

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI SICAKLIKLARDA MENEVİŞLENMİŞ VE BORLAMA İŞLEMİNE
TABİ TUTULMUŞ SAE 5140 ÇELİĞİNİN MEKANİK VE TRIBOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

BÜNYAMİN YAMANEL

HAZİRAN 2018

Makine Mühendisliği Anabilim Dalında BÜNYAMİN YAMANEL tarafından hazırlanan FARKLI SICAKLIKLARDA MENEVİŞLENMİŞ VE BORLAMA İŞLEMİNE TABİ TUTULMUŞ SAE 5140 ÇELİĞİNİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ali ERİŞEN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduđumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiđini onaylarım.

Doç.Dr. Osman BİCAN
Danışman

JÜRİ ÜYELERİ

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Selahattin BUDAK
Üye (Danışman) : Doç. Dr. Osman BİCAN
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hakan ARSLAN

19/06/2018

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

FARKLI SICAKLIKLARDA MENEVİŞLENMİŞ VE BORLAMA İŞLEMİNE TABİ TUTULMUŞ SAE 5140 ÇELİĞİNİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YAMANEL, Bünyamin

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Osman BİCAN

Haziran 2018, 99 sayfa

Borlama, metalin sertliğini ve aşınmaya dayanımını artırmak amacıyla metal yüzeyini ince bir metal borür tabakası ile kaplama işlemidir. Bor atomunun metale difüzyonu ile metal yüzeyinde ince bir tabaka halinde yeni bir bileşik oluşur. Bu tabaka çok sert özellikler gösteren bir metal borür yapısındadır. Borlama katı, sıvı ve gaz yöntemleri ile yapılabilir. Borlama işlemi alüminyum ve silisyumlu yatak çeliklerinin dışında birçok demir alaşımlarına uygulanmaktadır. Yapı çelikleri, menevişli çelikler, takım çelikleri ve paslanmaz çelikler, döküm çelikleri, sünek ve sinterlenmiş çelikler ve havada sertleştirilmiş çeliklere uygulanır.

Makine imalat sektöründe özellikle kesici takım ve kalıp sektöründe karşılaşılan en büyük sorulardan biri yorulma ve aşınmadır. Bilindiği gibi makine elemanlarından istenen esas yapı yani matrisin sünek yüzeylerinin ise sert olmasıdır.

Bunun nedeni en yüksek eğilme ve burulma gerilmelerinin ve bunların bileşkelerinin yüzeyde oluşmasıdır. Bunun yanı sıra ilgili makine malzemesinin darbe dayanımının yüksek olması için içyapısının sünek olması istenmektedir. Bu amaçla sektörde farklı ıslah çelikleri kullanılmaktadır. Buna karşın gerek mekanik özellik gerekse sürtünme ve aşınma kaynaklı makine hasarları meydana gelmektedir.

Bu nedenle bu çalışmada bu ıslah çeliklerinde biri olan SAE 5140 eliĐinin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla farklı ısıl işlem koşulları ve yüzey kaplaması deneysel olarak incelenecek ve üretilen bu alaşımların yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenerek en uygun koşullar belirlenecektir.

Anahtar Sözcükler: AISI 5140, Borlama, Su verme, Sürtünme, SEM



ABSTRACT

AN INVESTIGATION OF THE MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF TEMPERED AND BORONIZED SAE 5140 STEEL AT DIFFERENT TEMPERATURES

YAMANEL, Bünyamin

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Machine, Graduate Thesis

Supervisor: Assoc. Prof.Dr. Osman BİCAN

June 2018, 99 pages

Boronizing is the process of coating the metal surface with a thin layer of metal boron to increase the hardness and abrasion resistance of the metal. By diffusion of boron atom to metal, a new compound is formed as a thin layer on the metal surface. This layer is a metal boron structure with very hard properties. Boriding can be done by solid, liquid and gas methods. Commercial solid boron material (Ekabor) containing BC_4 , KBF_4 and SiC is used in solid boriding process.. Boron treatment is applied to many iron alloys other than aluminum and silicon bearing steels. Structural steels are applied to tempered steels, tool steels and stainless steels, cast steels, ductile and sintered steels and air hardened steels.

One of the biggest questions in the machine manufacturing sector especially in the cutting tool and mold sector is fatigue and wear. As is known, the desired internal structure of the machine elements is ductile and the surfaces are of the desired hardness.

This is due to the fact that the highest bending and torsional stresses and their components are formed on the surface. Besides, in order that the impact resistance of the related machine material is high, it is desired that the internal structure is ductile.

For this purpose different cutting steels are used in the sector. On the other hand, if mechanical properties are required, machine damage caused by friction and abrasion can occur. For this reason, in order to improve the mechanical and tribological properties of SAE 5140 steel, which is one of these improvement steels, different heat treatment conditions and surface coating will be experimentally investigated and the optimum conditions will be determined by examining the structural, mechanical and tribological properties of these alloys.

Keywords: AISI 5140, Boronizing, Water quench, Friction, SEM



TEŞEKKÜR

Yapmıő olduğum çalışmanın konu tespitinden deney çalıőmalarına kadar her safhasında yanımda olan Danışman hocam Sayın Doç. Dr. Osman BİCAN'a, çalıőmalarım sırasında desteğini eksik etmeyen tecrübelerini benimle paylaőan değerli hocam Doç. Dr. Salih Uėur BAYÇA' ya, deneylerim aşamasında bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen Arő. Gör. Arda TANIŐ hocama, manevi desteğini hiç eksik etmeyen arkadaőım Makine Mühendisi Abdullah VURGUN'a ve hayatımın her döneminde yanımda olan aileme teőekkürü borç bilirim.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	I
ABSTRACT	III
TEŞEKKÜR	V
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1.GİRİŞ	1
1.1.Bor Elementi	1
1.1.1. Bor Madeninin Tarihçesi.....	1
1.1.2. Bor Elementi Özellikleri	2
1.1.3.Bor Mineralleri	3
1.1.4. Bor Rezervleri	4
1.2. Bor Bileşikleri.....	6
1.2.1.Bor Karbür(B ₄ C)	6
1.2.2. Bor Nitrür(BN)	6
1.2.3.Boridler.....	7
1.2.4.Bor Halojenürler.....	7
1.3. Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları.....	7
1.4.Borlama Yöntemleri	10
1.4.1. Katı Borlama İşlemi	10
1.4.2. Toz Ortamda Borlama	11

1.4.3. Macunlama ile Borlama	11
1.4.4. Sıvı Ortamda Borlama	12
1.4.5. Gaz Ortamda Borlama	14
1.4.6. Plazma Borlama	15
1.5. Borlama İşleminin Avantaj ve Dezavantajları	16
1.5.1. Borlama İşleminin Avantajları	16
1.5.2. Borlama İşleminin Dezavantajları	17
1.6. Isıl İşlem İçinde Borlama İşleminin Yeri	18
1.7. Borlama ile Yüzey Sertleştirme	19
1.8. Borür Tabakası Özellikleri	20
1.8.1. Borür Tabakası Oluşumu, Büyümesi ve Gelişmesi	20
1.8.2. Borür Tabakaları ve Kalınlıkları	21
1.8.3. Sertlik	23
1.8.4. Aşınma	23
1.8.5. Korozyon Direnci	24
1.8.6. Bor Tabakasındaki Kalıntı Gerilmeler	24
1.8.7. Borlanabilen Malzemeler	25
1.9. Çelikler	25
1.9.1. Çeliklere Uygulanan Isıl İşlemler	26
1.9.2. 41Cr4 Islah Çeliği	26
1.10. Aşınma	27
1.10.1. Abrasiv Aşınma	27
1.10.2. Adheziv Aşınma	28
1.10.3. Kavitasyon-Erozyon Aşınma	28
1.11. Literatür Araştırması	28
1.12. Çalışmanın Amacı	34

2.MATERYAL VE YÖNTEM	36
2.1. Kimyasal Bileşim ve İç Yapı İncelemeleri	36
2.1.1.Borlama İşlemi ve Mikro Yapı İnceleme	36
2.2.2.Yüzey Altı Mikro Yapı İnceleme	47
2.3.Mekanik Deneyler.....	47
2.3.1. Mikro Sertlik Deneyleri.....	47
2.3.2. Aşınma Deneyleri.....	48
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	51
3.1. İç Yapı İncelemesi	51
3.2. XRD Sonuçları.....	62
3.3 .Aşınma grafikleri	68
3.4. Aşınma Yüzey Sonuçları	71
3.5. Aşınma Yüzey Altı Sonuçları	83
4.SONUÇLAR VE ÖNERİLER	92
4.1.Sonuçlar	92
4.2.Öneriler	93
KAYNAKLAR	94

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Bor elementine ait bazı özellikler [9].....	3
1.2. Ticari olarak önemli bor mineralleri[10].....	4
1.3. Dünya bor rezervleri oranı[10].....	5
1.4. Türkiye’de bor rezervleri(milyon ton) [10].....	6
1.5. Bazı bor bileşiklerinin sertlikleri [12].....	7
1.6. Sıvı borlama işleminde kullanılan malzemeler ve özellikleri [15]	13
1.7. Gaz borlama işleminde kullanılan malzemeler ve özellikleri [15]	14
1.8. Çeşitli yüzey işlemleriyle elde edilen sertlik değerleri[15].....	17
1.9. Fe ₂ B ve FeB özellikleri [2]	20
1.10. İslah çeliğinin farklı standartlardaki gösterimi	26
2.1. Deneylerde kullanılan ısıtma işlem fırınının özellikleri	40
2.2. Birinci borlama grubu	41
2.3. İkinci borlama grubu	42
2.4. Abrasiv aşınma şartlar	50
3.1. AISI 5140 çeliği kimyasal bileşimi.....	51

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Gaz ortamındaki borlama tertibatının şematik resmi [20]	15
1.2. Plazma borlama tesisat şeması [21]	16
1.3. Tavlama işleminin şematik gösterimi	18
1.4. Borlama işlemi sırasında borür yapısının gelişimi [52]	21
1.5. Oluşumlarına göre borür tabakaları [23]	22
2.1. Numunelerin görünümü	36
2.2. Borlama tozu “Baybora”	37
2.3. Borlama potası teknik resim	38
2.4. Deney numunelerinin bor potası içindeki şematik gösterimi	39
2.5. Isıl işlem fırını	42
2.6. Bakalit alma cihazı	43
2.7. Hassas kesme cihazı	44
2.8. Zımpara ve parlatma cihazı	44
2.9. %4'lük nital çözeltisi	45
2.10. Optik mikroskop	46
2.11. Desikatör	46
2.12. Sertlik ölçme cihazı	48
2.13. Aşınma cihazı	49
2.14. Hassas tartım cihazı	49
2.15. SEM cihazı	50
3.1. N numunesine ait iç yapı optik mikroskop görüntüsü	52
3.2. SM numunesine ait iç yapı optik mikroskop görüntüsü	53
3.3. B4 numunesi optik mikroskop görüntüsü	54
3.4. B4 numunesine ait SEM görüntüsü	55
3.5. B6 numunesine ait optik mikroskop görüntüsü	55
3.6. B6 numunesine ait SEM görüntüsü	56
3.7. B8 numunesine ait SEM görüntüsü	56

3.8. B8 numunesine ait SEM görüntüsü	57
3.9. BSM 4 numunesine ait optik mikroskop görüntüsü.....	58
3.10. BSM 4 numunesine ait SEM görüntüsü.....	58
3.11. BSM 6 numunesine ait optik mikroskop görüntüsü.....	59
3.12. BSM 6 numunesine ait SEM görüntüsü.....	59
3.13. BSM 8 numunesine ait optik mikroskop görüntüsü.....	60
3.14. BSM 8 numunesine ait SEM görüntüsü.....	60
3.15. Bor tabakası kalınlığının borlama süresine göre değişimi	61
3.16. İşlem görmemiş AISI 5140 numunesi X-ışını difraksiyon analizi	62
3.17. Isıl işlem görmüş AISI 5140 numunesi X-ışını difraksiyon analizi.....	63
3.18. 4 saat borlanmış AISI 5140 numunesi X-ışını difraksiyon analizi	63
3.19. 6 saat borlanmış AISI 5140 numunesi X-ışını difraksiyon analizi	64
3.20. 8 saat borlanmış AISI 5140 numunesi X-ışını difraksiyon analizi	64
3.21. 4 saat borlanmış ve ısıl işlem görmüş AISI 5140 numune XRD analizi	65
3.22. 6 saat borlanmış ve ısıl işlem görmüş AISI 5140 numunesi XRD analizi....	65
3.23. 8 saat borlanmış ve ısıl işlem görmüş AISI 5140 numunesi XRD analizi.....	66
3.24. Borlanmış çeliğin sertliğinin yüzey altı mesafesine göre değişimi.....	67
3.25. Borlanmış ve ısıl işlem görmüş çeliğin sertlik-mesafe grafiği.....	68
3.26. Aşınmaya tabi tutulan borlanmış AISI 5140 çeliğine uygulanan hacim kaybı- yük grafiği	69
3.27. Aşınmaya tabi tutulan borlanmış ve ısıl işlem görmüş SAE 5140 çeliğine uygulanan yük-hacim kaybı grafiği	70
3.28. N 15N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü	72
3.29. N 25N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü	72
3.30. B4 15N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü	73
3.31. B4 25N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü	74
3.32. B6 15N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü	75
3.33. B6 25N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü	75
3.34. B8 15N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü	76
3.35. B8 25N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü	77
3.36. SM 15 N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü	78
3.37. SM 25N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü	78
3.38. BSM4 15N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü.....	79

3.39. BSM4 25N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü.....	80
3.40. BSM6 15N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü.....	81
3.41. BSM6 25N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü.....	81
3.42. BSM8 15N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü.....	82
3.43. BSM8 25N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü.....	83
3.44. N 5N yüzey altı SEM görüntüsü	84
3.45. B4 5N Yüzey altı SEM görüntüsü	85
3.46. B6 5N Yüzey altı SEM görüntüsü	85
3.47. B8 5N Yüzey altı SEM görüntüsü	86
3.48. B4 25N Yüzey altı SEM görüntüsü	86
3.49. B6 25N Yüzey altı SEM görüntüsü	87
3.50. B8 25N Yüzey altı SEM görüntüsü	87
3.51. BSM 4 15N Yüzey altı SEM görüntüsü.....	88
3.52. BSM6 15N Yüzey altı SEM görüntüsü.....	89
3.53. BSM8 15N Yüzey altı SEM görüntüsü.....	89
3.54. SM 15N Yüzey altı SEM görüntüsü	90
3.55. N 15N Yüzey altı SEM görüntüsü	91

KISALTMALAR DİZİNİ

AISI	American Iron And Steel Institute
B	Bor
B4	4 saat borlanmış AISI 5140 çeliği
B6	6 saat borlanmış AISI 5140 çeliği
B8	8 saat borlanmış AISI 5140 çeliği
B ₄ C	Bor karbür
BSM 4	4 saat borlanmış ve ıslah edilmiş AISI 5140
BSM 6	6 saat borlanmış ve ıslah edilmiş AISI 5140
BSM 8	8 saat borlanmış ve ıslah edilmiş AISI 5140
FeB	Demir borür
Fe ₂ B	Demir diborür
HV	Vickers sertlik değeri
N	İşlem görmemiş AISI 5140 çeliği
SAE	Society of Automotive Engineers
SEM	Scanning Electron Microscope
SM	Islah edilmiş AISI 5140 çeliği
XRD	X-ray diffraction

1.GİRİŞ

Makine işlemlerinde kullanılan malzemelerin korozyon, aşınma gibi tribolojik etkiler nedeniyle kullanımın süreleri kısalmaktadır. Kullanım ömürlerini uzatmanın yolu ise ancak yüzeyleri iyileştirmekle mümkündür. Makine imalat sanayinde aşınma ve korozyona bağlı olarak büyük miktarlarda malzeme kayıpları meydana gelmektedir. Türkiye’ de bu duruma bağlı olarak kayıp miktarı 1991 yılı için yaklaşık 4,5 milyar dolar civarında olduğu düşünülmektedir. [1]

Yüzey sertleştirme yöntemlerinde kullanılan bir yöntem borlamadır. Bor madeni kullanılarak bu işlem gerçekleştirilir. Yer kabuğunun nadir bulunan elementlerinden biri olmakla birlikte, 150’den fazla mineralin yapısında mevcuttur. Ülkemiz ise bu kıymetli maden yönünden oldukça zengin bir ülke konumdadır. Dünya rezervleri göz önüne alındığında bor madeni yaklaşık olarak %62 oranında ülkemizde bulunmaktadır. Gübre sanayinden, nükleer alanlara varıncaya kadar çok farklı alanlarda kullanılması bu madeni kıymetlendiren bir diğer noktadır. Çok geniş çapta malzemelere rahatlıkla uygulanabilir olması yöntemin avantajlarındanır. Bütün demir esaslı metaller örneğin; AISI 1010, AISI 1020, AISI 1040 AISI 4140, AISI 5140, 310 paslanmaz çeliği alaşımlı ve alaşımsız çelikler için ayrıca sinterlenmiş demir gibi malzemeler için borlama işlemi uygun bir yöntemdir. Ayrıca demir dışı metal ve alaşımlara da başarı ile borlama yöntemi uygulanabilmektedir.(Ni,Co, Mo,Ti) [2]

1.1.Bor Elementi

1.1.1. Bor Madeninin Tarihçesi

Bor elementi ile içinde bulunan yüzyılda karşılaşılmasına rağmen, bileşiklerinden uzun bir zamandır yararlanılmaktadır. Mısırlılar, Çinlilerin ve Mezopotamya uygarlıklarının bu bileşikleri kullandığına dair kanıtlar mevcuttur.

Uzun süre Orta Asya'da yaşayan ünlü gezgin Marko Polo bu madeni Avrupa ile tanıştırmıştır. Avrupa'da ilk bor oluşumuna 1827 yılında İtalya'da rastlanmıştır.

Amerika kıtasında ise bor minerallerine rastlanması Avrupa öncesine dayanmaktadır. Bu tarihler takriben 1850' yıllar olarak bilinmektedir. Ülkemizde ise uzun bir dönem bu madenin varlığı bilinmesine rağmen ciddi olarak 19.yy'da ele alınmaya başlanmıştır. Fakat ülkemizde keşfedilen önemli bor yatakları yabancılar tarafından işletilmiştir. 1935 Maden Tetkik Arama kurulduktan sonra önemi kavranmaya başlanmıştır. Emet, Kırka, Bigadiç'te önemli yataklar bulunmuştur. Sonraki yıllarda tüm bor yataklarını işletme ayrıcalığı Etibank' a verilmiştir. Günümüzde yaptıkları üretim bakımından Türkiye ve Amerika Birleşik Devletleri başı çekmektedir. [3-7]

1.1.2. Bor Elementi Özellikleri

Yer kabuğunda en çok çıkarılan madenler sıralamasında 51.sırada yer alır. Boratlar ve borosilikatlar şeklinde doğada bulunmaktadır. Ergime sıcaklığı yaklaşık olarak 2075°C'dir. Periyodik sistemde üçüncü grubun başında bulunur. ¹⁰B ve ¹¹B olmak üzere iki izotopu mevcuttur. Bu izotopların dünya üzerinde dağılımları farklılık gösterir. Örneğin;¹⁰B Türkiye'de bol miktarda bulunurken Avrupa ülkelerinde az miktarda mevcuttur. Yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyonda bulunarak borik asit başta olmak üzere bazı yan ürünler oluşturur. Bor elementinin kimyasal özellikleri ise yapı özelliklerine ve tane büyüklüğüne bağlı olarak değişim gösterir. 1µm boyuttan küçük amorf bor yüksek hızla reaksiyon tepkimesinde bulunurken, kristalin bor ise kolay reaksiyona girmez. Bor elementi minerallerle de reaksiyon tepkimesi verebilir. Reaksiyon konsantrasyon ve sıcaklığa bağlı olarak çok hızlı veya yavaş şekilde de gerçekleşebilir. [8]

Çizelge 1.1. Bor elementine ait bazı özellikler [9]

FİZİKSEL ÖZELLİKLER	
Atom Kütle	10,811 (g/mol)
Kaynama noktası	3 727 (°C)
Termal genişleme katsayısı	8,3 µm/(m.K), (0 °C)
Elektriksel iletkenlik	1,0 E-12 µS/cm
Isıl iletkenlik	0,274 W/cm.K
Yoğunluğu	2,34 g/cm ³ , (25 °C'de)
Görünüşü	Sarı-Kahverengi ametal kristal
Elastik modülü	Kütle: 320/GPa
Sertliği	Mohs: 9,3 Vickers:49 000 MN.m ⁻²
Buharlaşma ısı	489,7 kJ/mol
Ergime noktası	2075 °C
Molar hacmi	4,68 cm ³ /mol
Fiziksel durumu	Katı, (20 °C ve 1 atm'de)
Spesifik ısı	1,02 J/g.K 0,348 Pa (300 °C'de)

1.1.3.Bor Mineralleri

Bor içeren birçok mineral olmakla birlikte ticari değere sahip olan mineraller piyasada rağbet görmektedir.

Dünya pazarlarında bu mineraller çeşitli işlemler görmektedir. Bir borat anyonu, hidrojenle yahut metalik bir katyon ile bir araya getirilerek bu mineralleri oluştururlar.

Oluşan bu mineraller ise birleştikleri metal katyonun ismiyle anılırlar.(Kalsiyum Borat gibi) Bu bileşikler yapılarında B₂O₃ bileşiğine göre pazarlanırlar [10]

Çizelge 1.2. Ticari olarak önemli bor mineralleri[10]

ADI	FORMÜLÜ	%B	%B ₂ O ₃
TİNKAL	Na ₂ B ₄ O ₇ . 10H ₂ O	11,4	36,5
KOLEMANİT	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ . 5H ₂ O	15,7	50,8
ULEKSİT	NaCaB ₅ O ₉ . 5H ₂ O	13,3	42,9
KERNİT(Razorit)	Na ₂ B ₄ O ₇ . 4H ₂ O	15,8	50,9
PRİSEİT(Pandermit)	Ca ₄ B ₁₀ .O ₁₉ .7H ₂ O	15,4	49,8

1.1.4. Bor Rezervleri

Stratejik öneme sahip bor mineralinin bulunduğu yerler bölgesel değişiklik göstermektedir. Bu öneminden dolayı kesin rezervler net olarak bilinmemektedir. Yayınlanan her yeni veri farklılık göstermektedir.

Dünya üzerinde bor madeninin en çok bulunduğu yerler ise Türkiye, Rusya ve ABD gibi ülkeler olduğu söylenebilir. Ticari değer olarak bor yatakları ise dünya üzerinde dört bölgeye ayrılmıştır.

Bu bölgeler ABD’de : Majova Çölü, Güney Amerika kıtasında “And Kemerı”, “Güney ve Orta Asya Bölümleri” ve Rusya’ nın doğusunda yer alan bölgelerdir. [8]

Çizelge 1.3. Dünya bor rezervleri oranı[milyon ton]

ÜLKE	TÜRKİYE	ABD	GÜNEY AMERİKA	ASYA	TOPLAM
REZERV	864,5	80	91	162	1197,5
%	72	7	8	13	100

Ülkemizin çeşitli bölgelerinden çıkarılan bor madeni giderek önemini artırmaktadır.

Çizelge 1.4. Türkiye’de bor rezervleri(milyon ton) [10]

BÖLGE	REZERV(TL)	%	TENOR(%B₂O₃)	REZERV(B₂O₃)
Bigadiç-	657	36,4	30-40	197-263
Balıkesir				
Kırka-	520	28,8	25-26	130-135
Eskişehir				
Emet-	620	34,4	30-40	186-248
Kütahya				
Kestekek-	8	0,4	30-35	2,5-2,8
Bursa				

1.2. Bor Bileşikleri

1.2.1. Bor Karbür(B₄C)

Bor karbür sistemindeki tek bileşik bor karbürdür. Masif olarak üretilmek istendiğinde 1800-2000°C sıcaklıklarda grafit kalıplarda preslenerek elde edilir. Saf bor karbür hafif parlak görünüme sahiptir. 2,52 g/cm³ yoğunluk değerine 2450 °C erime sıcaklığına sahiptir. Sahip olduğu yüksek sertlik değeri nedeniyle aşındırıcı malzeme imalinde tercih edilmektedir. [11]

1.2.2. Bor Nitrür(BN)

Hafif ve beyaz renge sahip bir malzemedir. Elektrik ve ısı iletkenliği oldukça düşük olmakla birlikte kübik sistemde yüksek sertliğe sahiptir. Kübik yapıdaki bor nitrür çok iyi bir aşınma malzemesidir. [11]

1.2.3.Boridler

Metalik özellik gösteren bor bileşikleridir. Metallerle veya metal oksitlerle borun reaksiyonu sonucu oluşur. Yüksek erime noktasına, yüksek sertlik özelliklerine sahiptir. Oksitlenmeye karşı dayanıklıdır. Metal yüzeylerini kaplamak için, sıcaklığa dayanıklı ürünlerin imalatında, korozyon dayanımının istendiği ürünlerde tercih edilir. [11]

1.2.4.Bor Halojenürler

Borun F, Cl, Br ve I gibi halojenlerle yaptığı bileşiklerdir. %95 oranında bor-fiber üretiminde kullanılırlar.[11]

Çizelge 1.5. Bazı bor bileşiklerinin sertlikleri [12]

MALZEME	MOHS SERTLİK
Bor(element)	9,3
Bor Karbür(B ₄ C)	9,32
Elmas	10

1.3. Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları

Günümüzde birçok sektörün temel taşı bor oluşturmaktadır. Mutfakta kullanılan kaplarda, kıyafetlerde, arabaların motor koruyucusu olarak kullanılan malzemelerin içinde, boya imalinde, temizlik ürünlerinde, diş macunlarında, top ve makineli tüfeklerin namlu ağzında, nükleer enerji ile çalışan iş yerlerinde radyasyondan korunmak ve daha bir sürü alanda bor malzemesi kullanılmaktadır.

Bazı endüstri kollarında rafine bazılarında ise mineral konsantresi olarak kullanılmaktadır.

Kullanım miktarı borun yeni kullanım alanlarının keşfedilmesine ve bor malzemesini girdi olarak kullanan gelişmiş ülkelerin üretim miktarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Özellikle batı ülkeleri bu değeri madeni birçok alanda girdi olarak kullanmakta ve bu sayede önemli ekonomik değerler elde etmektedir.

Bor minerallerinin kullanımını da diğer sektörel ürünler gibi tüketim düzeyine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Dünya bor cevherlerinin ve bileşiklerinin kullanımını bu madeni işleyen gelişmiş ülkelerin boru kullanacakları yeni alanları keşfetmesine paralellik göstermektedir. Aynı zamanda halen kullanılmakta olan yapısında bor ihtiva eden ürünlere olan talepte bu ürünün kullanım miktarını etkilemektedir. Sektörel olarak bor minerali ve bor madenlerin kullanım alanları şu şekilde özetlenebilir:

Savunma endüstrisi: Zırh yapımında, zırhlı araçlarda, askeri amaçlı kurşun geçirmez yeleklerde, fişek, silah namlusu ve daha bir çok alanda kullanılmaktadır.

Cam endüstrisi: Araç camlarının imalinde, cam şişelerde, bor camlarda, cam seramikleri gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Elektronik ve bilgisayar endüstrisi: Sensör, mikrodalga tüpü, TV ekranları, bilgisayar sistemlerinde, batarya, pil vb. alanlarda,

Enerji endüstrisi: Bor hidrür yakıtları, gaz türbinleri, ısı enerji depolayıcıları, güneş enerjisinin depolanması, güneş pillerinde koruyucu olarak.

Görüş sistemleri endüstrisi: Dürbün, kamera ve mercek camları, fotoğraf makinelerinde,

İlaç ve kozmetik endüstrisi: Lens solüsyonları, dezenfektan ürünleri, parfüm, şampuan, kolonya...

İletişim araçları endüstrisi: Cep telefonları, modem, televizyon gibi cihazlarda,

İnşaat endüstrisi: Çimento içerisinde,

Kağıt endüstrisi: Kağıtların parlaklaştırılmasında, kağıt hamurunun beyazlatılması esnasında,

Kimya endüstrisi: Elektrolitik işlemlerde, banyo çözeltileri, atık temizleme amaçlı olarak, yapıştırıcılarda, korozyon önleyicilerde, dezenfektan malzemelerde, parlaticılar, ağartıcılar, mumyalama, deterjanlarda, kireç koruyucularda, petrol boyaları gibi alanlarda,

Koruyucu endüstrisinde: Ahşap malzemelerin koruyucusu olarak, boya ve vernik yapısında,

Makine endüstrisinde: Zımpara ve aşınma amaçlı kullanılan cihazlarda, manyetik amaçlı kullanılan cihazlarda, motor yağlayıcılarında, yüksek sızdırmazlık isteyen contalarda kullanılır.

Metalurjik ürün endüstrisinde: Sürtünme ve aşınmaya dayanıklı malzemelerin yapısında, döküm malzemelerinde, kesicilerin yapısında, kaplama sanayinde, savunma amaçlı kompozit malzemelerde,

Otomobil endüstrisi: Hidroliklerde, hava yastıklarında, titreşim söndürücü olarak, antifrizlerde, araçların plastik aksamında,

Uzay ve havacılık endüstrisinde: Yüksek sürtünme ve aşınma gereken malzemelerde, uydularda, uçaklarda, roket yakıt üretiminde, helikopterlerde,

Nükleer endüstrisinde: Nükleer atık depolamada(kolemanit cam bloklar), nötron emiciler, reaktör kontrol çubukları, emniyet malzemelerinde kullanılır. [8]

1.4.Borlama Yöntemleri

1.4.1. Katı Borlama İşlemi

Borlama işlemi genellikle 4-10 saat aralığında ve 900-1000°C sıcaklık aralığında uygulanır. Soy gaz atmosfer ortamında yapılabildiği gibi ağzı sıkı şekilde kapatılmış kaplarda normal atmosfer şartlarında da yapılabilmektedir. Borlama işleminde kullanılacak tozun tane büyüklüğü 5-10 µm arasında değişmektedir.

Bor verici ortamın ana bileşenini B₄C, amorf bor ve ferro-bor oluşturur. Bor karbürün tercih sebebi ise diğer bileşiklere oranla ekonomik olmasıdır. [13]

İçerdiği teorik bor miktarı bakımından en yüksek oran %95-97 oranıyla amorf bordur. Ergime sıcaklığı en yüksek olan 2450°C ile bor karbüre aittir.[14]

İlave olarak olarak NH₄ Cl, BaF, NaBF₄, NH₄ F, Na₂ CO₃, KBF₄ ve Na₂ AlF₆ gibi aktivatörler kullanılır. Borlama işlemi neticesinde yüzeyde Fe₂B ve FeB tabakaları oluşur. Meydana gelen ısıl genişmeden dolayı çatlamlar meydana gelir. Bu durum ise bazı durumlarda istenmez. Çözüm olarak ise katı borlama sayesinde FeB fazı azaltılır ve çatlamlar engellenmiş olabilir. [15]

Sistemin avantajları [15]

- Ekonomiktir,
- İşlem basamakları kolaydır,
- Toz bileşimleri değiştirilebilir,
- Ekipman sayısı azdır.

Dezavantajları [15]

- Yüzeyde oluşan bor tabakasının dağılımı homojen değildir.

1.4.2. Toz Ortamda Borlama

Borlama uygulanacak malzemenin toz halinde bulunan bor ortamında 800-1000°C arası sıcaklıklarda, 4-10 saat arası zamanlarda bekletilmesiyle gerçekleşen borlama yöntemidir. Çelik malzemeden imal edilmiş pota içerisine borlama yapılacak numune alınır. Pota içerisi toz halindeki bor malzemesi ile doldurularak çelik potanın ağzı sıkıca kapatılır.

Bu aşama esnasında pota içerisindeki numunenin etrafının minimum 10mm kalınlıkla toz bor ile kaplanması önemlidir. Bu işlemlerin ardından pota istenilen sıcaklığa ayarlanan ısıtma fırınının içine konular. Uygun süre istenilen sıcaklıkta borlama işlemi böylece gerçekleştirilmiş olur. Özel bir yöntem gerektirmemesi ve maliyeti bu yöntemi cazip kılan özellikler arasında gösterilir. [16]

1.4.3. Macunlama ile Borlama

Borlama amacıyla kullanılacak tozun macun kıvamına getirilip borlanacak yüzeye 2mm kalınlık olacak şekilde sürülmesiyle gerçekleşen bir yöntemdir. Bu macun 150°C sıcaklığı geçmeyen kurutma ortamında hemen kurutulmalıdır.

Macunlama yapılan numuneler önceden ısıtılmış ısıtma fırınına konularak borlama işlemi gerçekleştirilir. İstenilen süre borlama yapıldıktan sonra parçalar fırından çıkarılarak soğuması beklenir. Parça üzerinde mevcut olan atık maddeler temizlenir ve bu sayede borlama işlemi tamamlanmış olur.[17]

Bu borlama türünde koruyucu olarak argon, NH_3 gibi gazların kullanılması gerekir. [18]

1.4.4. Sıvı Ortamda Borlama

Bor verici ortamın sıvı olduğu borlama çeşididir. Borlama uygulanacak malzemenin 800-1000°C arasında sıcaklıkta 2 - 6 saat arasında gerçekleştirilir. Normal atmosfer ortamında gerçekleşen bir yöntemdir. Sıvı ortamda kimyasal reaksiyonun hızlı gerçekleşmesinden dolayı sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Bu işlem için kullanılan malzemeler basit olmakla beraber işlem neticesinde temizlik sorun yaratır. [15]

- ◆ Borlama sonrası parça yüzeyinde tuz kalıntıları ve reaksiyona girmemiş bor oluşur.
- ◆ Borlama işleminin başarılı olması için banyo viskozitesi artmamalıdır, bu yüzden banyoya tuz ilavesi gerekir.
- ◆ Korozyonlara karşı dayanıklı fırına ihtiyaç vardır.

Bu sayılan nedenler hem ekonomik anlamda hem de işlem prosesi olarak zaman aldığı için yöntemin negatif özellikleridir. [19]

Çizelge 1.6. Sıvı borlama işleminde kullanılan malzemeler ve özellikleri [15]

KARIŞIMDA BULUNAN BİLEŞİKLER	FORMÜL	MOLEKÜL AĞIRLIĞI	TEORİK BOR MİKTARI (%)	ERİME SICAKLIĞI (°C)
Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	381.42	11.35	-
Susuz boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	201.26	21.50	741
Meta bor asidi	HBO_2	43.83	24.69	-
Sodyum bor florid	NaBF_4	109.81	9.85	-
Borik oksit	B_2O_3	69.64	31.07	450
Bor karbür	B_4C	55.29	78.28	2450

Ana bileşen borakstır. Bor karışımı içinde bor karbür bulunur. Genellikle sıcaklık değerleri 800 ve 1000 °C aralığında ve [2,6] saat sürelerde borlama işlemi gerçekleştirilir. Bu şekilde gerçekleştirilen borlamamaya normal sıvı ortamda borlama denilmektedir.[15]

Basit bir elektroliz mantığındaki gibi anot katot kısımlar mevcuttur. Anot olarak grafit, katot olarak ise iş parçası görev alır. Uzmanlık gerektirmeyen ve maliyet olarak uygun olması sistemin avantajlarıdır.

Gerilim değerleri 2 ile 14 volt arasında bir gerilim uygulanır. İşlem sıcaklığı olarak 800-1000 °C arasında süre olarak ise 0.5-5 saat arasında borlama işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntem ise elektroliz yöntemiyle borlama yöntemidir.

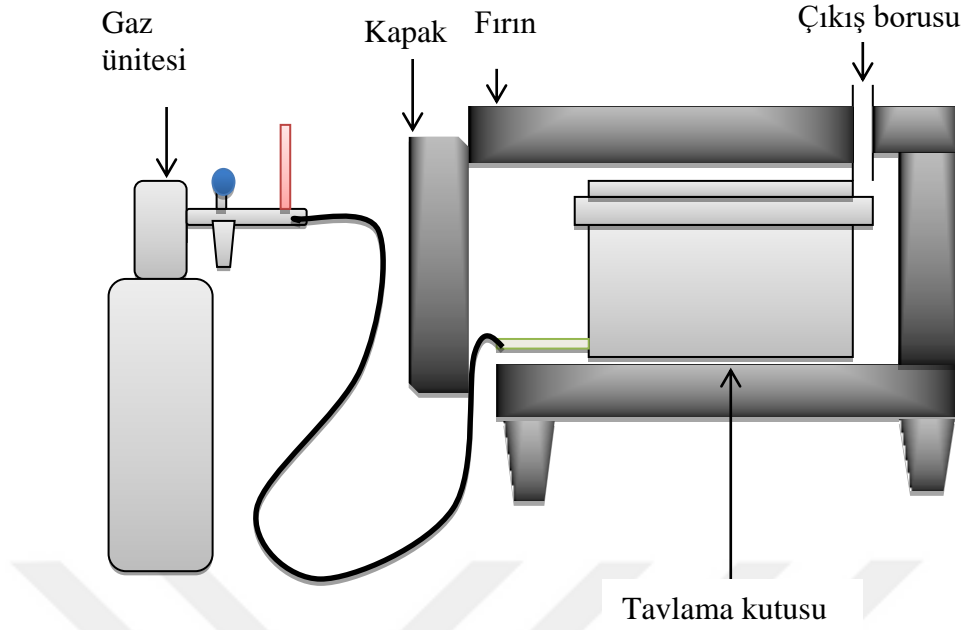
Büyük parçalara uygulanamaması, elektrolit tesisatının ekonomik olmaması ve tuz parçalarının iş parçası üzerine yapışması sistemin dezavantajlarıdır. [15]

1.4.5. Gaz Ortamda Borlama

BF_3 , BCl_3 , B_2H_6 , $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{B}$ maddeleri kullanılır. Bu malzemeler oldukça hassastır. Gaz ortamda gerçekleştirildiği için yayılım oldukça hızlıdır ve gelişmiş sıcaklık kararlılığı elde etmek kolaydır. Tesisatının pahalı olması, gaz ortamının patlama ihtimali, ortamın zehirli olması da olumsuz özellikleri arasında sayılabilir. [15]

Çizelge1.7. Gaz borlama işleminde kullanılan malzemeler ve özellikleri[15]

Karışım Malzemeleri	Formül	Malzeme molekül ağırlığı	Karışım bor miktarları	Donma Noktası(°C)
Bor triflorid	BF_3	67.82	15.95	-128.8
Bor triklorid	BCl_3	117.9	9.23	-107.3
Bor tribromid	BBr_3	250.57	4.32	-46
Di - boron	B_2H_6	26.69	39.08	-165.5
Bor trimetil	$(\text{CH}_3)_3\text{B}$	55.92	19.35	-161.5
Bor trietil	$(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{B}$	98.01	11.04	-94



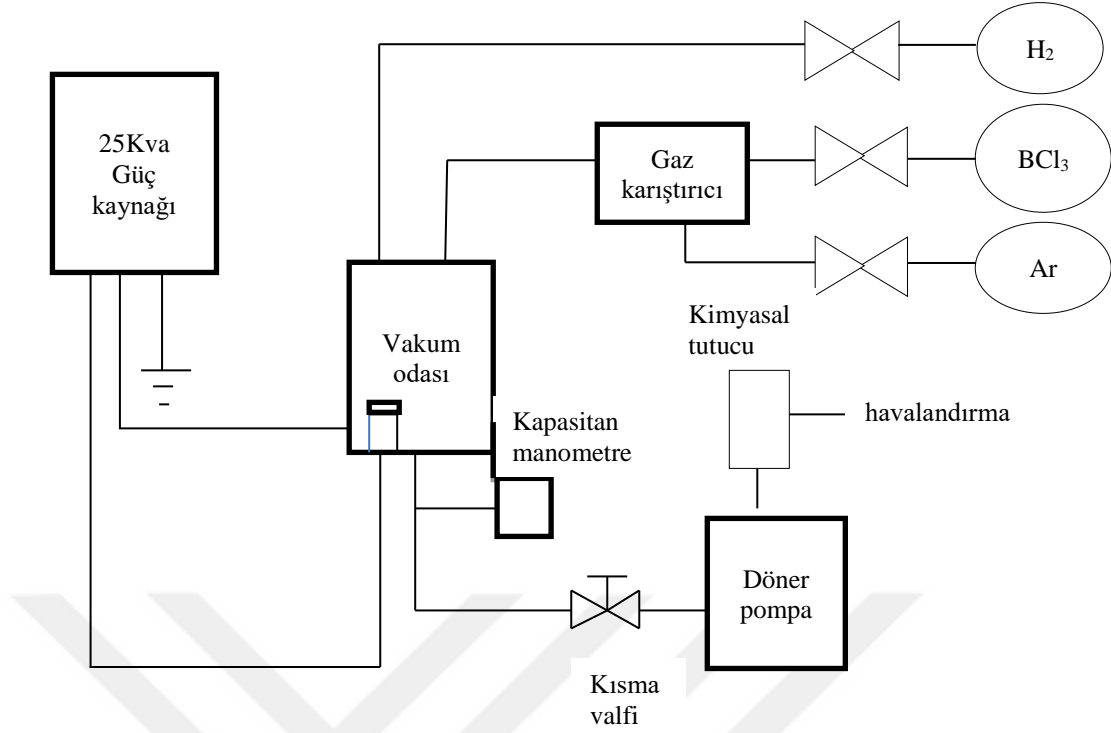
Şekil 1.1. Gaz ortamındaki borlama tertibatının şematik resmi [20]

1.4.6. Plazma Borlama

$B_2H_6-H_2$ ve BCl_3-H_2Ar 'un karışımlar plazma borlamada kullanılmaktadır. Bu karışım içindeki $B_2H_6-H_2$ $600^\circ C$ gibi düşük sıcaklıklarda borlama işlemine imkan vermektedir. [24]

Yöntemlerin avantajları içinde:

- Klasik borlamaya oranla daha iyi bir potansiyel vardır,
- İnce yapılı bor tabakaları elde edilebilir,
- Düşük sıcaklıklarda ve düşük sürelerde işlem gerçekleştirilebilir,
- Enerji ve gaz tasarrufu sağlar.[21]



Şekil 1.2. Plazma borlama tesisat şeması [21]

1.5. Borlama İşleminin Avantaj ve Dezavantajları

1.5.1. Borlama İşleminin Avantajları

- ❖ Borlama neticesinde borlanan yüzeyin oksidasyon direnci 850°C sıcaklığa kadar dayanıklılık gösterebilir.
- ❖ Nitrüleme işlemine göre artışı sertlik değerini yüksek sıcaklıklarda da korumasıdır.
- ❖ Çok geniş çapta çelikler için uygulanabilecek bir yöntemdir,
- ❖ Borlama neticesinde oluşan borür tabakasında düşük sürtünme katsayısı oluşur.
- ❖ Borlanma ile malzemelerin oksitlenme ve korozyon direnci artar.
- ❖ Yüksek sıcaklıklarda sertliğini koruyabilir.
- ❖ Borlama işlemi uygulanan demir esaslı malzemelerin korozyon-erozyon direnci bir çok ortamda korunduğu için kullanım alanı geniştir. [19]

1.5.2 Borlama İşleminin Dezavantajları

- ❖ Gaz sementasyonu ve plazma nitrürleme işlemine göre esnek olmaması ve işçiliğin çok olması ekonomik olarak olumsuz özelliğidir.
- ❖ Borlanan yüzeylerin hassas işlenmesi gerektiğinde elmas kullanılması gerekir.
- ❖ Çeliklerin eğilme-yorulma dayanımında az da olsa artış görülür.
- ❖ Çoğu zaman borlama işlemi sonucunda yapı bütünlüğünü korumak için temperleme ve sertleştirme gerekebilir.
- ❖ Borlama neticesi hacimsel büyüme %5 ile %25 arasında değiştirmektedir. [27]

Çizelge 1.8. Çeşitli yüzey işlemleriyle elde edilen sertlik değerleri [19]

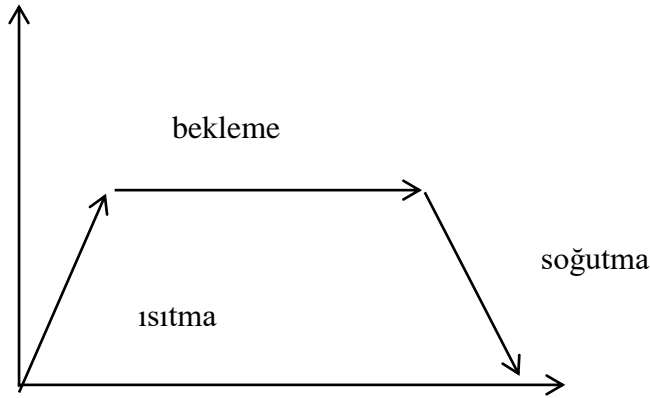
MALZEME	Mikrosertlik (HV)
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 çeliği	630-700
Yüksek hız çeliği BM 42	900-910
Nitrürlenmiş çelik	650-1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
WC+Co	1160-1820
Al ₂ O ₃ +ZrO ₂ seramikler	1483
Al ₂ O ₃ +TiC+ZrO ₂ seramikler	1730
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Elmas	>10000

1.6. Isıl İşlem İçinde Borlama İşleminin Yeri

Isıl işlem, genellikle metal ve alaşımların yapılarına etki ederek; malzemenin sertlik, süneklik vb. gibi özellikleri iyileştirmek amacıyla yapılan işlemler bütünü olarak tarif edilebilir. Isıl işlem aşamaları kısa bir tarifile istenilen özellikleri malzemeye kazandırmak amacıyla malzemenin belli sıcaklığa kadar yükseltip, o sıcaklıkta gerekli süre bekledikten sonra soğulması şeklinde gerçekleşen bir olaydır.

Özel olarak malzemenin yüzeyinde ya da iç bölgesinde ısıl işlemler gerçekleştirilebilir. Bu işlemler genel olarak tavlama ve sertleştirme diye ikiye ayrılır.

Tavlamada iç yapının kararlı, denge durumuna yaklaşmasını sağlayan ve yavaş soğutularak gerçekleşen bir işlemdir. Sertleştirme de ise östenit hızlı soğutularak yarı kararlı(martenzit) bir sistem elde edilebilir.



Şekil 1.3. Tavlama işleminin şematik gösterimi

Özellikle gelişen teknoloji ve artan talepler doğrultusunda çok değişik ısıtım yöntemleri geliştirilmiştir. Gerek malzemenin tamamına gerekse de yüzeyine ısıtım işlemi uygulanabilmektedir.

Örneğin; malzemenin yüzeyinin sert olması buna karşılık iç yapısının sünek olması istendiği durumlarda sadece yüzey sertleştirme işlemi uygulanabilir.

Kimyasal ısıtım işlemleri diye adlandırılan sementasyon, nitrürasyon, karbonitrürasyon gibi yöntemlerle iç yapıya dokunmadan yüzey sertleştirme yapılabilmektedir.

Yüzeye karbon atomu verilerek yüzey sertleştirme işlemi sementasyondur. Nitrürleme ve borlama gibi yöntemlerde ise yüzey sertliğini artıran maddeler difüzyon mekanizmasıyla malzemeye geçer. [51]

1.7 .Borlama ile Yüzey Sertleştirme

Borlama yüzey iyileştirmek amacıyla borun difüzyonu şeklinde gerçekleşen termokimyasal bir işlemdir. Difüzyon için gerekli olan bor için herhangi bir bor bileşiği kullanılabilir.(B₄C, amorf bor vs)

Deoksidan malzeme kullanılarak borlama aşamasında redükleyici ortam oluşturulur ki bu sayede O₂ tutularak bor malzemesinin yüzeye yapışması engellenir. Borlama işlemi katı, sıvı ve gaz ortamlarında yapılabilir. Son yıllarda plazma borlama ve implantasyon yöntemiyle borlama işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bazı endüstriyel uygulamalar için Fe₂B yapısı istenmektedir. Borlanmış yüzeylerin aşınma direnci yüksek, sürtünme katsayısı düşük hale gelir. Bor tabakası yüksek sertlikleri oluşturduğu için çalışmalar aşınma üzerinde yoğunlaşmıştır.

Borlama ile malzeme yüzeyinde sert bir tabaka meydana gelir. Bor difüze edilmiş yüzeylerin sertlikleri borlanmamış olanlarına göre yaklaşık 10 kat daha fazladır.

Borlama neticesinde oluşan borür tabakası elde ettiği bu sertlik değerlerini yaklaşık 1000°C sıcaklığa kadar muhafaza eder. Bu sayede sahip olduğu tribolojik özellikleri kaybetmeden aşınma özelliklerini korumuş olur. [2]

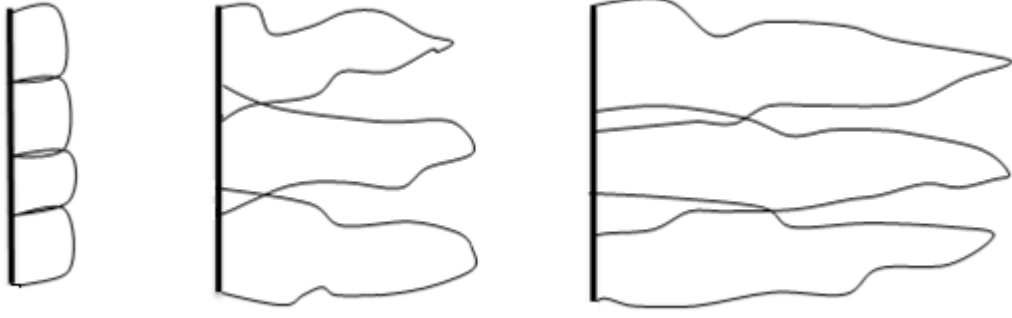
Çizelge 1.9. Fe₂B ve FeB özellikleri [2]

Özellik	Fe₂B	FeB
Ergime noktası(°C)	1390	1550
Mikro Sertlik(HV)	1600-2000	1600-2400
Uzama Katsayısı(1000°C)	$8.10^{-6} \text{ 1 /}^\circ\text{K}$	$10-16.10^{-6} \text{ 1 /}^\circ\text{K}$
Termal İletkenlik(1000°C)	0.2- 0.3 W/(cm °C)	0.1- 0.2 W/(cm °C)
Küri Noktası(°C)	742	325
Yoğunluk(gr/cm ³)	7.00	6.3
Kristal Sistem	Tetragonal Hacim Merkezli	Ortorombik
Kafes Parametreleri(A°)	a:5.078, b:4.249	a:4.053, b:5.495, c:2.496

1.8.Borür Tabakası Özellikleri

1.8.1. Borür Tabakası Oluşumu, Büyümesi ve Gelişmesi

Borlama aşamasının ilk kısmında bor verici ortam ile numune yüzeyinde bir reaksiyon meydana gelir. Difüzyon aşamasıyla beraber yüzeyde ilk önce çekirdeklenme oluşur. Zamanla beraber bu çekirdek yapı borür tabakası halini alır ve iç kısımlara yayılır. Oluşan borür tabakası içinde dış yüzeyde FeB alt kısımda ise Fe₂B yapıları meydana gelir. [22]



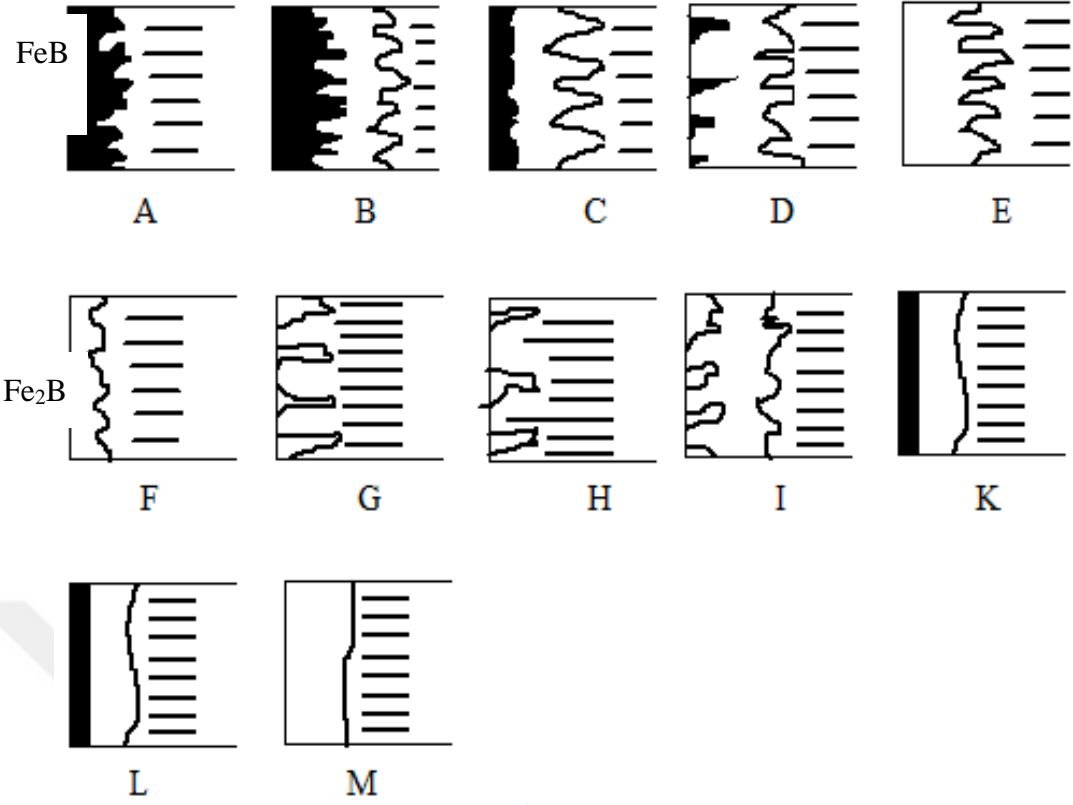
Şekil 1.4.Borlama işlemi sırasında borür yapısının gelişimi [52]

Borlama işlemi neticesinde oluşan borür fazları reaksiyona girerek malzeme yüzeyinden başlar. Borür tabakasının oluşumu difüzyona bağlıdır. Demir esaslı yüzeylerde sıcaklık arttıkça bor yüzeyde oluşan bor kalınlığı da artmaktadır. Borlama yüzeyinde sert borür fazları meydana gelmektedir. Oluşan bu tabakalar ya tek fazlı Fe_2B tabakası ve ya ikili faz şeklinde olan Fe_2B+FeB 'dir. Borür tabakasının şekli, büyüklüğü oluşan fazlara, bor tabakasının sertliği ise oluşan bor tabakasındaki yapılara ve borlama için kullanılan malzemenin kimyasal yapısına göre değişiklik gösterir. [24]

1.8.2. Borür Tabakaları ve Kalınlıkları

Farklı borlama türleri kullanılarak Şekil 1.5.'de gösterilen farklı borür yapıları elde edilebilir. [23]

Borür tabakalarının yapısı; borlama yöntemine göre, borlama işlemine tabi olan numunenin özelliklerine, işlem şartlarına, kullanılan toz bileşimine bağlı olarak düz formda ya da parmaklı şeklinde olabilir.



Şekil 1.5. Oluşumlarına göre borür tabakaları [23]

A'da yalnızca gevrek faz olan FeB yapısı, B'de gevrek faz FeB ile Fe₂B bir arada, C'de ise FeB ve Fe₂B ikili yapı oluşmuştur. FeB biraz daha incedir. D'de İkili yapı, yalnız FeB dişleri ayrılmış, E'de yalnız Fe₂B yapısı, güçlü testere diş formunda, F'de sadece Fe₂B, dişler zayıf testere şeklinde, G'de Fe₂B testere diş formunda, H'de Fe₂B testere dişi aralıklı ve az oluşmuş, I'de ara bölge, K'de diş yapısı bozulmuş, L'de her iki yapıda mevcut testere dişi düzleşmiş yapıda, M'de tek yapı ve düzleşmiş şekildedir.

Bu yapılar içinde istenen yapı ise E ve F yapılarında olduğu gibi yalnızca Fe₂B'den oluşan tekli yapıdır. Oluşan bu yapıda borür tabakasından dolayı yapı bozulmadan ısıtılma işlemleri uygulanabilmektedir. [23]

Teorik olarak tabaka kalınlığı sınırsız olarak kabul edilmektedir. Tabaka kalınlığının artması ise işlem süresinin ve sıcaklığının artmasıyla gerçekleşir. Sıcaklık belirlenmesinde demir bor denge diyagramından yararlanılır. Sıcaklığın ötektik nokta(1149°C) sıcaklığının altında olması gerekir. Bu sıcaklık üzerinde erimeler meydana gelmesi önemli sorun teşkil eder. Zaman faktörü de ekonomik olarak önemlidir. Borlama işlemi sonunda malzeme yüzeyinde oluşan borür tabakası testere dişi formundadır. Borür tabakası yüksek sıcaklık sayesinde difüzyon mekanizmasıyla gerçekleşir. Borür tabakasında bazen tek yapı bazen ise ikili yapı oluşmaktadır. [15]

Çelik malzemelerde karbon miktarının artışına paralel olarak bor difüzyonunda azalma olmaktadır. Azalan difüzyonla beraber yüzeyde oluşan borür kalınlığı azalmakta ve yapı düzleşmektedir. [14]

1.8.3.Sertlik

Borlamanın en büyük etkisi sertlik üzerinedir. Bu sertlik ise oluşan FeB ve Fe₂B yapısına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Sertlik değerleri 2000 ile 3000 HV arasında değerler alabilmektedir. Maksimum değerini titanyumun borlanması almaktadır.

1.8.4.Aşınma

Malzemede minimum aşınma için malzeme yüzeyinin aşınma katsayısının çok küçük olması istenir. Borlama işlemi ise yüzeyde oluşturduğu borür tabakası sayesinde aşınma katsayısını düşüren bir işlemdir.

Doğru sıcaklık ve sürelerde bu işlem gerçekleştirildiğinde aşınma konusunda önemli ölçüde yüzeyde iyileşme görülebilir.

Fakat; istenilen özellikte, doğru tribolojik özelliklere sahip olmak için uygun borlama ve/veya ısıl işlem uygulanmaz ise verimli sonuçlar elde edilmeyebilir. Bu durumda alternatif yöntemler daha cazip duruma gelir.[14]

1.8.5.Korozyon Direnci

Borür tabakası su ve atmosfer etkisine bağlı oluşan korozyona karşı direnci düşüktür. Buna karşın asitlerden ve bazı sıvı metallere karşı iyi direnç gösterir. H_2SO_4 ve H_3PO_4 gibi güçlü asitlerle çinko, kurşun gibi metallerin sıvı karışımlarında borlanmış malzemelerin korozyona karşı direnci çok yükselmektedir. [23]

1.8.6. Bor Tabakasındaki Kalıntı Gerilmeler

Borür tabakasının mekanik özellikleri kalıntı gerilme ile ilgilidir. Malzeme çeşidi, ısıl işlem ve borlama şartlarına bağlı olarak ana metalin ara yüzeyinde gerilmeler oluşur.

İç gerilmelerin tabakada yapacağı hasara faz yapısı, ya da bor tabakasının girintili çıkıntılı olmasına göre değişkenlik gösterir. İç gerilmenin tüm yüzeye dağılabilmesi için bor tabakasının girintili çıkıntılı olması ve faz yapısı olarak ise Fe_2B olması gerekir. İkili yapılar oluştuğunda ise (Fe_2B+FeB) farklı yönlendirilmiş iç gerilmelerin oluşmasıdır.

Fe_2B basma şeklinde gerilme oluşurken, FeB de çekme şeklinde gerilme oluşur. Meydana gelen bu gerilmeler ise tabakada çatlamlar meydana getirir. [25]

1.8.7. Borlanabilen Malzemeler

İş parçalarının ömrü ekonomik olarak oldukça önemlidir. Sadece yüzey sertliği gerekli olan alanlarda alaşım ve pahalı alaşım çelikler yerine, daha ekonomik düşük alaşım çelikler kullanılabilir. Yüksek hız çeliklerinde, silisyum oranının %0,5' den fazla olan çelik malzemelerde ve alaşım olarak alüminyum bulunan çeliklerde bu işlem uygun değildir.[26]

Borlama işlemi yapılacak malzemelerin; borür tabakası oluşturabilme, gerekli mekanik özellikleri taşıma, ısı işlemler için uygun olma vb. özellikleri taşımalıdır. Nerdeyse demir esaslı bütün malzemelere, döküm çeliklerine, ıslah çeliklerine, takım çeliklerine, sinterleme uygulanmış çeliklere borlama işlemi rahatlıkla uygulanabilir.[23]

1.9. Çelikler

Demir ve karbondan oluşan bir alaşımdır. C'den başka elementlerde kullanılabilir. Çeliğe çeşitli özellik kazandıran iç yapısı ve içerdiği elementlerdir. Değişik oranlarda elementler eklenerek ve çeşitli işlemlerle farklı özelliklere sahip çelikler elde etmek mümkündür.

Mangan, fosfor, kükürt çeşitli oranlarda çeliğin yapısında bulunabilir. Ayrıca Cr ve Si gibi elementlerde içerebilir. Sürekli döküm ve döküm olmak üzere iki şekilde üretilmektedir.

Çelik Malzemelerin Bazı özellikleri:

- İstenilen özellikleri elde etmek için ısı işlemler uygulanabilir.
- Talaş kaldırma ile istenilen şekil ve yüzey pürüzlülüğü elde edilebilir.
- Kimyasal bileşimi uygun olan çelikler için kaynak işlemi uygulanabilir.

1.9.1. Çeliklere Uygulanan Isıl İşlemler

İstenilen özellikleri kazandırmak amacıyla genellikle metal veya alaşımlı malzemeleri belirli bir sıcaklığa kadar kontrollü bir şekilde ısıtma ve ısıtma işleminin ardından soğutma işlemleri olarak ısıl işlemi tanımlayabiliriz.

İstenilen yapıyı elde etmek, talaş kaldırmayı kolaylaştırmak, malzemenin kullanım alanlarına göre istenilen fiziksel ve mekanik özellikleri elde edebilmek amacıyla malzemenin belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılıp gerekli dönüşüm sağlanıncaya kadar bu sıcaklıkta bekletilip yavaş bir soğutma şeklinde gerçekleştirilen olay yumuşatma tavlı olarak tanımlanır.

Malzemenin bir kısmının veya tamamının sertleştirilmesi gerektiğinde uygulanan yöntem ise sertleştirme işlemidir.

1.9.2. 41Cr4 Islah Çeliği

Çizelge 1.10. Islah çeliğinin farklı standartlardaki gösterimi

AISI/SAE	DIN	EN	AFNOR	JIS
5140	1.7035	41Cr4	42C4	SCr440(H)

AISI 5140 çeliği karbon miktarı oranına göre sertleştirilmeye uygun, su verme ve menevişleme işlemi sonunda belirli yükler etkisi altında yüksek tokluk gösteren çeliklerdir.

Kullanım alanları ise: Taşıt motor imalatında, krank mili, dişliler, ön aks, aks kovanı, piston, piston rotları, tarak pimi, burçlar, civatalar, direksiyon mili olarak söylenebilir.

1.10. Aşınma

Genel bir ifade ile mekanik etkileşim sonucu katı yüzeyden malzeme kaldırılması şeklinde ifade edilebilir. Aşınmaya birçok faktör etki eder. Aşınma, sertlik gibi bir malzeme özelliği değildir. Aşınmanın meydana gelebilmesi için iki elemana ihtiyaç vardır, bunlar hareket ve yüküdür.

Uygulanan yük şiddeti, malzeme cinsi ve yüzey geometrisine bağlı olarak aşınma miktarı değişebilir. Hareket türü de aşınmayı etkileyen bir başka durumdur. Akma, kayma, yuvarlanma, çarpma ve vurma gibi türler olabilir. [29]

Aşınma olayına etki eden bir ya da aynı anda birkaç faktör etki edebilir.

1.10.1. Abrasiv Aşınma

Bir yüzey üzerinde ve yüzeye eğik bir kuvvetin etkisi altında olan taneciğin aşınmasına abrasiv aşınma denir. Bu kuvvetin dik bileşeni yüzeye etki ederek yüzeyin aşınmasını sağlar. Aşındırıcı parçacık ve bu parçacık ile temas halinde olan parça abrasiv aşınma da önemlidir. Buldozer, kazıcılar, greyder gibi makineler buna örnek verilebilir. [29]

Borlama malzemenin sertliğini yüksek rakamlara çıkarmaktadır. Borlama sonucu artan sertliği yüzeyler arası sürtünme yüzeyini azaltarak aşınma hızını düşürür. [30]

Borlanmış çelikteki alaşım elementleri aşınma özelliklerini etkiler. Bu etkiler aşınma mekanizmasına bağlıdır. Borlanmış alaşım çeliklerinin abrasiv aşınma dirençlerinin artırdığı bilinmektedir.

Krom, molibden, vanadyum gibi elementlerin borlanmış numune içinde olmasının aşınma direncini iyileştirdiği görülmüştür. [31]

1.10. 2. Adheziv Aşınma

Bu aşınma türü vakum altında gerçekleştirilmektedir. Temas yüzeylerinde oluşan kalıntılar ve oksidasyonları aşınma davranışını etkiler. Bu aşınma türünde borlanmış numunenin aşınma dayanımı sertleştirilmiş yahut nitrürlenmiş numunelere oranla daha kötü aşınma direnci sergilediği görülmüştür.

Aşınma testleri vakum dışında atmosfer altında yapıldığında ; sürtünen kısımlar arasında yüzeyde koruyucu bir tabaka meydana gelmektedir. Borün oksijene karşı ilgisi yüksek olduğu için bor tabakasının üzerinde ince oksit filmi oluşur. Bu durum aşınmaya olumlu katkı sağlar. Bu durumda aşınmayı engellemek için yağlamaya gerek yoktur. Adheziv aşınmayı önlemede katkı sağlar. [18]

1.10. 3. Kavitasyon-Erozyon Aşınma

Malzemelerde meydana gelen kavitasyon, sıvı ortam içerisinde hareket sonucu küçük kabarcıkların oluşması, zamanla büyüüp patlaması esasında dayanır. Bu olayların sürekli tekrarlanması sonucunda da yüzey bölgesinin yorulması sonucu oluşur. Bu şekilde malzeme yıpranmaya zamanla aşınmaya mahkum kalır.[32]

1.11.Literatür Araştırması

1030 ve 1050 çeliklerine katı borlama işlemi uygulanmıştır. Borlama sıcaklığı olarak 950°C, süre olarak ise 2, 4 ve 6 saat olarak belirlenmiştir. Borlama neticesinde yüzey sertlikleride artış görülmüştür. Bu artış borlama öncesine göre 8-10 katlık bir artıştır. Aynı sıcaklıkta borlama süresiyle tabaka kalınlığının düzenli arttığı görülmüştür.

Aynı malzeme de artan bor tabaka kalınlığıyla ise aşınmanın azaldığı belirlenmiştir. Farklı karbon miktarına sahip AISI 1030 ve AISI 1050 çelikleri karşılaştırıldığında ise yaklaşık aynı aşınma davranışı sergiledikleri tespit edilmiştir. [33]

1.2842 (Soğuk İş Takım Çeliği) çeliğine 850,950 ve 1050°C sıcaklıklarda borlama işlemi yapılmıştır. Her sıcaklıkta 1 ve 4 saat olmak üzere iki farklı borlama süresi belirlenmiştir. Sıcaklık ve zaman artışının borür tabakasını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda borlama süresinden çok borlama sıcaklığının borür tabakasını oluşturan fazlar arasında ayrılmalara yol açtığı, bu durumun ise FeB ve Fe₂B fazlarının termal genişleme katsayıları farklılığından meydana geldiği anlaşılmıştır. Zaman artışından ziyade sıcaklık arttıkça tabakaları oluşturan FeB ve Fe₂B fazlarının arasında ayrılmaların daha da arttığı görülmüştür.

Bu durum ise, sıcaklığın artmasıyla termal genişlemenin de artması ve dolayısıyla fazların daha kolay bir şekilde ayrılması olarak yorumlanabilir. Bu malzeme için optimum borlama sıcaklığının 850°C olduğu belirlenmiştir. [24]

AISI 5140 ve AISI 420 paslanmaz çelikleri 850, 900 ve 950°C sıcaklıklarında 2,4 ve 6 saat süreyle borlama işlemi uygulanmıştır. Borlama süresi arttıkça malzeme yüzeyinde meydana gelen borür tabakası kalınlığının arttığı görülmüştür.

Çeliklerin yapısı da bu tabaka kalınlığını etkilemiştir. AISI 420 paslanmaz çelikte oluşan borür tabakasının düz ve pürüzsüz iken AISI 5140 çeliğinde oluşan yapı testere dişi formundadır. Borür kalınlığı AISI 5140 çeliğinde daha fazladır. İki çelikte de FeB, Fe₂B, CrB ve MnB fazları görülmüştür. Cr elementi borlama sonucunda bileşik yaptığı için borür tabakasının kalınlığını azaltmıştır. Borlama yüzey sertliklerini 4 - 6 kat arasında artırmıştır. Adhezyon test sonuçlarına göre borlama neticesinde aşınma oranları azalmıştır. [34]

850°C ' de 2,4, 6 ve 8 saatlik zaman dilimle düşük karbonlu mikro alaşımlı çeliklere Ekabor 2 tozu kullanılarak borlama işlemi uygulanmıştır. Borlama işlemi neticesinde çelik yüzeyinde üç ayrı bölge oluşmuştur.

Oluşan bu tabakaya genel olarak Borür tabakası denilmektedir. Bu yapı içerisinde FeB ve Fe₂B yapıları oluşmuştur. Borlama ile yüzey sertleşmesinde 9 katlık artış meydana gelmiştir. [35]

Demir esaslı FeCu-Grafit kompozitinden toz metal parça üretilip kullanılmıştır. Bazı numunelere yalnız borlama bazılarına ise borlama+bilyalı dövme işlemleri uygulanmıştır. Aşınma dayanımı borlanmış FeCu-Grafit kompozitinde 24 kat artış olmuştur. Borlanmış + bilyalı dövülmüş FeCu-Grafit ise 7 kat artış göstermiştir. Bu işlem sonunda numune yüzeyinde oluşan aşınma azalmıştır.[36]

Katı ortamda AISI 1040 ve AISI P20 çeliklerine borlama işlemi yapılmıştır. Borlama sıcaklığı olarak 800, 875 ve 950 °C seçilmiştir. Borlama süresi olarak ise 2, 4, 6 ve 8 belirlenmiştir. Her iki çelik numunede artan süre ve sıcaklık ile numune yüzeyinde borlama kalınlığının arttığı görülmektedir.

Sertlik değerleri ise yaklaşık aynı çıkmıştır. Bu durumun nedeni iki farklı çelik numunenin karbon oranlarının yakınlığı ile açıklanmaktadır. Sertlik değerleri incelendiğinde üç farklı yapı gözlemlenmiştir.

FeB ve Fe₂B' nin olduğu kısım borür tabakası, geçiş bölgesi ve ana matristir. Kırılma tokluk değerleri ise malzeme bileşimi, borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Borlama süresindeki artış ise kırılma tokluğunu azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu duruma etken olan nedenin ise borlama süresinin artışı ile yapıda daha sert ve gevrek olan FeB yapısının artışıdır. [37]

Katı ortamda AISI 1030 çeliğine borlama işlemi uygulanmış ve abraziv aşınma testi uygulanarak incelenmiştir. Borlama sıcaklığı olarak 900,950 ve 1050°C tercih edilmiştir. Her sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat süreyle borlama işlemi uygulanmıştır.

Kaplama kalınlığı işlem sıcaklığı ve borlama süresine bağlı olarak 80,6 µm ile 340,9 µm arasında değerler almıştır. Borür tabakalarında ölçülen sertlik değerleri ise 1227-1625HV arasındadır.

Al₂O₃ zımpara kağıtlarıyla yapılan abraziv aşınma sonucunda minimum aşınmanın 950°C' de 6 saat, maksimum aşınmanın ise 1050°C' de 4 saat borlanan numunede olduğu görülmüştür.

SiC ile yapılan zımpara kağıtlarıyla yapılan aşınma sonucunda en az aşınma 900°C' de 4 saat borlamayla, en çok aşınma ise 1050°C' de 2 saat borlama yapılan numunede tespit edilmiştir. Al₂O₃ aşındırıcı kullanıldığında minimum aşınmanın olduğu 950°C' de 6 saat borlamayla numunelerin ilk hallerine göre 24,5 kat az aşındığı sonucuna ulaşılmıştır. SiC ile yapılan aşınma testinde minimum aşınma 900°C' de 4 saat borlanmış numunelerde olduğu tespit edilmiştir.[38]

Borlama neticesinde malzeme yüzeyinde borür tabakası oluşmaktadır. Tabakaların altında Fe₂B fazı oluşmakta ve borür tabakasının ana matrise tutunmasını kolaylaştırmaktadır. Borür tabakasının üst kısmında ise FeB tabakası oluşmuştur. Borlama sonunda sertlik değerlerinde artış, aşınma ve korozyon direncinde iyileşme görülmüştür.[39]

950°C' de 3 saat süreyle 1050 çeliğine borlama işlemi yapılmıştır. Bor tozu olarak %80 susuz boraks(tinkal) ve %20 ferrosilisyum tozu kullanılmıştır. 3 saat borlama sonunda havada soğutma işlemi uygulanmıştır. Sertlik değerlerinin borür tabakasında 496-1290HV, geçiş bölgesinde 300-334HV ve ana yapıda 260-266HV olarak ölçülmüştür. Borür tabakalarının sertlik ölçümlerinde değerlerin yüzeyden iç bölgelere gidildikçe düştüğü görülmüştür. Bu durumun nedeni ise iç bölgelere gidildikçe difüzyon miktarın azalmasına bağlı olarak borür tabakasının azalmasıdır. [40]

950°C' de 5 saat süreyle AISI 420 ve AISI 5120 çeliklerine borlama işlemi uygulanmıştır. AISI 5120 çeliğinde oluşan bor yapısının morfolojisi testere dişi şeklinde pürüzlü iken, AISI 420 çeliğinde ise bu yapı düz, pürüzsüzdür. Yüzeyde oluşan borür tabakası kalınlığı AISI 420 çeliği için 50,62µm, AISI 5120 çeliği için ise 148,74 µm olarak ölçülmüştür. İşlem görmemiş AISI 420 çeliği sertliği HV0,05 340 olarak ölçülürken borlamayla birlikte aynı şartlarda sertlik 1854-2147HV olarak değişmiştir.

İşlem görmemiş AISI 5120 çeliğinin sertliği HV0,05 224 iken borlamayla bu değer 1498-1892HV arasında değerlere çıkmıştır.

AISI 420 çeliğinin aşınma oranı daha düşük çıkmıştır. Bu çalışmada gerçekleştirilen borlamanın aşınmayı yaklaşık beş kat azalttığı görülmüştür [41]

AISI 310 paslanmaz metal çeliğine 850 ve 1050°C'de Ekabor-2 tozu kullanılarak 2 ve 6 saat sürelerle katı borlama işlemi uygulanmıştır. Borlamaya bağlı olarak çelik yüzeyinde borür tabakası oluşmuştur. XRD analizleri sonucunda bu yapı içerisinde FeB, Fe₂B, CrB, Cr₂B, NiB, Ni₂B ve Ni₃B yapılarına görülmüştür.

İşlem görmemiş AISI 310 çeliği HV0.1'de 276 vickers sertlik değerine sahip iken borlama sonucu HV0.1'de 1658-2284 vickers aralığında sertlikler elde edilmiştir. Sertlik değerinde yaklaşık dokuz katlık artış yaşanmıştır. Zamana ve sıcaklığa bağlı olarak oluşan borür tabakası kalınlığı ise 7.82-56.72µm arasında değerler almıştır. Borlanmış çeliğin aşınma oranının işlem görmemiş çeliğe oranla yaklaşık yedi kat azaldığı görülmüştür. [42]

AISI 1020 çeliğine 1000°C sıcaklıkta 4 saat borlama işlemi uygulanmıştır. Borür tabakasında elde edilen fazlar XRD analiziyle elde edilmiştir. Borür yapısı incelemesinde SEM analizi kullanılmıştır. İşlem görmemiş numuneler ile aşınma uygulanan numuneler karşılaştırılmıştır. XRD analizi sonucunda yapıda Fe₂B fazı görülmüş ve borür tabaka kalınlığı 177µm olarak ölçülmüştür. Aşınma deneylerinde borlanmış numunelerde aşınmanın azaldığı tespit edilmiştir. [43]

Krom çeliği(%13 ve %25Cr) 850, 900 ve 950°C sıcaklıklarda 1-12 saat borlanmış. Numuneler bor tozu içerisine gömülerek yüksek saflıkta (%99'lük Argon) ortamda gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonucunda iki farklı mikro yapı oluşmuştur. %13 Cr çeliğinde dış yüzeyde FeB ve iç tarafta Fe₂B bileşiği görülmüştür. %25 Cr çeliğinde ise her bir borür tabakasında ikili fazların oluştuğu görülmüştür. Dış yapıda FeB ve CrB, iç yapıda ise Fe₂B, Cr₂B çiftli yapıları görülmüştür. Deneyler neticesinde borür tabakasının büyümesinin parabolik olduğu belirlenmiştir. Mikro yapıları borid tabakalarının diğerine oranla yüksek aşınma sergilediği görülmüştür.[44]

Borlama genellikle katı, sıvı , gaz ortamda uygulanılır. Borlama sıcaklığı genellikle 800-1000°C arasında 1 ile 8 saat arasında uygulanmaktadır. Oksijeni tutuması için redükleyici madde kullanılmaktadır. Borlamanın en büyük etkisi sertlik üzerinedir. Alaşımli çeliklerde 2500HV, titanyumda ise 3000HV sertlik değerlerine ulaşılabilir. [45]

Aşınma direncini artırması korozyona karşı etkili olması da borlamayı üstün kılan özelliklerdendir. Bu çalışmanın amacı ise kısaca borlanmış numunelerin endüstride hangi alanlarda ve nasıl kullanılacağı konusunda bilgi vermektir.[45]

Bu çalışmada AISI 8620 2, 4 ve 6 saat 850,900 ve 950°C sıcaklıkta katı borlama yapılmıştır. Aşınma testleri 10, 20 ve 30N ' luk yükler 0.2m/s hız altında Al₂O₃ aşındırıcı kağıtları kullanılarak yapılmıştır. Borlama süresi ve sıcaklık arttıkça sertlik değerleri ve borür tabakası artış göstermiştir. Borlanmış numune işlem görmeyen numuneye göre aşınma direncinde artış görülmektedir.[46]

Ekabor I tozu kullanılarak AISI W4 çeliğine 1,2,4,6 ve 8 saat sürelerde 850, 900 ve 950°C sıcaklıklarda katı borlama yapılmıştır. Borür tabakası testere dişi formunda oluştuğu görülmüştür. Borlama süresinin artışı sertlik değerini ve gözenekliliği artırmaktadır. Borlama süre ve sıcaklığa bağlı olarak borlama kalınlığı 8-386mm arasında değişkenlik göstermiştir.Sertlik değerleri ise 1407-2093 HV0.05 arasında değişmektedir. Fe₂B'nin kırılma tokluğu ise FeB'den yaklaşık 4 kat fazladır.[47]

AISI H13 Sıcak iş çeliği ve SAE 304 çeliği 800 ve 950°C sıcaklıklarda 3,5 ve 7 saat sürelerle borlama işlemine tabi tutulmuştur. XRD analizleri neticesinde yapıda FeB,Fe₂B ve CrB bileşikleri H13çeliğinde, FeB, Fe₂B, CrB ve Ni₃B fazları ise 304 paslanmaz çeliğinde görülmüştür. Aynı şartlarda borlanmış numuneler kıyaslandığı zaman 304 çeliğinin sertliğinin daha yüksek çıktığı görülmüştür.

Krom ve nikel a ait alaşım elementleri yüksek sertlik elde etmek için önemli rol oynar. Borlama sıcaklığı ve zamanı arttıkça çeliklerde meydana gelen borür tabakası artmaktadır.[48]

SAE 1010, SAE 1040, D2 takım çeliği ve 304 paslanmaz çeliğinde borlama işlemi uygulanmıştır. Bu çalışma oluşan tabaka kalınlıkları ve aşınma direnci incelenerek diğer yüzey sertleştirme işlemleriyle karşılaştırılmıştır. Borlama işlemi 900°C sıcaklıkta Ekabor 3 tozu kullanılarak 2, 4, 6 ve 8 saatlik sürelerde uygulanmıştır. En düşük karbon oranına sahip SAE 1010 çeliğinde 8 saat için 140µm, SAE 1040 çeliği için bu rakam 130 µm, 304 çeliğinde 8 saat borlama da kalınlık 85 µm, D2 takım çeliğinde ise 8 saatlik borlama sonucunda 45 µm olarak ölçülmüştür. Bu durumun nedeni ise düşük karbonlu çeliklerde bor difüzyonunun, alaşım ve yüksek karbonlu çeliklere oranla daha fazla gerçekleşmesi ile açıklanır. Borlama karbürizasyon ile karşılaştırıldığında tabaka kalınlığı en büyük değerlerini karbürizasyonda alır. Borlama süresinin artışıyla da tabaka kalınlığı artar. Bu deneysel çalışmada borlamanın diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine oranla aşınma dayanımının yüksek olduğu görülmüştür. [49]

SAE 4140 çeliği numuneler 1223, 1273, 1323 ve 1373 K sıcaklıklarda 120, 240 ve 480 dakikalık sürelerle borlanmıştır. Borlama süresi ve sıcaklık artışına bağlı olarak çelik yüzeyinde meydana gelen borür tabakasında artış gözlenmiştir. Bu tabaka 57 ile 290 µm arasında değişmektedir.

En büyük borid tabakası 6 saat 1050°C sıcaklıkta yapılan borlamada elde edilmiştir. 50gr yük altında yapılan sertlik değerleri ise 1200-1750HV arasında değişmektedir. İşlem görmeyen numuneler ile borlanmış numunelerin aşınma davranışları karşılaştırıldığında borlanmış numunelerin aşınma direncinin 3-4 kat iyileştiği görülmüştür. En iyi aşınma direncini ise 900°C'de 6 saat borlanan numuneye ait olduğu görülmüştür.[50]

1.12. Çalışmanın Amacı

Makine imalat sektöründe karşılaşılan en büyük sorunlardan iki tanesi aşınma ve yorulmadır. Bilindiği gibi makine elemanlarından istenen esas yapı yani matrisin sünek, yüzeylerinin ise sert olmasıdır.

Bunun nedeni en yüksek eğilme ve burulma gerilmelerinin ve bunların bileşkelerinin yüzeyde oluşmasıdır. Bunun yanı sıra ilgili makine malzemesinin darbe dayanımının yüksek olması için içyapısının sünek olması istenmektedir. Bu amaçla imalat makine sektöründe farklı ıslah çelikleri kullanılmaktadır. Makine parçalarında oluşan sürtünme ve aşınma büyük sorunlar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada taşıt ve makine imalinde, ön aks, krank mili, aks kovani, direksiyon mili ve benzeri parçalarda sıklıkla tercih edilen yüksek aşınmalara maruz kalan AISI 5140 çeliği tercih edilmiştir. Malzemeye katı borlama işlemi ve sonrasında ıslah işlemi uygulanmıştır.

Borlama bir çok çelik malzemeye uygulanan termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Aşınma direncinde, sertlik değerlerinde artış sağlaması ve korozyona karşı dayanıklı olması maliyet açısından önemli kayıpları engelleyebilmesi borlamayı son yıllarda tercih edilen bir yöntem haline getirmiştir.

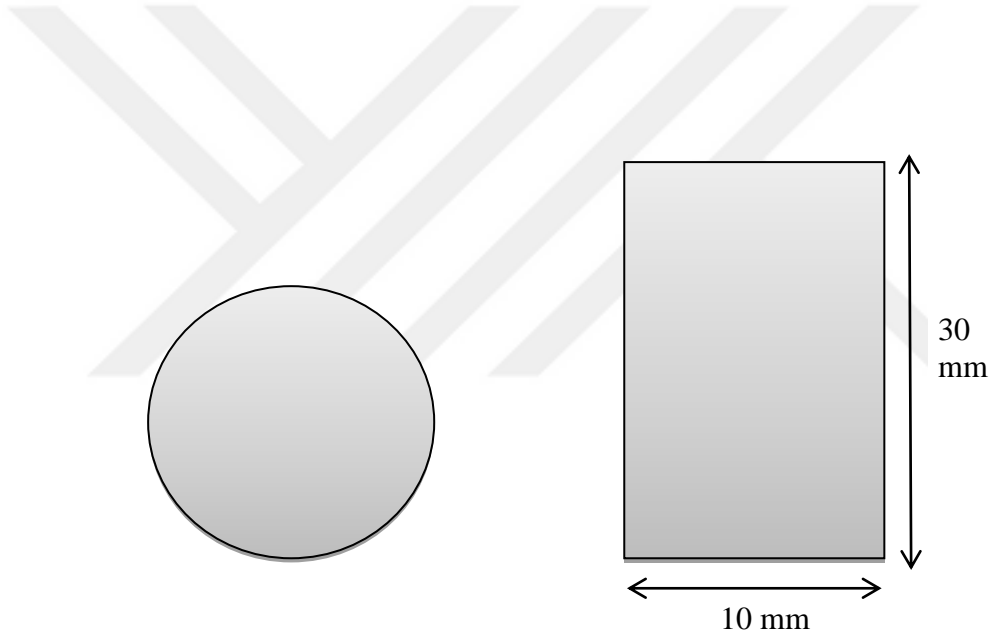
Bu nedenle ıslah çeliklerinden biri olan AISI 5140 çeliğinin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla farklı ısıl işlem koşulları ve yüzey kaplaması deneysel olarak incelenmiş ve üretilen bu alaşımların yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine bakılarak en uygun koşullar belirlenmeye çalışılmıştır.

2.MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Kimyasal Bileşim ve İç Yapı İncelemeleri

2.1.1.Borlama İşlemi ve Mikro Yapı İncelemesi

Deneyde kullanılmak üzere AISI 5140 çeliği temin edilmiştir. Deney numunesi olarak kullanılacak AISI 5140 çeliği $\phi 10 \times 30$ mm olacak şekilde olacak şekilde universal torna tezgahı kullanılarak işlenmiştir. Numunelerin şematik resmi Şekil 2.1.' de verilmiştir.

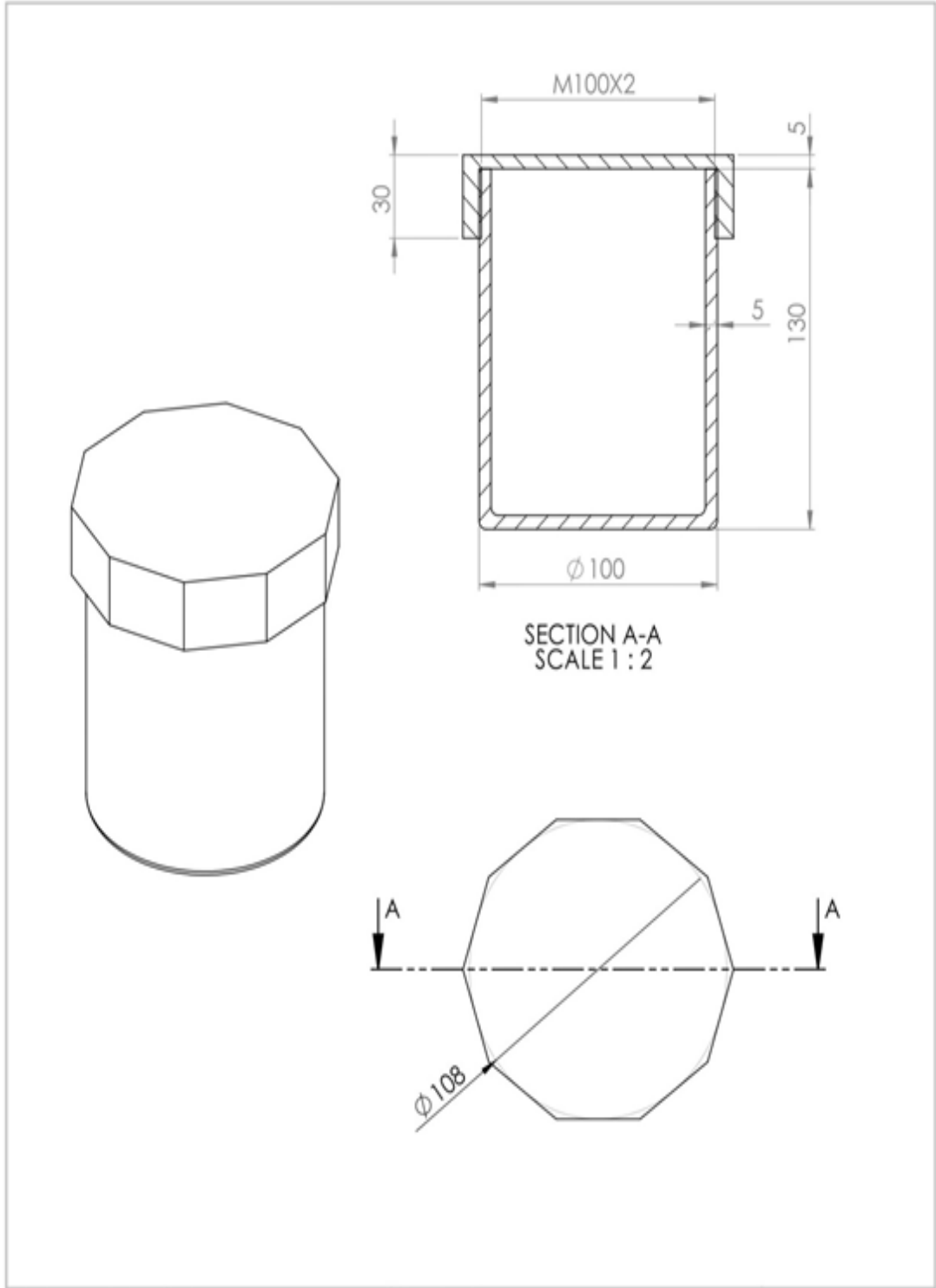


Şekil 2.1. Numunelerin görünümü

Hazırlanan numunelerin kimyasal bileşimleri optik emisyon argon spektrometresinde ölçülmüştür. Katı borlama işlemi 304 paslanmaz çeliğinden yapılan pota içerisinde Baybora kullanılarak 1223 K sıcaklığında 4, 6 ve 8 saat sürelerde gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemlerinde bor ajanı olarak genellikle ekabor tozu kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise Baybora tercih edilmiştir. Şekil 2.2.' de deney aşamalarında kullanılan Baybora tozu verilmiştir.

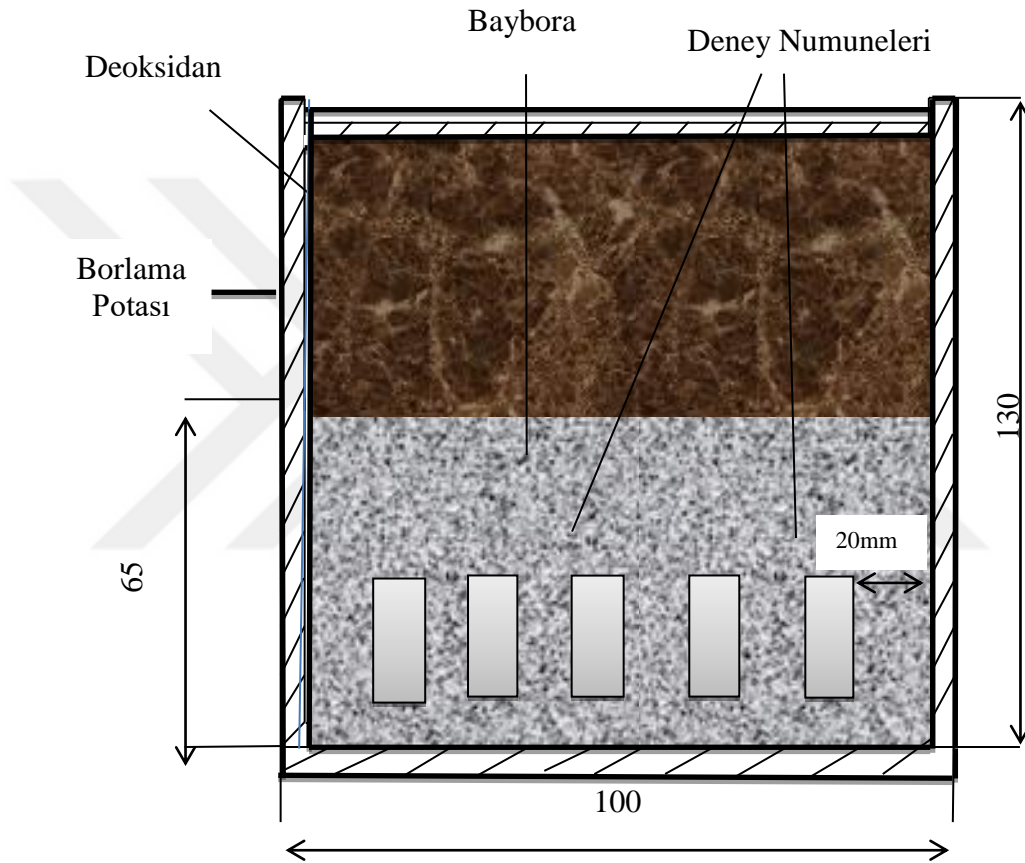


Şekil 2.2. Borlama tozu “Baybora”



Şekil 2.3. Borlama potası teknik resim

Katı borlama işlemi borlama potası kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Deney numuneleri göz önünde bulundurularak borlama potası ölçüleri belirlenmiş ve borlama potası Ankara Organize Sanayi bölgesinde 304 paslanmaz çelik malzemeden yaptırılmıştır. Borlama işlemi için kullanılan potanın şematik resmi Şekil 2.4.' de verilmiştir.



Şekil 2.4. Deney numunelerin bor potası içindeki şematik gösterimi

Potanın içerisindeki yükseklik 6.5 cm olacak şekilde Baybora ile doldurulmuştur. 10 adet AISI 5140 numune pota içerisine yerleştirilmiştir. Potanın kalan kısmı deoksidan(kömür tozu) malzeme ile doldurulmuştur Deoksidan malzeme sayesinde ise numunelerin oksitlenmesi engellenmiştir. Numunelerin kenarlarında en az 1cm toz borlama ajanı ile dolu olmasına dikkat edilmiştir.

Borlama işlemi için Magma Term markalı ısıtım işlem fırını kullanılmıştır. Çizelge 2.1.' de deney aşamasında kullanılan ısıtım işlem fırınına ait bazı özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Deneylerde kullanılan ısıtım işlem fırınının özellikleri

ISIL İŞLEM FIRINI	VOLTAJ	AKIM	GÜÇ
MAGMA TERM	220V	Max20A	4,3kW

Fırının sıcaklık ve süre ayarlaması yapıldıktan sonra borlama potası içine konulmuş fırın sıcaklığı 950°C sıcaklığa ulaştıktan sonra 4 saat beklenmiştir. Soğuyan pota içerisindeki numuneler zarar görmeyecek şekilde çıkarılarak 4 saat borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Aynı işlem 6 ve 8 saat için tekrarlanmıştır.

Borlama işleminden sonra borlama potası ısıtım işlem fırını içinde soğumaya bırakılmıştır.

Çizelge 2.2. Birinci borlama grubu

Numune kodu	Malzeme	Borlama sıcaklığı(°C)	Borlama süresi(saat)
N	AISI 5140	-	-
B4	AISI 5140	950	4
B6	AISI 5140	950	6
B8	AISI 5140	950	8

B4, B6 ve B8' e ait numunelerden beşer adet numune alınarak 850°C sıcaklıkta 70 dakika östenitleştirme işlemi uygulanmıştır. Fırından çıkarılan numunelere yağda su verme işlemi yapılmıştır. Bu yapının sert ve iç gerilmelere sahip olmasından dolayı 450°C sıcaklıkta 2 saat menevişleme işlemi uygulanmıştır.

Bu işlem sonunda malzemeler fırından çıkarılarak havada soğumaya bırakılarak, bu numunelere BSM4, BSM6 ve BSM8 kodları verilerek vakum cihazında saklanmıştır. Numunelerin kodları ve borlama şartları Çizelge 2.2.' de verilmiştir.

Çizelge 2.3. İkinci borlama grubu

Numune Kodu	Malzeme	Borlama Sıcaklığı(°C)	Borlama Süresi	Su Verme 850°C 70dak	Menevişleme 450°C 2 saat
BSM 4	AISI 5140	950	4	var	var
BSM 6	AISI 5140	950	6	var	var
BSM 8	AISI 5140	950	8	var	var



Şekil 2.5. Isıl işlem fırını

Herhangi bir işlem uygulanmayan AISI 5140 çeliği numunelere 850°C sıcaklıkta 70 dakika östenitleştirme işlemi uygulanmıştır. Bu süre sonunda fırından çıkarılan numunelere yağda su verme işlemi yapılmıştır. Soğuyan numuneler temizlendikten sonra 450°C’ de 2 saat menevişleme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem neticesinde fırından çıkarılan numuneler havada soğumaya bırakılmış ve bu numunelere SM kodu verilerek vakum cihazının içerisine konulmuştur.

Her bir deney numunesi kesilerek bakalit alma işlemi gerçekleştirilmiştir. deney aşamasında kullanılan Mikro Test markalı bakalit alma cihazı Şekil 2.6.' da verilmiştir.



Şekil 2.6. Bakalit alma cihazı

Kesme işlemlerinde kullanılan Mikro Test markalı hassas kesme cihazı Şekil 2.6.' da verilmiştir.



Şekil 2.7. Hassas kesme cihazı

Yüzeyleer sırasıyla 120, 240, 400, 800 ve 1200 gritlik zımpara kağıtları ile zımparalanmış ve 6µm ve 3µm' luk elmas solüsyonlar ile sırasıyla parlatılmıştır. Şekil 2.8.' de zımparalama ve parlatma işlemlerinde kullanılan Mikro test markalı zımpara cihazı verilmiştir.



Şekil 2.8. Zımpara ve parlatma cihazı

Nital çözeltisi 46 ml saf su ve 4 ml Sıgma Aldrich marka % 4-66' lık nitrik asit kullanılarak %4'lük nital çözeltisi hazırlanmış ve numuneler sırasıyla 3 saniye %4'lük nital çözeltisinde bekletilip suyla temizlenmiştir. Hazırlanan nital çözeltisine ait görüntü Şekil 2.9.'de verilmiştir.



Şekil 2.9. %4'lük nital çözeltisi

Temizlenen numunelerin üzerine etil alkol damlatılıp, kurutma cihazıyla kurutuldu. Nikon Eclipse MA 100 marka optik mikroskop kullanılarak numunelere ait yapılar incelendi. İç yapı incelemesi için kullanılan optik mikroskop Şekil 2.10.' da verilmiştir.



Şekil 2.10. Optik mikroskop

İç yapı incelemesinin tamamlanmasından sonra numuneler oksitlenmemesi için vakum cihazında saklanmıştır. Vakum cihazının fotoğrafı Şekil 2.11.' de verilmiştir.



Şekil 2.11. Desikatör

Hazırlanan bakalitler sırasıyla 240, 400, 600, 800 ve 1200 ' lük zımpara kağıtları kullanılarak zımparalama işlemleri gerçekleştirildi. 3µm ve 6µm' luk parlatma solüsyonları yardımıyla mikro test markalı parlatma cihazında parlatma işlemleri gerçekleştirildi. Numunelerin oksitlenmemesi için etil alkol kullanıldı ve numuneler kurutuldu.

Yüzey altında oluşan borür tabakası incelenerek bu yapılara ait görüntüler optik mikroskop yardımıyla çekildi.

2.2.2.Yüzey Altı Mikro Yapı İnceleme

Abraziv aşınma testleri uygulanan numunelerin yüzey altı görüntüleri incelendi. 5-15 ve 25N' luk yükler altında altın da aşınma testine tabi tutulan numunelerin yüzey altı incelemesi yapıldı. Numuneler boyuna iki eşit parçaya kesildikten sonra bakalite alındı. Bütün numuneler sırasıyla 240, 400, 800 ve 1200' lük zımpara kağıtlarıyla zımparalanarak son işlem olarak parlatma işlemi uygulandı. Parlatılan yüzeylere nital çözültisi uygulanarak yüzey altı görüntü alma işlemine geçildi.5-15 ve 25N' luk aşınma testine tabi tutulan numunelerin yüzey altı fotoğrafları optik mikroskop ve SEM aracılığıyla çekildi.

2.3.Mekanik Deneyler

2.3.1. Mikro Sertlik Deneyleri

1223 K sıcaklıkta borlanan numunelerin sertlik değişimleri yüzey altı boyunca incelendi. Sertlik ölçümleri Kırıkkale Üniversitesi Metalografi laboratuvarında bulunan Galileo Durometria markalı İtalyan markalı sertlik ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Ölçümler 10µm aralıklarla HV 0.1 yük altında 10 s bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Her bölüm için 10' ar ölçüm alınmış ve aritmetik ortalaması kullanılmıştır. Deneyler sırasında kullanılan sertlik ölçüm cihazı Şekil 2.12.' de verilmiştir.



Şekil 2.12. Sertlik ölçme cihazı

2.3.2. Aşınma Deneyleri

Borlama işlemine tabi tutulan numunelerin tribolojik davranışlarının incelenmesi amacıyla Şekil 2.13.' de verilen aşınma test cihazı kullanılmıştır. Cihaz bir yükleme sistemi ve hız kontrol ünitesinden oluşmaktadır.

Borlanan numuneler 0,5 m/sn sabit hızda 200 mm çapa sahip 177 µm ortalama parçacık boyutuna sahip alümina aşındırıcı kullanılarak 5-25 N yük aralığında aşınma testine tabi tutuldu. Deneylerde numuneler 40 m' lik kayma mesafesi tamamlanıncaya kadar sürdürüldü.



Şekil 2.13. Aşınma cihazı

Aşınma testi öncesi ve sonrası ultrasonik temizleyicide temizlenen numunelerin ağırlıkları ölçüldü. Tartım işlemi 10^{-4} hassasiyetli tartım cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler aşamasında kullanılan tartım cihazı Şekil 2.14.' te verilmiştir.



Şekil 2.14. Hassas tartım cihazı

Aşınma öncesi ve sonrası ağırlıkların farkları alınarak aşınma meydana gelen ağırlık kayıpları belirlendi. Aşınma yüzeyleri ve aşınma yüzey altı SEM görüntüleri alınarak aşınma mekanizmaları belirlendi. Bu işlem Şekil 2.15.'te Kırıkkale Üniversitesi Eğitim Fakültesinde bulunan JEOL markalı JSM-5600 model SEM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.15. SEM cihazı

Çizelge 2.4. Abrasiv aşınma şartları

NUMUNELER	Hız(m/s)	Uygulanan Yük (N)
B4	0,5	5, 10, 15, 20 ve 25
B6	0,5	5, 10, 15, 20 ve 25
B8	0,5	5, 10, 15, 20 ve 25
SM	0,5	5, 10, 15, 20 ve 25
BSM4	0,5	5, 10, 15, 20 ve 25
BSM6	0,5	5, 10, 15, 20 ve 25
BSM8	0,5	5, 10, 15, 20, ve 25
N	0,5	5, 10, 15, 20 ve 25

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

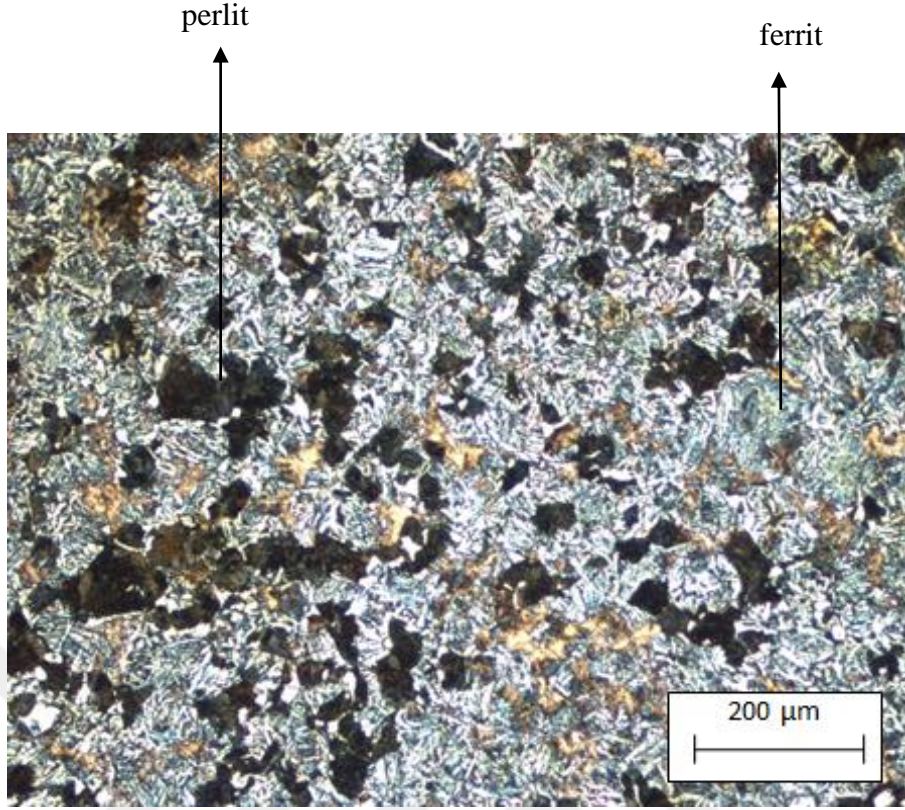
3.1 İç Yapı İncelemesi

Çizelge 3.1.' de deneylerde kullanılan AISI 5140 çeliği numunelere ait kimyasal bileşim verilmiştir.

Çizelge 3.1. AISI 5140 çeliği kimyasal bileşimi

%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Fe
0,424	0,67	0,021	0,005	0,312	1,01	97,4

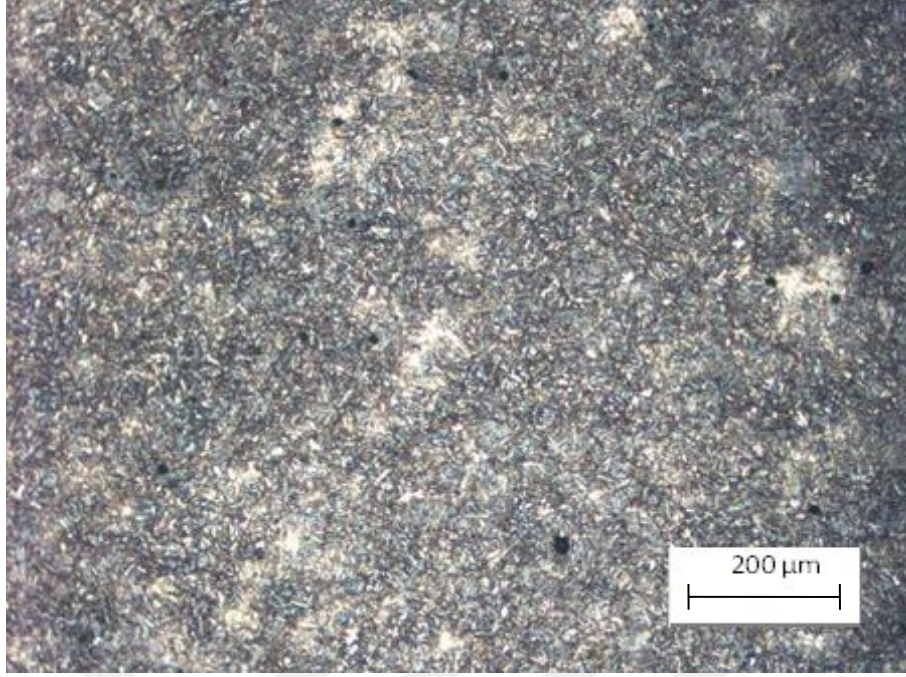
Herhangi bir işlem görmeyen AISI 5140 çeliğine ait mikro yapı görüntüsü Şekil 3.1.'de verilmiştir. Mikro yapıda beyaz bölgeler ferritik yapıyı, koyu bölgeler ise perlitik(ferrit+sementit) yapıyı göstermektedir. AISI 5140 kalite çeliği karbon oranından dolayı yaklaşık %50 ferrit, %50 perlit fazlarından oluşmaktadır.



Şekil 3.1. N numunesine ait iç yapı optik mikroskop görüntüsü

Islah işlemine tabi tutulan deney numunesine ait iç yapı görüntüsü Şekil 3.2.'de verilmiştir. Herhangi bir işlem görmeyen AISI 5140 çeliği numuneye 850°C' de östenitleştirme işlemi uygulanmıştır. Hacim merkezli kübik yapıya sahip AISI 5140 çeliği bu işlem sonunda yüzey merkezli kübik yapıya dönüşmüştür. Östenitleştirme işleminden sonra numunelere yağda su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem neticesinde numune içindeki yapı martenzite dönüşmüştür. Karbon atomları bu ani soğuma esnasında hacim merkezli kübik yapı içerisinde çıkamadığı için malzeme içerisinde yüksek düzeyde sertleşip, kırılgan hale gelmektedir. Bunun sebebi yapı içinde yüksek miktarda iç gerilmeler oluşmasıdır.

Bu işlem sonucunda yapının tane boyutunun küçüldüğü belirlenmiştir. Menevişleme işlemi neticesinde yapı, menevişlenmiş martenzite dönüşmüştür.



Şekil 3.2. SM numunesine ait iç yapı optik mikroskop görüntüsü

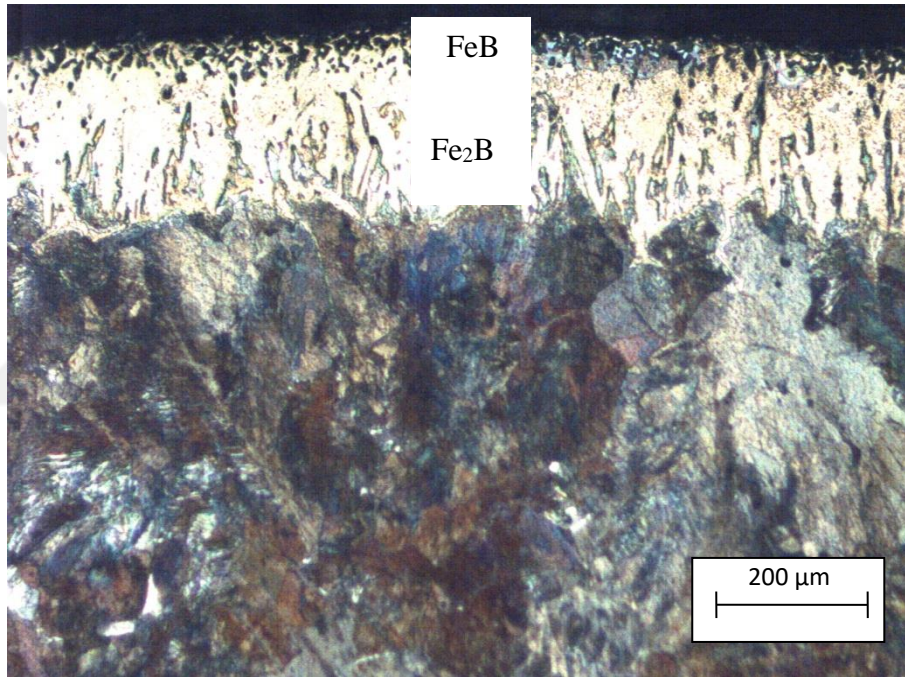
950 °C de 4, 6 ve 8 saat süreli borlama işlemi uygulanan AISI 5140 çeliğine ait numunelerin optik ve SEM görüntüleri Şekil 3.3. - 3.14. arasında verilmiştir. Numunelerinin iç yapılarının ferrit, perlit ve yüzeyde borür tabakalarından oluştuğu gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıkta borun numune içine difüze olması şeklinde gerçekleşir.

Bu difüze işlemi neticesinde Fe_2B fazı elde edilebileceği gibi Fe_2B ve FeB ' den oluşan ikili yapıdan oluşan borür tabakası elde edilebilir. Kırılgan bir yapıya sahip olmasında ötürü FeB fazı istenmez. Tekli yapı olan Fe_2B istenen yapıdır.

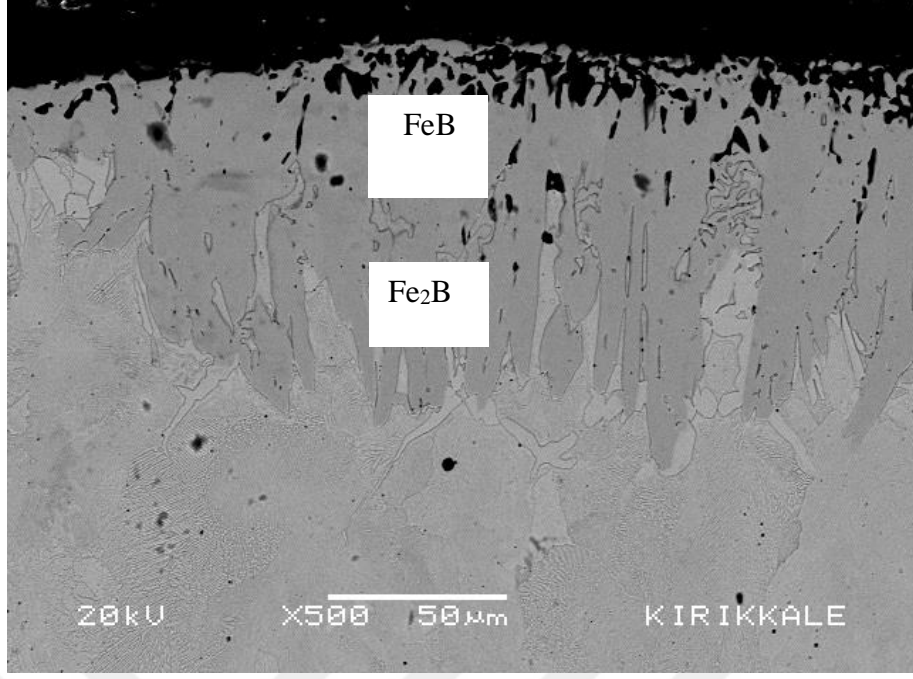
Oluşan Fe_2B ve FeB fazları arasındaki ısıl genleşme farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlamlar oluşabilir. Bu çatlamları önlemek FeB fazını azaltmak veya FeB fazının oluşmasını önlemek ile mümkündür.

Oluşan ilk borür çekirdeği numune içinde büyür. Bor atomları kafes yapının [001] doğrultusunda daha hızlı yayıldığı için FeB ve Fe_2B [001] düzlemi boyunca yönelir.

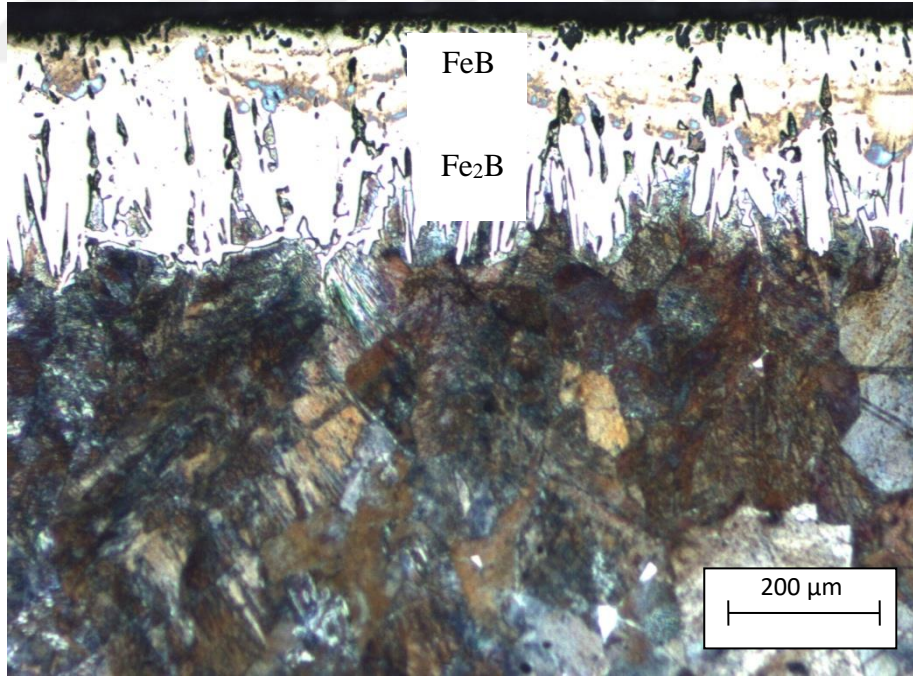
Bu yüzden borür taneleri [001] düzlemi boyunca yüzeye dik daha hızlı büyür. Başka bir deyişle, borür tabakaları çeliğin yüzeyinden içeriye doğru oluşmaktadır. Borür tanelerinin diğer yönlerde büyümesi daha yavaştır. Bu nedenle kolonsal yapı oluşur. Önce Fe_2B fazı oluşmakta, ortamda yeterince bor konsantrasyonu varsa sıcaklık ve süre artışı ile FeB fazı da oluşmaktadır. İlk önce oluşan Fe_2B fazı uzun bir sürede büyümektedir. Borlamanın son aşamasında sadece FeB fazı oluşmaktadır. FeB fazı Fe_2B fazından daha kısa sürede büyüdüğünden FeB fazının dokusu Fe_2B fazı kadar güçlü değildir.



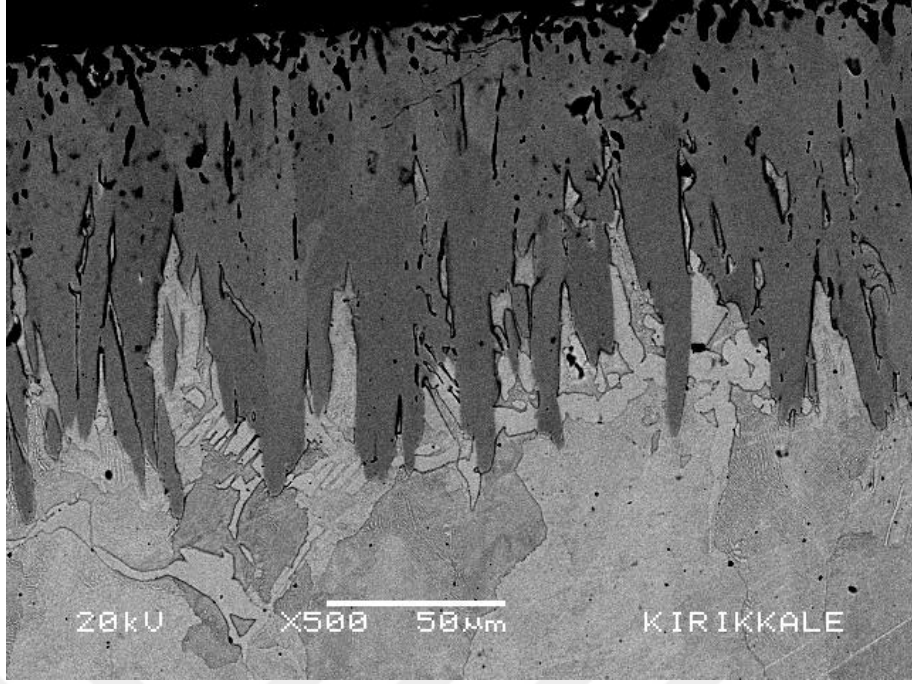
Şekil 3.3. B4 numunesi optik mikroskop görüntüsü



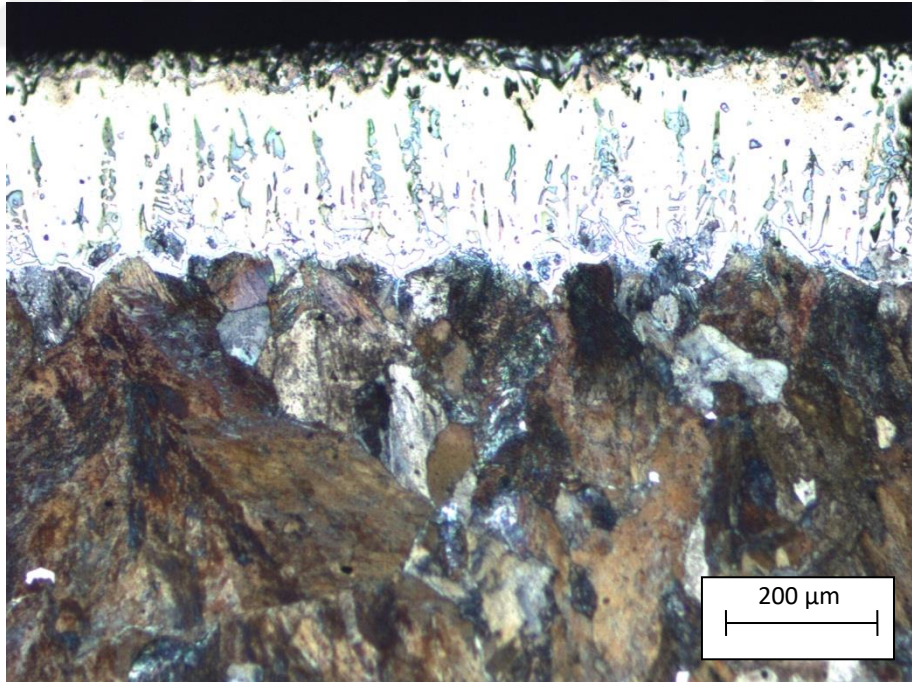
Şekil 3.4. B4 numunesine ait SEM görüntüsü



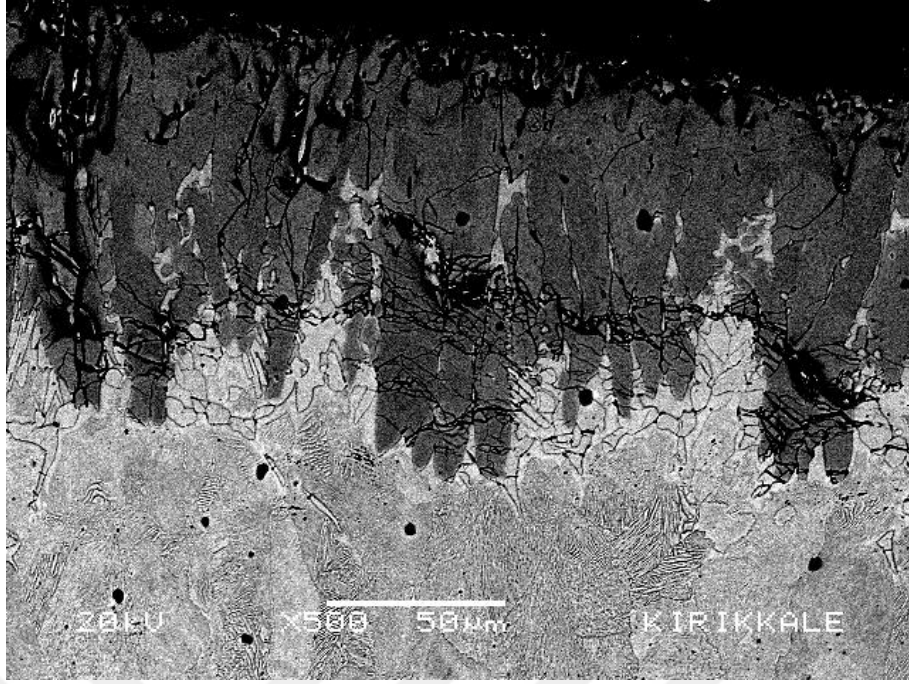
Şekil 3.5. B6 numunesi optik mikroskop görüntüsü



Şekil 3.6. B6 numunesine ait SEM görüntüsü



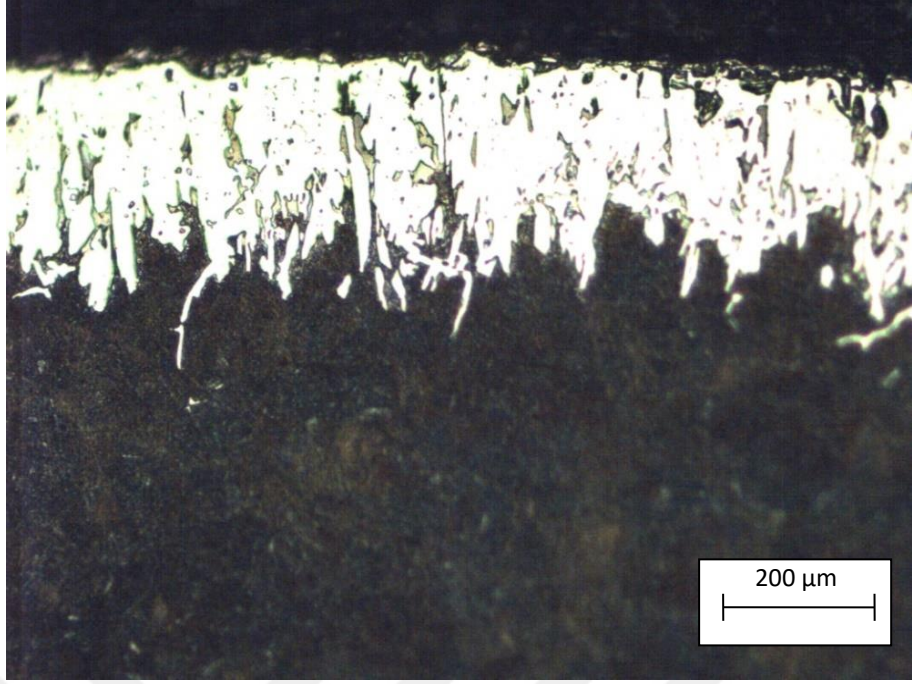
Şekil 3.7. B8 numunesine ait optik mikroskop görüntüsü



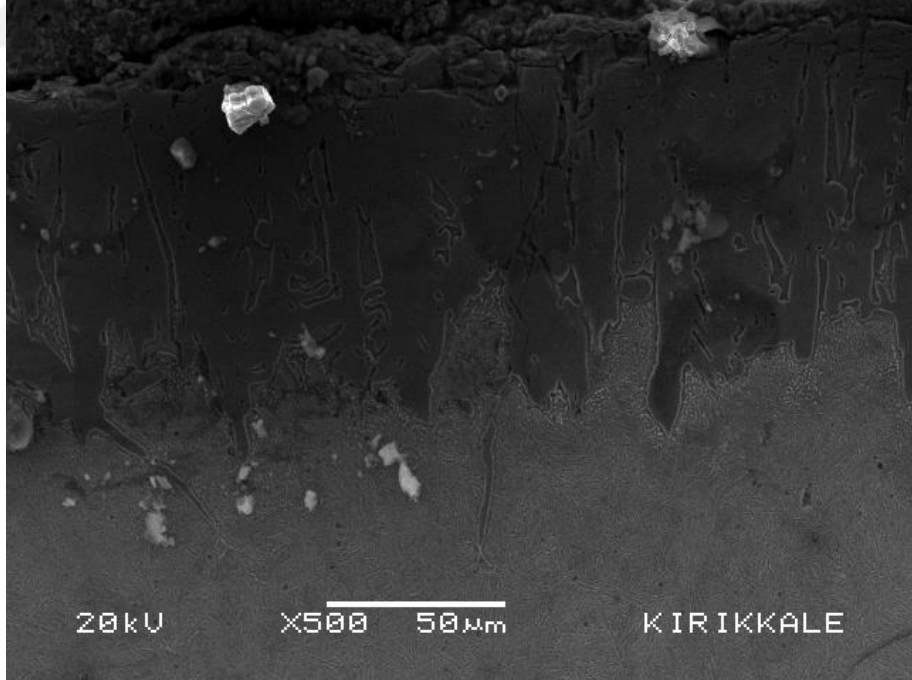
Şekil 3.8. B8 numunesine ait SEM görüntüsü

950°C’de 4, 6 ve 8 saat borlama işlemini uygulanan AISI 5140 çeliğine ait numuneler 70dk östenitleştirme işlemine tabi tutulduktan sonra su verme ve 2 saat menevişleme işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemler sonucunda iç yapı incelemesi ve XRD sonuçları incelendiğinde menevişlenmiş martenzit fazıyla birlikte yüzeyde borür tabakalarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Yapılan bu işlemler sonucunda Fe₂B’nin tamamen FeB’ye dönüştüğü XRD analizlerinden tespit edilmiştir.

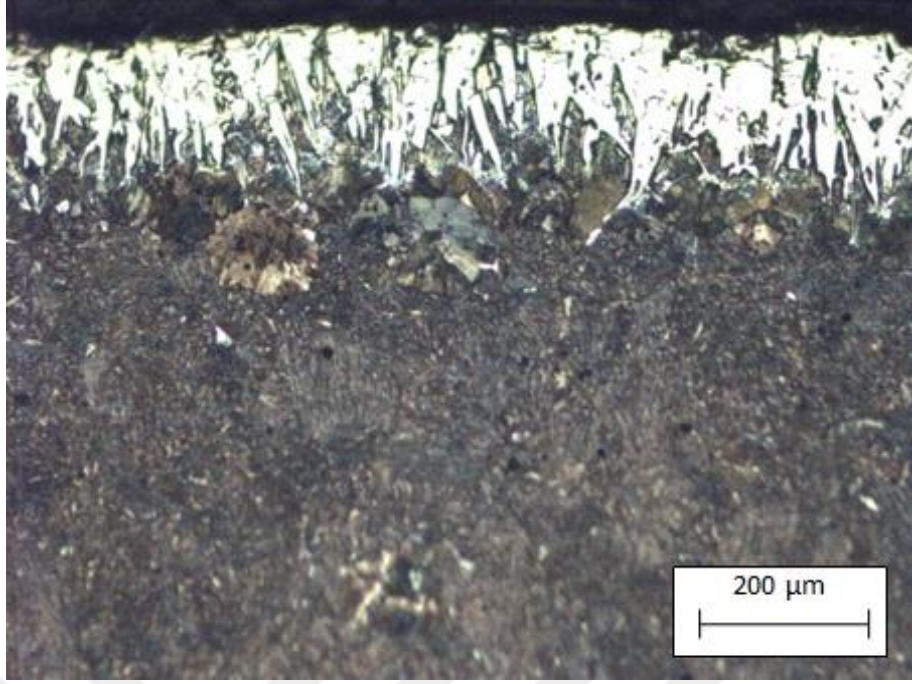
Borlama sonrası uygulanan ıslah işleminin yüzeyde oluşan borür tabakası kalınlığını azalttığı belirlenmiştir. 950 °C’ de borlama sonunda uygulanan ıslah işlemi neticesinde en yüksek borür tabakası kalınlığının 6 saat borlanmış numunede olduğu belirlenmiştir. Borür tabakalarına ait optik ve SEM görüntüleri Şekil 3.9.- 3.14. arasında verilmiştir.



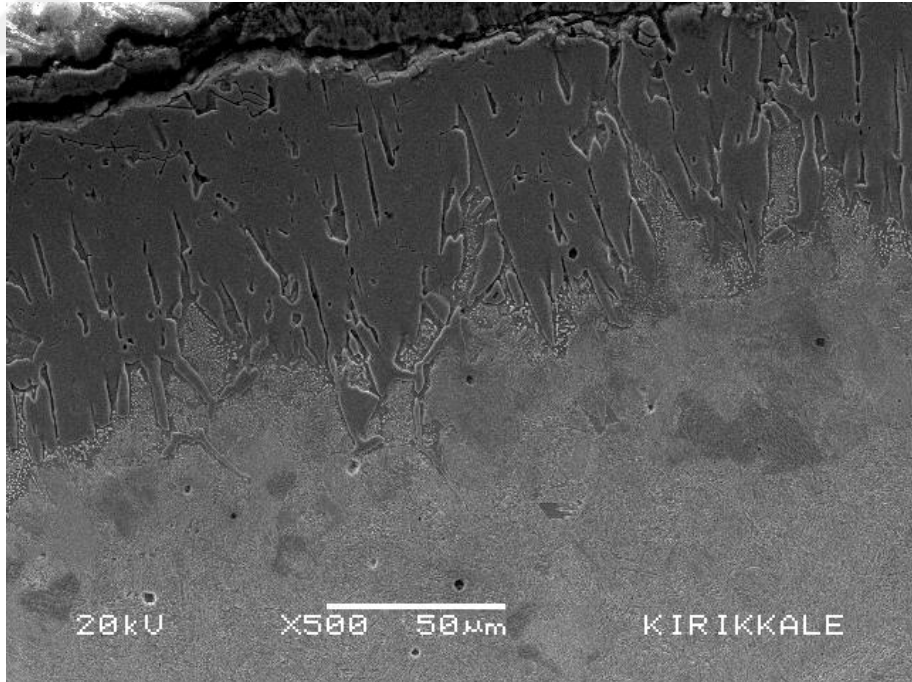
Şekil 3.9. BSM 4 numunesine ait optik mikroskop görüntüsü



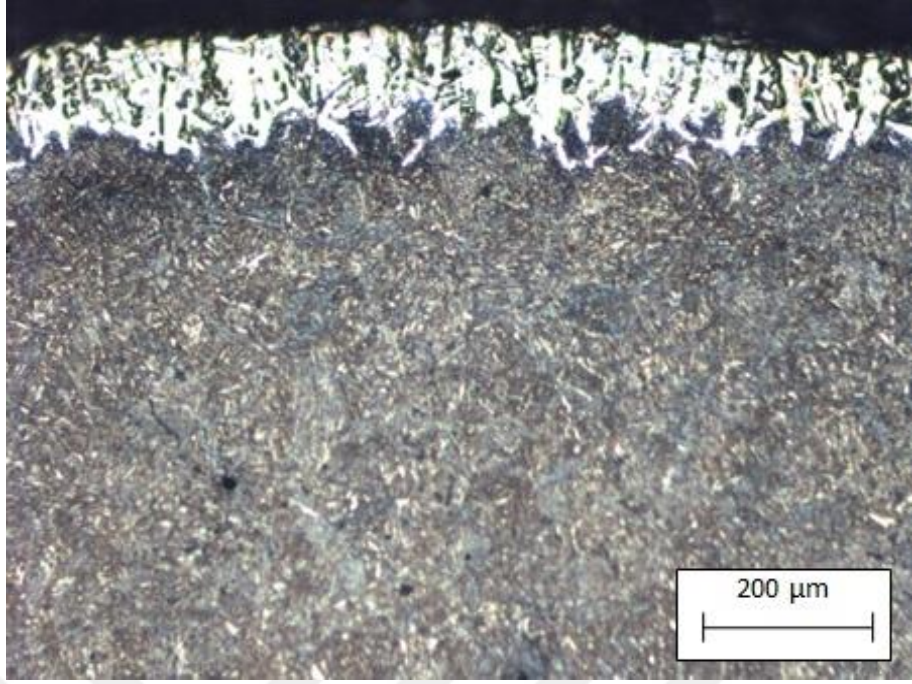
Şekil 3.10. BSM 4 numunesine ait SEM görüntüsü



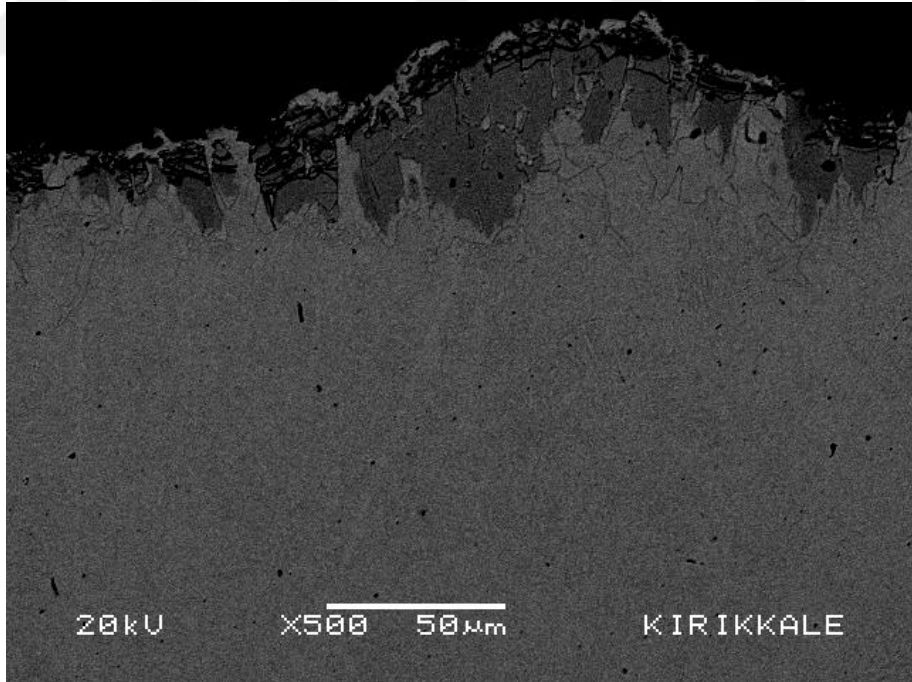
Şekil 3.11. BSM 6 numunesine ait optik mikroskop görüntüsü



Şekil 3.12. BSM 6 numunesine ait SEM görüntüsü



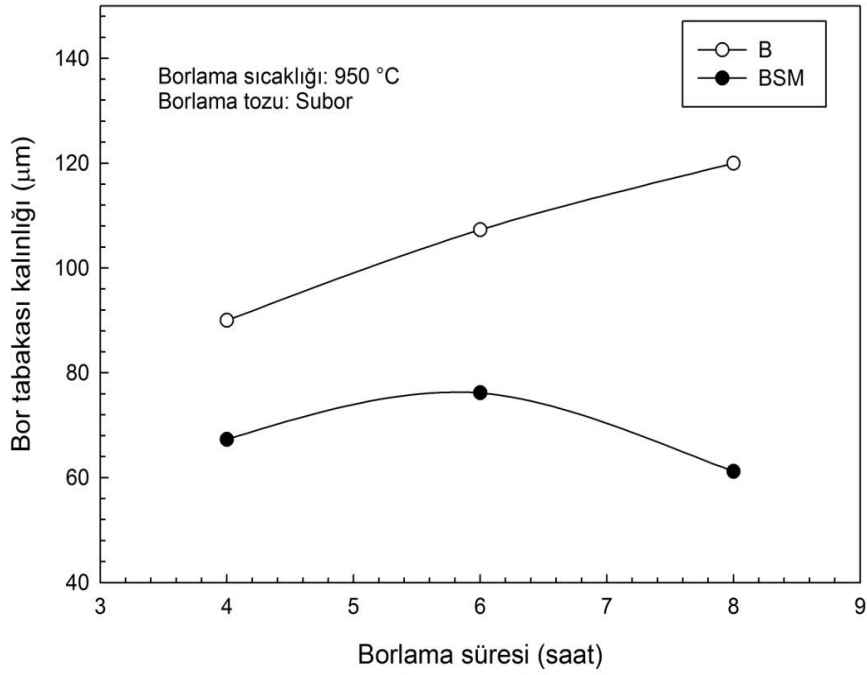
Şekil 3.13. BSM 8 numunesine ait optik mikroskop görüntüsü



Şekil 3.14. BSM 8 numunesine ait SEM görüntüsü

950°C sıcaklıkta yapılan katı borlama işlemi sonucunda borlama süresinin artışının çelik yüzeyinde oluşan borür tabakasını artırdığı görülmüştür. Artan borlama süresi ile oluşan bor tabakası kalınlığının arttığı, 4 saatlik borlama için bu kalınlık yaklaşık 90µm, 6 saat borlama sonucunda 107,3 µm ve 8 saatlik borlama sonrası ise 120 µm olduğu görülmüştür.

Oluşan borür tabakası kalınlıkları BSM4' te 67,3 µm, BSM6' da 76,2 µm ve BSM8' de 61,2 µm olduğu görülmüştür. Borlama süresine bağlı olarak oluşan bor tabakası kalınlığına ilişkin grafik Şekil 3.15.' de verilmiştir.



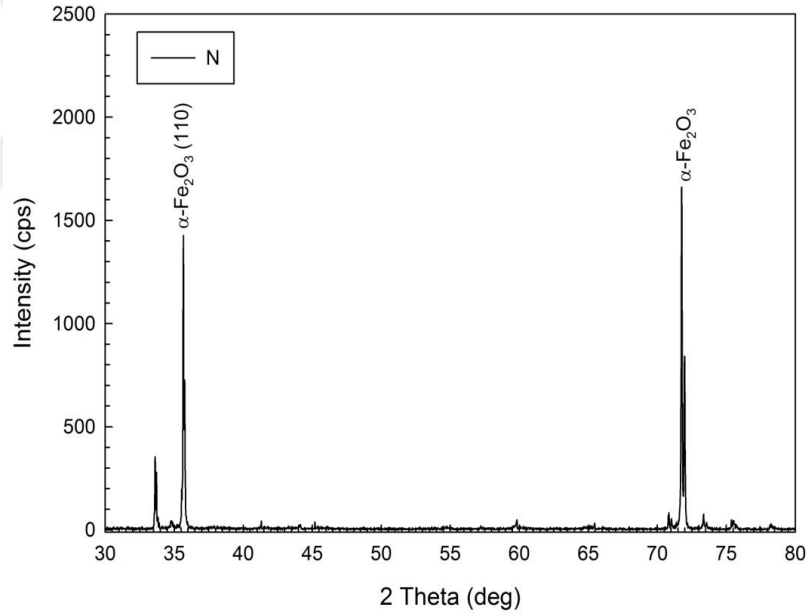
Şekil 3.15. Bor tabakası kalınlığının borlama süresine göre değişimi

Şekil 3.15. incelendiğinde borlama sonunda uygulanan ıslah işlemiyle beraber bor tabakası kalınlığı azalmaktadır. 4-6 saat borlama arasında bor tabakası kalınlığında artış gözlenirken, 6 saat süreden fazla borlama sürelerinde bor tabakası kalınlığı azalmaktadır.

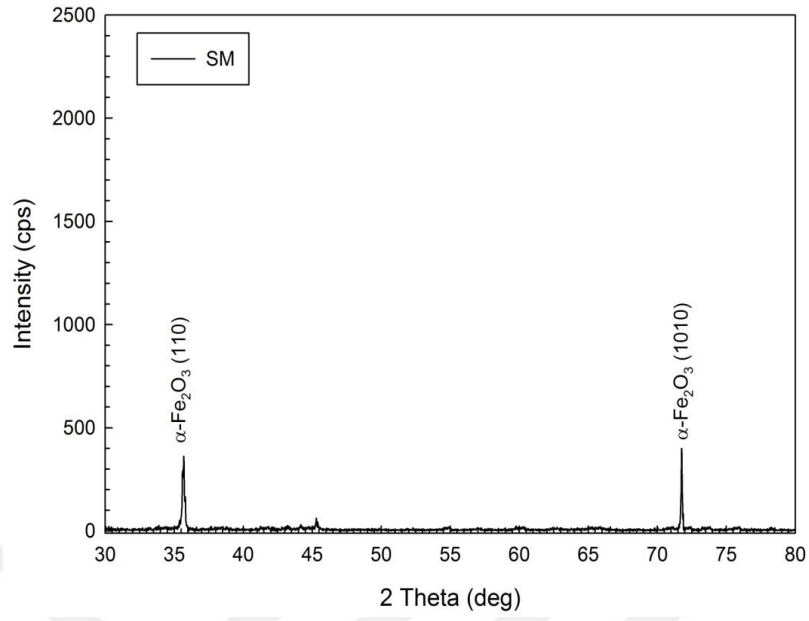
3.2 XRD Sonuçları

Borlama işlemi neticesinde kaplama yüzeyinde oluşan borür yapılarını belirlemek için PHILIPS PW-3710 marka XRD cihazı kullanılmıştır. XRD analizlerinde 40Kv 30mA özelliklerinde bakır katot tercih edilmiştir. Tarama hızı 2.000derece/dk, tarama eksenini olarak 2theta/theta, tarama modu sürekli, örnekleme genişliği ise 0.200 derecedir. Borlama sonucunda oluşan borür tabakasında FeB, Fe₂B, α-Fe₂O₃ bileşiklerinin oluştuğu görülmüştür.

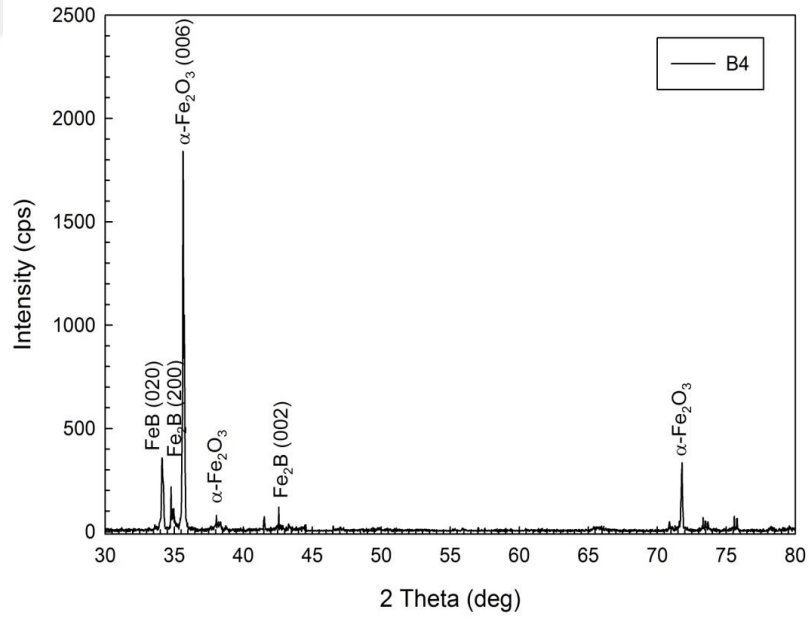
Artan borlamaya bağlı olarak FeB ve Fe₂B bileşiklerinde artış olduğu görülmüştür. 4 saat süreyi aşan borlama sürelerinde Fe₂B fazının FeB' ye dönüşmesinden dolayı FeB fazında artış görülmüştür.



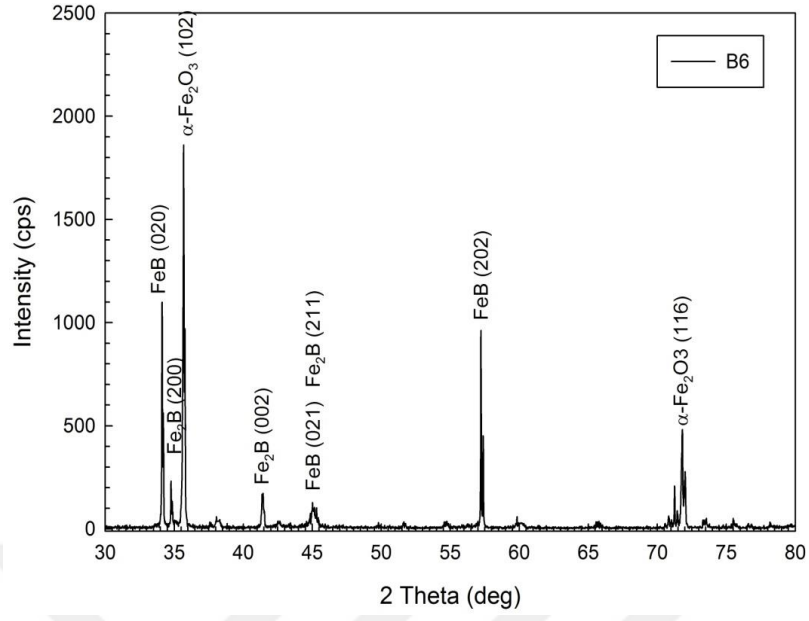
Şekil 3.16. İşlem görmemiş AISI 5140 numunesi X-ışını difraksiyon analizi



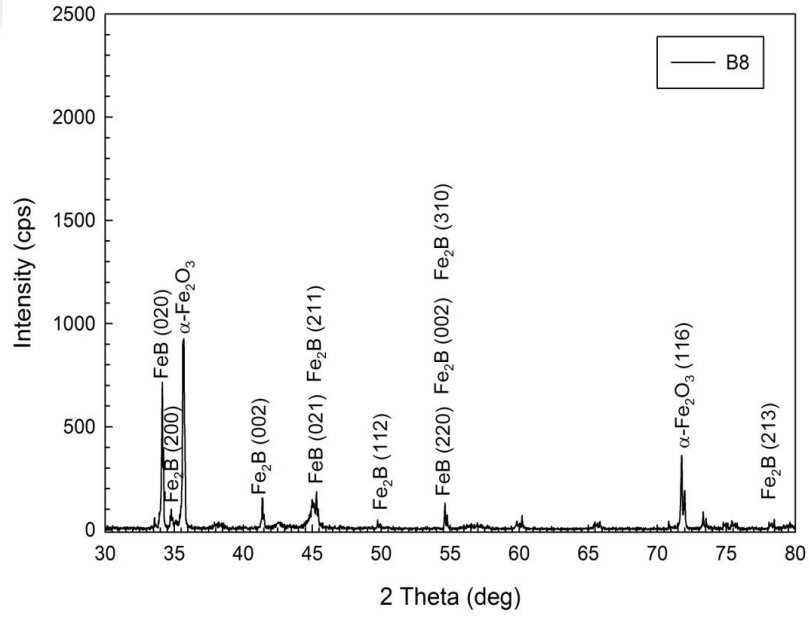
Şekil 3.17. Isıl işlem görmüş AISI 5140 numunesi X-ışını difraksiyon analizi



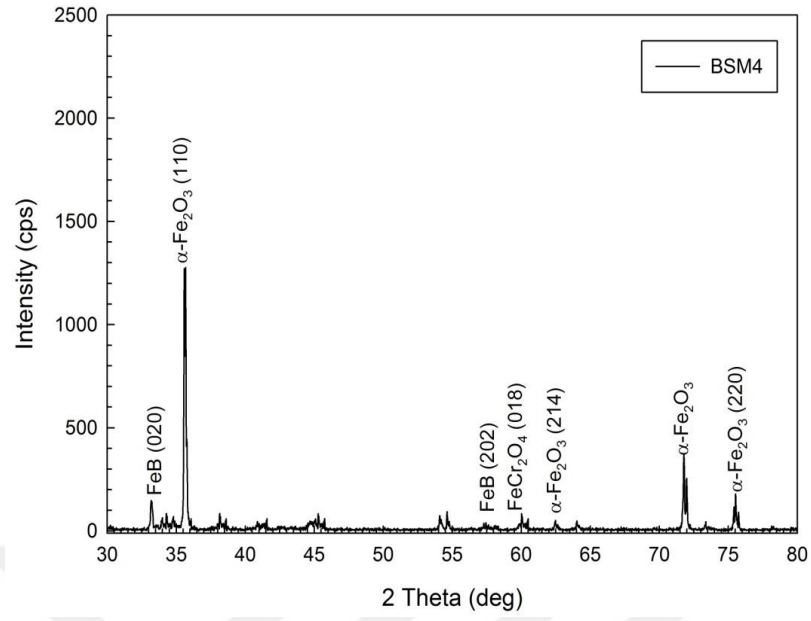
Şekil 3.18. 4 saat borlanmış AISI 5140 numunesi X-ışını difraksiyon analizi



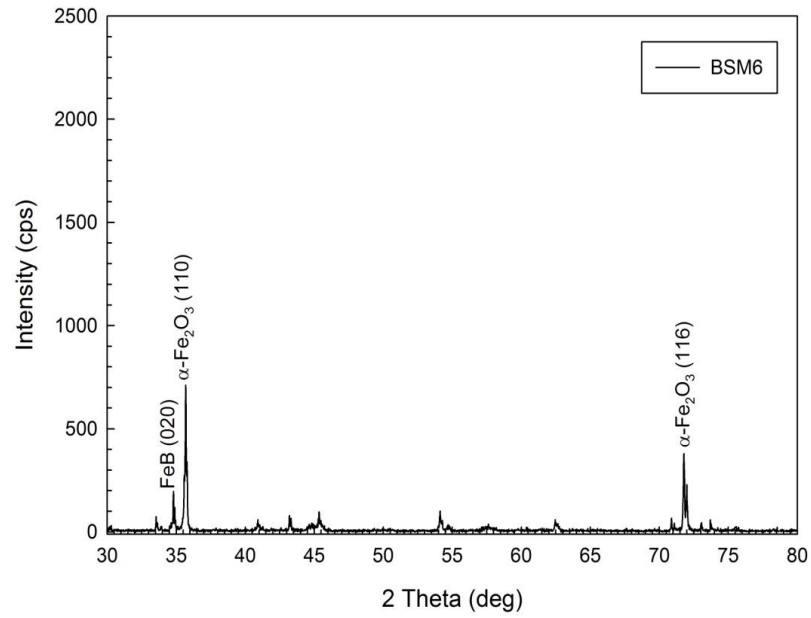
Şekil 3.19. 6 saat borlanmış AISI 5140 numunesi X-ışını difraksiyon analizi



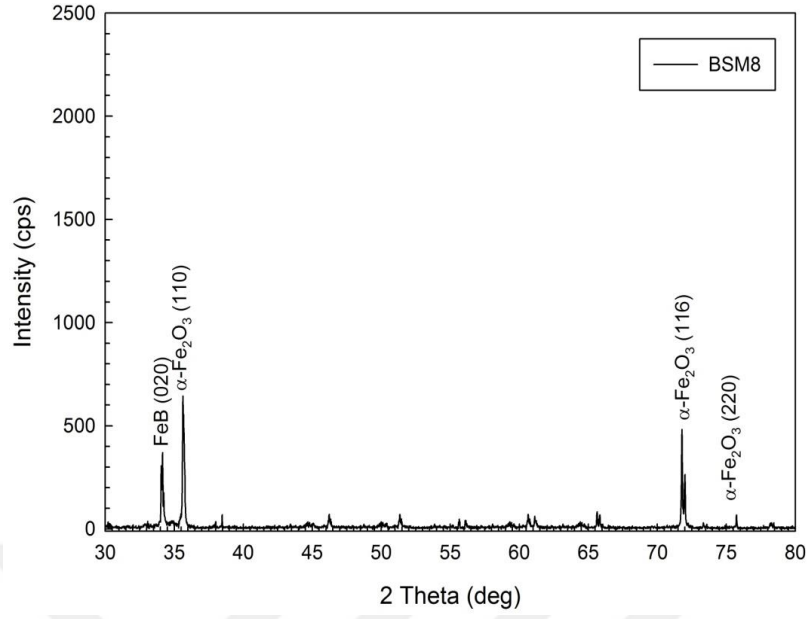
Şekil 3.20.8 saat borlanmış AISI 5140 numunesi X-ışını difraksiyon analizi



Şekil 3.21. 4 saat borlanmış ve ısıl işlem görmüş AISI 5140 numunesi XRD analizi



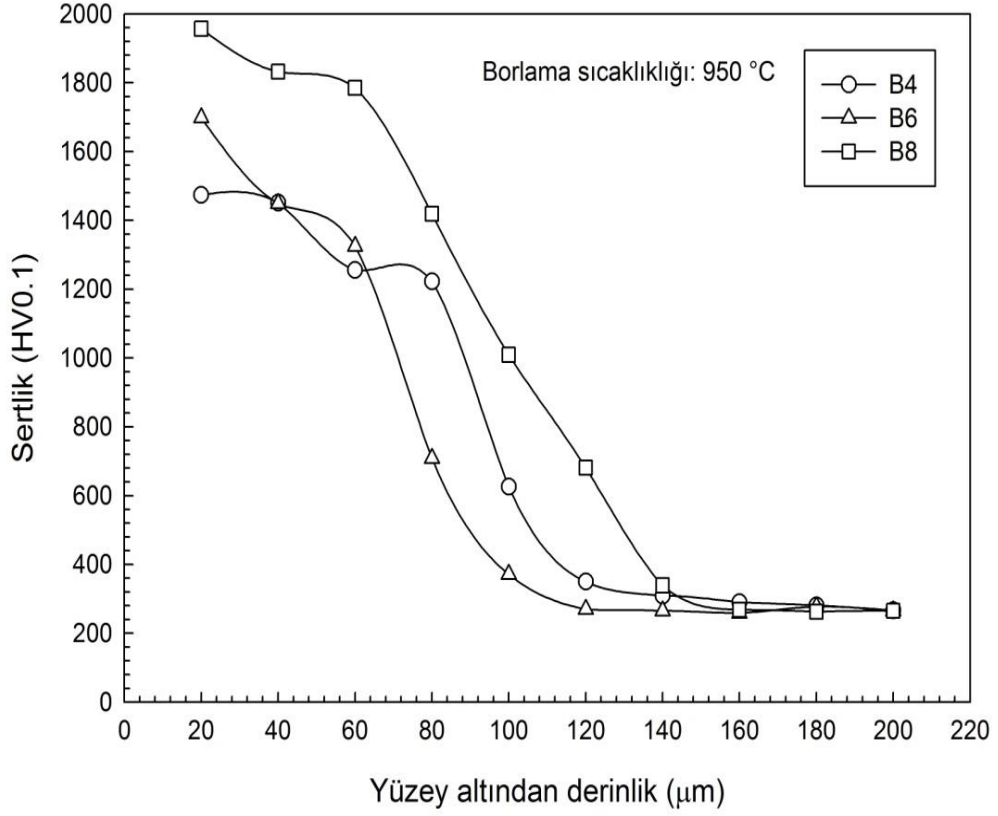
Şekil 3.22. 6 saat borlanmış ve ısıl işlem görmüş AISI 5140 numunesi XRD analizi



Şekil 3.23. 8 saat borlanmış ve ısıl işlem görmüş AISI 5140 numunesi XRD analizi

950°C sıcaklıkta 4, 6 ve 8 saat sürelerde olmak üzere katı borlama uygulanan AISI 5140 çeliği numunelere ait yüzey altında meydana gelen sertlik değişimlerinin yüzey altından derinliğe göre değişimleri Şekil 3.24.' da verilmiştir.

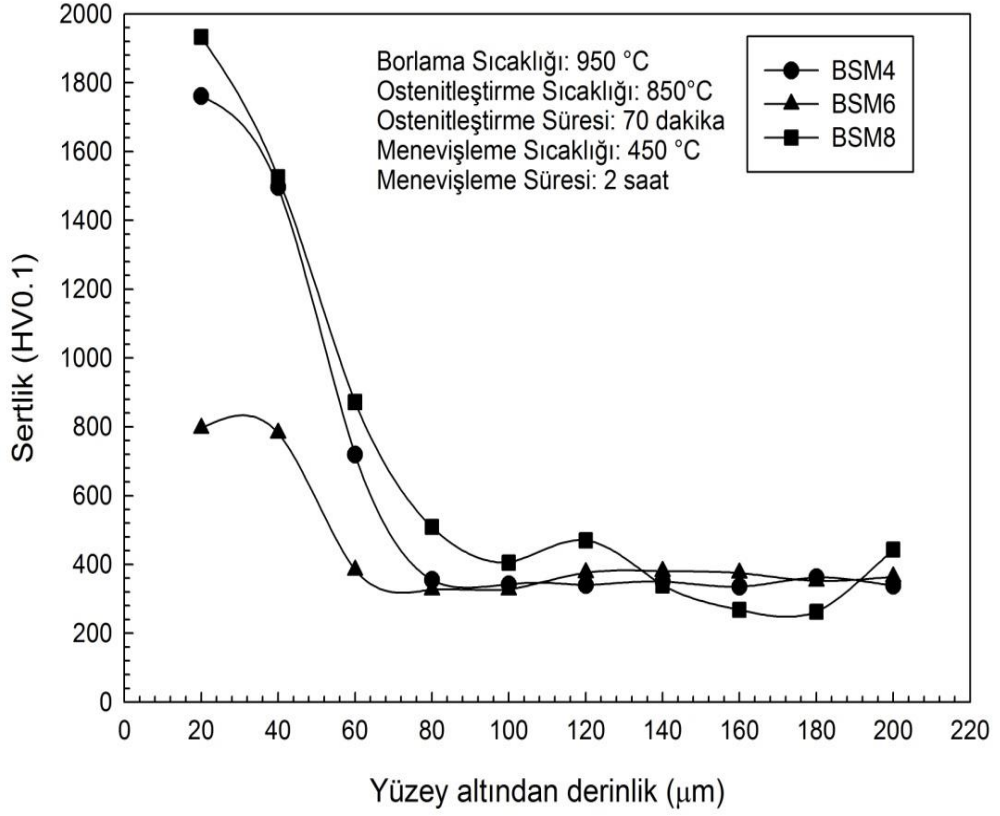
Borlama uygulanan AISI 5140 çeliği numunelerin hiçbir işlem görmeyen AISI 5140 çeliği numunelere göre sertlik değerleri 4-5 kat arttığı görülmüştür. Maksimum sertlik değerleri en yüksek borlama süresi olan 8 saatlik süre sonunda yaklaşık 1840 HV olarak ölçülmüştür. Şekil 3.24. grafiği incelendiğinde borlama neticesinde üç bölgenin oluştuğu görülür. Bor atomlarının difüze olduğu borür bölgesi, bor difüzyonunun azaldığı geçiş bölgesi ve ana matristir.



Şekil 3.24. Borlanmış çeliğin sertliğinin yüze altı mesafesine göre değişimi

AISI 5140 çeliğine uygulanan 4, 6 ve 8 saat borlama ve ardından uygulanan ıslah işlemleri neticesinde numunelere sertlik deneyleri yapılmıştır. Bu işlemler neticesinde sertlik değerlerinin arttığı Şekil 3.25.'de görülmektedir.

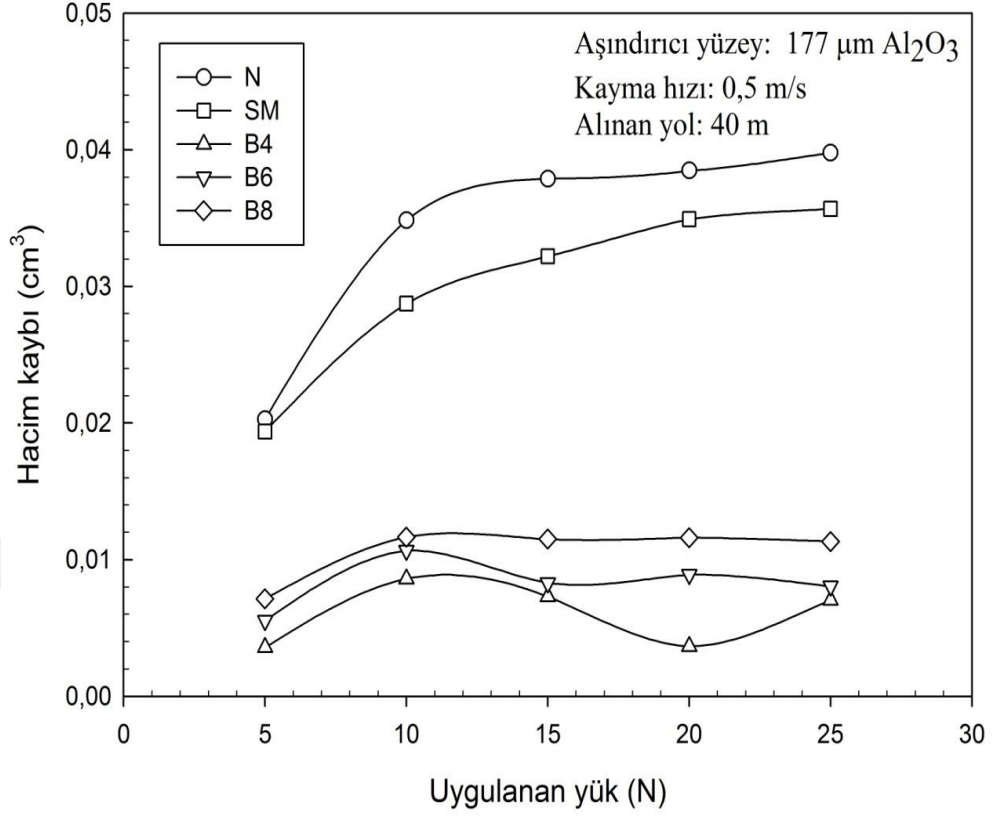
En yüksek sertlik değerleri borlama süresi 8 saat olan numuneye ait olup 1840HV değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Şekil 3.25. incelendiğinde borlama işleminden sonra uygulanan ıslah işleminin geçiş bölgesi kalınlığını azalttığı anlaşılmaktadır. Bu durumdan dolayı sertlik değerlerinde keskin bir düşüş yaşanmıştır.



Şekil 3.25. Borlanmış ve ısıl işlem görmüş çeliğin sertlik-mesafe grafiği

3.3 Aşınma grafikleri

Şekil 3.26.'deki eğrilere bakıldığında ıslah ve borlama işlemlerinin aşınmayı iyileştirdiği görülmektedir.



Şekil 3.26. Aşınmaya tabi tutulan borlanmış AISI 5140 çeliğine uygulanan hacim kaybı- yük grafiği

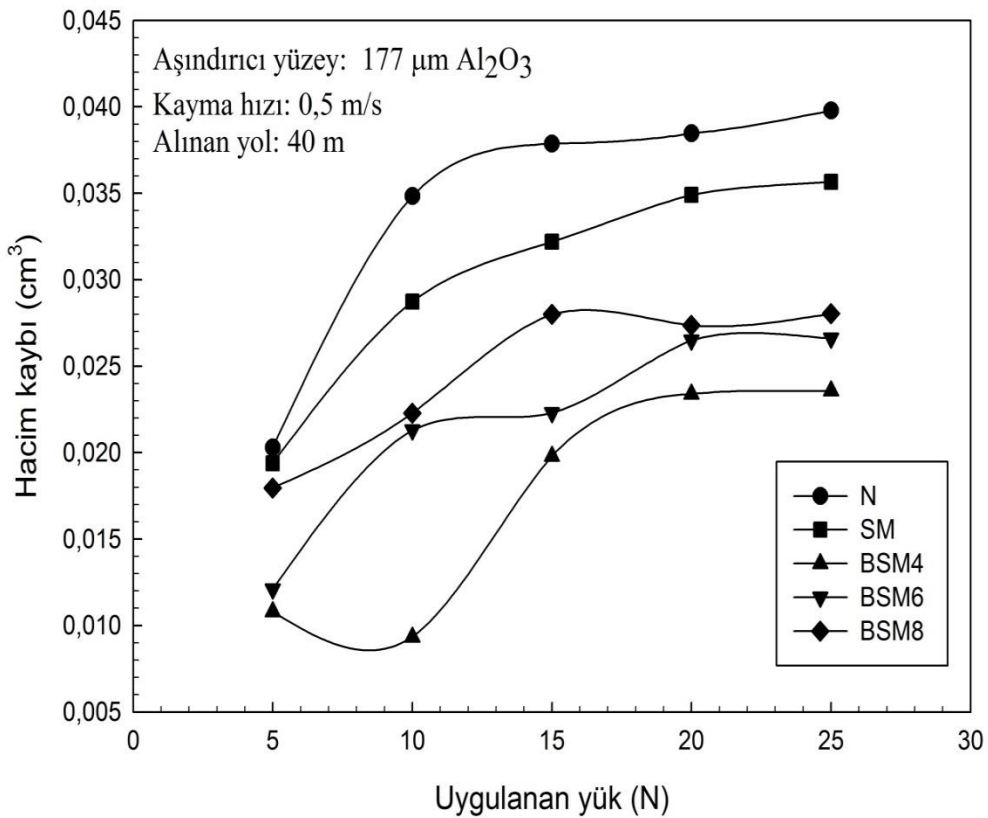
Herhangi bir işlem görmemiş numunede aşınma ile meydana gelen hacim kaybının uygulanan yük ile arttığı gözlenmiştir. Borlama uygulanmayan sadece ıslah edilen numunenin işlem görmemiş numuneye göre daha iyi aşınma davranışı sergilediği belirlenmiştir. Bu durum mekanik özelliklere dayandırılarak açıklanabilir.

Şöyle ki, ıslah edilmiş durumda bulunan çeliğin sertliği işlem görmemiş numuneye göre daha yüksektir. Bilindiği gibi sertlik arttıkça aşınma direnci iyileşmektedir. Borlanmış AISI 5140 çeliği numuneler incelendiğinde ise aşınma direncinin herhangi bir işlem görmeyen AISI 5140 çeliği numuneye göre yaklaşık 4 kat daha arttığı belirlenmiştir.

En iyi aşınma direnci 950°C de 4 saatlik borlama uygulanan numunede görülmüştür. Borlama süresi arttıkça aşınma direncinin kötüleştiği belirlenmiştir.

Bu durumun nedeni borlama esnasında oluşan kırılkan ve sert bir faz olan FeB yapısı ile açıklanabilir. Şöyle ki, artan borlama süresiyle FeB fazının yapı içerisindeki miktarının arttığı XRD analizleriyle tespit edilmiştir. Bu FeB fazını gevrek ve kırılkan bir faz olduğu bilinmektedir. Gevrek ve kırılkan inter metalik bu faz abraziv aşınmaya yol açarak aşınma direncini kötüleştirmektedir.

Şekil 3.27.'deki eğriler incelendiğinde; borlama ile birlikte uygulanan ıslah işleminin aşınma direncini artırdığı görülmektedir



Şekil 3.27. Aşınmaya tabi tutulan borlanmış ve ısıl işlem görmüş SAE 5140 çeliğine uygulanan yük-hacim kaybı grafiği

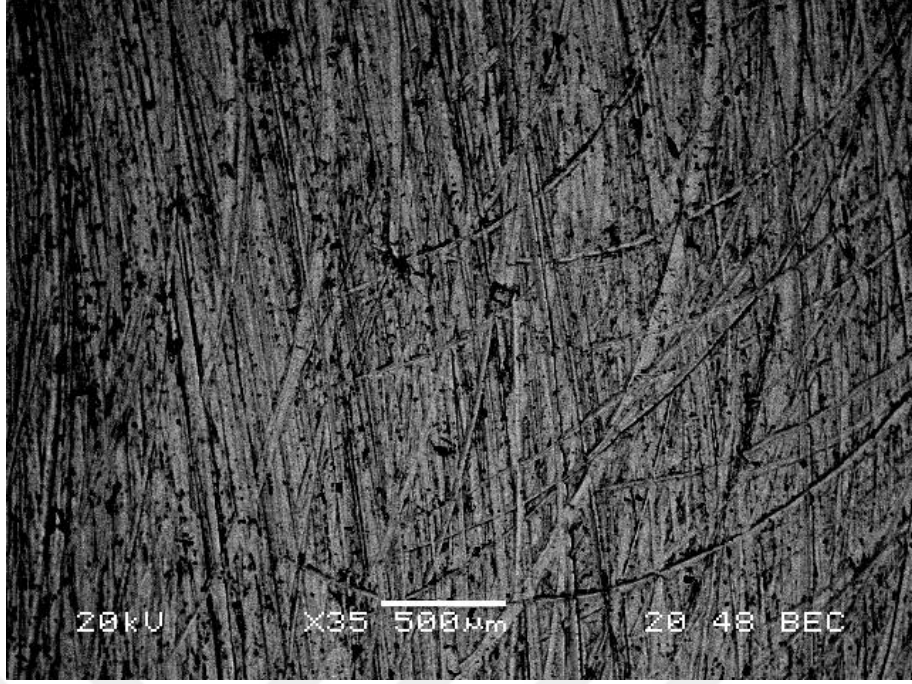
Yalnız ısıtma işlemi uygulanan numunelerin ise borlama ve ıslah işlemleri uygulanan numunelere göre daha kötü aşınma davranışı sergilediği belirlenmiştir. Şekil 3.27.'deki eğriler incelendiğinde borlama ve ıslah işlemine tabi tutulan numunelerdeki en iyi aşınma direncini 950°C' de 4 saat borlanmış numunenin gösterdiği anlaşılmıştır.

Özet olarak AISI 5140 çeliğine uygulanan ısıtma işlemi, borlama, borlama ve ıslah işlemlerinin uygulanması aşınma direncini artırmaktadır. Her durumda hiçbir işlem görmeyen AISI 5140 çeliğinin aşınma direnci artmıştır. En iyi aşınma direncinin 950 °C'de 4 saat borlama işlemine tabi tutulmuş numune olduğu tespit edilmiştir. Borlama sonrası uygulanan ıslah işleminin aşınma direncini sadece borlanmış duruma göre kötüleştirdiği belirlenmiştir.

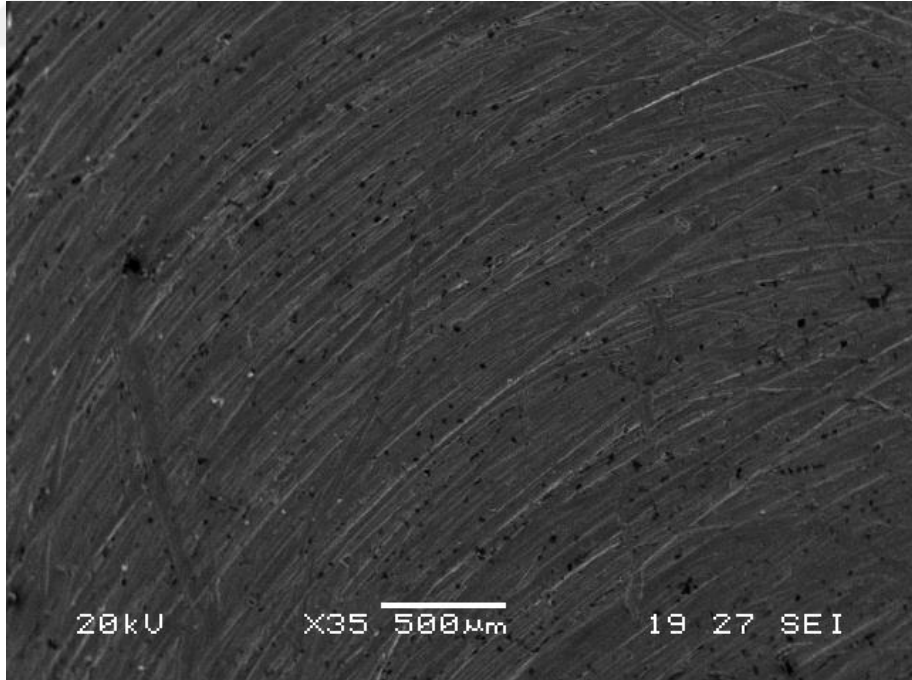
Bu durumun nedeni hem ıslah işleminin borür tabakasının kalınlığını azaltması hem de borür tabakasını kısmi dağıtmasıdır. Ayrıca ıslah işleminin Fe₂B fazını FeB fazına dönüştürmesinden kaynaklanmaktadır.

3.4 Aşınma Yüzey Sonuçları

950°C'de 4, 6 ve 8 saatlik katı borlamaya tabi tutulan AISI 5140 çeliği numunelere ve herhangi bir işlem görmeyen AISI 5140 çeliği numunelere 15N ve 25N'luk yükler altında 177µm'lik Al₂O₃ aşındırıcı yüzeyde 0,5m/s kayma hızında ve 40m mesafede abraziv aşınma testi uygulanmıştır. Aşınma testine tabi tutulan numunelere ait SEM görüntüleri Şekil 3.28. – 3.35. arasında verilmiştir.

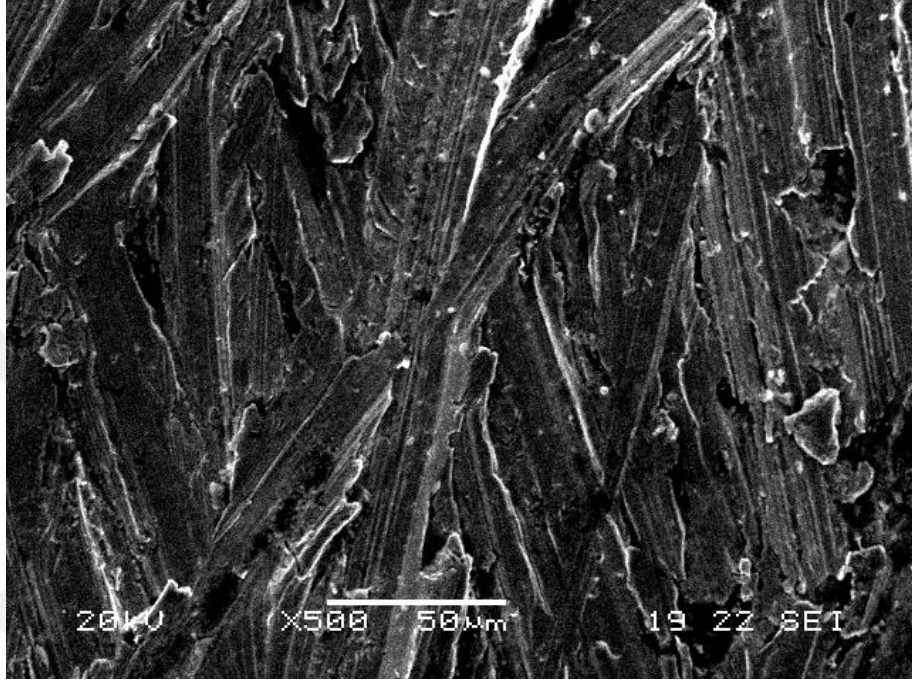


Şekil 3.28. N 15N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü

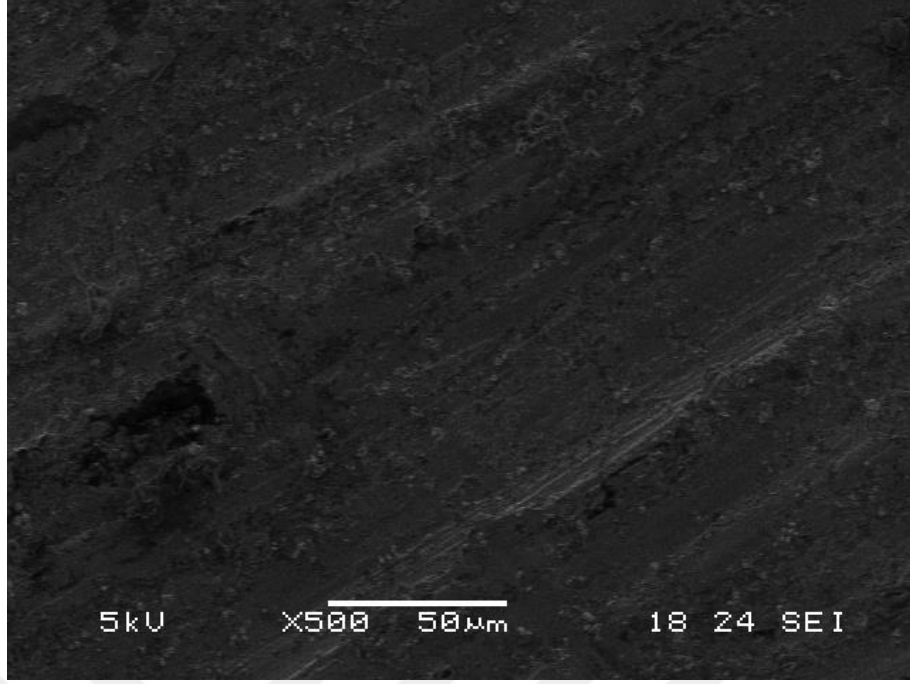


Şekil 3.29. N 25N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü

Herhangi bir işlem görmeyen AISI 5140 çeliği numunelerin aşınma davranışı incelendiğinde artan kuvvetle aşınma miktarının arttığı tespit edilmiştir. 25N' luk kuvvet altında gerçekleştirilen aşınma testinde numune yüzeyinde oluşan çiziklerin arttığı ve derinleştiği belirlenmiştir.



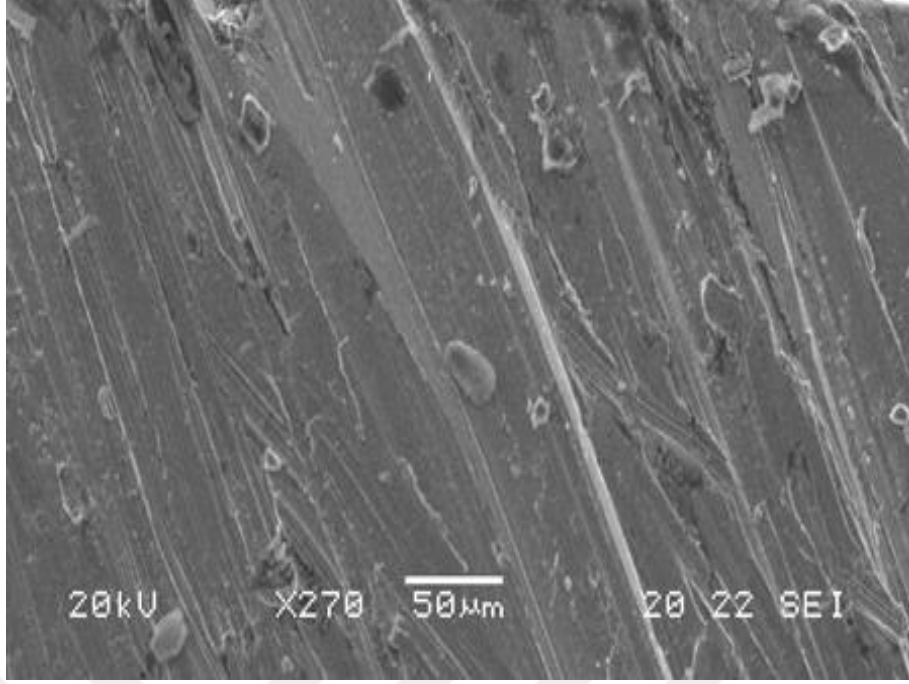
Şekil 3.30. B4 15N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü



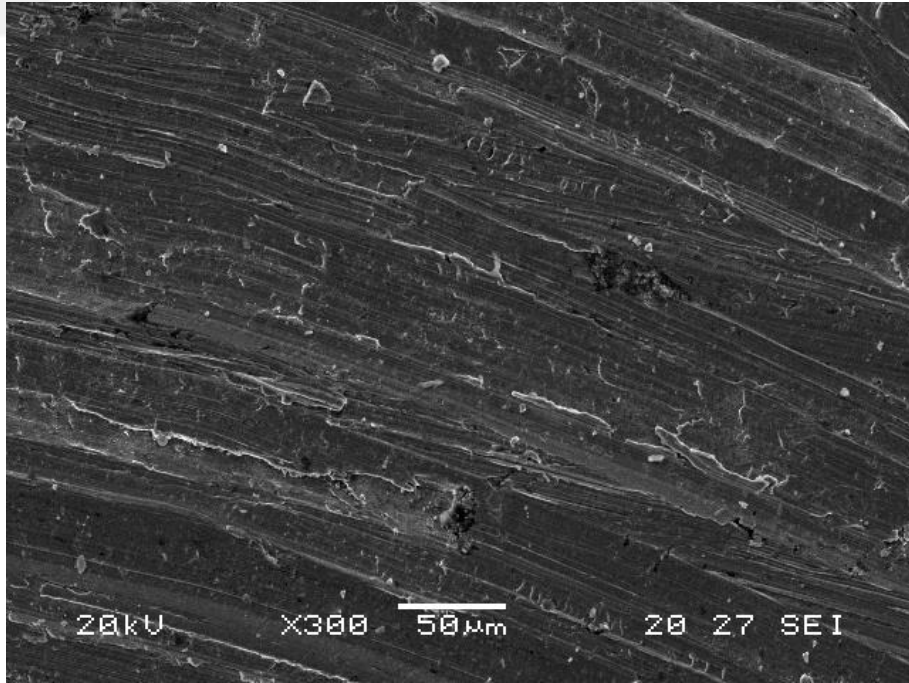
Şekil 3.31. B4 25N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü

4 saat borlanmış numunede 25N kuvvet altında gerçekleştirilen aşınmanın küçük bir miktar düştüğü belirlenmiştir. Böyle olmakla birlikte iki kuvvetle gerçekleştirilen aşınma sonuçlarında yaklaşık olarak aynı miktarda aşınmanın gerçekleştiği söylenebilir. Şöyle ki aşınma testi sırasında uygulanan 15 ve 25 N' luk yük bor tabakasını tamamen kaldırmamaktadır. Bu durum ise aşınma direncinin yüksek kalmasında temel etkindir.

Şekil 3.32. ve Şekil 3.33.' de 6 saat borlanmış AISI 5140 çeliği 15-25 N yük altında gerçekleştirilen aşınma sonucu yüzey görüntüleri verilmiştir.

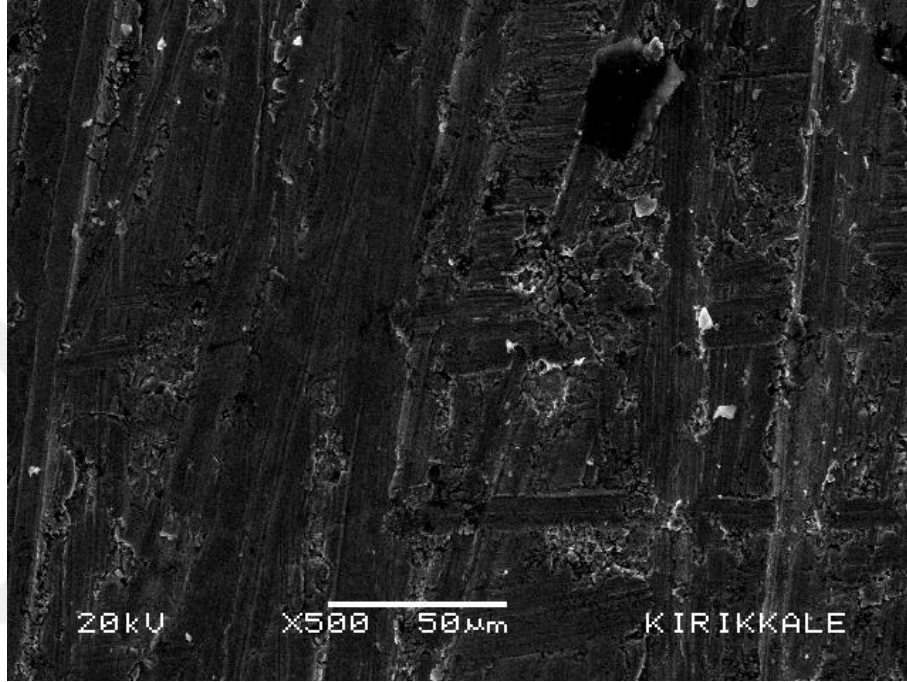


Şekil 3.32. B6 15N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü



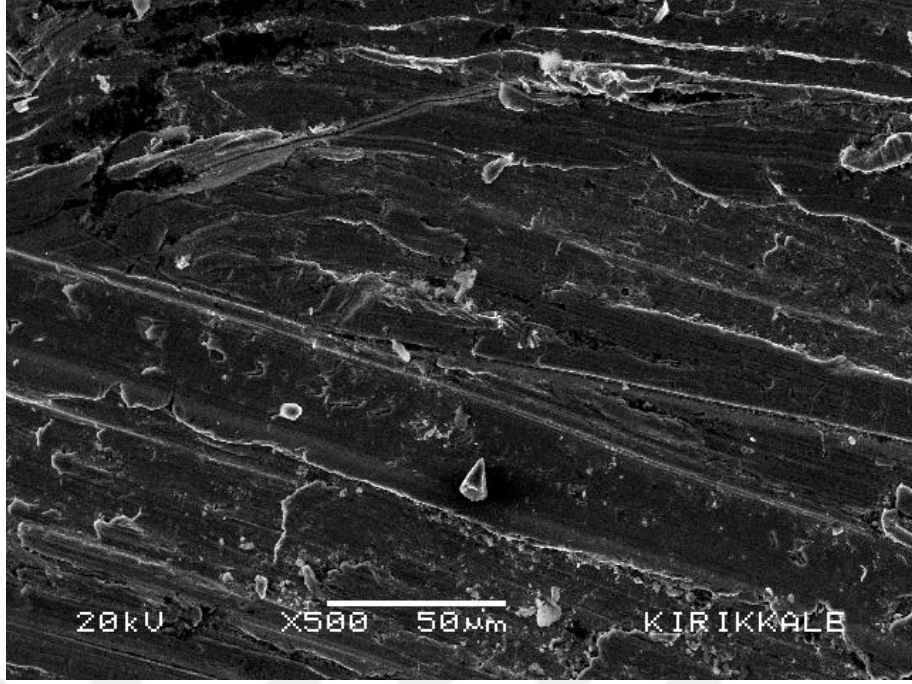
Şekil 3.33. B6 25N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü

6 saat borlama sonucu AISI 5140 çeliği aşınma direnci 15-25 N' luk yükler altında yakın sonuçlar vermiştir. Borlama sonucu artan borür kalınlığı artan yüke rağmen borür tabakasını kaldırmadığı için aşınmada iyileşme görülmüştür. Ancak yapının FeB' ye dönüşmeye başlaması ise aşınma direncini kötü etkilemiştir.



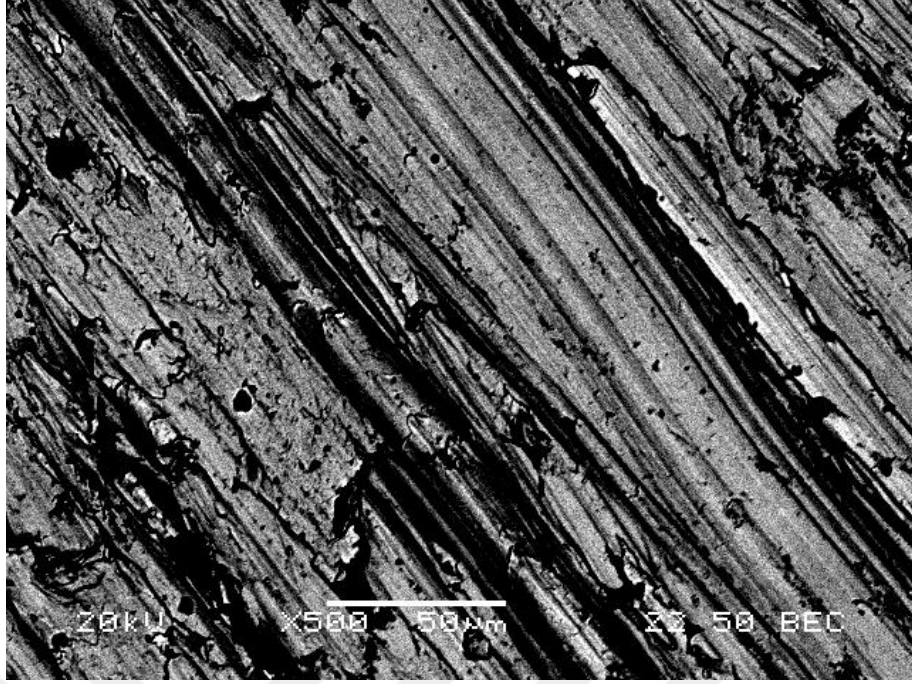
Şekil 3.34. B8 15N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü

8 saat borlama sonucunda AISI 5140 çeliği yüzeyinde maksimum bor tabakası oluşmasına rağmen Fe₂B' nin FeB' ye dönüşmesi aşınma direncini 4 ve 6 saat borlanan numunelere oranla düşürmüştür. Buna rağmen borlama kalınlığının yüksek olmasından dolayı 15-25N' luk yükler altında gerçekleştirilen testlerde borür tabakası tamamen aşınmamıştır. Bu nedenle iki kuvvetle uygulanan testlerde de benzer aşınma davranışları görülmektedir.

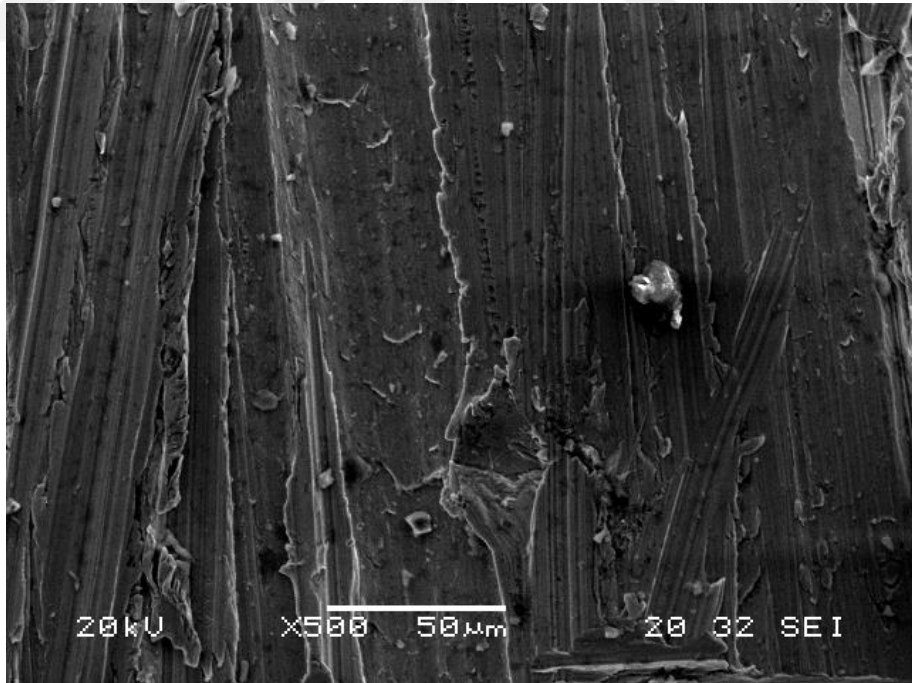


Şekil 3.35. B8 25N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü

Islah işlemi uygulanmış numunelere 15 ve 25 N' luk yükler altında abraziv aşınma sonucu yüzeyde oluşan SEM görüntüleri Şekil 3.26. - 3.27. arasında verilmiştir. 15N ve 25N'luk yüklerde yüzey üzerinde sıvama olduğu görülmüştür. 25 N' luk yük altında gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda yüzeyde oluşan çiziklerin sayısında ve çizik derinliğinde artış görülmüştür. Islah işlemine tabi tutulan numunelerin yüzeyinde artan kuvvetle birlikte aşınmanın arttığı belirlenmiştir.

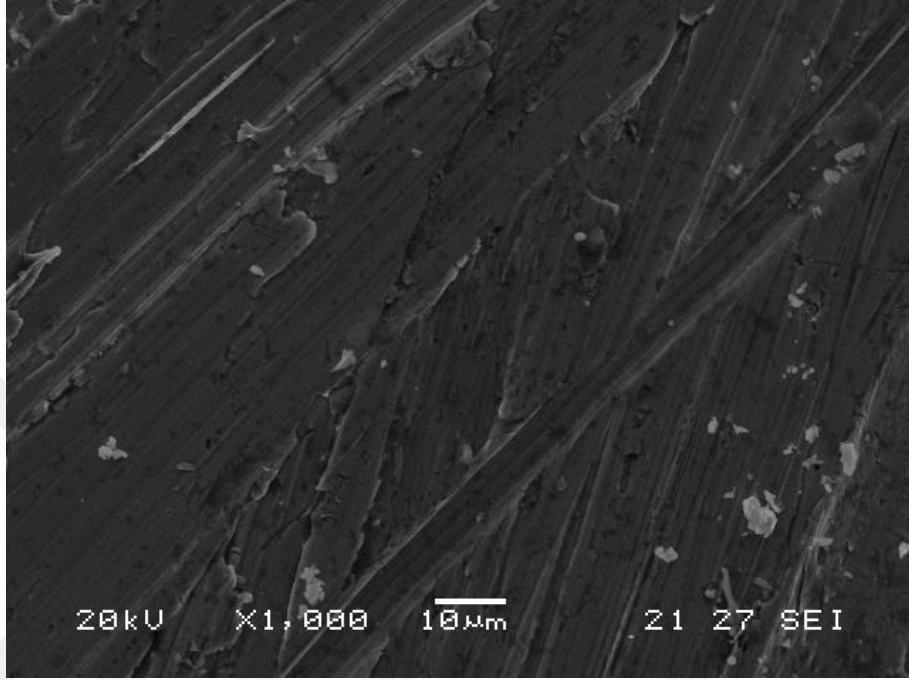


Şekil 3.36. SM 15 N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü

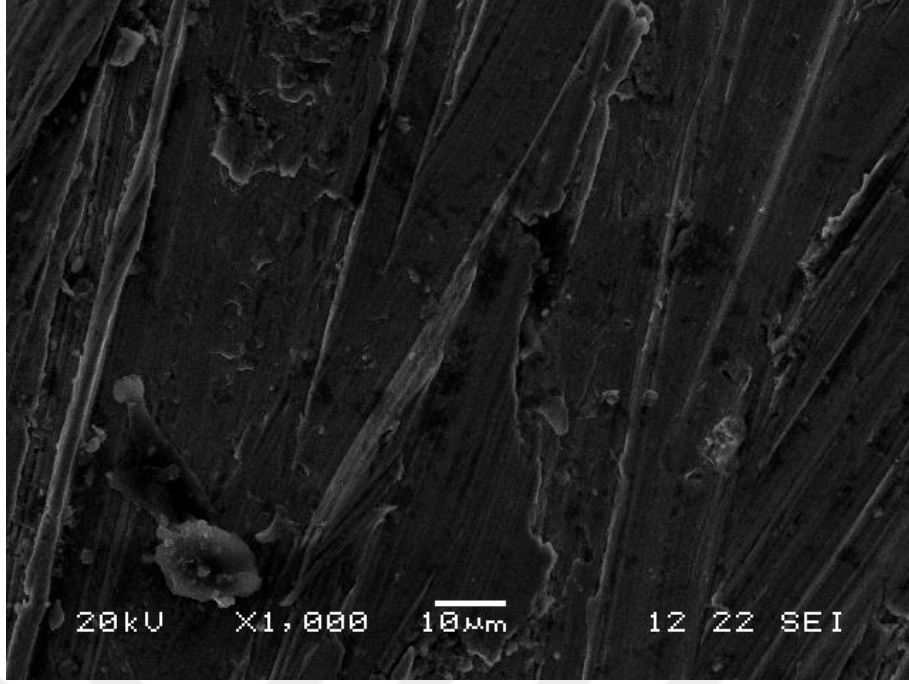


Şekil 3.37. SM 25N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü

4,6 ve 8 saat borlanan ve ıslah işlemine tabi tutulan numunelere 15-25N' luk kuvvetler altında aşınma testi uygulanan numunelerin aşınma yüzeyleri SEM görüntüleri Şekil 3.38. - 3.43. arasında verilmiştir.

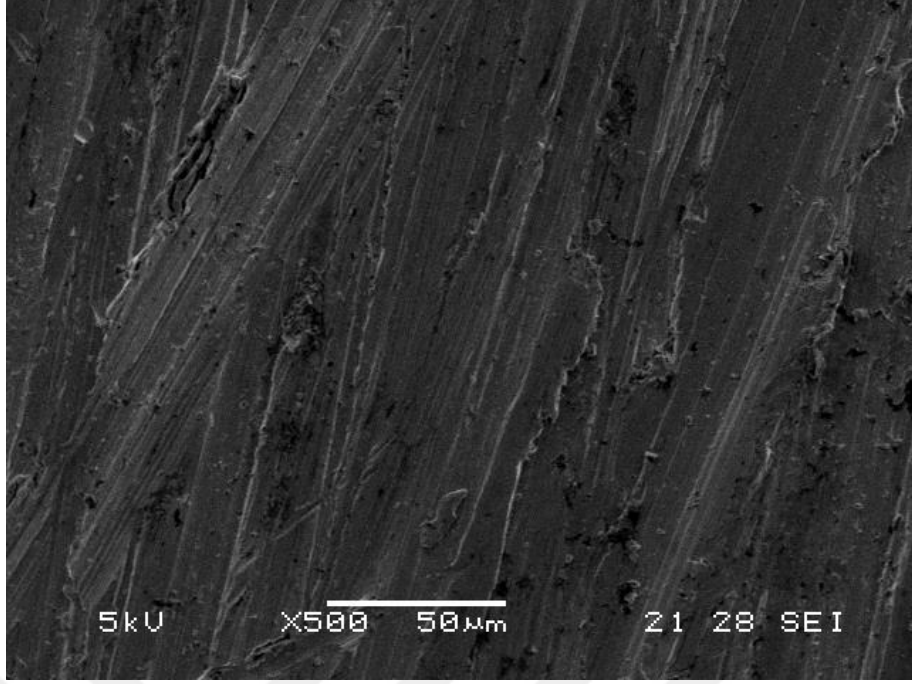


Şekil 3.38. BSM4 15N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü

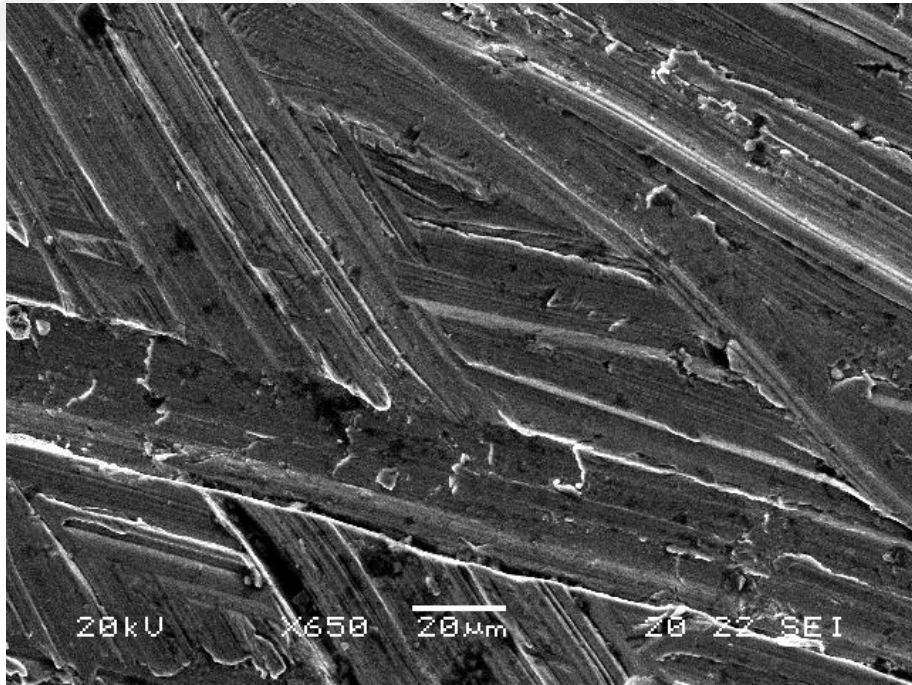


Şekil 3.39. BSM4 25N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü

4 saat borlanmış, ıslah işlemine tabi tutulmuş numunelerden 25N' luk kuvvet altında gerçekleştirilen aşınma yüzeyinde oluşan çizik sayısı fazladır. Yükün artışıyla numune yüzeyinde meydana gelen aşınma miktarının arttığı belirlenmiştir. Bu nedenle numune yüzeyinde meydana gelen çiziklerin derinleştiği anlaşılmıştır.

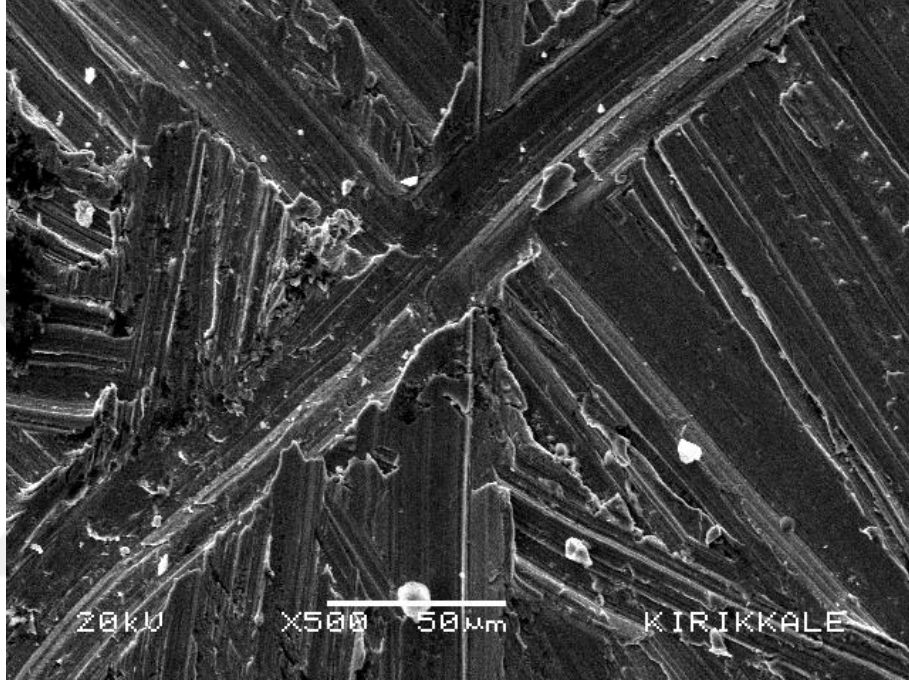


Şekil 3.40. BSM6 15N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü

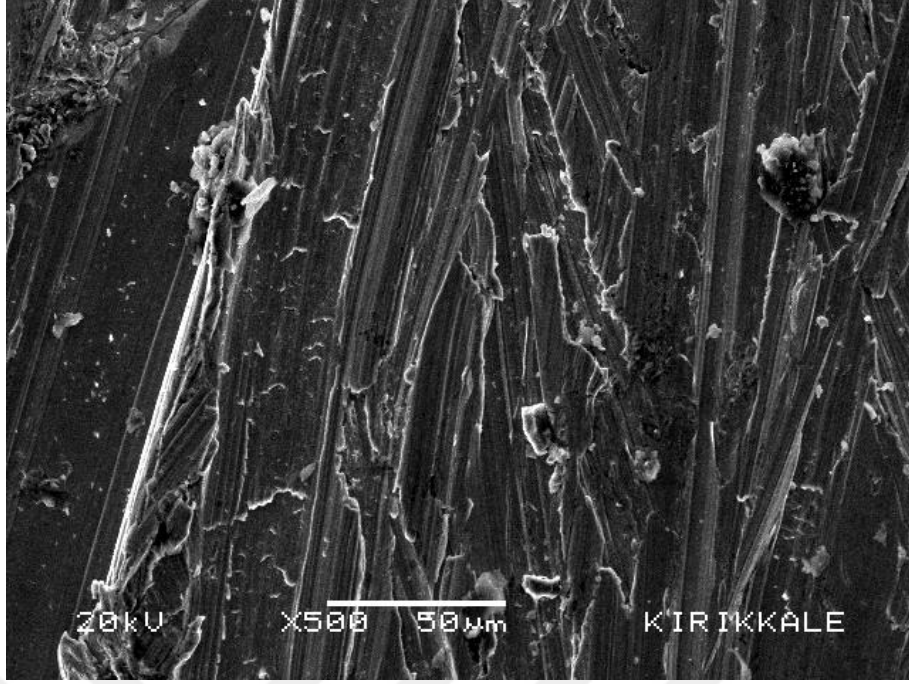


Şekil 3.41. BSM6 25N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü

6 saat borlanmış ve ıslah işlemine tabi tutulmuş numunelerin yüzeyleri incelendiğinde 25N kuvvet altında gerçekleştirilen aşınma testinde numune yüzeyinde oluşan çiziklerin hem sayısı hem derinliğinde artış gözlemlenmiştir. Bu durum ıslah işlemi ile azalan borür tabakasına bağlanabilir. Aşınmaya karşı dirençli borür tabakasının azalması artan yükte beraber aşınma direncini azaltmaktadır.



Şekil 3.42. BSM8 15N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü



Şekil 3.43. BSM8 25N numunesi yüzey aşınma SEM görüntüsü

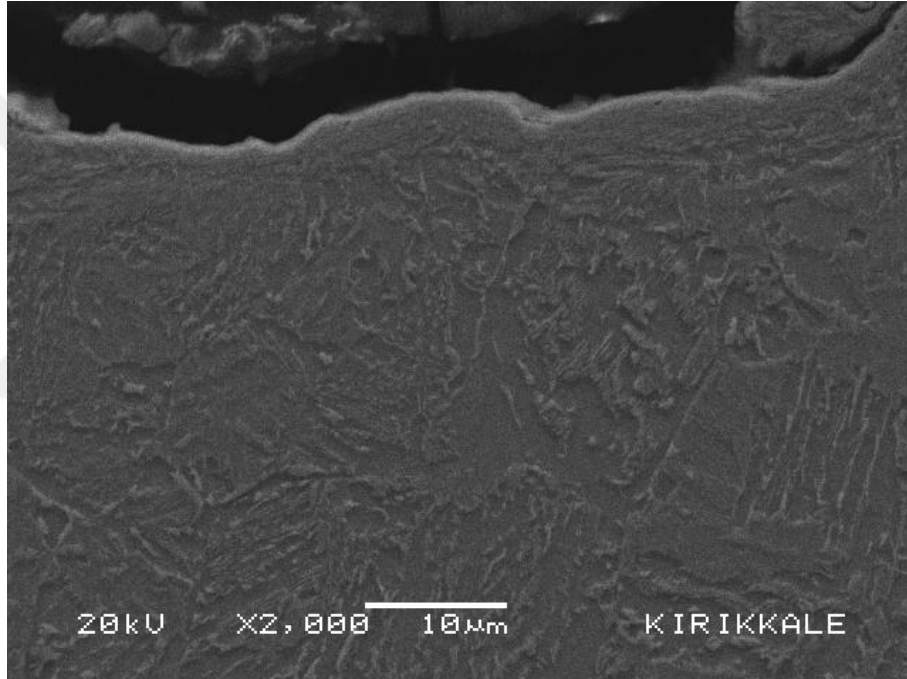
Şekil 3.43. ve Şekil 3.44. incelendiğinde 8 saat borlama işlemiyle yapının FeB' ye dönüşmesi ve ıslah işleminin borür tabakasını küçültmesi aşınma direncini olumsuz etkilemiştir. Artan yükte beraber numune yüzeyinde oluşan çizik ve aşınma artmıştır.

3.5 Aşınma Yüzey Altı Sonuçları

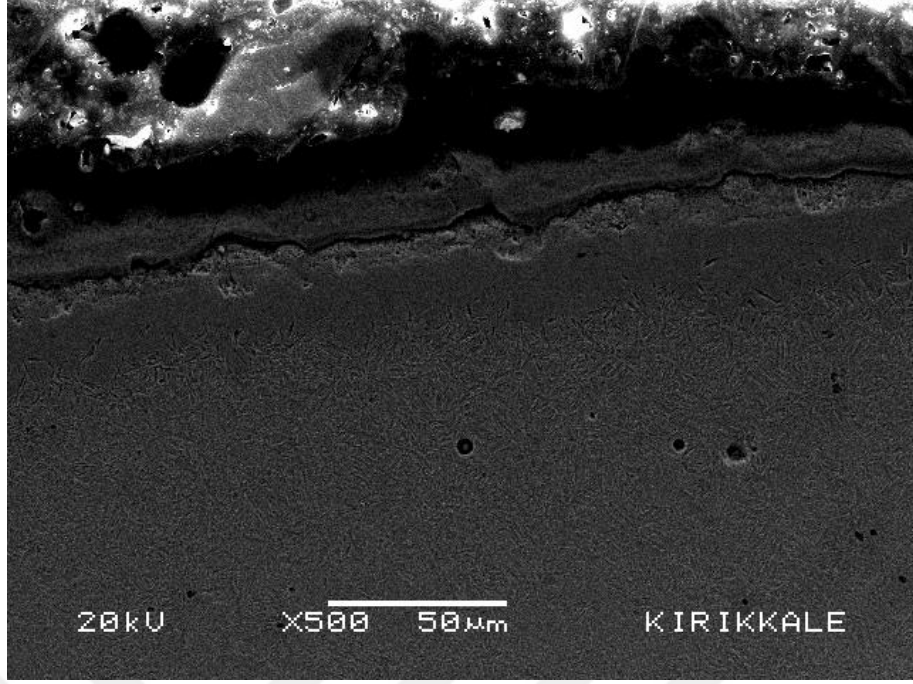
Farklı sürelerde borlanmış numunelerin 5 ve 25 N yük altında aşınma davranışlarını belirlemek amacıyla kayma yönüne paralel kesitlerinin yüzey altı aşınma fotoğrafları Şekil 3.44.- 3.50. arasında verilmiştir. İşlem görmemiş çelik numunenin yüzey altında mekanik olarak aşırı deforme olmuş bir bölge gözlemlendi. Bu bölgenin kalınlığının ortalama 5 µm olduğu belirlendi. Paralel kesit incelendiğinde yüzeyin dalgalı bir profile sahip olduğu ve yüzeyden kopmaların olduğu gözlemlendi.

5N yük altında aşınma deneyine tabi tutulmuş borlanmış numunelerin yüzey altı incelendiğinde yüzeydeki bor tabakasının aşınma öncesine göre oldukça azaldığı belirlendi.

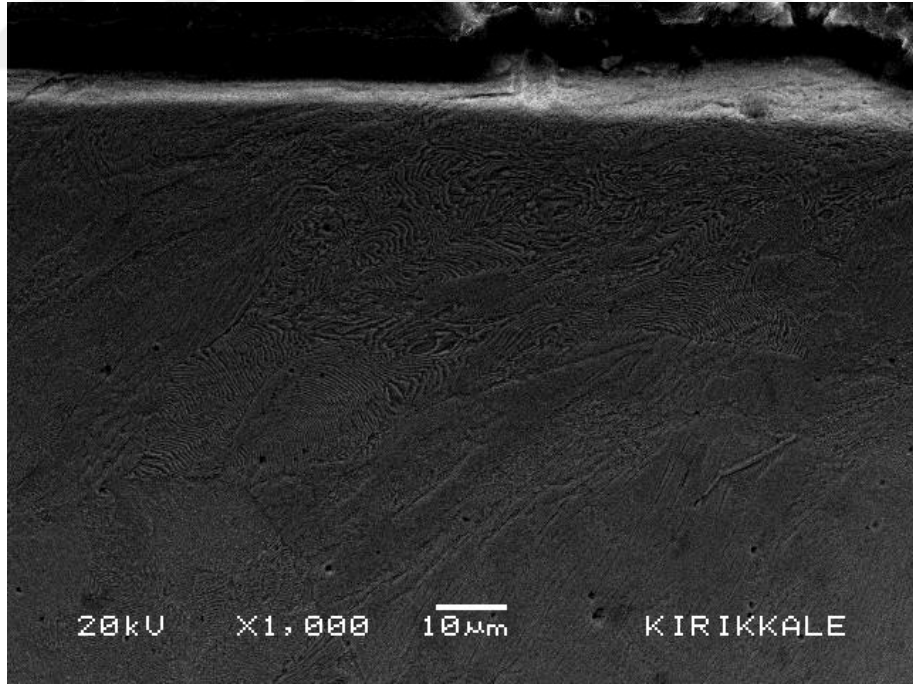
Bu bor tabakasının hemen altında aşınma yönüne paralel kayma çizgileri gözlemlendi. 25 N yük altında oluşan yüzey altı deformasyonlarına bakıldığında yüzeydeki bor tabakasının tamamen kalktığı belirlendi. Özellikle B6 ve B8 kodlu numunelerde yüzey altı çatlaklarının oluştuğu belirlendi.



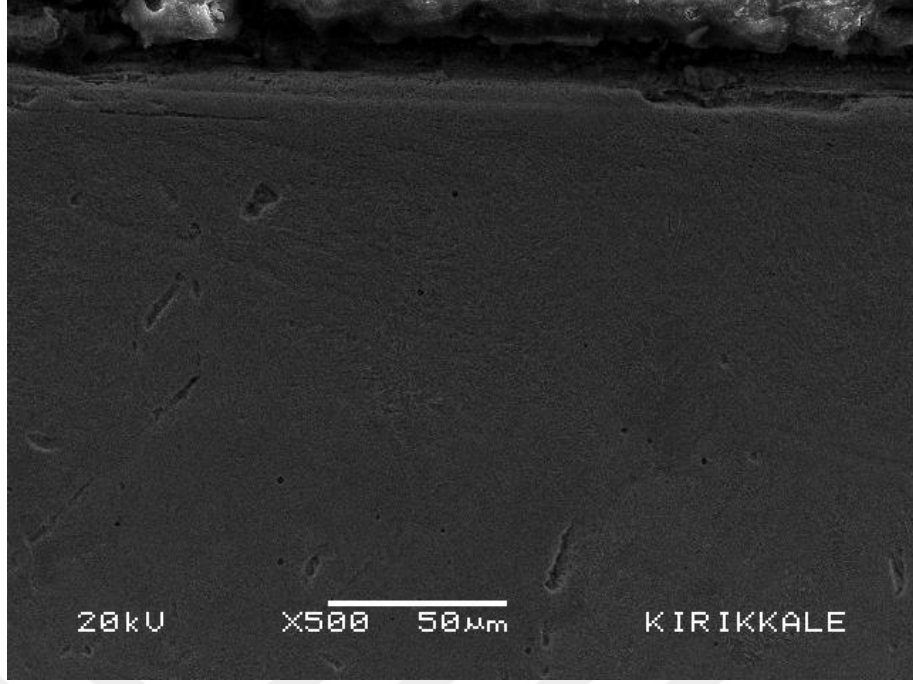
Şekil 3.44. N 5N yüzey altı SEM görüntüsü



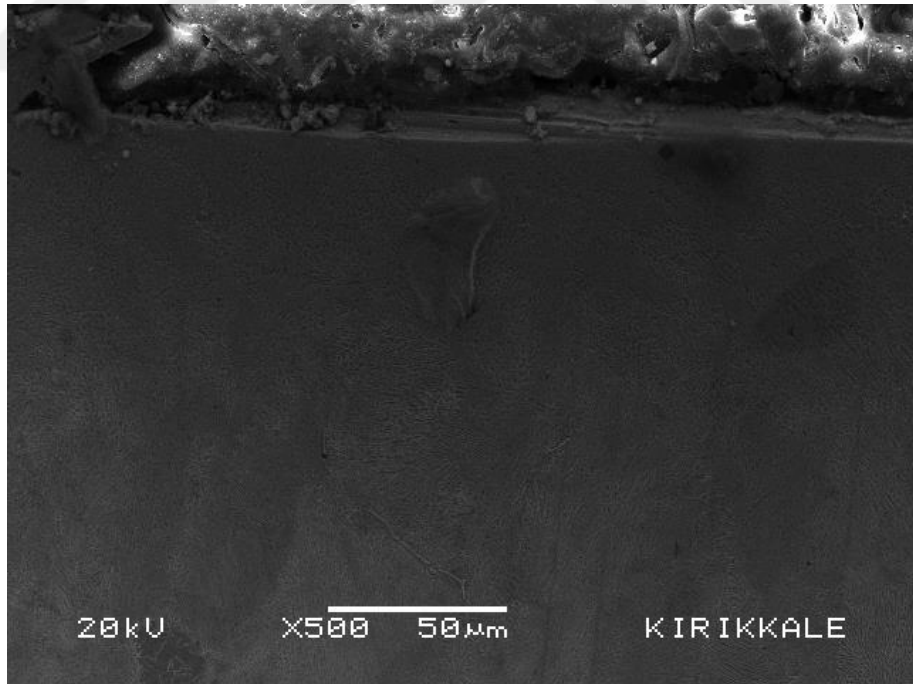
Şekil 3.45. B4 5N Yüzey altı SEM görüntüsü



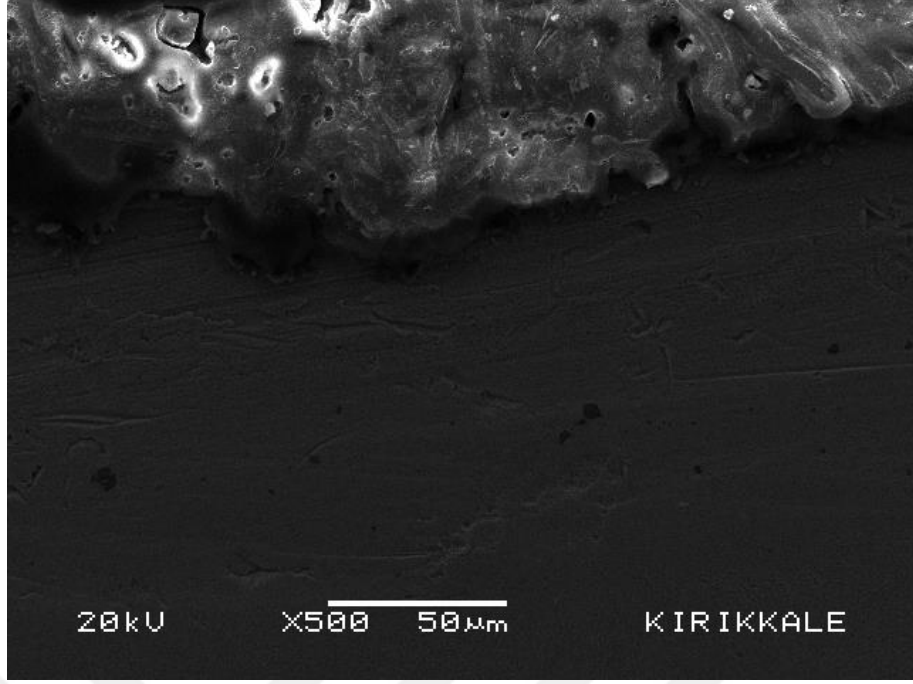
Şekil 3.46. B6 5N Yüzey altı SEM görüntüsü



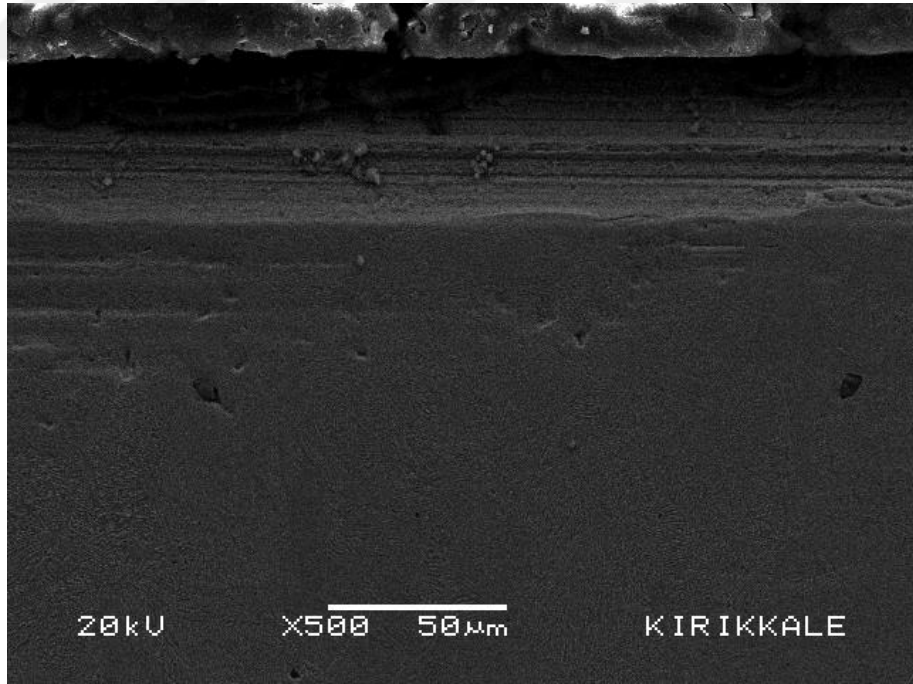
Şekil 3.47. B8 5N Yüzey altı SEM görüntüsü



Şekil 3.48. B4 25N Yüzey altı SEM görüntüsü

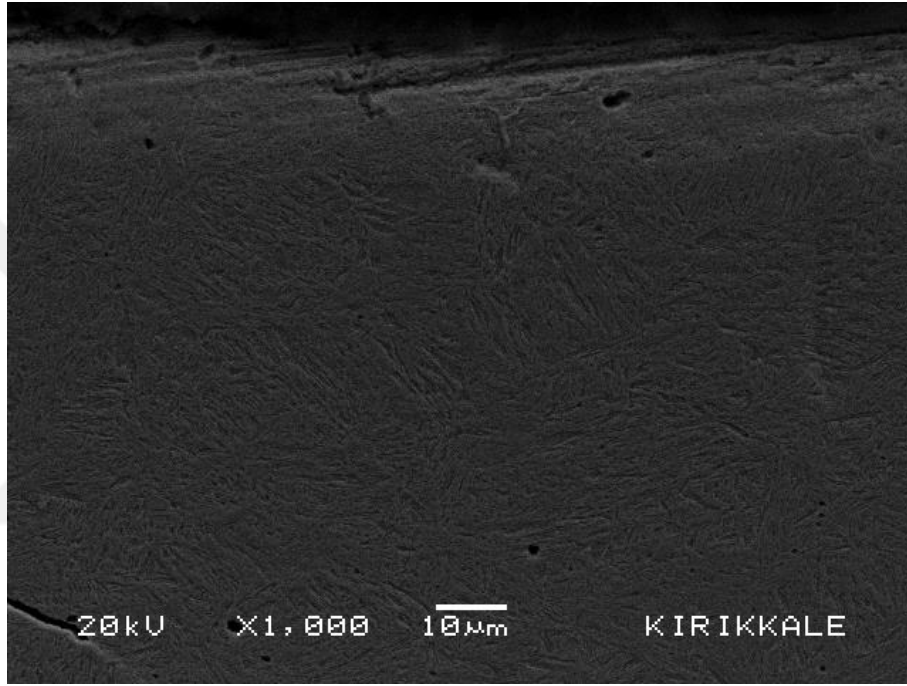


Şekil 3.49. B6 25N Yüzey altı SEM görüntüsü

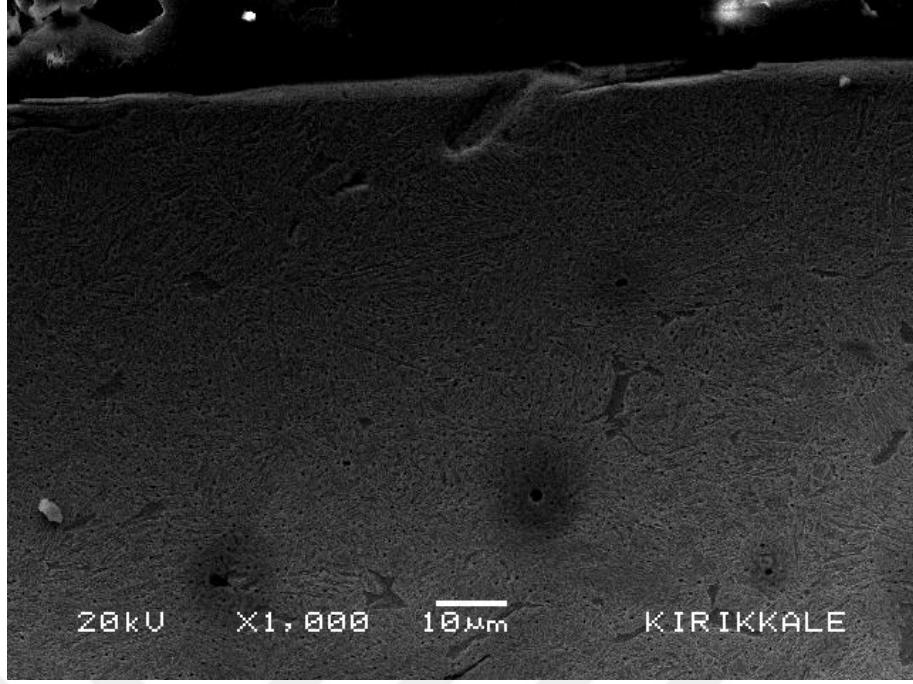


Şekil 3.50. B8 25N Yüzey altı SEM görüntüsü

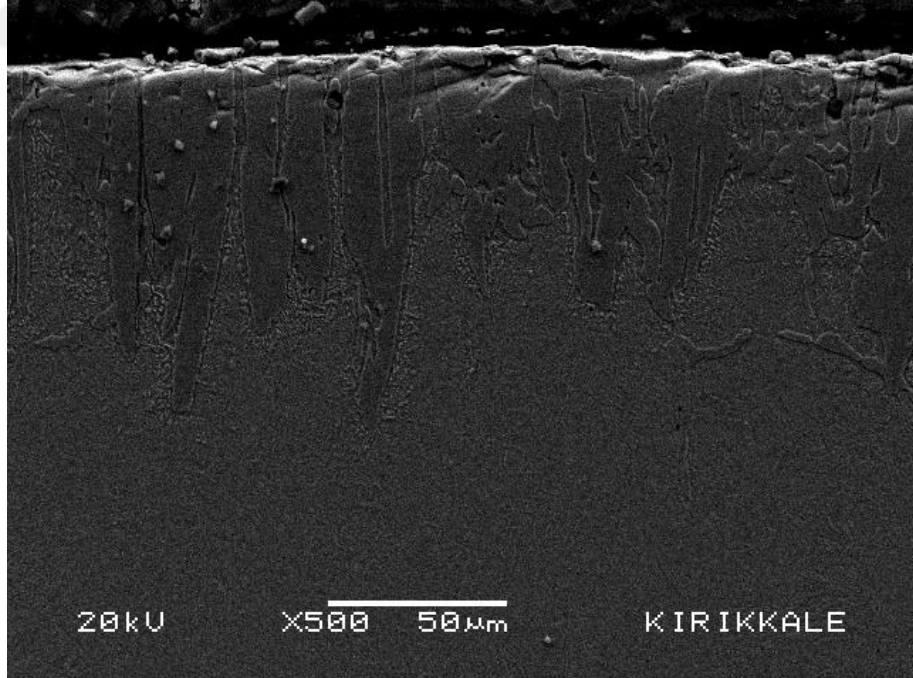
4, 6 ve saat borlanmış ve ıslah işlemine tabi tutulmuş 15N yük altında aşınma davranışlarını belirlemek amacıyla kayma yönüne paralel kesitlerinin yüzey altı aşınma fotoğrafları Şekil 3.51.- 3.53. arasında verilmiştir. Bu yüzey altları incelendiğinde işlem öncesine göre bor tabakası kalınlığının incelendiği belirlenmiştir. Özellikle BSM 4 ve BSM 8 kodu verilmiş numunelerde borür tabakasında aşınmanın daha fazla olduğu ve yüzey de kopmuş parçaların olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.51. BSM 4 15N Yüzey altı SEM görüntüsü



Şekil 3.52. BSM6 15N Yüzey altı SEM görüntüsü

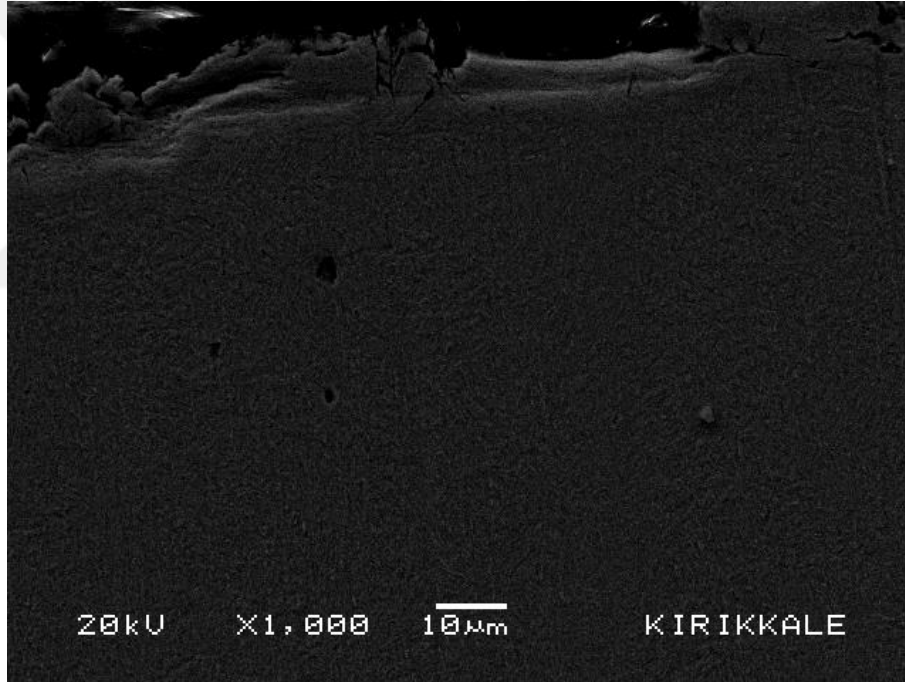


Şekil 3.53. BSM8 15N Yüzey altı SEM görüntüsü

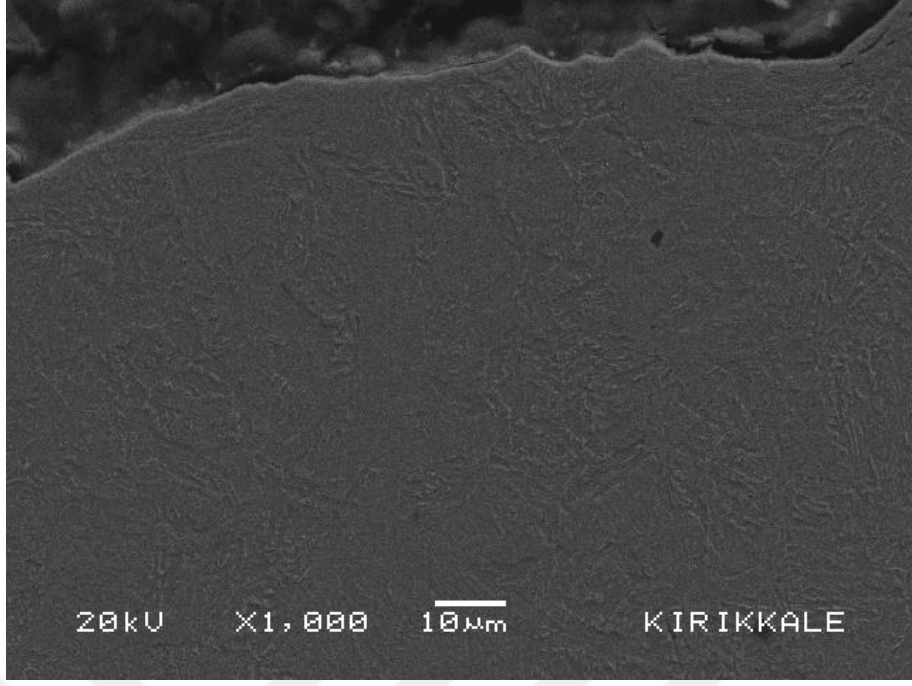
İslah işlemine tabi tutulmuş ve herhangi bir işlem görmemiş numuneye ait yüzey altı SEM görüntüleri Şekil 3.54. ve 3.55.' de verilmiştir.

İslah işlemine tabi tutulmuş 15N yük etkisi altında aşınmaya testi uygulanmış numuneye ait yüzey altı incelendiğinde çatlak oluşumuna rastlanmıştır. Aşınma neticesinde yüzeyde kopmuş parçalar olduğu gözlemlenmiştir.

İşlem görmemiş çelik numunenin yüzey altında mekanik olarak aşırı deforme olmuş bir bölge gözlemlendi. Paralel kesit incelendiğinde artan yüklerle beraber yüzeyin dalgalı bir profile sahip olduğu ve yüzeyden kopmaların arttığı belirlenmiştir.



Şekil 3.54. SM 15N Yüzey altı SEM görüntüsü



Şekil 3.55. N 15N Yüzey altı SEM görüntüsü

4.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1.Sonuçlar

Bu çalışmada farklı sürelerde borlama ve sonrasında ıslah işlemi yapılmıştır. Borlama sıcaklığı 950°C ve borlama süresi olarak 4,6 ve 8 saat olarak üç farklı süre kullanılmıştır. Borlama çeşidi olarak katı borlama ve bor ajanı olarak ise yerli Baybora kullanılmıştır. İşlemler neticesinde; sertlik, aşınma, mikro yapı ve bazı mekanik özellikler incelenmiştir. Buna ait sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1-AISI 5140 ıslah çeliğinde borlama süresi arttıkça çelik yüzeyinde meydana gelen borür kalınlığı artmaktadır ve borlanmış numunenin işlem görmeyen AISI 5140 çeliğine göre sertlik değerleri yaklaşık 4 kat artmaktadır.

2- Borlama işlemi neticesinde yapılan sertlik ölçümlerinde 3 farklı bölgenin oluştuğu görülmüş olup bu durumun borlama neticesinde uygulanan ısı ile değişmediği belirlenmiştir.

3-Borlama neticesinde meydana gelen borür tabakasında iki farklı kimyasal bileşime sahip yapıya rastlanmıştır. Bu yapılar gevrek ve genellikle istenmeyen FeB yapısı ile yüksek sertlik değerine sahip genellikle istenen Fe₂B fazıdır.

4-Borlama sonrası uygulanan ısı ile borlama işlemi bor yüzeyinde meydana gelen borür tabakasını azalttığı buna karşılık yalnız borlanmış numuneye göre sertlik değerlerinde ise önemli bir değişim yaşanmadığı tespit edilmiştir.

5- Seçilen süreler içinde uygulanan borlama işlemlerinde en uygun sürenin 4 saat olduğu belirlenmiştir.

6- Borlanmış numunelerin ilk hallerine oranla aşınma dirençlerinin yaklaşık 4 kat arttığı gözlemlenmiştir. Borlama sonrası uygulanan ısı işlemlerin ise aşınma direncini kötüleştirdiği belirlenmiştir.

7- Aşınma yüzey altı incelemelerinde borlanmış numunelerin farklı deformasyon tabakalarının oluştuğu görülmüştür.

8- Yapılan borlama işlemlerinde kullanılan borlama tozunun(Baybora) ithal Ekabor tozlarıyla hemen hemen aynı sonuçları verdiği gözlenmiştir.

4.2.Öneriler

1. Borlanmış SAE5140 çeliğinin korozyon davranışları farklı sıcaklıkta ve süre boyunca incelenebilir.
2. Farklı borlama tozları kullanılarak mekanik ve tribolojik özelliklerin değişimi incelenebilir.
3. Bu çelikte oluşan borlama tabakalarının tek bir faza indirgenebilmesi için farklı ısı işleme koşulları denenebilir.
4. Hafif silah namlularına bu işlem yapılarak nitrüleme işlemi ile karşılaştırılabilir.
5. Borlama sonrası gerek tam değişken gerekse genel değişken gerilmeler altında yorulma davranışları incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Khoee, S.M.M., , Ergimiş Boraks Banyosunda Çeliklere Vanadyum Karbür Kaplama, İ.T.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi,112s, İstanbul, 1992.
- [2] Ünlü B., Yılmaz S., “Bor ve Borlamının Kullanım Alanları” Mühendis ve Makine sayı:552, cilt:47, 2006
- [3] LYDAY, P.A., "Boron", Mineral Facts and Problems, 1985.
- [4] U.S.BORAX-CHEM. CORP., "The Story of U.S.Borax" 1977.
- [5] U.S.BORAX-CHEM. CORP., "100 Years of U.S. Borax", Anniversary Booklet of 100th Year of U.S. Borax, 1972.
- [6] Kimya Mühendisleri Odası, "Boraks", Kimya Mühendisliği Dergisi, Sayı 60, cilt :6, 1973.
- [7] MTA, "Bor Mineralleri-10", MTA Yayınları, Sayı:187, Ankara, 1982
- [8] Tombal T., Özkan Ş., Ünver İ.,Osmanlıoğlu A.,“ Bor bileşiklerinin özellikleri, üretimi, kullanımı ve nükleer reaktör teknolojisinde önemi” Bor Dergisi İstanbul 2016
- [9] BOREN-Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü 2016, [online], <http://www.boren.gov.tr/tr/bor/bor-elementi>, [Erişim Tarihi: 16.06.2016]
- [10] İpekoğlu Ü., Polat M., “Bor Endüstrisine Genel Bakış” Madencilik Sayı: 1, cilt: XXVI, 1987

- [11] Özer M., “Üç farklı çeliğe katı borlama işleminin yapılmasının iç yapı ve sertlik üzerine etkisinin incelenmesi ” Balıkesir Üniversitesi yüksek lisans tezi Balıkesir, 2011
- [12] Taşcı A., “Borlanmış Çeliklerin Aşınma ve Korozyon Dayanımları” İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi , 45s, İstanbul, 1993.
- [13] Pengxun, Y., "Gaseous Boronizing With Solid Boronyielding Agents" Thin Solid Films., , 44-47 p., Vol 214, 1992
- [14] Bozkurt, N., “Bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme” Doktora tezi, İ.T.Ü., Fen Bil. Enstitüsü, İstanbul,1984
- [15] Baştürk S., Erten M., “ Borlama ile Yüzey Sertleştirme Çalışmaları” Mühendis ve Makine dergisi sayı:563 cilt:47 2006
- [16] Özsoy A., “Çeliğin Borlanması Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matrisin Özelliklerinin İyileştirilmesi” Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi,101 s, Eskişehir, 1991
- [17] Uzun A.U., “Borlama Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları” Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi,75 s., Isparta,2002
- [18] Selçuk B., Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Erciyes Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri, 1994
- [19] Sinha, A.K., “Heat Treating”ASM Handbook, pp 437-447,Vol 4, 1991.

- [20] Karaman,Y., “Endüstriyel Borlama ve Tekstil Endüstrisinde Bir Uygulama”, Y.Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Isparta, 2003.
- [21] Tezcan, R., “Borlama İşlemi ve Endüstriyel Uygulamaları”, Yüksek lisans Tezi, Osmangazi Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1996.
- [22] Bayça S., Şahin S., “Borlama” Mühendis ve Makine Dergisi sayı:532 cilt: 45 2004
- [23] Mathuschka, A.G., Boronizing” Carl Hanser Verlag, Munchen Wien, 100s. Germany, 1980.
- [24] Topuz P., “ DIN 1.2842 çeliğinin borlanması ile oluşan borür tabakası üzerine borlama sıcaklık ve süresinin etkileri” Bor Dergisi, İstanbul 17-18s, 2016.
- [25] Yünker U., “Borlanmış Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi”, Yüksek lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, 161s., Manisa, 2000 .
- [26] Atik, E., “Farklı Bir Yüzey Sertleştirme Yöntemi: Borlama”, Makina & Metal, 117s, 2001.
- [27] Hegewaldt, F., Singheiser, L., and Türk, M., “Gasborieren”,HTM,39,1,7,15, 532s., 1984.
- [28] Krzyminski, h., and Kunst, H. T., Borieren refracter metalle, Harterei Technische Mittlungen, 100-112p..Vol:28, 1973
- [29] Nejat y. SARI, Erdinç Kaluç “Endüstride Aşınma Problemleri” Makine ve metal Teknolojisi, 64-68s. , sayı:50, 1996.

- [30] Özmen Y., Çetincan A., “Borlamanın Çeliklerde Aşınma Dayanımına Etkisi” 5. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi ve İmalat Kongresi, 583-591s, Ankara, 1992.
- [31] Hbig K.H., Chatterjee-Fisher R., Wear Behaviour of Boride Layers on Alloyed Steels. Tribology International, 209-215s, 1981.
- [32] Demirci H., “Fe-Esaslı Malzemelerin Borlanması ile Kavite Dayanımının Değişimi” 7. Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, 261-269s, Ankara, 1996.
- [33] Er, Ü., Par, B., “Bor Yayınıyla Yüzeyi Sertleştirilmiş AISI 1030 ve AISI 1050 Çeliklerinin Abrasiv Aşınma Dayanımlarının İncelenmesi”, Osman Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Eskişehir, 17s, 2004.
- [34] Barut N., Yavuz D., Kayalı Y., “Borlanmış AISI 5140 ve AISI 420 Çeliklerinin Difüzyon ve Adhezyon Davranışlarının İncelenmesi” Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Afyon 2-7s., 2014.
- [35] Turku N., Doğan Ş., Uçar N., Çalık A., “Borlama Süresinin Düşük Karbonlu Mikro Alaşımli Çeliklerin Sertlik Değerleri Üzerine Etkisi” Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 147-151s, 2014.
- [36] Yılmaz S., Ünlü B., Varol R., “Borlama ve Bilyalı Dövmenin Demir Esaslı T/M Malzemelerde Aşınma ve Mikro Yapı Özelliklerine Etkisi” Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 1-8s., 2008.
- [37] Uslu İ., Cömert H., “Borlanan AISI 1040 ve AISI P20 Kalıp Çeliklerinin Bazı Mekanik Özellikleri” sayı:1, cilt:8, 2004.

- [38] Çelik O., Er Ü., Aydınbeyli N., Akbayır Ö., Gaşan H., “ Borlanmış AISI 1030 Çeliğinin Abraziv Aşınma Özellikleri” Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi XXI,S.1,2008.
- [39] Uluköy A., Can A., “Çeliklerin Borlanması” Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi sayı:2, cilt:12, 189-198s., 2006.
- [40] Delikanlı K., Çalık A., Uzun H.A., “Sade Karbonlu Bir Çeliğin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi” BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,99-110s., 2003.
- [41] Gunes I., “ Investigation of Tribological Properties and Characterization of Borided AISI 420 and AISI 5120 Steels” Trans Indian Inst 67(3):359-365s., 2014.
- [42] Gunes I., Yıldız I., “Investigation of Adhesion and Tribological Behavior of Borided AISI 310 Stainless Steel” Revistamateria ISSN 1517-7076 artigo 11680, 61-71s., 2016.
- [43] Krelling A.P., Costa C.E., Milan J.C.G., Almeida E.A.S. “Micro-abrasive wear mechanisms of borided AISI 1020 steel ” Tribology International 111 234–242s., 2017.
- [44] Dybkov V.I., “Sintered Metals and Alloys Boriding of Chromium Steels” Toz Metalurjisi ve Metal Seramikleri, Vol. 55, Sayı: 11-12, 2017.
- [45] Çetin M., “Borlanmış Hadfield Çeliklerinin Aşınma Dayanımını İncelenmesi”, Yüksek lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2003.
- [46] Tabur M., Izciler M., Gul F., Karacan I., “Abrasive Wear Behavior of Boronized AISI 8620 Steel” Wear 266, 1106–1112, 2009.

- [47] Ozbek I., Bindal C., “Mechanical Properties of Boronized AISI W4 Steel” Elsevier Surface and Coatings Technology 154 14–20s., 2002
- [48] Taktak S., “Some Mechanical Properties of Borided AISI H13 and 304 Steels” Elsevier Materials and Design 28 1836–1843., 2007.
- [49] Atık E., Yunker U., Meriç C., “The Effects of Conventional Heat Treatment and Boronizing on Abrasive Wear and Corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 Steels” Elsevier Tribology International 36 155–161s., 2003
- [50] Ulutan M., Yildirim M., Çelik O., Buytoz S., “Tribological Properties of Borided AISI 4140 Steel with the Powder Pack-Boriding Method” Tribol Lett 38:231–239s., 2010.
- [51] Arat M., “Paslanmaz Çelik 310 ve 316 Metalinin Plazma Borlama ve Nitrürleme Metodu ile Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi” Yüksek lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, , 2-3 s., İstanbul , 2011.
- [52] Xu, C. H., Gao, W., Yang, Y. L., Superplastic Boronizing of a Low Alloy Steel- Microstructural Aspects, Journal of Materials Processing