

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BOR İÇERİKLİ ELEKTROTLARLA DÜŞÜK KARBONLU
ÇELİK YÜZEYLERİNİN KAPLANMASI VE AŞINMA
DİRENCİNİN İNCELENMESİ**

Bahadır KÖSELİ

**Tez Yöneticisi
Doç.Dr.Mehmet EROĞLU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

METALURJİ VE MELZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ,2008

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BOR İÇERİKLİ ELEKTROTLARLA DÜŞÜK KARBONLU
ÇELİK YÜZEYLERİNİN KAPLANMASI VE AŞINMA
DİRENCİNİN İNCELENMESİ**

Bahadır KÖSELİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez 12 / 06 / 2008 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği/oy çokluğu ile başarılı/başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Doç.Dr. Mehmet EROĞLU

Üye: Prof.Dr. Mustafa AKSOY

Üye: Doç.Dr. Ahmet HASÇALIK

Bu tezin kabulü,Fen bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezim boyunca değerli görüşlerini aldığım,yakın ilgisini ve destegini hiçbir şekilde benden esirgemeyen değerli hocam Doç.Dr.Mehmet EROĞLU'na benden yardımlarını esirgemeyen bölüm başkanı değerli hocam Prof.Dr.Mustafa AKSOY'a, çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan bölümümüz çalışanlarından Yetkin KAYA 'ya ve emeği geçen herkese teşekkür ederim.

Ayrıca bu tez çalışması TÜBİTAK'ın (105M355) maddi desteği ile gerçekleştirilmiştir.Bu bakımdan TÜBİTAK'ada teşekkürlerimizi bir borç biliriz.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	
İÇİNDEKİLER.....	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	IV
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
SİMGELER.....	IX
ÖZET.....	X
ABSTRACT.....	XI
1.GİRİŞ.....	1
1.1.BORLAMA.....	1
1.2. Borlama İşlemi.....	5
1.2.1.Borlama İşleminin Avantajları.....	8
1.2.2.Borlama İşlemininDezavantajları.....	9
1.2.3.Çok Bileşenli Borlama.....	10
1.3. Borlama Yöntemleri.....	11
1.4. Borlanabilen Malzemeler ve Borürlerin Genel Özellikleri.....	12
1.4.1. Borürlerin Özellikleri.....	15
1.4.2.Fe-B İkili Denge Diyagramı.....	16
1.4.3. Borür Tabakasının Yapısı, Bileşimi ve Kalınlığı.....	18
1.4.4.Demir Borürlerin Büyüme Mekanizmaları ve Özellikleri.....	22
1.4.5.Borür Tabakası ve Arayüzey Morfolojisine Alaşım Elementlerinin Etkisi.....	25
1.5.Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulamaları.....	29
1.6. Çeliklerde Bor Kaplamaların Aşınma Özellikleri.....	33
1.6.1 Borlanmış Çeliklerin Kısa Süreli Tavlanması.....	33
1.6.2. Borlanmış Çeliklerin Aşınma Özellikleri.....	36

2.YÜZEY KAPLAMA	43
2.1.Kaplama Konsepti	43
2.2. Kaplamanın Yapısı	43
2.3. Kaplama Çeşitleri	43
2.3.1. Malzemeye göre çeşitlendirme	43
2.3.2. Uygulama alanına göre çeşitlendirme:	44
2.4.Kaplamanın Potansiyel Özellikleri	44
2.5. Metalik Kaplamanın Yapısı	45
2.6. Kalıntı Gerilimi	45
2.7. Eritme Tekniği İle Yüzey Kaplama Uygulamaları	48
2.7.1. Alaşımlama:	48
2.7.2. Cladding türü kaplama	48
2.8. Kaplamada Termal Teknikler	48
3. AŞINMA	49
3.1. Bir Aşınma Sisteminde Temel Unsurlar	49
3.2. Aşınma Rejimleri	53
3.3. Aşınmayı Etkileyen Faktörler	53
3.4. Aşınma Mekanizmaları	54
3.4.1. Adhezif Aşınma(Yapışma Aşınması)	54
3.4.2. Yorulma Aşınması	55
3.4.3. Eroziyon Aşınma	55
3.4.4. Öğütme Aşınma	56
3.4.5. Oymalı Aşınma	56

3.4.6. Korozif Aşınma:	56
3.4.7. Abrazif Aşınma	57
3.5. Abrasif aşınmanın engellenmesinde veya abrasif aşınmanın hızının en aza indirilmesinde kullanılan yöntemler	60
3.5.1. Yüzey Sertliğini Artırmak	60
3.5.2. Abrasiv parçacıkları uzaklaştırmak	60
3.5.3. Aşınmış Parçaları Değiştirmek	60
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	61
4.1. Elektrot İmali	61
4.2. Kaplama Amaçlı Kaynakların Yapılışı	61
4.3. Mikroyapı İncelemesi ve Kimyasal İçerik Tayini	62
4.4. Abrasiv Aşınma Testi	63
5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	65
5.1. Kaplama Bor İçerikleri, Penetrasyon Derinliği ve Kaplama Yüksekliği	65
5.2. Mikroyapı İnceleme Sonuçları	68
5.2.1. Elektrot I ile yapılan kaplama için mikroyapı inceleme sonuçları	68
5.3. Elektrot II İle Yapılan Kaplama İçin Mikroyapı İnceleme Sonuçları	77
5.4. Sertlik Ölçüm Sonuçları	86
5.5. Aşınma Testi Sonuçları	88
5.6. Amprik Formüller	90
6. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER	91
7. KAYNAKLAR	92
8. ÖZGEÇMİŞ	95

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Çeliklere uygulanan yüzey sertleştirme işlemlerinde; (a) işlem sıcaklıklarının ve (b) sertleşme derinliklerinin mukayesesi Çeşitli yüzey işlemlerinde;(c) işlem sıcaklıklarının ve (d) kaplama kalınlığı/modifikasyon derinliğinin kıyaslaması.....	6
Şekil 1.2. Çeliklerin yüzey modifikasyonlarının sağlanmasında kullanılan değişik metotların sertlik derinliği ve sıcaklık açısından kıyaslanması.....	7
Şekil 1.3. Çeşitli yüzey işlemleri yapılmış Ck 45 çeliğinde aşınma hızlarının sıcaklıkla değişimi.....	11
Şekil 1.4. Kutu borlama yönteminde iş parçasının potaya yerleştirilmesi.....	11
Şekil 1.5. Fe-B ikili denge diyagramı.....	17
Şekil 1.6. Borür tabakasının şematik olarak gösterilişi.....	18
Şekil 1.7 Borür tabakalarının türleri, a) FeB; b)Fe ₂ B; c) Geçiş zonu.....	19
Şekil 1.8. Borür tabakası ve geçiş zonu kalınlığının borlama süresi ile değişimi.....	21
Şekil 1.9. Bazı çeliklerde, borür tabakası kalınlığının borlama süresi ile değişimi.....	21
Şekil 1.10. Bazı çeliklerin ve saf metallerin horlanma sonrasındaki mikro yapılan: (a) AISI 4140, (b) AISI H13 (c)SafKrom,(d) DDK. 80,(e)SafNikel,(f)AISI316L(g) AISI 1015 (h)AISI 1040 (.) AISI M2 (k) AISI W4.....	23
Şekil 1.10. (Devamı).....	24
Şekil 1.11. Gaz ortamda horlanan bir malzemenin yüzeyinde oluşan borür tabakası ve matris içerisindeki B ve Fe atomlarının dağılımı.....	24
Şekil 1.12. Karbon miktarına bağlı olarak borür tabakasındaki FeB ve Fe ₂ B fazlarının sertliğinin değişimi.....	27
Şekil 1.13. Bazı çelikler ve Fe-Cr alaşımlarında, Cr miktarına bağlı olarak; (a) FeB ve (h) Fe ₃ B fazlarındaki sertliğin değişimi (Çelikler: X8Cr17 ve X10CrNi18).....	28

Şekil.1.14. Nikel miktarına bağlı olarak, borür tabakasının sertliğindeki değişimi.....	28
Şekil 1.15. Çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi.....	28
Şekil 1.16. Borlanmış çeliklerde borür tabakası boyunca elementlerin şematik olarak dağılımı.....	29
Şekil 1.17. Borik asidin kristal yapısı.....	35
Şekil 1.18. Bor kaplanmış çelik yüzeyinde oluşturulan bor oksit ve borik asit tabakasının şematik gösterilişi.....	36
Şekil 1.19. Çelik matris, bor kaplanmış çelik ve bor kaplama+kısa süreli ısıtma işlem görmüş çelik malzemelerin, (a) 440C paslanmaz çelik bilyeye karşı aşınma deneyleri sonucunda elde edilen sürtünme katsayıları ve (b) 440C paslanmaz çelik ve safir bilyeye karşı aşınma hızları.....	37
Şekil 1.20. Çeşitli yayınma işlemleri uygulanmış ENİA çeliğinin aşınma davranışları.....	39
Şekil 1.21. 42CrMo4 çeliğinde dinamik sertliğin sıcaklıkla değişimi.....	40
Şekil 1.22. Kuru kayma halinde yapılan deneylerde meydana gelen adhezif aşınma.....	40
Şekil 1.23. Farklı yüzey işlemlerine sahip 42CrMo4 çeliğinin taşlama diski testi sonucundaki abrazif aşınma miktarları.....	40
Şekil 1.24. Erozyon testi sonucunda çeşitli yüzey tabakalarında meydana gelen ağırlık kayıpları [97]:1)C+SİC; 2)Fe ₂ B; 3)Cr ₇ C ₃ ; 4)WC-Co; 5)(TiCr)B ₂ ; 6)CrB ₂ 7)B ₄ C; 8) CrB; 9) Cr+C;10)Cr+B ₄ C.....	41
Şekil 1.25. a) X10CrNiTi189 çeliğinin 56°C'de, HCl ve H ₂ SO ₄ 'deki ağırlık kaybı ve b) Ck 45 çeliğinin, 56 °C'de, HCl'deki ağırlık kaybı.....	42
Şekil 3.1. Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi.....	50
Şekil 3.2. Sürtünen iki çisimde aşınmanın temel unsurları.....	52
Şekil 3.3 İki elemanlı abradif aşınma.....	57

Şekil 3.4. Üç elemanlı abrasif aşınma.....	57
Şekil 3.5. Kütlesel sertliğin abrasif aşınma direncine etkisi	59
Şekil 4.1. Abrasiv aşınma aparatının şematik görünüşü.....	63
Şekil 4.2. MKE yapımı torna tezgahına monte edilmiş aşınma aparatı.....	64
Şekil 5.1. Proje dahilinde üretilen 5.20 mm (Elektrot I) ve 6.65 mm (Elektrot II) örtü çapına sahip elektrotlar.....	65
Şekil 5.2. Fe-B denge diyagramı üzerinde Elektrot I ve Elektrot II'nin kaplamada verdikleri bor içerikleri.....	66
Şekil 5.3. Penetrasyon derinliği (a) ve kaplama yüksekliği (b)'nin Şematik gösterimi.....	66
Şekil 5.4. 0.54 kJ/mm ısı girişi için elektrot I ile yapılan kaplamada a)(optik mikroskop) kaplama bölgesi, b) (optik mikroskop) geçiş bölgesi c) (optik mikroskop), d)(optik mikroskop) ve e) (SEM) kaplama mikroyapısı (A: anametal, G: geçiş bölgesi, K: kaplama, P: perlit, Ö: ötektik, F: ferrit).....	69
Şekil 5.5. 0.74 kJ/mm ısı girişi için elektrot I ile yapılan kaplamada a)(optik mikroskop) kaplama bölgesi, b) (optik mikroskop) ve c) (SEM) kaplama mikroyapısı.....	70
Şekil 5.6. 0.92 kJ/mm ısı girişi için elektrot I ile yapılan kaplamada a) (optik mikroskop) kaplama bölgesi, b) (SEM) geçiş ve c) (optik mikroskop) kaplama mikroyapısı.....	71
Şekil 5.7. 1.12 kJ/mm ısı girişi için elektrot I ile yapılan kaplamada kaplama mikroyapısı optik mikroskop mikroyapı resmi.....	72
Şekil 5.8. 1.23 kJ/mm ısı girişi için elektrot I ile yapılan kaplamada kaplama mikroyapısı optik mikroskop mikroyapı resmi.....	72
Şekil 5.9. 1.34 kJ/mm ısı girişi için elektrot I ile yapılan kaplamada kaplama mikroyapısı optik mikroskop mikroyapı resmi.....	72

Şekil 5.10. a) SAE 1020 kaplanan çelik, b) 0.54 kJ/mm, c)0.92 kJ/mm ve 1.32 kJ/mm ısı girişleri için kaplamalardan alınan x-ray analiz sonuçları.....	75
Şekil 5.11. 0.54 kJ/mm ısı girişi için elektrot II ile yapılan kaplamada a)(optik mikroskop) kaplama bölgesi, b) (optik mikroskop), c) (optik mikroskop), d) (SEM) kaplama mikroyapısı (A: anametal, G: geçiş bölgesi, K: kaplama, M: martenzit).....	78
Şekil 5.12. 0.74 kJ/mm ısı girişi için elektrot II ile yapılan kaplamada, optik mikroskop kaplama mikroyapı görüntüsü.....	78
Şekil 5.13. 0.92 kJ/mm ısı girişi için elektrot II ile yapılan kaplamada a) (optik mikroskop) kaplama bölgesi ve b)(SEM) kaplamadan alınmış mikroyapı görüntüleri.....	79
Şekil 5.14. 1.12 kJ/mm ısı girişi için elektrot II ile yapılan kaplamada optik mikroskop kaplam mikroyapı görüntüsü (M: martenzit).....	79
Şekil 5.15. 1.23 kJ/mm ısı girişi için elektrot II ile yapılan kaplamada optik mikroskop kaplam mikroyapı görüntüsü.....	80
Şekil 5.16. 1.34 kJ/mm ısı girişi için elektrot II ile yapılan kaplamada optik mikroskop kaplam mikroyapı görüntüsü.....	80
Şekil 5.17. a) 0.54 kJ/mm, b)0.92 kJ/mm ve c)1.32 kJ/mm ısı girişleri için elektrot II ile yapılan kaplamalardan alınan x-ray analiz sonuçları.....	82
Şekil 5.18. 1.12 kJ/mm enerji girişi kullanılarak üretilen numunelerden elde edilmiş yüzeyleri için Kütle kaybı-yük ilişkisi.....	88
Şekil 5.19. Orjinal (yüzeyi işlem görmemiş SAE 1020)numunenin aşınma yüzeyinden alınan SEM Fotoğrafı (X500).....	89
Şekil 5.20. I nolu elektrot ile kaplanmış olan numunenin aşınan yüzeyinden alınan SEM Fotoğrafı (X500).....	89
Şekil 5.21. II nolu elektrot ile kaplanmış olan numunenin aşınan yüzeyinden alınan SEM Fotoğrafı (X500).....	89

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Aşınma hasarlarının oluşumunda, aşınma tiplerinin oranları.....	2
Tablo 1.2. Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması.....	9
Tablo 1.3. Toz ortamda borlanan bazı malzemelerin borlama sıcaklıkları ve elde edilebilecek optimum tabaka kalınlıkları.....	13
Tablo 1.4. Çeşitli altlık malzemelerinin borlanması sırasında oluşan farklı borik fazlarının ergime noktaları ve mikrosertlik değerleri	15
Tablo 1.5. Çeşitli metal borürlerin bazı özellikleri.....	16
Tablo 1.6. Fe ₂ B ve FeB fazlarının tipik özellikleri.....	25
Tablo 1.7 Borlanmış demir esaslı malzemelerin başlıca uygulamaları.....	32
Tablo 1.8. Yayınma işlemlerine ait bazı özellikler.....	38
Tablo 1.9. Borlanmış ve borlanmamış malzemelerin statik sürtünme katsayıları.....	38
Tablo 3.1. Yükleme ve Hareket Değişkenlerinin Sistemi Etkilemesi.....	51
Tablo 3.2 Aşındırıcı malzemelerin sertlik değerleri.....	54
Tablo 3.3. Malzeme özelliklerinin adhezif aşınmaya etkisi.....	55
Tablo 4.1. Elektrot örtüsü bileşimi (%ağırlık).....	61
Tablo 4.2. Elektrot örtüsünde kullanılan ferrobör'un kimyasal analizi (%ağırlık).....	61
Tablo 4.3. Elektrot çekirdek telin kimyasal bileşimi (%ağırlık).....	61
Tablo 4.4. Yüzeyi kaplanan düşük karbonlu çeliğin (SAE 1020) kimyasal bileşimi.....	62
Tablo 4.5. Kaplama işleminde kullanılan ısı girişleri ve kaynak parametreleri.....	62
Tablo 5.1. Isı girişi ve elektrot örtü kalınlığına bağlı olarak kaplamada bor içerikleri (%ağırlık).....	65
Tablo 5.2. Isı girişine bağlı olarak penetrasyon derinlikleri.....	67
Tablo 5.3. Isı girişine bağlı olarak kaplama yükseklikleri.....	67
Tablo 5.4. Elektrot I ile yapılan kaplamada geçiş bölgesinden ölçülen bor içerikleri (%ağırlık).....	76
Tablo 5.5. Elektrot II ile yapılan kaplamada geçiş bölgesinden ölçülen bor içerikleri (%ağırlık).....	84
Tablo 5.6. Elektrot I ile yapılan kapmalarda alınan sertlik değerleri (HV _{0.2}).....	86
Tablo 5.7. Elektrot II ile yapılan kapmalarda alınan sertlik değerleri (HV _{0.2}).....	87

SİMGELER

D₀	: yayınma sabitini (cm ² /sn)
Q,	: aktivasyon enerjisini (cal/mol)
R,	: gaz sabitini (1.987cal/mol°K)
T	: mutlak sıcaklığı (°K)
E	: Isı (enerji) girişi (J/mm)
A	: Akım (Amp)
V	: Gerilim (Volt)
S	: Kaynak hızı (mm/sn)
η	: Ark verimlilik katsayısı
P	: Penetrasyon derinliği (mm)
H	: Isı girişi (kJ/mm)
B	: Kaplama bor içeriği (%ağırlık)
K	: Kaplama yüksekliği (mm)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BOR İÇERİKLİ ELEKTROTLARLA DÜŞÜK KARBONLU ÇELİK YÜZEYLERİNİN KAPLANMASI VE AŞINMA DİRENCİNİN İNCELENMESİ

Bahadır KÖSELİ

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

2008, Sayfa: 95

Bu çalışmada, bor içerikli örtülü elektrotlar üretmiş ve düşük karbonlu çelik yüzeyleri tek paso halinde kaplanmıştır. Elektrot örtüsündeki bor içeriğinin kaplamanın mikroyapısı, sertliği ve aşınma direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kaplama işleminden sonra, WDX ve X-ray'i de içeren mikroyapı incelemeleri, sertlik ölçümleri ve abrasiv aşınma testleri sonuçlarından hareketle kaplamadaki bor içeriğinin birincil ve ötektik Fe_2B oluşumunda ve dolayısıyla sertlik üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Kaplamadaki bor miktarı arttığında mikroyapı ötektikten ($Fe_2B + \alpha-Fe$), birincil Fe_2B +ötektik + FeB yapıya doğru değişmiştir. Kaplamada kullanılan ısı girişinin de kaplama bor miktarı üzerinde kısmen etkili olduğu görülmüştür. Kaplamadaki bor miktarındaki artışla beraber aşınma direnci artmıştır. Mikroyapı inceleme, WDX ile X-ray analizleri ve mikrosetlik ölçüm sonuçlarından hareketle, yeni üretilen bor içerikli örtülü elektrotlar ile düşük karbonlu bir çelik yüzeyinde bor içeriğinin %7,2'ye kadar arttırılabileceği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Sert kaplama, Bor, Örtülü elektrot, Mikroyapı, Setlik

ABSTRACT

Masters Thesis

THE COATING OF LOW CARBON STEEL SURFACE WITH THE ELECTRODES CONTAINING BORON AND INVESTIGATION OF ABRASIVE WEAR BEHAVIOUR

Bahadır KÖSELİ

Firat University
Institute of Science and Technology
Metalurgical and Materials Engeneering Department

2008, Page: 95

In the present study, the shielded metal arc welding electrodes containing boron were produced and low carbon steel plates were surfaced with single pass bead on plate welds. The effects of boron content in the shield of electrode on the microstructure, hardness and abrasive resistance of the surfaces were investigated. After surfacing, microstructural analysis including metallographic examination, wavelength dispersive X-ray(WDX), X-ray, microhardness measurements and abrasive wear tests were performed. From the results, it was seen that boron content in the coating was effective on the formation of primary and eutectic Fe_2B , and consequently on the hardness. As the boron content in the coating increased the microstructure changed from eutectic structure ($Fe_2B + \alpha-Fe$) to primary Fe_2B with eutectic + FeB structure the heat input was also relatively effective on the amount of boron content of the coating. Abrasive wear resistance of the coating increased with the increase in boron content. As a result, from the microstructural observations, WDX and X-ray analysis and microhardness measurements, it was concluded that boron content of a low carbon steel surface can be increased up to 7,2 wt % by newly developed boron containing shielded metal arc welding electrodes.

Key words: Hardfacing, Boron, Shielded metal arc welding electrode, Microstructure, Hardness

1.GİRİŞ

1.1. BORLAMA

Malzemelerin performansı, genel olarak kütle ve yüzey özelliklerine bağlı olduğundan yüzey mühendisliği ve yüzey işlem teknolojilerinde son yıllarda çok önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Malzemenin kullanımı sırasında çevre ile olan etkileşimi öncelikle yüzeyinde gerçekleşmektedir. Yüzey işlemleri ile malzemenin sertlik, süneklik ve yorulma gibi mekanik özellikleri, sürtünme ve aşınma gibi tribolojik özellikleri ile oksidasyon ve korozyon özellikleri geliştirilmektedir. Bunlardan tribolojik özelliklerin geliştirilmesi önem açısından ilk sırayı teşkil etmektedir.

Yüzey işlemleri, daha ucuz ve daha kolay üretilebilen altlık malzemesinin yüzeyini çeşitli işlemlerle değiştirerek, istenilen özellikte malzeme elde edilmesini ve bunu çok amaçlı kullanarak ekonomik fayda kazanılmasını da sağlamalıdır. Bu işlemlerin en önemli avantajı, ucuz bir altlık malzeme yüzeyine yapılacak işlemlerle yüzey-ortam etkileşimine dayanan optik, manyetik, elektriksel, termal, kimyasal korozyon, oksidasyon ve tribolojik gibi mühendislik özelliklerinin istenilen şekilde değiştirilebilmesidir.

Gaz hali proseslerinin en önemlileri; fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), iyon ışın destekli biriktirme (IBAD) ve bunların plazma varyasyonlarıdır. Çözelti hali prosesleri ise kimyasal çözelti biriktirme, elektrokimyasal biriktirme ve sol jel prosesidir. Ergimiş veya yan ergimiş hal prosesleri, lazer, termal sprey ve kaynak prosesleri ile bunların plazma varyasyonlarıdır. Katı hal prosesleri ise önceki proseslere göre daha kalın kaplamaların gerçekleştirildiği difüzyon esaslı uygulamalardır.[7]

Endüstride, makine elemanlarının kullanım dışı kalmasının başlıca sebepleri; aşınma, yorulma ve korozyondur. Endüstrileşmiş toplumlarda sürtünme ve aşınmanın kontrol altında tutulması veya azaltılması gittikçe artan bir ihtiyaç olmuştur. Çünkü makinenin servis ömrünü uzatmak, çevre kirliliğine yol açmamak, daha etkili makine ve aletler yapmak, gittikçe azalan malzeme kaynaklarını muhafaza etmek, enerjiden tasarruf etmek ve daha emniyetli alet ve makineler geliştirmek, büyük ölçüde sürtünme ve aşınmanın önlenmesine bağlıdır. Önceleri sadece sıvı veya katı yağlayıcı kullanmakla önlenmeye çalışılan bu probleme tribolojistlerin yaklaşımı, yüzey işlemleri ve kaplamaların kullanılarak aşınmanın önlenmesi yönündedir. Malzeme yüzeylerine uygulanan klasik ve modern kaplama yöntemleri dünyada ve ülkemizde hızla gelişerek yaygınlaşmaktadır. Çünkü sanayileşmiş ülkelerde aşınma sebebiyle G.S. M.H.'nın %7'sine eşdeğer bir harcamanın yapıldığı tahmin edilmektedir.

Tablo 1.1. Aşınma hasarlarının oluşumunda, aşınma tiplerinin oranları

Aşınma tipi	%
Abrazif aşınma	50
Adhezif aşınma	15
Erozif aşınma	8
Kimyasal aşınma	8
Korozif aşınma	5
Yorulma ve diğer aşınmalar	14

Amerika'da çeşitli malzeme hasarları sebebiyle yılda 500 milyon dolara varan ekonomik kayıp olduğu ileri sürülmektedir. Sürtünmeden dolayı meydana gelen enerji kayıpları ise daha büyük boyutta olup sürtünmenin azaltılması ile enerji tüketiminde % 1–2 tasarruf sağlanması, yılda 5–10 milyar Dolar kâra karşılık geleceği ifade edilmektedir. Malzemede kayıpnı oluşturan sebeplerden olan aşınmaya karşı alınan önlemlerin en başında ise seramik kaplamalar gelmektedir. Metalik malzemelerin abrazif, adhezif ve erozif aşınmaya karşı, çeşitli prosesler ile özellikle karbür nitrür ve borür gibi sert kaplama da denilen seramik kaplamalar yapılarak çok başarılı sonuçlar alınmaktadır. Ayrıca seramik kaplamalar, metalik malzemelerin korozyon dirençlerinin artırılması yanında yüksek sıcaklık uygulaması, enerji tasarrufu gibi amaçlarla da tatbik edilmektedir. Fakat bu proseslerin çoğunun uygulanabilirliği için yüksek teknolojiler yani yüksek maliyetler gerekmektedir. Buna karşılık, malzeme yüzeyinde, pratik ve ekonomik bir şekilde termokimyasal işlemlerle oksit olmayan seramiklerden olan borür tabakasının oluşturulması oldukça avantajlıdır. Termokimyasal bir yüzey işlemi olan borlama neticesinde, metalik malzemenin, yüzey sertliği, aşınma, oksidasyon ve korozyon direnci oldukça yüksek seviyelere çıkmaktadır.[5]

Dünyada bor rezervi açısından rakipsiz bir konumda olan ülkemiz bu avantajını mutlaka teknolojiye yansıtmalıdır. Tinkal (Boraks) $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ve üleksit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) gibi bor cevherinden çeşitli bor ürünleri ile katı ve gaz ortam borlamasında kullanılan bor bileşiklerinin üretimi, endüstriyel çapta gerçekleştirilmelidir. Batı Avrupa'da özellikle Almanya'da ve Doğu Avrupa'da da Rusya'da 1970'li yıllardan beri borlama konusunda, oldukça yoğun araştırmalar ve uygulamalar yapılmaktadır. Yurdumuzda da son yıllarda çeşitli demir esaslı alaşımlar üzerine bor kaplama konusunda akademik çalışmalar yapılmıştır.

Bor ve bor bileşikleri, çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu alanlar:

Cam Sanayi: Borsilikat, soda-kireç ve diğer düz camlarda, izolasyon ve tekstil amaçlı cam elyafında, cam seramiklerde.

Nükleer Sanayi: Reaktör kontrol çubuklarında, nükleer kazalarda güvenlik amaçlı ve nükleer atık depolayıcı olarak,

Uzay ve Havacılık Sanayi: Sürtünmeye, aşınmaya ve ısıya dayanıklı malzemelerde, roket yakıtı katkı malzemelerinde.

Elektrik-Elektronik ve İletişim Sanayinde: Bilgisayarların mikro chiplerinde, CD-sürücülerinde, bilgisayar ağlarında; ısıya, aşınmaya dayanıklı fiber optik kablolarda, yarı iletkenlerde, vakum tüplerinde, dielektrik malzemelerde, gecikmeli sigortalarda, kondansatörlerde, cep telefonlarında, modemlerde ve televizyonlarda,

Enerji Sektörü: Hidrojen taşıyıcılarda, güneş enerjisinin depolanmasında, güneş pillerinde koruyucu olarak,

Metalurji ve Malzeme: Paslanmaz ve alaşımlı çeliklerde, aşınmaya ve sürtünmeye dayanıklı fiber takviyeli kompozit malzemelerde, flakslarda, refrakterlerde, lehimlemede, döküm katkı malzemelerinde, kesici ve aşındırıcı takımlarda, zırh plakalarında, ısı ve ses yalıtım malzemelerinde, spor malzemelerinde, mıknatıslarda,

Kimya Sanayi: Bazı kimyasalların redüksiyonunda, elektrolitik işlemlerde, flotasyon kimyasallarında, banyo çözeltilerinde, katalistlerde, atık temizleme malzemelerinde, petrol boyalarında, yanmayan ve erimeyen boyalarda, toz deterjanlarda, toz beyazlatıcılarda, parlaticılarda, kâğıt hamuru beyazlatıcılarında, ahşap koruyucularında, boya ve vernik kurutucularında, plastiklerdeki yanma direncini artırıcı katkılarda,

Otomobil Sanayi: Hava yastıklarında, hidroliklerde, motor yağlarında, antifrizlerde.

Tekstil Sektörü: Isıya dayanıklı kumaşlarda, tekstil boyalarında, suni ipek parlatma malzemelerinde, deri renklendiricilerinde,

Tıp: Osteoporoz tedavilerinde, alerjik hastalıklarda, psikiyatride, kemik gelişiminde ve artiritte, menopoz tedavisinde, beyin kanserlerinin tedavisinde,

İlaç ve Kozmetik Sanayi: Dezenfekte edicilerde, antiseptiklerde, diş macunlarında.

Seramik Sanayi: Emaye ve glazür çamurlarında,-porselen boyalarında,

İnşaat-Çimento Sektöründe: Mukavemet artırıcı ve izolasyon amaçlı olarak,

Tarım Sektörü: Gübrelerde, böcek-bitki öldürücülerde,

Manyetik Cihazlarda, mumyalamada ve fotoğrafçılıkta bor ve bor bileşikleri kullanılmaktadır. Borun; titanyum, zirkonyum, molibden, tungsten, krom ve demir gibi elementler ile yaptığı bileşiklerin oldukça yüksek seviyede; ergime sıcaklığı, sertlik, korozyon ve aşınma dirençlerine sahip olduğu bilinmektedir.[5]

Bor kaplama sonrasında çok yüksek olan sürtünme katsayısını 0,65 seviyesinden; yüzeyde bor oksidin oluşturulması ve havanın nemi ile de bunun borik aside dönüşmesi sayesinde, kendinden yağlamalı kaplama haline getirerek aşınmayı, 0,05 seviyelerine indirmek mümkündür. [6]

Günümüzde tasarımcılar ve kullanıcılar için oldukça zengin bir yelpazeye sahip olan yüzey işlemleri, uygulanan yüzey işlemlerine bağlı olarak, altlık malzemenin özellikleri üç şekilde değiştirilebilir. Bunlar:

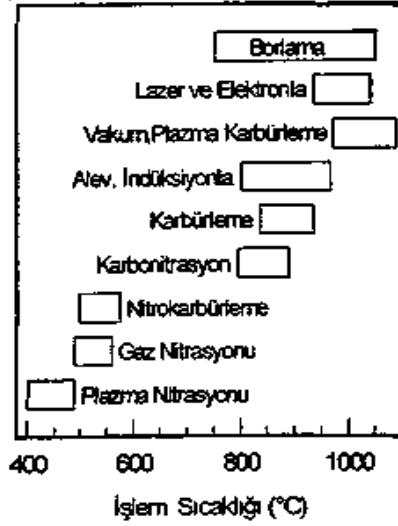
- Malzeme yüzeyine değişik metal veya bileşikler kaplayarak (PVD, CVD plazma püskürtme gibi yöntemlerle metalik, seramik ve organik kaplamalar yapmak),
- Yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirerek yani farklı bir elementin difüzyonu yoluyla altlık malzeme yüzeyinde bileşik oluşturarak (borlama, nitrüleme, karbürleme, borsilikonlama ve karbonitrüleme işlemleri gibi),
- Altlık malzemesinin kendisinden kaynaklanan oksit tabakasını kalınlaştırarak (alüminyum ve titanyumun anodizasyonu gibi), başka maddelerle reaksiyon sokarak (kromatlama ve fosfatlama gibi) veya yüzeyin mikroyapısını (İndüksiyonla Sertleştirme, Alevle Sertleştirme vb.) değiştirerek gerçekleştirilmektedir.

Yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirerek gerçekleştirilen yüzey sertleştirme işlemleri, katı, sıvı veya gaz fazındaki elementlerin yüksek sıcaklıklar yardımıyla malzeme yüzeyine yayındırılması esasına dayanır. Değişik elementlerin, farklı proseslerle metalik yüzeylere yayındırıldığı difüzyon işlemleri, endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptir.

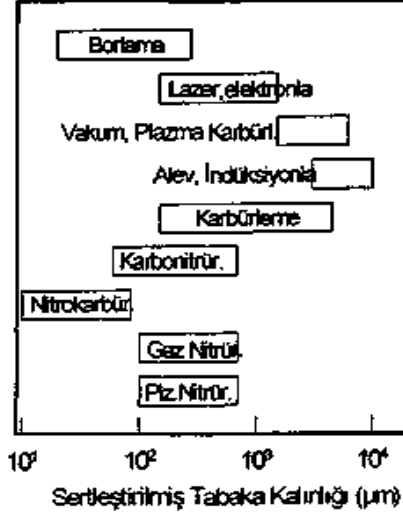
Çeliklere uygulanan yüzey sertleştirme işlemlerinde; işlem sıcaklığı ve sertleşme derinliği ile çeşitli yüzey işlemlerinde, işlem sıcaklığının ve kaplama kalınlığı veya modifikasyon derinliğinin kıyaslanması Şekil 1,1’de verilmektedir. Yüzey işlemlerinin en geniş uygulama alanı bulunduğu demir esaslı alaşımlarda, yüzey modifikasyonu için kullanılan değişik metotların sertlik derinliği ve sıcaklığa bağlı olarak kıyaslanması ise Şekil 1,2’de verilmektedir.[8]

1.2. Borlama İşlemi

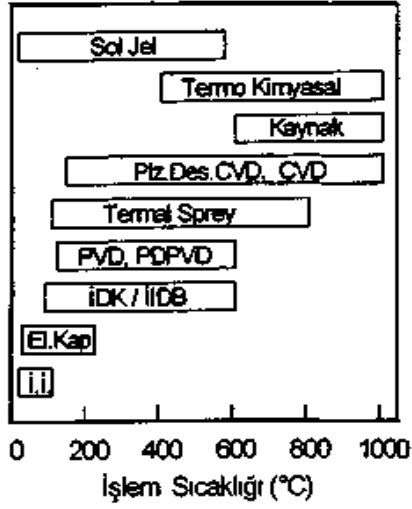
Ülkemiz 563 milyon ton (B_2O_3) bor rezervi ile dünya bor rezervlerinin % 64'üne sahiptir. Bu rezerv, ticari ve yüksek kalitede bor minerallerinden oluştuğu için Türkiye, bor cevheri piyasasında rakipsiz konumdadır. Oksit olmayan seramiklerden olan borürler, üstün özelliklere sahip olduklarından birçok araştırmacı bor ve bor bileşikleri üzerine çalışmalar yapmaktadır. Son yıllarda termokimyasal yöntemle bor kaplamalar ilgi odağı olmuştur. Böylece kaplanan malzemenin matris özellikleri yanında, yüzeyinde oluşacak bor bileşiklerinin özelliklerine bağlı olarak yüksek aşınma, oksidasyon ve korozyon direnci ile üstün mekanik özellikler elde edilmesi mümkün olmaktadır.[7]



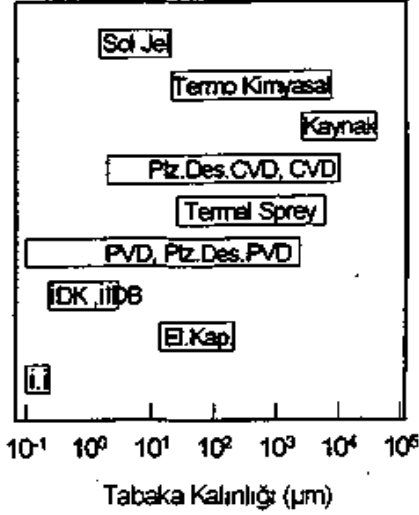
(a)



(b)



(c)

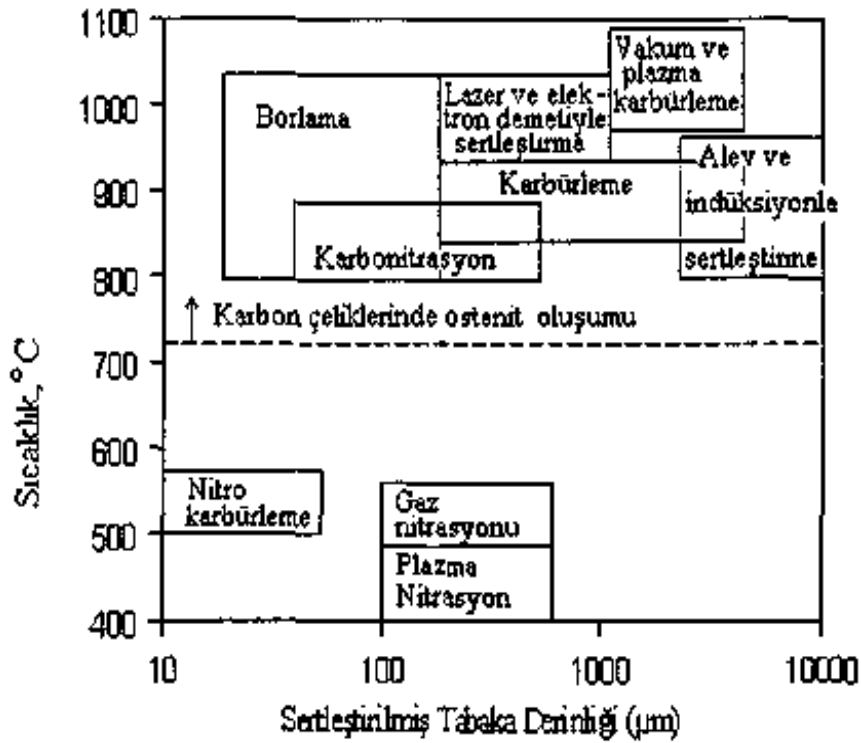


(d)

İ.İ. : İyon İmpantasyonu
El.Kap.: Elektro Kaplama
PVD : Fiziksel Buhar Biriktirme
CVD : Kimyasal Buhar Biriktirme

İDK : İyon Destekli Kaplama
İİDB : İyon Işın Destekli Biriktirme
PDPVD : Plazma Destekli PVD
Plz.Des.CVD : Plazma Destekli CVD

Şekil 1.1. Çeliklere uygulanan yüzey sertleştirme işlemlerinde; (a) işlem sıcaklıklarının ve (b) sertleşme derinliklerinin mukayesesi. Çeşitli yüzey işlemlerinde; (c) işlem sıcaklıklarının ve (d) kaplama kalınlığı/modifikasyon derinliğinin kıyaslaması



Şekil 1,2. Çeliklerin yüzey modifikasyonlarının sağlanmasında kullanılan değişik metotların sertlik derinliği ve sıcaklık açısından kıyaslanması

Bor elementi, periyodik sistemde 3A grubunda yer almakta olup, atom ağırlığı 10,81 gram ve atom numarası 5'tir. Yoğunluğu 2,33 g/cm³ olan borun, ergime noktası 2092 °C iken kaynama noktası 2550 °C, atom yarıçapı 0,46Å ve iyon yarıçapı da 0,23Å olup valansı +3'tür. Bor elementi genellikle hem tetragonal ve hegzagonal kristal yapıda, hem de amorf yapıda olabilir. Amorf yapıdaki yoğunluğu 2,34 g/cm³ olan bor elementinin sertliği ise 9,3 Mohs'dur.

Borlama, Alman Endüstri Standardı DIN 17014'e göre "termokimyasal işlem yoluyla iş parçasının yüzeyinin bor atomlarıyla zenginleştirilmesi" olarak tarif edilen termo-difüzyonal yüzey işlemidir. Termal enerji yoluyla bor atomlarının iş parçasının yüzeyindeki metal latisin içerisine yayılması ve orada ana malzemenin atomları ile borürlerin oluşturulmasıdır.

Borlama işlemi; yüzey sertleştirilmiş çelikler, temperlenmiş çelikler, takım çelikleri, paslanmaz çelikler gibi yapısal çeliklerle, işlem çeliklerine, döküm çeliklere, Armco demirine, gri ve sfero dökme demirlere, sementit karbürler, sinterlenmiş metal tozlarına, sinterlenmiş çeliklere ve nikel, kobalt, molibden, titanyum, krom, mangan, tungsten, niyobyum ve tantalyum gibi demir dışı metal ve alaşımlarına da uygulanabilmektedir.

Genellikle borlama işlemi, 700–1050°C sıcaklık aralığında 1–12 saat sürelerde çeşitli

borlama ortamlarında gerçekleştirilmektedir. Borlama ortamı katı, sıvı veya gaz olup bor kaynağı (B_4C , $Na_2B_4O_7$, H_2B_6), aktivatör (KBF_4), dolgu malzemesi ve deoksidanlardan meydana gelmektedir. Burada aktivatörler tabakanın düzenli büyümesini sağlarken, dolgu ve deoksidan malzemeler işlem sıcaklığında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluşturmakta ve ayrıca ortamdaki malzemelerin ana malzemeye yapışmasını önlemektedirler. Plazma ve akışkan yatakta borlama işlemleri, gaz ortamda borlama teknikleri içerisinde yer alırlar. Şu an ki eğilim çok bileşenli borlamanın kullanımına doğrudur.

1.2.1. Borlama İşleminin Avantajları

Borlama işleminin en önemli karakteristik özelliği, elde edilen borür tabakasının çok yüksek sertlik (1450–5000 HV) ve ergime sıcaklığına sahip olmasıdır. Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme yöntemleri olan sementasyon ve nitrürasyona göre çok daha yüksektir. Hatta bu sertlik, sertleştirilmiş takım çeliklerinin ve sert krom kaplamanın sertliklerinden daha yüksek, tungsten karbürüne ise eşdeğerdir. Bor kaplanmış çeliklerin ve diğer sert metallerin yüzey sertlikleri Tablo 1,2’de verilmektedir.

Borür tabakalarının yüksek yüzey sertliğine ve düşük sürtünme katsayısına sahip olmaları; adhezif, tribo-oksidasyon (kimyasal), yüzey yorulması ve abrazif aşınma gibi temel aşınma mekanizmalarının oluşumunu önlemede çok önemli fayda sağlar. Bu sayede kalıp üreticilerinin, pahalı ve zor işlenen takım çelikleri yerine, üstelik orijinal malzemeninkinden daha üstün özelliklere ve aşınma direncine sahip olan kolay işlenen çelikleri kullanabilmeleri mümkün olmuştur. Bu ise takım ve kalıp ömrünü artırdığı gibi yağlayıcı kullanımını da azaltır. Borür tabakası, yüksek sıcaklıklarda ($550^{\circ}C$ – $660^{\circ}C$) bile sertliğini muhafaza etmektedir. Isıl işlem uygulanabilen malzemeler, performanslarını optimize etmek için borlama sonrası tamamen sertleştirilebilirler. Borlama, bir iş parçasının sertleştirilmesi istenen seçilmiş bölgelerine, düzensiz karmaşık şekillere üniform bir şekilde uygulanabilir. Borlama yüzeyi, çok hassas bir şekilde parlatılabilir. Soğuk yapışma kaynağına eğilimi azaltmaktadır. Borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin oksitleyici olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerin erozyon dirençlerini artırmaktadır. Bu özellikleri sebebiyle de endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Borlama işlemi ile düşük alaşımlı çeliklerin, H_2SO_4 , H_3PO_4 ve HCl gibi asitlere karşı direncini artırmak mümkündür. Borlanmış yüzeyler çok yüksek sıcaklıklarda ($850^{\circ}C$) orta özellikte oksidasyon direncine ve oldukça yüksek ergimiş metal korozyon direncine sahiptir. Borlanan parça, oksitleyici ve korozif ortamlarda üstün bir yorulma ömrüne sahiptir.

1.2.2 Borlama İşleminin Dezavantajları

Borlama işleminin bu avantajlarının yanı sıra bazı sınırlamaları da mevcuttur:

Borlama teknikleri esnek değildirler. Gaz ortamında sementasyon ve plazma nitrürasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre işçilik ve işletim maliyeti daha yüksektir. Daha esnek olan gaz karbürizasyonu ve plazma nitrürasyonu işlemlerinin kısa sürede ve daha kolay gerçekleşmesi borlamaya göre avantajlar sağlamaktadır. Bu rağmen; yüksek sertlik ve kalıcı yüksek aşınma ve korozyon direncinin arzu edildiği durumlarda borlama işlemi tercih edilmektedir. Ucuz iş gücü temin edilebilen yerlerde de borlama tercih edilen bir işlemdir.

Borlamaya tabi tutulan malzemelerde bor tabaka kalınlığının %5-20'si oranında boyutsal olarak artış gözlenmektedir. Örneğin, 25 µm'lik bir tabaka kalınlığı, 1,25–6,25 µm'lik bir büyümeye neden olmaktadır. Bu kalınlık artışı borlanan malzemenin cinsine ve borlama şartlarına bağlıdır. Çok hassas toleranslarla çalışmak gerektiği zaman, kaplamanın işlenmesi elmas takımlarla mümkün olmaktadır. Çünkü yüzeyin geleneksel tekniklerle işlenmesi sırasında kaplama tabakasında kırılmalar meydana gelmektedir. Bu da kaplama kalitesinde bozulmalara ve çatlamalara yol açmaktadır.

Tablo 1,2. Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması

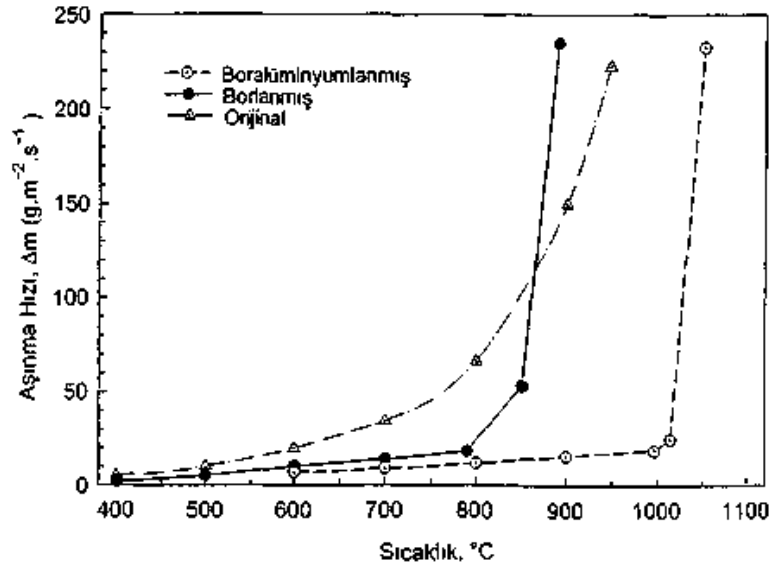
Malzeme	Mikrosertlik (Kg/mm ² veya HV)
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13	540–600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 çeliği	630–700
Yüksek hız çeliği	900–910
Nitrürlenmiş çelik	650–1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650–950
Sert krom kaplama	1000–1200
Sementit karbürler. WC+Co	1160–1820
Al ₂ O ₃ +ZrO ₂ seramikler	1483
Sialon seramikler	1768
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000

Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde (2000 N) karbürizasyon ve nitrasyonla kıyaslandığı zaman, çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği sebebiyle, dişli üretiminde bir sınırlama söz konusudur.

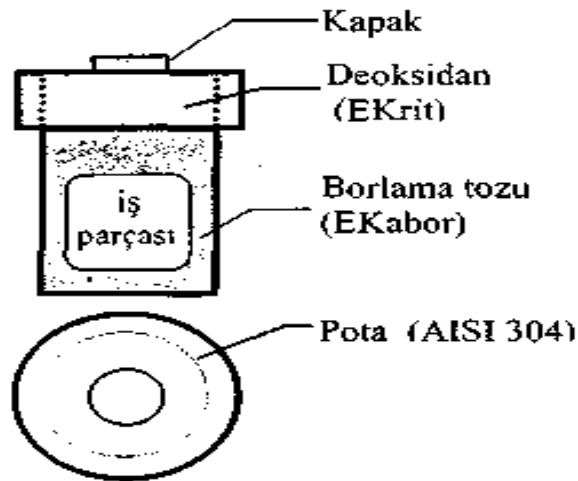
Borlama sonrası ısıtıl işlem görecektir olan çeliklerde borür tabakasının özelliklerinin korunması için inert atmosfer veya vakum gerekmektedir.

1.2.3. Çok Bileşenli Borlama

Çok bileşenli borlama bor elementi yanında, alüminyum, krom, silisyum, vanadyum ve titanyum gibi metalik elementlerden bir veya birkaçının, çelik yüzeyine aynı anda veya birbiri ardına yayındırılması esasına dayanan termokimyasal bir işlemdir. Katı ortamda yapılabildiği gibi sıvı boraks ortamında da yapılabilmektedir. Çok bileşenli borlama, genellikle iki kademeli bir işlem olarak, 850–1050 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada borlama işlemi, geleneksel yöntemlerden biriyle yapılmaktadır ve daha çok kutu borlama tercih edilmektedir. FeB fazının oluşumu iyi sonuçlar vermekte ve 30 µm civarındaki kaplamalar yeterli olmaktadır. İkinci aşamada, elementin tabakaya difüzyonu gerçekleştirilmektedir. Kutu borlama sırasında oluşan sinterleşmeyi önlemek için ortamdan Ar veya H₂ gazı geçirilmektedir. Çok bileşenli borlama; bor-alüminyumlama, bor-silisyumlama, bor-kromlama, bor-krom-titanyumlama, bor-krom-vanadyumlama ve bor-vanadyumlama şeklinde altı gruba ayrılmaktadır. Bor-silisyumlama ile işlem gören parçaların yorulmalı korozyon dirençlerinde artış sağlanırken, bor-alüminyumlama ile rutubetli ortamlarda daha iyi korozyon ve aşınma direncine sahip parçalar elde edilmektedir. Ck 45 çeliğinin; orijinal, borlanmış ve bor-alüminyumlanmış durumdaki aşınma hızlarının sıcaklıkla değişimi Şekil 1,3'te verilmiştir. Bor-kromlama işlemi ile bor-alüminyumla işlemindekinden daha yüksek oksidasyon direncine ve geleneksel borlamadakinden daha iyi korozyon ve yorulmak korozyon direncine ulaşılmaktadır. Bor-kromlanmış parçaların ısıtıl işlemleri, bu sebepten dolayı kontrollü atmosfer gerektirmeksizin gerçekleştirilebilmektedir. Bor-krom-titanyumlama işlemi sonrasında parça yüzeyinde 5000 kg/mm sertlik değerine sahip titanyum borür tabakası oluşmakta, bu da çok yüksek abraziv aşınma ve korozyon direnci sağlamaktadır. Bor-vanadyumlama ve bor-krom-vanadyumlama işleminde sertliği 3000 kg/mm² olmasına rağmen oldukça sünek tabakalar elde edildiğinden, bu işlem, darbeli yüklemelere maruz kalacak olan parçalara uygulanabilmektedir. [17]



Şekil 1,3. Çeşitli yüzey işlemleri yapılmış Ck 45 çeliğinde aşınma hızlarının sıcaklıkla değişimi



Şekil 1,4. Kutu borlama yönteminde iş parçasının potaya yerleştirilmesi

1.3. Borlama Yöntemleri

Borlama işlemleri, termokimyasal ve termokimyasal olmayan yöntemler olarak iki ana gruba ayrılan yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemlerden en çok kullanılan termokimyasal yöntemlerdir. Termokimyasal bor kaplama yöntemleri sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak bor atomunun metale difüzyonu prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemler; kutu borlama sıvı borlama, pasta borlama ve gaz ortamda borlama şeklinde sıralanabilir. Termokimyasal olmayan fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey ve iyon biriktirme gibi yöntemler ile de son yıllarda borlama işlemi gerçekleştirilebilmektedir.

1.4. Borlanabilen Malzemeler ve Borürlerin Genel Özellikleri

Endüstriyel olarak borlama işlemi, çok geniş bir yelpazedeki demir esaslı alaşımların hemen hepsine ve bazı demir dışı alaşımlara uygulanmaktadır. Sade karbonlu, paslanmaz ve takım çelikleri gibi yapısal çeliklere, döküm çeliklere, Armco demire (ticari saflıkta), gri ve küresel grafitli dökme demirlere, sinterlenmiş demir ve çeliklere uygulanabilmektedir. Buna ilaveten, nikel, kobalt, molibden, titanyum, krom, mangan, niyobyum, tungsten ve tantalyum gibi demir dışı metal ve alaşımlarına, bazı seramiklere de uygulanmaktadır.

Altlık malzemenin uygunluğuna göre borlama işlemi 800–1050°C sıcaklık aralığında yapılabilir. Fakat gri dökme demir ve sert metallerde (sementit karbürler) bu kadar yüksek sıcaklıklara çıkılamaz. Gri dökme demirlerin borlanması 850–880°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilir. Çünkü steadit ötektiği içeren gri dökme demir, 950 °C'de ergimeye başlayacak ve bunun sonucunda ise iş parçasının yüzeyi deforme olacaktır. Sert metallere için tavsiye edilen sıcaklık ise en fazla 900 °C civarındadır. Daha yüksek sıcaklıklarda altlık malzemenin borlanması yanında, volfram karbür partiküllerinin veya mevcut diğer sert karbürlerin de parçalanıp borürlere dönüşmesi mümkündür.

Tablo 1.3'de toz ortamda borlanan bazı malzemelerin borlama sıcaklıkları ve elde edilebilecek optimum tabaka kalınlıkları verilmiştir. Alüminyum, çinko ve magnezyum alaşımları düşük ergime sıcaklıklarından dolayı borlanamazlar. Çelik malzemelerin borlanmasında, kaplama tabakasında üç farklı bölge oluşur. Bunlar; I Borür tabakası, II Difüzyon bölgesi ve III matris bölgeleridir. Borür tabakası ile matris arasındaki ara yüzeyin geometrisi, çelik bünyesindeki alaşım elementi miktarına bağlı olarak dişli/kolonsal yapıda veya düz bir yapıda olabilmektedir. Alaşım elementi miktarı arttıkça borür tabakası daha düz bir yapıda oluşur.

Tablo1.3. Toz ortamda borlanan bazı malzemelerin borlama sıcaklıkları ve elde edilebilecek optimum tabaka kalınlıkları

Malzeme No	DİN	AISI	Borlama Sıcaklığı, (°C)	Tabaka Kalınlığı, (mm)
1.0037	St 37		900–1000	50 – 500
1.0050	St 50		900–1000	50–500
1.1141	Ck 15	1020	900–1000	50 – 500
1.1191	Ck 45	1042	900 – 950	40–200
1.7131	16 MnCr5	5115	880–950	40–200
1.8159	CrV4	6152	880 – 900	15–150
1.8519	CrMoV7		880 – 900	15–150
1.4541	X10CrNiTi8		880–980	20–60
1.4571	X10CrNiMoTi8		880–980	20–60
1.2080	X210Cr12	D3	940–980	40–80
1.2162	21MnCr5		880–950	40 – 200
1.2312	CrMnMoS8		880	40–120
1.2316	X35CrMo17		1010–1030	40–100
1.2379	X 155 CrVMo12	D2	1020–1050	40–80
1.2436	X210CrW12	D6	940–980	40–80
1.2764	X 19 NiCrMo4		880–920	40–150
1.2787	X22CrNi7		950	20–60
1.2842	MnCrV 8	02	880–900	40–150
	GGL 25		850	40–200
	GGG 60		850	40–200

Borlama işlemi, difüzyon kontrollü bir işlem olduğundan, borlama süresi ve sıcaklığı arttıkça tabaka kalınlığı da asimptotik olarak artar. Ancak, borlama süresindeki artış, çok hâkim borür tabakası oluşumuna, o da borür tabakasında poroziteye sebebiyet verir. Alaşım elementleri miktarının artmasıyla, bor atomlarının difüzyonu zora gireceğinden borlamanın miktar ve boyutlarında azalma görülür. Borlama işleminin ostenit fazında gerçekleşmesi sebebiyle havada sertleşen çeliklerde, borlama sonrasında matris sertleşir. Çelik potanın, borlama sonrasında dışının su ile soğutulması matrisin sertliğini daha da artırır. Suda sertleşen parçalar borür tabakasının termal şoka maruz kalması sebebiyle su verilmesi gerekli olduğu durumlarda borlanmazlar. Benzer şekilde sülfürlenmiş ve kurşunlanmış çelikler yüzeylerde çatlak oluşturma eğilimleri, nitrürlenmiş çelikler ise çatlak hassasiyetleri sebebiyle borlama işlemine tabi tutulmamaktadır. Alüminyum ve silisyumun, borür tabakasında çözünürlüğü yoktur. Alüminyum içeren çeliklerin (mesela nitrüleme çeliği CrAlNi₇, malzeme no: 1,8550) borlanması tavsiye edilmezken, bu konuda müspet yönde bazı çalışmalara rastlanmıştır. İçerisinde ağırlıkça %1'den fazla silisyum bulunan çelikler kalın borür tabakası için uygun

olmayan malzemelerdir. Bu malzemelerdeki alüminyum ve silisyum, bor atomlarının difüzyonu sırasında yüzeyden içerilere doğru itilirler. Difüzyon bölgesinde Fe_2B fazının altında ferritik bir bölgenin oluşumuna yol açarlar. Bunun sonucu olarak son derece sert borür tabakasının altında orijinal altlık malzemeden daha yumuşak bir tabaka yer alacaktır. Eğer iş parçası, oldukça yüksek gerilmelere maruz kalırsa, sert borür tabakası bunu yumuşak ferrit bölgesine iletecek ve borür tabakasının parçalanmasına yol açacaktır. Buna yumurta kabuğu etkisi denir. Titanyum ve alaşımlarının borlanması, 1000–1200 °C sıcaklık aralığında, kutu borlama yöntemi ile yüksek vakumda (0,0013 Pa veya 10^{-3} torr) ve yüksek saflıkta argon kullanılarak oksijensiz amorf bor ortamında; gaz borlama yönteminde ise $\text{H}_2\text{-BCl}_3\text{-Ar}$ gaz karışımında yapılmaktadır. Titanyumun borlanması sonucunda, aşınmaya karşı oldukça dayanıklı, %18 bor ağırlık yüzdesi ile TiB , %30–31 bor ağırlık yüzdesi ile TiB_2 ve Ti_3D_4 oluşmaktadır. Tablo 1,4’de çeşitli altlık malzemelerin borlanması sırasında oluşan borür fazlarının ergime sıcaklıkları ve mikrosertlik değerleri verilmektedir. Kobalt ve nikel gibi metaller ve alaşımları ile bu elementleri ihtiva eden sert metaller borlanabilen malzemelerdir. Kobalt ve nikel esaslı WC ve TiC gibi karbürler çok sert ve yüksek ergime sıcaklığına sahip olmalarına karşılık, nemli atmosferik şartlarda, oksidasyon dayanımları düşüktür. Bunu önlemek için borlama uygulanabilir. Nikel ve kobalt gibi yumuşak metallerin borlanması ile sinterlenmiş karbürlerin aşınma dirençleri yükseltilebilir. Ancak, sert metallerin borlanmasında tatmin edici bir sonuç alabilmek için kobalt veya nikel oranı, hacimce % 6’dan çok olmalıdır.

Tablo 1.4. Çeşitli altlık malzemelerinin borlanması sırasında oluşan farklı borik fazlarının ergime noktaları ve mikrosertlik değerleri

Altlık Malzeme	Borür Tabakasındaki Sürekli Faz	Tabaka Sertliği (HV veya Kg/mm ²)	Ergime Sıcaklığı, °C
Fe	FeB	1900–2100	1390
	FeB	1800–2000	
Co	CoB	1850	
	CoB	1500–1600	
	Co ₄ B	700–800	
Co-27	CoB	2200(10080	
	Co, B	—1550	
	Co ₄ B	700–800	
Ni	NiB	1600	
	NiB	1500	
	NiB	900	
Mo	MoB	1660	2000
	MoB	2330	2100
	MoB	2400–2700	2100
W	WB	2600	2300
Ti	TiB	2500	1900
	TiB	3370	2980
Ti-6Al-4V	TiB		
	TiB	3000	
Nb	NbB	2200	3050
	NbB ₄		
Ta	TaB		3200–3500
	TaB	2500	3200
Hf	HfB	2900	3250
Zr	ZrB	2250	3040
Re	ReB	2700–2900	2100

Bakır, bor atomlarının difüzyonuna engel olduğu için bakır veya bakır alaşımları borlanmaya uygun değildirler. Fakat bölgesel borlama işleminde borlanmayacak kısımların maskelenmesinde kendinden yapışan ince film veya sac olarak kullanılırlar. İşlem sıcaklığı 950 °C 'nin üzerine çıkarsa, Ekabor bileşimindeki bileşikler ile bakır arasında ötektik reaksiyonu sonucu ergime meydana gelir.

1.4.1. Borürlerin Özellikleri

Bor, periyodik tabloda birçok elementle bileşik oluşturmaktadır. Borür bileşiklerinin çoğu kuvvetli kovalent bağ yapısına sahip olduklarından ergime sıcaklık dereceleri, elastisite modülleri ve sertlikleri oldukça yüksektir (Tablo 1,5).

Borürlerin oluşumu, büyük ölçüde bileşik yaptığı atomla arasındaki atomik boyut faktörüne ve elektrokimyasal etkiye bağlıdır. Diğer seramik bileşiklere göre borürlerin termal

genleşme katsayıları orta seviyelerde, ısı iletkenlik katsayıları ve termal şok dirençleri ise oldukça yüksek seviyelerdedir. Borürlerin çoğunun elektriksel dirençleri, 5–80 $\mu\Omega\text{-cm}$ aralığında olup, diğer seramik bileşiklere göre iyi elektriksel iletkenliğe sahiptirler. Kristal yapıları ve latis parametreleri benzer olan borürler katı eriyik oluşturabilirler. Borürlerin kimyasal dirençleri, birçok seramiğe nazaran oldukça yüksektir.

Tablo 1.5. Çeşitli metal borürlerin bazı özellikleri

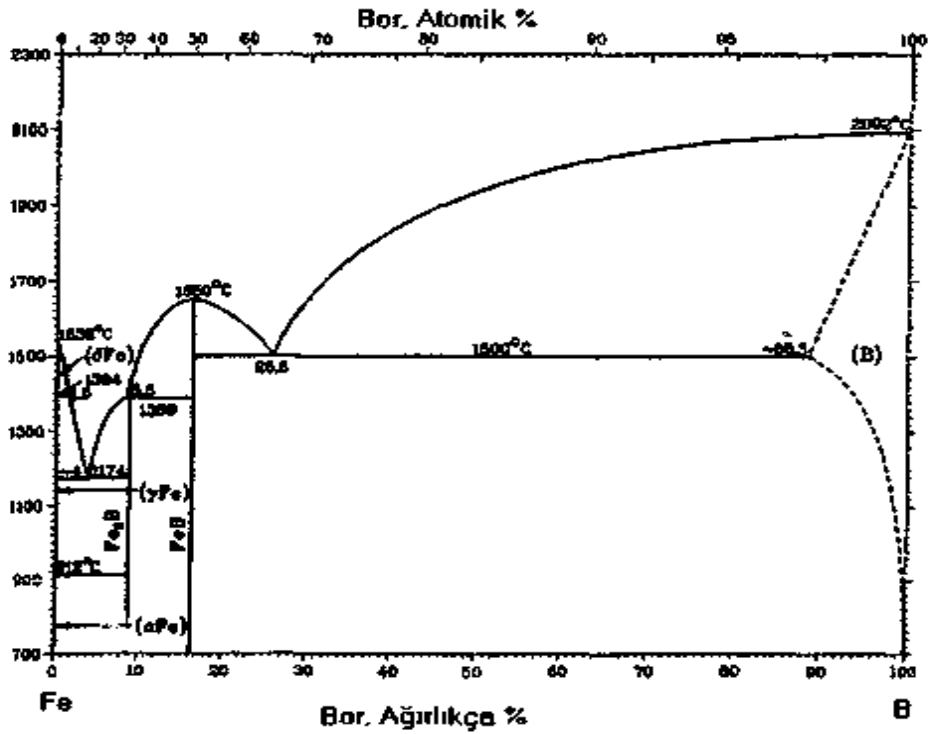
Borür	Kristal Yapı	Teorik Yoğun. (gr/cm ³)	Ergime Sıcak. (°C)	Termal Genleşme (10 ⁶ /°K)	Termal İletkenlik (W/m ² K)	Sertlik (GPa)	Elastik Modül (GPa)	Elektrik Direnci ($\mu\Omega\text{-cm}$)
CoB	Ortog.	8,13	1110		17	11,3		28
CoB	Tetra.	8,05	1260		14	11,3		33
CoB	Ortog.	7,32			17	11,3		76
Cr2B	Ortog.	6,58	1870	14,2 (27–1027°C)	10,9 (20°C)	13,2		107
CrB	Tetra.	6,14		12,3 (27–1027°C)	20,1 (20°C)	11,8		46
FeB	Tetra.	7,34	1410		17,4	13,1–17,7	284	38
FeB	Ortor.	6,73	1650	12 (400–1000°C)	12 (20°C)	16,2–18,6	343	80
MnB	Tetra.	7,18	1580		6,6	17,7		40
MnB	Ortog.	6,36	1890		7,7	20,1		57
MoB	Tetra.	9,23	2280	5 (25–500 °C)		24,5		40
MoB	Hegz.	7,99	2375	7.7 (300–900°C)		11,8		45
MoB	Ortoa.	7,45	2140	S.6(27–1027°C)	— 50 (20°C)	23	672	26
NbB	Ortog.	7,57	2917	12.9(27–1027°C)	15,6 (27°C)	21,5		40
NbB	Hegz.	7,00	3036	8(27–1027°C)	23,5(1027°C)	25,5	637	26
Ni3B	Ortog.	8,20	1175		41,8	11,7		21
NiB	Tetra.	8,05	1225		54,8	14		14
NiB	Ortog.	7,17	1590		21,9	15,2		50
TiB	Ortog.	4,56	2190			22,7		40
TiB	Hegz.	4,52	3225		64,4 (27°C)	33–25,5	551	9
VB	Ortog.	5,60	2570					35
VB	Hegz.	5,07	2742	7.6(27–1027°C)	42,3 (27°C)	20,6–27,5	268	23
WB	Tetra.	17,09	2670	6.7		23,7		
WB	Ortog.		2665	6,9 (20–2205°C)		36,3		
W2B5	Ortog.	13,17	2365 -	7.8-(27–1027°C;	~ 52 (20°C)	26,1	775	22
ZrB	Hegz.	6,10	3245	55,9(27–1027°C)	57,9 (27°C)	22,1–17,9	343–500	10

1.4.2 Fe-B İkili Denge Diyagramı

Bor, periyodik tablonun IIIA grubunda yer almaktadır. Bor elementinin atom numarası 5 ve atom ağırlığı 10,81 gram'dır. Bor atomunun yarıçapı, 0,46 $\text{\AA}$ ve ergime sıcaklığı 2092 $^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bor elementinin valansı +3, iyon yarıçapı 0,23 $\text{\AA}$ 'dür. Bor elementi, rombohedral kristal yapısına sahip olup latis parametreleri sırasıyla $a=1,093\text{ nm}$ ve $c=2,381\text{ nm}$ 'dir. Bor, amorf yapıda da olabilmektedir.

Bir alaşımda katı eriyik oluşum şartları arasında en önemli olanı, atomik boyut faktörüdür. Bor elementi a-Fe'de atom çapına bağlı olarak hem arayer hem de yer alan konumunda bulunabilmektedir Fe-B sisteminde borun atom yarıçapının demirin atom yarıçapından 2.69 kat daha küçük olması, bu elementle katı eriyik yapma imkânı sağlamaktadır (Şekil 1,5). Bor difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjisi 62 kcal/mol olarak tespit edilmiştir.

Fe-B ikili denge diyagramının a-Fe fazına yakın bölgesi, son 50 yıl içerisinde birçok kez değişikliğe uğramış, fakat yapılan son çalışmalarda, borun a-Fe ve α -Fe fazları içerisinde %0,5 B kadar çözündüğü tespit edilmiş, γ -Fe fazı içerisindeki çözünürlüğü ise tam olarak tespit edilememiştir.

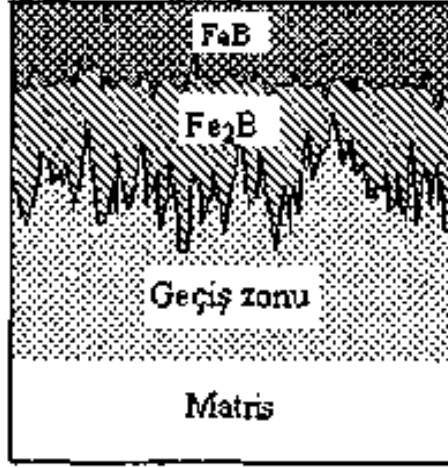


Şekil 1,5. Fe-B ikili denge diyagramı

Denge diyagramından demir ile bor arasında Fe_2B (8,83 B) ve FeB (16,23 B) bileşikleri oluşmaktadır. Ötektik reaksiyon bor iyon difüzyonunun hâkim olduğu γ -Fe tane sınırlarında ve/veya Fe_2B , $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ 'de başlamaktadır. Ötektiğin yapısı ve özellikleri, bileşimin yanında sıvı tabakanın soğuma hızına da bağlıdır. Yüksek soğuma hızında ince mikroyapı, yüksek sertlik ve tokluk elde edilmektedir. İncelemeler sonucunda, Fe_2B fazının ergime sıcaklığının 1389–1410 °C arasında ve FeB fazının ise 1540–1657 °C arasında yer aldığı görülmektedir. Fe_2B peritektik reaksiyon sonucu 1407 °C'de oluşmaktadır.

1.4.3. Borür Tabakasının Yapısı, Bileşimi ve Kalınlığı

Borür tabakasının özellikleri, borlanacak malzemenin bileşimine, borlama metoduna, borlama ortamına ve zaman, sıcaklık gibi işlem şartlarına bağlı olarak, ya düz bir formda veya dişli/kolonsal formda olabilir. Borlama işlemi sonucunda çeliklerde başlıca iki tabaka meydana gelmektedir. Bunlar; borür tabakası ve geçiş zonedir (Şekil 1,6).



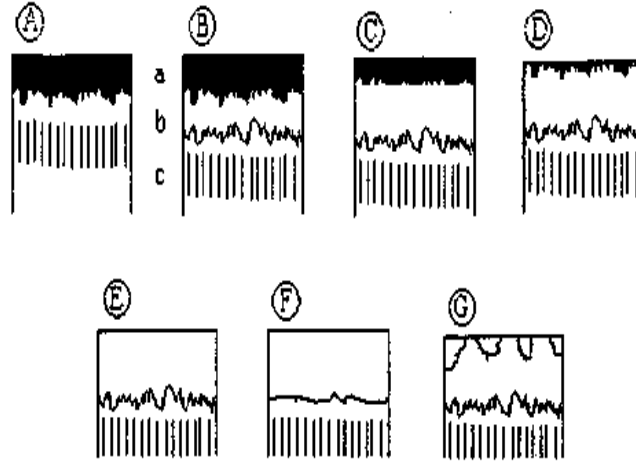
Şekil 1,6. Borür tabakasının şematik olarak gösterilişi

Borür tabakalarının şekli ile ilgili olarak kaplama tabakalarının bileşim ve belirleyici görünüşleri esas alınarak geliştirilmiş bir sınıflandırma sistemi Şekil 1,8’de görülmektedir. Borlanmış bir numunenin metalografik olarak hazırlanması sonucunda, borür tabakasının kalınlığı, yapısı (kolonsal veya düz), porozite içerip içermediği tesbit edilebilir.

Bu tabaka türlerinin görünüşlerinden, kaplama yapısının özelliklerini belirlemek mümkün değildir ancak malzemenin yüzeyinde oluşan borür tabakasının kolonsal yapılu oluşu tamamen tabakanın görünüşü hakkında bilgi vermektedir. Oluşturulan bu sınıflandırma sistemi borür tabakasının görünüşünü karakterize etmek ve borlama işleminin uygun olup olmadığına karar vermek için imkân sağlamaktadır. Bu borür tabaka türlerinden E ve F grubu borürler yani tek fazlı (Fe_2B) tabakalar endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu tip tabakalar her zaman elde edilmeyebilir. Özellikle hâkim tabakalarda daha çok D tipi borür tabakası elde edilmektedir.

Yüksek silisyum veya alüminyum ihtiva eden çeliklerde, bu elementlerin kaplama-matris arayüzeyinde birikerek yumuşak ferrit fazı oluşturmaları sebebiyle, borlama işlemi tercih edilmemektedir (Şekil 1,7-G tipi).

Borlama işlemi sonucunda elde edilen tek fazlı (Fe_2B) borür tabakasının bazı avantajları vardır. Bunlar; Fe_2B fazının, FeB fazına göre daha az kırılgan olması, borlama sonrası ısıtıl işlemlere uygulanabilirliğe sahip olması ve kaplamanın özellikleridir.



Şekil 1,7 Borür tabakalarının türleri, a) FeB; b) Fe₂B; c) Geçiş zonu

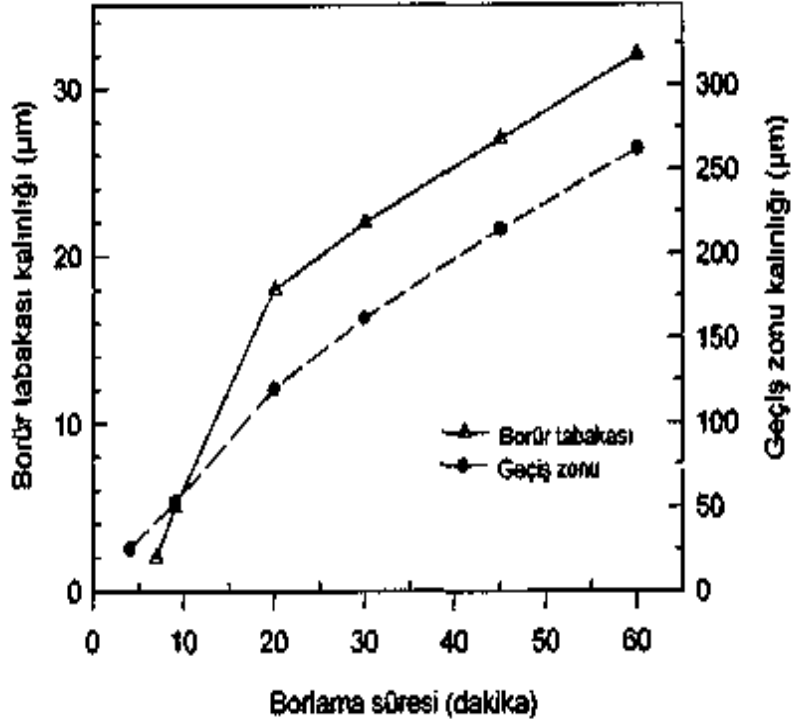
Difüzyon yönüne bağlı olarak, kolonsal yapı sergileyen tek fazlı Fe₂B fazı, çift fazlı Fe₂B+FeB fazlarına göre daha çok tercih edilmektedir. Gerçekte FeB ve Fe₂B fazları birbirlerine basma ve çekme gerilmeleri uygulamakta ve çoğu zaman bu gerilmeler sebebiyle, iki faz arasında yüzeye paralel veya dik ilerleyen çatlaklar oluşmaktadır. Fe₂B basma, FeB fazı çekme etkisi yapmaktadır. Genellikle FeB/Fe₂B arayüzeyinde, FeB fazının çekme gerilmelerine Fe₂B fazının ise-basma gerilmelerine maruz kaldığı ileri sürülmektedir. Bu yüzden termal şok veya mekanik etkiler altında ayrılmalar ve tabaka halinde kalkmalar meydana gelmektedir. Bu sebeple, minimum FeB içeriğine sahip kaplama tabakaları elde edilmeye çalışılmaktadır. Çift fazlı borür tabakalarında yüzeyin hemen altında porozite oluşumu görülür. Bor kaplamalarda, borür tabakasının ince olması durumunda, porozite oluşumu ve tabakanın kalkma riskinin düşük olduğu düşünülmektedir. Eğer çift fazlı Fe₂B+FeB borür tabakası, vakum veya tuz banyosunda 800 °C sıcaklık civarında uzun süre ısıtılma tabi tutulursa, tek fazlı Fe₂B fazı elde etmek mümkün olmaktadır.

Borlama işlemi esnasında çelik bileşiminde bulunan elementlerin yeniden dağılırlar. Bu arada FeB ve Fe₂B tabakalarının, karbon ve silisyum çözündürme kabiliyeti olmamasından dolayı, bor yayını esnasında karbon ve silisyum borür tabakasından içeriye doğru itilirler. Bunun sonucu olarak borür tabakası ile borlanan metal matris arasında 'geçiş bölgesi' olarak isimlendirilen bir yapı meydana gelir.

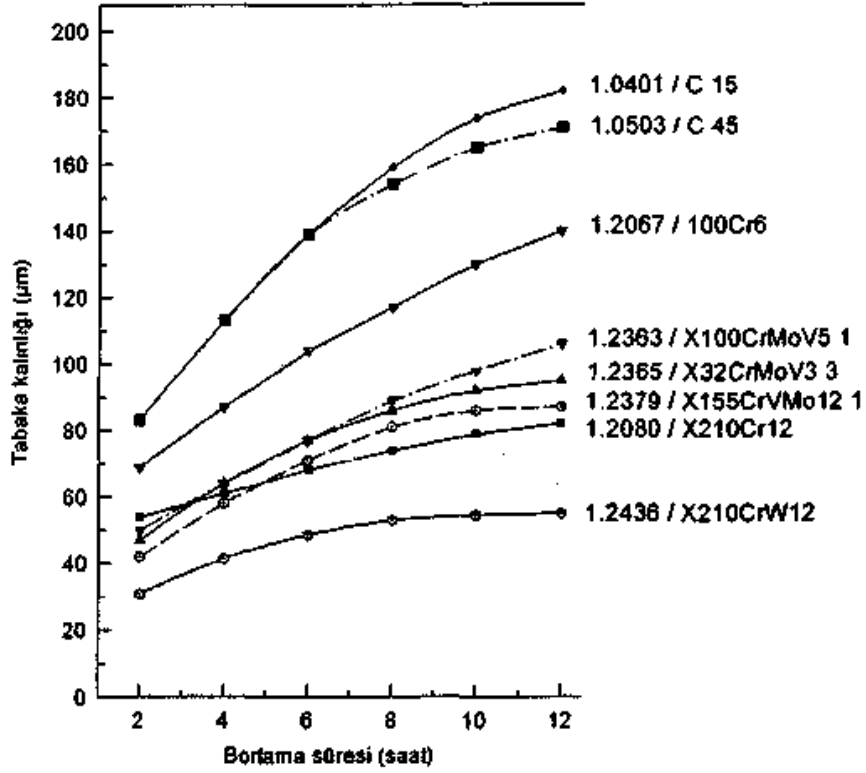
Geçiş bölgesindeki mikroyapı, matrisin mikro yapısından farklı bir görünüme sahiptir ve borür tabakasına göre daha kalındır". Bu bölgedeki bor dağılımının otoradyografi yöntemi ile incelenmesi sonucu, geçiş bölgesi kalınlığının, normal metalografik yöntemle belirlenene göre daha kalın olduğu belirlenmiştir. Aynı yöntemi kullanan Bozkurt", geçiş bölgesinin, borür

tabakasından 10–15 kat kadar fazla bir kalınlığa sahip olduğunu tespit etmiştir. Şekil 1,9’da Ck 15 çeliğinde borlama süresine bağlı olarak geçiş bölgesi ve borür tabakasının kalınlıklarının değişimi görülmektedir. [6]

Genel olarak, geçiş bölgesindeki tane boyuta, ana malzeme tane boyutuna göre daha büyük olduğu halde, sinterlenmiş Fe-C alaşımlarında bu bölgede tane büyümesine rastlanmadığı ileri sürülmektedir. Borür tabakasının kalınlığı, borlanan parçanın kullanım şartlarına göre; borlanan malzemenin cinsi, borlayıcı ortamın bileşimi, işlem süresi ve borlama sıcaklığına bağlı olarak belirli sınırlar dâhilinde istenilen kalınlıkta ayarlanabilir. Optimum borür tabaka kalınlığı mümkün olan en kalın tabaka demek değildir. Tabaka kalınlığı, daima amaca uygun olmalıdır. Eroziyon aşınma için (seramik endüstrisinde kullanılan pres takımlarında olduğu gibi) kalın tabakalar uygundur. Mesela, termoplastik ve termoset malzemelerin ekstrüzyonunda malzeme hamurunda cam ve asbest fiberler, ağaç talaşı veya TiO_2 gibi pigment olarak kullanılan ve oldukça aşındırıcı olan dolgu maddeleri vardır. Adheziyon aşınma için ise (zımba takımlarında olduğu gibi) ince tabakalar gereklidir. Teorik olarak borür tabakasının kalınlığı yaklaşık olarak $5\mu m$ olması adheziyon aşınmadan korunmak için yeterli olacaktır. Bununla beraber Fe_2B kristallerinin birbirine kenetlenen dişli bir yapıya sahip olmaları sebebiyle alaşımsız veya az alaşımlı çeliklerde bu kalınlıkta homojen bir tabaka üretmek mümkün değildir. Metallerin talaşsız şekillendirilmesinde kullanılan yüksek alaşımlı takım çeliklerinde bu amaç için en iyi sonuç $15\text{--}20\mu m$ tabaka kalınlığında elde edilmiştir. Bazı çeliklerde, borür tabakası kalınlığının borlama süresi ile değişimi Şekil 1,9’da verilmektedir. Tabaka kalınlığı arttıkça tabakanın gevrekliği de artacağı için, özellikle çift fazlı (Fe_2B+FeB) tabakalarda, tabakanın çok kalın olmamasına dikkat edilmelidir. Alaşım elementlerinin oranı arttıkça çelik içerisine bor yayılımı daha zor olacak, oluşan borür dişleri daha yoğun, daha üniform ve kapalı olacaktır. [24]



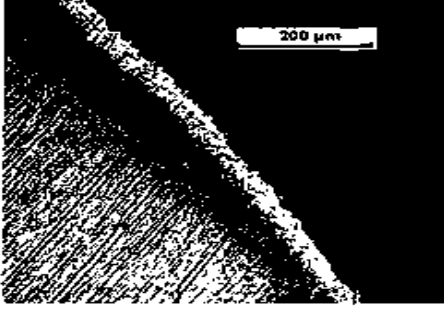
Şekil 1,8. Borür tabakası ve geçiş zonu kalınlığının borlama süresi ile değişimi



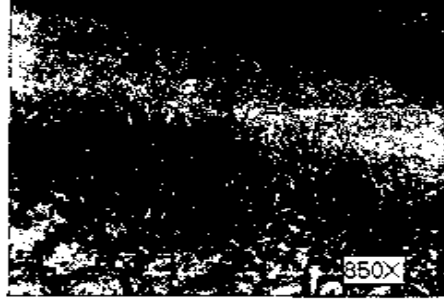
Şekil 1,9. Bazı çeliklerde, borür tabakası kalınlığının borlama süresi ile değişimi

1.4.4 Demir Borürlerin Büyüme Mekanizmaları ve Özellikleri

Borlama süreci iki ana adımda gerçekleşmektedir. Birinci adımda, borlama bileşenleri arasında cismin yüzeyinde ve orta seviyede reaksiyonlar meydana gelir. Parçalanan bileşenler, yüzeyde çok hızlı bir şekilde, sıkı ve ince bir borür tabakası oluştururlar. Bu oluşumun süresi sıcaklığa bağlıdır ve 900 °C 'de 10 dakika civarındadır. Bu aşama, toplam borlama süresine oranla çok kısa bir zaman aldığından ihmal edilebilir. İnce ve sağlam olan birinci tabakanın oluşumundan hemen sonra ikinci adım başlar. Bu adım yayınma kontrollüdür. Oluşacak borlu tabakaların kalınlığı, yayınma kanunlarına uygun olarak borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak parabolik ($x^2=D.t$) bir artış göstermektedir. Borür fazlarının oluşumu, borlama ortamının aktif bor konsantrasyonuna bağlı olarak, tane sınırları ve dislokasyonlar gibi mikro hataların, yüzey pürüzlülükleri ve çizikleri gibi makro hataların bulunduğu daha reaktif noktalarda başlamaktadır. Yüksek saflıktaki demirde olduğu gibi, demir-bor reaktifliğinin çok düşük olduğu şartlarda, bu noktalardan sadece bir kaçı reaksiyona girer ve rasgele dağılmış reaksiyon ürünü adacıklar meydana gelir. Ortamın bor potansiyelinin daha yüksek olduğu durumlarda, metal yüzeyindeki daha az reaktif olan noktalar da devreye girerek sürekli bir tabaka oluşur. Bu durum, daha düşük bor potansiyelli ortam ile daha reaktif metal şartlarında da sağlanabilmektedir. Şekil 1.11'de borür tabakası ve matris içerisindeki bor dağılımını görmek mümkündür. Tablo 1,6'da ise Fe₂B ve FeB fazlarının tipik özellikleri verilmektedir.



(e) Saf nikel, 950°C'de 5 saat borlanmış



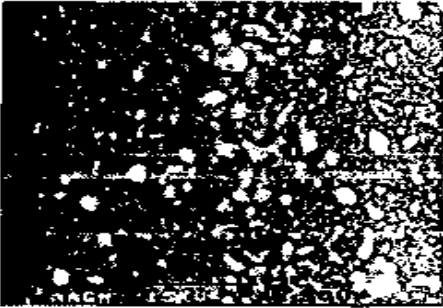
(f) AISI 316L, 950°C'de 6 saat borlanmış



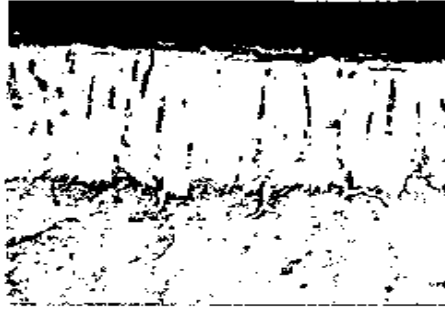
(g) 950°C'de 4 saat borlanmış AISI 1015



(h) 950°C'de 2 saat borlanmış AISI 1040



(i) 950°C'de 1 saat borlanmış AISI M2



(k) 950°C'de 6 saat borlanmış AISI W4

Şekil 1.10. Bazı çeliklerin ve saf metallerin borlanma sonrasındaki mikro yapılan: (a) AISI 4140, (b) AISI H13 (c) Saf Krom, (d) DDK. 80, (e) SafNikel,(f) AISI316L(g), AISI 1015 (h), AISI 1040 (i) ,AISI M2 (k), AISI W4



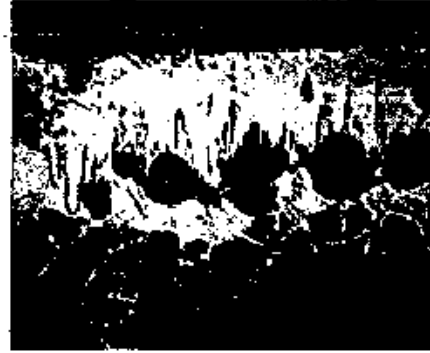
(a) AISI 4140, 950°C'de 8 saat borlanmış



(b) AISI H13, 900°C de 3 saat borlanmış

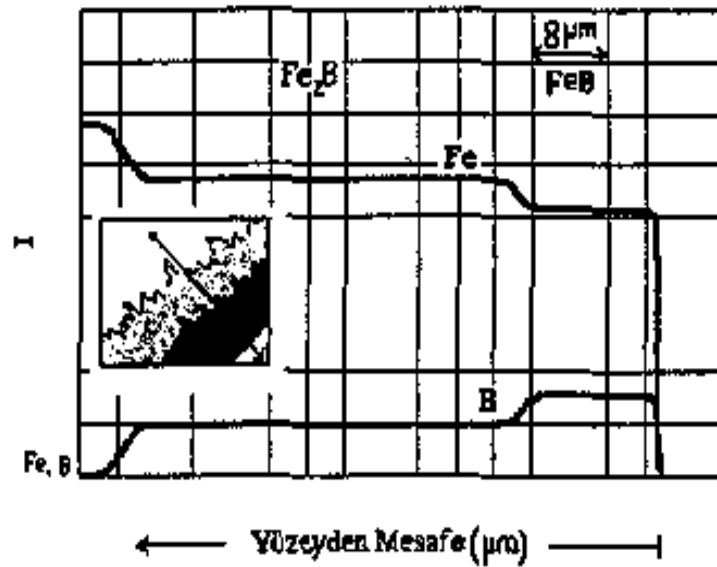


(c) Saf krom, 940°C'de 8 saat borlanmış



(d) DDK 80, 950°C'de 6 saat borlanmış

Şekil 1.10. (Devamı)



Şekil 1.11. Gaz ortamda borlanan bir malzemenin yüzeyinde oluşan borür tabakası ve matris içerisindeki B ve Fe atomlarının dağılımı

Tablo 1,6. Fe₂B ve FeB fazlarının tipik özellikleri

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Kristal Yapı	Hacim Merkezli Tetragonal	Ortorombik
Latis Parametresi (Å)	a=5,078, c=4,28	a=4,053, b=5,495 c=2,946
Bor içeriği (%Ağırlıkça)	8,83	16,23
Yoğunluk (gr/cm ³)	7.43	6,75
Elastisite Modülü (GPa)	280–295	590
Mikrosertlik (GPa)	18–20	19–21
Oluşum Entalpisi (ΔH) (kJ/mol)	—71,13	—71,13
Gibbs Serbest Enerjisi (kJ/mol)	—71,75	—69,47
Ergime Sıcaklığı (°C)	1389–1410	1540–1657
Termal Genleşme Katsayısı (ppm/°C)	7,65 (200–600°C) 4,25(100–800°C)	23 (200–600°C)
Termal iletkenlik (W/m.°K)	30.1 (20°C)	12.0 (20°C)
Elektriksel Direnç	38	80
Renk	Gri	Gri

Çeliklerde yayınma mekanizmasını etkileyen en önemli faktör, yayınmanın gerçekleştirildiği sıcaklıktır. Borlama sıcaklığına bağlı olarak borür tabakasının büyüme kinetiği Eşitlik 3'de verilen bağıntı yardımıyla incelenerek yayınma katsayısı ve yaklaşık tabaka kalınlığı belirlenebilmektedir. D; yayınma katsayısını, D₀; yayman atomların yayınma sabitini (cm²/sn), Q; aktivasyon enerjisini (cal/mol), R; gaz sabitini (1.987cal/mol°K) ve T; mutlak sıcaklığı (°K) ifade etmektedir.

$$D = D_0 \cdot e^{-Q/RT} \quad (3)$$

Borür tabakasının büyümesi FeB ve Fe₂B fazlarında bor atomlarının difüzyon hızı tarafından kontrol edildiği ve bor atomlarının numune yüzeyine dik doğrultuda yayınması sonucu tabakanın büyüme gösterdiği kabul edilmektedir.

1.4.5 Borür Tabakası ve Arayüzey Morfolojisine Alaşım Elementlerinin Etkisi

Demir esaslı alaşımların termokimyasal yöntemlerle borlanması; borür tabakası ve geçiş bölgesinin morfolojisine, tabakadaki fazların cinsine, tabaka ve geçiş bölgesi kalınlığına alaşım elementlerinin değişik şekillerde etkileri görülür. Borür tabakası içerisindeki alaşım elementlerinin cins ve miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerde önemli ölçüde değişiklik görülür. Alaşım elementleri borür tabakası içerisinde katı eriyik borürleri oluşturduğu için borür tabakasının sertliğini artırır. Titanyum, nikel ve kobalt gibi alaşım elementlerinin ilavesi, borür tabakasının büyümesini yavaşlatıp, yüksek bor konsantrasyonuna sahip

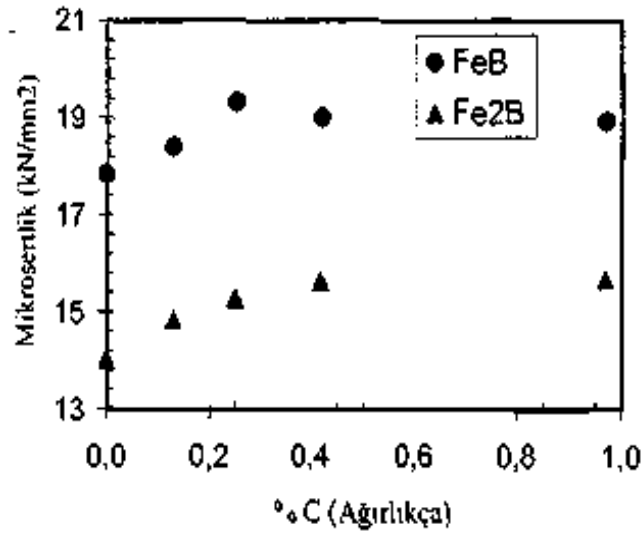
borürlerin oluşumuna sebebiyet vererek çok fazlı, daha kaliteli borür tabakaları meydana getirirler (Mesela, titanyumda TiB_2 fazının meydana gelmesi gibi). Kobalt ve titanyumun borlanması, borür tabakası kolonsal değil oldukça üniform bir yapıdadır. Alaşım elementleri, borür tabakası içerisinde çözünebilme durumuna göre de iki gruba ayrılırlar. Bunlardan birincisi, borür tabakası içerisinde az veya oldukça kararlı borür oluşturarak çözünebilenler (Cr, Ni, Mn, V, Mo gibi), ikincisi ise borür tabakasında çözünürlüğü olmayan (C, Si, Al, Cu gibi) elementlerdir. Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucunda esas olarak (Fe, M)B ve $(Fe, M)_2B$, (M=Cr, Mn, Ni) bileşikleri elde edilir. Oluşan bu borürlere alaşım elementlerinin etkileri farklılıklar arz etmektedir. Borlanan malzemede alaşım elementleri, atom numaralarına ve çaplarına bağlı olarak reaktivite gösterirler. Krom ve manganın atom numaraları demirinkinden düşük olduğundan, matristen yüzeye doğru yayınırken, nikel ve karbon yüzeyden içeriye doğru yayınır. Borlama işleminde kullanılan yöntemden bağımsız olarak, karbon çeliklerinde yüzeyde iki tür borür fazı oluşabilmektedir ve genellikle oluşan borürlerin kolonsal yapıda büyüdüğü görülür. Ancak, yüksek alaşımlı çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabakası ve büyüme mekanizmasına etkisinden dolayı, ara yüzey yapısının kolonsal yerine düz ve kompakt olduğu belirtilmektedir. Alaşım elementlerinin matris ve borür tabakası içerisindeki çözünürlüklerine bağlı olarak, matrisin yakınında oluşturdukları bileşiklerin borlama mekanizmasını etkilemesinden dolayı borür tabakasının yapısı değişmektedir.[25]

Karbon: Karbon hem borür tabaka yapısına, hemde tabaka/matris arayüzey morfolojisine etki etmektedir. Az ve orta karbonlu çeliklerde borür tabakası kolonsal bir yapıya sahip olurken, yüksek karbonlu çeliklerde borür tabakası/matris arayüzeyi düz bir yapıya sahip olur. Çelikteki karbon miktarı arttıkça, borür tabakasındaki Fe_2B fazının kararlılığı artmaktadır. Karbon elementi kaplama tabakası içerisinde çözünmeyip, matrise doğru yayınmakta ve kaplama tabakasının hemen altındaki geçiş bölgesinde $FesC$, $Cr_{23}C_6$, Fe_6C_3 gibi karbürlerin oluşumuna sebep olarak, borür tabakasının hemen altında tamamen perlitik bir yapı oluşturmaktadır. Karbon, geçiş bölgesi denilen bu bölgenin yapısını etkilemekte ve daha düzenli ve sert bir yapı oluşmasına neden olmaktadır. Çeliklerde, borür tabakasında oluşan FeB, Fe_2B fazlarının sertlikleri karbon yüzdesinin artışına bağlı olarak artmaktadır (Şekil 1.12). Bu artış % 0,4 C'a kadar devam etmekte, bu değerin üzerinde ise hemen hemen sabit kalmaktadır. Bu durum, FeB, Fe_2B veya diğer borür bileşiklerinde daha fazla karbon çözünürlüğünün zor olmasından kaynaklanmaktadır.

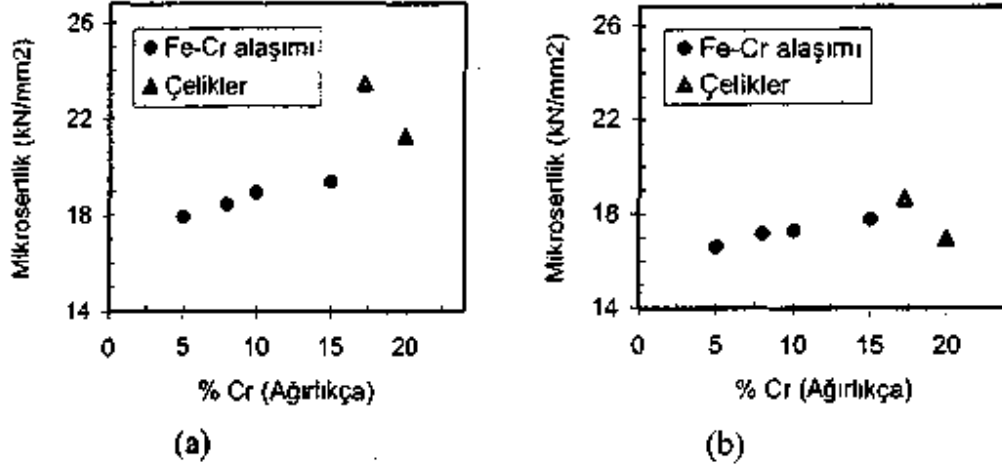
Krom: Kromun, atom numarası demirin atom numarasından düşük olduğundan, altlık malzemeden ziyade borür tabakasında, yani (Fe, Cr)B ve (Fe, Cr)₂B'de daha fazla çözünür ve yüzeye doğru yayılır. Krom da, karbon gibi borür tabakasının hem morfolojisine hem de kalınlığına etki etmektedir. Matristeki krom miktarı arttıkça, borür tabakası/matris arayüzeyi kolonsal yapıdan düz hale gelmesi, alaşım elementinin borür tabakası içerisinde demir atomlarının yerini alması sebebiyledir.

Demir esaslı malzemelerde krom, borür tabakasının kalınlığını azaltmaktadır. Krom, tabaka boyunca hemen hemen homojen bir dağılım gösterir ve kromlu çeliklerde oldukça düzgün bir geçiş bölgesi oluşur. Krom içeren borür tabakasının sertliği, krom miktarı ile doğru orantılı olarak artar (Şekil 1.13).

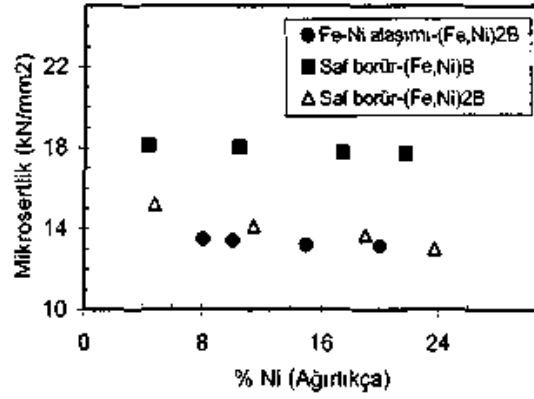
Nikel: Nikel, hem borür tabaka kalınlığı hemde tabaka morfolojisi üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Borür tabakasında nikel miktarının artması, kaplama/matris ara yüzeyinde kolonsal yapının düzlemsel yapıya dönüşmesine ve porozitenin artmasına neden olurken, kaplamanın mekanik özelliklerini de kötüleştirir. Çeliklerde nikel konsantrasyonunun artması, (Fe, Ni)B fazının sertliğini azaltırken (Fe, Ni)B fazında herhangi bir azalmaya sebep olmamaktadır (Şekil 1.14). Şekil 1.16'da, alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına olan etkisi verilmiştir.



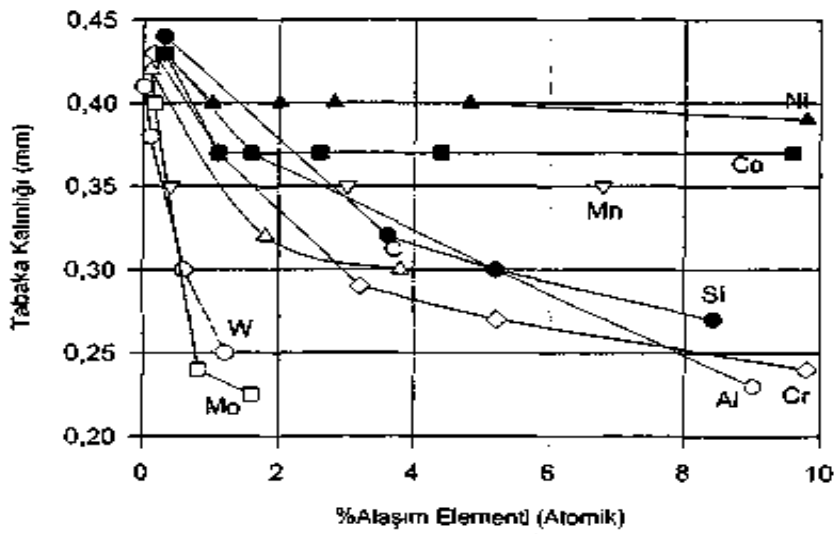
Şekil 1,12. Karbon miktarına bağlı olarak borür tabakasındaki FeB ve Fe₂B fazlarının sertliğinin değişimi



Şekil 1,13. Bazı çelikler ve Fe-Cr alaşımlarında, Cr miktarına bağlı olarak; (a) FeB ve (b) Fe; B fazlarındaki sertliğin değişimi (Çelikler: X8Cr17 ve X10CrNi18)

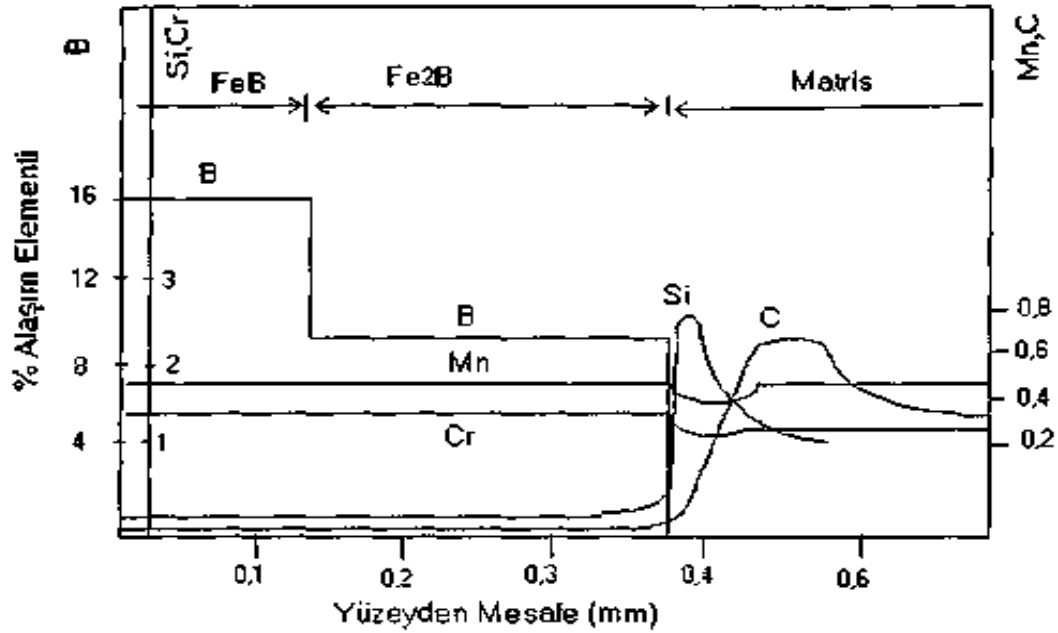


Şekil 1,14. Nikel miktarına bağlı olarak, borür tabakasının sertliğindeki değişimi



Şekil 1,15. Çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi

Silisyum: Karbon elementi gibi silisyumunda borür tabakası içerisinde çözünürlüğü olmadığından borlama işlemi sırasında çeliğin iç kısımlarına doğru itilerek borür tabakası ile metal arayüzeyinde yoğunlaşır ve burada ferrit fazı meydana gelir. Bu bölgede meydana gelen $\text{FeSi}_{0.4}\text{B}_{0.6}$ ve Fe_4SiB_2 bileşikler ise mekanik özelliklerin olumsuz yönde etkilenmesine neden olmaktadır. Bu çok yumuşak bir faz olduğu için tabakada çatlamalara, dökülmelere ve çökmelere neden olabilir. Belirtilen bu alaşım elementlerinin dışında, W, Mo ve V, borür tabakasının kalınlığını azaltarak düzlemsel yapıda borür tabakası oluşumunu teşvik ederler. Şekil 1,16'de çeliklerin borlanması sonucunda, borür tabakası boyunca alaşım elementlerinin dağılımları şematik olarak verilmektedir.



Şekil 1,16. Borlanmış çeliklerde borür tabakası boyunca elementlerin şematik olarak dağılımı

1.5 Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulamaları

Bor kaplanmış malzemeler, göstermiş oldukları üstün özellikler sebebiyle otomotiv, makine, kimya, tekstil ve gıda endüstrileri başta olmak üzere çok geniş bir endüstriyel kullanım alanına sahiptir. Özellikle adheziv ve abraziv aşınma şartlarında birçok kullanım alanı mevcuttur (Tablo 1,7). Aşınmanın büyük bir problem teşkil ettiği alanlarda borlama işlemi parçaların kullanım ömrünü artırarak büyük ekonomik faydalar sağlamaktadır.

Aşağıda borlama işleminin bazı endüstriyel uygulamaları verilmektedir:

- Tütün yapraklarını delip şerit halinde kesen %17 CrTi paslanmaz çelik parça, tütün

yapraklan üzerindeki mineral parçacıktan sebebiyle şiddetli bir erozyona uğrar. Her 4 haftada bir değiştirilmek zorunda kalan bu parça 850 °C'de 5 saat süreyle EKabor 1 veya 2 toz ortamında borlanması sonucunda servis ömrü 2 yıla kadar çıkmış yani 25 kat artmıştır.

- %0,9C. %2Mn CrV (DİN no: 1,2842) çeliğinden yapılan, seramik pota üretiminde kullanılan kalıplann servis ömrü, 900°C'de 5 saat horlamakla 3 kat artmıştır.

- Ticari kahve kavurma fabrikaları için borlanmış kahve öğütme diskleri, borlanmamış olanlara nazaran 5 kat daha uzun ömürlü olmuştur. Bu diskler %0,45C'lu çelikten (DİN no: 1,0503) yapılmış olup borlama işlemi 850 °C'de 4 saat süreyle gerçekleştirilmiştir.

- Çok büyük kimya fabrikalarında kullanılan ve 18/10 CrNiMoTi (DİN no: 1,4571) çeliğinden yapılan su besleme regülâtörü valfindeki 4 delikte, erozyon nedeniyle 2,000 saatlik bir çalışma süresi sonrasında tek delik oluşmuştur. Stellite kaplı parça ise yaklaşık 8,000 saat çalışma sonrasında kullanılamaz hale gelmiştir. Fakat bu valf %13 Cr'lu çelikten (DİN no: 1,4006) yapıp 900 °C'de 6 saat borlanmış ve uygun bir ısıtma işleminden geçirildikten sonra ise 18,000 saat çalışma süresi sonunda bile hala kullanılabilecek durumda olduğu tespit edilmiştir.

- Daha önceleri 90° açılı ve 100 mm çapındaki dirsek ve bunun engelleme plakası ostenitik CrNi çeliğinden yapılıyor ve servis ömrü ise en fazla 6 hafta oluyordu. Bu dirsek alaşımsız St.37 çeliğinden yapıp 1000 °C'de 6 saat borlama sonucunda servis ömrü 4–6 kat artmıştır.

- Ağırlığı yaklaşık 500 kg olan daralan dirseğin (çapı 400/250 mm) iç yüzeyi borlama pastası ile 950 °C'de 10 saat süre ile ve argon gazı altında borlanmıştır. Pasta ile borlama maliyeti 3,000 DM olurken, borlama tozu ile yapılanda ise 5,000 DM olmuştur. Yani pasta borlama ile maliyet % 40 azalmıştır.

- Endüstriyel yakıt yakma üniteleri ve kimya endüstrisinde sıvı kimyasal atıkların depolandığı yerlerde, yakma nozülleri. Pervane gibi dönen parçalar ve enjektör başları başarı ile senelerden beri horlanmaktadır. Bu endüstrilerde yanan yakıt, buhar ve atıklar nozüle 8 barlık bir basınçla gelirler. Çoğunlukla düşük P ve S'lü % 0,45 C'lu (DİN no: 1,1191, Ck 45) çelikten yapılan bu parçalar. 900 °C'de 6 saat EKabor 2 ile borlama sonucunda servis ömrü yaklaşık 2–3 kat artmıştır. Sıvı atıkların prusik asit içermesi durumunda ise (DİN no: 1,4571) AISI 316 Ti çeliğinden yapılan bu parçalar. 850 °C'de 6 saat EKabor 2 ile borlanması sonucunda servis ömrü yine yaklaşık 2–3 kat artmıştır.

- Boru klipi yapımında kullanılan kalıplar %0,9C. %2Mo CrV (DİN no: 1,2842) çeliğinden yapıp sert krom kaplamaktadır. Bu şekilde üretilen kalıplardan 10,000 parça

ancak üretilebilirken, 900°C'de 6 saat EKabor 1 tozu ile borlanıp ısıtılma işlem görmüş olan kalıplardan 17,000 parça üretildikten sonra bile temiz yüzeyli ve gerekli boyut toleransına sahip parçalar üretilebilmiştir.

- Demiryolu taşıyıcı bojilerin süspansiyon parçaları %3Ni, %1Cr, %0,5Mo (DİN no: 1,6746) çeliğinden yapılmaktadır. Çok pahalı olan bu parçalar, 100,000 km de bir değiştirilirken, 900 °C'de 4 saat borlama sonrasında 200,000 km'den sonra bile hala kullanılabilir özelliklerde olduğu tespit edilmiştir.

- Kesici takımlarda iki farklı tipte aşınma meydana gelir. İşlenen metal ise kesici takımında soğuk kaynak (adhezif aşınma), plastik gibi metalik olmayan bir malzeme işlenirse erozyon meydana gelecektir. Kesici takımların horlanması sonucu her iki aşınma türü büyük oranda ortadan kalkmaktadır.

Rotorlar ve darbe ile kesici parçalardan %18 Cr. %9Ni Ti çeliğinden yapılanlar 850 °C'de 6 saat horlanmak suretiyle kullanım ömürleri 3 kat artmıştır.

- Kishimoto'ya göre Japonya'da 1972'den beri geniş çapta ve başarılı bir şekilde dövme kalıpları borlanmaktadır. Bu kalıplar %0,4C, %5Cr, %1Mo,%1V yapılmış olup 900 °C'de 3 saat EKabor 1 ile borlanmıştır. Bu kalıplar havada sertleştirilmiş ve temperlenmiştir. Kalıpların servis ömrü en az 2–3 kat, en fazla ise 10 kat artış göstermiştir.

- PVC üreten bir fabrikada vinil klorür taşıyan borular %18Cr, %9Ni Ti ve %18Cr, %10Ni MoTi çeliklerinden yapılır. Bu boruların ömrü 6 ay kadar iken borlama sonrası ise bor tabakasının kalınlığı 15 µm olmasına rağmen 2 yılın üzerine çıkmıştır. Borlama işlemi 850 °C'de 4 saat süreyle EKabor 2 tozuyla yapılmıştır.

Tablo 1,7 Borlanmış demir esaslı malzemelerin başlıca uygulamaları

] AISI	Altlık Malzemeleri		Uygulama Alanları
	BSI	DİN	
		St37	Kovanlar, sürgüler, nozüller, taşıma tüpleri, taban plakaları, besleyiciler, bıçaklar ve yardımcı elemanlar
1020		C15,Ck15	Dişli sürücüler, pompa şaftları
11043		C45	Pinler, yardımcı kavrayıcılar, aşındırıcı diskler ve sürgüler.
		St 50	Döküm akıttıcılar, nozıllar ve kollar.
İ138		45S20	Şaft koruma parçaları, mandireller.
1042		Ck45	Girdaptı akış elemanları, nozüller(petro yakıtlar için) merdaneler, sürgüler ve kovanlar.
		C45W3	Giriş plakaları
W1		C60W1	Kavrama aynası, yardımcı baralar
D3		X210Cr2	Kovan, basma aletleri, plaka, mandreller, çekiçler, kalıplar.
C2		115CrV3	Çekme kalıplan, enjektörler. jstaklar, giriş pinleri
		40CrMnMo7	Giriş plakaları, bükme kalıpları
H11	BH11	X38CrMoV5	Vanalar, enjeksiyon silindirleri, çıkıcılar
H13		X40CrMoV5	Ağzlar, ingot kalıpları, sıcak dövme için alt ve üst kalıplar ve matrisler, diskler
H10		X32CrMoV3	İnjeksiyon kalıplama kalıplan, besleyiciler, sıcak şekillendirme için alt ve üst kalıplar ve matrisler.
D2		X155CrVMol2	Çekme kalıplan, soğuk haddeleme merdaneleri.
		105WCr6	Kalibreli merdaneler
D6		X210CrW12	Sıkıştırma merdaneleri
Sİ	BSI	60WCrV7	Basma ve çekme matrisleri, mandrelleri, doğrultuculan, Kalıplan ve kavrama ringleri.
D2	BS224	X16VMol2	Çekme kalıplan, soğuk haddeleme merdaneleri.
L6		56NiCrMo4	Ekstrüzyon kalıpları, kovanlar, döküm ileticiler, dövme kalıplan ve serbest dövme elemanları.
		X45NiCrMo4	Kalibreli kalıplar, basınç pedleri ve kalıpları.
02	B02	90MnCrV8	Kalıplar, bükme kalıpları, basınç takımları, kalibreli merdaneler, kovanlar, çekme kalıplan, yardımcı baralar, diskler, delik açan çekiçler.
E52100		100Cr6	Toplar, merdanelere, yardımcı baralar ve yardımcı elemanlar.
		Nİ36	Demir dışı metallerin döküldüğü döküm parçaları.
		X50CrMnN	Magnetize edilemeyen takımların parçaları (ısıl işlem yapılabilir.).
4140	708A42 (En19C)	42CrMo4	Basma takım ve kalıpları, ekstrüzyon amaçlı vidalı sürücüler,) merdaneler, ekstrüzyon baraları ve geri dönüşüz valfler.
4150	708A42 (CDS-15)	50CrMo4	Taban plakalarının nozülleri.
4317		17CrMo4	Konik, vida ve silindir dişliler; şaftlarTzincir bileşenleri
5115		16MnCr5	Helisel yatak tekerlekleri, yardımcı baralar, yatak kolonları
6152		50CrV4	Güvenlik plakaları, sürücü parçaları, valf yayları, yay yuvaları.
302	302S25	X12CrNi	Vida yuvaları ve kovanlar.
316	316S16 (EN583)	X5CrNiMo8	Plastik ve kauçuk endüstrisinde kullanılan delinmiş veya iüçük holler açılmış yuvalar.
		G-X10CrNiMo8	Valf açıcıları, tekstil ve kimyasal endüstri için parçalar.
410	410S21	X10Cr3	Valf bileşenleri ve besleyiciler.
420	420S45 (En56D)	X40Cr3	Valf besleyicileri, dalıcı rotlar, besleyiciler, yardımcı ekipmanlar, kimyasal işlemlerde kullanılan parçalar.
		X35CrMo7	Şaftlar, valfler, dingiller.

- Mekanik test cihazlarının tutucu çeneleri borlandığında tutucu dişlerin daha fazla yüke dayandığı gözlenmiştir. Bu ise, tutucu çenelerin orijinal testere dişli profil yerine trapezoidal bir profilde yapılabilmesine imkan sağlar ve böylece üretimi daha kolay olur. Borlama işlemi ile üretim maliyetlerinin azaltılmasından başka, malzeme maliyetleri de düşürülür. Bu tutucu çenelerde yüksek alaşımlı takım çelikleri (%2,1C, %12Cr'lu çelik gibi) yerine, ısıl işlem görmüş daha ucuz çelikler (%1Cr Mo'lu veya %1Cr V'lu çelikler gibi) kullanılabilir. Bu çeliklerin horlanması 900 °C'de 4–5 saat süre ile gerçekleştirilir. Borlanmış tutucu çeneler, yüksek basma gerilmelerinde borür tabakasının altlık malzemeden ayrılmasını önlemek ve yeterli çekirdek sertliğine ulaştırmak için ısıl işleme tabi tutulur. Bu durumda ostenitleme nötral tuz banyosunda (siyanürsüz) yapılır, su verme ise yağda gerçekleştirilir.

- Geri dönüşsüz valfler % CrMo çeliğinden yapılırlar. Nitrürleşen olan bu valfler silikon içeren elastomerlerin işlenmesinde kullanıldığında 5 ila 8 gün içerisinde ömrünü tamamlamaktadır. Eğer bu valf, 950 °C'de 5 saat süreyle Ekabor 2 ile borlandıktan sonra vakum altında uygulanan ısıl işlem ile çekirdek sertliğinin de arttırılması sonucunda servis ömrü ortalama 8 kat artmıştır.

- Volkswagen Golf ve Audi otomobillerinin dizel motorlarının DIN 42CrMo4 çeliğinden yapılan yağ pompası dişlileri 920 °C'de 1,5 saat Ekabor 1 ortamında borlandıktan sonra su verme ısıl işlemi ile sertliği 52–55 Rc'ye getirilmiş ve böylece adhezif aşınmaya karşı direnç sağlanarak servis ömürleri arttırılmıştır.

- Kayaları delmekte kullanılan kesici uç, SAE EX 30 CrNi çeliğinden yapılmaktadır. Yüzeyden içeriye doğru homojen bir sertlik dağılımı sağlamak için önce karbürizasyon yapılan ve sonra 900–920 °C'de 10 saat süreyle Ekabor ile horlanan bu parçanın ömrü 3 kat artmıştır. Aynı zamanda % 15 daha fazla yük uygulamak ve dönme hızını daha da arttırmak mümkün hale gelmiştir.[11]

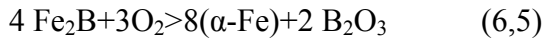
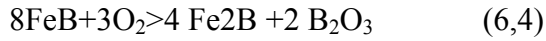
1.6. Çeliklerde Bor Kaplamaların Aşınma Özellikleri

1.6.1 Borlanmış Çeliklerin Kısa Süreli Tavlama

Bor kaplamaların temas halinde sürtünme katsayıları genel olarak oldukça yüksektir. Bu yüzden oldukça sert ve yüksek aşınma direncine ihtiyaç duyulan yerlerde tercih edilmektedir. Bu amaçla en çok kullanılan bor kaplamalar, demir borür ve titanyum diborür kaplamalardır. Demir borür kaplamalar, çok düşük aşınma ve yüksek sürtünme direncini ($\mu=0,38-0,63$) bir

arada bulunduran ilginç tribolojik özelliğe sahip malzemeler olmaları sebebiyle fren sistemlerinde kullanılabilmektedirler.

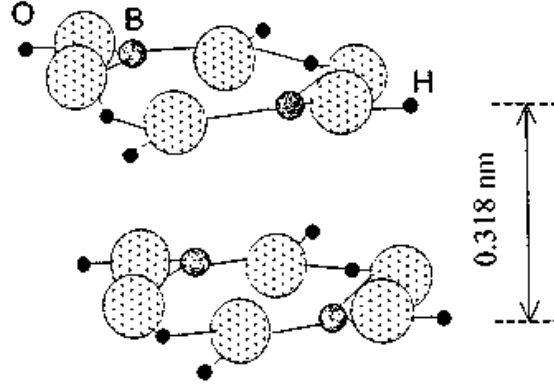
Son yıllarda Sliney ve Peterson, borik asidin yağlayıcı özellikleri üzerine önemli çalışmalar yapmışlardır. Camsı borik asidin cam geçiş sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta (450 °C) viskozitesinin hızlı bir şekilde azaldığını ve borik asitle yağlanan yüzeylerde sürtünme katsayısında önemli bir düşüş meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Takeuchi ve arkadaşları, FeB ve Fe₂B tabakalarında koruyucu oksit tabakası değişik reaksiyon mekanizmaları sonucunda oluştuğunu belirtmişlerdir. FeB tabakasında FeB'nin bileşeni olan bor, ortamdaki oksijenle tercihi olarak reaksiyona girerek yüzeyde B₂O₃-Fe₂B tabakaları oluşturur. Bunun sonucunda FeB tabakasının kalınlığında artış meydana gelir. Fe₂B tabakasında ise Fe₂B'nin bileşeni olan bor oksijenle birleşerek B₂O₃ ve α-demirini meydana getirir.



Bunun yanında Erdemir, bor kaplanmış çelik yüzeylerinde spontane bir reaksiyonla borik asidin oluşturulabildiğini de göstermiştir. Öncelikle Erdemir, Al₂O₃ üzerine kaplanan (B₂O₃) filmlerin % 50 oranında nem içeren atmosferik şartlarda 0,02–0,05 sürtünme katsayısına sahip olduğunu tespit etmiştir. Daha sonra Erdemir ve arkadaşları B₂O₃ kaplamanın yüzeyinde kendiliğinden meydana gelen bir kimyasal reaksiyon sonucunda borik asit (H₃BO₃) film tabakalarının oluştuğunu belirtmişler ve bunun bir sonucu olarak da çok düşük sürtünme katsayısı elde etmişlerdir. Burada, reaksiyon hızının artırılmasına gerek duyulmadığı ve doğal olarak gerçekleştiği önemli bir açıklama olarak belirtilmektedir. Oluşturulan bor oksit (B₂O₃) filminin her yerinde ince bir borik asit (H₃BO₃) tabakasının yer aldığı ve triklinik bir kristal yapıya sahip olduğu görülmektedir (Şekil 1.17). Her bir tabakada yer alan atomlar, sıkı paket yapıda olup birbirlerine kuvvetli bağlarla bağlanmışlardır. [7]

Bor ve oksijen atomları arasındaki bağlar, bazı iyonik karakterli özelliklerinin yanında kuvvetli kovalenttir. Hidrojen bağları düzlemsel bor/oksijen gruplarını bir arada kuvvetlice tutar. Atomik tabakalar, birbirlerine 0,318 nm uzaklıktadır ve zayıf Van der Waals kuvvetleri ile birbirlerine bağlanmıştır. Buna göre borik asidin yağlayıcı özelliği büyük bir ihtimalle kristal yapısından kaynaklanmaktadır. Kayma gerilmesi altında kristal tabakaları kendi aralarında, relatif hareketin yönüne paralel olarak dizilirler. Biri diğerinin üzerinde kolaylıkla kayabildiği için düşük sürtünme katsayısı elde edilmektedir. Borik asit tabakasının kristal yapısı MoS₂ veya grafit ile benzerlik göstermektedir. MoS₂ ve grafit gibi kuru yağlayıcıların malzeme yüzeyine adaptasyonunun hem masraflı hem de birçok güçlüğü beraberinde

getirmesi böyle bir sistemin önemini ortaya çıkarmaktadır. Burada borik asit filmi kendi kendine oluşmaktadır. Borik asit, B_2O_3 fazının ortamın relatif nem ile reaksiyona girmesi sonucunda oluşmaktadır.



Şekil 1.17. Borik asidin kristal yapısı

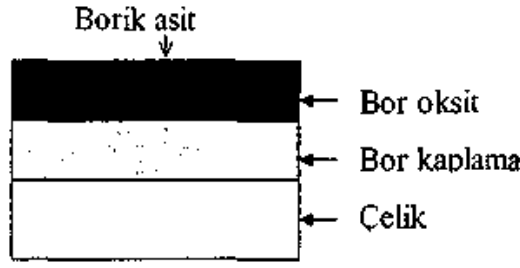
Bor kaplanmış çeliklerin yüzeyinde B_2O_3 tabakası oluşturmak için kısa süreli yüksek sıcaklık işlemi gerektirmektedir. Kısa ısıtma işlemi periyodundan dolayı, Fe atomları hem demir hem de borun kompleks oksitleri, demir oksidin oluşması için gerekli zamanı bulamazlar. Soğutumu sırasında ısıtma sırasında atmosferin nemi ile reaksiyon oluşarak yüzeyde borik asit tabakası oluşmaktadır. (Şekil 1.18) Oluşan kimyasal reaksiyonlar aşağıda verilmektedir.



“Erdemir ve Bindal”, bor kaplanmış ve kısa süreli ısıtma işlemi uygulanmış çeliklerin sürtünme katsayısı ve aşınma hızlarını son derece düşük değerlere (Şekil 1.20) taşıyan, bor kaplanmış çelik yüzeyindeki borik oksit ve borik asit tabakalarının varlığını mikro-lazer Raman spektroskopisi ile ispatlamışlardır. [11]

Son derece iyi kimyasal bütünlüğü sebebi ile B_2O_3 filmlerin, iyon dağlamalı seramik yüzeylere oldukça iyi yapıştığı görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda uygulamaya tabi tutulan seramikler için borik asidin kullanımı $170^\circ C$ 'nin üzerinde H_3BO_3 parçalanarak B_2O_3 'e dönüşüp yağlayıcı özelliğini kaybetmesi, $450^\circ C$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda B_2O_3 'in oldukça sıvı bir hal alıp seramik altlık malzeme ile reaksiyona girerek yüksek korozyon aşınmaya neden olması sebebiyle tavsiye edilmemektedir.

Metaller için bu kimyasal reaksiyon, ihmal edilebilir ve düşük sürtünme viskoz akış yağlama ile etkisini devam ettirmektedir.



Şekil 1.18. Bor kaplanmış çelik yüzeyinde oluşturulan bor oksit ve borik asit tabakasının şematik gösterilişi

1.6.2. Borlanmış Çeliklerin Aşınma Özellikleri

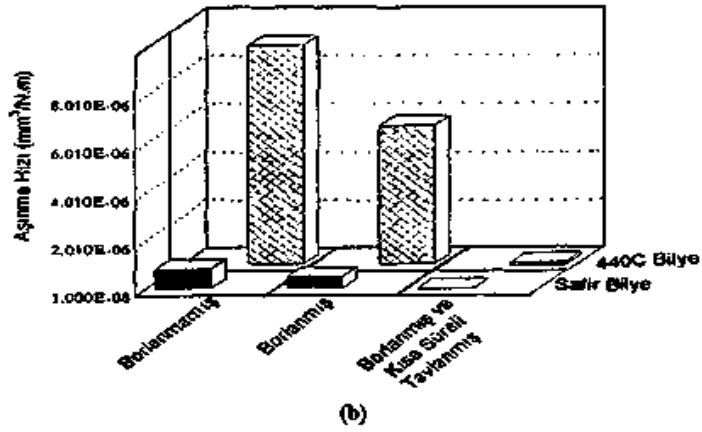
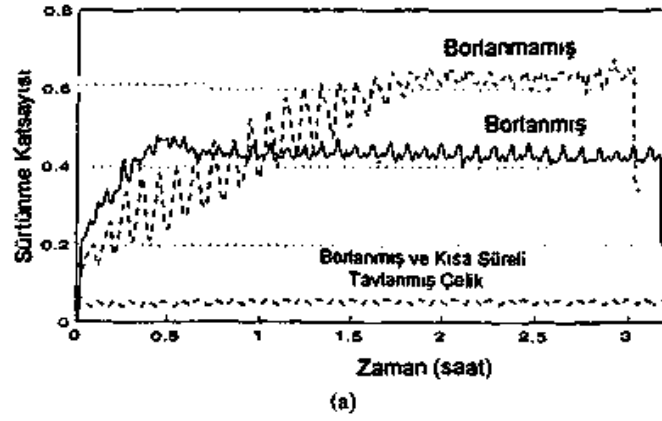
Makine elemanlarının aşınma dayanımlarını artırmanın önemli yöntemlerinden birisi de bor yayınımlı ile yüzeylerinde oldukça sert borür tabakalarının oluşturulmasıdır. Metalik malzemelerin abrazif aşınma direnci ile sertlikleri arasında doğrusal bir ilişki vardır, ancak malzeme mikroyapısının, aşınma dayanımına etkisi, sertliğine olan etkisinden çok daha fazladır. Borlama işlemi sonucunda ise, malzemenin sertliğinde muazzam bir artış meydana gelmektedir. [8]

Borlama işlemi ile karbon çeliklerinde 1500–2000 HV, alaşımlı çeliklerde 2500–2800 HV ve yüksek hız çeliklerinde 2800–3300 HV'e ulaşan yüzey sertlik değerleri elde edilebilmektedir. Bu ise borlama işleminin abrazif aşınma dayanımını artırması demektir (Şekil 1.19).

Çeşitli yayınma işlemlerinin; işlem sıcaklığı, tabaka kalınlığı ve sertliklerinin karşılaştırılması Tablo 1.11'de verilmektedir. Şen, yaptığı çalışmalarda ise borlamanın, diğer yüzey işlemleri ile kıyaslamasını yaparak, borlanmış çeliklerin aşınma hızının ne kadar düşük olduğunu göstermiştir.

Karbürleme ve borlama işlemi uygulanmış (AISI 1100 serisi) çeliklerinin aşınma davranışları karşılaştırıldığında borlamanın, karbürlemeye göre özellikle geçiş bölgesi üzerindeki yüklemelerde adhezif aşınma dayanımı açısından çok daha iyi sonuçlar verdiği ve bu özelliği yüksek sıcaklıklarda dahi muhafaza ettiğini belirtilmektedir. (Şekil 1.20).

Borlanmış numunelerde sürtünme katsayısında meydana gelen değişimler, çeşitli araştırmacılar tarafından, değişik teknikler kullanılarak belirlenmiş ve hepsi borlamanın sürtünme katsayısını düşürdüğü sonucuna varmışlardır.



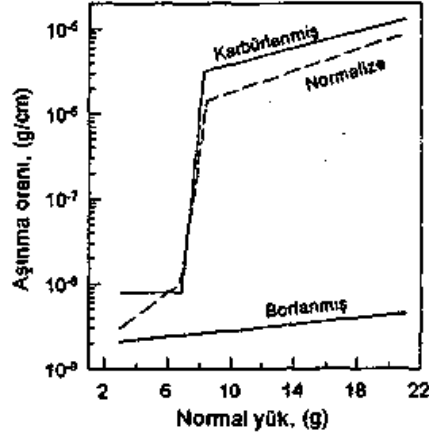
Şekil 1.19. Çelik matris, bor kaplanmış çelik ve bor kaplama+kısa süreli ısıtılmış çelik malzemelerin, (a) 440 C paslanmaz çelik bilyeye karşı aşınma deneyleri sonucunda elde edilen sürtünme katsayıları ve (b) 440 C paslanmaz çelik ve safır bilyeye karşı aşınma hızları

Tablo 1,8. Yayınma işlemlerine ait bazı özellikler

Yüzey İşlemi	Malzeme	İşlem Sıcaklığı (°C)	Sertlik (HV)	Tabaka Kalınlığı (mm)
Karbürleme	AISI 4620	800/900	700	225
Nitrürleme	Paslanmaz	500/600	800	200
Karbonitrürleme	AISI4620	700/900	700	500
Borlama	AISI 4620	900/1100	1500	50
Titanyum Karbür (TiC)	AISI 440C	900/1100	3000	75
Vanadyum Karbür (VC)	AISI D2	900/1100	2500	75
Ferritik Nitrokarb. (FNC)	AISI 4620	500/600	700	10
Referans Kaplamalar				
Krom Kaplama (Cr)	AISI4620	Oda Sıcaklığı	900	75
Elektroliz Ni/PONi)	AISI4620	Oda sıcaklığı/100	700	30

Tablo 1,9. Borlanmış ve borlanmamış malzemelerin statik sürtünme katsayıları

Malzeme Çifti	İşlem	Yüzey Pürüzlülüğü (um)	Statik Sürtünme Katsayısı
01–01 Takım	Borlanmış	0.076	0.07–0.09
Çeliği	Borlanmamış	0.076	0.22–0.24
1018–1018	Borlanmış	0.076	0.14–0.15
Karbon çeliği	Borlanmamış	0.076	0.19–0.24
302–302	Borlanmış	4.572	0.16–0.18
Paslanmaz çelik	Borlanmamış	0.076	0.19–0.22
Tungsten-	Borlanmış	0.076	0.12–0.14
Tungsten	Borlanmamış	0.076	0.45
Molibden-	Borlanmış	6.858	0.16–0.17
Molibden	Borlanmamış	0.076	0.38
Nikel-Nikel	Borlanmış	0.076	0.13–0.14
	Borlanmamış	0.076	0.42

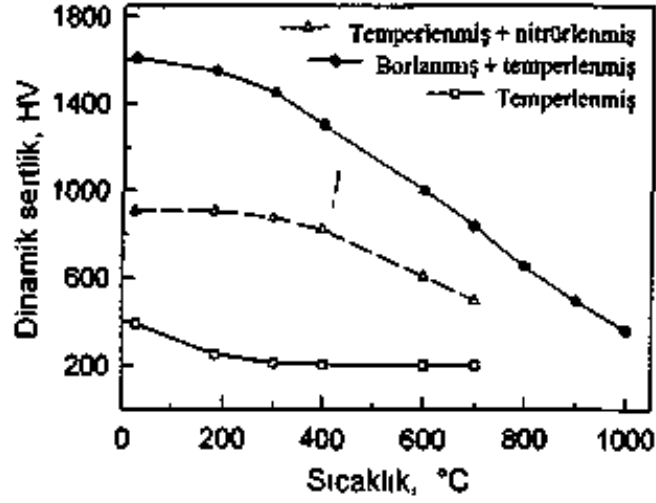


Şekil 1.20. Çeşitli yayınma işlemleri uygulanmış çeliğin aşınma davranışları

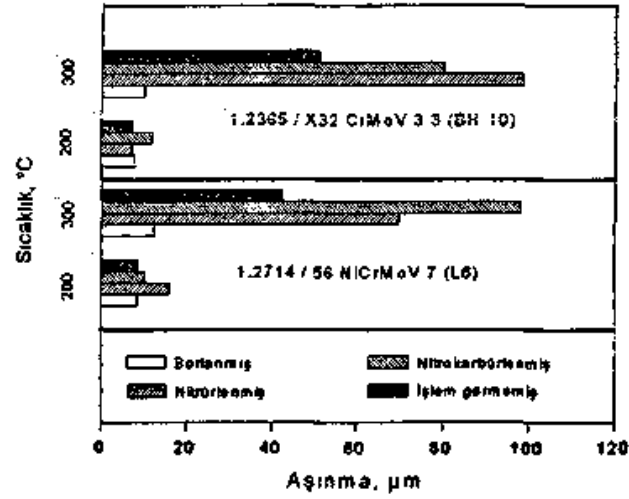
Borlanmış yüzeylerin aşınma açısından diğer bir üstünlüğü, gerek çalışma ortamından kaynaklanan, gerekse kayma sürtünmesi sonucunda ortaya çıkan ısının, borlu tabakaların sertliklerinde ve aşınma dayanımlarında büyük bir düşüşe neden olmamasıdır (Şekil 1.21).

Wulp, değişik sıcaklıklarda ve kuru sürtünme şartlarında yaptığı deneyler sonucunda Şekil 1.22 'deki sonuçları bulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi 200 °C sıcaklıkta aşınma dayanımları arasında belirgin bir fark yok iken, 300 °C sıcaklıkta borlama işlemi uygulanmış yüzeylerin aşınma dayanımı, nitrürleme ve karbonitrürleme uygulanmış yüzeylere göre oldukça yüksektir. [4]

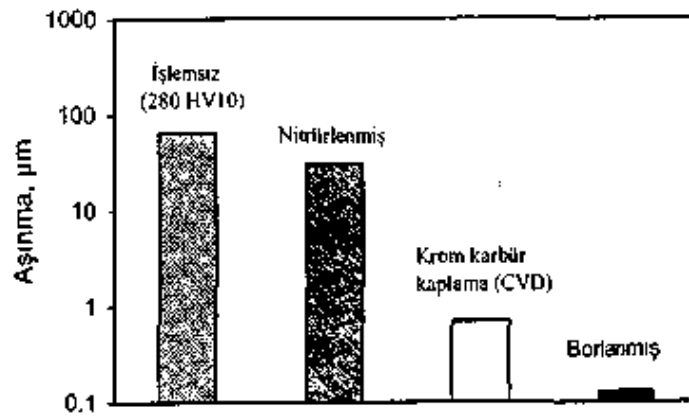
Borlanmış çelik yüzeylerin aşınma davranışlarında, tek fazlı (Fe_2B) tabakaları, çift fazlı ($\text{FeB}+\text{Fe}_2\text{B}$) tabakalarından daha iyi sonuçlar vermektedir. Borür tabakalarının abrazif aşınma dayanımları, yüksek sertliklerinden dolayı oldukça iyidir. Farklı kaplama teknikleri ile elde edilmiş çeşitli kaplamaların abrazif aşınma davranışları Şekil 1.23 'te verilmiştir. Borür tabakasının abrazif aşınma açısından üstünlüğü açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 1.21. 42CrMo4 çeliğinde dinamik sertliğin sıcaklıkla değişimi

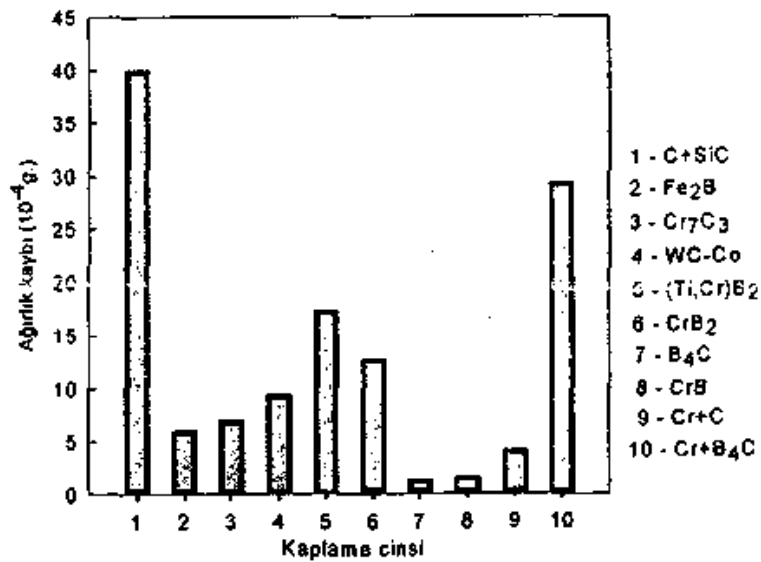


Şekil 1.22. Kuru kayma halinde yapılan deneylerde meydana gelen adhezif aşınma

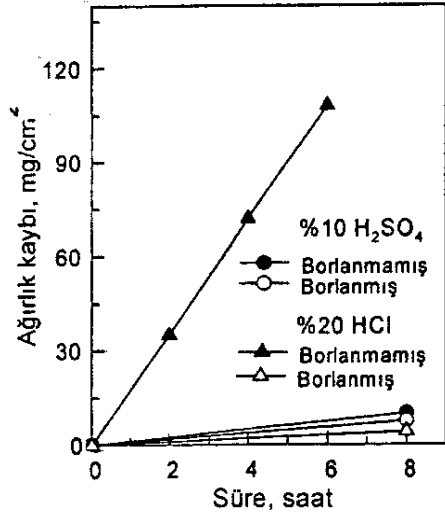


Şekil 1.23. Farklı yüzey işlemlerine sahip 42CrMo4 çeliğinin taşlama disk testi sonucundaki abrazif aşınma miktarları

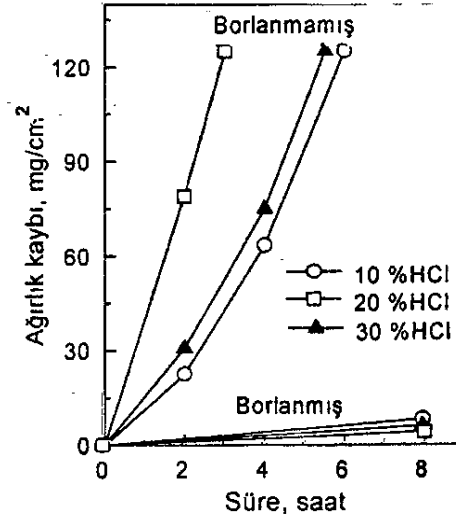
Plazma-sprey metoduyla üretilen çeşitli borür tabakalarının erozyon testleri sonucunda (Şekil 1.24) Fe₂B tabakasının erozyon direncinin, oldukça yüksek elde edildiği belirtilmiştir. Demir esaslı malzemelerin horlanması sonucunda, HCl, H₂SO₄, NaOH, NaNO₃ ve NaNO₃ / NaNO₂, Al, Pb ve Zn gibi bazı asit ve çözeltilerle sıvı metal banyolarına karşı büyük bir aşınma dayanımı sağlamasına rağmen, atmosferik korozyona karşı daha az direnç sağlar. Yüksek kromlu çeliklerin özellikle HCl'deki korozyon dayanımı, borlama ile önemli ölçüde artmaktadır. H₂SO₄'deki korozyon dayanımı ise çok fazla iyileşmemektedir. Krom borür, yüzeyde krom oksit oluşumuna neden olmakta ve yüzeyi korozyona karşı pasifleştirmektedir. Şekil 1.25'de çeşitli malzemelerin asitlerdeki aşınma dayanımı verilmiştir. Bor yayınımlı uygulanmış yüzeylerin korozyon dirençleri, büyük ölçüde borür tabakasında oluşan poroziteye ve mikro çatlaklara bağlıdır.



Şekil 1.24. Erozyon testi sonucunda çeşitli yüzey tabakalarında meydana gelen ağırlık kayıpları: 1) C+SiC; 2) Fe₂B; 3) Cr₇C₃; 4) WC-Co; 5) (TiCr)B; 6) CrB₂; 7) B₄C; 8) CrB; 9) Cr+C; 10) Cr+B₄C.



(a)



(b)

Şekil 1.25. a) X10CrNiTi1 çeliğinin 56°C'de, HCl ve H₂SO₄'deki ağırlık kaybı ve b) Ck 45 çeliğinin, 56 °C'de, HCl'deki ağırlık kaybı

2.YÜZEY KAPLAMA

2.1.Kaplama Konsepti:

Teknik veya dekoratif özellikler yardımıyla bir objenin üzerinde farklı bir malzemenin doğal, sentetik veya yapay olarak depolanması ile elde edilen malzeme katmanı yüzey kaplama olarak adlandırılır. [4]

Ana malzeme ile kaplanmış yüzey farklı fazlar içerirler. Aynı zamanda kaplanmış yüzey ile matris arasında bir ara yüzey mevcuttur. Bazı durumlarda difüzyon dolayısıyla kaplanmış yüzey ile ana matrisi ayırt etmek çok zordur.

2.2. Kaplamanın Yapısı:

Kaplanmış yüzey laminar bir yapıya sahiptir. Kaplama yüzeyi tek veya çok katmanlı olabilir. [1] Katman sayısı kullanım alanına göre belirlenir. Mesela çelik ve çinko alaşımları bakır-nikel-krom katmanları ile kaplanarak çok yüksek korozyon dirençli malzeme üretiminde kullanılırlar. PVD yöntemi ile 60 katmanlı kaplamalar ince ve sert yapıda üretilerek kullanım alanı bulmuşlardır.

a) Kaplamada kalınlık değişkendir.100 mikrometre ile birkaç milimetre aralığında kullanım yeri ve kaplama teknolojisine göre değişebilir.

2.3. Kaplama Çeşitleri:

Kullanılan kriterlere göre kaplamalar farklı şekillerde çeşitlendirilebildiler. Bu belirlemelerde malzeme, gösterim ve üretim metodu önemli rol oynar.

2.3.1. Malzemeye göre çeşitlendirme:

Bu çeşitlendirmede kaplama metalik metalik olmayan kaplama olarak ayrılır. Metalik kaplama: Bu tür kaplamalar farklı malzemelerden, metal alaşımlarından ve metal kompozitlerden üretilirler. Metalik malzeme yüzey üzerine verilirken metalik olarak farklı teknikler kullanılır. Prensipde kaplamalarda tüm metaller ve kompozitler kullanılabilir. Ancak pratikte tüm metaller ve alaşımlar kullanılamaz.[1]

Kaplama metalleri:

Çinko, Nikel, Krom, Alüminyum, Kadmiyum, Bakır, kurşun, gümüş, altın, demir, kobalt, palladyum, indiyum, ruthenium, platin diye sıralayabiliriz. Genelde refrakter metaller kullanılırlar; titanyum, zirkonyum, hafniyum, vanadyum, niyobyum, tantalum, molibden ve tungsten.[13]

Alaşımlar ve kaplama kompozitleri:

Çelikler(özellikle alaşımlanmış, korozyon ve ısı dirençli), Bronz ve metal alaşımları. Pb-Sn-Cu, Sn-Ni, W-Co, W-Ni, Ni-Fe, Co-Mo, Zn-Al, Zn-Fe, Zn-Ni, Zn-Mn, Zn-Ce, Zn-Co-Mo-Cr-Si, Ni-Cr-Al-Y

2.3.2. Uygulama alanına göre çeşitlendirme:

Uygulama alanına göre kaplam çeşitleri dört guruba ayrılabilir. Koruyucu, dekoratif, dekoratif-koruyucu ve teknik olarak sıralanabilir. Teknik kaplamada malzemelerin fizikse özellikleri iyileştirilir.(Mekanik, elektrik ve termal özellikleri) özellikle malzemelerin tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla bu işlem gerçekleştirilir. Birçok durumda malzemelerin tribolojik özelliği yumuşak malzemelere göre daha iyidir. Elektro kaplam sonrası elde edilene yüzeyin sertliği değişkendir ve kurşunun sertliği ile Rhodium un sertliği aralığında değişir. Bununla birlikte sertlik aynı metalin kaplamasında bile değişebilir. Bu durum kaplamanın kimyasal kompozisyonuna ve kaplama artlarına göre değişir. [16]

Ekseriyetle aşınmaya karşı dirençli kaplamalarda, sert krom kaplamalar 10–30 mikrometre kalınlıkta kullanılırlar. Yüksek sürtünme hızına sahip uygulamalarda ve yüksek banca maruz kalan kaplanmış yüzeylerde elektro kaplı gümüş veya indiyum kaplamalar 500–1500 mikrometre kalınlıkta uygulanırlar. Ayrıca bu tür uygulamalı için boşluklu krom kaplamalarda bu tür uygulamalar için uygulanabilirler.

Metalik olamayan kaplamalarda çok yüksek sertlik ve mükemmel tribolojik özellikler nitrür, oksit, karbür ve borür kaplamaları ile ve vakumda PVD veya CVD teknikleri ile elde edilebilirler.

2.4.Kaplamanın Potansiyel Özellikleri:

Yüzey katmanlarının potansiyel özellikleri gibi kaplamaların da potansiyel özellikleri şu gruplara ayrılabilir. Geometrik, geometrik-fiziko- kimyasal ve fiziko-kimyasal özellikler diye gruplara ayrılabilir. Esas olarak bu özellikler yüzey katmanlarının özellikleri gibi aynı parametrelerle tarif edilir. Fakat ilave olarak bazı parametrelerden de bahsetmek gerekir.

Geometrik parametreler kaplanacak parçanın kalınlığı, yüzeyin üç boyutlu yapısı ve kaplama kusurları. [15]

Kalınlık: kaplama kalınlığı en esas parametredir. Bu parametre kaplama katman porozite, mukavemet, korozyon direnci, gibi özellikler üzerinde belirleyici bir rol oynar. Ayrıca, farklı kaplama tipleri için kalınlığın rolü değişkendir. Kaplama kalınlığı arttıkça aşınma direnci

olumlu bir özellik sergilerken parçanın sünekliği, darbe direnci azalım gösterir.

Yüzeyin üç boyutlu yapısı: kaplama yüzeyinin üç boyutlu yapısı kaplama prosesinin bir sonucudur. Kullanılan tekniğe göre değişim sergiler.

2.5.Metalik Kaplamanın Yapısı:

Metalik kaplamalar kaplama malzemesinin kristalizasyonundan elde edilebilirler. Kristalizasyon işlemi çözelti malzemesinden, vakumda, metal buharından üretilir. Kristalizasyon metalik banyoda veya kaplam malzemesinin damlacığının yüzeye düşmesiyle teşekkül eder. İşlem kimyasal olarak malzeme birikimi veya kaplam ara yüzeyinde önceden teşekkül ettirilmiş yumuşak partiküllerin püskürtülmesiyle oluşur. Her bir durumda kaplama yapısı kaplam yapısı farklılık arz eder. Bu farklılık kullanılan metoda ve malzeme birikim parametrelerine bağlı olarak değişiklik gösterir. [10]

Genelde metalik kaplama yapısı kristal yapısında yani metal veya alaşıma benzer biçimde veya amorf biçiminde oluşabilir. Ancak, metalik malzemelerin kristal yapılarının aksine kaplamaların kristal dokuları çok daha ufak taneli ve daha fazla kusur içeren bir görünümündedirler. Aynı zamanda, metalik kaplamalarda dengede olmayan yapılar da oluşabilir.

2.6.Kalıntı Gerilimi:

Kaplama yüzeyi ile kaplanan yüzey arasındaki termal genleşme sabitleri farkı ve kaplama yüzeyindeki hatalar dolayısıyla kaplamalarda kalıntı gerilim oluşur. Kalıntı gerilimin karakterine bağlı olarak kalıntı gerilim pozitif veya negatif rol oynayabilir. Genellikle, basma gerilimleri tercih edilirken çekme gerilimi istenmez. Kalıntı gerilimin düşürülmesi için çok katmalı kaplama tercih edilebilir. Gerilimin işareti kaplanacak yüzeyin ve kaplanan yüzey katmanlarının termal genleşme sabitine ve yapısal kusurların karakterine bağlıdır. Eğer kaplama katmanları ara yer atomu olarak çok fazla atomu sahiplerse bu durumda yerleşmelerde atom boşlukları oluşacak ve çekme gerilmesi oluşacaktır. Aksi durumda ise basma gerilimi oluşacaktır. [9]

2.7.Eritme Tekniği İle Yüzey Kaplama Uygulamaları:

Yeniden eritme yüzey sertleştirme yönteminin bir gelişimidir. Uygulamada yüzey sertleştirme yöntemlerinde kullanılan güç yoğunluğundan daha fazla güç kullanılır. Bu tür tekniklerde kaplama yüzeyi çok hızlı bir biçimde eritilir veya bu yüzey üzerinde bir malzeme birimi sağlanır. Yeniden eritme teknikleri dört farklı grupta da incelenebilir. [2]

2.7.1 Alaşımlama:

Alaşımlamada harici olarak yüzeye alaşım elemanları bir güç kaynağı yardımıyla birlikte verilir. Ancak alaşımlama neticesinde yüzeyde yüzey pürüzlülüğü artar. Yüzeyde eğer yeniden eritme uygulanıyorsa alaşım elemanları ile ana yüzey karışıp yeni bir banyo teşekkül eder. Yeniden katılaşma sonrasında yeni bir apı ve yeni bir kimyasal kompozisyon oluşur. Özellikle aşınma dayançlı uygulamalar için demir esalı yüzey üzerine Ni-Cr alaşımlaması elektrot veya termal spray yardımıyla uygulanır. Ayrıca B₄C, SiC de yüzeye plazma veya arc yöntemi ile emdirilebilir. Diğer bazı malzemeler de alaşım elemanları olarak örneğin paslanmaz çelik, bakır alaşımları, metal oksitler, nitrürler, borürler ve inter metalik bileşikler kullanılırlar. [3]

Fizyon yöntemi ile katı tanecikler veya erimiş banyoya gaz balonları içerisinde alaşım malzemesi gönderilir. Kullanılan gaz azot, asetilen, karbon monoksit gazı olabilir.

2.7.2. Cladding türü kaplama:

Bu kaplama türü ile sert yüzey kapla uygulaması mümkündür. Kaplanacak yüzey üzerinde kaplama malzemesi yeniden eritilir ve yüzey üzerine depo edilir. Eritme işlemi bir telin yüzeye enjeksiyon yöntemi ile elektron demeti içerisinde geçirilen malzemenin yüzey üzerine ana metale karışmadan depolanması sağlanır. Isı kaynağı bir elektron bombardımanı demetidir. Özellikle ısı, korozyon ve aşınma dirençli kaplamalarda kullanılan bir yöntemdir. Örneğin hidrolik parçalarının yüzeyi bu yöntem ile kaplanır.

2.8.Kaplamada Termal Teknikler:

Termal teknikle de kaplanacak malzeme yüzeyine ısı etkisinin yanında, metalik malzemelerin katı halde mikro yapılarının değişimini, Toplam yapının durumunun değişimi, yüzeydeki kaplama malzemesinin erimesi ve tekrar katılaşması. [3] Bir ısı kaynağı kullanımı sonrası (Lazer, elektron ışın demeti) yüzey üzerine ilave kaplama malzemesi ve kaplanacak yüzey malzemesinde erime sonrası yeni bir doku elde edilir.

Elektron demetinin yüzeye inmesi sonrası yüksek bir enerji küçük bir yüzeye temas ettikten sonra yüzeyde kısa bir sürede yüksek miktarda (103–105 K/S açığa çıkar. Bir sonraki adımda erime ve katılaşma devam eder.

Yüzeydeki enerjinin etkisi gücün yoğunluğuna ve yüzeyde kalış süresine bağlıdır.

$$q = \frac{P_p \left[\frac{W}{d_{ss} \cdot cm^2} \right]}{\pi d_{ss}^2} \text{ Veya } q = \frac{4IU}{\pi d_{ss}^2} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{2}{d_{ss}} \right)^2 I^{1/2} U^{3/4}$$

Burada q: güç yoğunluğu, des: ark çapını tarif eder.

Alaşımlamayla yüzey kaplama işleminde alaşımlama sonrası yüzey pürüzlülüğü artar bu artış alaşım elementi ilavesinin kalınlığına bağlı olarak değişir. Alaşım elementinin ilavesi termal spray, elektroliz, elektro kaplama plak, ince folyo, pasta, toz halinde olabilir. Her iki katmanını yeniden eritilmesi sonrası katmanlar karışır alaşım malzemesi kısmen veya top yekûn olarak kaplanacak yüzey malzemesi ile karışır. Yeniden katılaşma sonrası yeni ve farklı bir yapı tezahür eder. Bu uygulama tribolojik uygulamalar için (Krom ve Nikel ilavesi) korozyon direnci için uygulanabilir.

Bir katının alaşımlanması difizyon kurallarına bağlıdır. Difizyon prosesi için önemli olan sıcaklık gradyanına, konsantrasyon gradyanına ve zamana bağlı değişim gösterir. Malzeme yüzeyinde çok kısa sürede enerjinin çok yüksek sıcaklık gradyanı oluşturması sebebiyle alaşım elementlerinin difizyon derinliği çok küçüktür. Difizyon çok yavaş bir prosestir. Bu tür proseslerde (milisaniyelerin söz konusu olduğu durumlar için) bu proses çok yavaş kalmaktadır. Sonuç olarak söz konusu proseslerde alaşım elementini yüzeye yedirmenin tek yolu katkı elementinin katılaşma öncesi hidrodinamik karışım ile eritilmiş banyoda yedirmektir.[13]

Sistem süreklilik arz eder, yani sürekli eritme ve sürekli karışım sağlanır. Aksiyon ve ark basıncı sayesinde hem katkı malzemesi ve hem de yüzey malzemesi erir ve yüzeyde bir eriyik havuzu teşekküle eder. Bu eriyik havuzunda elementlerin karışımı konveksiyon ve yerçekimi hareketleri ile sonuçlanır. Kaplanacak yüzey ile kaplanmış yüzey arasında da çok ince bir difizyon bölgesi oluşur. Bu ara yüzeyin kalınlığı 10 mikron kalınlığındandır. Yüzeye verilen ark kesildiğinde oluşan alaşım katılaşır ve yakında bulunan ana malzeme kısmen sertleşir. Yapı kimyasal kompozisyon, fiziksel ve kimyasal özellikler ana malzemeden tamamen farklı bir hal alır. Öncelikle alaşım katmanı prensip olarak karakteristik katmanın yapısını göstermez. Konveksiyon dolayısıyla fazlar arasında konsantrasyon farkı da oluşmaz. Sadece ara yüzeyde sıvı ve katı fazlar arasında çok ince bir ara yüzey teşekkül eder.

Alaşım katmanının sertliği ana malzemenin sertliğinden daha yüksek olur. Aynı zamanda kaplanmış katmanın yorulma mukavemeti de daha yüksek beklenir ve aşınma

direnci de yüksek mertebelere ulaşır. Bu iyileşmiş özelliklerin dışında yüzey kalitesi (pürüzlülüğün artmasından dolayı) düşer. Bu durum eriyik havuzun homojen karışımına, konveksiyonun yoğunluğuna bağlanmaktadır.[16]

Yeniden eritme işlemi iki aşamadan oluşur. İlk aşamada alaşım elementlerinin yüzeye depo edilmesi ve ikinci aşamada ise alaşım elementleri ve ana malzemenin yüzeyinin bir katman oluşturacak şekilde eritilmesi, genelde ilave edilen malzemenin kalınlığı ile ana malzemenin eriyen yüzeyinin kalınlıkları arasında bir oran vardır. Bu oran 0,5 seviyesinde tercih edilir. Yüzeye verilen enerjinin güç yoğunluğu arttıkça eriyen yüzey derinliği artar. Yüksek güç yoğunlukları malzemenin buharlaşmasına sebebiyet verir.

Alaşımlama genelde farklı tip çeliklere uygulanabilir. Yapı çeliklerine AISI 1045 ve bu çeliğin sahip olduğu karbondan daha az karbona sahip çeliklere rahatlıkla uygulanabilir.

Doğal olarak alaşımlama sadece veya esas olarak makine parçalarına veya çok ciddi zor şartlarda çalışan araç gereçlere uygulanır. Mesela Kesici aletler veya zımbalar veya kesme kesici kenarlarına, yeniden eritme işlemi ile alaşımlamada Ayrıca dökme demirler, yüksek mukavemetli çeliklere de uygulanabilir.

3.AŞINMA

İstenmeden meydana gelen aşınma, çeşitli makine ve teçhizatın kullanımı sırasında kırılma kadar önemli bir problem olsa bile, çok büyük ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Bu konu makine dizaynında çok önemlidir. Çünkü temas eden yüzeylerde, sürtünme kuvveti güç kaybına; aşınma ise, işleme toleranslarının kötüleşmesine neden olmaktadır. Bu yüzden aşınma, göz önüne alınması gereken çok önemli parametrelerden biridir.

Aşınmanın tanımı değişik şekillerde yapılabilmektedir. En genel haliyle“Mekanik ve kimyasal etkilerden dolayı malzemeden istenmeyen partikül kaybı” olarak ifade edilebilir. Moore’a göre aşınma, kullanılan malzemelerin yüzeylerine gaz, sıvı ve katıların teması neticesinde çeşitli etkenlerle malzemenin yüzeyinden mikro taneciklerin kopması sonucu meydana gelen yüzey bozulması olarak tanımlanmıştır. [12].

Diğer bir tanıma göre aşınma katı cisimlerin yüzeylerinden çeşitli etkenlerle sürekli malzeme kayıplarının ortaya çıkmasıdır. DİN 50320 ve ASTM G4093 standartlarına göre aşınma, kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması sonucu mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılmasıyla meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması şeklinde tanımlanmaktadır.

Genel olarak aşınma yataklarda, frenlerde, pistonlarda, supaplarda, tekerleklerde, kesici uç ve ağızlarında, dişlilerde kırma ve öğütme değirmenlerinde, yol, toprak ve ziraat makinelerinde, türbin kanatlarında, maden cevheri üretim cihazlarında vb. yerlerde meydana gelmektedir.

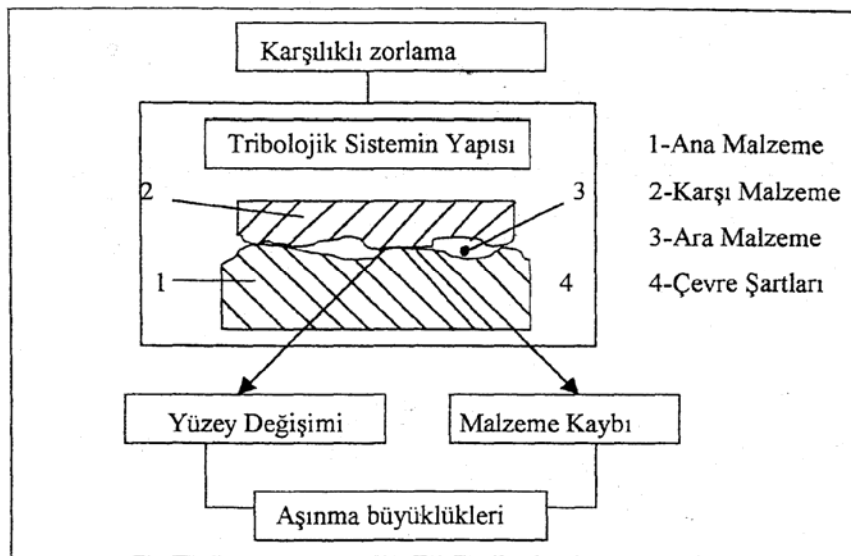
3.1 Bir Aşınma Sisteminde Temel Unsurlar:

Temas halinde bulunan katı yüzeylerde, malzeme kaybı üç şekilde gerçekleşebilir. Bunlar bölgesel erimeler, kimyasal çözünme ve yüzeyden fiziksel anlamda oluşan ayrılma. Uygulamada aşınma kapsamına, daha çok yüzeyden ayrılan malzemenin sebep olduğu hasar dahi edilmektedir.

Bir aşınmada temel unsurlar şunlardır:

- a) Ana malzeme (Aşınan)
- b) Karşı malzeme (Aşındıran)
- c) Ara malzeme
- d) Yük
- e) Hareket
- f) Çevre

Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte “Tribolojik sistem” olarak adlandırılır. Bir tribolojik sistemin standartlara uygun şematik olarak gösterimi görülmektedir [12].



Şekil 3,1. Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi

a) Esas malzeme (aşınan): Fiziksel ve kimyasal özellikleri yanında, yüzey yapısı, şekil durumu tamamen belirli olan ve aşınma özelliği ile incelenen katı cisim şeklinde tanımlanabilir.

b) Karşı malzeme (aşındıran): Aşınmanın meydana gelmesinde başlıca öneme sahip olan karşı sürünme elemanı, katı bir cisim, sıvı veya gaz olabilir. Bu eleman temel sürtünme elemanı ile birlikte bir aşınma çiftini oluşturmaktadır.

c) Ara malzeme: Esas sürtünme elemanı ile karşı sürtünme elemanı arasında katı, sıvı, gaz, buhar ya da bunların karışımı şeklinde bulunan maddedir. Örneğin bu ara maddeyi, yüzeyler arasına herhangi bir nedenle girmiş kum taneleri oluşturabileceği gibi, aşınma esnasında kopan parçacıklar da ara maddesi görevini üstlenebilir.

d) Yük Etki eden kuvvetin büyüklüğü, turu (statik, dinamik, darbeli veya titreşimli olup olmadığı) doğrultusu ve zamana göre değişimi yüklemenin şiddetini belirler.

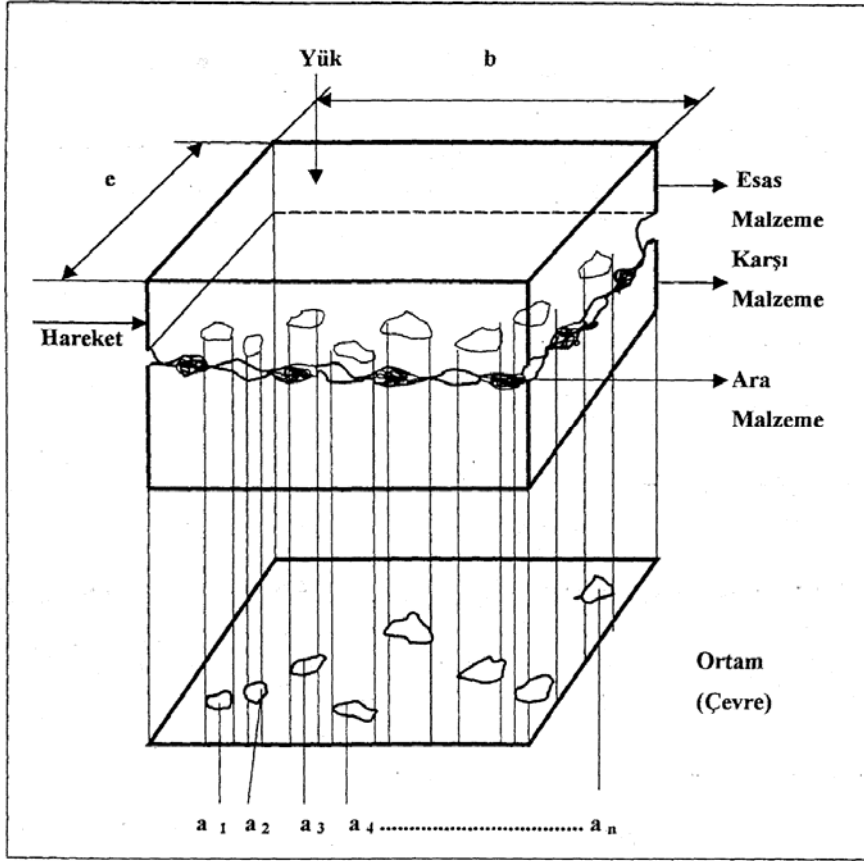
e) Hareket: Temel sürtünme elemanının karşı sürtünme elemanına göre izafi hareketinin cinsi (kayma yuvarlanma veya çarpma etkilerinden hangisinin ağırlıkta olduğu),büyüklüğü ve doğrultusu ile belirlenir.

Yükleme ve hareket değişkenleri sistemi etkileyen önemli giriş büyüklüklerini meydana getirirler. Bunların etkisiyle yapıda bazı değişimler meydana gelirken sürtünme ve aşınma ile gerçekleşen kayıplar ortaya çıkar.

t) Çevre: Sistemi içine alan ve genellikle sıvı veya gaz halinde bulunan ortamdır. Su, hava ve gazlar teknikte en sık rastlanılan çevre ortamlarıdır.

Tablo 3,1. Yükleme ve Hareket Değişkenlerinin Sistemi Etkilemesi [19]

Başlangıç (giriş) büyüklükleri	Tiribolojik olay sırasında Değişen faktörler		Sonuç Büyüklükleri
Sürtünme Elemanlarının Yapısı	Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi	Yapı değişimi	Sürtünme kuvveti
Yükleme	Ara maddesi	Fiziksel Kimyasal özellikler (mukavemet, iç gerilmeler)	Aşınma Miktarı
Hareket	Sıcaklık değişimi		



Şekil 3.2. Sürtünen iki çişimde aşınmanın temel unsurları .

Aşınma, genellikle önceden bilinen bir hasar tipidir. Birbirleriyle temasta olan malzeme yüzeyleri oksit filmleri veya yağlayıcılar ile korunsalar bile, mekanik yüklemeler altında oksit tabakasının veya yağlamanın bozulması, iki yüzeyin birbiriyle doğrudan temasına sebep olabilir. Bu temas sonucu oluşan sürtünme, malzemenin çalışma koşullarındaki ömrünü ve performansını sınırlayan aşınmaya sebep olur. Bu hasar uygun yağlama, filtreleme, uygun malzeme seçimi ve uygun tasarım gibi faktörlerle en aza indirilebilir, fakat kesimlikle tümüyle önlenemez. Aşınma çeşitli yönleriyle korozyona benzer. Bu iki hasar tipide zamanla kendiliğinden gelişir, her ikisinin de oluşumu önceden bir derece bilinebilir, her ikisinin de çeşitli tipleri vardır. Aşınma da korozyon gibi bir yüzey olayı olduğundan, yüzeyi etkileyen her şey aşınma davranışını da etkiler.[21]

3.2.Aşınma Rejimleri:

Hafif Aşınma:

Aşınma parçacıkları: Küçük (0,01–0,02 μm)

Yüzey: Parlak

Bu aşınma hasarı işletme koşullarında kabul edilebilir boyuttadır.

Şiddetli aşınma:

Aşınma parçacıkları: Büyük ($> 1 \mu$)

Yüzey: pürüzlü ve çizikli

Bu aşınma hasarı işletme koşullarında kabul edilemez boyuttadır.

3.3. Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınmayı etkileyen faktörler farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu faktörler, aşağıda dört grup halinde verilmiştir.

1 -Ana malzemeye bağlı faktörler

a) Malzemenin kristal yapısı

b) Malzemenin sertliği

e) Elastite modülü

d) Deformasyon davranışı

e) Yüzey pürüzlüğü

2-Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi

3-Ortamın etkisi

a) Sıcaklık

b) Nem

c) Atmosfer

4-Servis koşulları

a) Basınç

b) Kayma yolu [21].

Tablo 3,2 Aşındırıcı malzemelerin sertlik değerleri [23].

Aşındırıcı cinsi	Mikro sertlik(kg/mm)	Dayanabildiği sıcaklık
Elmas	10000	700–800
Bor karbür	3700–5000	700–800
SiC	2300–2600	1300–1400
Alüminyum oksit	2000–2300	1700–1800

Alüminyum oksit (Al aşındırıcı taneleri) sert ve köşelidirler. Silisyum karbür (SiC) aşındırıcı taneleri ise daha sert ve köşeli olmalarına rağmen, alüminyum oksit aşındırıcılara göre kırılgandırlar. Yüksek sıcaklıklarda bazı alümina ve silisyum karbür aşındırıcıların sürtünme katsayıları incelenmiş, neticede silisyum karbür’ün sürtünme katsayısının sıcaklığın yükselmesiyle azaldığı bulunmuştur.

Yüzeyler arasında sürtünme söz konusu olduğuna göre sürtünme kuvvetinin bir kısmı sistemde sıcaklık olarak ortaya çıkacaktır. Özellikle sistemde kuru bir sürtünme mevcut ise ortaya çıkan ısının boyutları oldukça yüksek olmakta, hatta bazı malzemelerde mikro yapı değişikliklerine bile neden olmaktadır. Co-Co çiftinin sıcaklığa bağlı olarak, belli bir sıcaklıktan sonra değişik mikro yapıya sahip olması sıcaklığın aşınma üzerindeki etkisini karakterize etmesi bakımından ilgi çekicidir [23].Aşınma yüzeylerine verilen enerji, ilk önce elastik ve plastik şekil değiştirme (deformasyon) işi ve kırılma işine dönüşürken, yüzey mekanik aktivasyona uğrar ve reaksiyona girmeye başlar. Şekil değiştirme işi genelde, ısı enerjisine dönüşmektedir.

3.4.Aşınma Mekanizmaları

3.4.1.Adhezif Aşınma(Yapışma Aşınması)

Yapışma aşınması olarak da adlandırılan adhezif aşınma, en sık rastlanan aşınma türü olmasına rağmen, genellikle hasarı hızlandırıcı etkide bulunmaz. Adhezif aşınma en genel olarak, karşılıklı etkileşim içinde birbirine göreceli olarak hareket eden iki yüzeyin birisinden bir parçacığın koparak diğer yüzeye yapışması sonucunda, bir yüzeyden diğer yüzeye olan malzeme taşınması olarak tanımlanabilir. Yağlama, birbiri içerisinde çözünmeyen metaller kullanmak, düz yüzeyler kullanmak, metal-metal temasını önlemek.

Tablo 3,3. Malzeme özelliklerinin adhezif aşınmaya etkisi

ÖZELLİKLER	ADHEZİF AŞINMA
Oksitli yüzey	Az
Kübik kristal yapı	Çok
Hegzegonal kristal yapı	Az
Yüksek deformasyon sertleşmesi	Çok
Yüksek sertlik	Az
Yüksek elastizite modülü	Az
Yüksek ergime sıcaklığı	Az

3.4.2.Yorulma Aşınması:

Değişken, tekrarlı yüklemeler sonucu meydana gelir. Tiribolojik zorlamalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden, yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülür. Neticede malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur; bu ise, yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur. Bu tür aşınma daha çok dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeylerinde görülür.

3.4.3.Erozif Aşınma:

Erozif aşınma, bir sıvı veya taşıyıcı içerisindeki sert partiküllerin malzeme yüzeyinden yüksek hızlarda kayması veya yuvarlanması sırasında meydana gelir. Kayma veya yuvarlanma esnasında, yüzeyle temas eden her bir partikül uzun bir periyot sonunda metal yüzeyinden çok sayıda parça koparılmasıyla erozif aşınma hasarı meydana gelir. Sıcaklık ve akış hızı artıkça aşınma hızlanır.

3.4.4.Öğütmeli Aşınma:

Öğütmeli aşınma, yüksek basınçlar altında partiküllerin metal yüzeyleri ile düşük hızlarda karşılaşmaları sonucunda, metal yüzeyinden parçacıkların kesilerek veya çok sayıda ufak çizikler açılarak kopartılması ile meydana gelir. Bu yüksek basınç ve düşük hız kombinasyonu, genellikle hafriyat çalışmalarında kullanılan buldozer ve kepçe gibi ağır iş makinelerinin çalışma koşullarında meydana geldiği için, bu araçların kesici uç yüzeylerinde bu hasar türü meydana gelir. Kepçelerde kullanılan batıcı ve kesici uçların, öğütmeli aşınma sonucunda şekil değişimi meydana gelerek körleme oluşur. Bunu önlemek için malzemenin kontrollü olarak aşındırılması yoluna gidilmiştir. Kontrollü aşınma ile malzeme kendi kendini bileyerek, körlenme sebebiyle meydana gelen performans düşüklüğünden kurtulabilir.

3.4.5.Oymalı Aşınma:

Oymalı aşınma malzeme yüzeyinin çok gerilmelerdeki çarpma durumlarında, yüzeyden bir parçanın kesilerek veya oyularak kopmasıyla meydana gelir. Oymalı aşınma diğer aşınma türlerine göre çok daha hızlı olarak geliştiğinden, bu aşınmaya uğrayan parçaların yenileriyle değiştirilerek kullanılması daha ekonomik olmaktadır.

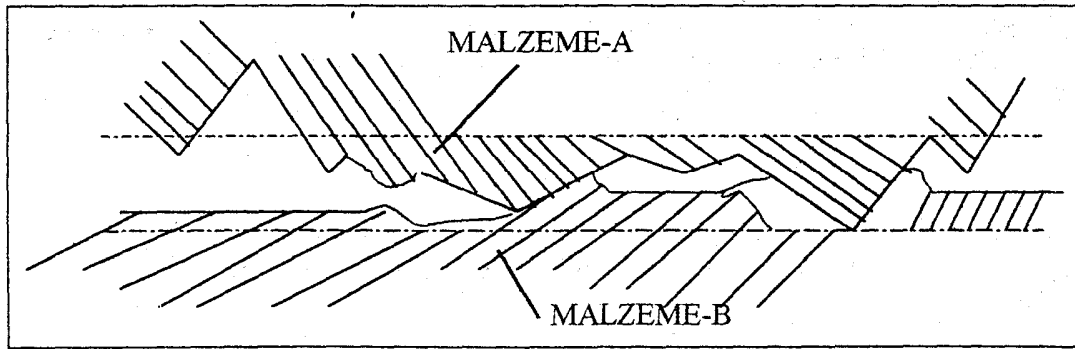
3.4.6.Korozif Aşınma:

Korozif aşınmada aşınma olayı iki kademedede gerçekleşmektedir. Temas halindeki yüzeyler ortamla reaksiyona girerler ve yüzeyde reaksiyon ürünlerinden oluşan bir tabaka meydana gelir, daha sonra temas noktasında çatlak oluşumu veya abrazif etkiden dolayı reaksiyon tabakası hasara uğrar.

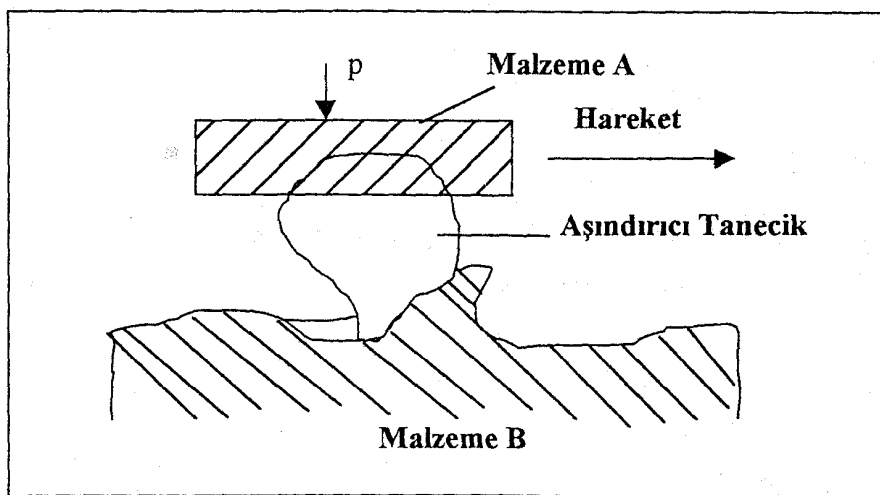
Tribooksidasyon aşınması adı da verilen korozif aşınma durumunda, ana malzeme ile karşı malzeme arasında tribolojik zorlamalardan dolayı meydana gelen kimyasal reaksiyon etkindir. Malzeme yüzeylerinin hava ile reaksiyona girerek oluşturduğu yüzey tabakaları(oksit tabakası)aşınmayı azaltmasına rağmen, bu yüzey tabakalarının tribooksidasyon sonucu özelliklerinin değişmesi, aşınmayı hızlandırmaktadır. Korozif aşınma özellikle metalik malzeme yüzeylerinde görülür.

3.4.7.Abrasif Aşınma

Yırtılma veya çizilme aşınması olarak da isimlendirilen abrasif aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Abrasif aşınma biri diğerinden daha sert ve pürüzlü olan metal yüzeylerinin birbirleriyle temas halindeyken kayması sırasında meydana gelir. Metal şekillendirmede yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat yöntemleri esasen bu tür aşınmaya dayanmaktadır, sert parçacıkların yumuşak metale batması da abrasif aşınmaya neden olabilmektedir. Buna örnek olarak, bir sisteme dışardan giren kum vb. gibi paçacıkların veya bir motordaki yanma ürünlerinin sebep olduğu aşınma verilebilir. Bu tip aşınmada sert ve keskin partiküller, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Bu aşınma, iki elemanlı ve üç elemanlı olmak üzere ikiye ayrılır



Şekil 3,3 İki elemanlı abrasif aşınma.



Şekil 3,4. Üç elemanlı abrasif aşınma mekanizması.

İki elemanlı abrasif aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbirleriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abrasif aşınmada ise, ana ve karşı malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilir.

Abrasif aşınmayı etkileyen iki temel faktör, aşındırıcı partikül ile metal yüzeyi arasındaki sertlik farklılığı ve teması da meydana getiren basınç büyüklüğüdür. Abrasif aşınma hızı, malzeme yüzeyine etki eden normal yük azaltılarak düşürülebilir. Böylece parçacıkların yüzeye daha az batması ve çapak kaldırması açısından daha az iz bırakması sağlanır. Şekil 3.4’de ise abrasif aşınma mekanizması, şematik olarak gösterilmektedir.

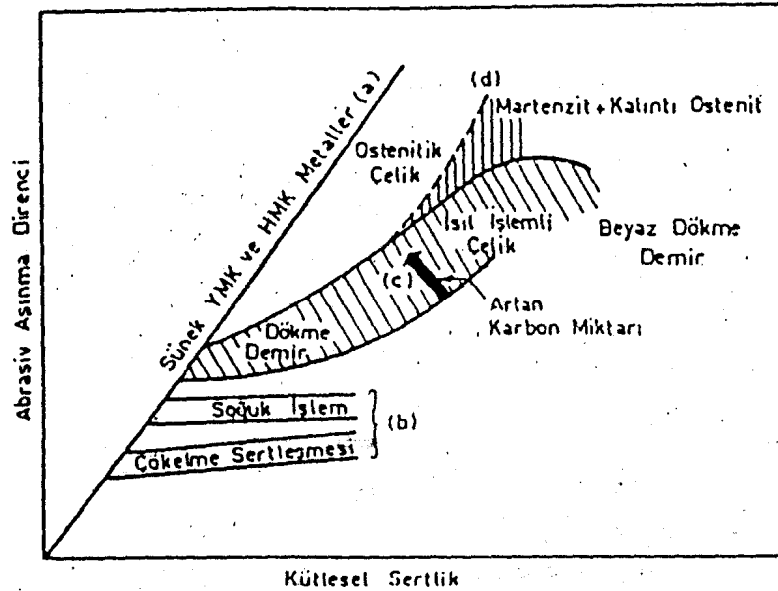
Genel olarak abrasif aşınma türleri üç ana grupta toplanmaktadır Bunlar, oymalı sürtünme aşınması, öğütmeli sürtünme aşınması ve erozyondur. Birçok karakteristik açıdan bu aşınma türlerinin birbirlerine benzemelerine rağmen, tek tek incelendikleri zaman, birbirlerinden önemli farklılıklar sergiledikleri görülür.[12]

Oymalı sürtünme aşınması, kütsel bir şekilde yüzeyin deformasyonu sonucunda oluşan bir aşınma türüdür. Aşırı yüklemeler etkisi ile meydana gelen oymalı sürtünme aşınmasına örnek olarak, ağır koşullar altında çalışan kazıcı, kırıcı gibi maden araçlarında görülen aşınmalar verilebilir.

Öğütmeli sürtünme aşınmasında, iki yüzeyin bir biri üzerinde hareket etmesi sonucunda ortaya çıkar ve ara yüzeyde abrasife dayalı parçacıklar bulunmaktadır. Bu ara yüzeyde yer alan taneler, ya bir yüzeyden aşınarak gelir ya da her iki yüzeyin birlikte aşınması sonucunda ortaya çıkar. Abrasif aşınma, keskin köşelere sahip yüzeye yük uygulaması durumunda parçanın yüzeyini kazıyarak veya kaldırarak parçalar koparmasıyla hasara neden olmaktadır. Örnek olarak balyalı değirmenler gösterilebilir.

Erozif aşınma ise, aşındırıcı tozların askıda durduğu sıvı veya hava gibi akışkan bir ortam vasıtasıyla malzeme yüzeyine çarpma etkisiyle gerçekleşmektedir. Her bir temas malzeme yüzeyinden küçük bir parçanın kaybına neden olmaktadır. Normal şartlar altında aşınma hızı düşüktür. Ancak yüksek sıcaklıklarda, malzemenin akma dayanımı düşmekte ve yüksek akış hızlarında erozif aşınma, hız kazanmaktadır. Bazı şartlarda malzemenin yüzeyinin her tarafını korozyon ürünleri kaplayabilmektedir. Buna erozyonun korozyon etkisi de denilmektedir. Örnek olarak gemi pervaneleri verilebilir.

Malzemelerin abrasif aşınma direnci, Şekil 3,5'te de görüldüğü gibi, kütleli sertlikten önemli derecede etkilenmektedir. Artan sertlikle abrasif direncinin artmasına rağmen sünek ve gevrek malzemeler farklı aşınma özelliklerine sahiptirler.[14] Tek fazlı sünek malzemelerde aşınma yüzeyinin yüksek plastik deformasyona uğraması, aşınma direncinin kütleli sertlikten ziyade yüzeysel sertliğe bağlı olmasına sebebiyet vermektedir. Bu nedenle, sünek malzemelerin deformasyon sertleşmesi özellikleri önemli olup, yüksek abrasif aşınma direnci açısından deformasyon sertleşmesi üssü (n) değerinin yüksek olması arzu edilir. Malzeme sertliğinin, tane boyutunu küçülterek, soğuk işlem uygulayarak, çökeltme sertleşmesi veya dispersiyon sertleşmesi yaparak artırılması halinde ise, aşınma direncinde bariz bir artış olmaktadır. Hatta bu işlemlerde malzemenin gevrekleşmesi aşınma direncinin bir miktar azalmasına da neden olabilir. Su verilmiş ve temperlenmiş çelikler gibi, martensitik ve küresel mikro yapıya sahip malzemeler, aynı sertlikteki sünek malzemelerden daha düşük aşınma direncine sahiptirler (Şekil 3,5). Bunun nedenleri aşınma ve kırılma mekanizmaları arasındaki farklılığın arasındaki, martensitik ve küresel mikro yapıya sahip malzemelerin sünek malzemelere kıyasla daha düşük deformasyon sertleşmesi üssü (n) değerine sahip olmalarıdır. Ayrıca, bu malzemelerde sünekliğin azalmasıyla, aşınma direncinde azalmada görülebilir. Östenitik çeliklerde ise, yüzeyin deformasyonla martenzite dönüşmesi, Şekil 3,5'deki d eğrisinden de anlaşılacağı gibi aşınma direncinin artmasına sebep olmaktadır [18].



Şekil 3,5. Kütleli sertliğin abrasif aşınma direncine etkisi

3.5. Abrasif aşınmanın engellenmesinde veya abrasif aşınmanın hızının en aza indirilmesinde aşağıdaki yöntemlere başvurulabilir:

3.5.1. Yüzey Sertliğini Artırmak:

Abrasif aşınmanın engellenmesinde veya aşınma hızının azaltılmasında en etkili yol, malzeme yüzey sertliğini arttırmaktır. Ancak bu yöntemin bazı malzemelere uygulanmasıyla daha büyük problemlerle karşılaşılabilir. Örneğin çeşitli tipteki bıçaklarda ve bunlara benzer kesici takımlarda malzeme sertliğinin artırılması, körlemeye karşı direnci arttıracaktır. Fakat bu durumda, malzemenin gevrek olarak kırılma riskini yükseltecektir.

Malzemenin sertliğiyle ana malzemeye katılan alaşım elemanlarının cins ve miktarları arasında sıkı ilişki vardır. Genelde bu alaşım elementleri malzemenin mukavemetini ve sertliğini arttırmırlar [22].

3.5.2. Abrasiv parçacıkları uzaklaştırmak:

Abrasif aşınmaya sebebiyet veren sert partiküllerin sistemden uzaklaştırılması ile abrasif aşınma engellenebilir. Bu nedenle, abrasif aşınmanın meydana geleceği ortamlarda kullanılan hava, su ve yağlarda bulunan partiküller filtre edilerek sistemden uzaklaştırılırlar [21].

3.5.3. Aşınmış Parçaları Değiştirmek:

Aşınmış parçaları değiştirmek, abrasif aşınmaya uğrayacak parçanın kolay bir şekilde değiştirilmesine imkân verecek dizaynların yapılması ile pratikte en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Ancak dizayn parçanın zor değişmesine imkan verdiği (parçaya erişememe), değişen parçanın maliyetinin yüksek olması veya değişme zamanının uzun olduğu durumlarda bu yöntemin uygulanması mümkün değildir [21].

4.DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Elektrot İmalı:

Çalışmada çekirdek tel çapı 2,5 mm ve örtü çapları 5.20 ve 6.65 mm olan örtülü elektrotlar Gedik Kaynak elektrot imalat fabrikasında imal edilmiştir. Tablo 4,1’de örtü bileşenleri verilmektedir. Bu tabloda da görüleceği gibi kaplamaya bor örtüdeki ferroboran geçirilmiştir. Tablo 4,2’de örtüde kullanılan ferrobor’un ve Tablo 4,3’de çekirdek telin kimyasal analizleri verilmiştir.

Tablo 4,1. Elektrot örtüsü bileşimi (%ağırlık)

Bileşen	Elektrot I (örtü ϕ 5.20)	Elektrot II (örtü ϕ 6.65)
Metalik demir*	47,2	44,6
Ferrobor	28,4	31,0
$MnO_2 + CaO + MgO + TiO_2 + NiO$	14,0	14,0
$Fe_2O_3 + SiO_2 + Al_2O_3 + Na_2O$	10,4	10,4

*Ferrobordaki demir’de metalik demirin içerisinde yer almaktadır.

Tablo 4,2. Elektrot örtüsünde kullanılan ferrobor’un kimyasal analizi (%ağırlık)

B	Al	Si	Fe
18	0.55	0.21	0.035

Tablo 4,3. Elektrot çekirdek telin kimyasal bileşimi (%ağırlık)

C	Mn	Si	P	S
0.09	0.5	0.03	0.025	0.025

4.2. Kaplama Amaçlı Kaynakların Yapılışı:

İmal edilen elektrotlarla 10 mm kalınlık ve 130x25 mm ebatlara sahip düşük karbonlu çelik levhaların (SAE 1020) yüzeylerine tek paso halinde kaplama amaçlı kaynaklar çekilmiştir. Tablo 4,4’de kullanılan düşük karbonlu çeliğin kimyasal analizi verilmiştir. Kaplama öncesinde çelik levhaların yüzeyleri kir ve pas gibi yüzeydeki zararlı atıklardan temizlenmiştir.

Tablo 4.4. Yüzeyi kaplanan düşük karbonlu çeliğin (SAE 1020) kimyasal bileşimi

C	Mn	Si	P	S
0.17	0.55	0.21	0.035	0.035

Kaplama işleminde örtülü elektrot ark kaynak yöntemi ve 6 farklı ısı girişi kullanılmıştır. Isı girişi 1 nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. Kullanılan ısı girişleri Tablo 4,5’de verilmiştir.

$$E = (A \times V \times \eta) / S \dots (1)$$

E = Isı (enerji) girişi (J/mm)

A = Akım (Amp)

V = Gerilim (Volt)

S = Kaynak hızı (mm/sn)

η = Ark verimlilik katsayısı (çalışmada 0,7 alınmıştır).

Tablo 4.5. Kaplama işleminde kullanılan ısı girişleri ve kaynak parametreler

Akım (Amp)	Gerilim (V)	Kaynak hızı (mm/sn)	Net Isı Girişi(kJ/mm)
110	24	3.40	0.54
110	24	2.50	0.74
110	24	1.80	0.92
100	24	1.50	1.12
110	24	1.50	1.23
120	24	1.50	1.34

4.3. Mikroyapı İncelemesi ve Kimyasal İçerik Tayini:

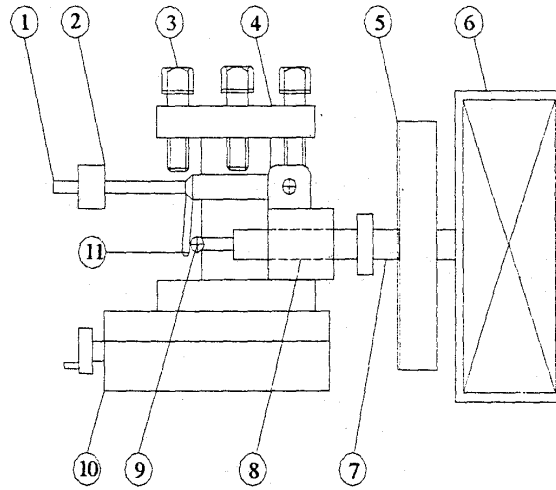
Kaplamaların yapılmasından sonra kaplama mikroyapısı incelenmesi ve elementel analiz için kaplama bölgesinden numuneler çıkartılmıştır. Bu numuneler metalografik işlemlerden geçirilmiş ve dağlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Metalografik işlemlerde; numunelerin yüzeyleri 80 mesh zımparadan başlayarak 1200 mesh zımparaya kadar zımparalandıktan sonra, parlatma işlemine geçilmiştir. Parlatma işleminde zımparalanmış numuneler 6, 3 ve 1 mikronluk elmas pastalardan geçirilmiştir. Parlatma işleminden sonra numuneler % 2 nital çözeltisinde dağlanarak, mikroyapı incelenmesine hazır hale getirilmişlerdir. Mikroyapı incelemeleri hem optik mikroskop, hem de taramalı elektron mikroskobu (SEM)’nda gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri sırasında penetrasyon derinlikleri ve kaplama yükseklikleri de tespit edilmiştir. Mikroyapı numuneleri üzerinde ayrıca bor içeriği için WDX (wavelength dispersive x-ray) analizleri gerçekleştirilmiştir. Kaplamada oluşan bileşiklerin tespiti için X-ışınlarından faydalanılmıştır. Bunun için yine kaplamalardan numuneler alınıp,

gerekli yüzey hazırlıklarından sonra X-ışınlarına tabi tutulmuşlardır. Bunların dışında kaplama sertlikleri kaplama yüzeyinden başlanıp ana malzemeye doğru 200 gr yük kullanılarak HV skalasında ölçülmüştür.

Gerekli inceleme ve analiz sonuçlarından hareketle, ısı girişi-penetrasyon derinliği, ısı girişi kaplama yüksekliği ve ısı girişi-kaplama bor içeriği ilişkileri çıkartılıp matematiksel eşitlik olarak ifade edilen ampirik formül haline dönüştürmüştür.

4.4.Abrasiv Aşınma Testi:

Kaplanmış yüzeylerin abrasiv aşınma dirençleri oda sıcaklığında pin-on-disc aşınma test düzeneğiyle bulunmuştur. Bunun için 1,12 kJ/mm enerji girişinde kaplanan numuneler kullanılmıştır. Aşınma testi bir torna tezgâhı yardımıyla gerçekleştirilmiş olup bu düzenek Şekil 4,1’de verilmiştir. Abrasiv aşınma testlerinde her numune için 10*10*5 mm ebatlarında numuneler kullanılmış olup, her numune için kullanılan yol 15 m’ dir.

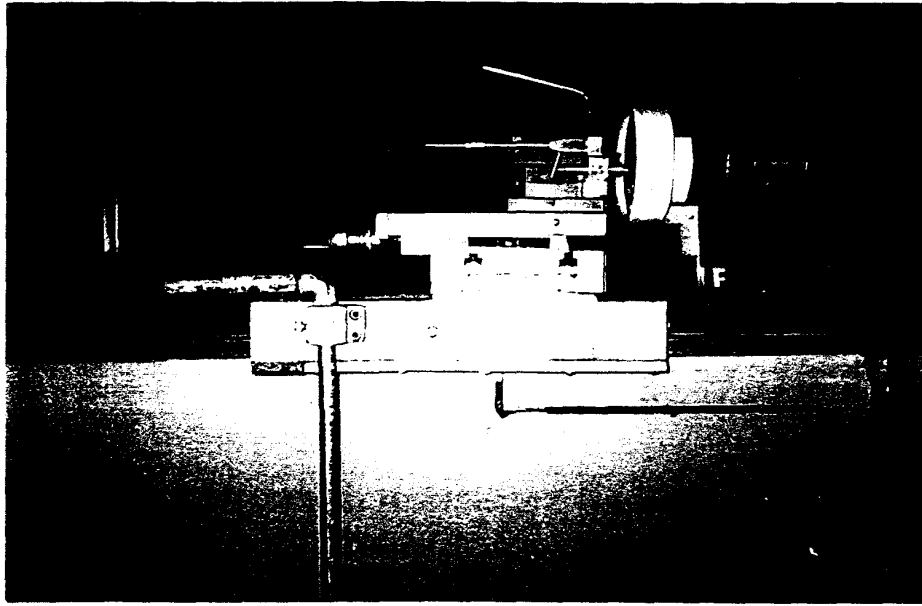


Şekil 4,1. Abrasiv aşınma aparatının şematik görünüşü

Baskı Yük Kolu, 2. Yük, 3. Kater Civatası, 4. Kater, 5. Abrasiv Aşındırıcı, 6. Hareket Mekanizması, 7. Deney Numunesi, 8. Yataklı Numune Tutucu, 9. Rulman, 10. Hareket, 11.Yük Kolu,)

Aşındırıcının bağlı olduğu disk torna tezgâhının aynasına ve aşındırılacak deney numunesi ise bir sistem bütünlüğü içinde torna tezgâhının katerine tespit edilmiştir.

Aşındırılacak malzemeye kuvvet uygulayacak mekanizma 10 N 15 N ve 20 N' luk yük bir terazi yardımıyla kalibre edilmiştir. Deney numunesi dıştan içe doğru 90 dev/dk ayna devri ve 0,325 mm/dev lik ilerleme hızıyla spiral bir yol takip etmiştir. Deney numuneleri aşındırma aparatına bağlanmadan önce 10^{-4} gr ağırlığa duyarlı Precisa XB marka elektronik terazi ile tartılmış ve aparata bağlama istenen aşama yolu aldırıldıktan sonra sökülerek yüzeyindeki kalıntı metal parçaları basınçlı hava yardımıyla temizlenerek tartma işlemi tekrarlanmıştır. Böylece, numunenin başlangıç ve son durumu arasındaki ağırlık farkı tespit edilerek aşınmadaki ağırlık kaybı bulunmuştur. Aşındırıcı olarak 80 numara silisyum karbür (SiC) zımpara kâğıdı kullanılmıştır. Her bir kullanımdan sonra bu zımpara kâğıdı yenisi ile değiştirilmiştir. Şekil 4,2 'de torna tezgâhına monte edilmiş aşınma aparatı gösterilmiştir.



Şekil 4,2. MKE yapımı torna tezgâhına monte edilmiş aşınma aparatı

5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Kaplama Bor İçerikleri, Penetrasyon Derinliği ve Kaplama Yüksekliği:

Çalışmada üretilen elektrotlar Şekil 5,1 ve kaplamalardaki bor miktarları ısı girişine bağlı olarak Tablo 5,1’de verilmiştir. Bundan sonraki kısımlarda örtü çapı 5.20 mm olan elektrot Elektrot I ve 6.65 mm olan elektrot Elektrot II olarak ifade edilmektedir.



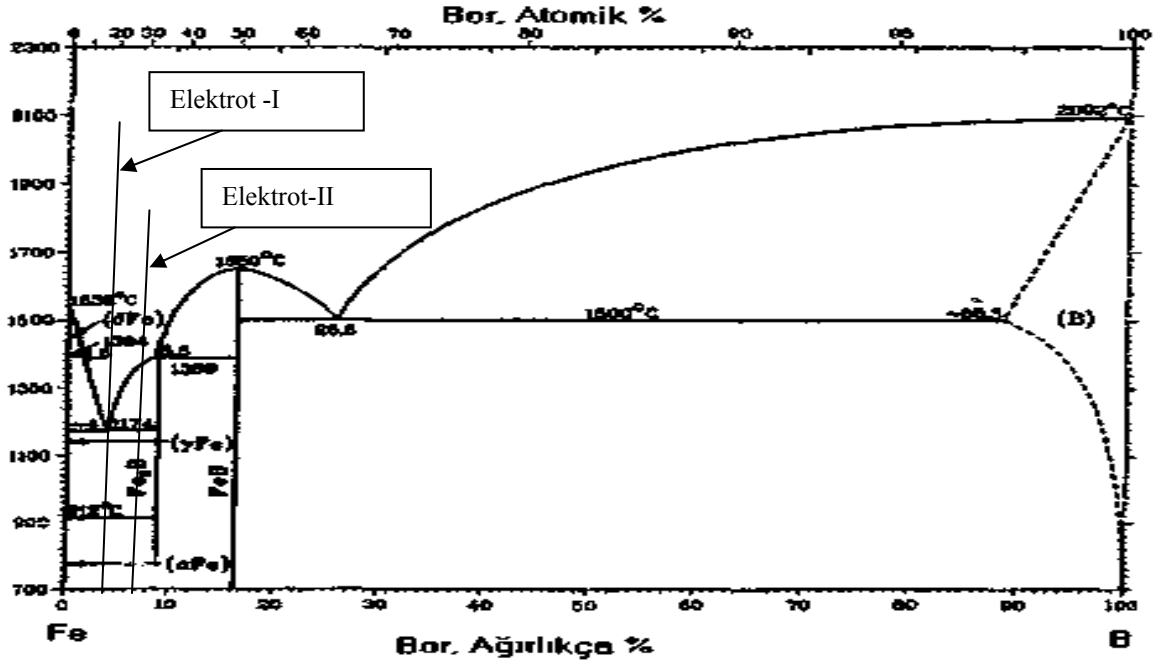
Şekil 5,1. Çalışmada üretilen 5.20 mm (Elektrot I) ve 6.65 mm (Elektrot II) örtü çapına sahip elektrotlar.

Tablo 5,1. Isı girişi ve elektrot örtü kalınlığına bağlı olarak kaplamada bor içerikleri (%ağırlık)

Net Isı Girişi (kJ/mm)	Bor Miktarı	
	Elektrot	
	Elektrot I	Elektrot II
0.54	4.332	7.292
0.74	4.309	7.278
0.92	4.297	7.234
1.12	4.265	7.216
1.23	4.248	7.189
1.34	4.219	7.165

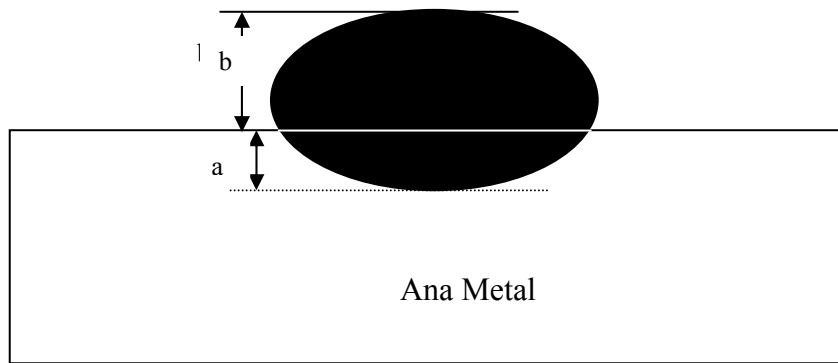
Tablo 5,1’de de görüleceği gibi kaplamada Elektrot I yaklaşık % 4,2 B ve Elektrot II ise yaklaşık %7,2 B vermiştir. Şekil 5,2’ de Fe-B denge diyagramı verilmiştir. Buna göre Elektrot I ötektik civarında (ötektiğin hemen üstünde) bir analiz verirken, kalın örtülü elektrot olan Elektrot II ötektik üstü (hiperötektik) bir analiz sergilemiştir. Böylece bu sonuçlar, örtüye katılan farklı miktarlardaki ferrobora ile kaplamaya farklı miktarlarda bor geçirilebileceğini göstermiştir. Enerji girişine bağlı olarak bor içeriğinde çok az bir azalmanın olduğu

görülmektedir. Bu durum, enerji girişindeki artışla beraber alaşım elementlerinin bir miktar yanarak curufa geçmesiyle izah edilebilir [20].



Şekil 5,2. Fe-B denge diyagramı üzerinde Elektrot I ve Elektrot II'nin kaplamada verdikleri bor içerikleri.

Şekil 5,3'de penetrasyon derinliği ve kaplama yüksekliği şematik olarak gösterilmiş olup, ölçülen değerler Tablo 5,2 ve 5,3'de verilmiştir. Bu tablolardan da görüleceği gibi, ısı girişindeki artışla beraber penetrasyon derinliği ve kaplama yükseklikleri artmıştır. Yine Elektrot I ve Elektrot II kıyaslandığında Elektrot I ile yapılan kaplamanın penetrasyon derinliği daha fazla iken Elektrot II ile yapılan kaplamanın penetrasyon derinliği daha azdır. Bu durum kalın örtülü olan Elektrot II'de daha kalın örtünün direncini arttırmasıyla izah edilebilir [30].



Şekil 5,3. Penetrasyon derinliği (a) ve kaplama yüksekliği (b)'nin şematik gösterimi

Tablo 5,2. Isı girişine bağlı olarak penetrasyon derinlikleri

Net Isı Girişi (kJ/mm)	Penetrasyon derinliği (mm)	
	Elektrot	
	Elektrot I	Elektrot II
0.54	1.31	1.10
0.74	1.46	1.24
0.92	1.63	1.38
1.12	1.81	1.58
1.23	1.94	1.66
1.34	2.08	1.79

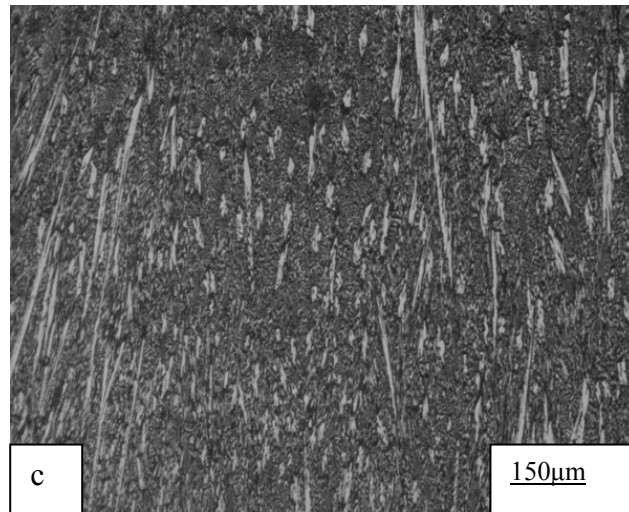
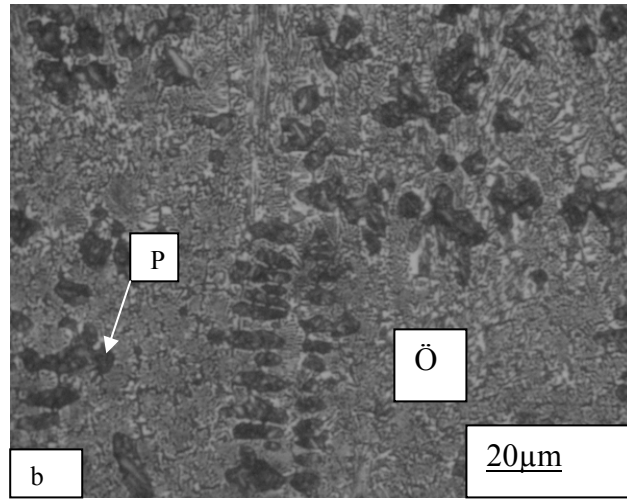
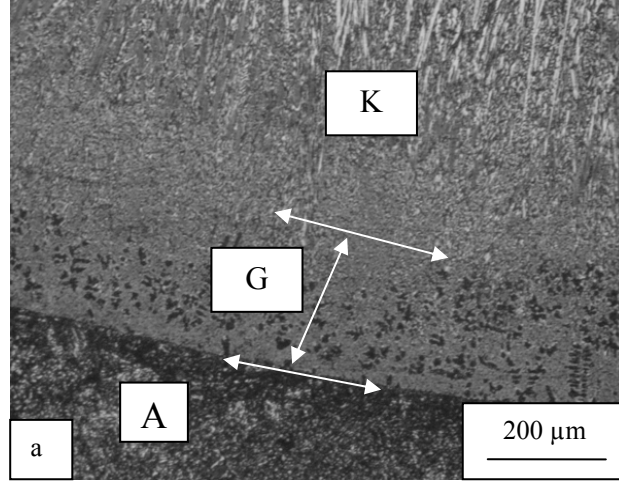
Tablo 5,3. Isı girişine bağlı olarak kaplama yükseklikleri

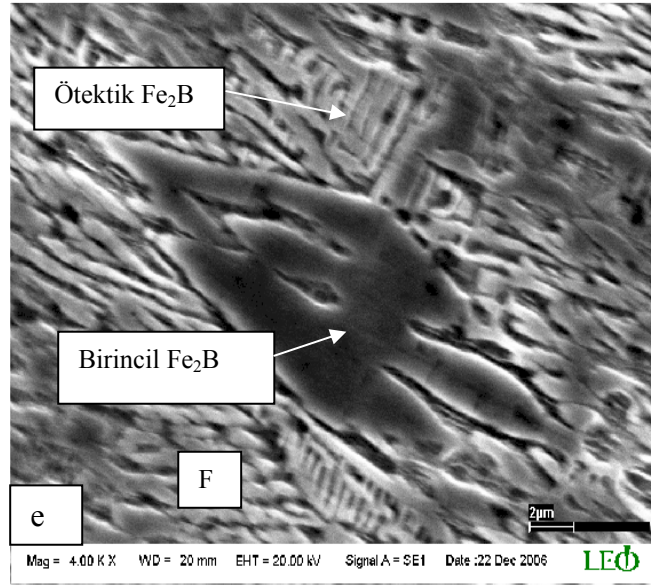
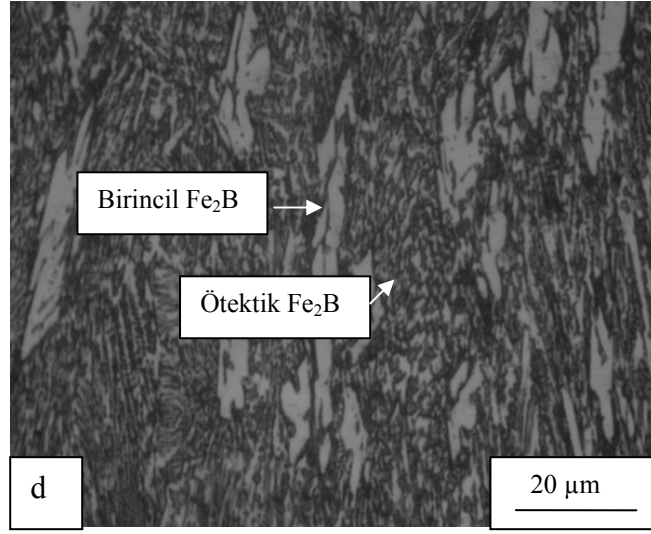
Net Isı Girişi (kJ/mm)	Kaplama yüksekliği (mm)	
	Elektrot	
	Elektrot I	Elektrot II
0.54	2.18	2.75
0.74	2.47	3.01
0.92	2.69	3.22
1.12	2.90	3.46
1.23	3.08	3.64
1.34	3.24	3.81

5.2. Mikroyapı İnceleme Sonuçları

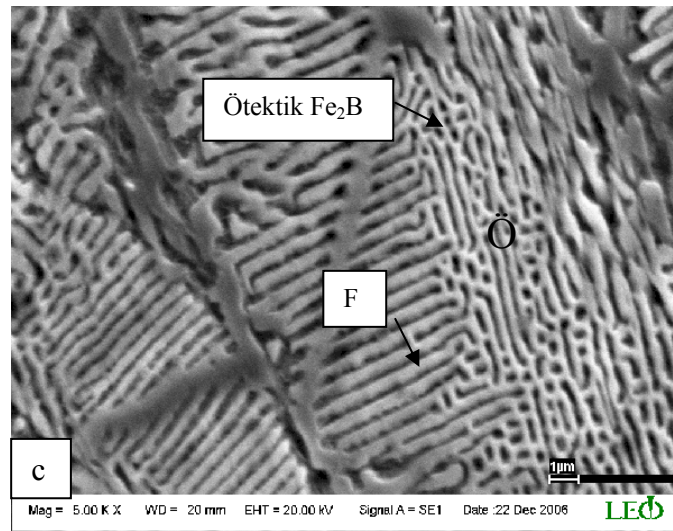
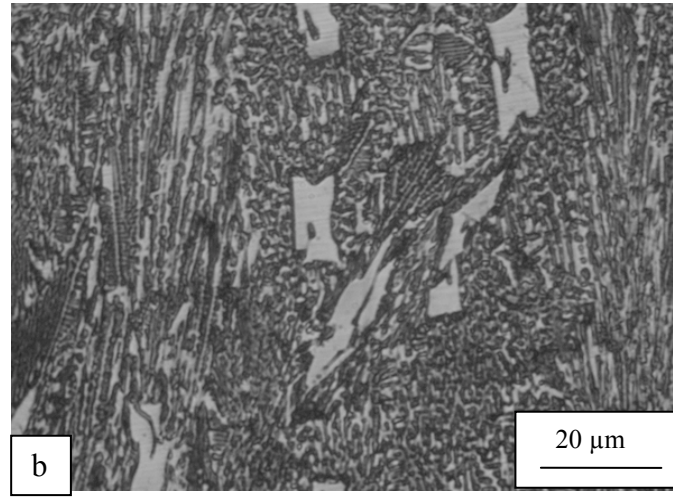
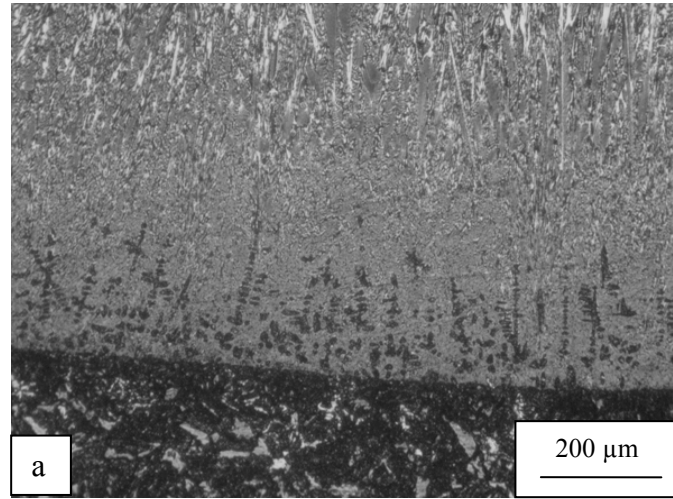
5.2.1. Elektrot I ile yapılan kaplama için mikroyapı inceleme sonuçları:

Yapılan mikroyapı inceleme sonucunda mikroyapıların ölçülen bor içerikleriyle uyumlu olarak değiştiği görülmüştür. Elektrot I ile yapılan kaplamada alınan mikroyapılar Şekil 5,4–5,9’da verilmiştir.

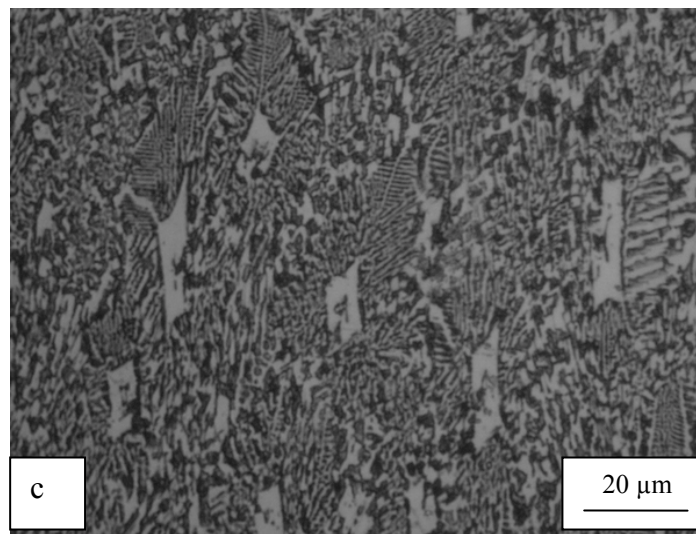
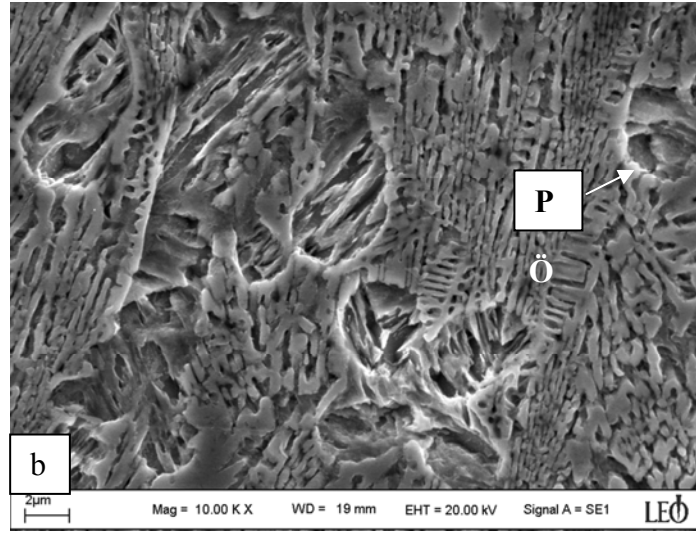
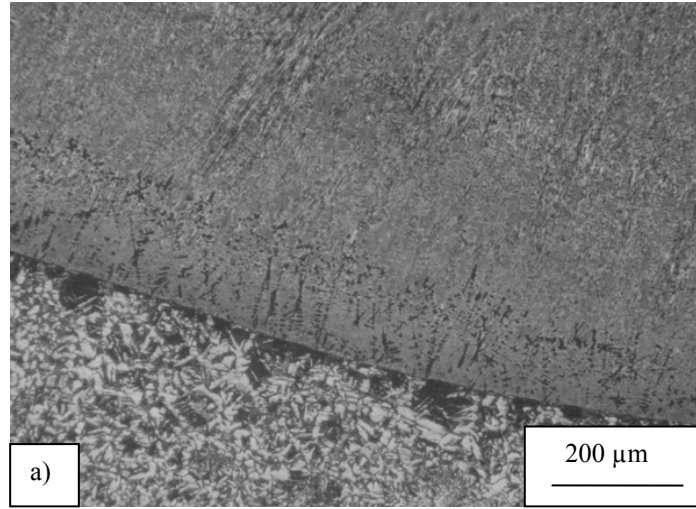




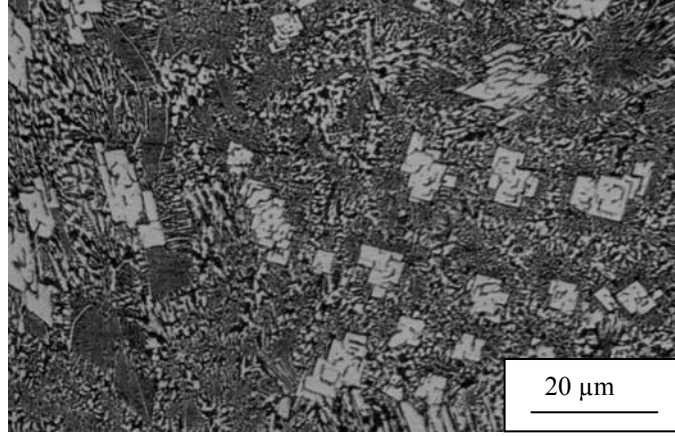
Şekil 5,4. 0.54 kJ/mm ısı girişi için elektrot I ile yapılan kaplamada a)(optik mikroskop) kaplama bölgesi, b) (optik mikroskop) geçiş bölgesi c) (optik mikroskop), d)(optik mikroskop) ve e) (SEM) kaplama mikroyapısı (A: anametal, G: geçiş bölgesi, K: kaplama, P: perlit, Ö: ötektik, F: ferrit).



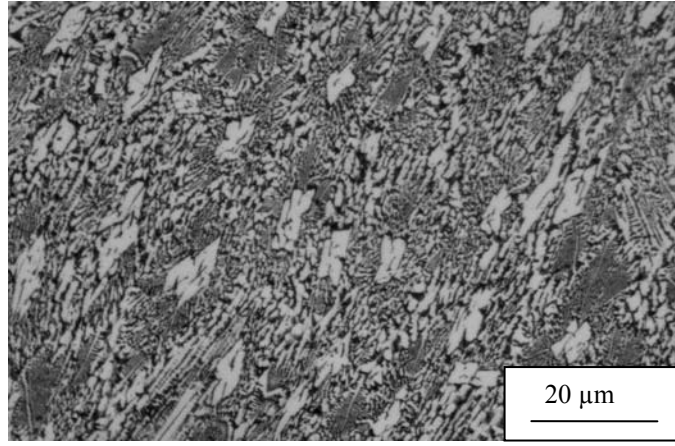
Şekil 5,5. 0.74 kJ/mm ısı girişi için elektrot I ile yapılan kaplamada a)(optik mikroskop) kaplama bölgesi, b) (optik mikroskop) ve c) (SEM) kaplama mikroyapısı.



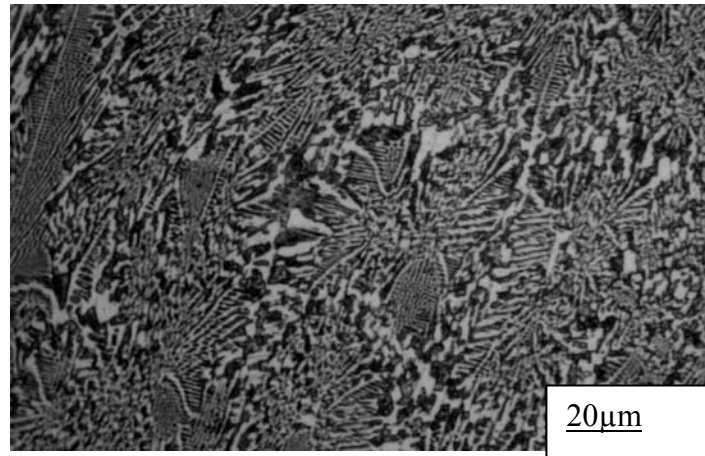
Şekil 5,6. 0.92 kJ/mm ısı girişi için elektrot I ile yapılan kaplamada a) (optik mikroskop) kaplama bölgesi, b) (SEM) geçiş ve c) (optik mikroskop) kaplama mikroyapısı.



Şekil 5,7. 1.12 kJ/mm ısı girişi için elektrot I ile yapılan kaplamada kaplama mikroyapısı optik mikroskop mikroyapı resmi.



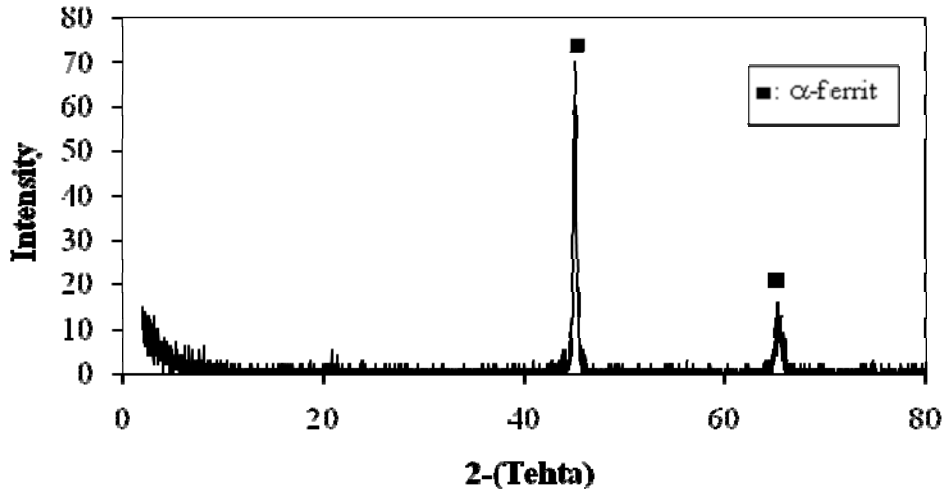
Şekil 5,8. 1.23 kJ/mm ısı girişi için elektrot I ile yapılan kaplamada kaplama mikroyapısı optik mikroskop mikroyapı resmi.



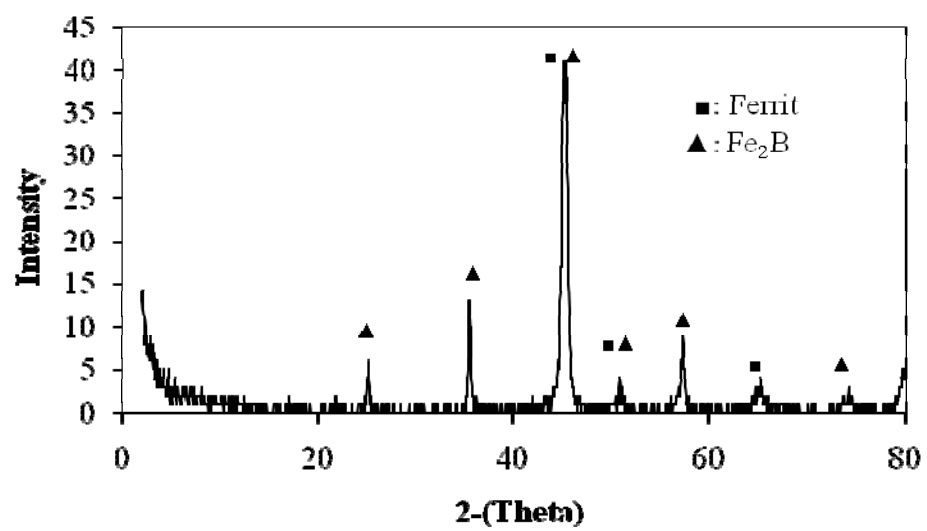
Şekil 5,9. 1.34 kJ/mm ısı girişi için elektrot I ile yapılan kaplamada kaplama mikroyapısı optik mikroskop mikroyapı resmi.

Verilen mikroyapı resimlerinden de görüleceği gibi, elektrot I için kaplama mikroyapısı genel olarak ötektik yapı (demir-bor bileşiği + α ferrit) ve çok az birincil demir-bor bileşiğinden oluştuğu görülmüştür.

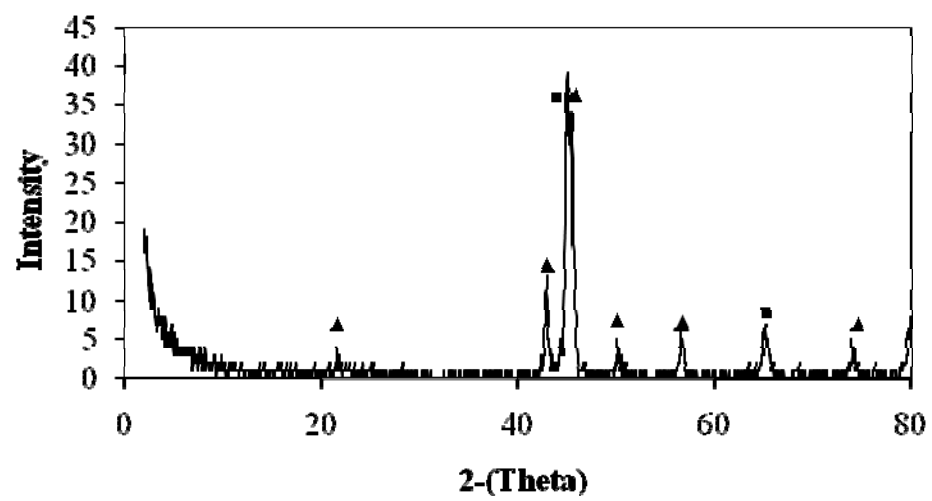
Yapılan X-ray analizleri demir–bor bileşiklerinin Fe_2B bileşiği olduğunu göstermiştir. İlgili X-ray pikleri ana malzeme, 0.54, 0.92 ve 1.32 kJ/mm ısı girişi için Şekil 5.10’da verilmiştir. Dolayısıyla bütün ısı girişi için ötektik yapı $\text{Fe}_2\text{B} + \alpha\text{-Fe}$ ’den oluşmaktadır. Enerji girişi daha çok mikroyapının inceliği üzerinde etkili olmuştur. Düşük enerji girişi, hızlı soğumadan dolayı daha ince bir yapının oluşumuna neden olmuştur. Yine, yapılan mikroyapı incelemelerinde ana metal (kaplanan malzeme, çalışmada SAE 1020 çeliği) ile kaplama arasında mikroyapısal açıdan kaplama yapısından farklı bir bölge tespit edilmiştir. Bu bölge geçiş bölgesi olarak adlandırılmıştır. Bütün enerji girişleri için geçiş bölgesinde mikroyapı ötektik yapı ($\text{Fe}_2\text{B} + \alpha\text{-Fe}$) + perlit adacıklarından oluşmaktadır. Oluşan perlit adacıkları Kaplamada ve geçiş bölgesinde mikroyapı oluşumu aşağıda belirtildiği gibi izah edilmiştir.



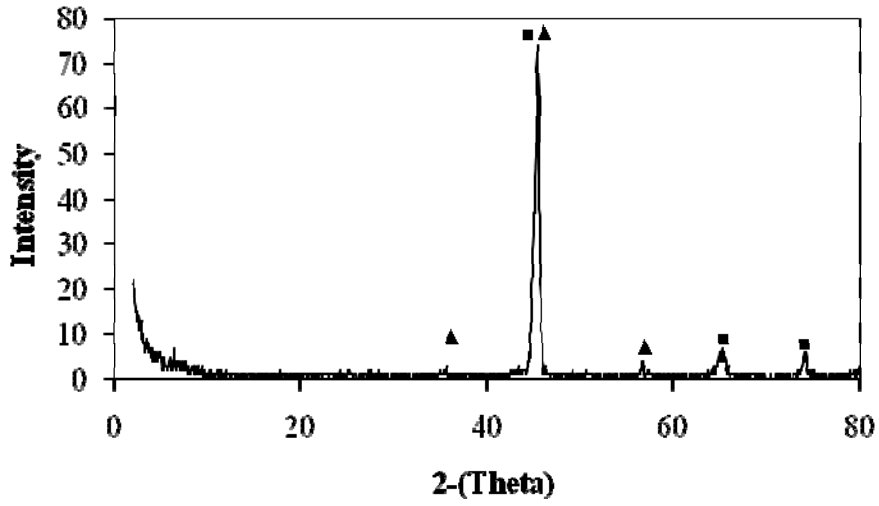
a)



b)



c)



d)

Şekil 5.10. a) SAE 1020 kaplanan çelik, b) 0.54 kJ/mm, c) 0.92 kJ/mm ve 1.32 kJ/mm ısı girişleri için kaplamalardan alınan x-ray analiz sonuçları.

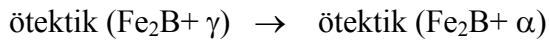
Kaplama bölgesinin ana metale yakın kısımdaki bileşim üzerinde ana metal etkili olurken kaplama üst bölgelerine doğru elektrot bileşimi etkili olmaktadır. Dolayısıyla geçiş bölgesinde demir oranı yükselirken bor oranı düşmüştür. Tablo 5,4’de geçiş bölgesinde alınan bor miktarını göstermektedir. Fe-B ikili denge diyagramı göz önünde bulundurulduğunda, kaplamada ve geçiş bölgesindeki mikroyapı oluşum reaksiyonu aşağıda belirtildiği gibi izah edilmektedir.

Kaplamada:

Ötektik dönüşüm (1174°C)



723 °C’de:



Oda sıcaklığında mikroyapı: $\text{Fe}_2\text{B} (\text{çok az}) + \text{ötektik} (\text{Fe}_2\text{B} + \alpha)$

Geçiş bölgesinde:

Ötektik dönüşüm (1174°C)



723 °C de

Ötektoidik dönüşüm



Oda sıcaklığındaki mikroyapı: $\text{ötektik} (\text{Fe}_2\text{B} + \alpha) + \text{perlit (sorbitik)}$ (adacıklar halinde)

Kaplama bölgesinde mikroyapı oluşumuna baktığımızda, sıvı alaşımdan öncelikli olarak çok az birincil Fe_2B oluşmaktadır. Geride kalan sıvı ise ötektik dönüşümle Fe_2B +östenit'e dönüşmektedir. Alaşımda karbon miktarı oldukça düşük olduğu için, oluşan östenit oldukça düşük karbon içermektedir. Dolayısıyla 723 °C' de östenit ferrite dönüşmektedir.

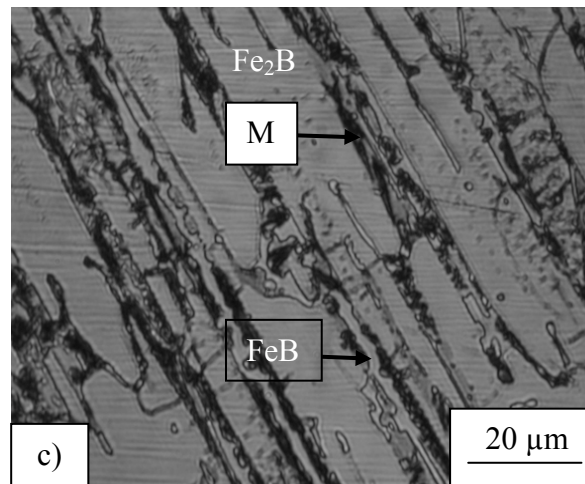
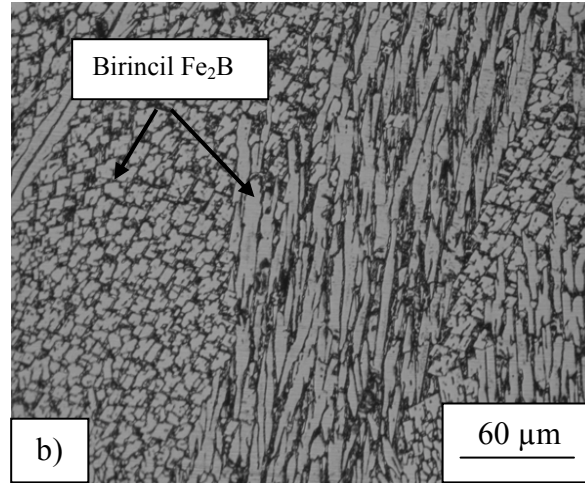
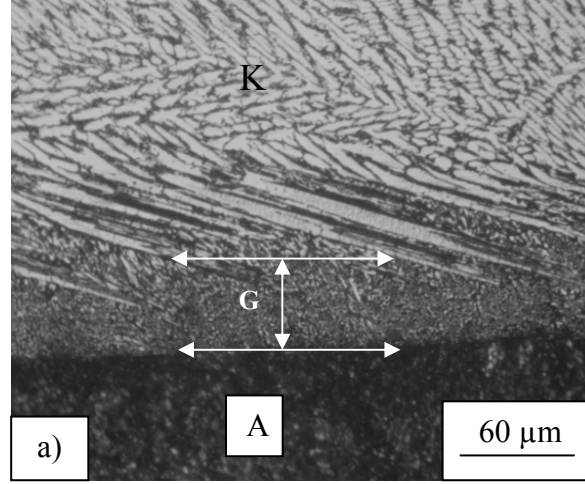
Geçiş bölgesinde mikroyapı oluşumuna baktığımızda; sıvıdan ilk olarak bir miktar δ ferrit dönüşmektedir. Oluşan ferritte bor'un çözünürlüğü düşük olduğu için, bor atomları sıvı içerisine doğru hareket ederken, sıvıdaki karbon da δ ferrite difüze olmaktadır. Bu bakımdan geride kalan sıvı karbon açısından fakir, ancak bor açısından zengin hale (yaklaşık % 4 B) gelmektedir. Katılaşma devam edip, sıcaklık ötektik sıcaklığa geldiğinde sıvı ötektik dönüşümle $Fe_2B + \text{östenit}$ 'e dönüşmektedir. Sıcaklık 723 °C' ye geldiğinde ötektik yapıdaki östenitin karbon oranı oldukça düşük olduğu için ferrite dönüşmektedir. δ ferritten dönüşen östenit ise, 723 °C'de perlitte dönüşmektedir. Ancak bu tür perlitin sorbitik pearlit olduğu literatürde belirtilmektedir. [29]

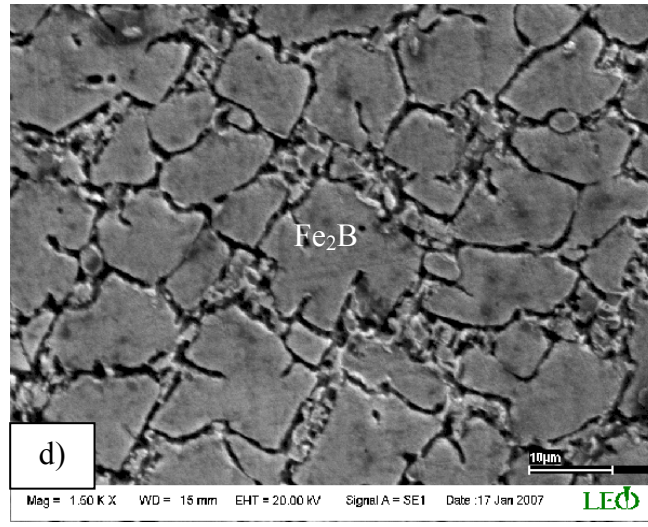
Tablo 5,4. Elektrot I ile yapılan kaplamada geçiş bölgesinden ölçülen bor içerikleri (%ağırlık)

Net Isı Girişi(kJ/mm)	Bor Miktarı
	Elektrot I
0.54	2.322
0.74	2.310
0.92	2.282
1.12	2.245
1.23	2.238
1.34	2.214

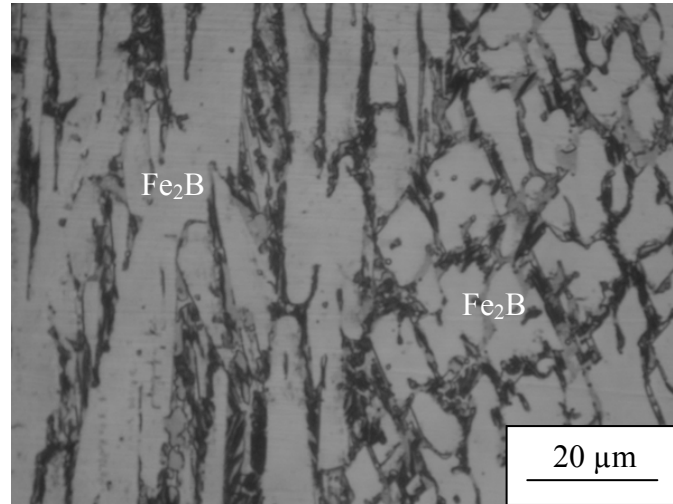
5.3. Elektrot II İle Yapılan Kaplama İçin Mikroyapı İnceleme Sonuçları

Bu elektrot için, yapılan miroyapı incelemeleri sonucunda mikroyapıların ölçülen bor içerikleriyle uyumlu olarak değiştiği görülmüştür. Elektrot II ile yapılan kaplamada alınan mikroyapılar Şekil 5.11–5.16’da verilmiştir.

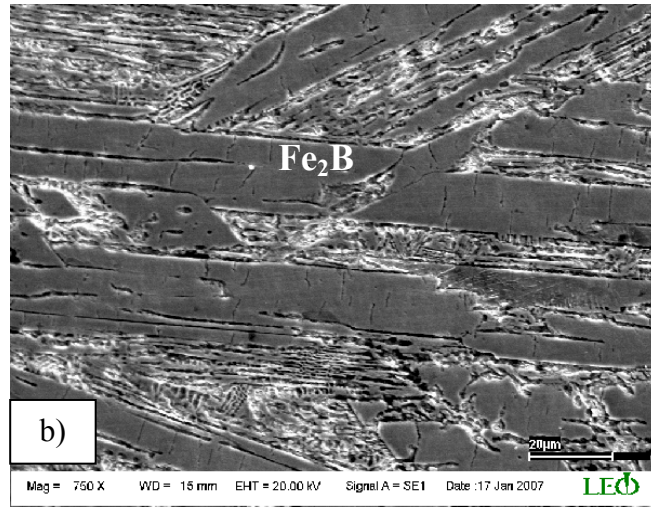
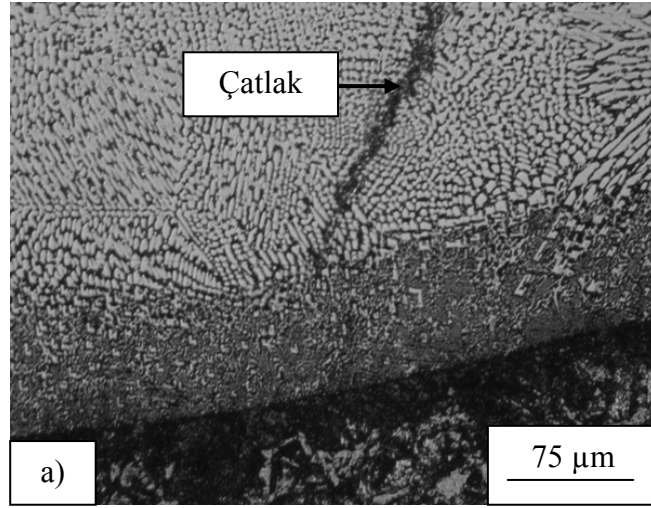




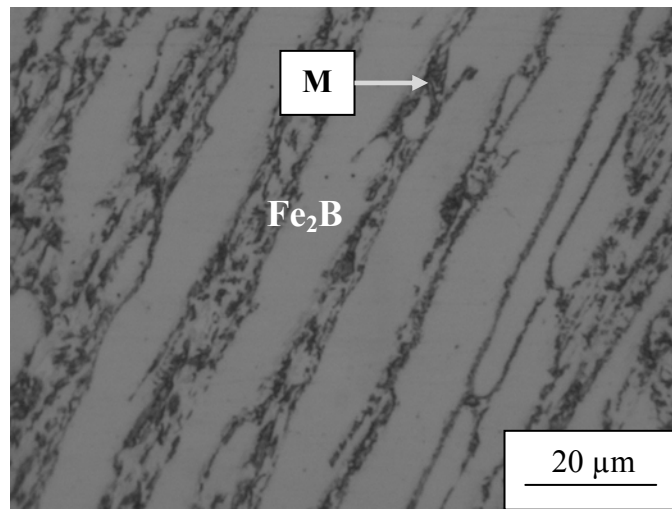
Şekil 5. 11. 0.54 kJ/mm ısı girişi için elektrot II ile yapılan kaplamada a)(optik mikroskop) kaplama bölgesi, b) (optik mikroskop), c) (optik mikroskop), d) (SEM) kaplama mikroyapısı (A: anametal, G: geçiş bölgesi, K: kaplama, M: martenzit).



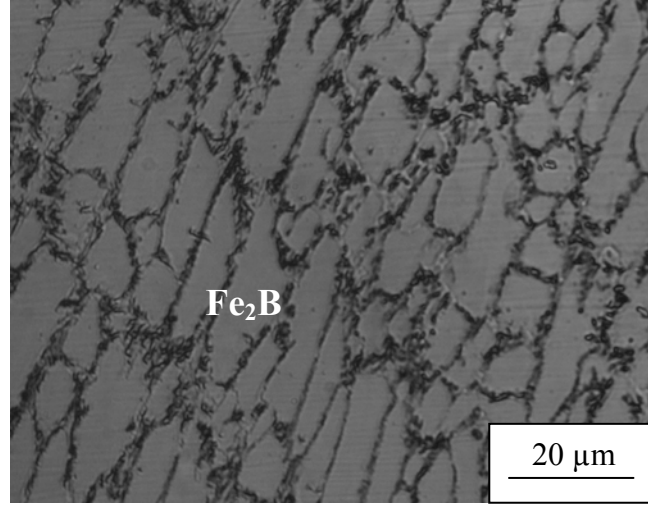
Şekil 5.12. 0.74 kJ/mm ısı girişi için elektrot II ile yapılan kaplamada, optik mikroskop kaplama mikroyapı görüntüsü.



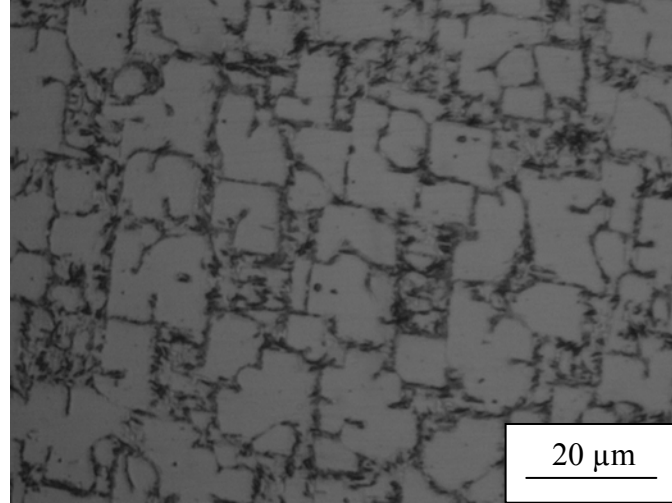
Şekil 5.13. 0.92 kJ/mm ısı girişi için elektrot II ile yapılan kaplamada a) (optik mikroskop) kaplama bölgesi ve b)(SEM) kaplamadan alınmış mikroyapı görüntüleri



Şekil 5.14. 1.12 kJ/mm ısı girişi için elektrot II ile yapılan kaplamada optik mikroskop kaplam mikroyapı görüntüsü (M: martenzit).

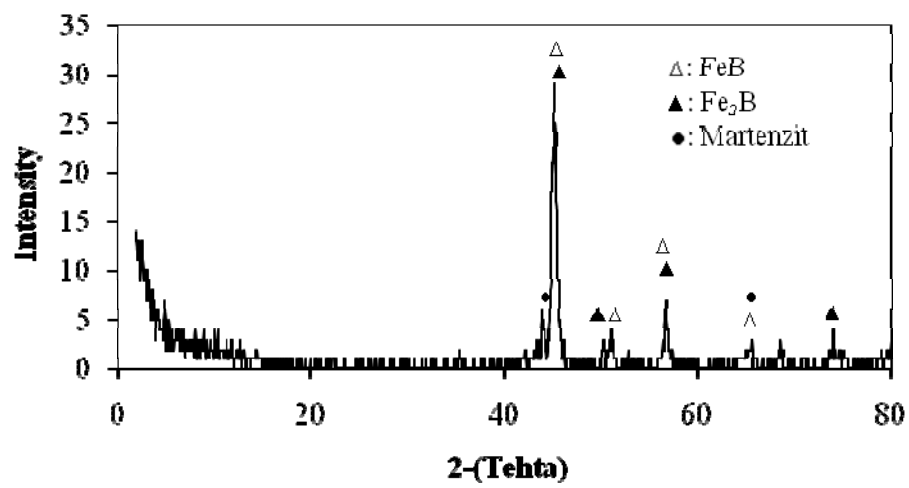


Şekil 5.15. 1.23 kJ/mm ısı girişi için elektrot II ile yapılan kaplamada optik mikroskop kaplam mikroyapı görüntüsü.

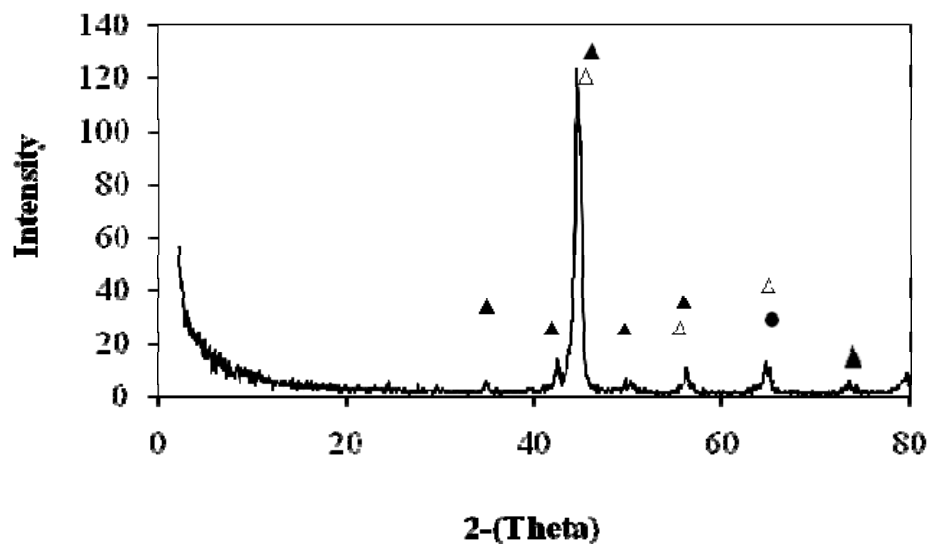


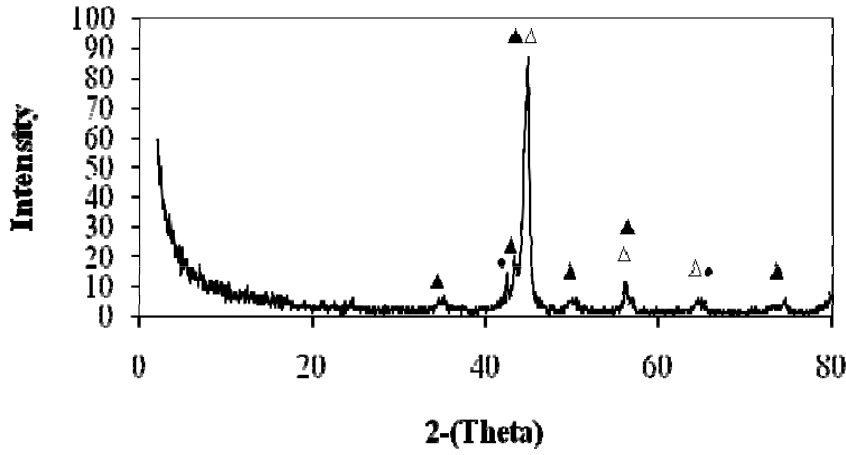
Şekil 5.16. 1.34 kJ/mm ısı girişi için elektrot II ile yapılan kaplamada optik mikroskop kaplam mikroyapı görüntüsü.

Mikroyapı resimlerinden de görüleceği gibi, elektrot II için kaplama mikroyapısı genel olarak birincil demir bor bileşiği ve ötektik yapı (demir-bor bileşiği + martenzit)’dan oluştuğu görülmüştür. Yapılan X-ray analizleri demir–bor bileşiklerinin Fe_2B ve FeB bileşikleri olduğunu göstermiştir. Bunlar Şekil 5.17’de 0.54, 0.92 ve 1.32 kJ/mm enerji girişleri için verilmiştir.



a)





c)

Şekil 5.17. a) 0.54 kJ/mm, b) 0.92 kJ/mm ve c) 1.32 kJ/mm ısı girişleri için elektrot II ile yapılan kaplamalardan alınan x-ray analiz sonuçları.

Mikroyapı incelemeleri FeB bileşiklerinin Fe_2B fazlarının arasında oluştuğunu göstermiştir. Bütün ısı girişlerinde benzer yapılar görülmüştür. Tek fark ısı girişindeki artışla beraber meydana gelen kısmi kabalaşma olmuştur. Yapılan makro ve mikro incelemeler sonucunda elektrot II ile yapılan kaplamalardan alınan numunelerde birer adet olmak üzere çatlaklara rastlanmıştır. Bu durum 0.92 kJ/mm enerji girişi için Şekil 5.13a’da görülmektedir. Yine, elektrot I de olduğu gibi, elektrot II için de yapılan mikroyapı incelemelerinde ana metal (kaplanan malzeme) ile kaplama arasında mikroyapısal açıdan kaplama yapısından farklı bir bölge tespit edilmiştir. Bu bölge geçiş bölgesi olarak adlandırılmıştır. Bütün enerji girişleri için geçiş bölgesindeki mikroyapının genel olarak ötektik yapı ($Fe_2B + \alpha-Fe$)’dan oluştuğu tespit edilmiştir.

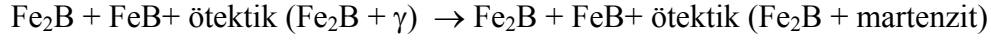
Geçiş bölgesinden ana metal hâkim olup, ölçülen bor miktarları enerji girişine bağlı olarak Tablo 5,5’de verilmiştir. Bu tablodan da görüleceği gibi, Fe-B deneye diyagramına göre, bileşim yaklaşık ötektik bileşimdir. Dolayısıyla geçiş bölgesinde mikroyapı $Fe_2B + \alpha-Fe$ oluşmaktadır. Oysa kaplama ana yapısı birincil $Fe_2B + FeB +$ ötektik ($Fe_2B +$ martenzit) yapısından oluşmaktadır. Kaplamada ve geçiş bölgesinde mikroyapı oluşumu aşağıda gösterildiği gibi izah edilmektedir.

Kaplamada:

Ötektik dönüşüm (1174 °C)



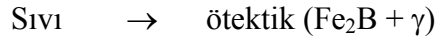
723 °C'nin altında:



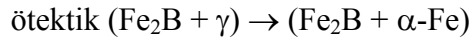
Oda sıcaklığındaki mikroyapı: Birincil $Fe_2B + FeB + \text{ötektik } (Fe_2B + \text{martenzit})$

Geçiş bölgesinde:

Ötektik dönüşüm (1174 °C)



723 °C'nin altında:



Oda sıcaklığındaki mikroyapı: Ötektik ($Fe_2B + \alpha\text{-Fe}$)

Kaplamada mikroyapı oluşumuna baktığımızda, sıvıdan ilk olarak birincil Fe_2B ve FeB oluşmaktadır. Fe-B denge diyagramına göre bu kaplama bileşimi (~%7.2B) için FeB 'nin oluşmaması gerekmektedir. Bu nedenle FeB 'nin bor açısından yerel konsantrasyon farkının yüksek olduğu bölgelerde oluştuğu kabul edilmektedir. Bu bölgeler de Fe_2B levhaları arasındır. Sıvıdan Fe_2B ve FeB oluşumundan sonra, sıcaklık ötektik sıcaklığa (1174 °C) doğru düştükçe mikroyapıdaki Fe_2B ve FeB miktarı artarken sıvı miktarı oldukça azalmakta olup, Fe_2B ve FeB kristal kafeslerinde karbon çözündüremedikleri için, sıvı içindeki karbon miktarı artmaktadır. Ötektik sıcaklığa gelindiğinde kalan sıvı ötektik dönüşümle Fe_2B ve östenite dönüşmektedir. Ötektik dönüşüme uğrayan sıvı karbon açısından zengin oluğu için, ötektik dönüşümle oluşan östenit karbon açısından zengin östenittir. Bu östenit oda sıcaklığına soğuma süresince martenzite dönüşmektedir.

Geçiş bölgesi için mikroyapı oluşumuna baktığımızda, sıvının bileşimi yaklaşık ötektik bileşim olduğu için, sıvıdan direkt katılaşma gerçekleşmektedir. Ötektik dönüşüm sonucunda Fe_2B ve östenite meydana gelmektedir. Buradaki östenit oranı kaplamadakine göre oldukça fazla olduğu için, bu östenitler oldukça düşük karbon içeriğine sahiptirler. Dolayısıyla bu östenitler oda sıcaklığına soğuma süresince ferrit'e dönüşmektedir.

Tablo 5.5. Elektrot II ile yapılan kaplamada geçiş bölgesinden ölçülen bor içerikleri (%ağırlık)

Net Isı Girişi(kJ/mm)	Bor Miktarı
	Elektrot I
0.54	4.112
0.74	4.031
0.92	3.987
1.12	3.934
1.23	3.912
1.34	3.901

Genel olarak mikroyapı inceleme sonuçlarının literatür (Bourithis, 2002; Iakovou, 2001; Scotti, 1996; Kulka, 2004; Pertek, 2002; Nakaidze, 2003; Gopalakrishnan, 2001; GE, 2000; Pons, 1988; Peng, 1990; Shafirstien, 1991; Tayal, 1994; Ahmed, 1995; Glozman, 1997; Agarval,2000; Gopalakrishnan, 2001) [32] ile uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak, literatürdeki çalışmalar plazma ark kaynak (Bourithis, 2002; Iakovou, 2001), lazer ve elektron ışın (Pons, 1988; Peng, 1990; Shafirstien, 1991; Tayal, 1994; Ahmed, 1995; Glozman, 1997; Agarval, 2000), özlü elektrot (Scotti, 1996), [31] ve önce borlama sonra lazer ile yüzey modifikasyonu şeklindedir (Pertek, 2002; Gopalakrishnan, 2001; GE, 2000). Özlü elektrot ile ilgili yapılan çalışmada Scotti ve arkadaşları kaplamada yaklaşık %5 bor verecek şekilde özlü elektrot kullanarak ark kaynak yöntemi ile kaplamada çatlak oluşumunu araştırmışlar ancak geniş bir mikroyapı incelemesinde girmemişlerdir. [26] Mikroyapısal açıdan baktığımızda mevcut çalışma sonuçlarının, Borithis ve arkadaşlarının çalışmaları sonuçlarıyla oldukça uyumluluk göstermiştir. [28] Borithis ve arkadaşları düşük karbonlu çelik yüzeyine değişik kalınlıklarda bor yapıştırmışlar ve bunları daha sonra plazma kaynak enerjisi kullanarak ergitmişler ve geniş bir mikroyapı incelemesi yapmışlardır. Bu çalışmada kaplamada plazma kaynak yöntemiyle %3,7, 5,8, 6,9 ve 7,2 bor elde etmişlerdir. Örtülü elektrot kullanarak elde edilen mevcut kaplama mikroyapılarının Borithis ve arkadaşlarının bulduğu sonuçlarla oldukça benzerlik göstermiştir. [33] Lazer ile yapılan yüzey modifikasyon çalışmalarına baktığımızda araştırmacılar öncelikle değişik çeliklerin yüzeyini geleneksel termokimyasal yöntemle borlamışlar ve daha sonra borlanmış yüzeyi lazer ısı kaynağı kullanarak tekrar ergitip katılaştırmışlardır. Bu çalışmaları yapmalarının nedeni olarak; termokimyasal borlamada yüzeyde uzun çubuksu bor bileşiklerinin(Fe_2B ve FeB)darbeli. Ortamlarda, kırılğan, olmasını, göstermişlerdir.

Ancak, termokimyasal yöntemle borlanmış yüzeyin lazer ile tekrar ergitilmesiyle uzun çubuksu yapılar yerini daha ince yapılara bırakmışlar ve tokluk artışına neden olmuşlardır [29].

Gerek plazma kaynak, lazer ve elektron ışın yöntemi gerekse geleneksel borlama ve lazer ile ergitme yöntemleri sonuçlarıyla, mevcut çalışma sonuçlarının oldukça benzerlik göstermesi, mevcut çalışmanın başarısını ortaya koyduğu gibi, ekonomiklik ve geniş yüzeylerin borlanması konusunda da yeni bir ufuk açmıştır. Şöyle ki; plazma ark kaynak makinası kullanılarak yapılan kaplamada, bor tozu önce alkol ile beraber yüzeyse yapıştırılıp, kurutulduktan sonra kaynak makinasıyla ergitiliyor. Burada yapılan işlem hem zaman alıcı hem plazma ark kaynak makinesi oldukça pahalı bir cihazdır. Benzer olarak lazer ve elektron ışın yöntemleri de oldukça pahalı yöntemlerdir. Yine yüzeyi önce termokimyasal yöntemle borlama ve sonra lazer ile ergitme işlemi ise yine hem oldukça zaman alıcı hem de oldukça pahalı bir yöntem olarak görülmektedir. Oysa mevcut çalışmayla geliştirilen örtülü elektrot ile oldukça geniş yüzeylere çok hızlı, pratik ve oldukça ucuz olarak istediğimiz oranda bor geçişi sağlanmaktadır. Dolayısıyla, özellikle geniş yüzeyler göz önünde bulundurulduğunda, üretilen örtülü elektrotlar ile yüzeye bor geçirilmesi işleminin, geleneksel borlama işleminin yerini alacağına inanılmaktadır.

Üretilen elektrotlarla nükleer santrallerdeki çelik yüzeylerinin kaplanması için kullanılması da önerilecektir. Şöyleki; nükleer santrallerde kullanılan çeliklerde nötron absorblaması nedeniyle bu çeliklerde bor kullanılmaktadır. Bu amaçla yapılan bir çalışmanın (Nakaidze, 2003) mikroyapı sonuçları ile mevcut çalışma sonuçları da uyum içindedir. Ancak çeliğe katılan bor elementi çeliğin deformasyon özelliklerini oldukça sınırlandığından bor miktarı %1'i geçmemektedir. Bu bakımdan nükleer santrallerde kullanılan çeliklerin yüzeylerinin mevcut çalışmayla üretilen örtülü elektrotlarla kaplanarak tek pasoda yüzeyde yaklaşık 4–5 mm' lik bir kısımda %7,2'ye kadar bor elde edilebilecektir.

5.4 Sertlik Ölçüm Sonuçları

Kaplamaların yüzeyinden başlayıp ana metale doğru alınan sertlikler Tablo.5,6 ve 5,7'de verilmiştir. Bu tablolardan da görüleceği gibi en yüksek sertlikler Elektrot II'nin vermiş olduğu kaplamalarda elde edilmiştir. Bunun neden ise Elektrot II ile yapılan kaplamada kaplamaya daha fazla bor (%7,2) geçerek mikroyapı da sert fazlar olan birincil Fe₂B+FeB Yapılarını oluşturmaktadır. Her iki elektrot için de geçiş bölgesinde sertlikler düşmüştür. Bu durum ise bu bölgede bor miktarının düşüşüne bağlanmaktadır. Isı girişindeki artışla beraber çok az bir sertlik düşüşü görülmüştür. Bu durum, ısı girişindeki artışla beraber bor miktarındaki düşüşle ilişkilendirilmektedir. Ancak, bu düşüş fazla olmadığı için sertlik düşüşü de fazla değildir.

Tablo 5, 6. Elektrot I ile yapılan kapmalarda alınan sertlik değerleri (HV_{0.2}).

Kaplamanın yüzeyinden ana metale doğru mesafe (mm)	Net Isı Girişi (kJ/mm)					
	0.54	0.74	0.92	1.12	1.23	1.34
0.3	903	881	910	850	840	830
0.6	855	901	832	824	790	890
0.9	1025	864	894	895	910	798
1.2	845	905	965	886	835	844
1.5	891	865	952	830	824	915
1.8	978	873	870	847	750	805
2.1	865	920	893	975	843	820
2.4	862	1010	900	843	862	815
2.7	830	880	910	815	813	844
3.0	905	886	840	821	805	836
3.3	810	855	830	907	802	735
3.6	230	805	860	829	790	833
3.9	225	220	845	824	834	872
4.2		215	800	836	890	793
4.5			219	795	835	803
4.8			215	215	800	821
5.2				210	215	780
					210	210

Not: (koyu olarak gösterilen değerler geçiş bölgesinden alınmıştır, Geçiş bölgesinden sonraki değerler ana metale aittir.)

Tablo 5,7. Elektrot II ile yapılan kapmalarda alınan sertlik değerleri (HV_{0,2}).

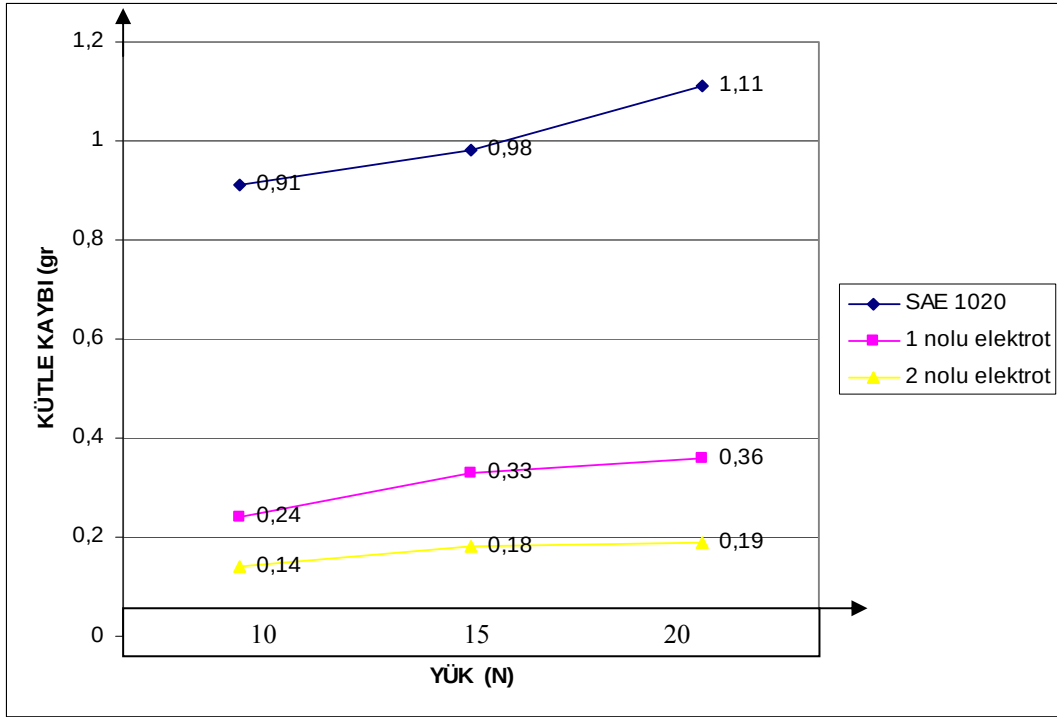
Kaplamanın yüzeyinden ana metale doğru mesafe (mm)	Net Isı Girişi (kJ/mm)					
	0.54	0.74	0.92	1.12	1.23	1.34
0.3	1850	1750	1630	1535	1529	1510
0.6	1755	1810	1750	1640	1510	1480
0.9	1940	1852	1680	1710	1615	1540
1.2	1610	1870	1740	1630	1580	1610
1.5	1880	1750	1610	1535	1640	1485
1.8	1710	1640	1660	1615	1555	1520
2.1	1870	1785	1695	1595	1486	1590
2.4	1675	1690	1710	1640	1512	1515
2.7	1790	1860	1595	1565	1495	1480
3.0	1851	1630	1640	1585	1580	1415
3.3	1932	1730	1715	1655	1455	1560
3.6	880	1880	1595	1600	1588	1390
3.9	235	878	880	1560	1610	1485
4.2	230	225	220	1510	1555	1530
4.5		220	215	872	1480	1490
4.8				215	870	1590
5.2				210	210	861
					210	210
						210

Not: (koyu olarak gösterilen değerler geçiş bölgesinden alınmıştır, Geçiş bölgesinden sonraki değerler ana metale aittir.)

Mevcut çalışmadaki kaplamalarda bulunan bor içeriğine yakın bor içeriği literatürde plazma ark kaynak yöntemi kullanılarak elde edilmiş ve sertlikler belirlenmiştir [27]. Bourithis ve arkadaşlarının buldukları sertlik değerleri ile mevcut çalışmadaki sertlik değerleri uyum içindedir. Ancak mevcut çalışmanın farkı ilk defa örtülü elektrot kullanılmış olmasıdır. Bu çalışma 1900 HV'lere varan sonuçların ilk defa örtülü elektrot ile elde edilebileceğini göstermiştir.

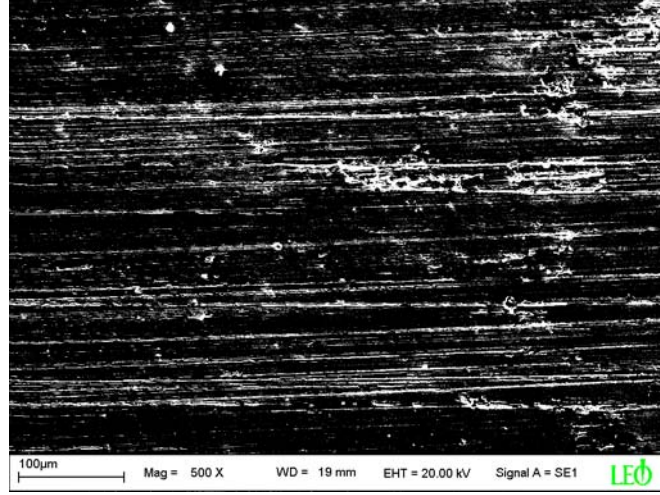
5.5.Aşınma Testi Sonuçları:

Şekil 5.18.da 1.12 kJ/mm enerji girişi kullanılarak kaplanmış numuneler için kütle kaybı – yük ilişkisi verilmiştir.

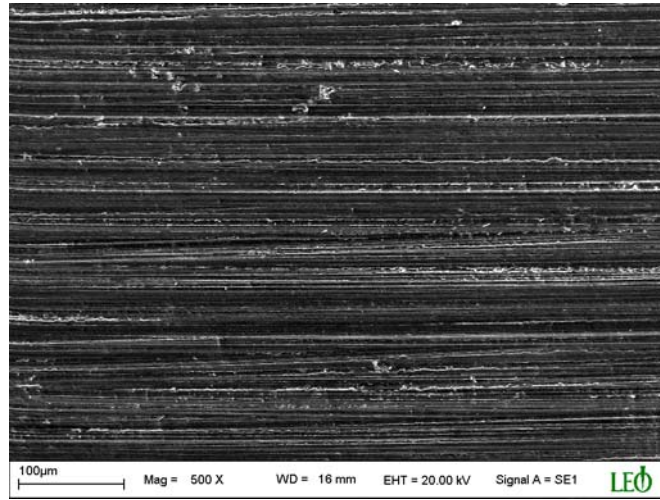


Şekil 5.18. 1.12 kJ/mm enerji girişi kullanılarak üretilen numunelerden elde edilmiş yüzeyleri için Kütle kaybı-yük ilişkisi

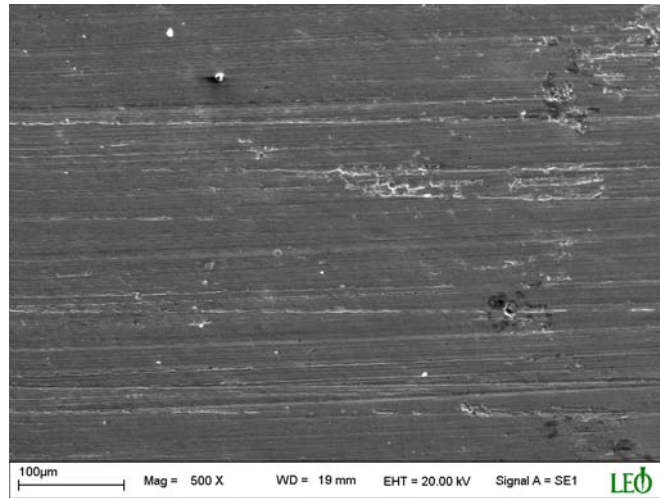
Şekil 5,18 ‘da görüldüğü üzere en düşük aşınma kaybı 2 nolu elektrottan yapılmış numunede ve en yüksek aşınma kaybı ise SAE 1020 celikğinden alınannumunede görülmüştür. 2 nolu elektrotun kullanıldığı numunede görülen en düşük kütle kaybı mikroyapıda bulunan birincil Fe₂B ve martenzit oluşumuna bağlanmaktadır. Bütün numuneler göz önünde bulunduğunda en iyi aşınma direnci 2 nolu elektrotun kullanıldığı ve kaplama içerisine geçen bor miktarına bağlı olduğu görülmektedir. Çizik yüzey fotoğraflarındanda görüleceği gibi en derin ve geniş aşınma izleri herhangi bir işlem yapılmayan numunenin yüzeyinde görülmektedir.(Şekil 5.19) II nolu elektrot ile kaplanmış olan numunenin yüzeyindeki çizikler daha yüzeysel ve dardır.(Şekil 5.21) Bulunan sonuçlar aşınmış yüzeyden alınan SEM görüntüleriyle de desteklenmektedir. Şekil 5.19 – 5.21 ‘de 20 N luk yük için SEM çizik yüzeyleri verilmiştir. Bu resimlerde de görüleceği gibi kaplamadaki bor artışıyla beraber genişlikleri ve derinlikleri azalmaktadır.



Şekil 5,19 Orjinal (yüzeyi işlem görmemiş SAE 1020)numunenin aşınma yüzeyinden alınan SEM Fotoğrafi (X500)



Şekil 5,20 I nolu elektrot ile kaplanmış olan numunenin aşınan yüzeyinden alınan SEM Fotoğrafi (X500)



Şekil 5,21 II nolu elektrot ile kaplanmış olan numunenin aşınan yüzeyinden alınan SEM Fotoğrafi (X500)

5.6. Amprik Formüller:

Yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen ölçümlerden hareketle, Isı girişi-Penetrasyon derinliği, Isı girişi-Kaplama yüksekliği ve Isı girişi-Kaplama bor içeriği grafiklerinin çizimi ve gerekli grafik denkleminin bulunmasından sonra aşağıdaki eşitliklere ulaşılmıştır.

Isı Girişi-Penetrasyon derinliği ilişkisi:

5.20 mm örtü kalınlığına sahip elektrot için

$$P = 0.9551H + 0,7674$$

6.65 mm örtü kalınlığına sahip elektrot için

$$P = 0.8609H + 0,6132$$

P: Penetrasyon derinliği (mm)

H: Isı girişi (kJ/mm)

Isı Girişi-Kaplama yüksekliği ilişkisi:

5.20 mm örtü kalınlığına sahip elektrot için

$$K = 1.2892H + 1,4944$$

6.65 mm örtü kalınlığına sahip elektrot için

$$K = 1.3018H + 2,0371$$

K: Kaplama yüksekliği (mm)

Isı Girişi-Kaplama bor içeriği ilişkisi

5.20 mm örtü kalınlığına sahip elektrot için

$$B = (-131.17H + 4405,9) \times 10^{-3}$$

6.65 mm örtü kalınlığına sahip elektrot için

$$B = (-155,24 H + 7379,7) \times 10^{-3}$$

B: Kaplama bor içeriği (%ağırlık)

6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER:

Bu çalışmada bor yüzey kaplama amacıyla örtülü elektrot imal edilmiştir. Kaplamadaki bor miktarını değiştirmek için elektrot örtüsüne iki farklı oranda ferrobör ilave edilerek kaplama amaçlı kaynaklar çekilmiştir. Kaplama 6 farklı ısı girişinde gerçekleştirilmiştir. Kaplama sonunda kaplama bor içerikleri, penetrasyon derinlikleri, mikroyapılar ve sertlikler ve aşınma özellikleri belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda varılan sonuçlar aşağıda verildiği gibi genelleştirilebilir.

- 1- Örtü kalınlığı 5.20 mm olan elektrot kaplamada yaklaşık % 4,2 B verirken, örtü kalınlığı 6.65 mm olan elektrot yaklaşık % 7,2 B vermiştir.
- 2- Isı girişindeki artışla kaplama bor içeriğinde çok az bir düşüş görülmüştür.
- 3- Isı girişindeki artışla kaplama metalinde mikroyapısal açıdan kabalaşma görülmüştür.
- 4- Her iki elektrotla yapılan kaplamada kaplama bölgesi; kaplama ve geçiş bölgesi olarak iki kısımdan oluşmuştur.
- 5- Örtü kalınlığı 5.20 mm olan elektrot ile yapılan kaplamada kaplama mikroyapısı çok az birincil Fe_2B + ötektik ($\text{Fe}_2\text{B} + \alpha\text{-Fe}$) yapıdan oluşurken, geçiş bölgesi ötektik ($\text{Fe}_2\text{B} + \alpha\text{-Fe}$) + perlit adacıklarından oluşmaktadır.
- 6- Örtü kalınlığı 6.65 mm olan elektrot ile yapılan kaplamada kaplama mikroyapısı birincil $\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$ + ötektik ($\text{Fe}_2\text{B} + \text{martenzit}$) yapıdan oluşurken, geçiş bölgesi ötektik ($\text{Fe}_2\text{B} + \alpha\text{-Fe}$) yapıdan oluşmaktadır.
- 7- Örtü Kalınlığı 6.65 olan elektrot maksimum 1900 HV sertlik verirken örtü Kalınlığı 5.20 olan elektrot maksimum 1000 HV sertlik vermiştir.
- 8- Enerji girişindeki artışla beraber kaplama kalınlığı artmıştır.
- 9- Bu çalışma sonucunda elde edilen elektrotlarla yapılan kaplamaların, nötron absorblama ve baristik özellikleri ileri bir araştırma konusu olarak önerilmektedir.
- 10- Kaplamadaki bor artışıyla beraber kaplamanın abrasiv aşınma direnci artmıştır.

7.KAYNAKLAR

1. Kayalı E.Sabri. ‘‘ sürtünme ve aşınma ‘’,Workshop on Coatings, Tübitak,24–25 Kasım 1993,Gebze
2. Metals handbooks, volume 10,‘‘Failure Analisis and prevention’’,ASM metals park 1975
- 3.Kayalı E.S. ‘‘aşınma ve ve kaplı takımların aşınması’’İ:T:Ü: Kimya-Metalurji Müh.Bölümü 8 Kasım 1995 İstanbul
4. .Wulp Donalt J.‘‘Understanding How Components Fail’’ ,American Societyfor metals, Metals Park, Ohio,1985
- 5.Ulusal bor araştırma enstitüsü(BOREN) web sayfası(www.boren.gov.tr)
- 6.Bozkurt. N.‘Bor Yınlımında Çeliklerde Yüzey sertleştirme’Doktora Tezi İ:T:Ü:1984
- 7.Bindal. C.‘Az alaşımlı ve Karbonlu Çeliklerde Borlama ile yüzeyi kaplanan borürlerin Bazı Özelliklerinin tesbiti’,doktora Tezi. İ.T.Ü.1991
- 8.Özsoy. A. ‘Çeliğin Borür tabakası, geçiş zonu ve ana matriks özelliklerinin iyileştirilmesi’,doktora tezi, Anadolu Üniversitesi,1991
- 9.Şen, U.‘küresel grafitli dökme demirlerin borla kaplanması ve kaplama özellikleri’Doktora Tezi, İ.T.Ü. Eylül 1997
- 10.Usta M.Özbek, İ.İpek, M.Bindal, C.and Üçışık, A.H.’boronizing of Pure Niobium’7th World Biomaterials Congress,1418(2004)
- 11.Erdemir, A.‘A.and Bindal, C.’Formation and self Lubrication mechanizim of boric acid on Borided steel Surface ‘,Surf Coat. tech.76–77,pp443–449,1995
12. Duman, M.Ş., 1999, Kompozit Maizemelerdeki Aşınmanın İncelenmesi, Yüksek Lisans

13. Erdoğan, M. (1998), Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, Nobel Yayın ve Dağıtım, ANKARA.
14. Anık, S. Dilicioğlu, A., Eryürek, B., (1999), İmal Usulleri, Birsen Yayın evi, İSTANBUL.
15. Andriyachin, V.M. process of laser welding and thermal treatment, Publ. Nauka, Moscow 1988.
16. Barwicz, W. More important applications of electron beams, 1990. Proceedings: First Polish Conference on Applications of the electron beam, September 1972, Karpacz, Poland. Transactions of the Institute for Electron Technology of Wrocław Technical University, no. 1, 1974, pp. 11–46.
17. Gozdecki, T. Hering, M., and Bobodzinski, W.: electronic heating equipment. Wsip, Wrsaw 1990.
18. Çimenoglu, H. Kayalı E.S. 1991 Kobalt Esaslı Alaşımların Aşınma Özellikleri 4. Denizli malzeme sempozyumu
19. Chichos, H. 1977 Tribology series Elsevier Science Publisher vol. 1
20. Easterling, K.E 1992 Introduction to the physical metallurgy of welding London
21. Kayalı, E. Eruslu S. Ürgen N., Çimenoglu M., 1997 hasar analizi seminer notları İstanbul
22. Larsen, J.A 1990 Ser. Met. Et. Material. vol 24,
23. Muratoğlu, M. 1997 SiC Katkılı 2124 Al Kompoziti ve Yaşlandırılmış Kompozitin Aşınma Davranışının Araştırılması Doktor Tezi ELAZIĞ
24. Özbek İ, Akbulut H. Zeytin S. Bindal C. Üçışık A H. The characterization of Borided 99,5% Purity Nickel, *Surface and Coatings Technology*, 126, 166–170, (2000).

25. Özbek İ. Bindal C. Mechanical Properties of Boronized AISI W4 Steel, *Surface and Coatings Technology*, 154, 14–20, (2002).
26. Allaoui O. Bouaouadja N. Saindernan G. Charecterization of Boronized Layers on a XC38 Steel, *Surface and Coatings Technology*, 201, 3475–3482, (2006).
27. Bourithis L. Papaefthymiou, S. Papadimitriou G D. Plasma Transferred Arc Boriding of a Low Carbon Steel: Microstructure and Wear Properties, *Applied Surface Science*, 200, 203–218, (2002).
28. Brossard J M. Hierro M P. Trilleros J A, Carpintero M C, Sánchez L. , Bolívar F J., Pérez F J., Heat Treatment of Codeposited Aluminium–Silicon Coatings on Ferritic Steels by CVD-FBR Technology, *Surface and Coatings Technology*, 201, 5743-5750, (2007).
29. Gopalakrishnan, P. Shankar P., Rao R V S., Sundar M., Ramakrishnan S.S., Laser Surface Modification of Low Carbon Borided Steels, 44, 701-712, (2001).
30. Nakadze, S. Garibashvili V. Antadze M. Tsagareishvili, O., Neutron-Absorption Deformable Boron-Rich Ferrous Alloy, *Journal of Solid State Chemistry*, 177, 592-595, (2004).
31. Scotti A, Rosa L A A, Influence of Oscillation Parameters on Crack Formation in Automatic Fe-B Hardfacing, *Journal of Materials Processing Technology*, 65, 272–280, (1997).
32. Ueda N., Mizukoshi T., Demizu K., Sone T., Ikegana A., Boriding of Nickel by the Peoders-Pack Method, *Surface and Coatings Technology*, 126, 25-30, (2000).
33. Iakovou ,R. Bourithis L., Papadimitriou G., Synthesis of Boride Coatings on Steel Using Plasma Transferred Arc (PTA) Process and its Wear Performance, *Wear*, 252, (2002)

ÖZGEÇMİŞ

Araştırmacı 1982 yılında Elazığ'da doğdu.1999 yılında Elazığ Mehmet Akif Ersoy Lisesinden mezun oldu. Yüksek öğrenimini Fırat Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğinden 2005 yılında mezun olarak tamamladı.2006 yılından beri Yıldırım Holding'e bağlı Eti Krom A.Ş. 'de Metalurji ve Malzeme Mühendisi olarak görev yapmaktadır.