T.C.

HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KATI BORLAMANIN HARDOX 450 VE HARDOX HİTUF ÇELİKLERİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Mehmet TOPRAK

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2019

T.C.

HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KATI BORLAMANIN HARDOX 450 VE HARDOX HİTUF ÇELİKLERİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Mehmet TOPRAK

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2019

Doç. Dr. Bülent AKTAŞ ’ın danışmanlığında Mehmet TOPRAK ‘ın hazırladığı **“Katı Borlamanın Hardox 450 ve Hardox HiTuf Çeliklerin Yüzey Özelliklerine Etkisi’’** konulu bu çalışma 31/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Doç. Dr. Bülent AKTAŞ ……...

Üye : Prof. Dr. Adnan ÇALIK ……..

Üye : Doç. Dr. Şerife YALÇIN ……

Bu Tezin Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Prof. Dr. İrfan ÖZBERK

Enstitü Müdürü

Bu Çalışma HÜBAK Tarafından Desteklenmiştir.

Proje No: 15110

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
1.GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER 13
2.1. Bor Elementi Hakkında Genel Bilgiler 13
2.2. Bor Elementinin Tarihçesi 15
2.2.1. Bor madeninin Dünya'daki tarihçesi 15
2.2.2. Bor madeninin Anadolu'daki tarihçesi 16
2.3. Bor Elementinin Özellikleri 17
2.4. Bor Mineralleri 18
2.5. Bor Ürünleri ve Üretim Yöntemleri 21
2.6. Bor Elementinin Kullanım Alanları 25
2.7. Borlama İşlemi 27
2.7.1. Borlama yöntemleri 29
2.7.1.1. Katı borlama 29
2.7.1.2. Sıvı borlama 33
2.7.1.3. Gaz borlama 34
2.7.1.4. Plazma borlama 36
2.8. Borür Tabakası 38
2.8.1. Borür tabakasının yapısı 38
2.8.2. Borür tabakasının özellikleri 39
2.8.3. Borür tabakası kalınlığının belirlenmesi 40
2.8.4. Demir borürlerin büyüme mekanizması 41
2.8.5. Geçiş bölgesi 42
2.8.6. Demir ve bor (Fe-B) ikili faz denge diyagramı 42
2.8.7. Borür tabakasının sertliği 43
2.9. Hardox Çelikleri 44
2.9.1. Hardox çelikleri hakkında genel bilgiler 44
2.9.2. Hardox çelik türleri ve özellikleri 45
3. MATERYAL ve YÖNTEM 48
3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler 48
3.2. Borlama İşlemi 49
3.3. Metalografik İnceleme 51
3.4. XRD Analizi 53
3.5. Sertliklerin Ölçümü 54
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 56
4.1. XRD Analizi Sonuçları 56
4.2. Metalografik İnceleme Sonuçları 58
4.2.1. Optik mikroyapı sonuçları 58
4.2.2. Mikroyapı (SEM) sonuçları 63
4.3. Vickers Sertlik Sonuçları 71

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 76
5.1. Sonuçlar 76
5.2. Öneriler 77
KAYNAKLAR 79
ÖZGEÇMİŞ 83

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KATI BORLAMANIN HARDOX 450 VE HARDOX HİTUF ÇELİKLERİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Mehmet TOPRAK

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Bülent AKTAŞ
Yıl: 2019, Sayfa:83

Bu çalışmada; Hardox 450 ve Hardox HiTuf çelikleri katı borlama yöntemiyle 800, 900 ve 1000 ^{o}C sıcaklıklarda, 5 saat süre ile Ekabor-1 tozu kullanılarak borlanmıştır. Borlama ısıl işlemi sonucunda numunelerde oluşan fazlar, oluşan borür tabakasının difüzyon derinliği, borür tabakalarının yapısı ve borür tabakaların sertlikleri sırasıyla XRD, SEM ve Mikro-Vickers sertlik ölçme cihazı kullanılarak incelenmiştir. XRD analizleri sonuçları; Hardox 450 çeliğinin borlanmış bölgesinde FeB ve Fe_2B fazlarının meydana geldiğini ve Hardox HiTuf çeliğinde ise borür tabakası bölgesinde sadece Fe_2B fazının oluştuğunu göstermiştir. SEM mikroyapı incelemeleri sonucunda; borür tabakası derinliklerinin ortalama değerleri alındığında her iki çelik içinde 800 ^{o}C'de 60-70 µm, 900 ^{o}C'de 170-190 µm aralığında ve 1000 ^{o}C borlama sıcaklığında ise borür tabakası derinliğinin 335-345 µm arası değerlerde olduğu gözlenmiştir. Bu verilere göre, borlama sıcaklığı ile borlama tabakasının derinliğinin doğru orantılı olduğu ve sıcaklık arttıkça difüzyon derinliğinde bir artış olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, SEM mikroyapıları; örneklerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının parmaksı şekilde olduğunu göstermiştir. Hardox 450 çeliğinin sıcaklık değişimine bağlı olarak borür tabakası bölgesindeki sertlik değerleri 800-1250 kg/m^2, matris bölgesinde ise 100-140 kg/m^2 aralığında ölçülmüştür. Hardox HiTuf çeliğinde ise borür tabakası ve matris bölgesindeki sertlik değerleri sırasıyla, 750-900 kg/m^2 ve 80-100 kg/m^2 aralığında ölçülmüştür. Mikro-Vickers sertlik sonuçları Hardox 450 ve Hardox HiTuf çeliklerinin her ikisinde de borür tabakasının parmaksı yapısından matris yapıya doğru gidildikçe sertlik değerlerinin düştüğünü göstermiştir. Hardox 450 çeliğinin sıcaklık değişimine bağlı olarak borür tabakası bölgesindeki sertlik değerleri 800-1250 kg/m^2, matris bölgesinde ise 100-140 kg/m^2 aralığında ölçülmüştür. Hardox HiTuf çeliğinde ise borür tabakası ve matris bölgesindeki sertlik değerleri sırasıyla, 750-900 kg/m^2 ve 80-100 kg/m^2 aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre, borür tabakasının ana malzemeye kazandırdığı sertlik değeri matris sertlik değerinden yaklaşık 6-10 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca, her iki çelikte de borlama sıcaklığının artmasıyla birlikte borür difüzyon kalınlığı artarken, borür tabakasının sertlik değerlerinde ise bir azalma meydana gelmiştir. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde; Hardox çeliklerinden yapılmış iş makine ve makine parçalarının borla kaplanmasının malzemenin iş görebilirliğini ve kullanım ömrünü arttırabileceği sonucu çıkarılmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Hardox 450 çeliği, Hardox HiTuf çeliği, Katı borlama, Borür tabakası, Sertlik

ABSTRACT

MScThesis

THE EFFECT OF SOLID BORONIZING ON THE SURFACE PROPERTIES OF HARDOX 450 AND HARDOX HİTUF STEELS

Mehmet TOPRAK

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Bülent AKTAŞ
Year:2019, Page:83

In this study; Hardox 450 and Hardox HiTuf steels were boronized by solid boronizing method using Ekabor-1 powder at temperatures of 800, 900 and 1000 ^{o}C for 5 h. The phases formed in samples as a result of boronizing heat treatment, and diffusion depth of boride layer, structure and hardness of boride layers were investigated using XRD, SEM and Micro-Vickers hardness testers, respectively. XRD analysis results showed that FeB and Fe_2B phases were formed in the boronized area of Hardox 450 steel and only Fe_2B phase was formed in the boride layer area of the Hardox HiTuf steel. As a result of SEM microstructure investigations; when theme an values of the boride layer depths were taken, it was observed that the boride layer depths in both steel were between 60-70 µm at 800 ^{o}C, 170-190 µm at 900 ^{o}C and 335-345 µm at 1000 ^{o}C. According to these data, it was observed that the boron temperature and the depth of the boring layer were directly proportional and an increase in the depth of diffusion was observed as the temperature increased. Furthermore, microstructures investigations showed that the boride layers formed on the surfaces of the samples were in the form of finger. Depending on the change of the boronizing temperature, the hardness values of Hardox 450 steel in the boride layer and the matrix area were measured in the range of 800-1250 kg/m^2, and 100-140 kg/m^2, respectively. The hardness values of Hardox HiTuf steel in the boride layer and matrix area were measuredin the range of 750-900 kg/m^2 and 80-100 kg/m^2, respectively. Micro-Vickers hardness results indicated that the hardness values of the boride layer decreased from the finger structure to towards the matrix structure in both of Hardox 450 and Hardox HiTuf steel. Further, it was determined how the hardness value of the boride layer according to the base material was about 6-10 times higher than the matrix hardness value. Besides, while the boride diffusion thickness increased with the in crease of the boronizing temperature in both steels, the hardness values of the boride layer decreased. When all these results are evaluated, it is concluded that the boronizing of work machinery and machine parts made of Hardox steels can increase the operability and life of the material.

KEY WORDS: Hardox 450 steel, Hardox HiTuf steel, Solid boronizing, Boride layer, Hardness

TEŞEKKÜR

‘‘Katı Borlamanın Hardox 450 ve Hardox HiTuf Çeliklerin Yüzey Özelliklerine Etkisi’’ başlıklı tez çalışmamın konu tespitinde, literatür araştırmasında, numunelerin hazırlanmasında, deneylerin gerçekleştirilmesi aşamasında ve testlerin laboratuar ortamında yapılması işlemlerinde tarafıma her türlü yol göstererek tez çalışmamın tamamlanması noktasında destek ve yardımlarından dolayı değerli danışmanım Doç. Dr. Bülent AKTAŞ’a, teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmada; numunelerin katı borlama yöntemiyle kaplanması işleminin gerçekleştirilmesinde emeği geçen Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümünün başta Prof. Dr. Adnan ÇALIK olmak üzere tüm öğretim elemanlarına teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmada; numunelerin yüzey sertliğinin ve mikroyapılarının incelenmesi aşamasında laboratuar çalışmalarında sağlamış oldukları tüm imkânlar için Harran Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma Merkezi’ne (HÜBTAM) teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam boyunca bana manevi desteklerinden dolayı değerli eşim Serap TOPRAK’a, değerli ailemin tüm mensuplarına ve kuzenim Furkan TOPRAK’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Bor kristallerinin tipik görünümü 13
Şekil 2.2. 2014 yılında dünya bor üretiminin bölgelere göre dağılımı 14
Şekil 2.3. Bor minerallerinin kaşifleri..... 15
Şekil 2.4. Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması 28
Şekil 2.5. Örnek kutu borlama kabı şekli ve örneğin yerleşim şekli..... 30
Şekil 2.6. Akışkan yataklı borlama düzeneği..... 33
Şekil 2.7. Gaz borlama ünitesi 35
Şekil 2.8. Plazma borlama sistem şeması 37
Şekil 2.9. Borür tabakası çeşitleri 38
Şekil 2.10. Borür tabaka kalınlığının belirlenmesi 40
Şekil 2.11. Fe-B denge diyagramı 43
Şekil 2.12. Aşınmaya maruz kalmış hardox çeliğinden üretilmiş olan makine aparatı.....45
Şekil 2.13. Hardox 400 çeliğinden üretilmiş örnek bir makine takımı 46
Şekil 2.14. Hardox 450 çeliğinden üretilmiş örnek bir makine takımı 46
Şekil 2.15. Hardox aşınma levhasından imal edilmiş kepçe ve kırıcı..... 47
Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan örneklerin resimleri 48
Şekil 3.2. Elektrik rezidanslı kül fırını..... 49
Şekil 3.3. Numunelerin seramik pota içerisindeki yerleşimi ve ekrit tozu ile üstünün kapatılması..... 50
Şekil 3.4. Potaların kapaklarının kapatılması..... 50
Şekil 3.5. Metalografik zımparalama ve parlatma cihazı..... 51
Şekil 3.6. KOZO markalı XJM 200 mikroskop cihazı..... 52
Şekil 3.7. ZEISS EVO 50 markalı taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı..... 53
Şekil 3.8. Ultima III-Rigaku markalı x-ışını kırınımı (XRD) cihazı 54
Şekil 3.9. AOB Lab markalı Mikro-Vickers sertlik ölçme cihazı……..... …55
Şekil 4.1. Hardox 450 çeliklerinin 900 ºC'de 5 saat süreyle borlanmış ve borlanmamış numunelerin XRD desenleri ..……..…. 56
Şekil 4.2. Hardox HiTuf çeliklerinin 900 ºC'de 5 saat süreyle borlanmış ve borlanmamış numunelerin XRD desenleri 57
Şekil 4.3. Hardox 450 çeliğinin borlanmış kenara yakın matris bölgesinden mikroyapısı..... 59
Şekil 4.4. Hardox 450 çeliğinin borlanmış bölgenin kenara yakın yerden mikroyapıları..... 60
Şekil 4.5. Hardox HiTuf çeliğinin borlanmış kenara yakın matris bölgesinden mikroyapısı 61
Şekil 4.6. Hardox HiTuf çeliğinin borlanmış bölgenin kenara yakın yerden mikroyapıları 62
Şekil 4.7. Hardox 450 çeliğinin borlanmış kenara yakın matris bölgesinden SEM mikroyapısı..... 63
Şekil 4.8. Hardox 450 çeliğinin borlanmış bölgenin kenara yakın yerden SEM mikroyapıları..... 64
Şekil 4.9. Hardox HiTuf çeliğinin borlanmış kenara yakın matris bölgesinden SEM mikroyapısı 66
Şekil 4.10. Hardox HiTuf çeliğinin borlanmış bölgenin kenara yakın yerden SEM mikroyapıları 67
Şekil 4.11. 1000 ºC sıcaklıkta ve 5 saat sürede borlanmış Hardox 450 ve Hardox HiTuf çeliğinin kenardan 750X büyütmeli SEM görüntüsü..... 68
Şekil 4.12. Hardox 450 ve Hardox HiTuf çeliklerinin borlanma sıcaklığının ortalama borlama tabakası derinliğine etkisi 69
Şekil 4.13. Borlanmış örneklerin kenara yakın kısmından Mikro-Vickers sertlik ölçümlerinin alındığı noktalar……. ..... …72
Şekil 4.14. Hardox 450 çeliğin borlama sıcaklığına göre sertlik değerlerinin değişimi 73
Şekil 4.15. Hardox HiTuf çeliğin borlama sıcaklığına göre sertlik değerlerinin değişimi……..... …74

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Bor ve bazı birleşikleri ile elmasın sertlikleri 14
Çizelge 2.2. Borun atomik yapısı 17
Çizelge 2.3. Borun kimyasal özellikleri 17
Çizelge 2.4. Borun fiziksel özellikleri 18
Çizelge 2.5. Bor kimyasal ve alaşımlarının kullanım alanları……. ...……25
Çizelge 2.6. Kutu borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcıların bazı özellikleri 30
Çizelge 2.7. FeB ve Fe_2B'nin bazı fiziksel özellikleri 40
Çizelge 2.8. Fe - B tabakalarının sertlikleri ve erime noktaları 44
Çizelge 3.1. Hardox 450 ve Hardox HiTuf çeliklerin kimyasal kompozisyonu (%) 48
Çizelge 4.1. SEM görüntülerinden alınan örneklerin ortalama borlama tabaka derinliği 70
Çizelge 4.2. Borlanmış Hardox 450 çeliğin 3 kenarından ölçülen sertlik ölçüm sonuçlarının ortalama değerleri 72
Çizelge 4.3. Borlanmış Hardox HiTuf çeliğin 3 kenarından ölçülen sertlik ölçüm sonuçlarının ortalama değerleri 73

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
DIN	Alman Standartlar Enstitüsü
EDS	X-Işını Enerji Dağılımı Spektrometresi
Ekabor	Borlama tozu
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X-Işını Kırınımı
B	Bor elementi simgesi
Fe	Demir elementi simgesi
µm	Mikrometre
Ppm	Herhangi bir karışımda toplam madde miktarının milyonda 1 birimlik maddesi

1.GİRİŞ

Makine endüstrisindeki uygulamalarda kullanılan makineler ve makine takımlarının kullanım süreci içerisinde, çalışma şekillerindeki farklılıklarından oluşan değişik aşınma şekilleriyle malzemelerin yüzeylerinde meydana gelen aşınmalarda ve makinelerin kullanım alanlarında aparatlara yüksek mukavemetli kuvvet uygulanması gibi durumlar makine ve takımlarının kullanım ömrünü olumsuz etkilemektedir. Makine ve takımlarının işletme şartlarına ve çalışma koşullarına dayanamayarak kullanım ömrünün azalması makine sanayisinde ciddi derecede maddi kayıplara yol açmıştır. Belirtilen bu sorunların giderilmesi adına malzemelere istenilen sertliği kazandırmak ve kullanım ömrünü uzatmak amacıyla birçok çalışma yapılmış ve bu çalışmalar günümüzde halen devam etmektedir.

Makine parçalarının mukavemetleri ısıl işlemlerle arttırılabildiği ve bu ısıl işlemlerden birisi de borlamadır. Borlama işlemi uzun bir geçmişe sahip olup, 1895 yılında ilk kez Moissan tarafından gerçekleştirilmiştir. Borlama ile ilgili çalışmalar 1970'li yıllardan itibaren artırılarak, günümüzde teknolojik olarak geliştirilmiş ve özellikle endüstride kullanılan alternatif bir yöntemdir (Özer, 2011).

Hardox çeliklerine yönelik yapılan literatür araştırması sonucunda; yüksek aşınma dayanımı, tokluğa ve sertliğe sahip Hardox çeliklerinin çeşitli alanlarda kullanılmak üzere kendi içerisinde değişen özelliklerinden (sertlik değerleri, aşınma dayanımı, tokluğu vb.) dolayı farklı isimlerde tanımlandıkları görülmektedir. Bu çeliklerin kullanım alanları yüzey sertliği, darbe tokluğu, yüksek mukavemet, yüksek aşınma direnci ve kullanım ömrünün uzun olmasını gerektiren makine endüstri sahalarında kullanıldığı görülmektedir.

Bu çalışmada; Hardox çelikleri sınıflarından olan Hardox 450 ile Hardox HiTuf çeliklerinin istenilen sertliğe, mikroyapıya ve kullanım yerlerinde yüksek verime sahip olabilmesi için ısıl işleme tabii tutmuştur. Isıl işlem yöntemi olarak katı

borlama yöntemi tercih edilerek; farklı sıcaklık değerlerinde ve sabit süredeki parametreler ile işleme tabii tutulmuştur. Kullanım alanlarına göre çeliklerin borlama yöntemindeki uygun sıcaklık aralığının tespiti amaçlanmıştır.

Literatür incelemesi sonucu; konuyla ilgili daha önceki yıllarda yapılmış olan çalışmalardan bazıları aşağıda özet olarak verilmiştir:

Nair (1996), AISI 1020, AISI 1040 ve AISI 4140 çeliklerine sabit sürede (2 saat) ve değişen sıcaklıklarda (800, 900, 1000 ve 1100 ^{o}C) borlama işlemi uygulanarak en uygun borlama sıcaklığını tespit edilesi amaçlamıştır. Sabit sıcaklıkta (900 ^{o}C) ve değişen sürelerde (2, 3, 4, 5 saat) borlama işlemi uygulanarak en uygun borlama süresini tespit etmek amacıyla gerçekleştirmiştir. İşlemler neticesinde; numunelerde maksimum sertlik değerlerini 900 ^{o}C borlama sıcaklığı ve 5 saat borlama süresininde elde etmiştir. Ayrıca, alaşımsız ve alaşımlı çeliklerde oluşan borür tabaksının Fe_2B fazında olduğu ve dişli forma sahip olduğunu tespit etmiştir. Ana malzemeye borür tabakasının geçişi alaşımlı çeliklerde geçiş bölgesinden gerçekleşirken, alaşımsız çeliklerde geçiş bölgesine rastlanılmamıştır. Mikrosertlik ölçümü sonucunda, malzeme cinsine, borlama sıcaklığına ve borlama süresine bağlı olarak 700-1750 $HV_{0.06}$ mikrosertlik değeri ve 30-60 µm arasında değişen borür tabakası kalınlıkları elde etmiştir.

Uzun (2002), farklı sıcaklık ve süre parameterlerinde Ç1040 çeliğine borlama işlemi uygulamıştır. Ç1040 çeliğine 4 farklı borlama işlemi gerçekleştirmiştir. Borlama işlemlerinin numunelerin birincisinde 950 ^{o}C sıcaklıkta 3 saat, ikincisinde 950 ^{o}C sıcaklıkta 5 saat, üçüncüsünde 1000 ^{o}C sıcaklıkta 3 saat ve dördüncü de ise 1000 ^{o}C sıcaklıkta 5 saat parametrelerinde borlama işlemi gerçekleştirmiştir. Tüm numunelere havada soğutma işlemi uygulamıştır. Bu dört grup deneylerde borlama tozu olarak ferrosilisyum ile yeni susuz boraks (tinkal) tozları karışımı kullanılarak katı borlama işlemi gerçekleştirmiştir. Borür tabakalarının yüzeyinden parmaksı uçlarına (matrise) doğru gidildikçe sertlik değerleri azaldığını ve bu nedenle borlü tabakanın en dış yüzeyinde FeB fazı, parmaksı kısımlarında ise Fe_2B fazının

oluştuğu belirtilmiştir. Ayrıca borür tabakasının sertlik değerinin matris sertlik değeriyle kıyaslandığında borür tabakasının sertlik değerinin çok daha fazla olduğu, borlama sıcaklığı ve süre parameterlerinin değerlerinin artmasıyla mikro sertlik değerinin arttığını tespit etmiştir.

Yapar (2003), ticari EN-TS-C10E, EN-TS-C35E, EN-TS-C60E ve 41Cr4 makine yapım çeliklerini farklı borlama süreleri (2, 4, 6 ve 8 saat) ve farklı borlama sıcaklıklarıyla (850, 950 ve 1050 ºC) borlama işlemi gerçekleştirmiştir. Borlama işlemine bağlı olarak numune yüzeylerinde oluşan borür tabakası ve numunelerin yüzey özellikleri incelemiştir. Borlanan tüm numunelerde sertlik görüntüleri çıkartılmış ve numune yüzeylerinde ana numunenin sertliğinden 7-9 kat civarında yüksek sertlik değerlerinin bulunduğunu tespit etmiştir. Ayrıca numunelerin yüzey kısımlarında kolonsal yapıda FeB fazını ve alt kısmında ise Fe_2B fazını elde etmiştir.

Er ve Par (2004), 950 °C sıcaklık değerinde ve farklı sürelerde (2, 4 ve 6 saat) katı ortamda toz borlama tekniğiyle AISI 1030 ve 1050 sade karbon çeliklerine işlem uygulamıştır. Borlama işlemiyle numunelerde oluşan borür tabakalarının kalınlıklarını ve yüzey sertliklerini ölçmüştür. AISI 1030 ve 1050 çeliklerinin borlanmış hallerinin borlanmamış hallerine göre yüzey sertlikleri bakımından yüksek değerlerde artmalar elde edildiği sonucuna varmışlardır.

Çalık ve ark. (2004), düşük karbonlu ve alaşımsız Ç 1035 çeliğinin yüzeyine bor emdirilmiş ve çeliğin yüzeyinin kimyasal bileşimi (kompozyonu) değiştirilerek borlama işlemi uygulamışlardır. Hazırlanan çelik numuneleri 950 °C ile 3 saat süre parametrelerinde, %20 ferro silisyum ile %80 susuz boraks (tinkal) karışımı tozlu ortamda borlama işlemi gerçekleştirilmiş ve havada soğutma uygulamışlardır. İşlemlerini çelik malzemeli borulardan hazırlanan potalarda yapmışlardır ve kutu borlama yöntemi kullanmışlardır. İşlem neticesinde malzemelerin optik mikroyapı ve SEM mikroyapı fotoğraflarını çekmişlerdir. Elde ettikleri borür tabakasının morfolojisini, tabaka kalınlığını ve mikrosertliklerini incelemişlerdir. Borür tabakasının kolonsal (parmaksı) yapıda oluştuğunu tespit etmişlerdir. Borür tabakası

bölgesinde yüzeyden parmaksı uçlara (matrise) doğru mikrosertliklerinin azaldığı, bu nedenle de borür tabakasının en dış bölgesinin FeB fazından, parmaksı bölgelerinin ise Fe_2B fazından oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Barış (2007), Ç1040 çeliğinden, 6x6x55 mm boyutlarında 9 adet numune üçerli gruplar halinde 3 durumda, katı borlama yöntemi ile Ekabor-2 tozu kullanılarak Argon gazı (Ar) korumalı borlanma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Numunelerden I. Grup 900 ^oC'de 4 saat, II. Grup 900 ^oC'de 6 saat ve III. Grup 1000 ^oC'de 4 saat süre ile fırında bekleterek borlama işlemlerini gerçekleştirmiştir. Borlanmamış numunenin sertliği 192 HV, borlanmış I., II. ve III. grup numunelerin yüzey sertlikleri sırasıyla 1583 HV, 1716 HV ve 1693 HV olarak ölçmüştür.

Taştan (2010), AISI 1020, AISI 1040, AISI 4140 ve AISI H13 çeliklerine farklı sıcaklık (820, 860, 900 ve 940 ^oC) ve farklı süre (2, 4, 6 ve 8 saat) parametrelerinde borlama işlemi gerçekleştirilmiş ve borür tabakası kalınlıkları ölçülmüştür. AISI 1020 malzemesinin 940 ^oC sıcaklık ile 8 saat sürede borlanmasıyla en yüksek tabaka kalınlığını, H13 malzemesinin 820 ^oC sıcalık ile 2 saat sürede borlanmasıyla da en düşük tabaka kalınlığını elde etmiştir. Genellikle C oranının artması B difüzyonunu zorlaştırdığından yüksek C oranı içeren çeliklerde daha düşük seviyede borür tabakalarını elde etmiştir.

Öner (2010), borlanmış volfram metalinin mekanik ve kinetik özelliklerini incelemiştir. Borlama işlemini ekabor tozlarından oluşan katı bir ortamda (1040, 1090 ve 1140 °C) farklı sıcaklıklarda ve (2, 4, 8, 12 ve 16 saat) farklı sürelerde yapmıştır. XRD analizleri ile volfram metali üzerinde oluşan borür tabakasının çoğunlukla WB olduğunu göstermiştir. Ancak, bazı sıcaklık ve sürelerde W_2B fazının varlığını da ortaya koymuştur. Metalografik çalışmalar sonucunda; volframın yüzeyinde neredeyse bütünüyle düz, dişli ve poroz yapıdaki borür tabakasının oluştuğunu gözlemiştir. Ayrıca, borlama süresi ve sıcaklığı ne kadar yüksek olursa o kadar kalın borür tabakası oluşacağını bildirmiştir. Borür tabakası kalınlığı bazı degişkenlerle birlikte 12.66 μm ile 157.56 μm aralığında değiştiğini gözlemiştir.

Borlanmış numunelerin sertliklerinin yüzeyden itibaren içeriye doğru mesafeyle beraber düştüğü gözlemlemiştir. Altlık malzemenin üzerindeki borürün ortalama sertliği 1882 HV ile 4982 HV aralığında değişirken altlık malzemenin sertliği 456 HV ile 577 HV aralığında değiştiğini tespit etmişlerdir.

Alparslan (2011), AISI 1050 ve AISI 1010 çeliklerine Ekabor-II tozu kullanılarak katı ortamda borlama işlemini 900 °C sıcaklık ve 6 saat süre parametrelerinde gerçekleştirmiştir. Borlanmış numunelerin SEM, XRD ve Mikrosertlik analizlerini ölçmüştür. Yapılan analizler sonucunda, AISI 1050'de 1365 HV'lik, AISI 1010'da ise 1520 HV'lik bir sertlik değeri elde etmiş ve borlamış her iki numunede de FeB ve Fe_2B fazlarının oluştuğunu tespit etmiştir. Kullanım şartlarına bağlı olarak ömürlerinin 6-12 kat arttırılabildiğini gözlemiştir.

Gençer ve ark. (2011), Saf Fe ve Fe-8V numunelerine, borlama tozu %90 SiC, %5 KBF ve %5 B_4C içeren karışım içerisinde 900, 1000 ve 1100 ºC (±5 ºC hassasiyetinde) sıcaklıkları 3 saat süre parametrelerinde seramik pota içierisinde borlama işlemine tabii tutulmuştur. XRD sonuçlarında saf Fe yüzeyindeki borlu tabakada Fe_2B ve FeB fazları oluşurken, Fe-8V alaşımı yüzeyindeki borlu tabakada sadece FeB fazının oluştuğunu göstermişlerdir. Oluşan borür bileşiklerinin çoğu Fe_2B ve FeB borür olduğunu ve bunun dışında oluşan borürlerin bir kısmının yapıda Fe-V-B çökeltisi şeklinde bulunduğunu tespit etmişlerdir.

Azaklı (2012), tungsten elementinin demir esaslı malzemelerin borlanma davranışına müstakil etkisini belirlemek için saf demir ve saf tungsten kullanılarak ark ergitme cihazında %1, 2, 4, 8, 12 ve 16 W içeren sentetik Fe-W alaşımları hazırlamıştır. Saf demir ve Fe-W alaşımlardan elde edilen numunelere kutu borlama yöntemiyle Ekabor-II tozu içerisinde 1100 °C sıcaklık ve 3 saat süre parametrelerinde borlama işlemine tabii tutulmuştur. Yüzeyden yaptığı XRD analizleri neticesinde borlanmış tüm numunelerde FeB ve Fe_2B fazları tespit etmiştir. Ayrıca %8 ve daha fazla tungsten içeren numunelerde de FeW_2B_2 fazını tespit etmiştir. Borür tabakasının, geçiş bölgesi ve matrisin sertliğinin, artan tungsten

miktarıyla arttığını rapor etmiştir. Elde edilen en yüksek sertlik değeri Fe-16W numunesinin borür tabakasından ölçülmüş ve 2700 HV değerinin üzerinde olduğunu tespit etmiştir.

Üçkardeşler (2013), GS 52, GS 60, AISI 8620 ve GX120Mn13 çelik döküm numunelere farklı sıcaklık (850, 900 ve 950 °C) ve farklı süre (2, 4 ve 6 saat) parametrelerinde paket borlama metodunu uygulamıştır. Karbon çeliğinde oluşan borür tabakasında FeB ve Fe_2B bileşiklerine ait iki borid katmanın oluştuğunu tespit etmiştir. GX120Mn13 çeliği en düşük borid katman kalınlığına, GS 52 malzemesi ise en yüksek borid katman kalınlığına sahip olduğunu tespit etmiştir.

Kabadayı (2013), DIN 1.4849 (G-X40NiCrSiNb 38-18) kalite çeliğine (850, 950 ve 1050 °C) farklı sıcaklıklarda ve (3, 6, 9, 12 ve 15 saat) farklı sürelerle ticari Ekabor-2 toz karışımı kullanılarak katı borlama ısıl işlemi uygulamıştır. Borür tabaka kalınlığının, borlama işleminin sıcaklık ve süre parametrelerine bağlı olarak arttığı bildirmiştir. Ayrıca, sertlik değeri ortalama olarak 1635 HV olan parmaksı (çubuksu) bir yapıda oluştuğunu tespit etmiştir. XRD analizleri sonucunda da yapısında Fe_2B ile Fe_3B tabakalarının oluştuğunu tespit etmiştir.

Demirel (2013), AISI 8640 ve GS 60 çeliklerine, Ekabor-2 tozu içerisinde farklı sıcaklık (850, 900 ve 950 ºC) ve farklı süre (2, 4, 6 ve 8 saat) parametrelerinde borlama işlemi uygulamıştır. Borlama süresinin arttırılmasıyla daha kalın katman oluştuğunu görmüştür. Mikrosertlik ölçümleri sonuçlarında borlama sıcaklığı ve süresinin arttırılmasıyla sertlik değerlerininde arttığını, XRD analizi sonucunda da her bir çeliğin yüzeyinde de FeB ve Fe_2B fazlarının oluştuğunu tespit etmiştir.

Ünüvar (2013), ticari saflıktaki kobalt numunelerine 900 °C ve 1000 °C sıcaklıklarla 1, 3 ve 6 saat sürelerde borlama işlemi uygulamıştır. Daha sonra metalografik yöntemlerle hazırlanan numunelerin optik mikroskobik incelemeleri sonucu borür tabakası, geçiş bölgesi ve ana yapının mikroyapısı net olarak gözlemleyebilmiştir. Borlanan numunelerde sertlik değerlerinin borür tabakasından

ana yapıya doğru gidildikçe azalma gösterdiğini tespit etmiştir. Borlama sıcaklığı ve borlama süresi ile borür tabakası kalınlığının arasında doğru orantı olduğunu tespit etmiştir.

Cengiz ve ark. (2015), Fe-Cu ikili alaşımları (içerisine %1, %2, %4, %8 ve %16 oranlarda bakır katkısı yapılarak hazırlanan) ve saf demir 1000 °C sıcaklıkta ve 3 saat sürede kutu borlama yöntemiyle işlemine tabii tutmuştur. XRD analizinde tabakaların tümünde FeB ve Fe_2B fazlarını tespit etmiştir. Borür tabakasının morfolojisi altlıktaki Cu miktarının artmasıyla değişikliğe uğradığını, altlığa taraf taraksı şeklinde bir yapıda gelişen borür tabakası incelenmiş ve dişlerin daha fazla uzadığını görmüştür. Bakır atomlarının Cu_xB_y bileşiğini oluşturmadığı ve demir borür tabakası içerisinde de çözünmediği görülmüştür. Fakat borür tabakası dişlerinin büyüme yönüne paralel halde gruplaşarak bakırca zengin çökeltiler oluşturduğunu gözlemiştir. Saf Fe ve Fe-16 Cu alaşım üzerindeki tabaka sertlikleri sırasıyla 2100 HV ve 1350 HV yaklaşık değerlerinde ölçmüştür.

Topuz (2016), DIN 1.2842 (90MnCrV8) soğuk iş takım çeliğine, farklı sıcaklık (850, 950 ve 1050 °C) ve farklı süre (1 ve 4 saat) parametrelerinde Ekabor-1^{TM} tozuyla borlama işlemi gerçekleştirmiştir. Çalışmasında, borlama parametrelerindeki (sıcaklık-zaman) artışa bağlı olarak borür tabakası kalınlığınında artış gösterdiğini saptamıştır. XRD analizleri sonucunda FeB ve Fe_2B fazlarının yanında ayrıca çeliğin içerisindeki yüksek miktardaki Mn'den dolayı MnB, Mn_2B ve diğer demir esaslı malzemelerde de rastlanabilen FeB_{49} fazını da gözlemiştir. Demir esaslı malzemelere borlama işlemi uygulanması sonucunda borür tabakası bölgesinde ikili (FeB ve Fe_2B) fazları oluştuğu tespit edilmiştir. Bu fazlardan FeB fazının Fe_2B fazından üzerinde (yüzeye daha yakın) oluşmasında Fe_2B fazının içermiş olduğu demir miktarının yüksek olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Bu fazlar yapısal olarak iki faz testere dişine benzer bir şekilde birbirlerine bağlanarak borür tabakasının oluşturduğunu göstermiştir.

Sağlam (2016), çelik dişli sondaj takımları 1000 °C sıcaklık ve farklı süre (30, 45, 60, 75, 90 ve 105 dakika) parametreleri kullanılarak termokimyasal bir yöntemle (nano bor tozuyla) kaplamıştır. Nano bor tozunun O_2 karşı affinitesinden dolayı bor tozunun potaya doldurulması Ar gazı ortamında yapmıştır. XRD analizi neticesinde; borür tabaka bölgelerinde faz olarak NiB, CrB Cr_2B, FeB ve Fe_2B oluştuğu gözlemiştir. Borlama işlemindeki parametrelerden olan borlama süresinin arttırılması ile borür tabakaları kalınlıklarında ve sertliklerinde artışlar gözlemiştir. Ayrıca, borlama işlemi ile yüzey sertliğinin 5 kat civarında arttığını tespit etmiştir.

Turku (2016), 900 ^oC sıcaklık ve 8 saat süreyle borlama işlemine tabii tutulan Ni-Ti ikili ve Ni-Ti-Cu üçlü şekil hafızalı alaşımların Ekabor Ni ortamında borlanması ile ortaya çıkan özelliklerini araştırmıştır. Borlanmış Ni-Ti ikili şekil hafizalı alaşımların borür tabakaları çökelmiş fazları ihtiva ettiği bulumuştur. Buna ilaveten, testere dişi şeklindeki borür tabakaları artan Cu yoğunlaşması ile daha düz bir görünüm sergilemiştir. Bunun yanı sıra borlanmış ikili şekil hafizalı Ni-Ti alaşımı ile karşılaştırıldığında borlanmış Ni-Ti-Cu üçlü alaşımlarında borür tabakası kalınlığı daha düşük olduğu ve borür tabaka kalınlığı artan Cu yoğunlaşması ile azaldığı tespit etmiştir. XRD analizleri borlanmış ikili ve üçlü şekil hafızalı alaşımların borür tabakalarında NiSi, Ni_2Si, TiB_2 ve $Ni_{4.6}Si_2B$ fazlarının oluştuğunu ortaya koymuştur. Sertlik değerleri her bir numunede yüzeyden matrise doğru azaldığı ve borür tabakasında elde edilen sertlik değerleri bu bölgede oluşan sert borür fazları nedeniyle matrise göre 4-5 kat arttığı bildirmiştir.

Doğan (2016), 900 ^oC sıcaklık ve farklı süre (2, 4, 6 ve 8 saat) parametreleriyle Ekabor Ni ortamında borlamaya maruz bırakılan Ni-Ti ikili şekil hafızalı alaşımların borlama özellikleri araştırmıştır. Borür tabakalarının mikrosertliği ve kalınlığı artan borlama süresi ile arttığı ve buna ilaveten, borür tabakasından ana yapıya giderken sertlik değerlerinde hızlıca bir düşüş olduğunu göstermiştir. Borür tabakasındaki yüksek sertlik değerlerinin bu bölgede oluşan TiB_2 borür fazının varlığına atıf etmiştir.

Kara (2017), α-tipi Grade-2 Ti, (α+β)-tipi Ti-6Al-4V alaşımı ve β-tipi Ti-45Nb alaşımından elde edilen numuneler bir karışım (amorf bor + susuz boraks + aktif karbon) içerisinde katı borlama işlemi uygulanmış ve işlem sonucunda borür tabakalarının mekanik ve yapısal özellikleri incelemiştir. Bileşime bağlı olarak değişik büyüme kinetiği sonucu her bir numunenin yüzeyinde farklı kalınlıklarda TiB_2(.NbB_2) ve TiB fazlarından oluşan ikili borür tabakası oluşmuştur. Grade-2 Ti ve Ti-6Al-4V alaşımından üretilen numune yüzeylerinde geliştirilen borür tabakalarında en yüksek sertlik değeri 4000 HV, Ti-45Nb alaşımından üretilen numunelerde ise 3500 HV olarak ölçmüştür.

Yamanel (2018), AISI 5140 ıslah çeliğine borlama sıcaklığı 950 °C ve borlama süresi olarak 4, 6 ve 8 saat olarak üç farklı süre katı borlama yöntemi uygulamıştır. Bor ajanı olarak ise yerli Baybora kullanmıştır. Borlama işlemleri sonucunda; sertlik, mikroyapı ve bazı mekanik özellikler incelemiştir. Çeliğin borlama işlemi süresi arttırıldıkça yüzeyindeki borür tabaka kalınlığının da arttığını gözlemiştir. Borlanmış AISI 5140 çeliğinin işleme tabii tutulmayan AISI 5140 çeliğine göre sertlik değerinin yaklaşık 4 kat arttığını belirtmiştir. Borlama neticesinde meydana gelen borür tabakasında iki farklı kimyasal bileşime sahip yapıya rastlamıştır. Bu yapılar gevrek FeB yapısı ile yüksek sertlik değerine sahip Fe_2B fazıdır. Borlama sonrası uygulanan ısıl işlemin bor yüzeyinde meydana gelen borür tabakasını azalttığı buna karşılık yalnız borlanmış numuneye göre sertlik değerlerinde ise önemli bir değişim gerçekleşmediğini tespit etmiştir.

Birden (2018), çalışmasında AISI 304L austenitik paslanmaz çeliğine, katı borlama yöntemiyle 950 ºC'de ve farklı süre (2, 4, 6 ve 8 saat) parametrelerinde işlem uygulamıştır. Bu çelikleri SEM, XRD ve Vickers sertlik analizleri yapılarak incelenmiştir. Borlanan numunelerin borür tabakası, alaşım elementlerine bağlı olarak düz ve daha ince bir yapıda olduğu görülmüştür. Difüzyon süresi arttıkça bor tabaka kalınlığının arttığı gözlemiştir. Borür tabaka kalınlığı 20 μm - 50.6 μm ve porozite bant genişliği 13.6 μm - 24.4 μm olarak ölçmüştür. Oluşan FeB, Fe_2B, CrB,

MnB gibi inter-metalik fazlar XRD analizleri sonucunda belirlemiştir. Vickers sertlik analizleri sonucunda 1515.1 $HV_{0,1}$ - 382.3 $HV_{0,1}$ sertlik değerlerini elde etmiştir.

Literatür incelemesi sonucu; Hardox çelikleriyle yapılmış olunan benzer çalışmalardan bazıları aşağıda özet olarak verilmiştir:

Tabur (2008), aşınmaya dayanıklı Hardox 400 ile AISI 8620 sementasyon çeliklerini Ekabor® 2 tozu kullanarak farklı sürelerde (2, 4 ve 6 saat) ve farklı sıcaklıklarda (850, 900 ve 950 ºC) katı borlama yapmıştır ve bu çeliklerin borür katman kalınlıkları, mikro yapı ve mikro sertlikleri incelemiştir. İşlemin sıcaklık ve süre parametrelerine bağlı olarak borür tabaka derinliği 70 µm - 280 µm arasında değiştiğini bildirmiştir. Ana malzeme yüzeyinde oluşan borür tabaka yapısının düzgün dallı bir şekilde oluştuğunu optik ve SEM incelemeler neticesinde ortaya koymuştur. Borürlerin FeB, Fe_2B varlığını x-ışını kırınımı ile teyit etmiştir. XRD analizleri sonucunda, borlanmış Hardox 400 çeliğinin borür tabakasında FeB, Fe_2B, Fe_3B türünde borürler oluştuğu ve borlanmış AISI 8620 çeliğinin borür tabakasında FeB, Fe_2B, türünde borürler oluştuğunu tespit etmiştir. Sertlik değerlerinde ise borür fazlarından oluşan kaplama tabakasında en yüksek değerde olduğu, geçiş zonundan itibaren sertliğin düştüğü tespit edilmiştir. Her iki çelik de mikrosertklik açısından karşılaştırıldığında borlanan Hardox 400 çeliğinin borür bölgesinin, AISI 8620 çeliğinin borür bölgesinden fazla sertliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Ancak matris sertliklerine bakıldığında, AISI 8620 çeliğinin matris sertliğinin Hardox 400 çeliğinin matris sertliğinden fazla olduğu gözlemlemiştir.

Topal (2017), Hardox 450 + FeW metalik tozu, toz oranı parametresi kullanılarak AISI 1020 çeliğinin yüzeyine plazma transfer ark kaynak tekniğiyle kaplanmıştır. Kaplama morfolojisi; OM (optik mikroskop), SEM, XRD ve mikrosetlik analizleri ile incelenmiştir. En yüksek sertlik değerleri Hardox 450 + %25 FeW alaşımı ile yüzeyi alaşımlandırılmış numunelerde, en düşük sertlik değeri de sadece Hardox 450 içeren S-Referans numunesinde tespit etmiştir. Artan toz miktarına paralel olarak, sert bileşiklerin oluşumuna bağlı olarak mikrosertliğin

arttığı gözlenmiştir. Artan FeW tozu ile karbür bileşiği oluşumuna bağlı sertlik artmıştır. Kaplama tabakalarında Fe(α), Fe_3Mo, Fe_2C, Fe_3W_3C, Fe_2W, Cr_3C_2, Fe_7W_6, Fe_7C_3, W faz ve bileşiklerinin oluştuğu tespit edilmiştir.

Yukarıda verilen literatür araştırmalarına göre, çeliklere uygulanan borlama işlemi sonucunda bazı genel ortak sonuçlar elde edilmiştir. Çeliklerin yüzeyinde ve mikroyapısındaki incelemelerde; işlem süresi, sıcaklığı ve numunelerin cinsine bağlı olarak parmaksı yapıda farklı difüzyon mesafesinde borür tabakası oluşturduğu görülmektedir. Yüzey sertliğine dair laboratuvar sonuçlarına göre işlem süresi, sıcaklığı ve numunelerin cinsine bağlı şekilde değişerek arttığı ve borlama işleminin sonucunda da çeliklerin saf haline göre sertlik değerlerinin yüksek değerlerde çıktığı sonuçlarına varılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan Hardox 450 ve Hardox HiTuf çeliklerinin kullanım alanlarının yüksek sertlik ve tokluğa sahip olmayı gerektirdiği literatür araştırmaları sonucunda görülmektedir. Bu nedenle, Hardox çeliklerinin kullanıldığı makine ve makine takımlarının iş görebilirliğinin arttırılması ve kullanım ömürlerinin uzatılması açısından yüzey sertliklerinin daha yüksek değerlere çıkarılması gerekmektedir. Bu sebeple, borlama işleminin yapılması kaçınılmazdır. Makine endüstrisindeki uygulamalarda kesici, kırıcı ve delici işlemler sonucunda yoğun aşınmaya maruz kalan makine takımlarının yapımında kullanılan Hardox çeliklerinin gerek yüzey aşınmasından gerek çatlama veya kırılmalardan kaynaklı kullanım özelliğini yitirerek âtıl duruma gelmelerinden dolayı kullanıldıkları sektörde maddi ve manevi zararlara yol açtığı görülmektedir. Hardox çeliklerinin kullanıldığı makine parçalarının aşınmaya karşı dirençleri arttırılarak yüzeylerinin daha sert ve dayanıklı hale getirilmesi kullanıldığı sektörde iş görürlüğü ve devamlılığı sağlanması amaçlanmaktadır. Bu nedenle yüzey sertleştirme yöntemlerinden olan katı borlama yöntemiyle Hardox 450 ve Hardox HiTuf çelikleri yüzey sertleştirme işlemlerine tabii tutularak daha sert, aşınmalara karşı daha dayanıklı ve kullanım alanlarında iş görebilirlikleri noktasında en verimli makine parçaları üretmek hedeflenmiştir.

Yukarıdaki literatür sonuçlarına bakıldığında, Hardox 450 çeliği üzerinde bazı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan bazılarının yöntem ve sonuçlarına değinilmiştir. Fakat literatür taramamızda Hardox HiTuf çeliğinin benzer bir çalışmada daha önce kullanıldığına dair herhangi bir veriye ulaşılamamıştır. Bu nedenle, katı borlama yöntemiyle yüzeyi sertleştirme işleminin Hardox HiTuf çeliğinde yapılmış olması, çalışmamıza özgün bir çalışma olma özelliğini kazandırmıştır.

Belirtilen amaçlara dair bu çalışmada; süre sabit tutularak farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen borlama ısıl işlemleri sonucunda Hardox 450 ve Hardox HiTuf numune çelikleri üzerinde bazı deneyler gerçekleştirilmiştir. Borlama sonucunda oluşan fazların tespiti; XRD analiziyle, oluşan borür tabakasının difüzyon derinliği ve borür katman yapılarındaki değişimi optik mikroskop ve SEM analiziyle, borlanmış tabakanın yüzey sertlikleri ise Mikro-Vickers sertlik yöntemi ile ölçülmüştür.

Sonuç olarak, Hardox 450 ile Hardox HiTuf çeliklerinde borlama işleminden oluşan borür tabakasının ana malzemeye kazandırdığı sertlik değeri matris sertlik değerinden yaklaşık 6-10 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Borlama işlemiyle yüksek değerde yüzey sertliği kazandırılan çeliklerin kullanıldığı iş makineleri veya makine takımlarının iş görebilirliğini ve kullanım ömrünü arttırabileceği sonucuna varılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Bor Elementi Hakkında Genel Bilgiler

Bor (B), periyodik cetvelin 3A grubunun birinci ve en hafif elementidir. Bor elementi farklı izotoplardan (^{8}B, ^{10}B, ^{11}B, ^{12}B ve ^{13}B) meydana gelmektedir. ^{10}B ve ^{11}B en kararlı olan izotoplarıdır. ^{10}B ve ^{11}B izotoplarının tabiatta var olma yüzdeleri sırasıyla %19.1-20.3 ve %79.7-80.9'dir. Yer kabuğunda var olan 51. element olmakla birlikte tabiatta hiçbir vakit serbest halde bulunmamaktadır. Doğada 230 civarında çeşitli bor minerali olduğu bilinmekte ve bunlardan en yaygın olarak bulunanlardan bir tanesi turmalindir. Ancak sanayide, kernit ($Na_2B_4O_7.4H_2O$), tinkal ($Na_4B_4O_2.10H_2O$), üleksit ($NaCaB_5O_9.8H_2O$) ve kolemanit ($Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$) kullanılmaktadır [URL 1]. Şekil 2.1.'de bor kristalinin tipik görünümü gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Bor kristallerinin tipik görünümü (Samuk, 2015)

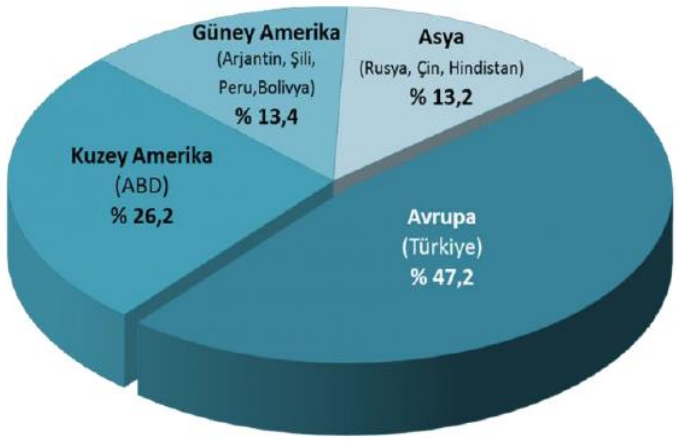
Bor elementi, farklı allotropik (bir tanesi amorf ve altı tanesi kristalin polimorf) formlarda bulunur. α ve β rombohedral formları en fazla çalışılmış olan kristalin polimorflarıdır. Alfa (α) rombohedral strüktür ve 1200 ^{o}C sıcaklığın üzerinde bozulur. 1500 ^{o}C sıcaklıkta ise beta (β) rombohedral meydana gelir. Amorf form takribi 1000 ^{o}C sıcaklığın üstünde beta (β) rombohedrale dönüşür. Saf boru ergime noktasının üstünde ısıtıp tekrar kristalleştirildiğinde beta (β) rombohedral forma dönüşebilir. Farklı metal ya da ametal elementlerle oluşturduğu birleşiklerin sergilediği farklı özellikler, endüstride birçok bor birleşiğinin kullanılmasına imkân

sağlamaktadır. Bor, birleşiklerinde metal dışı birleşikler gibi davranmasının yanı sıra saf bor karbon gibi elektrik iletkenidir. Kristalize bor, optik özellikleri ve görünümü bakımından elmasla benzerlik gösterir ve yaklaşık olarakta elmas kadar serttir [URL 1]. Çizelge 2.1.'te bor ve bazı birleşikleri ile elmasın sertliklerini gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Bor ve bazı bileşikleri ile elmasın sertlikleri (Yamanel, 2018)

MALZEME	MOHS SERTLİK
Bor (element)	9.3
Bor Karbür (B_4C)	9.32
Elmas	10

Bor elementi, toprakta, kayalarda ve suda yaygın şekilde var olan bir elementtir. Toprağın bor içeriği 10-20 ppm, tatlı suların bor içeriği 0.01-1.5 ppm ve deniz suyun bor içeriğinde de 0.5-9.6 ppm civarındadır. Ekonomik boyutlarında ve yüksek konsantrasyondaki bor yatakları, bor elementinin oksijen ile tepkimesiyle oluşan bileşikleri olarak çoğunlukla Türkiye ve ABD'nin hidrotermal, volkanik ve kurak bölgeler gibi aktivite miktarının çok yüksek olduğu alanlarında yer almaktadır [URL 2].



Şekil 2.2. 2014 yılında dünya bor üretiminin bölgelere göre dağılımı (Günay, 2017)

Şekil 2.2.'de de gösterildiği gibi 2014 yılında dünyadaki bor üretimi 2.13 milyon tonu B_2O_3 olup, toplamda yaklaşık olarak 4.6 milyon ton üretilmiştir. Bor üretiminde (B_2O_3 bazında); birinci sırada %47.2 pay oranıyla Avrupa (Türkiye) yer almaktadır. %26 pay oranıyla Kuzey Amerika (ABD) ikinci büyük paya sahiptir.

Daha sonra sırasıyla %13.4 pay oranıyla Güney Amerika (Arjantin, Şili, Peru, Bolivya) ve %13.2 payla oranıyla da Asya (Rusya, Çin, Hindistan) takip etmiştir [URL 3].

2.2. Bor Elementinin Tarihçesi

2.2.1. Bor madeninin Dünya'daki tarihçesi

Boraks, ilk olarak yaklaşık 4000 yıl önce Babilliler tarafından Uzakdoğu'dan getirilmiş ve altın işletmeciliğinde kullanılmıştır. O dönemin yazılı kaynaklarında "boraks", "bayrach" ve "borar" gibi sözcükler adı altında yer aldığı tespit edilmiştir. Mısırlılarda da bor elementini; mumyalamada, tıpta ve metalurji uygulamalarında kullandıkları o dönemin yazılı kaynaklarına dayanılarak bilinmektedir. 762 yılında boraksın kullanıldığı alanlara dair ilk yazılı metne, Arap (Bağdat, Mekke ve Medine civarındaki) yerleşimlerinde rastlanmıştır. Arap doktorları tarafından ilk kez M.S. 875 yılında ilaç olarak kullanılmıştır. Avrupa'da ise Arapça dilinde yazılmış olan kimya kaynakların çevrilmesi sonucu 12. ve 13. yüzyılda boraksı tanımıştır. Borik asitin borakstan yapıldığı 1700'lü yılların başında bilinmektedir. Elementer bor ise 1800'lü yılların başında elde edilmiştir (Barış, 2007).



Şekil 2.3. Bor mineralinin kaşifleri - solda sağa doğru-: Josaph Gay-Lussac, Louis Jacques Thénard ve Sir Humphrey Davy (Alparslan, 2011)

1808 yılında İngiliz kimyacı Sir Humphry Davy ve Fransız kimyacı Gay-Lussac, elementer boru aynı zamanda elde edilmiştir (Şekil 2.3.). Yanıcı özellik

gösteren, koyu renkli ve saflığı %50'den fazla olmayan bor elementini elde etmeyi bu bilim adamları başarmışlardır. Fakat 1895'de ise Henry Moissan tarafından borik asit ve magnezyumu indirgeme metodunu kullanarak %86 civarındaki saflık oranında ve yüksek miktarda elementel bor elde etmiştir. ''Moissan Prosesi'' yöntemi halen ticari amaçlı amorf bor elementinin düşük saflıktaki eldesinin alt yapısını oluşturmaktadır (Uzun, 2002).

2.2.2. Bor madeninin Anadolu'daki tarihçesi

Bor minerali yataklarına Türkiye'de ilk olarak Balıkesir'in Susurluk-Sultançayırı bölgesinde bulunmuştur. 1861'de ilk defa "Maadin Nizamnamesi" çıkarılmıştır. Maadin Nizamnamesi kurallarına uygun olarak 1865 yılında bir Fransız şirketi olan Desmazures'a boraks işletme imtiyazı verilmiş olup, 1927 yılına kadar ise 624 yabancı şirkete imtiyaz verilmiştir. İmtiyaz verilmiş olan bu şirketlerin büyük bir kısmını 1944 yılında millileştirilmiş ve daha sonrasında yabancı sermayeli şirketlere yeni imtiyazlar verilmemiştir. Yerli kuruluş olan MTA ve Etibank kuruluşları 1935'de 2804 ve 2805 sayılı kanunlar çerçevesinde arama ruhsatlarını almışlardır. 1950'de Bigadiç'te, 1952'de Mustafa Kemal Paşa bölgesinde, 1956 yılında da (MTA Enstitüsü tarafından yapılan linyit etütleri esnasında) Emet-Kütahya bölgesinde ve Hisarcık ile Hamamköy çevresinde kolemanit yatakları bulunmuştur. Bu tarihten iki yıl sonrada (1958'de) bunların işletme ayrıcalığı Etibank'a verilmiştir. 1968'de yabancı şirketlere verilmiş olunan ayrıcalıkların devlete devredilmesi ile Etibank ve bazı yerli şirketler tarafından yürütülmeye başlanmıştır. 1978'de bor madenlerinin devlet tarafından yürütülmesi kararı itibariyle üretim, madencilik, pazarlama ve yatırıma dair tüm iş ve işlemler Etibank tarafından yerine getirilmektedir. Devletleştirme kararından itibaren madencilik ile rafine bor ürünleri üretiminde gelişmelerin olduğu ve bor rezervlerimizin 1978'de 600 milyon ton olarak bilinirken, bugün ise 3 milyar ton rezerve sahip olduğumuz bilinmektedir. Rezerv çalışmaları günümüzde de Eti Maden/MTA iş birliğiyle sürdürülmektedir. Bugün dünya bor pazarında aktifliğimiz giderek artarak 1970'li yıllarda %16 olan pazar yüzdemiz bugün ise %47'lik orana yükselerek ABD'nin de önünde yer almıştır [URL 4].

2.3. Bor Elementinin Özellikleri

Bor elementinin atomik yapısı Çizelge 2.2.'de, kimyasal özellikleri Çizelge 2.3.'de ve fiziksel özellikleri Çizelge 2.4.'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Borun atomik yapısı [URL 1]

Atomik Yapısı	
Atomik Çapı	1.17Å
Atomik Hacmi	4.6 cm^3/mol
Kristal Yapısı	Rhombohedral
Elektron Konfigürasyonu	$1s^2\ 2s^2\ p^1$
İyonik Çapı	0.23Å
Elektron Sayısı (yüksüz):	5
Nötron Sayısı	6
Proton Sayısı	5
Valans Elektronları	$2s^2\ p^1$

Çizelge 2.3. Borun kimyasal özellikleri [URL 1]

Kimyasal Özellikleri			
Elektrokimyasal Eşdeğer	0.1344 g/amp-hr		
Elektronegativite (Pauling):	2.04		
Füzyon Isısı	50.2 kJ/mol		
İyonizasyon Potansiyeli	Birinci:8.298	İkincisi:25.154	Üçüncüsü:37.93
Valans Elektron Potansiyeli (-eV)	190		

Çizelge 2.4. Borun fiziksel özellikleri [URL 1]

Fiziksel Özellikleri		
Atomik Kütlesi	10.811	
Kaynama Noktası	4275 K - 4002 °C - 7236 °F	
Termal Genleşme Katsayısı	0.0000083 cm/cm/ºC (0ºC)	
Kondüktivite	Elektriksel:1.0E-12 106/cm	Termal:0.274 W/cmK
Yoğunluk	2.34 g/cc @ 300 K	
Görünüş	Sarı-Kahverengi ametal kristal.	
Elastiklik Modülü	Bulk: 320/GPa	
Atomizasyon Entalpisi	573.2 kJ/mole @ 25 °C	
Füzyon Entalpisi	22.18 kJ/mole	
Buharlaşma Entalpisi	480 kJ/mole	
Sertlik	Mohs: 9.3	Vickers: 49000 MN m^{-2}
Buharlaşma Isısı	489.7 kJ/mol	
Ergime Noktası	2573 K - 2300 °C - 4172 °F	
Molar Hacmi	4.68 cm^3/mole	
Fiziksel Durumu	(20 °C & 1 atm): Katı	
Spesifik Isısı	1.02 J/gK	
Buhar Basıncı	0.348 Pa@2300 °C	

2.4. Bor Mineralleri

Kristal suyu içeren boratlar

Kernit (razorit): $Na_2B_40_7.4H_2O$

Tinkalkonit: $Na_2B_40_7.5H_2O$

Boraks (Tinkal): $Na_2B_40_7.10H_2O$

Sborgit: $Na_2B_40_7.5H_2O$

Eakwrit: $Na_4B_{10}0_{17}.7H_2O$

Probertit: $NaCaB_50_9.5H_2O$

Üleksit: $NaCaB_50_9.H_2O$

Nobleit: $CaB_6O_{10}.4H_2O$

Gowerit: $CaB_6O_{10}.5H_2O$

Florovit: $CaB_2O_4.4H_2O$

Kolemanit: $Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$

Meyerhofferit: $Ca_2B_6O_{11}.7H_2O$

İnyoit: $Ca_2B_6O_{11}.13H_2O$

Preseit (pandermit): $Ca_4B_{10}O_{19}.7H_2O$

Tercit: $Ca_4B_{10}O_{19}.2H_2O$

Ginorit: $Ca_2B_{14}O_{23}.8H_2O$

Pinnoit: $MgB_2O_4.3H_2O$

Kaliborit: $HKMg_2B_{12}O_{21}.9H_2O$

Kurnakavit: $Mg_2B_6O_{11}.15H_2O$

İnderit: $Mg_2B_6O_{11}.15H_2O$

Predorazhenskit: $Mg_3B_{10}O_{18}.4\ 1/2\ H_2O$

Hidroborasit: $CaMgB_6O_{11}.6H_2O$

İnderborit: $CaMgB_6O_{11}.11H_2O$

Larderellit: $(NH_4)2B_{10}O_{16}.4H_2O$

Ammonioborit: $(NH_4)3B_{15}O_{20}.(OH)_8.4H_2O$

Veatçit: $SrB_6O_{10}.2H_2O$

p-Veatçit: $(Sr, Ca)\ B_6O_{10}.2H_2O$

Bileşik boratlar(Hidroksil ve/veya diğer tuzlar ile)

Teepleit: $Na_2B.(OH)_4Cl$

Bandilit: $CuB.\ (OH)_4Cl$

Hilgardit: $Ca_2BO_8.(OH)_4Cl$

Borasit: $Mg_3B_7O_{13}Cl$

Fluoborit: $Mg_3(BO3)$

Hambergit: $Be_2(OH, F)\ BO_3$

Suseksit: $MnBO_3H$

Szaybelit: $(Mg, Mn)\ BO_3H$

Roveit: $Ca_2Mn_{22}+((OH)_4\ (B_4O_7(OH)_2)$

Seamanit: $Mn_{32}+(OH)\ (B\ (OH)_4\ (PO_4)$

Viserit: $Mn_4B_2O_5\ (OH, Cl)_4$

Lüneburgit: $Mg_3\ (PO_4)2B_2O_3.8H_2O$

Kahnit: Ca_2BAs

Sulfoborit: $Mg_3SO_4B_2O_4\ (OH)_2.4H_2O$

Borik asit

Sassolit (doğal borik asit): $B(OH)_3$

Susuz boratlar

Jenemejevit: $Al_6BO15.(OH)_3$

Kotoit: $Mg_3B_2O_8$

Nordenskiöldine: $CaSnB_2O_6$

Rodozoit: $CsB_{12}Be_4Al_4O_{28}$

Varvikit: $(Mg, Fe)\ 3TiB_2O_8$

Ludvigit: $(Mg, Fe_2+)\ 2Fe_2+BO_5$

Paygeit: $(Fe_2+, Mg)\ 2Fe_3+BO_5$

Pinakiolit: $Mg_3Mn_2+Mn_{23}+B_2O_{10}$

Hulsit: $(Fe_2+Mg_2+\ Fe_3+\ Sn_4+)_3BO_3O_2$

Borofluoritler

Avagadrit: $(K, Cs)\ BF_4$

Ferruksit: $NaBF_4$

Borosilikat mineralleri

Akzinit grubu: $(Ca, Mn, Fe, Mg)\ 3Al_2BSi_4O_{15}(OH)$

Bakerit: $Ca_4B_4(BO_4)\ (SiO_4)_3\ (OH)\ 3H_2O$

Kapelenit: $(Ba, Ca, Ce, Na)_3\ (V, Ce, La)_6\ (BO_3)_6\ Si_3O_9$

Karyoserit: Melanoseritin toryumca zengin türüdür.

Danburit: $CaB_2Si_2O_8$

Datolit: $CaBSiO_4OH$

Dumortiyerit: $Al_7O3(BO_3)(SiO_4)_3$

Grandidiyerit: (Mg, Fe) $Al_3\,BSiO_9$

Homilit: $(Ca, Fe)_3B_2Si_2O_{10}$

Hovlit: $Ca_2B_5SiO_9(OH)_5$

Hyalotekit: $(Pb, Ca, Ba)_4\,BSi_6O_{17}(OHF)$

Kornerupin: Mg_3Al_6 (Sr, Al, B)$_5O_{21}(OH)$

Manondonit: $LiAl_4$ $(AlBSi_2O_{10})(OH)_8$

Melanoserit: $Ce_4CaBSiO_{12}(OH)$

Safirin: $Mg_35Al_9Si5O_2$

Searlesit: $NaBSi_2O6H_2O$

Serendibit: $Ca_4(Mg, Fe, Al)_6$ $(Al, Fe)_9$ $(Si, Al)_6$ $3O_4$

Turmalin grubu mineraller

Tritom: $(Ce, La, YTh_5(Si, B)_3\,(O, OH, F)_{13}$

İdokreyz (Vezüvyanit): $Ca_{10}Mg_2Al_4$ $(Si_4)_5$ $(Si_2O_7)_2$ $(OH)_4$ (Barış, 2007).

2.5. Bor Ürünleri ve Üretim Yöntemleri

Metalik (elementel) bor: Bor oksitin magnezyum ile magneziotermik redüksiyonu ile metalik bor üretilmektedir.

$$B_2O_3+3Mg\rightarrow 2B+3MgO$$

Yukarıdaki reaksiyonuyla klasik olarak eldesi bor amorf yapıda %85-95 civarındaki oranında ara ürün olup, saflaştırılması, öğütme ve yıkama (HCl - HF ile) aşamalarından geçerek gerçekleştirilmektedir. Metalik bor üretiminde alternatif diğer bir yöntem ise; boranlar (B_2H_6..$B_{10}H_{14}$) ve bor halojenürleri termal (kızgın volfram ipliği üzerinde) parçalanarak; T<800 °C sıcaklıkta saf amorf bor, T=800-1500 °C

sıcaklık aralığında saf kristalin bor üretilmektedir. Ürün, çok saf kristalin bor haline; h_2 atmosferinde 1800 ile 2200 °C aralığındaki sıcaklıkta ısıtılarak sinterleme yoluyla getirilebilmektedir (Anonim, 2003).

Bor halojenürler: Bor elementinin halojenlerle (klor, brom, flor ve iyot gibi) oluşturduğu bileşiklerdir. Bor oksitin derişik sülfirik asit ve halojenlerle (klorit, bromit, florit ve iyodit gibi) ısıtılması işleminden üretilir. Bor klorür; renksiz, düşük viskoziteli ve ışığı kırabilen sıvı olmakla birlikte %95'i bor-fiber yapımında kullanılmaktadır. Bor florür; renksiz, boğucu kokulu ve yanıcı özelliği taşımayan bir gazdır. Bor iyodür ise kuvvetli nem çekici ve oksijen akımında yanma özellikleri olan bir katıdır (Uzun, 2002).

Boraks pentahidrat: Mineral adı tinkalkonit'tir. Disodyum tetraborat pentahidratın ($Na_2B_4O_7.5H_2O$) 1.88 özgül ağırlığına, 291.35 gr/mol molekül ağırlığına, -1143.5 kcal/mol oluşum ısısına ve 0.316 kcal/gr/°C özgül ısısına sahiptir. Pentahidrat boraksın dehidrasyonu sonucunda oluşan birikintiler halinde bulunur. Doymuş boraks çözüntüsünün 60 °C sıcaklık üstünde kristallenmesiyle meydana gelmektedir (Şimşek, 2005).

Bor nitrür: 2,27 g/cm^3 yoğunluğa, 3000 °C ergime sıcaklığına sahip ve renk olarak beyaz renktedir. Yüksek termal iletkenlik, iyi termal şok direnci, düşük termal genleşme, yüksek elektrik direnci ve mikrodalga geçirgenliği özelliklerinden dolayı talaşlı imalatta uygun olup, yüksek yüzey gerilimi ve büyük ölçüde kimyasal olarak inert benzerindeki özellikleri sebebiyle geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bor nitrür, beyaz grafit olarak isimlendirilen hegzagonal bor nitrür (α-BN) ve sertlik bakımından elmastan sonraki en sert malzeme olduğu bilinen kübik bor nitrür (β-BN) olmak üzere iki çeşit kristal forma sahiptir (Anonim, 2003).

Susuz boraks: Disodyum tetraborat ($Na_2B_4O_7$); 201.27 gr/mol molekül ağırlığına, 2.3 gr/cm^3 özgül ağırlığına, 741 °C ergime derecesine ve –783.2 kcal/mol oluşum ısısına, kolayca öğütülebilme özelliğine sahip, renksiz ve yüksek sertlikte bir

kristaldir. Higroskopiktir ve boraks hidratın 600 ile 700 °C sıcaklık aralığında dehidrasyonu ile stabil yapıda susuz boraks elde edilebilir (Öztürk, 2011).

Boraks dekahidrat: Doğada tinkal minerali olarak bulunur. Monoklinik kristal yapıda renksiz bir tuzdur. Teknoloji açısından alkali metal boratların arasında en önemlilerinden bir tanesi, ($Na_2B_4O_7.10H_2O$) disodyum tetraborat dekahidrat olarak da bilinen boraks dekahidrattır. Molekül ağırlığı 381.4 gr/mol, özgül ısısı 0.385 kcal/gr/°C (25-50 °C), özgül ağırlığı 1.71 (20 °C), oluşum ısısı –1497.2 kcal/mol'dür. Sulu çözeltileri, konsantrasyonundan bağımsız şekilde hafif alkali reaksiyon gösterir (pH=9.2). Doygun boraks çözeltisi 105 °C sıcaklıkta kaynar (Şimşek, 2005).

Bor karbür: Metalurji sektöründe geniş kullanım alanları olan (B_4C) bor karbürün özelliklerine bakılacak olunursa: 2.51 g/cm^3 yoğunluğa, 2450 °C ergime sıcaklığına, 980 °C'de 155 N/mm^2 ve 1425 °C'de ise 162 N/mm^2 çekme dayanımına, 345 N/mm^2 bükülme mukavemetine ve 2850 N/mm^2 basma mukavementine sahiptir. Sadece H_2SO_4, HF ve HNO_3 karışımlarında yavaşça çözünebilmektedir. Bazı metaller, metal oksitlerle ve metal hidrürlerle borürler meydana getirmektedir. Bor ve karbon ile aktinitler, lantanitler ve 3A ile 6A grubunun bazı metalleri güçlü borokarbür fazlar meydana gelirler. 4A ile 5A grubu diborürleri bor karbürle tepkimeye girmezler. 2600 °C sıcaklıkta karbonlu direnç fırınında tepkimeye sokulmasıyla ya da susuz borik asit, grafit veya kok tozu ile ark ocağında beraber ergitilmesiyle bor karbür elde edilebilmektedir (Anonim, 2003).

Boridler: Metalik karakterde olup, metallerle veya metal oksitlerle bor elementinin reaksiyonu neticesinde üretilirler. Ticari amaçlı metal karışımların ve borun; magnezyum, alüminyum veya karbon elemntleriyle indirgenmesi sonucunda üretilirler. Boridler iyi bir kimyasal stabiliteye, yüksek sertliğe ve ergime noktasına sahiptirler. Oksidasyona karşı yüksek dirence sahiptir. Bu sebeple, elektronik sanayinde, metal yüzeylerinin kaplanması işleminde, buhar ve ısıya dayanıklı kazanların yapımında ve korozyona dayanıklı malzeme üretiminde kullanılırlar (Şimşek, 2005).

Borik asit: (H_3BO_3), 61.83 gr/mol molekül ağırlığına, %56.3 oranında B_2O_3 içeriğine, 169 °C ergime noktasına, 1.44 gr/cm^3 özgül ağırlığına, –1089 kj/mol oluşum ısısına ve 22.2 kj/mol çözünme ısısına sahip kristal yapısı olan bir bor ürünüdür. Sudaki çözünürlüğü (oda sıcaklığında) az olmasına rağmen, sıcaklık değeri arttıkça çözünürlüğü de büyük ölçüde artmasından kaynaklı sanayide; borik asidi kristallendirmek amacıyla doygun çözeltiyi 80 °C sıcaklıktan 40 °C sıcaklığa soğutulması yetmektedir. Bor minerallerinden büyük ölçüde üretilen borik asitin kullanım sektörleri çeşitli olmakla birlikte en önemlileri; cam, seramik ve cam yünü sanayisidir. Borik asit üretimi bor minerallerinin sülfürik asit ile asitlendirilmesiyle üretilmektedir (Öztürk, 2011).

Ferrobor: üretiminde, hammadde olarak borik asit, bor oksit veya bor cevherleri kullanılmaktadır. Şarj olarak elektrik ark fırınında karbotermik redüksiyonu ile yüksek karbonlu ferrobor ya da şarj olarak alüminatermik redüksiyon yöntemiyle düşük karbonlu yüksek alüminyumlu ferrobor elde edilmektedir. Ferrobor alaşımlarındaki (Fe_2B, FeB) başlıca bileşenleri Si, Al, C ve B'dir. %12-21 arasında değişen B oranına göre; 6.3-7 g/cm^3 yoğunluğuna, 1600-1950 Vickers mikroserliğine, 0.1-0.3 W/cm K ısıl iletkeliğine, 1389-1550 °C ergime sıcaklığına ve 598-1015 K Curie sıcaklıklarına sahiptir (Anonim, 2003).

Bor Oksit (susuz borik asit): B_2O_3 ticaridir. Çoğunlukla %1 su içermekte ve borik asitten uygun sıcaklık değerinde su eksiltirilerek üretilir. Görünüşü renksiz cam gibidir ve oda sıcaklığında higroskopiktir. Cam sanayisinde Bor oksit ve susuz boraks çok kullanılmaktadır. Cam üretiminde, borik asit yerine, bor oksitin tercih edilmesi hammadde ve enerji bakımından avantaj sağlamaktadır. Bor oksit porselen sırlarının hazırlanmasında, ergitme işlemlerinde, çeşitli camlarda, seramik kaplamaları gibi çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. Ayrıca pek çok organik reaksiyonun katalizörüdür. Bor bileşiklerinin çoğunluğunun başlangıç maddesidir (Şimşek, 2005).

2.6. Bor Elementinin Kullanım Alanları

Bor elementi ve alaşımlarının kullanım alanları Çizelge 2.5.'de verilmiştir.

Çizelge 2.5. Bor kimyasal ve alaşımlarının kullanım alanları (Anonim, 2003)

ÜRÜN	KULLANIM ALANLARI
Amorf ve kristal bor	Askeri piroteknik, nükleer silahlar ve nükleer güç reaktörlerinde, metallerde alaşım elemanı ve deoksidan, bakır ve alaşımlarında gaz giderici, alüminyum dökümlerinde tane rafinasyonu, yarı iletkenlerde
Boranlar	Roketlerde ve atmosfer üstü uçaklarda yakıt
Bor fiberleri (cam elyaf)	Tekstil tipi cam elyaf: dokuma, kompozit oluşturma, otomobillerin dış ve aksamlarında, motor ve hava giriş manifoltlarında, elektronik baskı devrelerinde, elektrik yalıtım uygulamalarında, inşaat duvarlarında, mahfaza panellerinde, sıhhi tesisatlar da, banyo malzemelerinde, duvar kaplamalarında, alev geciktirici örtülerde, yüzme havuzlarında, yaya köprülerinde, kapı imalinde, boru yapımında, yakıt tanklarında, kimyasal depolarda, tarımsal aletlerde, endüstriyel makinelerde, koruyucu kasklarda, deniz ulaşım araçlarında, Polyester üretiminde, İzolasyon tipi cam elyaf: ısı yalıtıcı olarak binalarda, akustik izolasyon amacıyla boru, kazan ve tank kaplamalarında, otomobillerin izolasyon panellerinde, Optik tipi cam elyaf: telekomünikasyon alanında,
Disodyum oktaborat tetrahidrat	Borlu gübre olarak, toprakta bor eksikliğini gidermede, kumlu veya gevşek yapılı toprakta verimi artırmada, yabani otların kontrol altında tutulmasında, kereste korunmasında böcek ve mantar öldürücü olarak, alev önleyici,
Bor flamentleri	Havacılık ve spor malzemeleri için kompozitler
Bor karbür	Askeri araçlarda zırh plakaları, uzay mekiklerinde kimyasal korozif ortamlarda dış yüzey koruyucu, regülasyon, kontrol ve zırhlama amacıyla nükleer reaktörlerde, nükleer sanayinde nötron absorblayıcı, serbest partiküllü aşındırıcılar, kumlama nozülleri, tel hadde lokmaları, ekstrüder memeleri, otomatik havanlar, tekstilde iplik yönlendiriciler, filtreler, bujiler, tesviye aksamları, yüzey polisaj pastaları, transformatörlerde silisli saç yerine, kesme ekipman bileyicileri, endüstriyel yataklar, çok yüksek sıcaklıklarda korozyon ve oksitlenme direnci gerektiren ekipmanlar, refrakter malzeme olarak,
Bor nitrür	Sıcak ve ergimiş metallerle temas eden yüzeylerin kaplamalarında, aşınmaya maruz ve kimyasal korozyona karşı yüzeylerde, özel abrasivler, seramik silikon yarı iletken wafer'larda bor dop malzemesi, nükleer uygulamalarda nötron yakalamada, vakum ergitme potaları, cvd potaları, mikro devre paketleme, yüksek hassasiyet contaları, mikro dalga tüpleri, dökümde stoper halkaları, plazma ark yalıtkanları, metalurjik fırınlarda destekleyici iskeletler, yüksek sıcaklıklarda yağlayıcı olarak, yüksek ısıl şok direncinin ve yüksek tokluğun istendiği uygulamalarda, dielektrik malzeme olarak, nozıl pota, termokupul kılıfı ve cam kalıplarla ilgili refrakter malzeme olarak, pota ve refrakterde astar uygulamaları, diğer seramik malzemelerle birlikte kompozit yapımında, kozmetik endüstrisinde, seramik ve cam endüstrisinde, yüksek sıcaklıklarda kesme aletlerinde, aşındırıcı olarak, dökümle dövme ile üretilen parçaların işlenmesinde,

Çizelge 2.5. Bor kimyasal ve alaşımlarının kullanım alanları (Anonim, 2003) (Devamı)

Metal borürler	Sıvı metallere ve metal buharlarına karşı, yüksek emisyon gerektiren elektriksel uygulamalar, alüminyum ergitilmiş tuz elektrolizinde inert elektrotu olarak (TiB_2), termoelement kılıflar (ZrB_2), alüminyum ve alaşımlarında nükleant olarak (TiB), refrakter metallere katıldıklarında tane inceltici, magneto - hidrodinamik jeneratörlerin elektrot malzemesi, borlu çeliklerin üretiminde, helikopterler için hafif zırh malzemesi, yüksek sıcaklığa ve kimyasal atığa maruz kalan kısımlarda kaplama veya parça olarak, silisyum karbür (SiC) kompozitlerinin mukavemetlerini arttırmak için (TiB_2), yüksek sıcaklık elektrik kontak malzemesi olarak,
Ferrobor	Çeliklerde tane inceltici ve su alma kabiliyetini arttırıcı, yüksekoranda Mn, Ni, Cr ve Mo'in sağlayabileceği sertleşebilirlik özelliğini sağlamada, paslanmaz çeliklerde kaynak kabiliyetini yükseltmede, nükleer reaktörlerde regulator çubuğu, hadde merdaneleri üretiminde, çeliklerde yüzey sertleştirmede, nötron absorbsiyonunu arttırıcı olarak, yassı ve derin çekme işlemine tabi tutulacak çeliklerde, otomobillerin silecek ve marş motorlarında, manyetik ayırımda, cep telefonlarında, sensörlerde, neodyum-demir-bor (Nd-Fe-B) mıknatıslarında, metalik cam üretiminde,
Borazon	Yüksek hızlı kesiciler
Susuz borik asit (bor oksit)	Özel bor kimyasallarının ve organik bor bileşiğinin üretiminde, organik sentezde katalizör veya katalizör taşıyıcısı olarak, metalurji sanayinde flaks, metallerin borürlendirilmesinde ve boronizasyonunda, borlu alaşımlarının hazırlanmasında, cam ve seramik sanayinde, elektrik-elektronik sanayinde
Borik asit	Antiseptikler, göz damlaları, bor alaşımları, yangın geciktirici, naylon, fotoğrafçılık, tekstil, dericilik, gübre, nikel kaplama, kimyasal katalist, cam, cam elyafı, emaye, sır, vb.
Çinko borat	Pvc, halojenli polyester ve naylonlarda alev geciktirici, duman bastırıcı ve korozyon, geciktirici olarak, yüksek sıcaklıklara dayanıklı plastik malzemelerin imalatında, elektrik/elektrotronik parçalarda, kablolarda, yanmaya dayanıklı boyalarda, kumaşlarda, yanmaya dayanıklı halı kaplamalarda, otomobil/uçak iç aksamlarında, tekstil ve kâğıt endüstrisinde, mantar ve böcek öldürücü olarak ahşap aksamların korunmasında, bor silikat cam hammaddesi ve seramik sanayiinde ergime noktasını düşürücü (flux) olarak,
Kolemanit	Tekstil kalite cam elyafı, bor alaşımları, cüruf yapıcı, nükleer atık muhafazası
Özel sodyum boratlar	Fotoğrafçılık kimyasalları, yapıştırıcılar, tekstil, "finishing" bileşikleri, deterjan ve temizlik malzemeleri, yangın geciktiricileri, gübreler ve zirai araçlar
Sod. bor cevheri	Yalıtım cam elyafı, borosilikat cam
Sodyum bor hidrürler	Özel bor kimyasallarının saflaştırılması, kâğıt hamurunu beyazlaştırması, geri kazanılan kâğıtların parlaklığını arttırılması, metal yüzeylerin temizlenmesinde, ilaç sanayinde indirgeme kimyasalı olarak, endüstri atık sularından çözünmeyen ağır metallerin ve organik kimyasallardan metal iyonlarının, karbonil ve peroksit empüritelerinin arındırılması, pamuğun ve pamuk-polyester karışımlarının sürekli boyanma işlemlerinde verimliliğin ve performansın arttırılması, keton ve yüksek alkollerden koku ve renk gidermede, olefinlerin stabilizasyonunda, ilaç hammaddesi, vitamin ve kozmetiklerin üretiminde, trialkil boran, diboran alkil türevleri ve diğer bor bileşiklerinin üretiminde hammadde olarak, leşiklerdeki OH-gruplarının korunmasında, alkoller, fenoller, dioller, şekerler ve diğer bileşiklerdeki OH-gruplarının hızlı gazometrik tayininde, inorganik, kompleks ve organik tuzların kristalin hidratlarındaki su içeriğinin tayininde, tuz ve şeker hidratlarının dehidrasyonunda, füze katı yakıtlarında, yüksek enerjili jet motorlarda ve roketlerde saf hidrojen kaynağı olarak,

Çizelge 2.5. Bor kimyasal ve alaşımlarının kullanım alanları (Anonim, 2003) (Devamı)

Sodyum metaborat	Yapıştırıcı, deterjan, zirai ilaçlama, fotoğrafçılık, tekstil
Sod. pentaborat	Yangın geciktirici, gübre
Sodyum perborat	Deterjan ve beyazlatıcı, tekstil
Potasyum bor hidrür	Tekstil boyalarının, antibiyotiklerin, steroid preparatlarının, vitaminlerin ve diğer kimyasalların ve farmasötiklerin üretiminde indirgeyici olarak, trialkil boran, diboran alkil türevleri ve diğer bor bileşiklerinin üretiminde hammadde olarak, organik bileşiklerdeki OH-gruplarının korunmasında, alkoller, fenoller, dioller, şekerler ve diğer bileşiklerdeki OH-gruplarının hızlı gazometrik tayininde, inorganik, kompleks ve organik tuzların kristalin hidratlarındaki su içeriğinin tespit edilmesinde, tuz ve şeker hidratlarının dehidrasyonunda,
Sod. tetraborat	Lehim ve kaynak işlemlerinde, metal yüzeylerinin temizlenmesi, seramikler, sırlama, yüksek mukavemetli camlar vb.
Bor triklorür	Bor hidrürlerin sentezinde, bor nitrür ve diğer bor bileşiklerinin üretiminde, ekstra-saf elemental borun üretiminde, bor fiberlerinin üretiminde, katyon polimerizasyonunda katalizör olarak, alüminyum, magnezyum, çinko ve bakır ergitilmesi esnasında istenmeyen nitrür, karbür ve oksitlerin uzaklaştırılmasında, daha düşük bor içeriğine sahip bor klorürlerin üretilmesinde, elektronik ve mikroelektronik endüstrisinde hammadde olarak,
Susuz boraks	Gübre, cam, cam elyafı, metalurjik cüruf yapıcı, emaye, sır, yangın geciktirici
Trimetil borat	Kaplama solüsyonları, fluoborat tuzlar, sodyum bor hidrürler

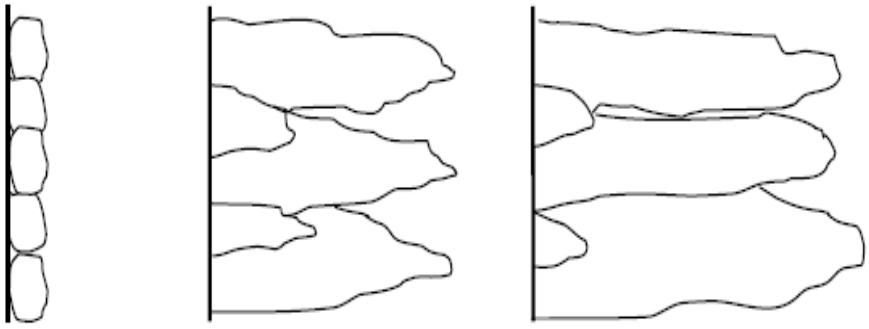
2.7. Borlama İşlemi

Borlama işlemi, termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerinden biridir. Borun yüksek sıcaklıkta metal yüzeyine yayılması neticesinde yüzeyde oluşan borur tabakasının meydana gelmesidir (Turku, 2016).

Bor elementi, demir esaslı malzemelerde yüzey sertleştirme amacıyla ya da alaşım elementi olarak kullanılmaktadır. Borlama işlemi esnasında, bor atomları ısının etkisiyle metalin yüzeyine difüze olurlar. Ana metal atomlarıyla beraber uygun borürleri oluştururlar. Bor kaynağının fiziksel hali katı, sıvı ya da gaz olabilir. Borlama işlemi; 800-1000 ºC sıcaklık değerlerinde, 1-8 saatte gerçekleştirilir. Dolgu malzemesi ve deokside ediciler, işlem esnasında oksijen girişini önleyerek

redükleyici bir ortam oluştururlar ve işlem malzemesinin borlama işlemi uygulanan ana malzemeye yapışmasını engellerler. Borlama işleminin gerçekleştirileceği ana malzemenin cinsi, borlama tozu karışımının birleşimi, borlanma işleminin süresi ve borlanma işleminin sıcaklığı gibi parametreler elde edilecek borür katmanını etkileyen faktörlerdir (Üçkardeşler, 2013).

Borlamanın ilk aşamasında borlayıcı ortam ve malzemenin yüzeyindeki tepkime çiftleri arasında bir tepkime meydana gelir. Taneler malzeme yüzeyinde çekirdek meydan getirmektedir. Borlama süresinin arttırılmasıyla ile çekirdek oluşumu artar. Böylelikle ince bir bor tabakası meydana gelir. Bor elementi Fe_2B ve FeB fazlarında çeliğin yüzeyine yayılır. Borlama esnasında, birinci borür çekirdeği malzemenin yüzey bölgesinde oluşur ve meydana gelen bu borür çekirdeği malzeme içinde gelişir. Bor atomları kafes yapının 001 doğrultusunda daha hızlı şekilde yayıldığından FeB ve Fe_2B fazları 001 doğrultusu boyunca yönlenir. Bundan dolayı borür taneleri 001 yönünde yani yüzeye dik şekilde daha hızlı büyüme gösterir. Borür tanelerinin diğer yönlerde büyümesi daha yavaştır. Bu nedenlerden dolayı kolonsal yapı oluşmaktadır. Öncelikli olarak Fe_2B fazı oluşur, daha sonra ortamda yeterince bor yoğunlaşması var ise FeB fazı da oluşmaktadır. Birinci oluşan Fe_2B fazı uzun bir sürede büyümektedir. Borür tabakaları çeliğin yüzeyinden matrise doğru FeB ve Fe_2B yapısında meydana gelir. Borlamanın son aşamasında da bir tek FeB fazı meydana gelir. FeB fazı Fe_2B fazı göre daha kısa sürede büyür, bu yüzden Fe_2B fazının dokusu FeB fazından daha güçlüdür (Özbay 2009). Şekil 2.4.'te borlama esnasında borür tabakasının oluşum aşaması gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması (Ayter, 2005)

Çift faz (Fe_2B+ FeB) oluşumu, tek faz (Fe_2B) oluşumundan daha az istenir. Çünkü borca zengin FeB fazının kırılganlığı, Fe_2B fazından daha fazladır. Bundan dolayı FeB fazının meydana gelmesi istenilmemektedir. FeB'nin ısıl genleşme katsayısı ($23x10^{-6}$/°C), Fe_2B'nin ısıl genleşme katsayısından ($7.85x10^{-6}$/°C) büyüktür. Çift fazlı yapıda meydana gelen Fe_2B ve FeB fazları arasındaki ısıl genleşme farklılıklarından dolayı malzeme yüzeyinde çatlamalar meydana gelir. Bu çatlamaları engellemek ise FeB fazını oluşumunu azaltmak ya da engellemekle mümkündür (Ayter, 2005).

Yüzey özelliklerini iyileştirme yöntemlerinin tümünde olduğu gibi borlama işleminin öncesinde de yapılması gerekli bir kaç tane ön hazırlık işlemleri vardır. İşlem gerçekleştirilmeden önce ana malzeme üzerinde eğer varsa yağ film tabakasının ve kesme sıvılarının tamamen temizlenmelidir. Isıl işlemin uygulanacağı yüzeyde eğer paslanma tespit edilirse tel fırça yardımıyla pasın giderilmesi gerekmektedir. Parça yüzeyinin pürüzsüz olmasının borlama kalitesinde önemli bir etkisinin olduğundan dolayı yüzeyler, mümkün olduğunca düzgün hale getirilinceye kadar temizlenme işlemlerine tabii tutulmalıdır. Borlama işlemi sonucunda parçaların boyutlarında, oluşan borür tabakası kalınlığı %20-30'u oranında parçada büyüme meydana getireceğinden dolayı borlanacak numunede bu durum dikkate alınarak ilk ölçülendirilme yapılmalıdır (Er ve Par, 2004).

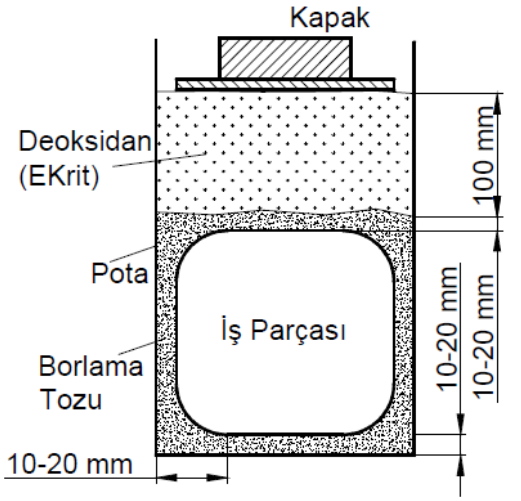
2.7.1. Borlama yöntemleri

2.7.1.1. Katı borlama

2.7.1.1.1. Kutu (paket) borlama

Kutu (paket) borlama işlemi, borlanacak olan malzemenin toz şeklindeki bor vericinin ortam içerisinde 800-1000 °C sıcaklıklarda, 4-10 saatte fırında bekletilerek gerçekleştirilmektedir. Katı ortamda borlama işlemi şematik olarak Şekil 2.5.'te gösterilmiştir. Isıya dayanıklı malzeme olan paslanmaz çelik sac kutu içerisine

parçanın her tarafına en az 10-20 mm bor tozu gelecek şekilde içine gömülüp, kutunun ağzı hava almaması için sıkıca kapatıldıktan sonra elektrik rezistanslı özelliğe sahip bir fırın yardımıyla talep edilen sıcaklıkta kutu borlama işlemi yapılmaktadır. Bu yöntem kolay uygulanabilmesi, toz kompozisyonlarında değişikliklerin kolaylıkla yapılması, basit donanıma sahip olması ve ekonomik açıdan uygun olması gibi olumlu etkenlerinden dolayı en yaygın kullanılan borlama tekniğidir (Sağlam, 2016).



Şekil 2.5. Örnek kutu borlama kabı şekli ve örneğin yerleşim şekli (Uluköy, 2005)

Kullanımı en yaygın bor sağlayıcılar; bor karbür (B_4C), ferrobor (Fe-B) ve amorf bordur (B). Çok iyi bir bor kaynakları olan ferrobor ve amorf bor, kalın borür tabakaları meydana getirirler ve bor karbüre göre çok daha pahalıdırlar (Yapar, 2003). Katı ortamda bor sağlayıcıların bazı özellikleri Çizelge 2.6.'da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Kutu borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcıların bazı özellikleri (Yapar, 2003)

İsim	**Formül**	**Molekül Ağırlığı (gr)**	**Teorik Bor Miktarı (%)**	**Ergime Sıcaklığı (ºC)**
Amorf Bor	B	10.82	95-97	2050
Ferro-Bor	-	-	17-19	-
Bor Karbür	B_4C	55.29	77.28	2450

SiC ve Al_2O_3 reaksiyonda yer almayıp, akışkanlık sağlayan dolgu malzemesi olarak kullanılırlar. Ayrıca SiC, borlama ajanlarının kaybını önler ve bor miktarını

kontrol eder. $NaBF_4$, NH_4Cl, KBF_4, BaF_2, $(NH_4)_3BF_4$, Na_2CO_3 ve $Na_2B_4O_7$ birleşikler ise borlama aktivatörleri olarak kullanılmaktadır (Yapar, 2003).

Kutu borlama tekniğinde aşağıda verilen birçok toz kullanılmaktadır.

1. %85-90 Ferrobor + %10-15 NaBF
2. %95 B_4C +%5 NaF
3. %33 Amorf bor + %2 NHCl +%65 Al_2O_3
4. %80 B_4C + %20 Na_2CO_3
5. %98 B_4C + %2 KBF
6. %50 Amorf bor + %1 $NH_4F.HF$ + %49 Al_2O_3
7. %(7.5-40) B_4C + %(2.5-10) KBF_4 + %(50-90) + SiC
8. %84 B_4C + %16 $Na_2B_4O_7$
9. %95 Amorf bor + %5 KBF_4
10. %20 B_4C + %5 KBF_4 + %75 Grafit
11. %(40-80) B_4C + %(20-60) Fe_2O_3
12. %100 B_4C (Sağlam, 2016).

Bunların dışında ticari bor sağlayıcılar da bulunmaktadır (Örneğin: Ekabor tozu) (Yapar, 2003).

Ticari alanda katı ortam borlama maddeleri kullanımlarına göre sınıflanılarak satılmaktadır. Bunlar;

- *Ekabor 1:* Toz halindedir. Optimum tabaka kalınlığının oluşumda kullanılır. Yüzey pürüzlülüğü bakımından ileri seviyede kalite elde edilir. Genellikle demir ve çelik malzemelerin borlama işleminde kullanılır.
- *Ekabor 2:* Granüllüdür. Yüzey pürüzlülüğü bakımından ileri seviyede kalitededir. Düşük alaşımlı çeliklerin borlama işleminde kullanılır.
- *Ekabor 3:* Granüllüdür. Ekabor-2'ye göre daha büyük taneli ve yüzey kalitesi olarak daha iyidir. Yüksek alaşımlı çeliklerin borlama işleminde kullanılır.
- *Ekabor HM:* Sert metallerin borlanması amacıyla özel şekilde üretilmiştir.

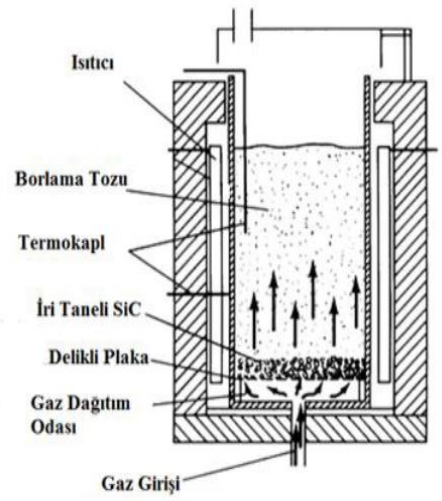
- *Ekabor Pasta:* Macun halindedir. Metalik malzemelerin borlanması işleminde borlanması istenen alanlara sürülerek uygulanır (Özer, 2011).

2.7.1.1.2. Pasta borlama

Bu yöntem; katı ortam borlamada kullanılan borlayıcıların macun haline getirilerek kullanıldığı ve kutu borlamanın zor (büyük parçalar), pahalı ve zaman alıcı olduğu durumlarda yani karmaşık geometrili makine parçalarında kısmi olarak pasta borlama vasıtası ile borlanabilmektedir. Yöntemde borlayıcı ortam olarak %45 oranında B_4C ve %55 oranında kriyolit (N_3AlF_6) ya da bütil asetat içinde çözünmüş nitro selüloz bağlayıcı ve B_4C–SiC-KBF_4 karışımı borlama tozu kullanılmaktadır. Bu yöntemde; borlanacak metal üzerine pasta sürülerek ya da püskürtülerek 1-10 mm kalınlığında bir tabaka oluşturulur ve kurutulur. Daha sonra ise borlanacak malzeme 800-1000 ^oC sıcaklıkta, 2-10 saat süre arasında koruyucu atmosfer altında borlama işlemine tabii tutulmaktadır. Koruyucu atmosfer olarak ise Ar veya N_2 gazı kullanılabilmektedir (Yılmaz, 2014).

2.7.1.1.3. Akışkan yataklı borlama

Akışkan yataklı reaktörler kullanılarak yapılan ısıl işlemler, yaklaşık 25 yıldan fazladır faydalanılmakta fakat yüzey mühendisliği alanında bu reaktörlerden faydalanılması ise daha yeni bir durumdur. Demir esaslı veya demir dışı malzemelerde, bu yöntem ile çeşitli yüzey modifikasyonları gerçekleştirilebilir. Bu teknikle borlama yüzey işlemi de yapılabilir ve yüksek kalitede, üniform tabakalar elde edilebilir. Bunun sebebi, yüksek oranda kütle ve yüksek oranda ısı transferinin reaktör içerisinde meydana gelerek, hacim boyunca düzgün bir sıcaklık akışı sağlamasıdır. Akışkan yataklı reaktör ile borlama işlemi; basit, esnek, ekonomik ve çevresel açıdan hiçbir zarar oluşturmaması nedeniyle diğer yöntemlere alternatif olabilmektedir (Bolat, 2016). Şekil 2.6.'da akışkan yataklı borlama düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Akışkan yataklı borlama düzeneği (Bolat, 2016)

2.7.1.2. Sıvı borlama

Bor bileşimli ergimiş tuz banyosuna metalik malzemenin daldırılması işlemidir. Ergimiş tuz banyosunun içerisinde farklı oranlarda B_4C, BaO, KCl, NaCl bileşikleri bulunur. BaO ilavesi ile difüzyonu önemli ölçüde iyileştirilir. İşlem sonucunda oluşan demir-bor tabakaları 100-200 µm kalınlığındadır. Zehirlilik, patlayıcılık gibi olumsuz etkenlerden dolayı doğanın ve çevrenin kirliliğine yol açması bu yöntemin kullanımını sınırlamaktadır. Bu borlama işlemi sonucunda borlayıcı ortam bileşenlerinin numune yüzeyine yapışması ile oluşan bu olumsuz durumunun giderilmesi açısından temizlenme (ek bir işlem daha) gerektirmesi sıvı borlamanın dezavantajlarındandır (Demirel, 2013).

Sıvı ortam borlamasının başarıyla uygulanabilmesi aşağıdaki şartlara bağlıdır:

a. Ergimiş banyo ortamı bir difüzyon elementi içermeli ve iletkenlik özelliğini çok iyi göstermelidir.
b. Ergimiş banyo içerisindeki redükleyici maddenin potansiyeli, difüzyon uygulanan metalin potansiyeline göre daha negatif olmalıdır.
c. Redükleyici madde ergimiş banyo içerisinde katı halde bulunmalı ve dağılımı homojen olmalıdır (Tabur, 2008).

2.7.1.2.1. Elektrolitik sıvı borlama

Boraks bazlı ergiyik içeren banyo içerisinde, demir esaslı malzemelere 900-950 ºC sıcaklıkta gerçekleştirilir. %30 oranında B_4C banyoya eklenir. Borlama işlemi %20 oranına kadar B_4C'ün ferro alüminyum ile değiştirilmesi işlemiyle geliştirilebilir. Çünkü çok etkili bir indirgeyici özelliğe sahiptir. Ancak %55 boraks, %40-50 ferroboron ve %4-5 ferro alüminyum içeren banyo ile en iyi neticeler elde edilir. Ayrıca %75 KBF_4 ve %25 KF tuz banyosu ile 670 ºC altındaki sıcaklıklarda nikel alaşımlarının borlanmasında kullanılır. Yüksek sıcaklıklarda demir alaşımlarında istenilen borür tabakası kalınlığının eldesinde kullanılır. %55 boraks ve %45 B_4C karışımı 1:1 oranında NaCl ve $BaCl_2$ kullanılarak çok yüksek tabaka kalınlıkları meydana getirilmektedir. Sıvı borlama ayrıca, boraks, ferro-silis, borik asit ve sodyum sülfat ($NaSO_4$) esaslı tuz banyolarında da yapılabilmektedir (Başman, 2010).

2.7.1.2.2. Elektrolizle sıvı borlama

Elektrolizle tuz banyosunda borlama işlemi ile borlanacak olan demir esaslı malzeme katod, grafit elektrot anod, boraks ise elektrolit olarak kullanılmaktadır. Borlama işlemi, 900-950 °C sıcaklıkta, 4-6 saat sürede ve 0.15-0.20 A/cm^2 akım yoğunluğu altında gerçekleştirilmektedir. Malzemenin bütün yüzeyinde homojen şekilde kaplanmış tabaka kalınlığı elde edebilmek amacıyla elektroliz işlemi esnasında malzeme döndürülmektedir. Alaşımlı çeliklerde kalın kaplama tabakalarının elde edilebilmesi için düşük akım yoğunluğu ve uzun borlama süresi gerekmektedir. Ancak düşük alaşımlı çeliklerde ise çok ince kaplamaların eldesinde, yüksek akım yoğunluğu kullanılarak çok kısa sürelerde borlanması yeterli olmaktadır. (Yapar, 2003).

2.7.1.3. Gaz borlama

Bu yöntem; BCl_3, H_2 ve N_2 gaz karışımı atmosferinde yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen borlama prosesidir. Borlama ortamı gaz fazında gerçekleştirilir.

Borlama işlemi Ar ve H_2 gazlarının ve bir evapotartörde gaz haline getirilmiş bir bor kaynağının belirli karışımının, dış ortama kapalı paslanmaz çelik bir odadaki numune üzerine püskürtülmesiyle yapılır (Şekil 2.7.). Borlama işlemi 700–950 ^oC aralığındaki sıcaklık değerlerinde ve 67 kPa 1:15 BCl_3+H_2 gaz karışımında gerçekleştirilmektedir. Gaz borlamada gazlaştırılabilen BCl_3 (bor halitler), BF_3, B_2H_6 (diboran) ve TEB (trietil boran) gibi bor bileşikleri ve redüktan olarak hidrojen gazı kullanılmaktadır. Gaz borlama işleminde genellikle bor halitler ve diboran kullanılmaktadır (Dilektaşlı, 2014).

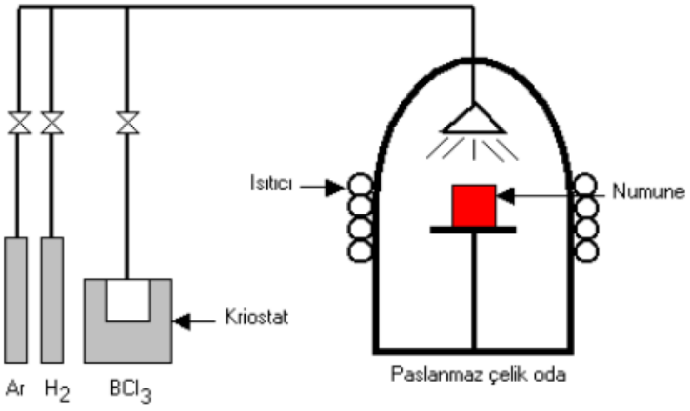
Gaz borlama reaksiyonları aşamaları şu şekildedir. Bor triklorür ısı ile aktive edilir.

$$BCl_3 + 3/2\ H_2 + Fe \rightarrow FeB + 3HCl$$

Burada hidrojen BCl_3'ü redüklemesiyle bor, demire yayılır. Bu reaksiyon bileşenleri 2 aşamada meydana gelir.

$$BCl_3 + 3/2\ H_2 \rightarrow B + 3HCl$$

$$B + Fe \rightarrow FeB$$ (Ersöz, 2008).



Şekil 2.7. Gaz borlama ünitesi (Özaydın, 2015)

Gaz ortamda borlama işleminin avantajları:

a. Bor potansiyeli ayarlanabildiğinden dolayı tek fazlı bir borlu tabaka eldesini mümkün kılmaktadır.

b. Bor dağılımının düzenli gerçekleşmesi, homojen kaplama kalınlıkları eldesini mümkün kılmaktadır.
c. Bu borlama işleminde parçaların yüzeylerinin temiz şekilde oluşabilmesi sebebinden dolayı borla kaplı olan numunenin yıkanma işlemine tabii tutulmasını gerektirmemektedir (Çarıkçı, 2012).

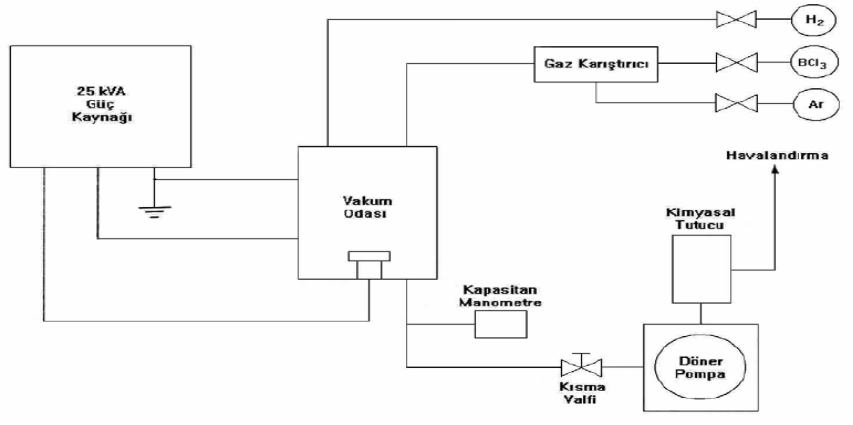
Dezavantajları:

a. Borlamada yer alan bor bileşiklerinin çok pahalı ve zehirli özellikte olması,
b. Bor halojenürleri korozyona sebep olduklarından dolayı istenmeyen metal halojenürleri meydana getirmeleri,
c. Çok yüksek tesis maliyetine sahip olması gibi olumsuz etkenleri bulunmaktadır (Çarıkçı, 2012).

2.7.1.4. Plazma borlama

Plazma borlama yöntemi, Ar ve H_2 gazlarına ilaveten BCl_3, B_2H_6, BF_3 veya trimetilborat bor kaynakları kullanarak, 1073–1273 K sıcaklık aralığında yaklaşık olarak 10^{-2} Pa basıncındaki plazma içerisinde yapılan borlanma şeklidir. B_2H_6-H_2 ve BCl_3-H_2-Ar 'un karışımları plazma borlama işleminde başarıyla kullanılabilmektedir. Ancak ilk bahsedilen gaz karışımı paket veya sıvı ortam borlama işlemi ile mümkün olmayan 873 K gibi düşük sıcaklıklarda farklı çelikler üzerinde borlu tabaka eldesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemdeki yüzey işlemlerinin (yüzey difüzyonu ve kimyasal emilme gibi) yükseltilmiş yüzey enerjisinden kaynaklı yüzeydeki kimyasal reaksiyonları katalitik etkisiyle hızlanırlar ve bu hızlanmanın sonucunda meydana gelen iyon ve elektronlar elektrik alanına etki ederler. Sistemin enerjisi, bu iyon ve elektronlar tarafından iletilir. İyon ve elektronlar, elektriksel alanın etkisiyle gaz moleküllerin bu sıcaklığa ait ortalama enerjisinden daha yüksek bir enerjiye sahip olurlar. Elektronlarla moleküllerin çarpışması sonucunda moleküllerin bir kısım enerjisi iletilir. Belirtilen durum, bu şartlar altında, sistem içindeki parçacıkların uygun sayıları yüksek enerji ile mevcut olduklarından ve atmosferdeki bu sıcaklıkta

dengeli enerji dağılımını anormal akkor ışık saçılımı olmadan karşılanabildiği için başarılır (Bekteş, 2010). Şekil 2.8.'de plazma borlama sisteminin şematiği gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Plazma borlama sistem şeması (Bekteş, 2010)

Plazma borlamanın avantajlarını şöyle belirtmiştir:

a. Diğer borlama yöntemleriyle borür tabaka kalınlığı ve homojenliği kontrol edilemezken, bu borlama yöntemiyle borür tabaka kalınlığı ve homojenliği kontrolü mümkün olabilmektedir.
b. Karmaşık malzemelerde homojen difüzyon tabakası ve sertlik elde edilmektedir.
c. Diğer yöntemlerle kıyasla işlem, daha düşük sıcaklıkta, daha kısa sürede ve çok yoğun enerjide gerçekleştirilir.
d. Bu yöntem yüzeyde tek fazlı Fe_2B tabakası elde ededilme imkânı sağlamaktadır.
e. Katı borlamaya kıyasla daha büyük boyutlu malzemeleri işleme tabi tutulabilir.
f. Bazı olumsuz etmenler (zehirlilik, patlayıcı yapı ve çevre kirliliği gibi) kontrol altına alınabilmektedir.
g. İşlem sonrasında daha düşük distorsiyon sağlanabilmektedir (Bekteş, 2010).

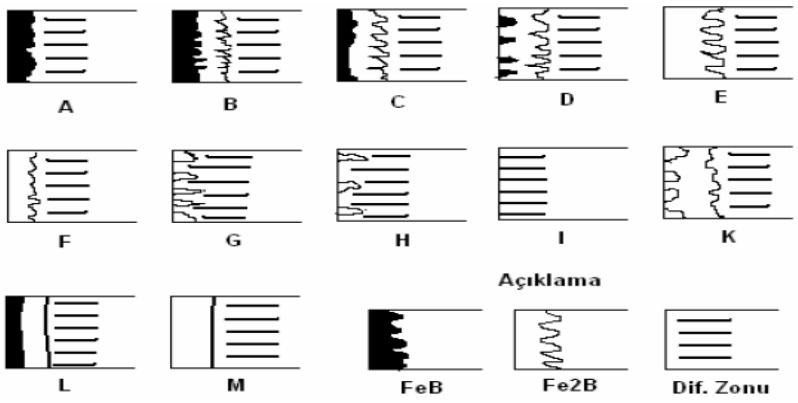
Belirtilen tüm bu avantajların yanı sıra kullanılan atmosferin aşırı zehirli olmasından dolayı bu işlemin kullanımını olumsuz yönde etkileyerek kullanımının

azalmasına sebep olduğu ve sonuç olarak da bu işlem ticari yönden de kabul görmemiştir (Bekteş, 2010).

2.8. Borür Tabakası

2.8.1. Borür tabakasının yapısı

Borür tabakası, malzemenin en dış yüzeyi ile yüzeyin altındaki parmaksı kısım arasındaki bölgeye verilen addır. Diğer bir adı da difüzyon bölgesidir. Borlama sırasında, yüzeyde metal kafesi içerisinde bor atomlarının difüzyonu ile bor bileşikleri meydana gelmektedir. Borür tabakası tek fazlı veya çok fazlı borürlerden meydana gelebilir. Bor tabakasının sertliği, şekli, büyüklüğü ve elde edilen fazların kompozisyonu ana malzemenin kimyasal kompozisyonuna bağlıdır. Termokimyasal yöntemlerle sade karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin borlanması esnasında elde edilen borürler kolonsal şekilde gelişmektedir. Bor kaynağından borür ve ana metal ara yüzeyine devamlı olarak yayılan bor atomları, bor tabakasına dik doğrultuda Fe_2B kristallerini meydana getirmekte ve bu kristaller kolonsal yapıda ana malzemeden iç kısıma taraf ilerlemektedir. Demir esaslı malzemelerin borlanması neticesinde çok fazlı borür tabakasında, FeB fazının büyüme mekanizması ile matrisin hemen üzerinde meydana gelen Fe_2B fazı benzerlik sergilemektedir (Özaydın, 2015). Demir esaslı malzemelerin borlanmasıyla meydana gelen ferrobor tabaka çeşitleri Şekil 2.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Borür tabakası çeşitleri (Özaydın, 2015)

A: Tek fazlı tabaka, sadece FeB

B: İki fazlı tabaka, Fe_2B ve FeB (Tam tabaka)

C: İki fazlı tabaka, B'den daha ince FeB tabakası

D: İki fazlı, izole FeB diş şeklindeki tabaka

E: Tek fazlı tabaka, özellikle Fe_2B ağırlıklı güçlü dişler

F: Tek fazlı tabaka, özellikle Fe_2B ağırlıklı daha az kuvvetli dişler

G: Bağımsız Fe_2B diş yapısı

H: Çok izole Fe_2B diş yapısı

I: Difüzyon bölgesi

K: Dejenere olmuş tabaka

L: Çift fazlı FeB ve Fe_2B tabakası

M: Tek fazlı FeB ve Fe_2B tabakasını belirtmektedir (Özaydın, 2015).

2.8.2. Borür tabakasının özellikleri

Yayınma yönüne bağlı olarak; kolonsal bir yapı gösteren Fe_2B (tek) fazı, Fe_2B + FeB (çift) fazlarına nazaran daha fazla tercih edilmektedir. Bu sebeple oluşum esnasında FeB ve Fe_2B fazları birbirlerine çekme ve basma gerilmeleri uygulamakta ve çoğunlukla bu gerilmelerden kaynaklı iki faz arasında çatlaklar meydana gelmektedir. Dış etkenler bu yapıların zamanla ayrılmalarına ve yüzeyden kopmalara neden olmaktadır. Farklı termal kat sayılarından dolayı FeB + Fe_2B çift faz tabakasının ara yüzeyinde çatlaklar oluşur. Bu durum nedeniyle mekanik yüke maruz kaldıklarında pul pul dökülme gerçekleşir. Bu sebeple minimum miktarda FeB fazı içeren tabakalar elde edilmesi istenilmektedir. Çift fazlı yapı, tek fazlı yapıdan daha düşük aşınma direnci ve mekanik özelliklere sahiptir. En az aşınma Fe_2B fazlı, en fazla aşınmada daha sert yapıda olan FeB fazlı borür tabakasında oluşmaktadır. En yüksek aşınma dayanımının FeB fazını içermeyen borür tabakalarında, yani sadece Fe_2B fazından meydana gelen tabakalarda elde edildiği deneylerle tespit edilmiştir. Demir esaslı malzemelerde borlama sonucunda, Fe_2B fazının çoğunlukta olduğu diş yapısına benzer kolonsal bir yapı oluşur. Çift fazlı Fe_2B + FeB tabakası, vakum altında 800 °C'de uzun süreli ısıl işleme tabi tutulduğunda tek fazlı Fe_2B fazı elde edilebilmektedir. Bu fazların yanında yüksek karbonlu çeliklerde ve dökme

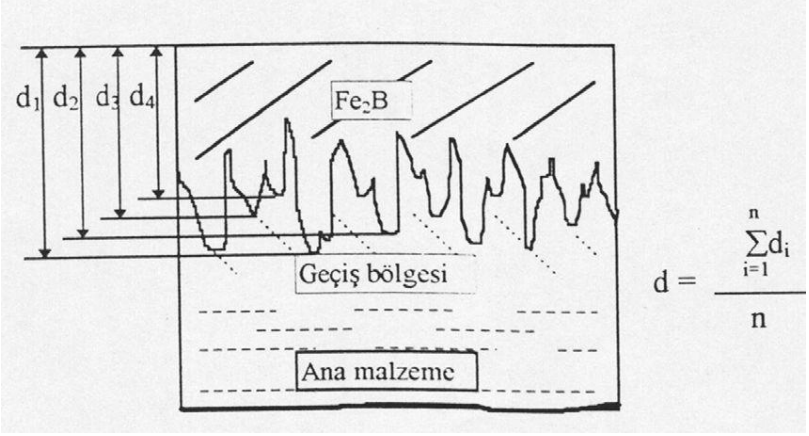
demirlerde $Fe_3(B,C)$ ve $Fe_5(B,C)$ tipi fazlar da oluşabilir (Saygın, 2006). Çizelge 2.7.'de FeB ve Fe_2B fazlarının tipik özellikleri verilmektedir.

Çizelge 2.7. FeB ve Fe_2B'nin bazı fiziksel özellikleri (Demirel, 2013)

Özellik	**Fe_2B**	**FeB**
Ergime Noktası, (°C)	1390	1550
Genleşme Katsayısı (1000 °C), (K^{-1})	$8.6x10^{-6}$	$10–16x10^{-6}$
İletkenlik Katsayısı (1000 ºC, W/cm ºC)	0.1-0.3	0.1-0.2
Özdirenç (20 °C), μ.ohm.cm	≈38	≈80
Küri Sıcaklığı, °C	742	325
Teorik Yoğunluk, gr/cm^3	7.43	6.75
Kristal Sistemi	Tetragonal Hacim Merkezli	Ortorombik
Kafes Parametreleri, A °	a = 5.075 b = 4.249	a = 4.053 b = 5.495 c = 2.946

2.8.3. Borür tabakası kalınlığının belirlenmesi

Borür tabakalarının değişken karakterli ve kolonsal bir yapıda olmalarından dolayı tabaka kalınlıklarının belirlenmesini zorlaştırmakta ve bu nedenle de farklı tanımlamalar yapılmaktadır. Literatüre bakıldığında borür tabaka kalınlığı, genellikle kolonsal yapının dış yüzeyle karşılaştırılması ve kolonların yüzeye bağlı olarak ortalama mesafelerinin alınması ile hesaplanmaktadır (Demirel, 2013). Şekil 2.10.'da Borür tabakasının kalınlığının belirlenmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Borür tabaka kalınlığının belirlenmesi (Uzun, 2002)

2.8.4. Demir borürlerin büyüme mekanizması

Termokimyasal yöntemlerle sade karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin borlanması esnasında elde edilen borürlerin, kolonsal gruplar şeklinde geliştiği saptanmaktadır. Oluşan bu borür tabakasında fazların yerleşimi en dış yüzeyde FeB fazı, yüzeyden içeriye taraf ilerledikçe Fe_2B fazı ve daha içerlerde geçiş bölgesi bulunmaktadır. FeB fazı ile Fe_2B ve Fe_2B ile matris ara yüzeyindeki yapının kolonsal yapıda olduğu bilinir. Fakat yüksek alaşımlı çeliklerin ara yüzey yapısının düz bir çizgi şeklinde olduğu belirtilmektedir. Borlama işlemi sonucunda borür tabakasında meydana gelen borür fazları, borlama ortamının aktif borun yoğunlaşmasına bağlı olarak, makro hataların ve mikro hataların bulunduğu bölgelerde başlamaktadır. Özellikle düşük aktif borun yoğunlaştığı ortamlarda, belirtilen bu bölgeler borür fazının meydana gelebildiği nadir yerlerdir (Kabadayı, 2013).

Borlama işlemi sonucunda meydana gelen borür fazları reaksiyona girerek malzeme yüzeyinden başlar. Borür tabakasının oluşumu difüzyona bağlıdır. Demir esaslı yüzeylerde sıcaklık artıkça bor yüzeyde oluşan bor kalınlığı da artmaktadır. Borlama yüzeyinde sert borür fazları oluşmaktadır. Meydana gelen bu tabakalar ya tek fazlı Fe_2B veya ikili faz şeklinde olan Fe_2B+FeB'dir. Borür tabakasının şekli, büyüklüğü oluşan fazlara, bor tabakasının sertliği ise oluşan bor tabakasındaki yapılara ve borlama için kullanılan malzemenin kimyasal yapısına göre değişiklik gösterir (Yamanel, 2018).

Yapılan araştırmalar sonucunda oluşan ilk borür fazının Fe_2B olduğu görülmekte olup, fakat Mösbauer elektron spektroskopu ile gerçekleştirilen ölçümlerde de yine tekrar oluşan ilk borür fazının Fe_2B fazı, üzerinde de FeB fazının da yer aldığı ve en dış yüzeyinde de FeB_{1+X} fazının bulunduğu görülmektedir. Yapılan çalışmaların sonucunda, en dış yüzeyinde oluşan fazın FeB_X olduğu, ancak sonradan yapılan çalışmalar sonucunda ise, bu fazın FeB_{1+X} şeklinde ve buradaki x katsayısının 1'den büyük olduğu belirtmektedir (Kabadayı, 2013).

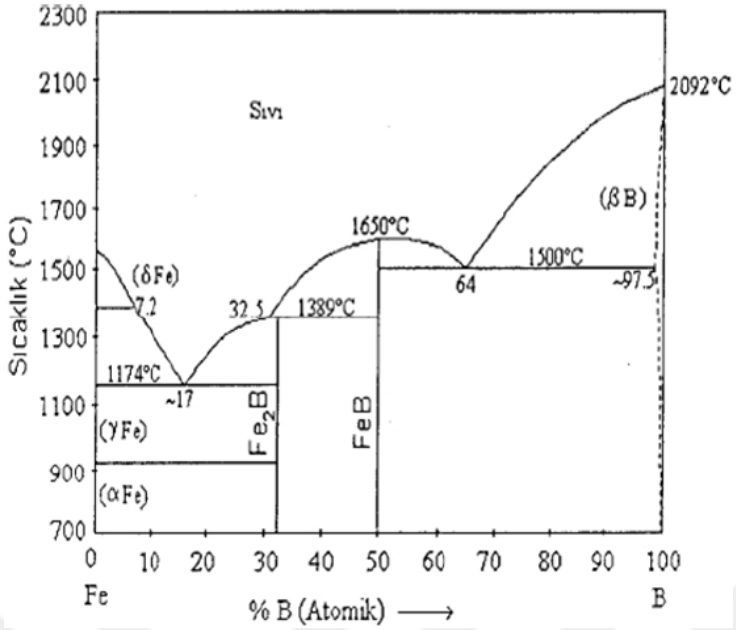
2.8.5. Geçiş bölgesi

Borlama işlemi sırasında çeliklerin bileşim elementlerinin çözünerek dağıldıkları FeB ve Fe_2B tabakalarının karbon çözdürme özelliğinin bulunmayışı nedeniyle, bor difüzyonu sırasında C ve Si'un borür tabakasından matrise doğru itildiği ve sonuç olarakta esas (ana) malzemenin yapısından farklı bir bölge meydana geldiği sanılmaktadır. İşlem sonrası, borür tabakası ile ana malzeme (matris) arasındaki bu bölge geçiş bölgesi adını almaktadır. Yapılan incelemelerde geçiş bölgesi tane boyutunun, ana malzemenin tane boyutuna oranla daha büyük olduğu görülmüş ve bunun sebebi de borun tanelerinin büyümesine etki etmesi olarak belirlenmiştir. Fakat sinterlenmiş Fe-C alaşımlarının ise geçiş bölgesinde tane büyümesine rastlanmadığı ileri sürülmektedir (Aysal, 2011).

Geçiş bölgesi hakkında farklı fikirler bulunmakta olup, bunlardan bir taneside; geçiş bölgesinde bor elementinin çeliklerde alaşım elementi olarak sergilediği etkiyi göstermesinden dolayı değişik özelliklerinin olması şeklinde belirtilmektedir. Bu bölgenin ısıl işleme hassasiyeti, borun ostenit dönüşümünü yavaşlatmasındandır. Ayrıca geçiş bölgesinde gözlenen ostenit tane irileşmesi durumuda borun alaşım elementi olarak çeliklerde sergilediği benzer özelliklerdendir (Aysal, 2011).

2.8.6. Demir ve bor (Fe-B) ikili faz denge diyagramı

Elementlerin Fe'de çözünme özelliklerini çözücü ve çözünen atomların izafi büyüklükleri belirlemektedir. Demir (Fe) alaşımlarında alaşım elementlerinin, atom çaplarına göre ara yer ve yer alan element olarak eriyebileceği bilinmektedir. Bu durumdan yola çıkılarak, bor α-Fe'de (saf demir) yer alan veya ara yer pozisyonunda olabildiği görülmektedir. Ayrıca Fe-B sisteminde, demirin atom çapının borun atom çapından %27 oranında daha büyük olması, bu elementle katı eriyik yapma olanağı sağlamaktadır. Düşük sıcaklık değerlerinde demir içerisindeki bor çözünürlüğü karşılaştırıldığında, 1/50 oranında ara yer atomu, büyük oranda ise yer alan atomu olarak eridiği görülmüştür. α-Fe'de borun difüzyonu için gerekli olan değerde yani 62 kcal/mol aktivasyon enerjisi tespit edilmiştir (Kutucu, 2013).



Şekil 2.11. Fe-B denge diyagramı (Kutucu, 2013)

Şekil 2.11.'deki denge diyagramında da görüldüğü üzere demir ile bor arasında Fe_2B (ağırlıkça %8.83 B) ve FeB (ağırlıkça %16 B) bileşikleri oluşmaktadır. Fe_2B, $Fe_3(C,B)_2$'de veya bor difüzyonunun hâkim olduğu γ-Fe tane sınırlarında ötektik reaksiyonu başlamaktadır. Ötektiğin yapısı ve özellikleri, bileşimin yanında sıvı tabakanın soğuma hızına bağlıdır. Soğuma hızının yüksek olduğu durumda ince mikroyapı, yüksek sertlik ve tokluk elde edilmektedir. Borlayıcı bileşenlerden metalik kafese doğru gidildikçe bor atomlarının içerilere doğru difüze olduğu ve sonrasında absorbsiyonu ile süreye bağlı olarak hem Fe_2B yani tek fazlı hem de FeB ile Fe_2B yani çift fazlı borür tabakalarını oluşmaktadır. Tabakanın özelliklerini büyük ölçüde bu iki borür belirlemektedir (Kutucu, 2013).

2.8.7. Borür tabakasının sertliği

Borlu tabakanın özelliklerine dair literatürdeki çalışmalara bakıldığında daha çok sertlik, korozyon ve aşınma gibi özelliklerin üzerinde durulmaktadır. Borlama işleminin en önemli etkisinin malzemenin sertlik özelliği üzerine olduğunu, sertlik durumu ise ana malzemenin cinsine ve meydana gelecek olan FeB ve Fe_2B fazlarına bağlıdır. FeB fazı, Fe_2B fazına kıyasla daha sert ve gevrek özelliğe sahiptir. Borlama

işlemiyle elde edilen sertlik; karbon çeliklerinde 1800-2000 HV değerinde, alaşımlı çeliklerde 2500-2800 HV değerinde, titanyumda ise 3000 HV civarındadır. Borlama işlemi neticesindede elde edilen borür tabakalarının özellikleri de ana malzemenin alaşım elementlerine göre değişiklik göstermektedir (Arat, 2011). Çizelge 2.8.'de Fe-B tabakalarının özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.8. Fe-B tabakalarının sertlikleri ve erime noktaları (Arat, 2011)

Malzeme	Oluşan Birleşik	Sertlik (HV)	Ergime Noktası
Fe	FeB	1900-2100	1390
Fe	Fe_2B	1800-2000	1390

2.9. Hardox Çelikleri

2.9.1. Hardox çelikleri hakkında genel bilgiler

Hardox çelikleri su verilme ve harelenme işlemlerinden geçirilmiş bir aşınma levhasıdır. Bu çelikler ilk defa 1970 yılında piyasaya sunulmuş ve o günden bugüne kadar birçok farklı ihtiyaçları karşılamak üzere sürekli olarak geliştirilmiştir. Hardox levhasının, diğer yüksek mukavemetli yapı levhalarına kıyasla 4-5 kat daha sert olmasının yanısıra mükemmel kaynak edilebilme ve işlenebilme özellikleri bu malzeme ile çalışmayı kolaylaştırmaktadır (Topal, 2017).

Endüstride kullanılan makine parçalarının birbiriyle teması veya çevresel etkenler sonucu oluşan aşınmalardan dolayı orijinal ölçülerini kaybetmesi makinenin çalışma sisteminin bozulmasına neden olarak çalışma verimini düşürmektedir. Makine elamanları aşınmanın yanı sıra yorulma, korozyon, darbeler ve iç gerilmelere maruz kalarak sistemin tamamen durmasına neden olabilmektedir (Topal, 2017). Şekil 2.12.'de aşınmaya maruz kalmış Hardox çeliğinden üretilmiş olan makine aparatı gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Aşınmaya maruz kalmış Hardox çeliğinden üretilmiş olan makine aparatı [URL 5]

Aşınma şiddetini etkileyen faktörlere bakıldığında; aşınmaya maruz kalan sistemin elemanları, malzeme cinsi, sertlik, yüzey pürüzlülüğü, kimyasal içerik, uygulanan ısıl işlemler, çevre, çalışma ortamı, elastik modülü, aşındırıcının tane boyutu ve şekli olduğu görülmektedir. Sertlik, malzeme seçiminde dikkate alınması gereken parametrelerin en önemlilerinden bir tanesidir. Malzemelerin sertlik değerleri yüksek ise aşınma dirençlerinin de yüksek değerlerde olduğu bilinmektedir. Aşınmanın malzemeler üzerindeki olumsuz durumların giderilmesi için aşınmaya dayanıklı malzemeler geliştirilmektedir. Bu malzemelerden bir taneside Hardox çelikleri serisidir. Özellikle Hardox 450 çeliği, piyasadaki yüksek dayanımlı diğer çeliklere kıyasla, en az 5 kat daha uzun ömürlü olduğu ve bu özelliğinden dolayı ise kepçe ve damperli kamyonların kasa imalinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Topal, 2017).

2.9.2. Hardox çelik türleri ve özellikleri

Hardox sertlik sınıfını her zaman kolayca seçebileceğimiz ayrı ayrı sertlik derecelerinde bulunur. Bunlar; Hardox 400, 450, 500, 550, 600 ve HiTuf dereceleridir (Topal, 2017).

Hardox 400: 400 HBW nominal sertliğe sahip, aşınmaya dayanıklı çok yönlü bir çeliktir. Yüksek düzeydeki tokluk değeri, iyi bükülebilir ve kaynaklanabilirlik özellikleri sayesinde, orta düzeyde aşınmaya maruz kalan yapılarda kullanılabilmektedir [URL 5]. Şekil 2.13.'te Hardox 400 çeliğinden üretilmiş örnek bir makine takımı gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Hardox 400 çeliğinden üretilmiş örnek bir makine takımı [URL 6]

Hardox 450: Mükemmel yapısal özellikleriyle, 450 HBW nominal sertliğe sahip, aşınmaya dayanıklı çelikler arasında en popüler çeliktir. Hardox 450 iyi bükülebilirlik ve kaynaklanabilirliği garantili darbe tokluğu özelliklerine sahiptir. Bu çelik aşınmaya maruz kalan birçok farklı bileşen ve yapıda kullanılabilir. 400 dereceye ek olarak 50 Brinell daha yüksek olan Hardox 450'nin sağladığı daha iyi aşınma direnci ve daha uzun aşınma ömrüyle, daha da fazla tasarruf sağlayabilmektedir [URL 7]. Şekil 2.14.'te Hardox 450 çeliğinden üretilmiş örnek bir makine takımı gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Hardox 450 çeliğinden üretilmiş örnek bir makine takımı [URL 7]

Hardox 500: Daha yüksek aşınma direnci gerektiren uygulamalar için uygundur. Bükülebilir, kaynaklanabilir ve yüksek düzeyde aşınmaya dayanıklı ve 500 HBW nominal sertliğe sahiptir. Hardox 500 çeliği, yük kapasite değeri ve servis ömrünü artırırken, belirtildiğinde garantili darbe tokluğu özelliği de iyi işlenebilirlik sağlar [URL 8].

Hardox 550: 550 HBW nominal sertliğe sahiptir. Hardox 500 çeliğine yakın tokluk değeriyle çatlak bütünlüğüne zarar vermeden aşınma ömrünü artırabilmektedir [URL 9].

Hardox 600: 600 HBW nominal sertliğiyle, Hardox 600 benzersiz düzeyde yüksek bir darbe tokluğuna sahiptir. Sıradışı aşınma koşulları için uygun olmasına rağmen kesilebilme ve kaynaklanabilme özellikleri sayesinde, yüksek performans uygulamaları için mükemmel bir seçimdir. Yüksek aşınma için ekstra sert ve tok bir çeliktir [URL 10].

Hardox HiTuf: Yapısal aşınma parçaları için ekstra yüksek tok çeliktir. Garantili darbe tokluğu sunan, aşınmaya karşı dayanıklı bir plakadır. 350 HBW nominal sertliğiyle, kalın bıçak ağızları, yıkım ekipmanları ve parçalama makinaları için uygun bir çeliktir [URL 11]. Şekil 2.15.'de Hardox çeliğinden yapılmış kepçe ve kırıcı gösterilmektedir.



Şekil 2.15. Hardox aşınma levhasından imal edilmiş kepçe ve kırıcı (Topal, 2017)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada, borlama işlemi için kimyasal bileşimleri Çizelge 3.1.'de verilen Hardox 450 ve Hardox HiTuf çelikleri kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Hardox 450 ve Hardox HiTuf çeliklerinin kimyasal kompozisyonu (%) [URL7; URL 11]

Örnekler	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Hardox 450	0.26	0.70	1.60	0.025	0.010	1.40	1.50	0.60	0.005
Hardox HiTuf	0.20	0.60	1.60	0.050	0.020	0.70	2.0	0.70	0.005

Deneylerde kullanılan Hardox 450 ve Hardox HiTuf çelikleri, çelik imalatı yapan özel bir çelik firmasından plaka şeklinde temin edilmiştir. Ticari olarak plaka şeklinde temin edilen Hardox 450 ile Hardox HiTuf çeliklerinin deney numune boyutlarına getirilmesi, mikro yapısının ve sertliğinin değişmemesi amacıyla çeliklerin kesimi 19.2x19.2x10 mm^3 boyutlarında lazerle gerçekleştirilmiştir. Yüzey işlemleri (zımparalama, parlatma vs.) ve XRD analizinden sonra numunelerin optik mikroskop ile SEM görüntülerinin alınabilmesi ve Vickers sertlik ölçümlerinin gerçekleştirilmesi için numuneler tel erezyon kesimiyle yaklaşık olarak iki parçaya ayrılarak son hallerini almışlardır. Hardox 450 ile Hardox HiTuf çeliklerden hazırlanmış numune örneklerinin her iki durumu Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan örneklerin resimleri

3.2. Borlama İşlemi

Borlama işlemi Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği bölüm laboratuvarında Şekil 3.2.'de gösterilen 1200 °C sıcaklık kontrollü, ±5 °C hassasiyetli elektrik dirençli ve mikro işlemci kontrollü programlanabilir kül fırını kullanılarak katı borlama yöntemiyle yapılmıştır. Bor kaynağı olarak ticari, piyasadan temin edilmiş Ekabor-1 tozu kullanılmıştır. Borlama anında hava temasını engellemek için %10 oranında Ekrit tozu kullanılmıştır. Bor verici tozlar, önceden hazırlanmış yüksekliği 80 mm ve çapı 50 mm olan yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik pota içerisine yaklaşık olarak 5 cm kalınlığında yerleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Elektrik rezistanslı kül fırını (Ünüvar, 2013)

Daha sonra Hardox 450 ile Hardox HiTuf çeliklerinden hazırlanmış 19.2x19.2x10 mm^3 ebatlarında numuneler pota içerisinde en az 1 cm aralıklarla yerleştirilmiştir. Potanın kenar kısmındaki numuneler arasında da yine en az 1 cm boşluk bırakılarak potanın tamamı bor verici toz (Ekabor-1) ile doldurulmuştur. Üst kısımına numunelerin oksitlenmesini önlemek yani hava giriş çıkışını engellemek amacıyla 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. Ardından kül fırını içerisine yerleştirilmiştir. Numunelerin seramik potalar içerisindeki gösterimleri ve üstünün Ekrit tozu ile kapatılması Şekil

3.3.'de gösterilmiştir. Seramik potaların ağzının kapatılması işlemi ise Şekil 3.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Numunelerin seramik pota içerisindeki yerleşimi ve ekrit tozu ile üstünün kapatılması (Ünüvar, 2013)



Şekil 3.4. Potaların kapaklarının kapatılması (Çarkçı, 2012)

Hardox 450 ile Hardox HiTuf çeliklerinden 19.2x19.2x10 mm^3 ebatlarında hazırlanan numunelerin borlama ısıl işlemi 800, 900 ve 1000 ^oC farklı sıcaklıklarda, 5 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Borlanmış numunelerin soğutma işlemi ise laboratuvar ortamında ortam sıcaklığında fırın dışında bekletilerek yapılmıştır.

3.3. Metalografik İnceleme

Hardox 450 çeliği ve Hardox HiTuf çeliği örneklerinin borlanmış bölgelerinin difüzyon derinliğini, malzemenin tane yapısını ve yeni oluşan fazların tespiti amacıyla örneklerin yüzeylerine zımparalama ve parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Metalografik yüzey işlemleri için Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği laboratuarındaki mevcut zımparalama ve parlatma cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.5). Numuneler sırasıyla 300, 600, 800, 1000, 1200, 1500 ve 2000 gridlik SiC zımparalar yardımıyla yüzeydeki tüm çizikler tamamen giderilinceye kadar zımparalanmıştır ve sonrasında numune yüzeyleri 3 µm ve 1 µm'luk elmas pasta ve solüsyonlar yardımıyla parlatma işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.5. Metalografik zımparalama ve parlatma cihazı

Parlatma işleminden sonra numunelerin borlanmış bölgelerinin difüzyon derinliğini ve malzemenin tane yapılarını ortaya çıkarmak için Nithal çözeltisi (%5 HNO_3 + %95 Ethanol) kullanılarak örnek yüzeylerine 2 dakika süreyle dağlama yapıldı ve örnekler mikroyapı incelemeleri için hazır hale getirildi.

Optik mikroskopta mikroyapı incelemeleri; borlama işlemi sonucunda Hardox 450 ile Hardox HiTuf çeliklerden hazırlanmış örneklerin bor difüzyonu kalınlığı, geçiş bölgesi ve tane yapılarını tespit etmek amacıyla Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi laboratuvarından bulunan KOZO markalı XJM 200 ters metal mikroskobuyla matris bölgesinden 500X büyütmede, borür tabakalı bölgede 200X büyütmede mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. KOZO markalı XJM 200 mikroskop cihazı Şekil 3.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. KOZO markalı XJM 200 mikroskop cihazı

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) mikroyapı incelemeleri ise borlama işlemi sonucunda Hardox 450 ile Hardox HiTuf çeliklerden hazırlanmış örneklerin bor difüzyonu kalınlığı, geçiş bölgesi ve tane yapılarını tespit etmek amacıyla Harran Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma Merkezi (HÜBTAM) laboratuarında bulunan ZEISS EVO 50 markalı SEM cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.7.). SEM cihazında 500X ile 750X büyütmede, EHT:10.00 kV ve EP Target:1.00e-001 mbar

değerlerinde görüntüler alınarak bor difüzyonu kalınlıkları (mikrometre), geçiş bölgeleri ve tane yapıları tespit edilmiştir.



Şekil 3.7. ZEISS EVO 50 markalı taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı

3.4. XRD Analizi

Borlama işlemi sonucunda Hardox 450 ile Hardox HiTuf çeliklerden hazırlanmış örneklerin yapısında oluşan yeni fazları belirlemek için Harran Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma Merkezi (HÜBTAM) laboratuarında bulunan Ultima III-Rigaku markalı x-ışını kırınımı (XRD) cihazı kullanılarak 2 ^{o}/dakika tarama hızında ve 2-90^{o} tarama aralığında gerçekleştirilmiştir. Faz durumlarının tespitinde kullanılan XRD cihazı Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Ultima III-Rigaku markalı x-ışını kırınımı (XRD) cihazı

3.5. Sertliklerin Ölçümü

Borlanmış Hardox 450 ve Hardox HiTuf çeliklerinin yüzey sertliklerinin tespiti için Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan AOB Lab markalı Mikro-Vickers sertlik cihazı kullanılarak borlanmış numunelerdeki sertlik değişimleri belirlenmiştir. Vickers sertlik cihazında borlanmış her numunenin farklı 3 kenarından ayrı ayrı 4 ayrı noktadan (borlanmış bölgesinde 2 noktadan, geçiş bölgesinden ve matristen) 5 saniye süre ile 100 gram yük uygulanarak sertlikleri ölçülmüştür. Sertlik ölçümlerinin gerçekleştirildiği Mikro-Vickers sertlik cihazı Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.

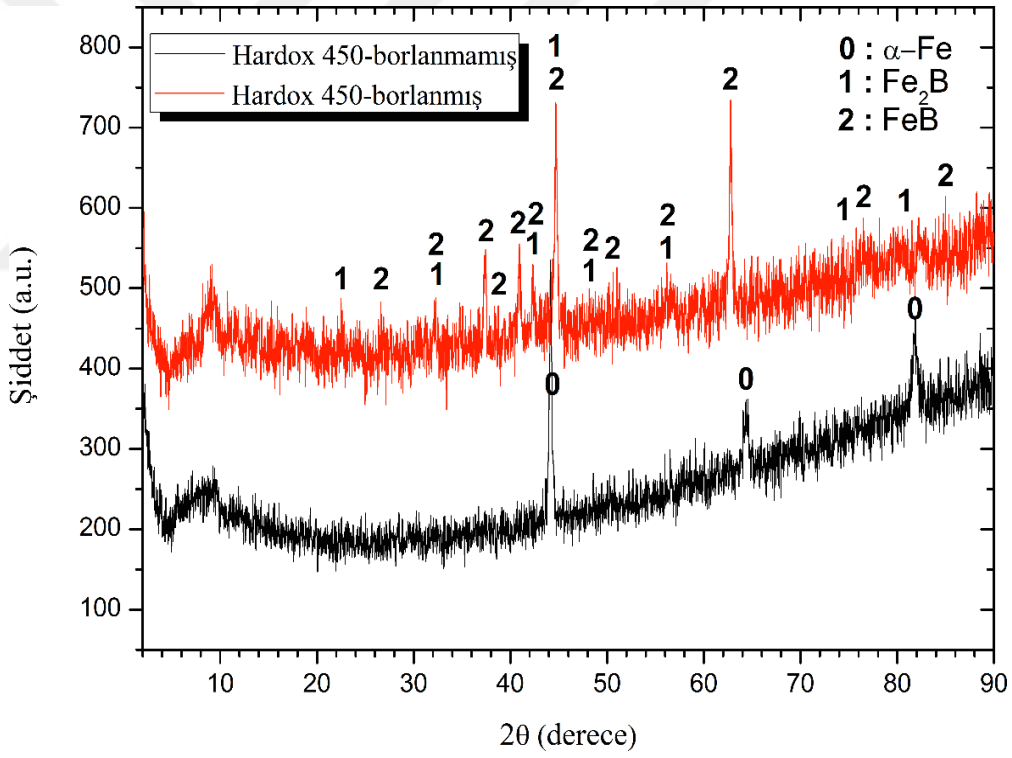


Şekil 3.9. AOB Lab markalı Mikro-Vickers sertlik ölçme cihazı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. XRD Analizi Sonuçları

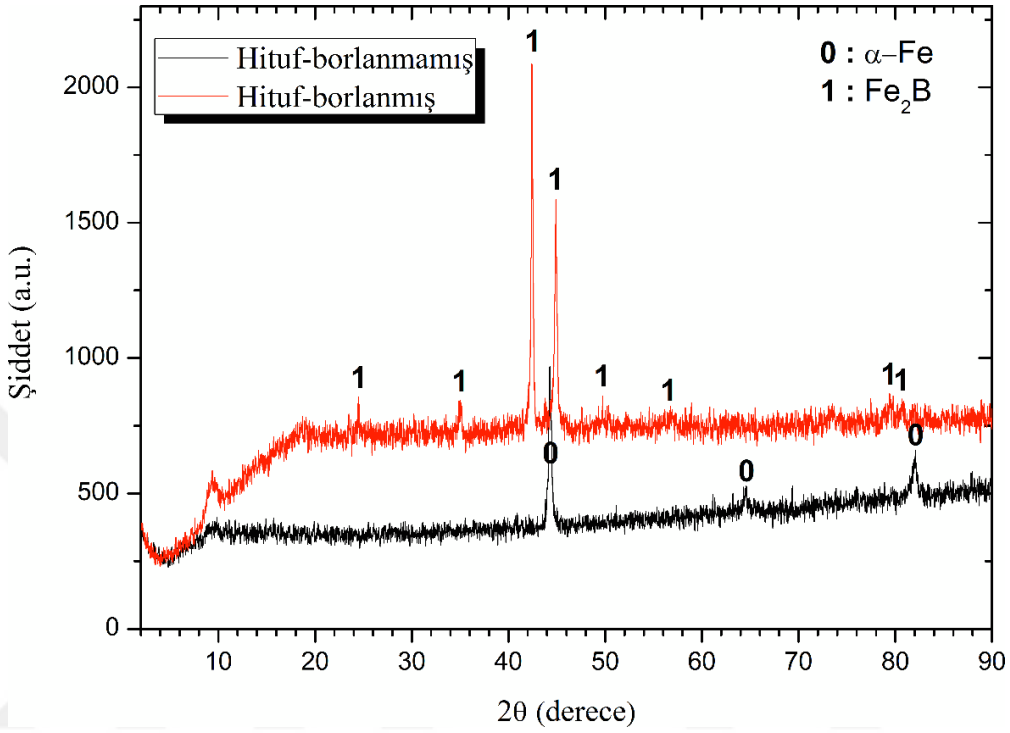
Şekil 4.1.'de, Hardox 450 çeliğinin borlanmamış ve 900 ^{o}C sıcaklıkta 5 saat süreyle Ekabor-1 tozuyla katı borlama işlemine tabii tutulmuş örneklerin XRD desenleri gösterilmiştir. Hardox 450 çeliklerinin borlanmış ve borlanmamış numunelerinin XRD desenleri incelendiğinde, borlanmamış örnekte sadece α-Fe fazı pikleri gözlenirken, borlanmış örnekte ise FeB ve Fe_2B fazlarına ait pikler gözlenmiştir.



Şekil 4.1. Hardox 450 çeliklerinin 900 ^{o}C'de 5 saat süreyle borlanmış ve borlanmamış numunelerin XRD desenleri

Şekil 4.2.'de, Hardox HiTuf çeliklerinin borlanmış ve borlanmamış numunelerinin XRD desenleri gösterilmiştir. Hardox HiTuf çeliklerinin borlanmış ve borlanmamış numunelerinin XRD desenleri incelendiğinde, borür tabakası bölgelerinde sadece Fe_2B fazı gözlenmiştir. Her iki durumun borlanma

parametrelerinin aynı olmasına rağmen matris yapılarının farklılığından ötürü borlanma bölgelerinde her iki numunede de α-Fe ve Fe_2B fazları tespit edilmiştir. FeB fazına sadece Hardox 450 çeliğinde rastlanmıştır.



Şekil 4.2. Hardox HiTuf çeliklerinin 900 ºC'de 5 saat süreyle borlanmış ve borlanmamış numunelerin XRD desenleri

Alparslan (2011), AISI 1010 ve 1050 çeliklerine katı borlama yöntemiyle borlama yapmıştır. Borlama işlemi sonrası her iki malzemede de FeB ve Fe_2B fazlarını tespit etmiştir. Gençer ve arkadaşları (2011), Saf Fe ve Fe-8V numunelerine borlama işlemi yapmışlardır. Borlama işlemi neticesinde XRD analiz sonuçlarına bakıldığında; saf demir yüzeyindeki borür tabakasında FeB ve Fe_2B fazları oluşurken, Fe-8V alaşımı yüzeyindeki borür tabakasında ise sadece FeB fazının oluştuğunu bildirilmiştir. Ayrıca, oluşan borür bileşiklerinin çoğunluğunda, Fe_2B ve FeB borür tabakası dışında bir de Fe-V-B çökeltisin oluştuğunu tespit etmişlerdir. Azaklı (2012), saf demir ve saf tungstene değişik parametrelerde katı borlama işlemi yapmış ve yüzeyden yapılan XRD analizleri neticesinde borlanmış tüm numunelerde Fe_2B, FeB fazlarını tespit etmiştir. Ayrıca, %8 ve daha fazla tungsten içeren numunelerde de FeW_2B_2 fazının oluştuğunu belirlemiştir.

Literatürdeki benzer çalışmaların sonuçları ile kendi çalışmamızın XRD sonuçları karşılaştırıldığında; elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu görülmüştür. Çeliklerin borlama işlemi sonucunda borür tabakasında farklı faz durumlarının ortaya çıktığı gözlenmiştir. Bazı çeliklerin borür tabakasında çift faz (Fe_2B+FeB fazları) oluşurken, bazı çeliklerin borlama işlemi sonucunda oluşan borür tabakasında sadece tek faz (Fe_2B fazı) oluştuğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar değerlendirilecek olunursa, çeliklerin borlama parametrelerinin aynı olduğu göz önünde bulundurulurak borür tabakasında oluşan faz durumlarının (tek faz veya çift faz) farklı olmalarında, çeliklerin kimyasal birleşenleri ile bu birleşenlerin kompozisyonlarındaki (%) yüzdelik ağırlıklarının önemli bir etkiye sahip olduğu sonucu çıkarılmıştır.

4.2. Metalografik İnceleme Sonuçları

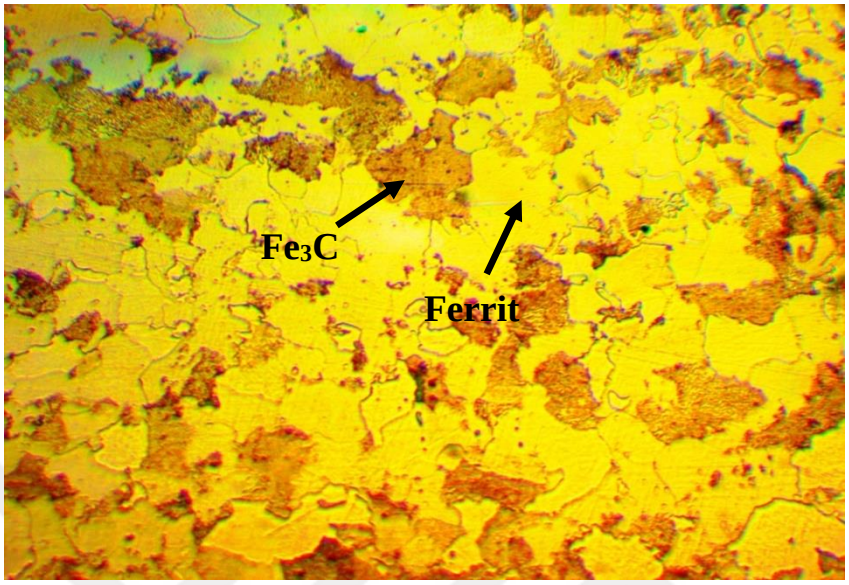
Bu çalışmada, Hardox 450 ve Hardox HiTuf çeliklerin matris hali ve üç farklı sıcaklıklarda (800, 900 ve 1000 ^oC) ve sabit sürede (5 saat) Ekabor-1 tozu ile borlanmış örneklerinin difüzyon derinliklerini, oluşan fazları ve tane yapıları; hem optik mikroskobu hemde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

Borlanmış örneklerinin difüzyon derinliklerini, oluşan fazları ve tane yapıları tespit edilmesine dair öncelikli olarak optik mikroskopta mikroyapılar çekilmiştir ve sonrasında da SEM mikroyapıları çekilerek ayrı ayrı ele alınmıştır. Hardox çeliklerin matris hali ile farklı sıcaklıkta borlanmış örneklerinin birbirleriyle ayrı ayrı kıyaslaması yapılmıştır.

4.2.1. Optik mikroyapı sonuçları

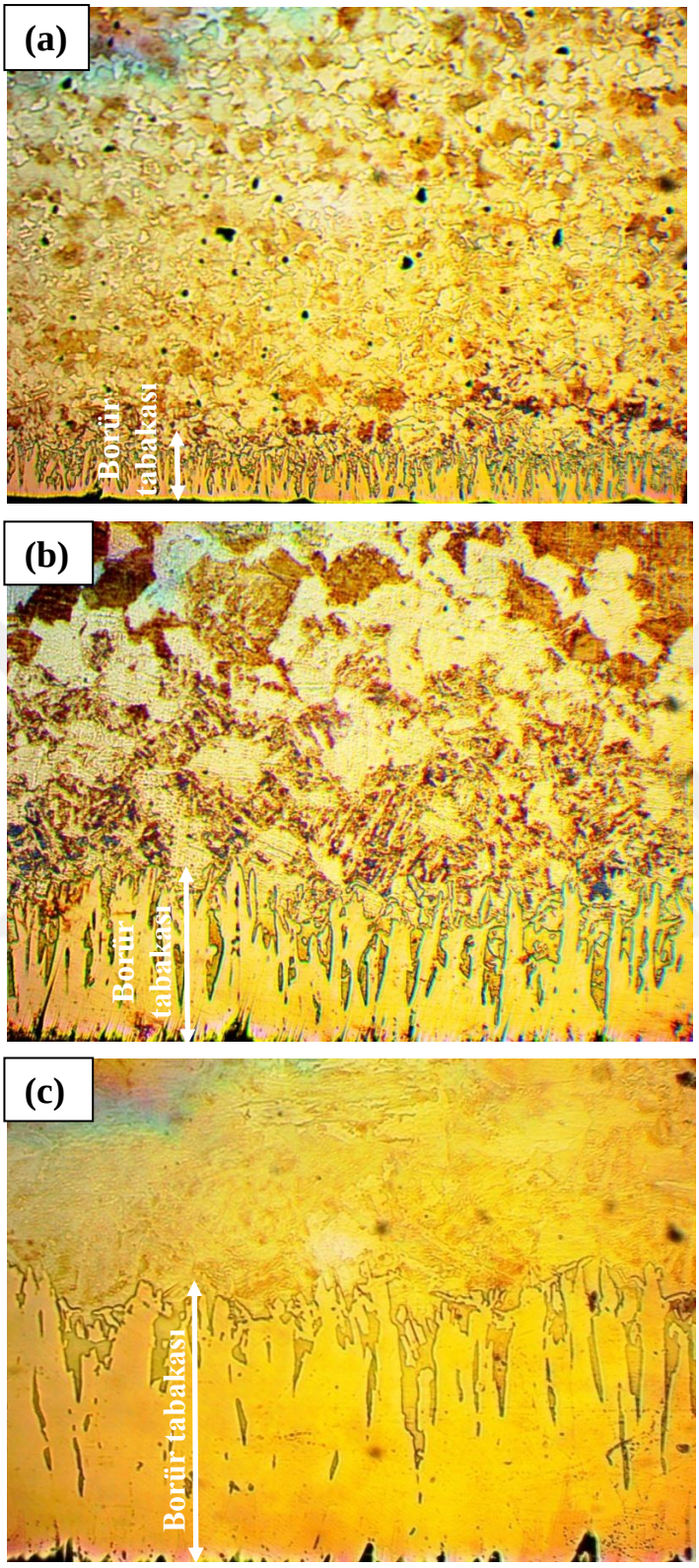
Hardox 450 çeliğinin borlanmış kenara yakın yerden saf matris yapısının optik mikroskoptan mikroyapı görüntüsü 500X büyütmede alınarak Şekil 4.3.'de

gösterilmiştir. Mikroyapıda açık renkli bölgeler ferrit ve perlit, koyu renkli bölgeler ise temperlenmiş sementit (Fe_3C) tanelerini göstermektedir.



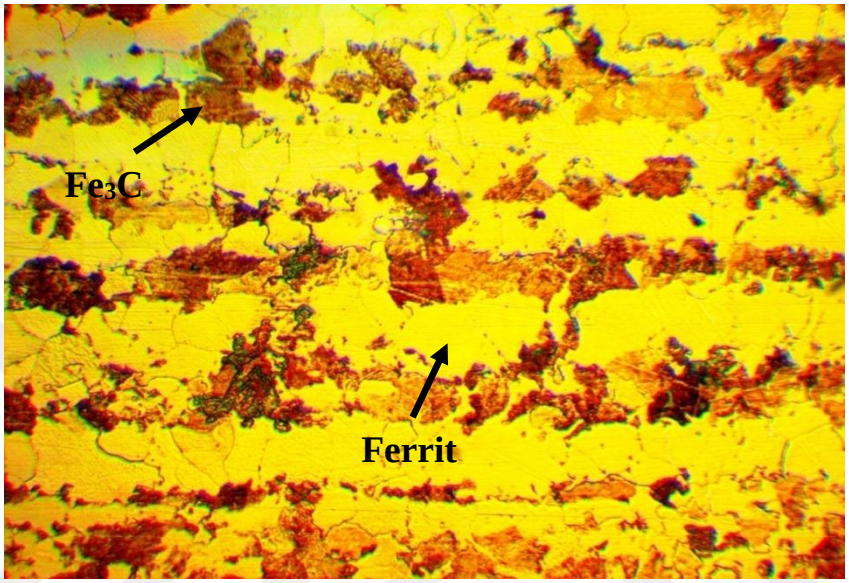
Şekil 4.3. Hardox 450 çeliğinin borlanmış kenara yakın matris bölgesinden mikroyapısı

Şekil 4.4.'te, Hardox 450 çeliğinin 800, 900 ve 1000 ºC sıcaklıkta 5 saat borlanmış bölgenin optik mikroskoptan alınan 200X büyütmede mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.4.'den Hardox 450 çeliğinin tane yapısı, borür tabakası kalınlığı ve bor difüzyon derinlikleri görülebilmektedir. Borlama işlemi sonucunda ana malzeme içerisinde borür tabakasının difüzyonun parmaksı yapıya sahip olduğu ve borlama işleminin sıcaklığın arttırılmasıyla da ana malzeme yüzeyine nüfuz eden borlama difüzyon derinliğinin de arttığı gözlemlenmektedir.



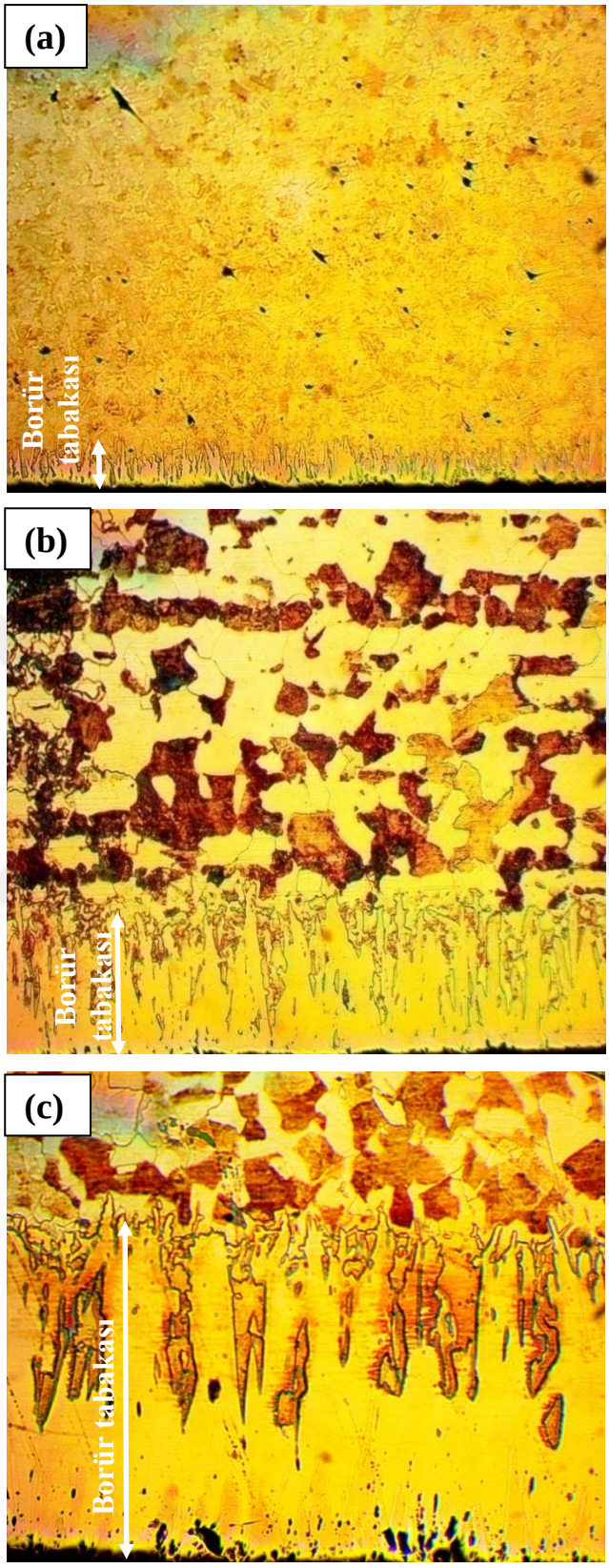
Şekil 4.4. Hardox 450 çeliğinin borlanmış bölgenin kenara yakın yerden mikroyapıları; (a) 800 °C, (b) 900 °C ve (c) 1000 °C sıcaklıkta 5 saat süre ile borlanmış resimleri

Şekil 4.5.'te, Hardox HiTuf çeliğinin borlanmış kenara yakın yerden saf matris yapısının optik mikroskoptan 500X büyütmede mikroyapı resmi verilmiştir. Hardox HiTuf çeliğinin matris yapısında ferrit, perlit ve temperlenmiş sementit (Fe_3C) taneleri görülebilmektedir. Mikroyapıda açık renkli bölgeler ferrit ve perlit, koyu renkli bölgeler ise temperlenmiş sementit (Fe_3C) fazlarını göstermektedir.



Şekil 4.5. Hardox HiTuf çeliğinin borlanmış kenara yakın matris bölgesinden mikroyapısı

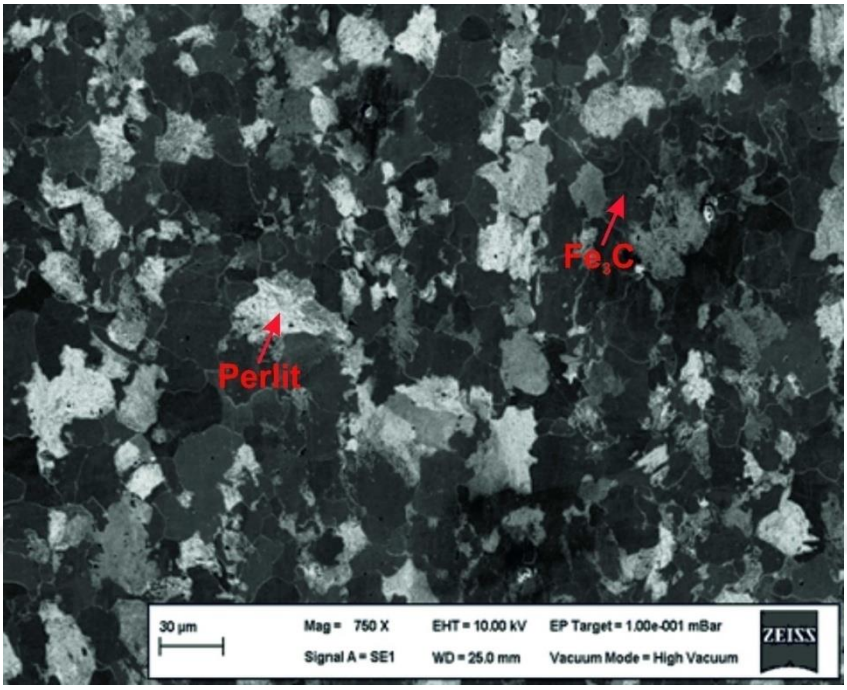
Hardox HiTuf çeliğinin 800, 900 ve 1000 ^{o}C sıcaklıkta 5 saat borlanmış bölgenin optik mikroskoptan alınan 200X büyütmede mikroyapı görüntüleri Şekil 4.6.'da verilmiştir. Şekilden görüleceği gibi borlama sıcaklığının artışı ile birlikte borür tabakasının kalınlığında da bir artış olmaktadır (Şekil 4.6 a-c).



Şekil 4.6. Hardox HiTuf çeliğinin borlanmış bölgenin kenara yakın yerden mikroyapıları; (a) 800 ºC, (b) 900 ºC ve (c) 1000 ºC sıcaklıkta 5 saat süre ile borlanmış resimleri

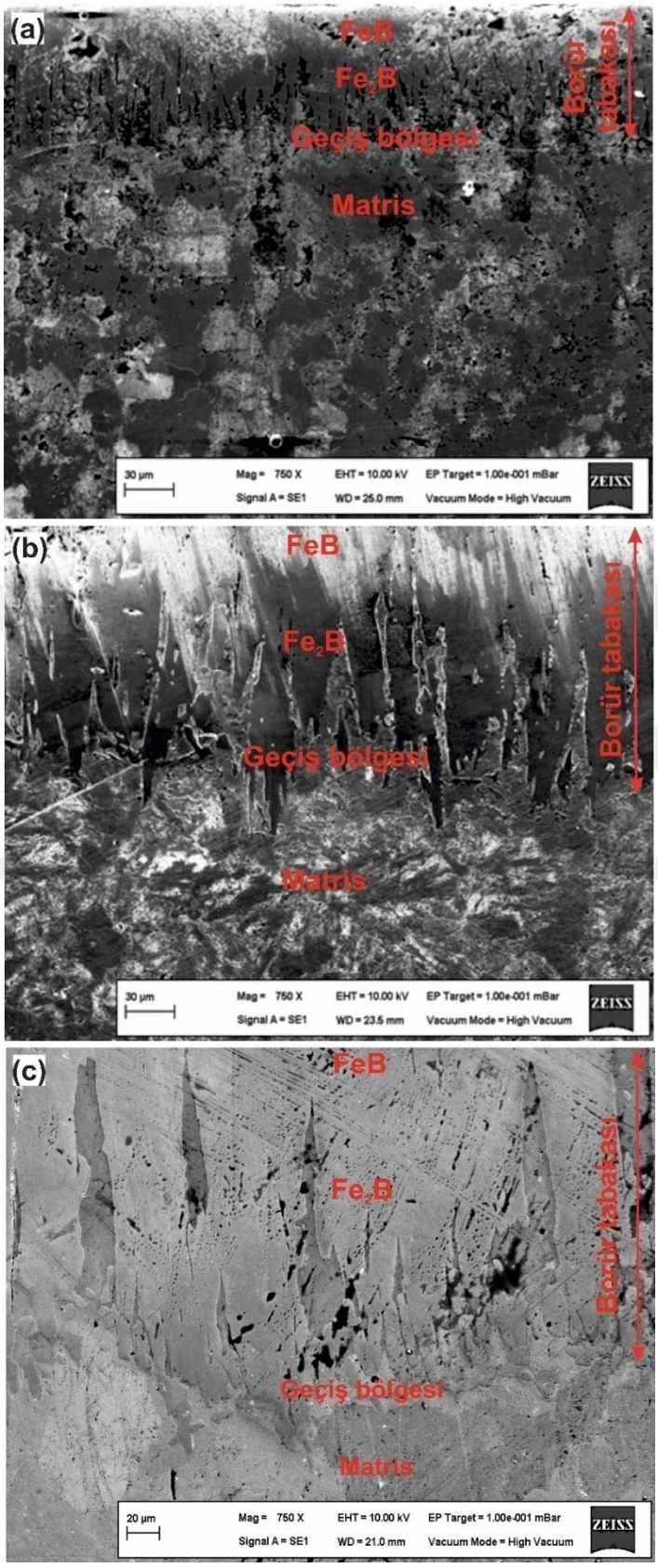
4.2.2. Mikroyapı (SEM) sonuçları

Hardox 450 çeliğinin borlanmış kenara yakın yerden saf matris yapısının SEM mikroyapı görüntüsü Şekil 4.7.'de gösterilmiştir. Mikroyapıda açık renkli bölgeler ferrit ve perlit, koyu renkli bölgeler ise temperlenmiş sementit (Fe_3C) tanelerini göstermektedir.



Şekil 4.7. Hardox 450 çeliğinin borlanmış kenara yakın matris bölgesinden SEM mikroyapısı

Şekil 4.8.'de, Hardox 450 çeliğinin 800, 900 ve 1000 ºC sıcaklıkta 5 saat borlanmış bölgenin SEM mikroyapıları verilmiştir. Şekil 4.8.'den Hardox 450 çeliğinin tane yapısı, borür tabakası kalınlığı ve bor difüzyon derinlikleri görülebilmektedir. Borlama işlemi sonucunda ana malzeme içerisinde borür tabakasının difüzyonun parmaksı yapıya sahip olduğu ve borlama işleminin sıcaklığın arttırılmasıyla da ana malzeme yüzeyine nüfuz eden borlama difüzyon derinliğinin de arttığı gözlemlenmektedir. Ayrıca Hardox 450 çeliğinin borlanmış yüzeyden alınan SEM mikroyapılarından oluşan borür tabakaları incelendiğinde; borlanmış yüzeyin ilk tabakasının FeB ve ardından gelen tabakanın ise Fe_2B fazlarına ait olduğu görülmektedir.

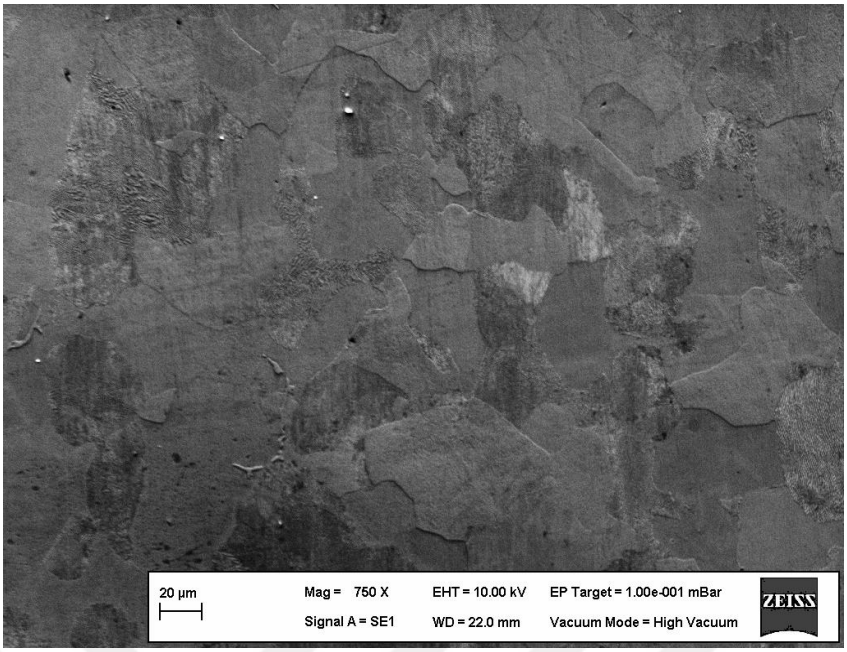


Şekil 4.8. Hardox 450 çeliğinin borlanmış bölgenin kenara yakın yerden SEM mikroyapıları; (a) 800 ^{o}C, (b) 900 ^{o}C ve (c) 1000 ^{o}C sıcaklıkta 5 saat süre ile borlanmış

Çalık ve ark. (2004), alaşımsız ve düşük karbonlu Ç1035 çeliğinin yüzeyine bor emdirilmiş ve çeliğin yüzeyinin kimyasal bileşimi değiştirilerek borlama işlemi yapmışlardır. Borlama işlemi sonucu elde ettikleri borür tabakasının kolonsal bir yapı oluşturduğu ve borür tabakasının en dış bölgesinde FeB fazının oluştuğunu, parmaksı bölgelerinde ise Fe_2B fazının oluştuğunu tespit etmişlerdir. Öner (2010), volfram metaline katı borlama yöntemiyle borlama yapmıştır. Borlama işlemi sonucu volframın yüzeyinde neredeyse bütünüyle düz, dişli ve poroz yapıdaki borür tabakasının oluştuğunu gözlemiştir. Ayrıca, borlama süresi ve sıcaklığı ne kadar yüksek olursa o kadar kalın borür tabakası oluşacağını bildirmiştir. Oluşan borür tabakasının çoğunlukla WB olduğunu ancak, bazı sıcaklık ve sürelerde W_2B fazının da oluştuğunu bildirmiştir.

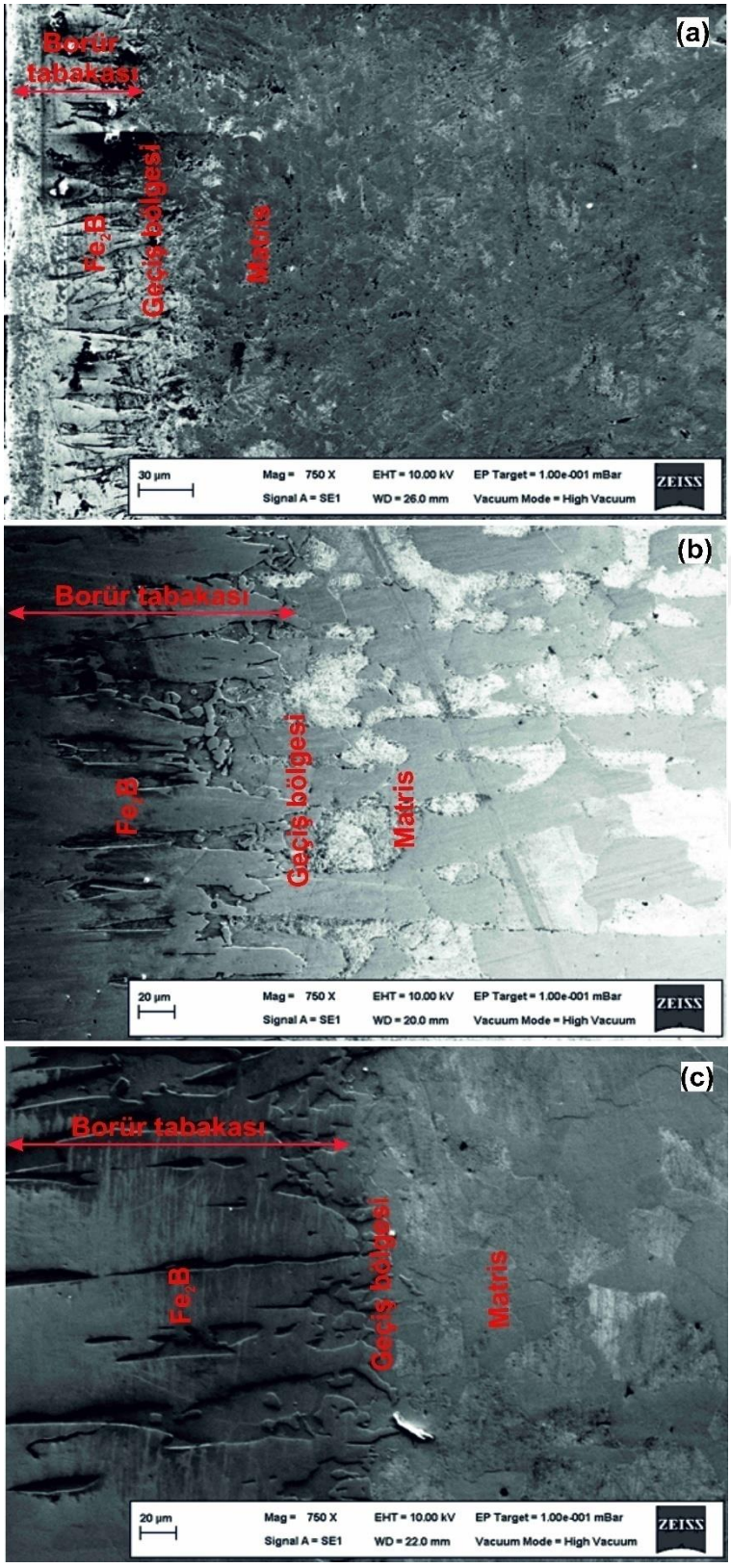
Literatürdeki benzer çalışmaların SEM sonuçları ile çalışmamız neticesinde elde ettiğimiz SEM sonuçları karşılaştırıldığında, çalışmamızla benzer sonuçlara varıldığı görülmüştür. Borlama işlemi sonucunda elde ettikleri borür tabakalarının kolonsal (parmaksı, dişli) bir yapı sergilediği ve borür tabakalarının en dış bölgesinde FeB fazının, parmaksı bölgelerinde ise Fe_2B fazının oluştuğunu tespit edilmiştir. Ayrıca, borlama sıcaklığının artmasıyla, borür tabakasının derinliğini arttığı görülmüştür.

Şekil 4.9.'da Hardox HiTuf çeliğinin borlanmış kenara yakın yerden saf matris yapısının SEM mikroyapı resmi gösterilmiştir. Hardox HiTuf çeliğinin matris yapısında ferrit, perlit ve temperlenmiş sementit (Fe_3C) taneleri görülebilmektedir. SEM mikroyapısında açık renkli bölgeler ferrit ve perlit, koyu renkli bölgeler ise temperlenmiş sementit (Fe_3C) fazlarını göstermektedir.



Şekil 4.9. Hardox HiTuf çeliğinin borlanmış kenara yakın matris bölgesinden SEM mikroyapısı

Hardox HiTuf çeliğinin 800, 900 ve 1000 ^{o}C sıcaklıkta 5 saat borlanmış bölgenin SEM mikroyapı resimleri Şekil 4.10.'da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi borlama sıcaklığının artışı ile birlikte borür tabakasının kalınlığında da bir artış olmaktadır (Şekil 4.10.).

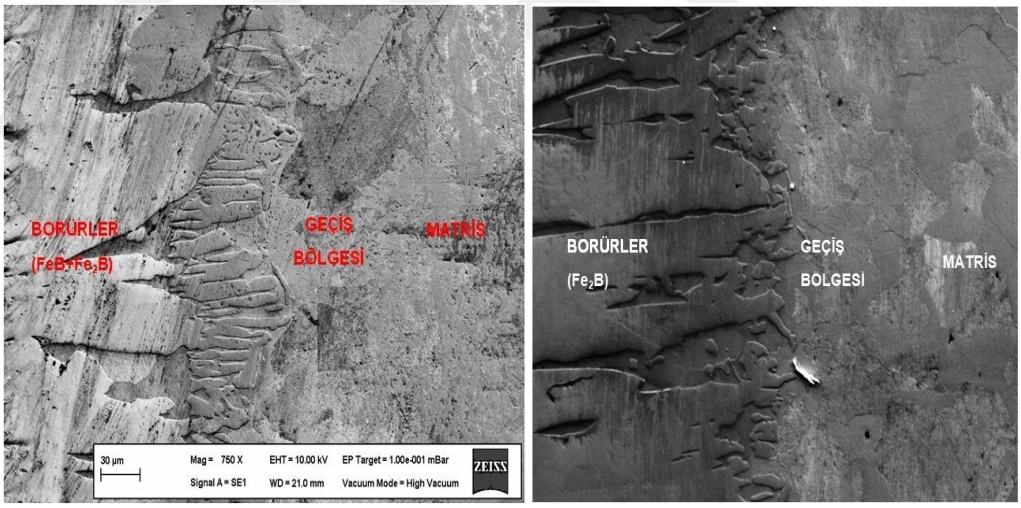


Şekil 4.10. Hardox HiTuf çeliğinin borlanmış bölgenin kenara yakın yerden SEM mikroyapıları; (a) 800 ^{o}C, (b) 900 ^{o}C ve (c) 1000 ^{o}C sıcaklıkta 5 saat süre ile borlanmış

Şekil 4.10.'da farklı sıcaklıklarda ve sabit sürede borlama işlemine tabii tutulmuş Hardox HiTuf çelik örneklerin yüzey kısmından 750X büyütmeli SEM görüntüleri incelendiğinde; borlama işlemi neticesinde ana malzeme içerisinde borür tabakasının difüzyonun parmaksı yapıya sahip olduğu görülmüştür. Borlama işleminin sıcaklığı arttırılmasıyla da ana malzeme yüzeyine nüfuz eden borlama difüzyon derinliğinin de arttığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, Hardox HiTuf çeliğin yüzeyinde oluşan borür tabakasının Fe_2B bileşiğine ait olduğu XRD ile belirlenmiştir.

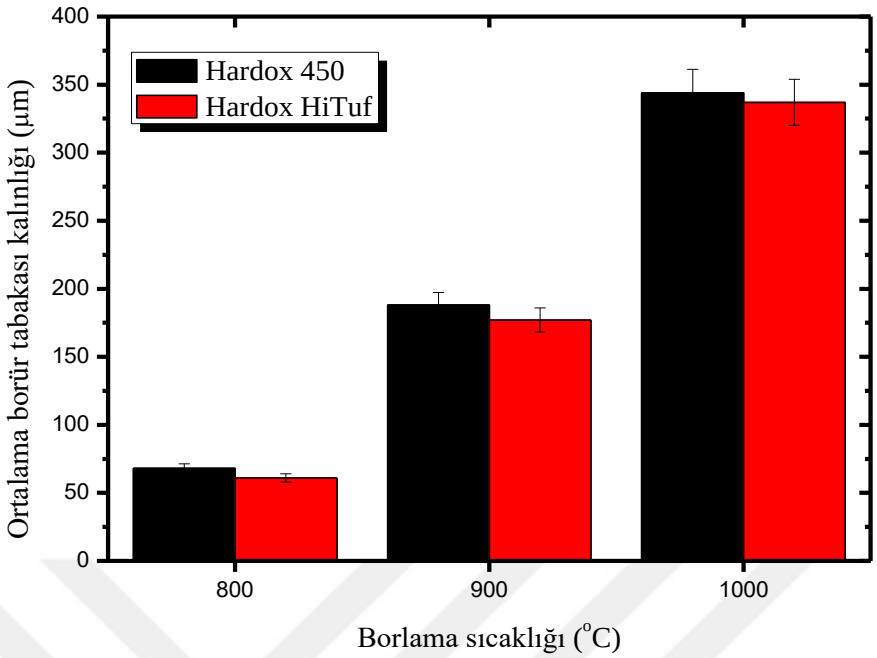
Şekil 4.11'de 1000 ºC sıcaklıkta ve 5 saat sürede borlanmış Hardox 450 ve Hardox HiTuf çeliklerinin kenardan alınan 750X büyütmeli SEM görüntüleri ve XRD sonuçları verilerinin karşılaştırılması açısından aşağıdaki gibi birlikte gösterilmiştir.

Hardox 450 Çeliği Hardox HiTuf Çeliği



Şekil 4.11. 1000 °C sıcaklıkta ve 5 saat sürede borlanmış Hardox 450 ve Hardox HiTuf çeliğinin kenardan 750X büyütmeli SEM görüntüsü

Hardox 450 ve Hardox HiTuf çeliklerin borlanmış kenara yakın her köşe noktasından (4 kenardan) alınan difüzyon derinliğini, geçiş bölgesini ve matris hallerinin gösteren SEM mikroyapı resimlerinden borür tabakası derinliklerinin ölçümleri yapılmış ve ortalama değerleri alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Şekil 4.12.'de ve Çizelge 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.12. Hardox 450 ve Hardox HiTuf çeliklerinin borlanma sıcaklığının ortalama borlama tabakası derinliğine etkisi

Şekil 4.12. ve Çizelge 4.1. incelendiğinde, numunelerin borlama ısıl işlem sıcaklığı arttıkça ortalama borlama tabakası derinliğinin de arttığı gözlemlenmektedir. Bu sonuçlara göre borlanma sıcaklığı ile borlama tabakası derinliği doğru orantılıdır. Sıcaklık artıkça difüzyon derinliği de artmaktadır. Kabadayı (2013), yaptığı çalışmada borür tabakası kalınlığı, işlem sıcaklığı ve süresine bağlı olarak artmakta olduğunu belirtmektedir. Topuz (2016), çalışmasında borlama sıcaklığı ve zaman parametrelerinin arttırılmasıyla borür tabakası kalınlığında da artmanın olduğunu belirtmektedir. Ünüvar (2013), çalışmasında sıcaklıkla bor tabaka kalınlığı oluşumu arasında doğru orantı tespit etmiştir. Yani sıcaklık arttıkça bor tabaka kalınlığı arttığı belirtilmektedir. Literatürdeki çalışmaların sonuçlarına bakıldığında, çalışmamızın sonuçlarını destekler nitelikte olduğu görülmüştür.

Sıcaklıkla borür tabakasının derinliğinin doğru orantılı olmasının sebebi araştırıldığında, borlama işleminin gerçekleşmesi için borun aktifleşme sıcaklığından yüksek sıcaklık değerinde işleme tabii tutulması gerektiği ve borlama işleminin sıcaklığının arttırılması da işleminin difüzyon hızını arttırmıştır. İşlemin difüzyon

hızının yükselmesiyle de yüzeyden içeriye doğru daha fazla borürün nufüz etmesini (kolonsal şekilde) sağlamıştır. Nüfuz eden borürün yüzeyden matrise doğru ilerlemesi de borür tabakası difüzyon kalınlığını arttırmıştır.

Çizelge 4.1. SEM görüntülerinden alınan örneklerin ortalama borlama tabaka derinliği

Malzeme	Sıcaklık (ºC)	Ortalama borlama tabakası derinliği (µm)
Hardox 450 çeliği	800	68
	900	188
	1000	344
Hardox HiTuf çeliği	800	61
	900	177
	1000	337

Borlama parametrelerinin aynı olduğu göz önüne alınarsa; her iki çeliğinin difüzyon derinliklerinin sonuçlarının karşılaştırılması yapıldığında Hardox 450 çeliğinin ortalama borlama tabakası derinliği, Hardox HiTuf çeliğinkinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun her iki çeliğin kimyasal yapısındaki bileşenlerindeki elementlerin oranlarının farklılığından dolayı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu oranların farklılıklarının borür tabakasının derinliğine ve yapısına etkileri tespiti açısından literatürde araştırmalar yapılmıştır.

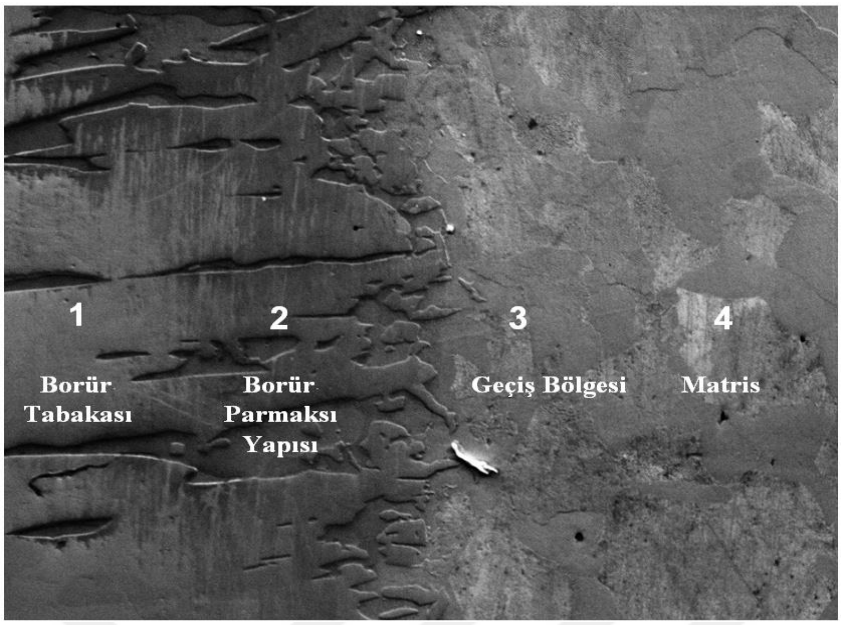
Bu araştırmalar sonucunda elde edilen verilere göre; karbon, yoğunlaşmasının artması ile borür tabakasının kalınlığının küçüldüğü ve karbonun FeB ve Fe_2B gibi fazlarda çözünmeyip Fe_3C, Cr_3C, Fe_6C_3 gibi karbürler şeklinde matris civarındaki bölgelerde biriktiğinden dolayı tabakanın daha sıkı ve sert olmasına sebep olmaktadır. Bu durum karbon yoğunlaşması arttığında FeB fazının stabilitesinin azaldığı, Fe_2B fazının ise arttığı anlamına gelmektedir. Silisyum (Si), karbonla benzer özellik göstererek, bor tabakasında çözünmezler. Bor atomları tarafından yüzeyden matrise doğru itilirler. Yüksek miktarda Si içeren çelikler borlamaya uygun olmamalarının sebebi ise tabakasının alt kısmında yumuşak bir ferrit zonu meydana getirirler ve bu oluşum pullanma dayanımını azaltmaktadır. Krom, çeliklerde borür tabakasının morfolojisini ve derinliğini etkilemektedir. Çeliklerin Cr yüzdeliklerine

bağlı olarak kolonsal veya düz karakterde borür tabakası oluşumuna etki etmektedir. Çeliklerin Cr yüzdeliklerinin artmasıyla da borür tabakasının derinliğinin azalması yönünde etki ettiği belirtilmektedir. Borlama işlemine tabii tutulmuş numunelerde, borür tabakası ve matris ara yüzeylerinde artan nikel miktarıyla daha da düzenli hale gelmektedirler. Yüksek orandaki nikel miktarı borür tabakasının kolonsal şeklini azaltmaktadır. Bu artış beraberinde yüksek poroziteyi ve kötü mekanik özellikleri getirmektedir. Mn'ın atom numarası Fe'den daha düşük olmasından dolayı borlanan numunenin içerisinden yüzey kısmına doğru yayınmaktadır. Oysa Ni ve C, Cr ve Mn tersi yönünde yayınmaktadır. Ayrıca kırılma tokluğuna Mn olumlu, Cr ise negatif yönde etkilediği düşünülmektedir. Borlama esnasında bileşenlerin hareket yönlerine bakılacak olunursa; C, Ni, Si, P bileşenleri yüzeyden matrise doğru, Cr ve Mn ise matristen yüzeye doğru hareket etmekte olduğu belirtilmektedir (Uluköy, 2005).

Taştan (2010), çalışmasında; çeliklerde C oranın artması B difüzyonunu zorlaştırdığı için, yüksek karbon (C) içeren çeliklerde daha düşük borür tabakaları elde edildiğini ve çelikteki alaşım elementlerinin de borür tabakası gelişimini zorlaştırdığını bildirmiştir.

4.3. Vickers Sertlik Sonuçları

Bu çalışmada, Hardox 450 ve Hardox HiTuf çeliklerin yüzeylerinin farklı sıcaklık değerlerinde (800, 900 ve 1000 ^{o}C), sabit 5 saat sürede ve Ekabor-1 tozuyla Kutu (Paket) borlama yöntemiyle borlanması ile elde edilen borla kaplı numunelerin yüzey sertliklerindeki değişimini tespit etmek için numunelerin yüzeyinden matrise (merkeze) doğru 5 saniye süreyle 100 gram yük uygulanarak, Şekil 4.13.'de gösterilen kenara yakın bölgelerde 4 farklı noktalardan Mikro-Vickers yöntemi ile sertlik ölçümleri yapılmıştır.



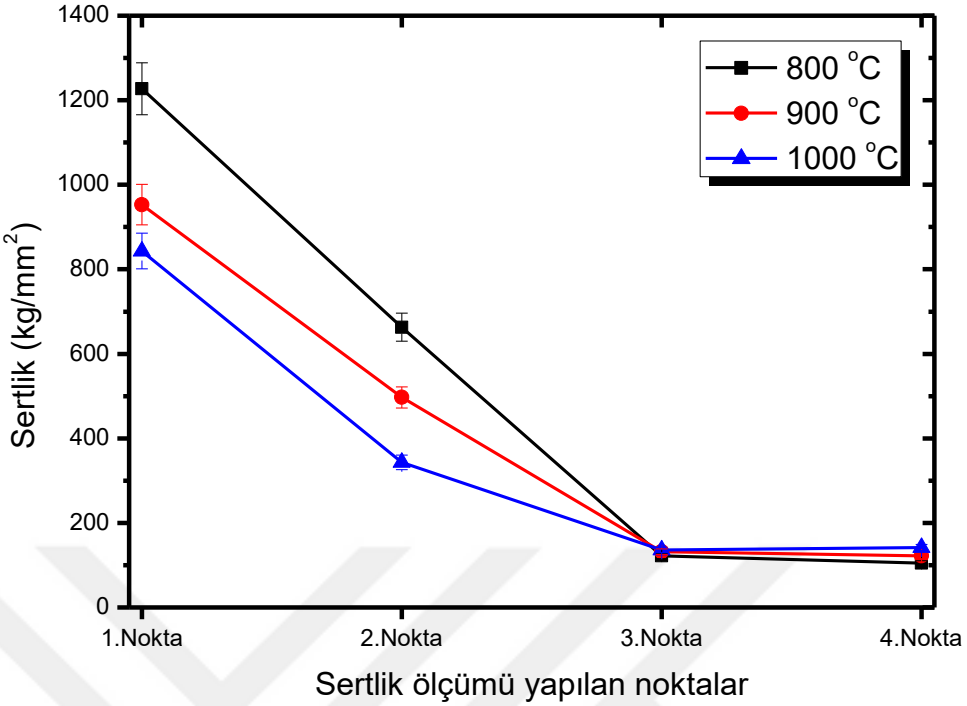
Şekil 4.13. Borlanmış örneklerin kenara yakın kısmından Mikro-Vickers sertlik ölçümlerinin alındığı noktalar

Borlanmış Hardox 450 çeliğinin üç farklı köşesinin 4 ayrı noktasından (1. ve 2. noktalar borür tabakası, 3. nokta geçiş gölgesi ve 4. nokta matris) ölçülen Mikro-Vickers sertlik değerlerinin ortalamaları Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Borlanmış Hardox 450 çeliğin üç kenarından ölçülen sertlik ölçüm sonuçlarının ortalama değerleri

Borlama sıcaklığı (°C)	**Noktalara göre sertlik değerleri (kg/mm^2)**			
	1.Nokta	**2.Nokta**	**3.Nokta**	**4.Nokta**
800	1227	663	122	105
900	953	497	132	122
1000	843	343	136	142

Şekil 4.14.'de, farklı sıcaklıklarda borlanmış Hardox 450 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru gidildikçe meydana gelen sertlik değişimi gösterilmektedir. Borlama sıcaklığı arttıkça borür tabakasının olduğu bölgede (1. ve 2. noktalarda) sertliklerde bir azalma olduğu görülebilmektedir. Geçiş ve matris bölgesinde (3. ve 4. noktalarda) ise borlama sıcaklığı arttıkça sertliklerde bariz bir değişim gözlenmemiştir. Borür tabakasının 1. ve 2. noktalardaki sertlikteki azalmanın nedeni ise yüksek sıcaklıklarda parmaksı yapıdaki borür tabakalarının büyümesi ve bu durumun sertlikte azalmaya neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.14. Hardox 450 çeliğin borlama sıcaklığına göre sertlik değerlerinin değişimi

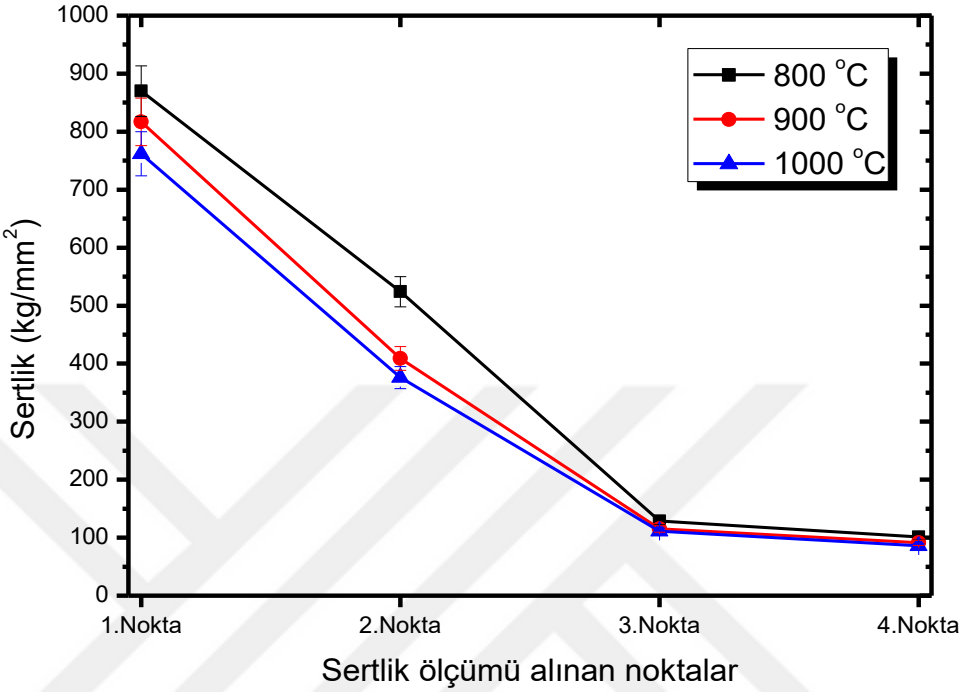
Çizelge 4.3.'de, farklı sıcaklıklarda borlanmış Hardox HiTuf çeliklerine ait üç farklı köşesinin 4 ayrı noktasından alınmış sertlik ölçüm sonuçlarının ortalama değerleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde borlama sıcaklığı artışı ile birlikte borür tabakasının sertliği azalmaktadır. Aynı zamanda borür tabakasından matrise doğru gidildikçe sertliklerde bir azalma olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. Borlanmış Hardox HiTuf çeliğin 3 kenarından ölçülen sertlik ölçüm sonuçlarının ortalama değerleri

Borlama sıcaklığı (°C)	**Noktalara göre sertlik değerleri (kg/mm²)**			
	1.Nokta	**2.Nokta**	**3.Nokta**	**4.Nokta**
800	870	524	129	101
900	817	409	115	91
1000	762	376	111	86

Şekil 4.15.'de farklı sıcaklıklarda borlanmış Hardox HiTuf çeliğinin yüzeyden içeriye doğru gidildikçe meydana gelen sertlik değişimi gösterilmekte olup, borlama sıcaklığının artması ile borür tabaksının sertliğinde bir miktar azalma meydana geldiği görülmektedir. Fakat sertlikteki bu azalma sadece borür tabakasının 1. ve 2.

noktalarında meydana gelmiş ve 3. ve 4. noktalarda ise bariz bir değişim gözlenmemiştir.



Şekil 4.15. Hardox HiTuf çeliğin borlama sıcaklığına göre sertlik değerlerinin değişimi

Bu çalışmada; Hardox 450 ve Hardox HiTuf çeliklerinin Mikro-Vickers sertlik değerlerinin ortalama sonuçlarının gösterildiği Çizelge 4.2. ve Çizelge 4.3. ile Şekil 4.14. ve Şekil 4.15. incelendiğinde; her iki çelikte de borlama sıcaklığının arttırılması ile sertlik değerinin düştüğü görülmektedir. Ayrıca, borür tabakasının parmaksı yapısından matris yapıya doğru gidildikçe de sertlik değerlerinin düştüğü görülmektedir.

Uzun (2002), yaptığı çalışmada borlama işlemi sonucunda oluşan borür tabakalarının sertlik değerlerinin yüzeyden parmaksı uçlara doğru gidildikçe azaldığı, bu sebeple de borür tabakasının en dış yüzeyinin FeB fazından, parmaksı bölgelerinde Fe_2B fazından oluştuğu ve borür tabakasının sertlik değerinin matrisin sertlik değerinden oldukça fazla olduğu belirtilmiştir. Yapar (2003), tarafından yapılan çalışmada; borlanan tüm numunelerde sertlik görüntüleri çıkarmış ve sonucunda borlanmış malzemenin yüzeylerinin ana malzeme sertliğinden 7-9 kat

civarında yüksek sertlik değerlerinde bulunduğunu tespit etmiştir. Tabur (2008), Hardox 400 ile AISI 8620 çeliklerini farklı sürelerde ve sıcaklıklarda katı borlama işlemi yapmış ve bu çeliklerin mikro sertlikleri incelemiştir. Sertlik değerlerinde borür fazlarından oluşan kaplama tabakasında en yüksek değerde olduğu, geçiş zonundan itibaren sertliğin düştüğü tespit edilmiştir. Her iki çelik de mikro sertklik açısından karşılaştırıldığında borlanan Hardox 400 çeliğinin borür bölgesinin, AISI 8620 çeliğinin borür bölgesinden fazla sertliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Kapcińska-Popowska ve ark. (2015), Hardox 450 çeliğinin mikro sertliği yaklaşık 500 HV0.1 iken, difüzyondan sonra borlama yüzeyinde yaklaşık 1800-1500 HV0.1 olarak ölçülmüştür. Yüzeyden uzaklaştıkça borlanmış tabakanın mikro sertliği alt tabakaya doğru kademeli olarak azaldığı görülmüştür. Literatürdeki bu çalışmaların sonuçları ile çalışmamızın sonuçları karşılaştırıldığında, birbirlerine benzer sonuçlara varıldığı görülmüştür.

Her iki (Hardox 450 ve Hardox HiTuf) çeliğinde artan borlama sıcaklıkları ile birlikte borür difüzyon kalınlığının arttığı fakat sertlik değerlerinin de düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, borlama sıcaklığı ve numuneler birbirleriyle karşılaştırıldığında da en yüksek sertlik değerinin Hardox 450 çeliğinde 800 ^{o}C sıcaklıkta 5 saat borlama işlemi ile elde edildiği tespit edilmiştir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada; Hardox 450 ve Hardox HiTuf çeliklerinin katı borlama yöntemiyle farklı sıcaklıklarda borlama ısıl işlemi sonucunda numunelerde oluşan fazlar XRD analizi ile belirlenmiştir. Oluşan borür tabakasının difüzyon derinliği ve borür tabakaları ile numuınenin tane yapılarındaki değişim optik mikroskop ve SEM analizi ile incelenmiştir. Borlanmış tabakanın yüzey sertlikleri ise Mikro-Vickers sertlik yöntemi ile ölçülerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

XRD analizi inceleme sonuçlarına göre; Hardox 450 çeliklerinin borür tabakası bölgelerinde FeB ve Fe_2B fazları, Hardox HiTuf çeliklerinin borür tabakası bölgesinde sadece Fe_2B fazının oluştuğu görülmüştür.

Optik mikroskop ve SEM analizi ile mikroyapı incelemeleri sonucunda; borlanma sıcaklığı ile borlama tabakası derinliği doğru orantılı olup, sıcaklık artınca difüzyon derinliği de artmakta olduğu gözlenmiştir. Her iki çelikte borlama parametrelerinin aynı olmasına rağmen her iki numunede difüzyon derinlikleri karşılaştırıldığında, Hardox 450 çeliğinin ortalama borlama tabakası derinliğinin Hardox HiTuf çeliğinkinden daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Bu farklılığa çeliklerin birleşenlerinin kimyasal kompozisyonlarındaki (%) yüzdelik ağırlıklarının farklı oranlardan oluşması ve bu birleşenlerin borür tabakasının derinliğine önemli ölçüde etki etmesi sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Çizelge 3.1.'de Hardox çeliklerinin kimyasal kompozisyonlarına bakıldığında borür tabakasının derinliğini azaltıcı yönde etki eden birleşenlerin (Cr, Ni, P gibi) yüzdeliklerinin farklı oranlarda olduğu görülmüştür. Kimyasal oranlardaki bu farklılıkta, Hardox çeliklerinin aynı borlama parametrelerin de olmasına rağmen farklı borür tabakası derinliğine sahip olmalarına neden olmuştur.

Mikro-Vickers sertlik testi sonucunda; her iki (Hardox 450 ve Hardox HiTuf) çeliğinde borür tabakasının parmaksı yapısından matris yapıya doğru gidildikçe sertlik değerlerinin düştüğü bulunmuştur. Borür tabakasının ana malzemeye kazandırdığı sertlik değeri matris sertlik değerinden yaklaşık 6-10 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Her iki çeliğinde borlama sıcaklığının artmasıyla borür difüzyon kalınlığının arttığı, fakat sertlik değerlerinin de düştüğü tespit edilmiştir. Borlama sıcaklığı ve malzeme türleri karşılaştırıldığında da en yüksek sertlik değeri Hardox 450 çeliğinin 800 ^{o}C sıcaklıkta 5 saat süreyle borlama işleminde elde edildiği tespit edilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda; borlama işlemi neticesinde yüzeyi borla kaplanmış olan çeliklerin sertlik değerinin matris sertliğine göre 6-10 kat arttığı görülmüştür. Hardox çeliklerinin kullanım alanlarının yüksek sertlik değerine sahip olma gereksinimi göz önüne alınacak olursa, Hardox çeliklerinden yapılmış iş makine ve makine parçalarına borla kaplamanın malzemenin iş görebilirliğini ve kullanım ömrünü arttırabileceği sonucunu çıkarmaktadır.

5.2. Öneriler

Literatüre bakılacak olunursa tez çalışmasında kullanılan Hardox 450 ile Hardox HiTuf çeliklerinin kullanım alanlarının yüksek sertlik ve tokluğa sahip olmayı gerektirdiği görülmektedir. Bu nedenle Hardox çeliklerinin kullanıldığı makine ve makine parçalarının iş görebilirliğinin arttırılması ve kullanım ömürlerinin uzatılması açısından yüzey sertliklerinin daha yüksek değerlere çıkarılması amaçlanmıştır.

Hardox çeliklerinin borlanarak yüzey sertliğinin arttırılması yönünde gerçekleştirilen çalışmamızda: Hardox 450 çeliğinde oluşan istenilmeyen çift faz durumunun (FeB+Fe_2B) giderilmesi ve çeliklerin yüzey sertliğinde daha yüksek oranda sertlik değerini ve daha az gevreklik elde edilebilmesi noktasında oluşan sonuçlar ve gerekçelerine bakılarak borlama parametrelerinde iyileştirme yapılabilir.

Sonraki çalışmalarda yapılabilecekler:

1) Örneklere farklı borlama parametrelerinde (farklı borlama sürelerinde) borlama işlemi yapılarak sürenin borür tabakasına etkisi incelenebilir.
2) Örneklerin borlanmış yüzeylerinden EDS (X-ışını Enerji Dağılım Spektrometresi) ile borür tabakasının kimyasal analizi yapılabilir.
3) Örneklerde oluşan borür tabakalarının büyüme termodinamiği ve kinetiği incelenebilir.
4) Borlanmış örneklerin farklı parametrelerde aşınma davranışları araştırılabilir.
5) Borlanmış çeliklerde oluşan borür tabakasının radyasyon kalkanlamaya etkisi araştırılabilir.
6) Borlanmış Hardox çeliklerin manyetik özellikleri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

ALPARSLAN, E., 2011. Tekstil Endüstrisinde Borlama Uygulamaları. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 113s.

ANONİM, 2003. (TMMOB) Metalurji Mühendisleri Odası, Bor Raporu.

ARAT, M., 2011. Paslanmaz Çelik 310 ve 316 Metalinin Plazma Borlama ve Nitrürleme Metodu İle Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 77s.

AYSAL, Z., 2011. Farklı Bor Kaynağı Kullanılarak Soğuk Şekillendirme Sacının Borlama Özelliğine Etkisinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 56s.

AYTER, T., 2005. Borlama İşleminin Çeliklerin Yüzey Kalitesi ve Aşınma Davranışına Etkisinin İncelenmesi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa, 99s.

AZAKLI, Y., 2012. Alaşım Elementi Olarak Tungstenin Saf Demirin Borlanma Davranışına Etkisi. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze, 87s.

BARIŞ, M., 2007. Farklı Borlama Sürelerinin Transmisyon Çeliğinde Abrasiv Aşınma Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 66s.

BAŞMAN, G., 2010. AISI 316L Tipi Paslanmaz Çeliğin Termokimyasal Difüzyon Yöntemiyle Borlanmasında Borlama Banyosu Birleşenlerinin Borür Tabakası Özelliklerine Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 239s.

BEKTEŞ, M., 2010. Fe-Mn İkili Alaşımlarının Mekanik Özellikleri Üzerine Borlamanın Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Isparta, 79s.

BİRDEN, A., 2018. Savunma Sanayiinde Kullanılabilen AISI 304L Paslanmaz Çeliğinin Katı Borlama İle Üretimi ve Karakterizasyonu. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale, 93s.

BOLAT, Ç., 2016. Orta Karbonlu DIN CK45 Çeliğinin Elektrokimyasal Yöntemle Borlanması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme ve İmalat Yüksek Lisans Programı, İstanbul, 59s.

CENGİZ, S., GENÇER, Y., TARAKÇI, M., ve AZAKLI, Y., 2015. Fe-Cu İkili Alaşımlarının Kutu Borlama Davranışına Bakır Miktarının Etkisi. Gazi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(3):339-349.

ÇALIK, A., DELİKANLI, K., ve UZUN, A., 2004. Ç 1035 Çeliğinin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi. II. Uluslararası Bor Sempozyumu, 23-25 Eylül, Eskişehir, s.237-242.

ÇARKÇI, M., 2012. Saf Nikelin Borlanma Özelliklerinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 66s.

DEMİREL, Ç., 2013. AISI 8640 ve GS 60 Çelik Malzemelerin Abrasif Aşınma ve Korozyon Davranışına Borlama İşleminin Etkisi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük, 117s.

DİLEKTAŞLI, E., 2014. Bazı Alaşımlı Çeliklerin Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışına Borlama İşlemenin Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 90s.

DOĞAN, Ş., 2016. Ni-Ti Alaşımlarının Borlama Özeliklerinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 47s.

ER, Ü., ve PAR, B., 2004. Bor Yayınımıyla Yüzeyi Sertleştirilmiş AISI 1030 ve AISI 1050 Çeliklerinin Abrazif Aşınma Dayanımlarının İncelenmesi. Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, XVII(1).

ERSÖZ, A., 2008. Elekrokimyasal Borlama İle Çeliklerin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 91s.

GENÇER, Y., TARAKÇI, M., GÜNDÜZ, K., Ö., CENGİZ S., ve ÇALIK, A., 2011. Fe-8V Alaşımı ve Saf Demirin Kutu Borlama Yöntemiyle Kaplanması. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May, Elazığ, s.559-564.

GÜNAY, B., 2017. Bor Karbürün Karakterizasyonu ve Nano B_4C Partükülü Üretimi. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir, 75s.

KABADAYI, E., 2013. Yüksek Krom ve Nikelli Dökme Çeliklerin Mekanik ve Korozyon Özelliklerine Yaşlandırma ve Borlama Isıl İşleminin Etkisi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Lisans Tezi, Karabük, 135s.

KARA, G., 2017. Farklı Kristal Yapılardaki Titanyum ve Alaşımlarının Borlanması ve Borlamanın Bu Malzemelerin Mikroyapı, Mekanik ve Biyouyumluluk Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Karadeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon, 183s.

KUTUCU, Y., K., 2013. Yüksek Alaşımlı Çeliklerin Borlanması Sonucunda Oluşan Isıl Artık Gerilmelerin İncelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 75s.

NAİR, F., 1996. Koruyucu Gaz Atmosferinde Macun Borlama Tekniği İle Çelik Yüzeylerin Sertleştirilmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 65s.

ÖNER, K.S., 2010. Volfram Metalinin Borlanması ve Borlama Kinetiğinin İncelenmesi. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze, 75s.

ÖZAYDIN, D., 2015. Toz Metalurjisi ile Üretilen Demir Esaslı Malzemelerde Borlamanın Mekanik Özelliklere Etkisi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa, 108s.

ÖZBAY, S., 2009. Atık Borlama Tozlarının Sinterlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyon, 57s.

ÖZER, M., 2011. Üç Farklı Çeliğe Katı Borlama İşlemi Yapılmasının İçyapı ve Sertlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir, 101s.

ÖZTÜRK, E., 2011. Çeşitli Bor Minerallerinden Hidrofobik ve Nanoyapılı Çinko Borat Üretim Yöntemlerinin Geliştirilmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 174s.

KAPCIŃSKA-POPOWSKA, D., PERTEK-OWSIANNA, A., BARTKOWSKA, A., 2015. Diffusion and Laser Boriding of Hardox 450 Steel. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 60(2):40-42.

SAĞLAM, G., 2016. Çelik Dişli Sondaj Matkaplarının Borlama Yöntemi İle Takım Ömrünün Uzatılması. Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bartın, 72s.

SAMUK, T., B., 2015. Yapı Malzemesi Üretiminde Kullanılan Bor Türevlerine Yönelik Çalışmaların Analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 79s.

SAYGIN M., 2006. AISI 1020 Çeliklerinde Borlamanın Yorulma Dayanımına Etkisi. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 46s.

ŞİMŞEK, M., 2005. İçten Yanmalı Motorlarda Borlama İle Mukavemet Özelliklerinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 104s.

TABUR, M., 2008. Bor Karbür Kaplanmış AISI 8620 ve Hardox 400 Çeliklerinin Abrasiv Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 192s.

TAŞTAN, F., 2010. Farklı Bileşimlere Sahip Çeliklerin Borlama İşlemi İle Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa, 71s.

TOPUZ, P., 2016. DIN 1.2842 Çeliğinin Borlanması ile Oluşan Borür Tabakası Üzerine Borlama Sıcaklık ve Süresinin Etkileri. Bor Dergisi, 1(1):15-19.

TOPAL, A., 2017. Plazma Transfer Ark Kaynak Yöntemi Kullanılarak AISI 1020 Çelik Yüzeylerinin Hardox 450 + FeW İle Kaplanması ve Aşınma Dirençlerinin Tespit Edilmesi. Adıyaman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman, 121s.

TURKU, N., 2016. Ni-Ti Alaşımlarının Borlama Özelikleri Üzerine Cu Alaşım Elementinin Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 48s.

ULUKÖY, A., 2005. 21NiCrMo2 (AISI 8620) Çeliğinden Yapılmış Dişli Çarklara Karbürleme İle Beraber Borlama İşleminin Uygulanması. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli, 114s.

[URL 1]: (Boren) Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü. http://www.boren.gov.tr/Sayfa/bor-elementi/23. Erişim Tarihi: 23.01.2019.

[URL 2]: (Boren) Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü. http://www.boren.gov.tr/Sayfa/rezervler/26. Erişim Tarihi: 24.01.2019.

[URL 3]: (Boren) Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü. http://www.boren.gov.tr/Sayfa/bor-uretimi/27. Erişim Tarihi: 25.01.2019.

[URL 4]: (Boren) Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü. http://www.boren.gov.tr/Sayfa/tarihce/21. Erişim Tarihi: 23.01.2019.

[URL 5]: https://www.ssab.com.tr/products/brands/hardox/products/hardox-400. Erişim Tarihi: 26.01.2019.

[URL 6]: http://www.muhendisalemi.com/wp-content/uploads/2017/07/hardox-parça Erişim Tarihi: 25.01.2019.

[URL 7]: https://www.ssab.com.tr/products/brands/hardox/products/hardox-450. Erişim Tarihi: 26.01.2019.

[URL 8]: https://www.ssab.com.tr/products/brands/hardox/products/hardox-500. Erişim Tarihi: 26.01.2019.
[URL 9]: https://www.ssab.com.tr/products/brands/hardox/products/hardox-550. Erişim Tarihi: 26.01.2019.
[URL 10]: https://www.ssab.com.tr/products/brands/hardox/products/hardox-600. Erişim Tarihi: 26.01.2019.
[URL 11]: https://www.ssab.com.tr/products/brands/hardox/products/hardox-hituf. Erişim Tarihi: 26.01.2019.
UZUN, H.A., 2002. Borlama İle Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 75s.
ÜÇKARDEŞLER, A., 2013. Çelik Dökümlerde Borlama Isıl İşleminin Abrasif Aşınma Direnci Üzerine Etkisi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 107s.
ÜNÜVAR, F., 2013. Saf Kobaltın Borlama Özelliğinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 78s.
YAMANEL, B., 2018. Farklı Sıcaklıklarda Menevişlenmiş ve Borlama İşlemine Tabi Tutulmuş SAE 5140 Çeliğinin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale, 99s.
YAPAR, U., 2003. Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama ile Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 145s.
YILMAZ, R., 2014. Karbür Kesici Takımların Süper Alaşım Talaşlı İmalat Performanslarına Borlama İşleminin Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 83s.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet TOPRAK
Uyruğu : T.C. (Türkiye Cumhuriyeti)
Doğum Yeri ve Tarihi : Şanlıurfa – 13.07.1988
Telefon : (0 534) 708 24 35
e-mail : mehmettoprak88@hotmail.com

EĞİTİM

Lise : Şanlıurfa Lisesi, Haliliye/Şanlıurfa, 2003-2006
Üniversite : Harran Üniversitesi, Haliliye/Şanlıurfa, 2007-2011

İŞ DENEYİMLERİ

2011, Osmanlı Proje Belgelendirme Patent ve Laboratuar Hizmetleri San. ve Tic. Ltd. Şti. - Mekanik Proje Çizimi ve Tasarımı
2012, Erze Ambalaj A.Ş. – Üretim Sorumlusu
2014, Haliliye Belediyesi – Kontrol Mühendisi

UZMANLIK ALANI

Mekanik Tesisat Projelerinin Çizimi ve Tasarımı

YABANCI DİLLER

İngilizce