°C	Santigrat Derece
EDS	EnergyDispersiveSpectrometry
HV	Vickers sertlik değeri
mm	Milimetre
µm	Mikrometre
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X Işını Kırınımı
P	Basınç
t	Zaman
T	Sıcaklık
Al	Alüminyum
C	Karbon
Si	Silisyum
SiC	Silisyum karbür
Ti	Titanyum
V	Vanadyum
MnB	ManganBorür

1. GİRİŞ

Borlama, bor atomlarının metal yüzeyine difüzyonu ile malzeme yüzeyini güçlendiren bir termokimyasal yüzey sertleştirme ve iyileştirme işlemidir. Borlama, metal ve alaşımların yüzeylerinde sertlik, aşınma direnci ve korozyon direncini artırırken, aynı zaman içinde bu özellikleri yüksek sıcaklıklarda muhafaza etmek ve erozyon direncini de arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Borlama, endüstriyel olarak daha çok demir esaslı alaşımlara (alüminyum ve silisyum içeren yatak çelikleri dışında, yüzeyi sertleştirilmiş, temperlenmiş, takım çelikleri ve paslanmaz çeliklere, döküm çeliklerine, gri ve küresel grafitli dökme demirlere, sinterlenmiş demir ve çeliklere) uygulanmaktadır.

"Borieren", "Boriding" veya "Boronizing" adıyla anılan Borlama işlemi, demirli, demirli olmayan ve sinterlenmiş karbür malzemelerin geniş bir bölümüne uygulanabilen termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Bu işlem; malzemeyi 700 °C ile 1000°C sıcaklıklar arasında tercihen 1 - 16 saat süre ile katı bor tozu (bor kaplama bileşimi) pasta, sıvı, gaz veya plazma şeklindeki bir ortamda ısıtılmasından ve bekletilmesinden ibarettir (Çalık ve Özsoy, 2002; Tezcan, 1996; Sinha, 1991).

Borlama, demir-çelik grubu malzemelerin akma ve kopma dayanımları %10-20, yorulma dayanımları %25 ve korozyonlu yorulma ömrünü %200 arttırmasına karşın, malzemelerin plastisite özelliklerini kötü yönde etkiler. Borlama ile tungsten karbürün sertliğine eşdeğer bir sertliğin yanında, teflon malzemeninkine yakın sürtünme katsayıları elde edilebilir (Özsoy, 2001). Borlama işlemi, titanyum, titanyum alaşımları, krom, manganez, kobalt, molibden, tantal, tungsten gibi demirli olmayan malzemelere de uygulanabilir. Alüminyum alaşımları, çinko ve bakır ve bakır alaşımları borlama işlemi için uygun değildir. Fakat bu malzemeler bazı iş parçalarında bütün yüzeylerin horlanmasının istenmediği durumlarda kaplamaya karşı koruyucu bölge olarak başanlı bir şekilde kullanılmaktadır (Matuschka, 1980). Borlama işlemi gerek toz metalürjisi ve gerekse diğer metotlarla üretilen bütün demir esaslı alaşımlara başarıyla uygulanabilmektedir. Refrakter metaller (W, Ta, Mo, Zr, Hf, Nb) karbürler (özellikle Co ile bağlı WC) ve Ni esaslı alaşımlara başarı ile uygulanarak özel yapıda borlu tabakalar elde edilebilmektedir (Atik, 1997; Sinha, 1991).

Borlama işlemi; yüzeyi sertleştirilmiş çeliklere, temperlenmiş çeliklere, takım çeliklerine, paslanmaz çeliklere, dökme çeliklere, dökme demirlere, sinterlenmiş metal tozlarına, nikel, kobalt, molibden ve titanyum gibi demir dışı metallere ve alaşımlarına uygulanabilmektedir (Özbek, 2000).

Borlama ile elde edilen değerler, sertleştirilmiş takım çeliğinden ve sert krom kaplamadan daha yüksek olup, tungsten karbür ile eşdeğerdir (Matuschka, 1980; Sinha, 1991). Yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayısı kombinasyonu, başta adezyon ve abrazyon aşınması olmak üzere korozyon ve yüksek sıcaklık oksidasyonu hasarına karşı önemli dayanıklılık sağlar. Az alaşımlı çeliklerin aside karşı dayanımlarını (örneğin sülfürik, hidroklorik ve fosforik asit) arttırabilir. Ostenitik paslanmaz çeliklerin hidroklorik aside karşı dayanımını arttırır (Özbek ve ark, 2004).

Türkiye'nin dünyada en büyük bor rezervine sahip olan ülke olması ve bor bileşiklerinin üstün özellikleri göz önüne alındığı takdirde, bor kaplamaların insanlık açısından önemi ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla bu çalışma; 16MnCr5 çeliklerinin borlanarak sertlik ,aşınma gibi özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine yapılmıştır.

Çalışmamda 16MnCr5 sementasyon çeliği 1000°C'de 16 saat borlanmış ve 1000°C'de 5'er saat bekletilerek 3 defa termal çevrimli borlama yapılmış ve ikisi arasındaki mikro yapısal ve mekanik özellikler arasındaki farklar kıyaslanmıştır. Daha önceki araştırmalar, yüzeyi borlanmış çeliklerin yüzeyinde sürtünme katsayısının düştüğünü ve yüzey sertliğinin arttığını, aynı zamanda korozyon direncinin de geliştiğini göstermektedir. Çalışmanın bir diğer amacı da imalat sırasında yaşanan zorlukların giderilmesine ve borlanmış çeliklerin yaygınlaştırılmasına katkı sağlamaktır.

1.1. Borlama Nedir?

Borlama, termokimyasal bir yüzey sertleştirme ve geliştirme işlemi olup, esas itibariyle metal yüzeyine bor atomunun difüzyonu olarak isimlendirilebilir. Borlama teknik açıdan oldukça ilerleme kaydetmiştir. Bor atomları ısı enerjisi etkisiyle metal yüzeyine yayınırlar ve esas metal atomlarıyla uygun borürler oluştururlar. Bununla

birlikte yaygın bir şekilde sert ve aşınma direnci yüksek tabakalar oluşturma amacıyla kullanılmıştır. Bu işlem bor atomlarının metalik malzemelerin yüzeyinden içeriye yönde difüzyonu ile gerçekleşmektedir. Genellikle ince tabakalı demir borür (FeB) fazı endüstriyel uygulamalar için tercih edilmektedir. Oluşan bu tabakalar malzemeye korozyon direnci sağlamak ile birlikte, aşınmaya karşı yüzeyde yaklaşık 2100 HV değerinde sertlik değeri de kazandırmaktadır.

Borlama işlemi yapılırken kullanılan yöntem; borlama malzemesinin bileşimi, borlanacak malzeme cinsi, işlem süresi ve işlem sıcaklığı, elde edilen tabakaya etki eden değerler dikkate alınmaktadır. Genel olarak parçalar borlama ortamında, 850-1000 °C sıcaklıkta, 2-8 saat bekletilerek borlama gerçekleştirilir (Baştürk ve Erten 2006; Yurtseven 2008).

Bor demirde çok az çözünebilmektedir. α -demirinde, 910 °C civarındaki maksimum çözünebilirlik sıcaklıklarında 20-80 ppm borun çözünebildiği; buna karşılık, 1150-1170 °C sıcaklıklarda γ -demirinde 55-260 ppm bor çözünebildiği gösterilmiştir. Çözünebilirlik sınırlarının genişliğinin, esas malzemenin saflığı ve tane boyutundaki değişikliklerden kaynaklandığına inanılmaktadır (Özsoy, 1991; Yurtseven 2008) . Çelik, dökme demir, nikel alaşımları, titanyum alaşımları ve sinterlenmiş karbürlerin borlanması konusu üzerine birçok araştırma ve uygulama yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda; borlanmış malzeme yüzeyinin çok yüksek sertliğe, yüksek bir aşınma direncine ve yüksek korozyon direncine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ancak borlamanın tek dezavantajı borlanmış tabakanın kırılabilirliğinin yüksek olmasıdır (Şahin 1999).

Bor ile yapılan yüzey sertleştirmesinde, bor elementi tek başına kullanılmaz. Daha çok bor karbür (B₄C) veya borik asidin, aktivatör ve katkı maddelerinin karışımları ile yüzey sertleştirme yapılmaktadır. (Selçuk vd. 2002; Taştan 2010). Borlamanın birinci aşamasında borlayıcı ortam ve nesnenin yüzeyindeki reaksiyon partnerleri arasında reaksiyon oluşur. Taneler yüzeyde çekirdek oluşturmaktadır. Borlama süresi artması ile çekirdek oluşumu artar ve ince bir bor tabakası elde edilir. Bor, Fe₂B ve FeB yapısında çeliğin yüzeyine yayılır.

1.2. Borlamanın Avantajları

Borlama işleminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;(Yapar vd. 2002, Taştan 2010)

- Çelik alaşımlarında 1600-2800 VSD arasında yüksek sertlik değerleri elde edilebilir. Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme yöntemleri olan sementasyon ve nitrürasyona göre çok daha yüksektir.
- Borür tabakasının sertliği yüksek sıcaklıklarda (650 °C) bile sabit kalmaktadır.
- Borlanmış parçaların yorulma ömürleri özellikle korozif ortamlarda % 25 oranında artırılabilir.
- Borlama, bir iş parçasının sertleştirilmesi istenen seçilmiş bölgelerine, düzensiz karmaşık şekillere homojen bir şekilde uygulanabilir.
- Borlama demir esaslı malzemelerin seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve erozyon direncini arttırmaktadır. Borlama işlemi ile düşük alaşımlı çeliklerin H₂SO₄, H₃PO₄ ve HCl gibi asitlere karşı direncini arttırmak mümkündür.
- Borlanmış çeliklerin yüksek sıcaklıklardaki (850 °C) oksidasyon direnci ve sıcak metal korozyonuna direnci yüksektir.
- Bor bileşikleri sürtünme katsayısını düşürerek yağlayıcı kullanımını azaltmakta ve soğuk kaynaklanma eğilimini düşürmektedir.
- Borlama yüzeyi, çok hassas bir şekilde parlatılabilir.

1.3. Borlamanın Dezavantajları

Borlama işleminin dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;(Yapar vd. 2002, Taştan, 2010).

- Proses esnek olmayıp, daha çok itina ister ve bu da prosesi pahalı yapar. Gaz ortamda sementasyon ve plazma nitrürasyon gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre işçilik ve işletim maliyeti daha yüksektir.
- Borlama işlemi ile borlanan hacimde % 5-% 25' lik artış olmaktadır. Örneğin, 25µm 'lik bir tabaka kalınlığı 1,25-6,25 µm 'lik bir büyümeye neden olmaktadır.

- Çok düşük tolerans isteklerinde borlanmış yüzey sadece elmas taşlama yoluyla sağlanmaktadır. Çünkü geleneksel yöntemler yüzeyde kırılmalara sebep olur. Bu yüzden kusursuz borlama işlemleri çoğunlukla geniş kesitli parçalara uygulanır.
- Borlamadan sonra genellikle parçanın vakum ya da yansız bir ortamda sertleştirilmesine ve temperlenmesine ihtiyaç duyulur. Bu sayede borür tabakasının bütünlüğü ve sağlamlığı artırılır.
- Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde (2000 N) karbürizasyon ve nitrürasyonla kıyaslandığı zaman, çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği sebebiyle, dişli üretiminde bir sınırlama söz konusudur.

1.4. Termal Çevrimli Borlama

Termal çevrimli borlama, numuneye, sıcaklık değişimine, sıcaklığın değişim hızına ve çevrim sayısına bağlı olarak numunenin mikroyapı ve özelliklerini iyileştirmek ve geliştirmek için iş parçasının belirli sıcaklıklar arasında ısıtılıp soğutulması işleminin birden fazla kez tekrarlanmasıdır. Termal çevrim sonunda yayınma hızının arttığı, östenit tane boyutunun küçüldüğü ve üniform bir yapı oluştuğu dolayısıyla fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerin iyileştirildiği ve geliştirildiği belirtilmektedir.

Çizelge 1. %0,45 C'lu çelikte, borlama sonrası uygulanan ısı işlemlerle matris malzeme özgül hacminin değişimi (Liliental, W. and Tacikowski, J. 1980)

Borlama Sonrası uygulanan ısı işlemler	Özgül Hacim	
	Matris	Fe ₂ B
Yok	0,1276	
Normalleştirme, 900°C/h	0,1278	
Normalleştirme + Sertleştirme +Temperleme, 200°C	0,1279	0,1367
Normalleştirme + Sertleştirme +Temperleme, 450°C	0,1286	
Normalleştirme + Sertleştirme +Temperleme, 650°C	0,1280	

Pratikte termal çevrimle yayınmanın hızlandırılması; ya yayınma işleminden önce bir ön ısı işlem olarak veya işlem esnasında termal çevrimin uygulanmasıyla sağlanmaktadır. Çelik, genellikle Ac1 sıcaklığının 30-50°C üzerine ısıtılır ve Ar1

sıcaklığının 50-199°C altına soğutulur (Özsoy, A., 1991). Çevrim sayısı 100'e kadar çıkabilir.

Kristhal ve Kenis, klasik yöntemler göre, 60 dakikalık karbürleme sonucunda yayınma katsayısının 2,5-3 kat arttığı ve tabakanın sertlik, darbe tokluğu ve aşınma direnci gibi özelliklerin iyileştiği göstermişlerdir (Soydan, Y., 1996) Yayınma katsayındaki artış; tane incilmesi, faz yeniden kristalleşmesi, iç gerilmelerin oluşması ve gevşemesi ile boşluk yoğunluğundaki artmasına bağlıdır. Sabit sıcaklıkta borlama işleminde işlem süresi arttıkça tane boyutuda artar ve bazı taneler diğerlerini yok edebilir (Soydan, Y., 1996).

Aynı yöntemi kullanan (Bozkurt, N. 1984) geçiş bölgesinin, borür tabakasından 10-15 kat kadar fazla bir kalınlığa sahip olduğunu tespit etmiştir. Borür tabakasının özellikleri, borlama sonrası uygun ısıl işlemler uygulanarak tabaka ile matriks malzeme özgül hacimleri arasındaki farkın azaltılmasıyla geliştirilebilir.

(Liliental ve Tacikowski 1980) borlamadan sonra, Normalizasyon +Sertleştirme + Temperleme işleminin ana malzeme ile Fe₂B tabakası özgül hacimleri arasındaki farkı düşürdüğünü, bunun sonucu olarak; borür tabakasındaki kalıntı gerilmeler ve gevrekliğin en düşük, aşınma direncinin ise en yüksek değerde olduğunu belirtmektedir. Borür tabakalarının özelliklerini iyileştirmek ve yayınmayı hızlandırmak için termal çevrimli borlama işlemleri uygulanmaktadır.

(Özsoy, 1991). Termal çevrimli borlamayla tane boyutunun düştüğünü ve geçiş bölgesi/borür tabakası oranının azaldığını ayrıca bölgeler arasındaki özgül hacim farklarının azaldığını, aşınma gibi servis özelliklerin iyi yönde etkilendiğini ve gevrekliğin azaldığını belirtmektedir. Makine elemanlarının aşınma dayanımlarını artırmanın en önemli yöntemlerinden birisi de, bor yayını ile yüzeylerinin sertleştirmesidir.

(Eyre,1975).karbürleme ve borlama işlemi uygulanmış malzemelerin aşınma davranışlarını karşılaştırmış ve Borlamanın karbürlemeye göre özellikle geçiş bölgesi üzerindeki yüklemelerde adhezif aşınma dayanımı açısından çok daha iyi sonuçlar verdiğini ve bu özelliği yüksek sıcaklıklarda dahi muhafaza ettiğini belirlemişlerdir.

(Budinski, 1993).farklı test teknikleri kullanarak yaptığı aşınma çalışmaları sonucunda, vanadyum karbür ve titanyum karbür yayındırılmış yüzeylerin adhezif ve abrazif aşınma dayanımlarının, diğer yayınma yöntemleri uygulanmış yüzeylerden daha yüksek olduğunu; kinetik katsayısı bakımından ise borlu-borlu ve VC-VC' lü çiftlerin en iyi sonuçları verdiği belirtmektedir.

(Özsoy, 1991).sabit sıcaklıkta 125-200 μm 'ye çıkan tane boyutunun, termal çevrimli borlamada 30-40 μm olduğunu ve geçiş bölgesi/borür tabakası oranının azaldığını belirtmektedir.

İstenilen uygulamaya uygun termal çevrimli borlama sonucunda, daha uniform ve daha az poroziteli borür tabakaların elde edilmesinin yanında, bölgeler arasındaki özgül hacim farkları azalmakta, tabakanın aşınma gibi servis özellikleri istenilen yönde etkilenmekte ve gevreklik azalmaktadır. Sabit sıcaklıkta ve termal çevrimli kriterlerinde borlanan numunelerin ve malzemelerin yüzey sertlikleri arasında fazla bir fark olmadığı sonucuna varılmıştır.

2. BORLAMA YÖNTEMLERİ

Borlama işlemi esnasında bor kaynağı ve bor sağlayıcı bileşikler katı, sıvı veya gaz fazında olabilirler. Borür tabakalarının oluşumu için uygulanan yöntemleri aşağıdaki şekilde sınıflandırabiliriz:

- a) Termo-kimyasal yöntemler (kutu borlama, sıvı borlama, gaz borlama ve pasta borlama)
- b) Termo-kimyasal olmayan yöntemler (fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey kaplama ve iyon biriktirme)

Bu teknikler içerisinde en çok kullanılanları, termo-kimyasal yöntemlerdir. Termokimyasal bor kaplama işlemi sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak bor atomunun metale difüzyonuna dayanan bir kaplama yöntemidir. Termo-kimyasal bor kaplama yöntemleri dört ana grup altında toplanmaktadır. (Yapar vd., 2002).

2.1. Kutu (Toz Ortamda) Borlama

Borlama ortamı olarak katı maddelerin kullanıldığı yöntemdir. Uygulamanın kolay olması, basit donanım gerektirmesi, ekonomik ve kullanılan toz karışımının kimyasal kompozisyonunda değişiklik yapılabilirliği nedenlerinden dolayı en yaygın borlama tekniğidir (Uluköy ve Can, 2006, Barış, 2007). Kutu borlama yönteminde kullanılan bor bileşikleri; borkarbür (B_4C), ferrobör ve elementer bördür. Bunlardan en çok kullanılanı, borkarbürdür. Aktivatör olarak sodyum bor tetraflörür ($NaBF_4$), potasyum bor tetraflörür (KBF_4), sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve redükleyici olarak silisyum karbür, grafit ve sodyum gibi maddeler kullanılır (Barış, 2007). Borlanan malzemeye ve ulaşılmak istenen bor tabakası kalınlığına bağlı olarak genellikle 800-1100 °C sıcaklık aralığında, bir saat ve daha uzun sürelerde işlem gerçekleştirilir. Toz haldeki bor verici karışımlar; bor verici bileşikler (bor karbür, saf bor, vb.), alkali metaller, aktivatörler ve dolgu maddelerinin belirli oranlarda karıştırılması ile oluştururlar. Borlama toz karışımları, işlem yapılacak malzemenin şekline uygun üretilmiş ısıl dirençli çelik kutularda, parçanın etrafını en az 1 cm kalınlıkta kaplayacak şekilde doldurulur. Kutunun üstü sızdırmaz bir kapakla kapatılarak işlem

2.2. Sıvı Borlama

Bor bileşikleri, aktivatör ve redükleyici maddelerden oluşan erimiş tuza, iş parçasının daldırılması yöntemidir. Borlama işlemi 900-1100 °C sıcaklıkta ve 2-9 saat süre ile yapılır. Bu yöntemin dezavantajı sıcaklıktır. Sıcaklığın 850 °C 'nin altına düşmesi durumunda erimiş boraksın akıcılığı azalacağından, borlama imkansız hale gelecektir (Bayça ve Şahin 2004, Yurtseven, 2008). Kullanılan banyoların esas bileşenleri ve özellikleri Çizelge 2.1 'de verilmiştir.

Çizelge 2.1.Sıvı ortam borlamasında kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri (Matuschka 1980).

Bor Sağlayıcılar	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı (gr)	Teorik Bor Miktarı (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	381,42	11,35	-
Susuz Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	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_2O_3	69,64	31,07	450
Bor Karbür	B_4C	55,29	78,28	2450
Potasyum Bor Florür	KBF_4	69,67	15,52	-

Sıvı ortamda yapılan borlama iki türdür. Borlama işlemi elektrik akımı uygulanarak yapılıyorsa elektrolitik borlama uygulanmadan yapılırsa normal sıvı ortamda borlama olarak adlandırılır. Akışkan yatakta borlama ısıl işlemi de sıvı borlama yöntemi olarak yapılmaktadır. Bununla birlikte sıvı ortamda borlama işlemi, tuz eriyiği içinde elektrolitik veya elektrolitsiz (daldırma) ve derişik çözeltide de gerçekleştirilir (Çalık, 2005, Turhan, 2008).

2.3. Gaz Borlama

Borlama ortamınının gaz fazında olduğu borlama işlemidir. Borlama işlemi Ar ve H₂ gazlarının ve evaporatörde gaz haline getirilmiş bir bor kaynağının (BCl₃ gibi) belirli karışımının, dış ortama kapalı paslanmaz çelik bir odadaki numune üzerine püskürtülmesiyle yapılır. İşlem 700–950 °C sıcaklık aralığında ve 67 kPa (0,67 bar),

1:15 BCl_3+H_2 gaz karışımında gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.15) (Bayça ve Şahin 2004; Ersöz, 2008).

Gaz borlama işleminde kullanılan bor taşıyabilen gazlar, bor halojenler veya bor hidrürlerdir. Gaz borlamada çoğunlukla kullanılan ortamlar aşağıda verilmektedir (Yapar vd. 2002; Ersöz 2008).

- Diborane (B_2H_6)- H_2 karışımı,
- Bor halid- H_2 veya (75:25 N_2 - H_2) gaz karışımı,
- $(\text{CH}_3)_3\text{B}$ ve $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{B}$ gibi organik bor bileşikleri

Gaz borlamada, gaz sirkülasyonu sonucu daha uniform bir bor dağılımını sağlamakta ve sonradan temizleme gerektirmediği için numune kolay elde edilmektedir (Şahin 1999).

2.4. Pasta (Macun) Borlama

Borlamada kullanılan tozların macun haline getirilerek kullanılan bir yöntemidir. Yöntemin en önemli avantajı, kısmi borlama yapılabilmesidir. Macun şeklindeki borlayıcı madde sertleştirilerek kaplanmak istenen yüzeye 3-6 mm kalınlıkta sürülür ve kül fırınına katılmadan önce kuruması sağlanır. Kurutma işleminden sonra macunlanmış parçalar fırına konur ve uygun sıcaklık sağlanarak borlama işlemi yapılır. Bu yöntemde borlama kesinlikle koruyucu gaz ortamında yapılması gerekir. Kutu borlamaya göre işlem süresi daha kısadır. Bu yöntemin önemli bir dezavantajı, borlama işleminden sonra numune yüzeyine macunun yapışmasıdır. Bu etkiyi en aza indirmek için sulu sodyum silikat çözeltisi, organik karakterli çözeltiler ve % 3 polivinil alkol ya da % 0,5 metil selüloz içeren sulu çözeltiler kullanılabilir (Çalık 2005, Turhan 2008).

Çizelge 2.2. Macunla borlamada kullanılan koruyucu gazlar ve özellikleri (Çalık 2005).

Koruyucu gazın adı	Kimyasal bileşimi
Argon	% 99,996 argon
Kalıp gazı (formier gazı)	% 5-30 H ₂ geri kalan N ₂
NH ₃ spalt gazı (amonyak)	% 75 H ₂ % 25 N ₂
Saf azot	% 99 N ₂ % 1 H ₂

2.5. Plazma (İyon) Borlama

Plazma borlama BCl₃, BF₃, B₂H₆ ve trietil boran (TEB) gibi bor bileşikleri ve redüktan olarak hidrojen gazı kullanılarak, 800-1100 °C sıcaklıkta, yaklaşık 10-2 Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş bir plazma içerisinde yapılan borlamadır (Bayça ve Şahin 2004, Barış 2007).

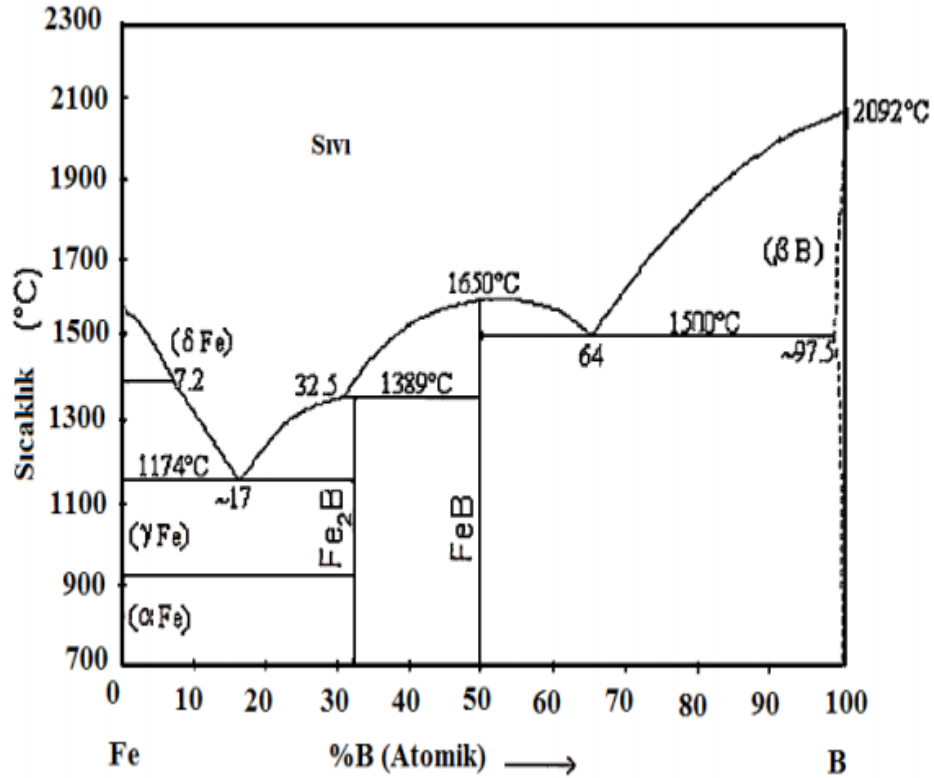
Katı haldeki bir maddeyi enerji vererek sıvı, sıvı haldeki maddeyi enerji vererek gaz ve gaz durumundaki maddeyi enerji vererek plazma haline getirmek mümkündür. Plazma, içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötral atom veya molekül içeren karışımdır. Uygulamada plazma, ısı enerjisi verilerek, ışınla veya elektriksel boşalma ile elde edilir. En yaygın kullanılan plazma yöntemi elektriksel boşalmadır. Bir elektrik gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa belirli şartlar sağlandığı takdirde uygulanan gerilim plakalar arasındaki gazın delinme geriliminin üzerinde ise, bu iki plaka arasında bir elektrik akışı olur. Klasik borlama, tuz borlama ve gaz borlama gibi işlemlerin çevreye kirletici etkisi nedeniyle son yıllarda plazma borlama işlemi daha yoğun olarak çalışılmaktadır (Bayça ve Şahin 2004, Barış 2007).

2.6. Fe-B İkili Denge Diyagramı

Bir alaşımda katı eriyik oluşum şartları arasında en önemli olanı, atomik boyut faktörüdür (Yılmaz ve Şen 1996). Bor elementi α -Fe'de atom çapına bağlı olarak hem arayer hem de yeralan konumunda bulunabilmektedir. Fe-B sisteminde borun atom yarıçapının, demirin atom yarıçapından 2,69 kat daha küçük olması, bu elementle katı eriyik yapma imkânı sağlamaktadır (Şekil 2.2). Bor difüzyonu için

gerekli aktivasyon enerjisi 62 kcal/mol olarak tespit edilmiştir (HayalsiandSugeno 1970). Fe-B ikili denge diyagramının α -Fe fazına yakın bölgesi, son yıllarda birçok kez değişikliğe uğramış, fakat yapılan son çalışmalarda, borun α -Fe ve γ -Fe fazları içerisinde ağırlıkça % 0,5 B kadar çözüldüğü tespit edilmiş, δ -Fe fazı içerisindeki çözünürlüğü ise tam olarak tespit edilememiştir (LiaoandSpear 1970).

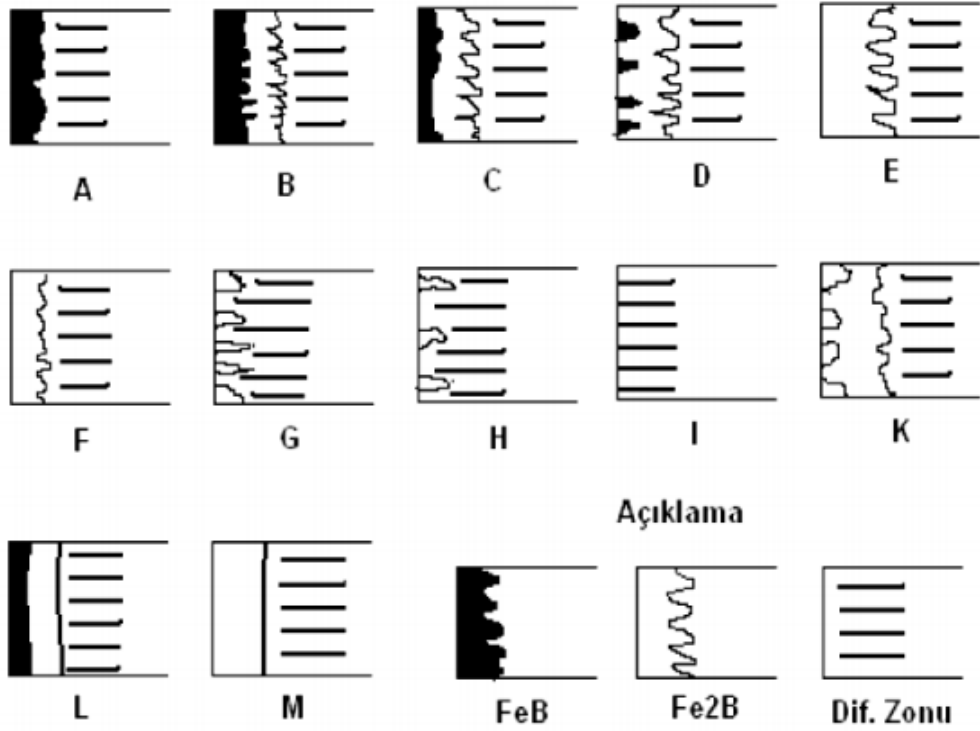
Denge diyagramından demir ile bor arasında Fe_2B (ağırlıkça % 8,83 B) ve FeB (ağırlıkça % 16,23 B) bileşikleri oluşmaktadır. Ötektik reaksiyon bor iyon difüzyonunun hakim olduğu γ -Fe tane sınırlarında ve/veya Fe_2B , $Fe_3(C,B)$ 'de başlamaktadır. Ötektiğin yapısı ve özellikleri, bileşimin yanında sıvı tabakanın soğuma hızına da bağlıdır. Yüksek soğuma hızında ince mikro yapı, yüksek sertlik ve tokluk elde edilmektedir. Farklı araştırmalarda; Fe_2B fazının ergime sıcaklığının 1389- 1410 °C arasında olduğu belirtilmektedir. Fe_2B 'nin peritektik reaksiyon sonucu 1407 °C 'de meydana geldiğini ifade etmektedir (Özbek 1999).



Şekil 2.2. Fe-B ikili denge diyagramı (John and Sammels 1981, Özbek 1999).

2.7. Borür Tabakası

Borür tabakası malzemenin en dış yüzeyi ile yüzeyin altındaki parmaksı (dişli) kısım arasına verilen isimdir. Bu bölgeye difüzyon bölgesi de denilmektedir (Delikanlı vd. 2003, Barış 2007). Borür tabakalarının yapısı; borlama yöntemine, borlanan malzemenin bileşimine, borlama ortamına ve işlem şartlarına bağlı olmak üzere ya düz bir şekilde (örneğin yüksek alaşımlı çeliklerde) ya da parmaksı türde (zik-zak şekilli) olabilir. İşlem süresi arttıkça parmaksı türdeki borür tabakalarında maksimum ve minimum kalınlıklar arasındaki farkda artar (Özsoy 1991).



Şekil 2.3. Borür tabakası çeşitleri (Yapar vd. 2002).

Şekilde;

- A : Özellikle FeB' yoğun olduğu tek fazlı tabaka,
- B : Fe₂B ve FeB fazlı iki tabaka,
- C : İki fazlı tabaka, tabaka B'den daha ince FeB tabakası,
- D : İki fazlı, izole FeB diş şeklindeki tabaka,
- E : Tek fazlı tabaka, özellikle Fe₂B ağırlıklı,
- F : Tek fazlı tabaka, özellikle Fe₂B ağırlıklı,
- G : Fe₂B diş yapısı,

- H** : İzole Fe₂B dış yapısı,
I : Difüzyon bölgesi,
K : Dejenere olmuş tabaka,
L : Çift fazlı FeB ve Fe₂B tabakası,
M : Tek fazlı FeB ve Fe₂B tabakası.

Alaşımız çeliklerde borlama şartlarına bağlı olarak tek fazlı (Fe₂B) ya da iki fazlı (FeB+Fe₂B) borür tabakası oluşur. Borlama ortamındaki bor miktarı Fe₂B fazı oluşumu için gerekli olan miktardan fazla ise uygun sıcaklık ve zaman şartlarında borür tabakasında Fe₂B fazına ilaveten FeB fazı da oluşur. Alaşımız çeliklerde ise bunlara ilaveten alaşım elementine bağlı olarak Cr₂B, TiB₂, NiB₂, CoB gibi bileşiklerden biri veya birkaçı oluşabilir (Goeriot et al. 1982, Yurtseven 2008).

İki fazlı borür tabakalarında, farklı genişleme katsayılarına sahip olduğundan dolayı iki faz arasında önemli ölçüde iç gerilmeler oluşur. Borlama işleminden sonra parçaların soğuması sırasında Fe₂B fazında basma, FeB fazında ise çekme gerilmeleri meydana gelir. Bu gerilmeler, hızlı soğutulma ya da mekanik zorlanmalar esnasında çatlak oluşumuna sebep olabilir (Selçuk 1994; Yurtseven 2008).

2.8. Geçiş Bölgesi

Geçiş bölgesi, borlanmış metal borür tabakası ile ana metal arasındaki ara bölge olarak tanımlanır. Geçiş bölgesi ile ilgili farklı görüşler olmakla birlikte yaygın olan görüş; borlama sonucu oluşan borür tabakasında karbon çözünemediği için metalin yapısında bulunan karbonun, bor difüzyonu sırasında yüzeyden iç kısımlara itilmesidir. Bunun sonucu olarak karbonca zengin geçiş bölgesi oluşur (Matuschka 1980; Ayter 2005).

Geçiş bölgesi hakkında başka bir görüş; bu bölgedeki borun çeliklerde alaşım elementi olarak gösterdiği etkiyi göstermesinden kaynaklanan farklı özelliklere sahip olmasıdır. Bu bölgenin ısı işlem hassasiyeti, borun östenit dönüşümünü yavaşlatmasındandır. Ayrıca bu bölgede gözlenen östenit tane irileşmesi de, borun alaşım elementi olarak çeliklerde gösterdiği özelliklerden biridir (Bozkurt 1984; Ayter 2005). Literatürde geçiş bölgesinin kalınlığı konusunda da farklı

değerlendirmeler mevcuttur. (Lovshenko et al, 1978) geçiş bölgesi kalınlığını borür tabakasının 3-4 katı olarak bildirilirken, (Bozkurt, 1984) bu oranın 10-15 kat olduğunu tespit etmiştir. Geçiş bölgesinin tane büyüklüğü ise ana malzemeye göre oldukça fazladır (Ayter 2005).

2.9. Borür Tabakası Özellikleri

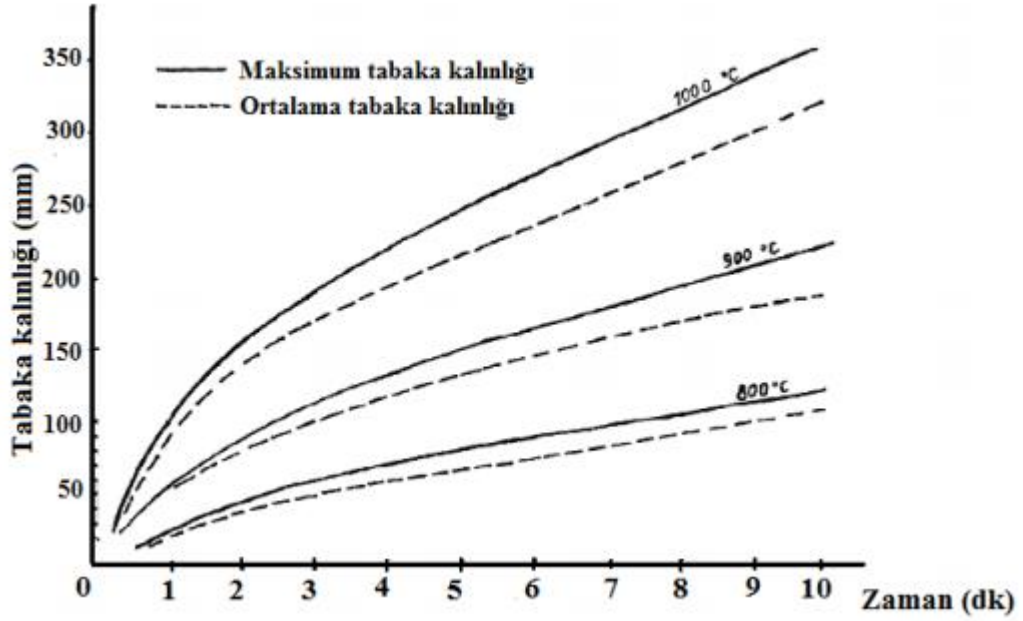
2.9.1. Borür tabakasının kalınlığı

Borlanan malzemenin cinsi, borlayıcı ortamın bileşimi, işlem şekli, sıcaklık ve süre borür tabakasının kalınlığına etki eden faktörlerdir. Teorik olarak tabaka kalınlığı sınırsızdır. Tabaka kalınlığı işlem sıcaklığı ve süresinin artmasıyla mümkündür. İşlem sıcaklığının Fe-B denge diyagramındaki ötektik sıcaklığın (1149 °C) altında olması gerekmektedir bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda lokal erimeler meydana gelerek malzeme yüzeyini bozabilir (Bozkurt 1984). Zaman faktörü ise ekonomik açıdan belli bir değeri aşmayacaktır. Şekil 2.4'de Ck 45 çeliği ve Ekabor-1 borlayıcısı kullanılarak yapılan çalışmada tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklıkla değişimi görülmektedir (Ayter 2005).

Çeliklerdeki alaşım elementi ve karbon miktarının artması ile bor difüzyonu azalmaktadır. Bunun sonucu olarak borür tabakasının hem kalınlığı azalmakta, hem de borür temas yüzeyünün dış şeklindeki yapısı düzleşmektedir (Bozkurt 1984).

Tabaka kalınlığını sınırlayan faktörden biride kırılgenliktir. Tabaka kalınlığı arttıkça kırılgenliği da artacağı için özellikle çift fazlı tabakalarda kalınlığı belirli değerler üzerinde olmamalıdır (Fichtl 1981).

Çelik esaslı malzemeler için kullanım şartlarına göre 20-200 µm tabaka kalınlığı uygundur. Kırılgenlik yönünden alaşımli çeliklerde 100 µm, alaşimsız çeliklerde 200 µm kalınlığa, hatta darbesiz aşınmaya maruz parçalarda su vermemek kaydıyla 400 µm kalınlığa çıkılabilmektedir. Borlama sıcaklığının artması tabaka kalınlığını arttırmasına ilaveten poroziteyi de arttırarak tabakanın gevrekliğine yol açar (Selçuk 1994, Ayter 2005).



Şekil 2.4. Ekabor-1 ile borlanmış Ck 45 çeliğinin, tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklığa bağlı olarak değişimi (Matuschka 1980, Ayter 2005).

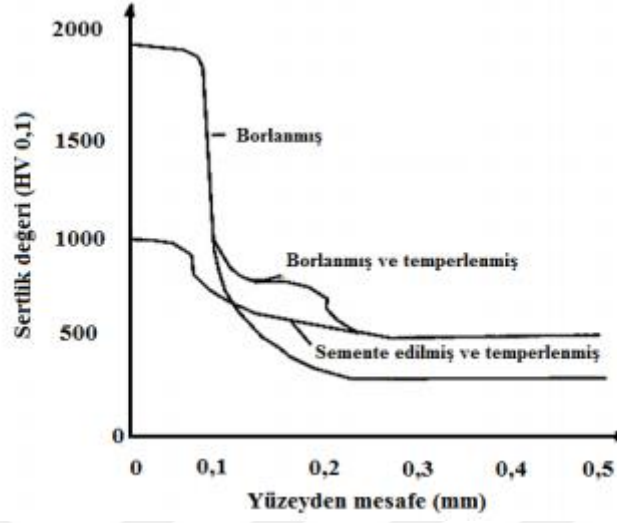
2.9.2. Borür tabakasının sertliği

Borlanan parçalarda ölçülen sertlik değerleri, ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak borür tabakası fazlarına bağlı olarak değişir. Yapılan sertlik ölçümlerinde Rockwell ve Brinell sertlik yöntemlerinin kullanılması borür tabakasının bozulmasına ve tabaka altındaki bölgenin deformasyonuna sebep olabileceğinden dolayı bu sertlik yöntemleri tercih edilmez. Çeliklerde oluşan FeB fazı, Fe₂B fazından daha sert ve gevrek bir yapıya sahiptir (Çifci 1999).

Sertlik ölçümleri mikro sertlik yöntemi ile Vickers veya knoop uçları kullanılarak yapılır (Matuschka 1980). Ölçümlerde büyük yüklerin kullanılması çatlama ve dökülmeye neden olabileceğinden dolayı hatalı sonuçlara sebep olabilir. Ayrıca büyük yükler tabakanın bozulmasına ve tabakanın altındaki bölgenin deformasyonuna sebep olabilir. Genel olarak 50-100 g.'lik yüklerle ölçüm yapılır (Özsoy 1996, Ayter 2005).

Borlamanın en büyük etkisi sertlik üzerine olup, ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak borür fazlarına bağlıdır. Borlama ile elde edilen sertlik; karbon çeliklerinde 1600-2000 HV, alaşımlı çeliklerde 2100-2800 HV, titanyumda ise 3000 HV civarındadır (Bozkurt 1984). Şekil 2.5'de borlu ve sementasyonlu tabakalardaki

sertlik dağılımları gösterilmektedir. Çizelge 2.3’de ise borlama ve diğer işlemlerle elde edilmiş yüzeylerin sertlik kıyaslamaları yapılmıştır (Ayter 2005).



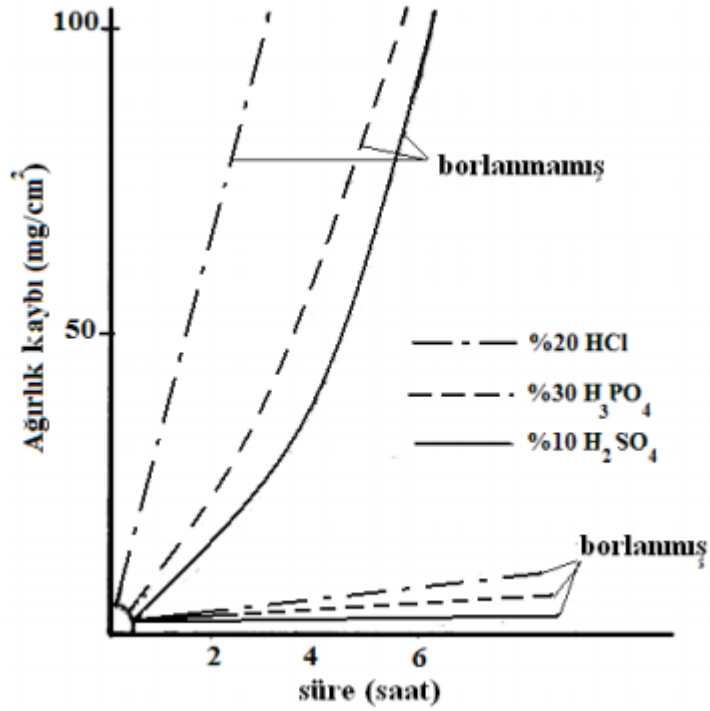
Şekil 2.5.Borlu ve sementasyonlu tabakalardaki sertlik dağılımları (Matuschka 1980, Yurtseven 2008).

Çizelge 2.3.Borlama ve diğer işlemlerle elde edilmiş yüzeylerin sertlik değerleri (Bozkurt 1984, Yurtseven 2008).

Malzeme	Mikro sertlik (kg/mm ²)
Nitrürlenmiş yüzey	610-940
Gaz ile karbürize edilmiş yüzey	700-820
Sert krom kaplı yüzey	0-1100
Wc+%13 Co sinterlenmiş malzeme	1600
Borlu karbon çeliği	1600
Borlu AISI H13 (X40CrMoV5-1) çeliği	1800
Borlu AISI A2 (X100CrMoV5) çeliği	1900

2.9.3. Borür tabakasının korozyon dayanımı

Borür tabakasının suya ve atmosfere karşı korozyon direncinin düşük olmasına karşılık, bazı asitlere ve sıvı metallere karşı iyi bir korozyon direnci gösterir. Özellikle HCl, H₂SO₄ ve H₃PO₄ gibi asitlerle alüminyum, kurşun ve çinko gibi metallerin sıvı banyolarında borlu malzemelerin korozyon direnci çok yüksektir (Matuschka 1980). Borlanmış ve borlanmamış Ck 45 çeliğinin bazı asit ortamlarındaki korozyon direnci Şekil 2.6 'da verilmiştir (Ayter 2005).



Şekil 2.6.Ck 45 çeliğinin 56 °C 'de, bazı asitlere karşı korozyon direnci (Matuschka 1980).

Bor yüksek sıcaklıklarda oksitlenebilen malzemeleri korumanın yanı sıra çeliklerin imalatında bir yağlayıcı ve korozyon engelleyici olarak kullanılmaktadır. Borürle kaplanmış çeliklerin korozyon direnci büyük oranda kaplamadaki gözeneklerin ve mikro çatlakların oranına bağlıdır. Gözenekli ya da çatlaklı kaplama korozyon direnci zayıf olan esas malzemeye korozyon ortamının girişine izin verir (Campos 2007).

2.10. (16MnCr5)Sementasyon Çeliği

Yüzeyde sert ve aşınmaya dayanıklı, çekirdekte ise daha yumuşak ve tok özelliklerin istendiği, değişken ve darbeli zorlamalara dayanıklı parçaların imalatında kullanılan, düşük karbonlu, alaşımsız veya alaşımlı çeliklerdir. (www.ayhandemirçelik.com 2016)

Sementasyon çeliklerinin karbon % 0.10 – 0.25' dir. Fakat son yıllarda % 0.35 karbon içeren çelikler geniş kesitli parçalarda iyi iç özelliklerinin sağlanabilmesi için kullanılmaktadır. Sementasyondan sonra tabakanın karbon yüzdesi 0.8 – 1' dir. Endüstride sementasyon işlemi aşınma, temas ve eğilme yorulmasına karşı yüzey direncinin gerekli olduğu parçalarda kullanılır. Buna göre sementasyon çelikleri; dişliler, miller, piston pimleri, zincir baklavaları, zincir dişlileri ve makaraları, diskler, kılavuz yatakları, rulmanlı yataklar, merdaneler, bir kısım olcu ve kontrol aletleri, zorlamalı parçalar, extruzyonla şekillendirilen parçalar, kesici takımlar gibi parçaların imalinde kullanılırlar.

Çekirdekte yumuşak ve tokluğun istenildiği, yüzeyde ise sert ve aşınmaya dayanıklı olan ve darbeli yerlerde tercih edilen esnek bir yapı çeliğidir. Ayrıca sementasyon ve nitrasyon ısıl işlemine uygun bir malzemedir.

3. KAYNAK ÖZETLERİ

(Taşcı, 1993) yapmış olduğu çalışmasında Bor ve bileşikleri çelik sanayiinde, cüruf yapıcı, alaşım elementi ve yüzey sertleştirici olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'de bol miktarda bulunan bor minerallerinin çeliklerde yüzey sertleştirme işleminde kullanılması üzerinde durulmuştur. Borlama sonrası yüzeyde FeB ve/veya Fe₂B'den meydana gelen borür tabakası ve altında geçiş bölgesi oluşur. Aşınma direnci için malzemenin aşındırıcıdan daha sert ve sürtünme katsayısının daha düşük olması istenir. Borlama ile bu özellikler büyük ölçüde sağlanabilmektedir. Bu nedenle de endüstride birçok kullanım alanı mevcuttur. Borlanmış malzemelerde korozyon dayanımı büyük ölçüde artmaktadır. Bor ile yüzeyi sertleştirilmiş çeliklerin bazı asit ve sıvı metallere karşı olan direnci geniş ölçüde artmaktadır. Özellikle HCL asidi ve Al, Pb, Zn metallerinin sıvı banyolarında borlanmış malzemelerin korozyon dayanımları çok yüksektir. Ancak yüksek alaşımlı malzemelerin borlanmasıyla daha iyi korozyon özelliği her zaman elde edilemeyebilir. Bor ile yüzey sertleştirme, esas olarak borun yüksek sıcaklıkta çeliğe yayınıdır. Bor kaynağının fiziksel durumu sıvı, gaz veya katı olabilir. Borlama banyosu ana bileşeni herhangi bir bor bileşimidir (B₄C, Na₂B₄O₇, B₂H₆ gibi). Bor yayını genel olarak çeliğin borlama ortamında 850-1000°C sıcaklıkta 2-6 saat bekletilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Borlu tabakanın özellikleri borlanan çeliğin bileşimi başta olmak üzere, borlama sıcaklığı ve borlama süresi ile yakından ilgilidir. Bu tezde bor ve borlama ile ilgili genel bilgiler verildikten sonra borlanmış çeliklerin aşınma ve korozyon dayanımları hakkında bilgi verilmiştir.

(Dilektaşlı, 2014) yapmış olduğu çalışmada plastik ekstrüzyon kalıplarında kullanılan kalıp çeliklerinin ömrünü uzatmak için yüzeyler pasta borlama yöntemiyle borlanmış, böylece yüzeylerin sertleştirilmesi sağlanmıştır. Plastik ekstrüzyon kalıplarında kullanılan AISI 4140, AISI H13, AISI 420 ve EN 1.8519 çeliklerinden imal edilmiş olan borlama numunelerine 850 – 900 ve 950 °C'de 4 – 6 ve 8 saat sürelerle pasta borlama işlemi uygulanmıştır. Borlanan numunelerin optik mikroskopla mikroyapı fotoğrafları çekilmiş borlama şartlarına göre 20 ile 140 µm arasında değişen tabaka kalınlıkları elde edilmiş, daha sonra faz analizi için X-ray difraksiyon analizi yapılmış ve Fe₂B, FeB, CrB fazları tespit edilmiştir. Çeliklerinin

yüzey sertliği borlama işlemi sonucunda 1800-2200 HV_{0,2} mertebesine kadar çıkmıştır. Yapılan kinetik hesaplamalarda AISI 4140, AISI H13, AISI 420 ve EN 1.8519 çeliklerde bor tabakası büyüme aktivasyon enerjileri sırasıyla 145.3, 222.9, 270.7, ve 146.5 kJ/mol olarak bulunmuştur. Borlanan çelikler oda sıcaklığında 300 °C'de ve 500 °C' de normal atmosferik koşullarda disk üzerinde bilya tipi aşınma cihazında aşındırılmıştır. İncelenen malzemelerin borlanmış yüzeyleri oda sıcaklığında aynı mertebede aşınmış olup relatif aşınma hızı 1.0 olarak alınmıştır. 300 °C'de AISI 4140 çeliği ve AISI H13 çeliği yaklaşık 13,5 kat aşınarak en iyi performansı göstermiştir. 500 °C'de yapılan deneylerde ise en düşük relatif aşınma hızı AISI H13 çeliğinde 20.4 olarak belirlenmiştir.

(Can,2009) yapmış olduğu çalışmada, Sıcak iş takım çelikleri 400°C ila 650°C arasında çalışabilen ve bu sıcaklıklarda mekanik özellikleri değişmeyen çeliklerdir. Bu çalışmada sıcak iş takım çeliklerinin sahip oldukları üstün mekanik özelliklerini ve kullanım ömürlerini borlama işlemi ile daha da artırmak amaçlanmıştır. Borlama deneylerinde AISI L6, malzeme numarası 1.2713 olarak tanımlanan sıcak iş takım çeliği kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan malzemeler kullanılmış sıcak dövme kalıbı üzerinden alınmış ve 12,7 mm küp şeklinde işlenmiştir. Çalışmada borlama sonrası AISI L6 sıcak iş takım çeliğinin yüzeyinde oluşan borür tabakalarının metalografik ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Borlama işlemi, katı ortamda Ekabor-II tozu kullanılarak, 920, 980 ve 1040°C'de 2-8 saat sürelerde yapılmıştır. Borlama işlemine tabi tutulan numunelerde borür tabakasının morfolojisini, sertliğini ve bu tabakada ki faz dağılımının tespit edilmesinde optik mikroskop, mikrosertlik ve X-ışınları difraksiyon analizleri (XRD) cihazları kullanılmıştır. Çalışma sonunda AISI L6 sıcak iş takım çeliğinin başarılı bir şekilde borlanabileceği ve bu işlemle yüzey sertliğinin arttırılabileceği gösterilmiştir.

(Ersöz, 2008) yapmış olduğu çalışmada çelik malzemeler üzerine mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek amacıyla çok geniş bir çeşitlilikte kaplama prosesleri uygulanmaktadır, PVD, CVD, termokimyasal uygulamalar, plazma sprey, iyon implantasyon gibi teknikler bu yöntemler arasındadır. Yüzey özellikleri arasında, parçanın aşınma ve korozyona karşı direncinin arttırılması önem açısından ilk sırada yer almakta ve sanayide uygulanan işlemlerin büyük çoğunluğunun amacını teşkil etmektedir. Çelik malzemeler için mevcut termokimyasal yüzey işlem

metotları arasında nitrürleme, karbürleme ve karbonitrürleme gibi yöntemler bulunmaktadır. Tüm bu yöntemlerin yanı sıra geniş bir endüstriyel uygulama alanı olan borlama termokimyasal işlemi süreci en önemli yüzey sertleştirme uygulamalarından biridir. Oluşan borür tabakaları malzemeye korozyon direnci ile birlikte, yüzeyde yüksek değerlerde sertlik ve yüksek aşınma direnci kazandırmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda sertliğini koruyan borür tabakası, ayrıca kırılma tokluğu, yorulma gibi diğer mekanik özelliklerini de geliştirerek malzemelerin servis ömürlerini uzattığı bilinmektedir. Bu çalışmada

(Ersöz, 2008) AISI 4140 tipi çelik malzeme farklı süre, sıcaklık, akım yoğunluğu ve ilave banyo bileşenleri kullanılarak ergimiş tuz elektrolizi yöntemi ile borlanmıştır. Elektrolitik olarak borlanan malzeme yüzeyinde süre, sıcaklık, akım yoğunluğu ve ilave banyo bileşenleri parametrelerinin değişimine bağlı olarak borür tabakası oluşumu incelenmiştir. Ayrıca elektrolitik olarak borlanan tüm malzemelerin yüzeyden itibaren sertlik ölçümleri yapılmış ve çelik malzeme sertliğinden yaklaşık 4-5 kat yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür. Sert ve kırılma tokluğuna uygulanan indentasyon tekniği kullanılarak çelik malzeme yüzeyinde oluşan borür tabakalarının kırılma tokluğu değerleri ölçülmüş, ve kırılma tokluğunun elektrolitik borlama süresi, sıcaklık, akım yoğunluğu ve banyo katkı maddelerine bağlı olarak kırılma tokluğu değeri incelenmiştir. Mekanik testlerin yanı sıra oluşan borür tabakalarının korozif ortamlarda davranışını incelemek için daldırma tekniği kullanılarak korozyon testleri yapılmıştır. Deneylerde %10-15-20'lik H_2SO_4 , %10-15-20'lik HNO_3 , %10-15-20'lik $HClO_4$, %10-15-20'lik H_3PO_4 çözeltileri kullanılmıştır. Numuneler asit çözeltilerin içerisinde oda sıcaklığında 12 saat bekletilmişlerdir. Korozyon deneyleri $900\text{ }^\circ\text{C}$, 200 mA/cm^2 ve 60 dakika koşullarında elektrokimyasal borlama işlemi uygulanmıştır. Yapılan çalışmalarda numunelerin birçoğunda Fe_2B ve FeB fazlarını içeren tipik dişli yapıda borür tabakası elde edilmiştir. Çelik malzeme yüzeyinde oluşan borür tabakalarının sıcaklık, süre ve akım yoğunluğuyla difüzyon kontrollü olarak arttığı görülmüştür. En kalın borür tabakası %90 $Na_2B_4O_7$ + %10 Na_2CO_3 banyo bileşimi kullanılarak yapılmış elektrolitik borlama işleminde elde edilirken, en düşük tabaka kalınlığı %100 $Na_2B_4O_7$ kullanılarak yapılmış elektrolitik borlama işleminde gözlemlenmiştir. Oluşan borür tabakalarının sertlik değerleri tabaka boyunca doğrusallık göstermekte ve en yüksek sertlik değerleri ise FeB tabakasında görülmektedir. Yüzeyden matrise doğru inildikçe FeB tabakasından Fe_2B tabakasına

geçişte sertlik değerleride azalmaktadır. Kırılma tokluğu çalışmalarında kullanılan tüm numuneler için kırılma tokluğu 2,67 ile 6,01 Mpa.m^{1/2} değerleri arasında bulunmuştur. Ayrıca toplam tabaka içerisinde FeB fazının artışına bağlı olarak kırılma tokluğu değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir.%10-15-20'lik H₂SO₄ , %10-15-20'lik HNO₃, %10-15-20'lik HClO₄, %10-15-20'lik H₃PO₄ sıvıları içerisindeki korozyon deneyi sonuçlarına göre borlanmış malzemelerin korozyon dayanımlarının 12 kata kadar arttığı görülmüştür.

(Uzun,2002) yapmış olduğu çalışmada Ç1040 çeliğine farklı sıcaklık ve sürelerde termokimyasal işleme bor kaplama ısıl işlemi uygulanmıştır. Aynı grup malzemelere 4 farklı borlama işlemi yapılmıştır. Birinci borlama işlemi 950 °C de 3 saat bekletip havada soğutma işlemi uygulanmıştır. İkinci grup deneylere de aynı sıcaklıkta 5 saat bekletme, üçüncü grup malzemelere 1000 °C de 3 saat bekletilip havada soğutma ve dördüncü grup numunelere de yine aynı sıcaklıkta 5 saat bekletip havada soğutma işlemi yapılmıştır. Her dört grup deneyde de taze (yeni) susuz boraks (tinkal) ile ferrosilisyum tozunun karışımından oluşan katı ortamda borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Termokimyasal borlama işlemleri aynı büyüklükteki potalarda gerçekleştirilmiştir. Yapılan deney numunelerinin de oluşan borür tabakasının dağlanmadan SEM fotoğrafları vasıtasıyla tabaka kalınlıkları ile mikro sertlikleri incelenmiştir. Borlanmış numuneler ile horlanmamış numuneler korozyon ve aşınma deneylerine tabi tutularak aralarındaki dayanım farkları karşılaştırılmıştır.

(Çiftçi, 1999) yapmış olduğu çalışmada Borlanan malzeme yüzeyinde belirli sıcaklık ve sürelerde, bor yayındırma işlemidir. Borlama ile yüksek sıcaklıklarda çelik malzeme yüzeyine, bor yayındırılarak Fe₂B ve/veya FeB fazları içeren borür tabakaları elde edilir. Çeliklerde bor yayınımla elde edilen tabakaların sertlik, aşınma ve korozyon dirençleri önemli miktarlarda artırılabilir. Borlu tabakaların özellikleri, borlanan malzemenin kimyasal bileşimine, borlama ortamı bileşiminin işlem sıcaklığına, işlem süresine, uygulanan ısıl işlemlere göre değişmektedir. Bu çalışmada sade karbonlu çeliklerin, sıvı ortam borlamasıyla elde edilen, borür tabakalarının yapı ve özelliklerine, karbon miktarının etkisi araştırılmıştır. Sade karbonlu çeliklerde alaşım elementi olarak karbon miktarının, borür tabaka kalınlığına, borür tabakası faz ve mikroyapışma, borür tabaka sertliğine olan etkileri araştırılarak incelenmiştir. Deneylerde elektrolitik demir, Ç.1010,

Ç.1020, Ç.1030, Ç.1040, Ç.1050, Ç.1060, Ç.1090 çelik malzemeleri kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler % 65 susuz boraks ve % 35 silisyum karbür, bileşimli sıvı banyoda 1000°C sabit sıcaklık ve 6 saatlik işlem süresince borlama işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra mikroyapı incelemeleri, mikrosertlik ve X- ışınları analizi yapılarak borlanan numunelerin özellikleri tespit edilmiştir.



4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Borlama İşlemi

Bu çalışmada, malzeme olarak 16MnCr5 sementasyon çeliği kullanılmıştır. Bu çelik amaca uygun olarak 10x10 mm ebatlarında giyotin makasıyla kesilmiştir. Kesilen numunelerin borlama ısıl işlemikati ortamda Ekabor-1 tozu kullanılarak 1000 °C’de 16 saat yapılmıştır. Bunun yanında termal çevrimli borlama ile karşılaştırma yapılması için 1000°C’de 5’er saat bekletilerek 3 defa termal çevrimli borlama işlemi yapılmıştır. İki farklı yöntem kullanılarak yapılan borlama işlemi birbirleriyle mikro yapısal ve mekanik açıdan karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.1. 16MnCr5 çeliğinin kimyasal bileşimi. @kalitemetalurji.com.tr,(2016)

16MnCr5 çeliğinin kimyasal bileşimi							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	v
0.14- 0.19	0.15- 0.40	1.00- 1.30	0.035	0.035	0.80- 1.10	-	-

Bor verici kaynak kullanarak, aynı sıcaklık ve farklı saatlerde borlama işlemine tabi tutulacak ticari saflıktaki 16MnCr5 çeliğinin özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Böylece bu malzemelerin borlama işlemlerinden sonra mekanik özellikleri araştırılmıştır.

Çizelge 4.2.(16MnCr5) ısıl işlem bilgileri. @kalitemetalurji.com.tr,(2016)

(16MnCr5) ISIL İŞLEM BİLGİLERİ									
Sementasyon Sıcaklığı (°C)	Soğutma Ortamı					Çekirdek Östenitleme Sıcaklığı (°C)	Cidar Sertleştirme		Meneviş Sıcaklığı (°C)
							Sıcaklık (°C)	Ortam	
900 – 950	Su	Tuz banyo	Yağ	Sıcak banyo	Hava	840 – 870	800 – 830	Yağ, Su, Sıcak Banyo	170 – 210
	-	-	+	+	+				

4.2.Deneyde Kullanılan Malzemeler

Bu tez çalışmamda Süleyman Demirel Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Laboratuvarında Nüve marka MF120 modeli elektrik dirençli ve mikro işlemci kontrollü programlanabilir kül fırını kullanılmış ve katı borlama işlemi ile kaplama yapılmıştır. Bor kaynağı olarak ticari olarak piyasadan temin edilebilen Ekabor 1 tozları kullanılmıştır. Borlama işlemi için bor verici tozlar önceden hazırlanmış yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik potalar kullanılmıştır. SDÜ Teknoloji Fakültesi Laboratuvarında bulunan Metkon marka cihazlave Kocaeli Üniversitesi Laboratuvarında bulunan mikro-vickers sertlik cihazı ile sertlik deneyleri yapılmıştır.

4.3.Borlama İşlemi

Borlama işlemi için bor verici tozlar önceden hazırlanmış yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik pota içerisine yaklaşık olarak 5 cm kalınlığında ekabor-1 tozu yerleştirildi. Daha sonra numuneler en az 1 cm aralıklarla konulmuştur. Potanın kenar kısmındaki numuneler arasında da yine en az 1 cm boşluk bırakılarak potanın tamamı bor verici toz ile doldurulmuştur. Üst kısım ise yine 1 cm'den az olmayacak şekilde Ekrit tozu ile kaplanmıştır. Daha sonra seramik potanın kapağı kapatılmıştır ve kapaktan sızıntı olmaması için etrafı şamot harcı ile sıvanmıştır. Sonrasında kül fırını içerisine yerleştirilmiştir. Seramik potaların içerisinde numunenin üzerinin Ekrit tozu ile

kapatılması Şekil 4.1 c'de gösterilmiştir. Seramik potaların ağzının kapatılması işlemi ise Şekil 4.1 d'de gösterilmiştir.

Borlama işlemi Süleyman Demirel Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Laboratuvarında bulunan ve Şekil 4.1 a'da gösterilen 1200°C sıcaklık kontrollü ve ± 5 °C hassasiyetli Nüve marka MF120 modeli elektrik dirençli ve mikro işlemci kontrollü programlanabilir, kül fırını kullanılmış ve katı borlama işlemi ile kaplama yapılmıştır.

Daha sonra seramik potanın kapağı kapatılmıştır ve kapaktan sızıntı olmaması için etrafı şamot harcı ile sıvanmıştır. Sonrasında kül fırını içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 4.1 b'de seramik potalar ve Ekobor-1 tozları gösterilmiştir. Numunelerin seramik potalar içerisindeki gösterimleri Şekil 4.1 f ve Şekil 4.1 c'de yapılmıştır. Seramik potaların içerisinde numunenin üzerinin Ektrik tozu ile kapatılması Şekil 4.1 c'de gösterilmiştir. Seramik potaların ağzının kapatılması işlemi ise Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



(a)



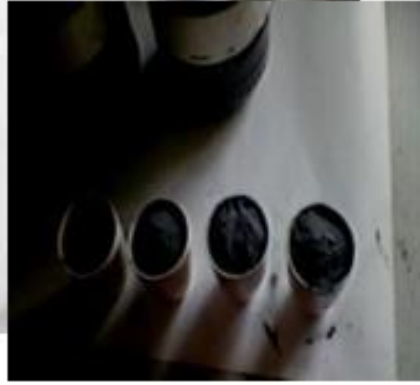
(d)



(b)



(e)



(c)



(f)

Şekil 4.1. Deneyde kullanılan ekipmanlar: (a) Nüve marka kül fırını (b) Seramik potalar ve Ekabor-1 tozları (c) Numunelerin üst kısmının Ekrit tozu ile kapatılması (d) Potaların kapaklarının kapatılması (e) Fırın içerisindeki seramik potalar (f) Numunelerin seramik pota içerisindeki görüntüsü

Bu şekilde hazırlanan seramik potalar 16MnCr5 çeliği, 1000°C’de Ekabor-1 ile borlanmış 5’er saat bekletilerek 3 defa termal çevrim yapılmıştır ve 16MnCr5 çeliği, 1000°C’de 16 saat Ekabor-1 ile borlanmıştır. Şekil 4.1 e’de borlama için fırın içerisinde işleme tabi olan seramik potalar gösterilmiştir. Süreler tamamlandıktan sonra potalar soğumaya bırakılmıştır. Soğuma tamamlandıktan sonra numuneler potaların içerisinden çıkarılmış üzerindeki tozlar temizlenmiş ve deneye uygun hale getirilmiştir.

4.4.Karakterizasyon Çalışmaları

4.4.1.Metalografik inceleme

Borlanmış numunelerin mikro yapılarının detaylı bir şekilde incelenebilmesi için belirlenen numuneler için metalografik analizler yapılmıştır. Bunun için numuneler Şekil 4.2’de görülen Buehler-Metaserv zımparalama ve parlatma cihazında ortalama 250 dev/dak hızla sırasıyla 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 numaralı zımparalar kullanılarak zımparalanmıştır. Daha sonra alumina ile çuhada parlatılmıştır. Daha sonra numuneye dağlama işlemi uygulanmıştır.



Şekil 4.2. Numune parlatması için kullanılan parlatma cihazı

4.4.2. Mikro yapı incelemeleri

4.4.2.1. Optik mikroskob incelemeleri

Metalografik inceleme için hazırlanan numuneler Şekil 4.3’de ki Olympus marka PMEÜ modeli optik mikroskop ile incelenmiştir. Aynı mikroskopta mikro yapı inceleme sonuçları çekilmiştir.



Şekil 4.3. Olympus marka (GX51) optik mikroskop

4.4.2.2. SEM mikroskobu incelemeleri

Hazırlanan numunelerin tabaka yapısı morfolojisinin incelenmesi amacı ile SEM yöntemi kullanılır. Bu yöntem çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronlarla yüzeyin taranması prensibi ile çalışır. SEM yöntemi uygulaması Gebze Yüksek Teknolojisi Enstitüsü Laboratuvarında yapılmıştır. Şekil 4.4'de taramalı elektron mikroskobu görülmektedir.



Şekil 4.4. Taramalı elektron FEI Quanta FEG 650 mikroskobu

4.4.3. Mikro sertlik ölçümü

Borlama sonucu oluşan kaplama kalınlıklarının ve matrisin sertlik dağılımları Şekil 4.5'de görülmekte olan SDÜ Teknoloji Fakültesi Laboratuvarında bulunan Metkon marka cihazla mikro-vickers sertlik ucu kullanılarak 100g. yük altında 15s. süre işlem yapılarak ölçüm gerçekleştirilmiştir. Ölçme işlemi yüzeyden itibaren matrise kadar belirli aralıklarla yapılmış ve en az beş değer aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur.

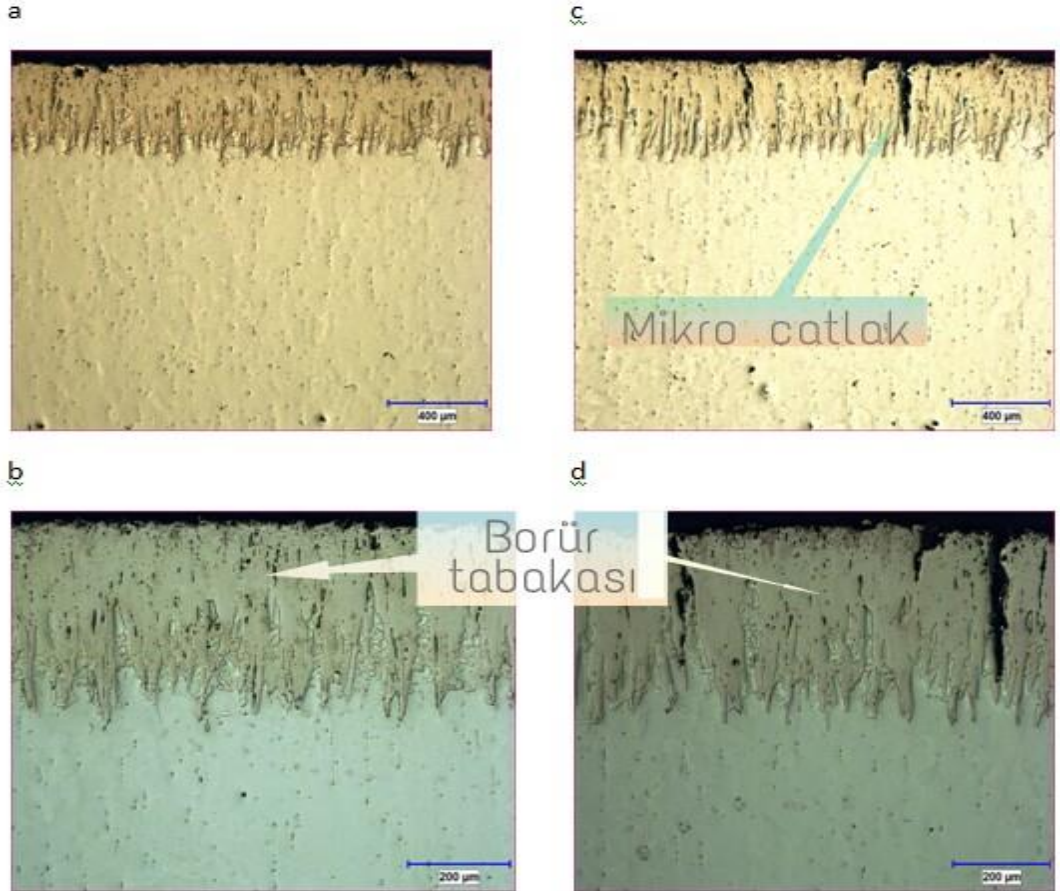


Şekil 4.5. Mikro sertlik ölçüm cihaz

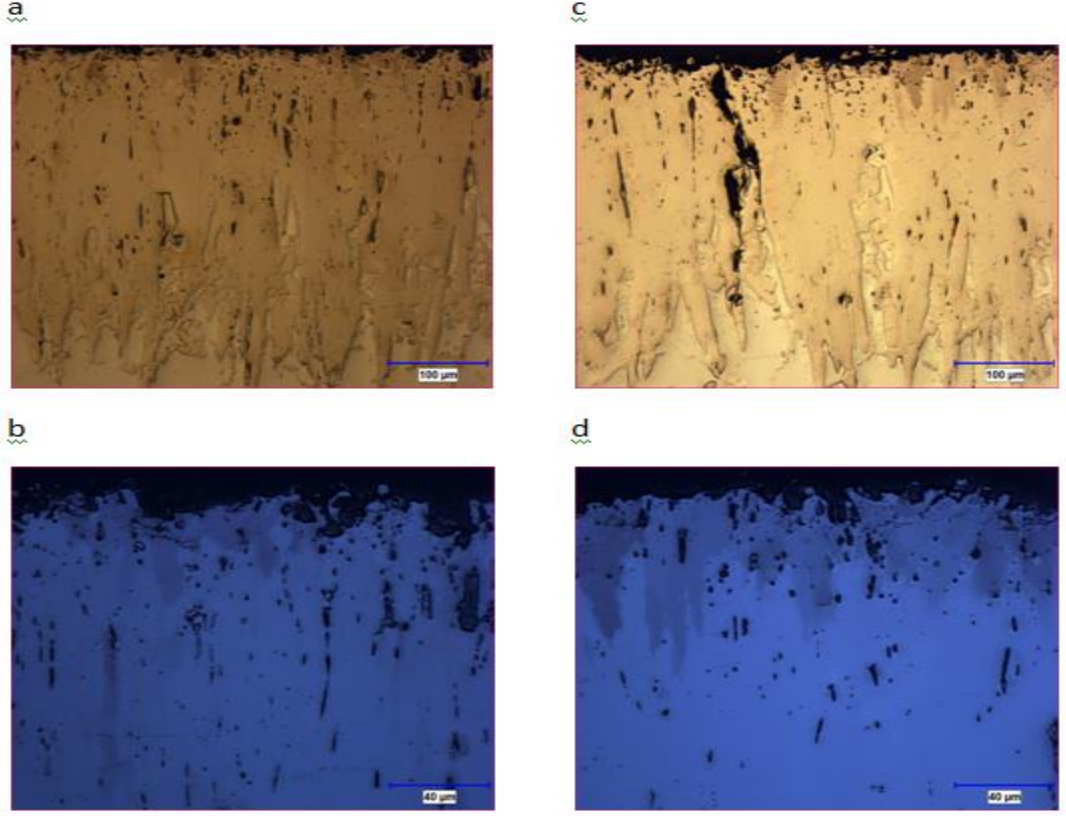
5.DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

5.1. Mikro Yapı (Optik Mikroskobu) İnceleme Sonuçları

16MnCr5 sementasyon çeliği 1000°C’de 16 saat borlanmıştır ve 1000°C’de 5’er saat bekletilerek 3 defa termal çevrimli borlama yapılmış ve ikisi arasındaki mikro yapısal ve mekanik özellikler arasındaki farklar kıyaslanmıştır. Termal çevrimli borlamada çeliğin üzerinde daha yoğun ve daha düzenli bir şekilde borür tabakası gözlenmektedir. Borür tabakasının çelik üzerinde dişli bir yapıya sahip görüntüsü gözlenmektedir. Bunun sebebi tercihli yönlerden yayılan bor difüzyon hızının daha yüksek olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Bu sonuçlardan termal çevrimli borlamanın daha kaliteli bir sonuç verdiğine ulaşılmıştır.



Şekil 5.1. Sol sütunda (a ve b) 16MnCr5 çeliği, 1000°C’de Ekabor-1 ile borlanmış 5’er saat bekletilerek 3 defa termal çevrim yapılmış 5x,10x yaklaşılmış optik mikro yapı görüntüsü sağ sütunda (c ve d) 16MnCr5 çeliği, 1000°C’de 16 saat Ekabor-1 ile borlanmış, 5x,10x yaklaşılmış optik mikro yapı görüntüsü

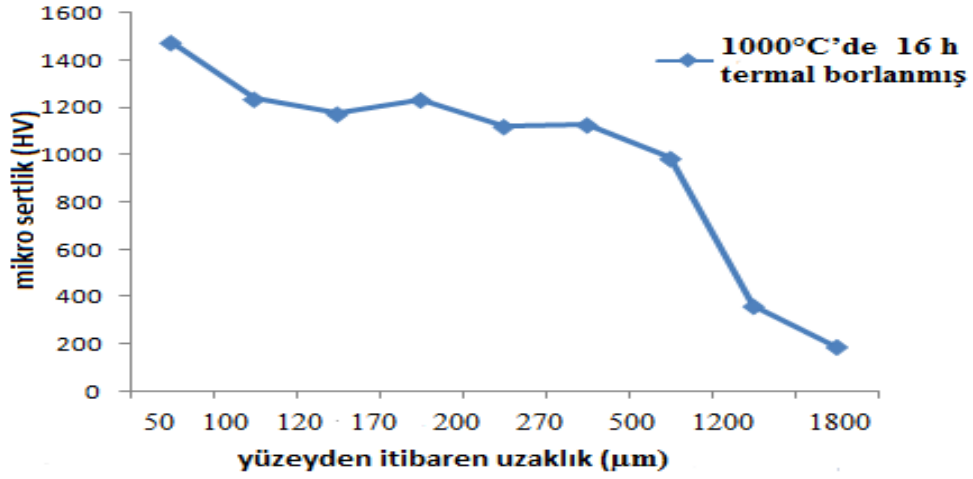


Şekil 5.2. Sol sütunda (a ve b) 16MnCr5 çeliği, 1000°C’de Ekabor-1 ile borlanmış 5’er saat bekletilerek 3 defa termal çevrim yapılmış 20x,50x, yaklaşırlmış optik mikro yapı görüntüsü sağ sütunda (c ve d) 16MnCr5 çeliği, 1000°C’de 16 saat Ekabor-1 ileborlanmış 20x,50x, yaklaşırlmış optik mikro yapı görüntüsü

Her iki borlama işleminde borür tabakasının oluştuğu görülmüş, ısıl çevrimli borlama da ise normal borlama da görülen geçiş bölgesi daha az görüldüğü tespit edilmiştir. Termal çevrimli borlama daborür tabakasının daha yoğun ve daha ince borür tabakası gözlenmiştir.

5.2. Mikro Sertlik Sonuçları

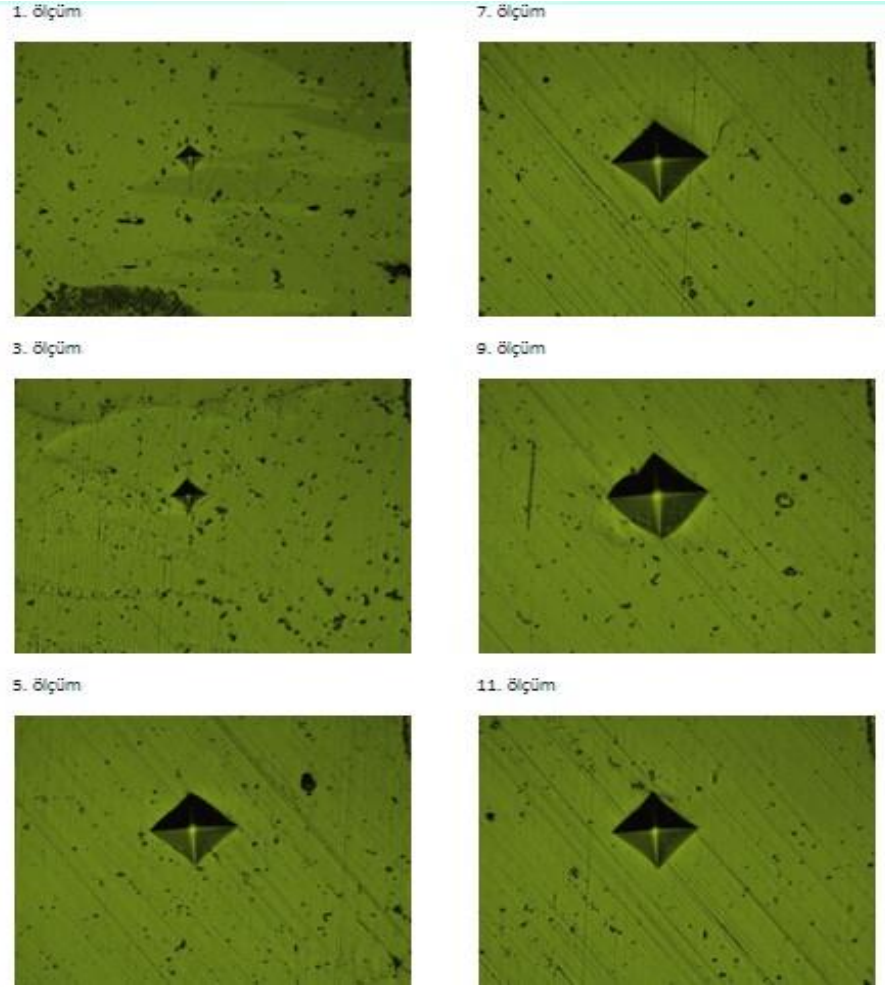
Bor kaplama yapılan numunelerde sertlik ölçümleri numunenin boyuna kesitleri alınarak kaplama ile ana malzeme arasında yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinde kaplamanın dış yüzeyi son nokta olarak kabul edilmiş ve ana malzeme merkezine doğru 0,1 mm aralıkta yapılan 14 adet ölçümün değerleri çizelge 5.1 de ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. Ölçümler dıştan içeriye doğru yapılmış olup sertliğin matrise doğru azaldığı görülmüştür. Deneyler Vickers sertlik ölçüm yöntemi kullanılmıştır.



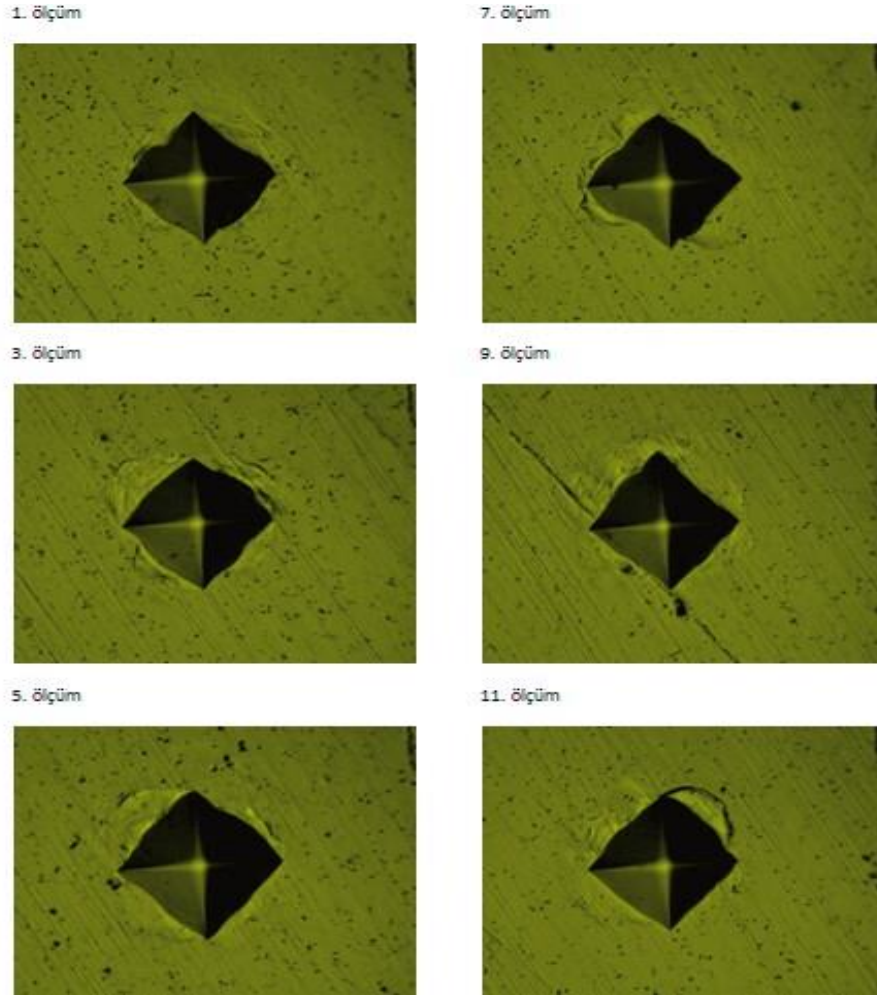
Şekil 5.3. 1000°C’de 5 saat bekletilerek 3 defa termal çevrim yapılmış 16MnCr5 çeliğinin yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak mikro sertlik değişimi

Çizelge 5.1. 16MnCr5 çeliği, 1000°C’de Ekabor-1 ile borlanmış 5’er saat bekletilerek 3 defa termal çevrim yapılmış mikro sertlik borür tabaka kalınlıkları ve tabaka kalınlıklarına ait sertlik değerleri

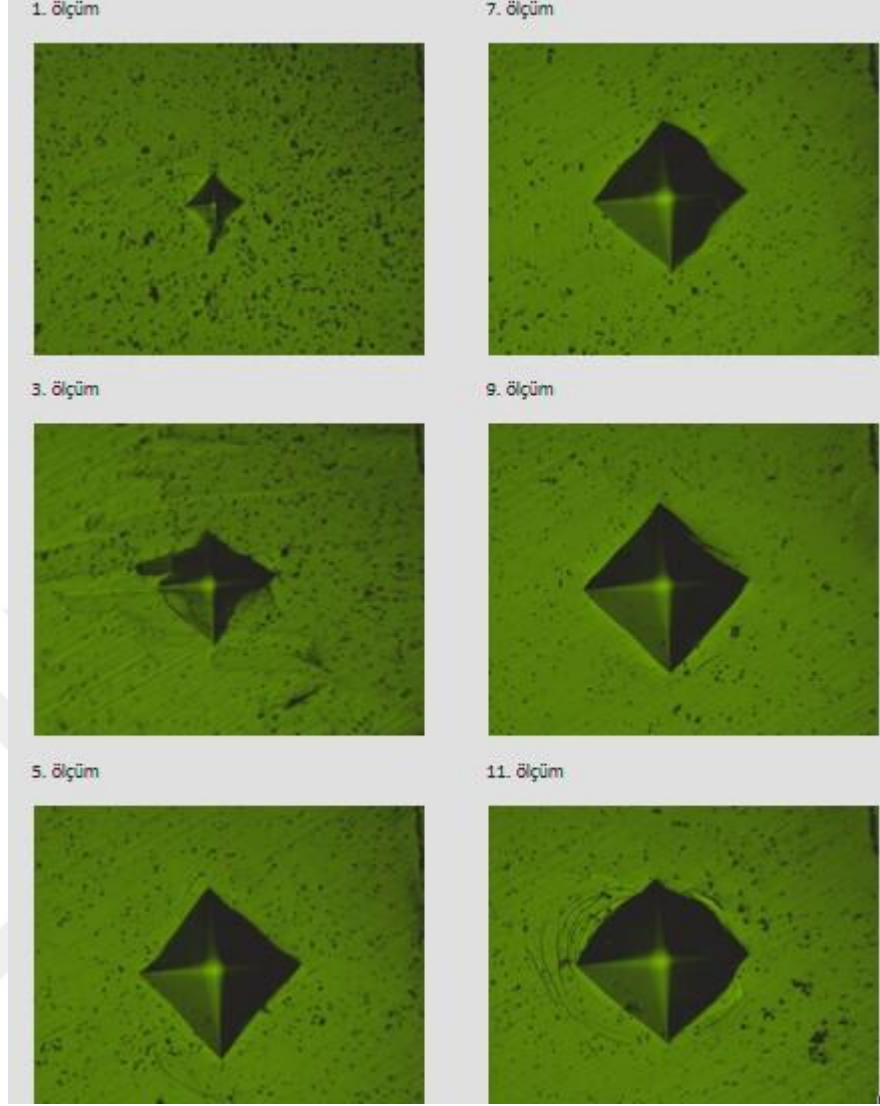
Ölçüm Sayısı	Ölçüm Mesafe Aralığı (mm)	HRC	HV	D1	D2	Ortalama Diagonal
1	0,06	---	1236,01	20,53	21,9	21,21
2	0,105	---	1475,34	18,92	19,91	19,42
3	0,142	---	1173,16	22,13	21,41	21,77
4	0,17	---	1233,42	20,59	21,88	21,24
5	0,20	69	996,02	22,88	24,38	23,63
6	0,23	69	985,03	22,89	24,64	23,76
7	0,27	---	1120,18	22,05	22,51	22,28
8	0,30	---	1080,34	23,49	21,89	22,69
9	0,33	---	1127,56	22,15	22,27	22,21
					EHT	-1
İstatistikler		HRC	HV	D1	D2	Ortalama Diagonal
Min		0	139,97	18,92	19,91	19,42
Max		69	1475,34	64,45	61,62	63,04
Fark		69	1335,37	45,53	41,71	43,62
Ortalama		13,462	868,088	31,495	31,938	31,718
Std. Sapma		26,67	472,158	16,155	15,903	16,009
Toplam		175	11285,1	409,44	415,2	412,33
Ölçüm Sayısı		13	13	13	13	13



Şekil 5.4. 16MnCr5 çeliği, 1000°C'de Ekabor-1 ile borlanmış 5'er saat bekletilerek 3 defa termal çevrim yapılmış (1,3,5,7,9,11). Ölçüm mikro sertlik izlerinin görüntüsü



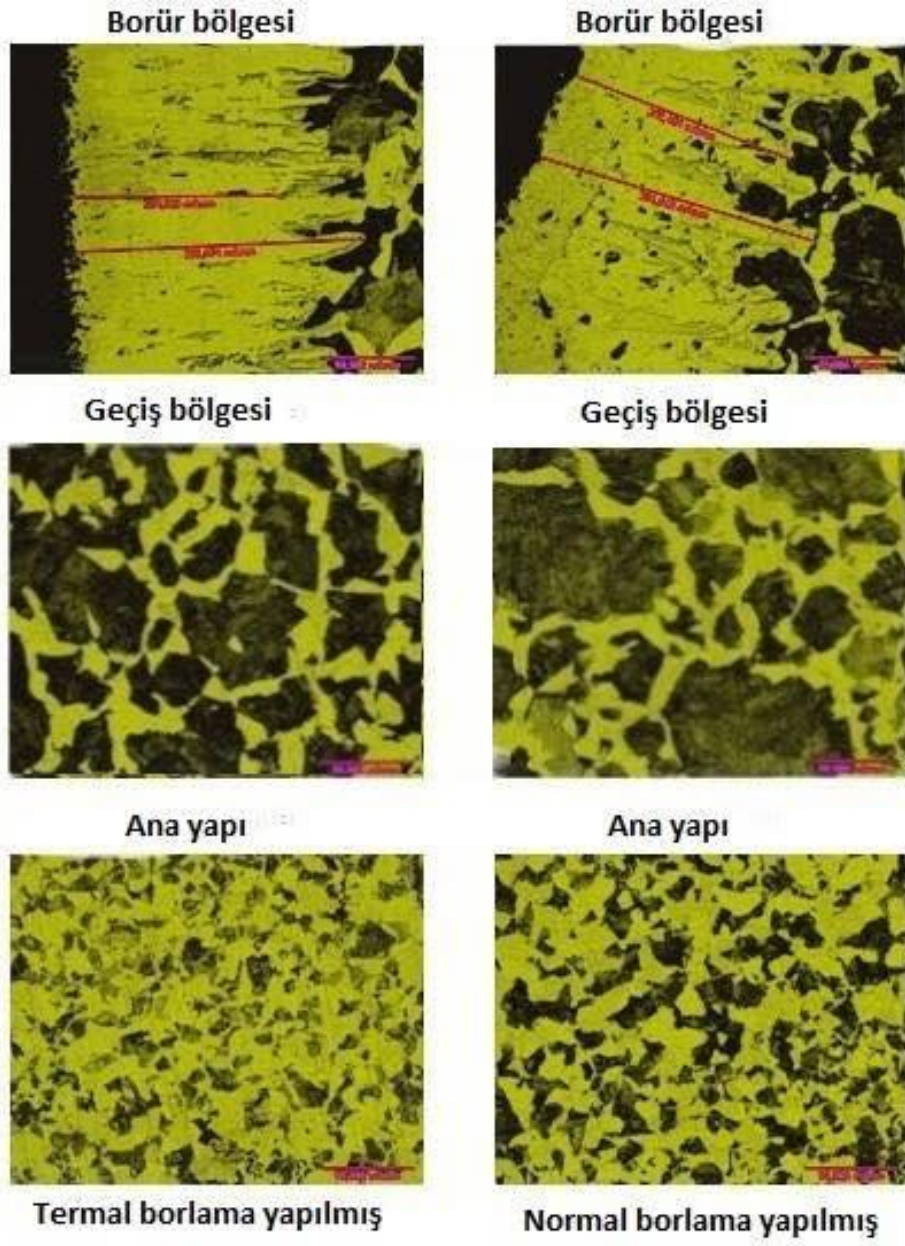
Şekil 2.5. 16MnCr5 çeliği, orijinal işlem görmemiş (1,3,5,7,9,11). Ölçüm mikro sertlik izlerinin görüntüsü



Şekil 5.7. 16MnCr5 çeliği, normal borlama yapılmış (1,3,5,7,9,11). Ölçüm mikro sertlik izlerini görüntüsü

Sertlik grafiği incelendiğinde tüm numunelerde son nokta kabul edilen kaplama üst yüzeyinden ana malzemeye doğru gidildikçe sertlik değerlerinde bir düşüş olduğu tespit edilmiştir. Sertlik değerlerindeki bu düşüşün kimyasal bileşimdeki farklılığa bağlı olduğu, üst yüzeyde tamamen borür kaplama bir yapı varken, ana malzemeye doğru gidildikçe kimyasal yapıda düşük karbonlu çeliğe ait alaşımların varlığı ile sertliğin düştüğü düşünülmektedir. Ana malzemenin merkezine doğru yaklaşıldıkça sertlik değerinin iyice düştüğü görülmektedir.

5.3 Mikro Dağlama Sonuçları

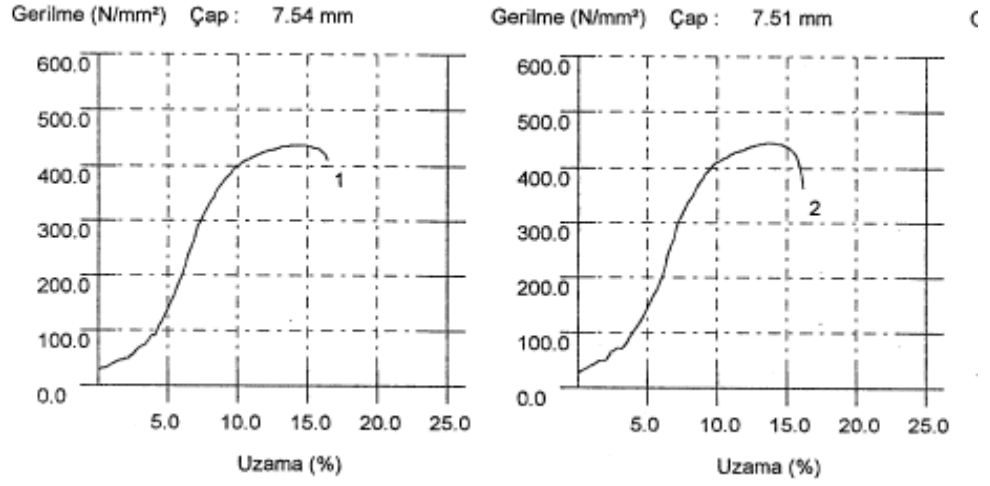


Şekil 5.8. 16MnCr5 çeliğinin termal (a,b,c) ve normal (d,e,f) borlama yapılmış mikro dağlama görüntüleri

5.4. Çekme Testi Sonuçları

Çizelge 5.4. 1000 °C 5 er saat bekletilerek 3 defa termal çevrimle borlanmış numunenin çekme testi sonuçları

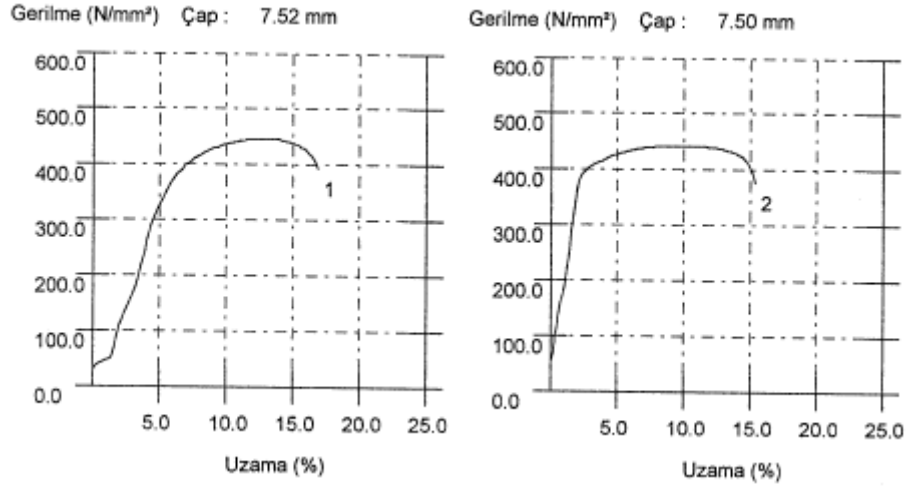
16MnCr5 çeliğinin termal çevrim yapılmış numunenin çekme testi sonuçları								
Çap mm	Kesit alanı Mm ²	İlk boy mm	Son boy mm	Kopma %	Akma dayanımı N/mm ²	Çekme dayanımı N/mm ²	Çekme/akma	Max Yük kN
7.53	44.45	37.62	43.79	16.39	390.19	440.96	1.13	19.60



Şekil 5.9.1000°C 5 er saat bekletilerek 3 defa termal çevrimle borlanmış numunenin çekme testi grafik sonuçları

Çizelge 5.5.1000°C normal borlanmış numunenin çekme testi sonuçları

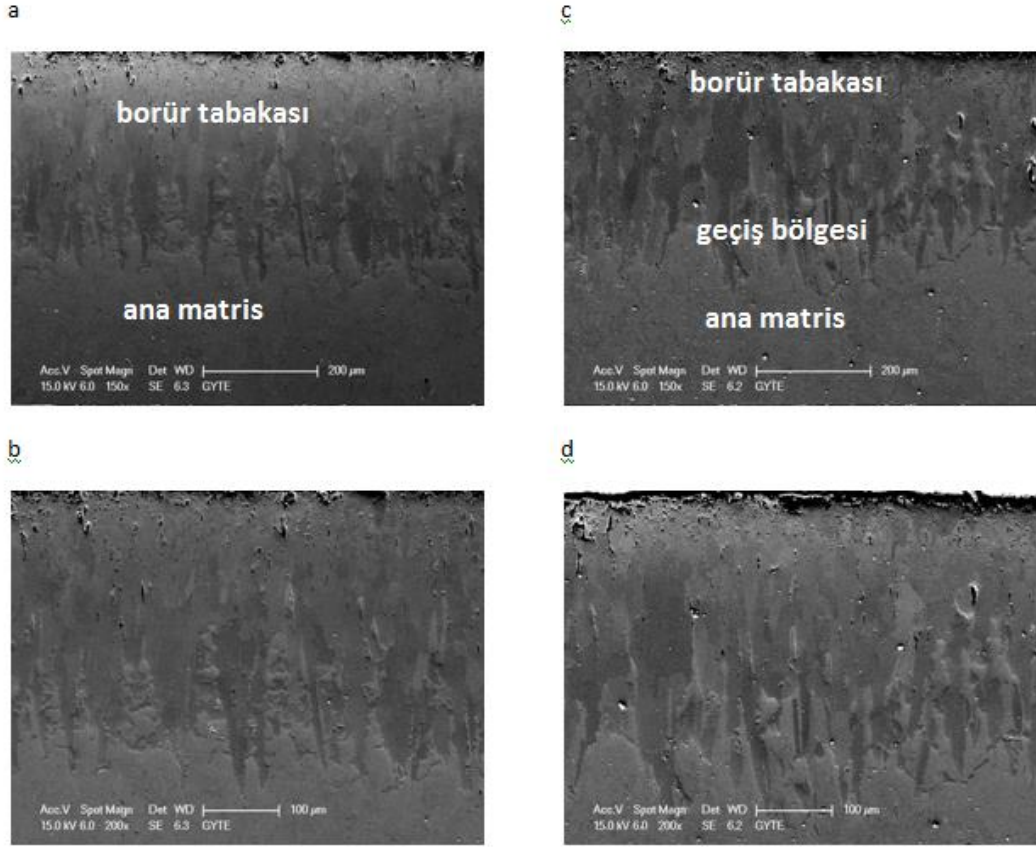
16MnCr5 normal borlama yapılmış numunenin çekme testi sonuçları								
Çap mm	Kesit alanı Mm ²	İlk boy mm	Son boy mm	Kopma %	Akma dayanımı N/mm ²	Çekme dayanımı N/mm ²	Çekme/akma	Max Yük kN
7.51	44.27	37.55	43.63	16.20	396.10	443.81	1.12	19.65



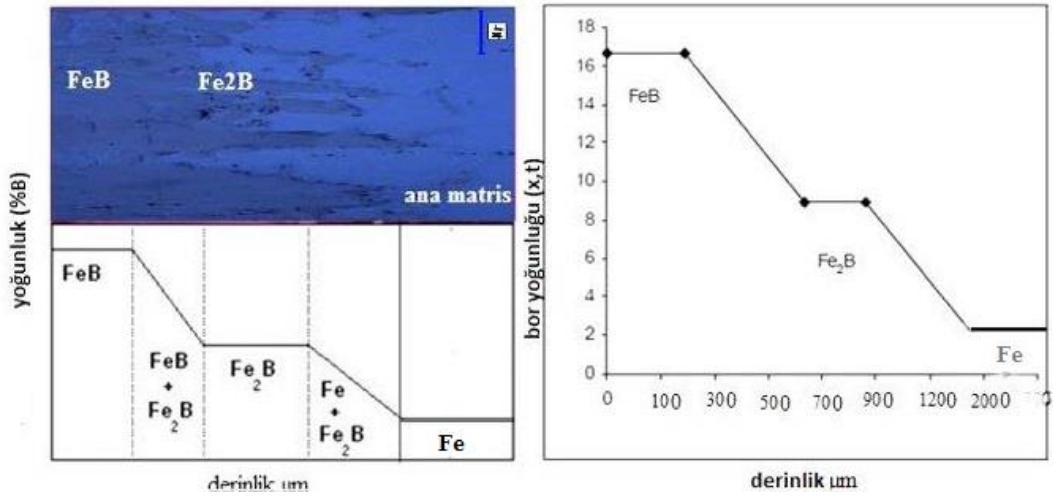
Şekil 5.10. 1000 °C normal normal borlanmış numunenin çekme testi grafik sonuçları

5.5. SEM-EDS Analiz Sonuçları

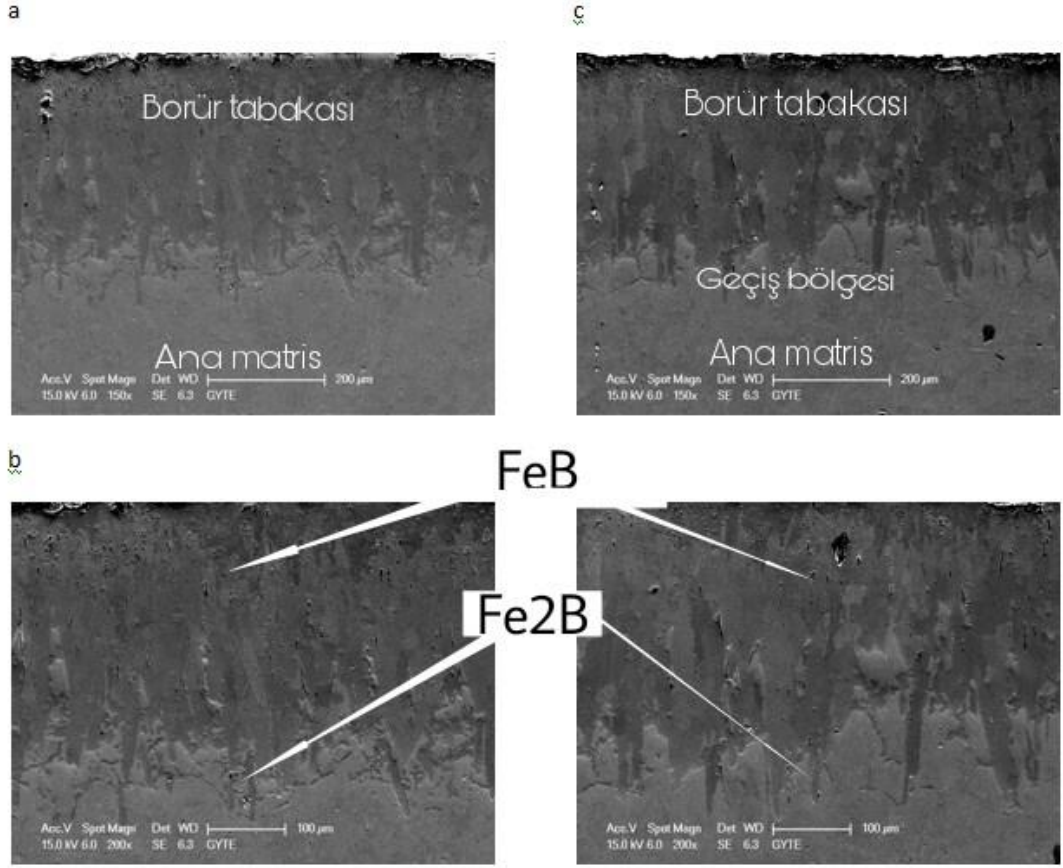
Aşağıdaki şekillerde 1000°C’de 16 saat normal borlanış ve 1000°C’de borlanmış 5’er saat bekletilerek 3 defa termal çevrim yapılmış borlama sonuçlarının kesit mikro yapısının SEM görüntüleri verilmiştir. Termal borlamada borun ana malzemeye doğru belirli yönlerde difüzyonu artmaktadır. Borlama yönteminin difüzyon kontrollü bir işlem olması sebebiyle borun malzeme yüzeyindeki yayılımı açısından oldukça önem arz etmektedir.



Şekil 5.11. (a,b) 16MnCr5 çeliği 1000°C’de borlanmış 5’er saat bekletilerek 3 defa termal çevrim yapılmış ve (c,d) 1000°C’de 16 saat normal borlanmış numunenin SEM görüntüleri



Şekil 5.12. 16MnCr5 çeliğin yüzeyden derinliğe göre yoğunluk şematik gösterimi

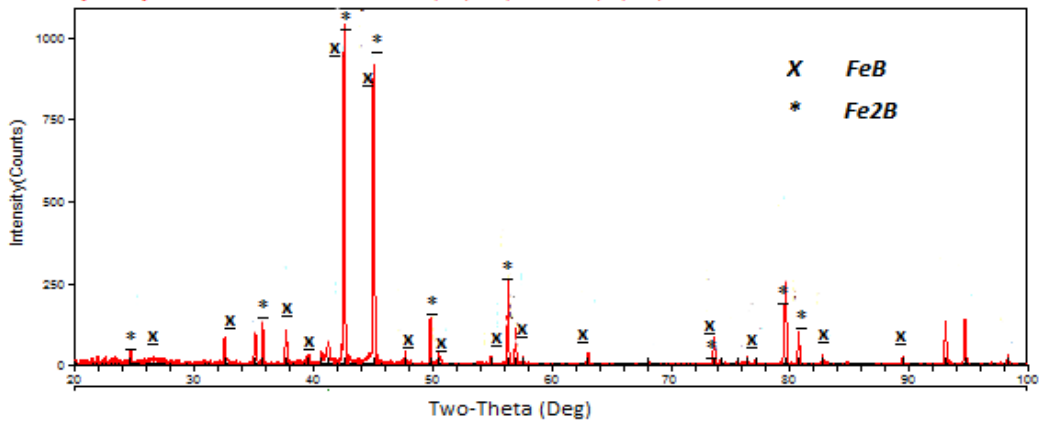


Şekil 5.13. (a,b) 16MnCr5 çeliği 1000°C’de borlanmış 5’er saat bekletilerek 3 defa termal çevrim yapılmış ve (c,d) 1000°C’de 16 saat normal borlanmış numunenin SEM görüntüleri

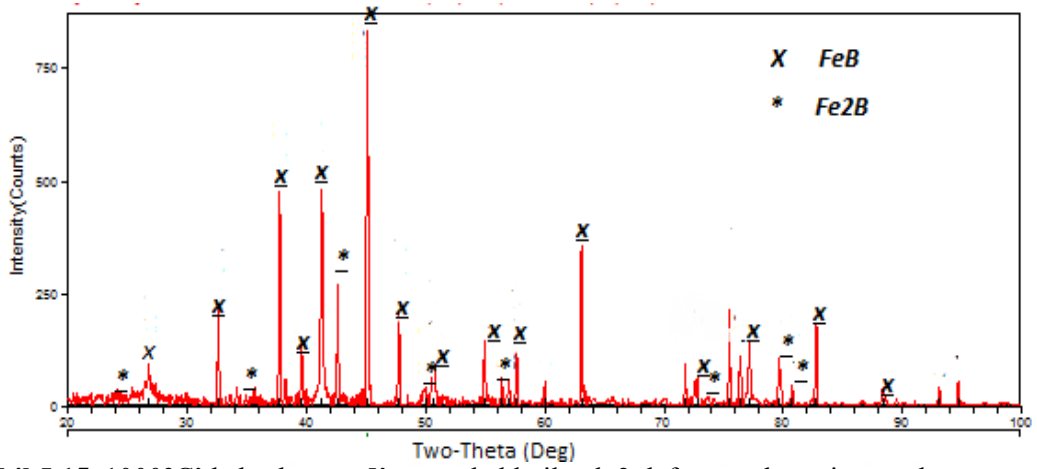
5.6. XRD Analiz Sonuçları

Farklı parametrelerde yapılan iki borlama işlemine tabi tutulan 16MnCr5 çelik numunelerin yüzeyinde oluşan borür tabakasındaki mevcut fazların tayini için X - Işınları difraksiyon analizi kullanılmıştır. İncelemeler sonucunda borür tabakasının termal borlamada daha verimli sonuçlar verdiği görülmektedir.

1000°C sıcaklıkta 16 saat iki tür borlama yapılan numunelerin Borür tabakalarında oluşan fazların x ışınları difraksiyon analiz sonuçları Şekil 5.14 ile Şekil 5.15’ te verilmiştir. Ekabor 1 ile borlanan numunelerde oluşan tabakada, FeB ve Fe₂B faz piklerinin olduğu gösterilmektedir. Burada Fe pikleri taban malzemesi 16MnCr5 sementasyon çeliğine aittir.



Şekil 5.14. 1000°C’de 16 saat borlanmış x-ışınları difraktogramı



Şekil 5.15. 1000°C’de borlanmış 5’er saat bekletilerek 3 defa termal çevrim yapılmış x-ışınları difraktogramı

6.TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bor minerali rezervi ve kaynakları açısından yeryüzünde önemli bir yeri olan ülkemizde, borun endüstriyel alanlarda kullanımında çok eksiklikler vardır. Bor üzerine yapılan akademik çalışmalar mercek altına alındığında ise borlama işlemi ile birçok malzemenin mevcut karakteristik özelliklerinde iyileşme olduğu dikkat çekmektedir. Özellikle sürtünen ve aşınmaya maruz kalan makine elemanlarının yüzey sertleştirilmesinde borlamanın diğer ısıl işlemlere göre daha verimli sonuçlar verdiği yapılan akademik çalışmalardan anlaşılmaktadır.

Yapmış olduğumuz çalışmada ticari saflıktaki bor mineralinin 16MnCr5çeliğinin mikro yapısına ve mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Yüzey sertliği ve aşınma performansı gibi mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Katı ortamda iki türlü borlamaya tabi tutulmuştur. Bunlardan birisi normal borlama yapılmıştır. İkincisinde termal çevrimli borlamaya tabi tutularak ikisi arasındaki farklar gözlenmiş ve termal çevrimli borlamanın daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Yapılan borlama işlemi 1000 °C sıcaklıkta 16 saat sürelerle gerçekleştirilmiştir. İki tür borlama Sonuçları kıyaslanmıştır. Daha sonra metalografik yöntemlerle hazırlanan numunelerin optik mikroskopik incelemeleri sonucu;

1) Normal borlamada borür tabakası, geçiş bölgesi ve ana yapının mikro yapısı net olarak gözlemlenmiştir. Termal çevrimli borlamada geçiş bölgesi gözlenememiştir. Ayrıca borlu tabaka kalınlığı, oluşan borür dişleri ile mikrosertlik ölçümlerinde metalografik incelemelerden yararlanılmıştır.

2) Borlanan numunelerde sertlik değerlerinin borür tabakasından ana yapıya doğru gidildikçe azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Bor elementinin borür oluşturmadığı kısımdan itibaren sertlik ana matrisin sertliğine düşmüştür. Ayrıca iki tür borlama sertlik değerleri kıyaslandığında sertlik değerleri birbirine yakın değerler olduğu gözlemlenmiştir, azda olsa ısıl çevrim yapılmış borlamada sertlik değerinin düştüğü sonucuna varılmıştır.

3) 1000°C'de yapılan borlama işlemleri eşit süreler baz alınarak incelendiğinde borlama işlemi yapılmış ticari saflıktaki 16MnCr5 çeliği numunelerin mikro yapı

incelemeleri sonucunda geçiş bölgesi ve ana yapının optik mikroskop ve SEM fotoğrafları çekilerek borür tabakası, geçiş bölgesi ve ana yapı tespit edilmiştir.

4) İki tür borlama yöntemi karşılaştırılmıştır. Termal çevrim yapılmış olan numunede daha fazla bor tabaka yoğunluğu oluşmuştur ve geçiş bölgesi oluşmadığı gözlemlenmiştir. Normal borlamada oluşan borür tabakası yoğunluğuna baktığımızda termal çevrimli borlamanın değerinin borür tabakası oluşumuna doğrudan etki ettiği görülmektedir.

5) normal borlama yapılmış numunelerin borür tabaka yüzeyinde mikro çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Termal çevrimli borlama yapılmış numunelerin borür tabakasında mikro çatlak oluşmadığı sonucuna varılmıştır.

Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında borlama ısı işleminin ticari saflıktaki 16MnCr5 sementasyon çeliğine de termal çevrimli borlamanın ne kadar daha verimli olduğu gözlenmektedir; uygulanan bu borlama işleminde borür tabakası, geçiş bölgesi ve ana yapının metalografik incelemeler sonucu elde edilmiş mikro yapı görüntülerinde net bir şekilde görülebileceği anlaşılmıştır. Ayrıca yapılan her iki tür borlama işleminden sonra ticari saflıktaki 16MnCr5çelik malzemelerin oluşacak borür tabakası vasıtası ile yüzey sertliğinin artacağı sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- Atik, E., 1997 "Çeliklerin Borlanarak Aşınma Dayanımlarının Artırılması" Makine ve Mühendis Dergisi, C. 38, S.445,17-20
- Ayter, T. (2005) Borlama İşlemi Çeliklerin Yüzey Kalitesi ve Aşınma Davranışına Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 110s.
- Barış M. (2007). Farklı Borlama Sürelerinin Transmisyon Çeliğinde Abrasif Aşınma Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Baştürk, S., Erten, M. 2006 Borlama ile Yüzey Sertleştirme Çalışmaları. Mühendis ve Makine, 563: 57–74.
- Bayça, S.U. ve Şahin, .S (2004) Borlama. Mühendis ve Makine, 532:51-59.
- Bozkurt, N., 1984. Bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Budinski K.G., 1993. TheWear of Diffusion Treated Surfaces, Wear, 162-164, 757-762.
- Campos., 2007. "Characterization of roughinterface sobtained by boriding", Applied Surface Science, 255:2596-2602.
- Çalık A.,2002. Türkiye'nin Bor Madenleri ve Özellikleri. Mühendis ve Makine Dergisi, Sayı 508, Ankara.
- Çalık A., Özsoy A., 2002. Termal Çevirimli Borlama İşleminin Ç1010 Çeliğine Etkileri. 11. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, İstanbul.
- Çalık A., Özsoy, A., 2004. Isıl Çevrimli Borlama işleminin SAE 1030 ve SAE 1050 İncelenmesi. Çeliklerine Etkileri. II. Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir.
- Çalık, A., 2005a. Termokimyasal Borlama Yöntemleri ve Önemi. 4th International Advaced Technologies Symposium, 839-844, Konya.
- Çalık, A., 2005b. Ostenitik Paslanmaz Çeliğin Katı Ortamda Borlama Özelliğinin Araştırılması. 4th International Advaced Technologies Symposium, 849-852, Konya.
- Çiftçi İ., 2004 "AISI H13 Ostenitik Paslanmaz Çeliğin Kaplanmış Sementit Karbür Kesici Takımla İşlenmesi Esnasında Oluşan Takım Aşınması", Teknoloji, 7 (3), 489-495.
- Delikanlı, K., Çalık, A., Uzun, H.A., 2003. Sade Karbonlu Bir Çeliğin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi. BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5 (1), 99-110.

- Dilektaşlı., 2014 Bazı Alaşımli Çeliklerin Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışına Borlama İşleminin Etkisi Yüksek Lisans tezi İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 110 S İstanbul
- ER Ü, Par B., 2004 Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi C.XVII, S.1, 2004
- Ersöz, A., 2008, Elektrokimyasal borlama ile çeliklerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 91 s.
- Eyre T.S., 1975. Effect of Boronising on Friction and Wear of Ferrous Metals. Wear, 33, 383-397.
- Fichtl W., 1981. Boronizing and its Practical Applications, Materials in Engineering, 2, 276-286.
- Geouriot., 1982. Methods for examining brittle layers obtained by a boriding surface treatment (Borudif), Wear, 86, 1-10.
- Hayashi Y. Sugeno T., 1970. "Nature of Boron in Iron", Acta Metallurgica, 18, 693-697.
- John., 1981 . A Study on electro boronizing of steel by superimposed cyclic current, J. Materials Science, 15, 1379-86.
- Liliental, W. and Tacikowski, J., 1980. Effect of heat treatment on the brittleness of boride layers on steel, Industrial Heating, 47, 34-36.
- Liao, P. K., Spear, K.E., 1970. B-Fe (Boron-Iron) Binary Diagrams of Binary Iron Alloys, pp. 41-47.
- Lovshenko et al., 1978. Vienna State University, Translated from Poroshkovaya Metallurgiya, Original Article Submitted Apr. 12
- Matuschka, A.G.V., 1980. Boronizing. München, Wien, Hanser, 100 s.
- Özbek, Ark., 2004. A Mechanical Aspect of Borides Formed on the AISI 440C Stainless-Steel, Vacuum, V73, s. 643-648.
- Özsoy A., 1991. Çeliğin Borlanması Borür Tabakası, Geçiş Sonu ve Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi. Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 101s, Eskişehir.
- Özsoy, A., 2001. Borlama ile İlgili Genel Bir Değerlendirme. Endüstriyel Yüzey Teknolojileri Dergisi, 22, 10-13.
- Reserved., 2013. 16MnCr5 çeliğinin ısıtım işlem bilgileri ve kimyasal bileşimi, Erişim Tarihi: 18.05.2016. <http://www.kalitemetalurji.com.tr>
- Selçuk B., 1994. Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Erciyes Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri.

- Selçuk B.Yüksek, S., Uysal, Ö., 2002. Demir Esaslı Makine Elemanlarının Aşınma ve Korozyon Direncinin Arttırılmasında Borun Rolü. 1. Uluslararası Bor Sempozyumu Kitabı, 114-118, Kütahya.
- Sinha, A.K., 1991. ASM Handbook, Boronizing, 4, Asm International, Materials Park, Ohio, Usa , S.437
- Soydan Y., 1996. Katı Ortamda Bor Yayınımı İle Sertleştirilen Çelik Yüzeylerinin Kuru Kayma Halinde Sürtünme ve Aşınma Davranışları. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 149s, İstanbul.
- Şahin, S.,1999. Katı Borlama Yöntemi ile Ferrobör Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 87s.
- Şen, Ş., 1998. Termokimyasal Borlama İşlemiyle AISI 5140, AISI 4140 ve AISI 4340 Çeliklerinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 165s, Sakarya.
- Taşcı, A., 1993. Borlanmış Çeliklerin Aşınma ve Korozyon Dayanımları. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 45s, İstanbul.
- Uluköy, A. Can, A.Ç., 2006. Çeliklerin Borlanması. Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12 (2), 189-198.
- 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.
- Yapar, Taştan., 2002. Çeliklerde Borlama Yoluyla Yüzey Sertleştirme, Metal Dünyası, 115, 69-74.
- Yapar, U., 2003. Düşük ve orta karbonlu çeliklerin termokimyasal borlama ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yılmaz., 2007. Borlama ve Bilyalı Dövmenin Demir Esaslı T/M Malzemelerde Yorulma Davranışına Etkisi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 1, 61-68.
- Yurtseven, R., 2008. Tel Çekme Sanayinde Borlamanın Endüstriyel Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ahmet KOÇASLAN

Doğum Yeri ve Yılı : Sütçüler, 1990

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : a-kocaslan@hotmail.com



Eğitim Durumu

Lise : Isparta Teknik Lisesi, 2007

Lisans :SDÜ Teknik Eğitim Fakültesi Mekatronik Öğretmenliği,2012