



Baybora-1 Borlama Tozu Kullanılarak Yüzey Sertleştirme İşlemine Tabi Tutulan 41Cr4 Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi

Investigation of Wear Behavior of 41Cr4 Steel Subjected to Surface Hardening Process Using Baybora-1 Boriding Powder

Bünyamin Yamanel¹, Osman Bican^{*2}, S. Uğur Bayça²

¹Kırıkkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

²Kırıkkale Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 21/11/2018

Kabul/Accepted: 21/12/2018

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2019

Özet

Bu çalışmada SAE 5140 çeliğine 950 °C de yerli Baybora-1 borlama tozu kullanılarak 4 ve 6 saat süreli katı borlama işlemi yapılmıştır. Numunelerin içyapısı optik ve SEM de incelenmiştir. Ayrıca oluşan bor tabakalarının kalınlık ve sertlik değerleri Mikrovickers sertlik ölçme yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Borlanan numuneler farklı yükler altında ve abrazyon aşındırıcı yüzeyler kullanılarak aşınma testine tabi tutulmuş ve aşınma yüzey fotoğrafları çekilmiştir. SAE 5140 çeliğinin içyapısının ferrit bölgeleri ve perlit lamellerinden oluştuğu görülmüştür. Farklı sürelerde borlama işlemine tabi tutulan SAE 5140 çeliğinin ise yüzey altında iki farklı tabaka oluştuğu XRD yöntemiyle belirlenmiştir. Bunların yüzeyden itibaren FeB ve Fe₂B tabakaları olduğu ve sertlik değerlerinin işlem uygulanmamış numunenin yaklaşık sekiz katı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu tabakaların kalınlığının artan borlama süresi ile arttığı belirlenmiştir. Ayrıca borlama işleminin aşınma direncini yaklaşık 4 kat arttırdığı belirlenmiştir. SAE 5140 çeliği yerli bir borlama tozu kullanılarak başarılı bir şekilde yüzey işlemine tabi tutulmuştur. Uygulanan borlama işlemi sertlik, mukavemet ve aşınma direnci değerlerini yaklaşık 4 kat arttırdığı görülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda en uygun borlama sıcaklığı 950 °C ve en uygun borlama süresi 4 saat olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“AISI 5140, Borlama, Su verme, Sürtünme, SEM”

Abstract

In this study, 4 to 6 hours solid boronizing process was applied to SAE 5140 steel at 950 °C using Baybora-1 boriding powder. The microstructures of the samples were examined in optics and SEM. In addition, the thickness and hardness values of boron layers were determined by using Mikrovickers hardness measurement method. Borided samples were subjected to abrasion test under different loads and by using different abrasive surfaces and wear surface photographs were taken. The structure of the SAE 5140 steel found in the cast was made of ferrite zones and pearlite lamella. SAE 5140 steel, which has been subjected to boriding at different times, was determined by XRD method. These were FeB and Fe₂B layers and the hardness values were approximately eight times the untreated sample. In addition, the thickness of these layers increased with increasing boron time. It was also determined that the boriding process increased the wear resistance 4 times. SAE 5140 steel has been successfully surface treated using a local boronizing powder. It was found that the boronizing process increased the hardness, strength and abrasion resistance values by 4 times. As a result of the experiments, the optimum boriding temperature was determined as 950 °C and the most suitable boronizing time was 4 hours.

Key Words

“AISI 5140, Boronizing, Water quench, Friction, SEM”

1. GİRİŞ

Makine işlemlerinde kullanılan malzemelerin korozyon, aşınma gibi tribolojik etkiler nedeniyle kullanımın süreleri kısalmaktadır. (C.Martini vd. 2017; Calik, 2017 ; Atik, 2003; Dele Afolabi, 2017) En büyük eğilme ve burulma momentlerinin yüzeyde olması nedeniyle aşınma ve yorulmaya bağlı olarak malzemenin ömründe kısalma meydana gelmektedir. Bu olumsuz etkenleri ortadan kaldırmak ve kullanılan malzemelerin ömürlerini uzatmanın yolu ise ancak yüzeyleri iyileştirmekle mümkündür. (B.Venkataraman and G.Sundararajan, 1995; H.J.Hunger and G.Trute; 1994) Makine imalat sanayinde aşınma ve korozyona bağlı olarak büyük miktarlarda malzeme kayıpları meydana gelmektedir. Türkiye’ de bu duruma bağlı olarak kayıp miktarının 1991 yılı için yaklaşık 4,5 milyar dolar civarında olduğu düşünülmektedir. (Khoee, 1992) Yüzey sertleştirme yöntemlerinden biri de borlama işlemidir.(Azakli vd. 2018) Borlanmış yüzeylerin aşınma direnci yükselir ve sürtünme katsayısı azalır.(Bejar, 2006) borlanmış çeliklerin sertlik değerleri borlama öncesine oranla 5-7 kat oranında artmaktadır. Borlama neticesinde oluşan borür tabakası bu sertlik değerini 1000 °C’ ye kadar koruyabilmektedir. Ayrıca aşınma özellikleri de korunmaktadır. (Selçuk, 2003; Chong, 2016; Hazar, 2017) borlama sonunda yüzeyde borür tabakası meydana gelir. Bu yapı içerisinde genellikle Fe₂B ve FeB yapıları oluşmaktadır. Sertlik değerleri olarak 1800-2000 HV Titanyumda ise borlama sonucu sertlik değerleri 3000 HV ye kadar çıkmaktadır. (Kulka vd. 2017; Matijevic, 2014; Martini vd. 2004) Bor madeni kullanılarak bu işlem gerçekleştirilir. (Tavakoli, 2015; Bartkowska, 2018) Bor 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. Çok geniş bir kullanım alanına sahip olmakla birlikte farklı özellikteki malzemelere rahatlıkla uygulanabilir. 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) (Ünlü vd. 2006)

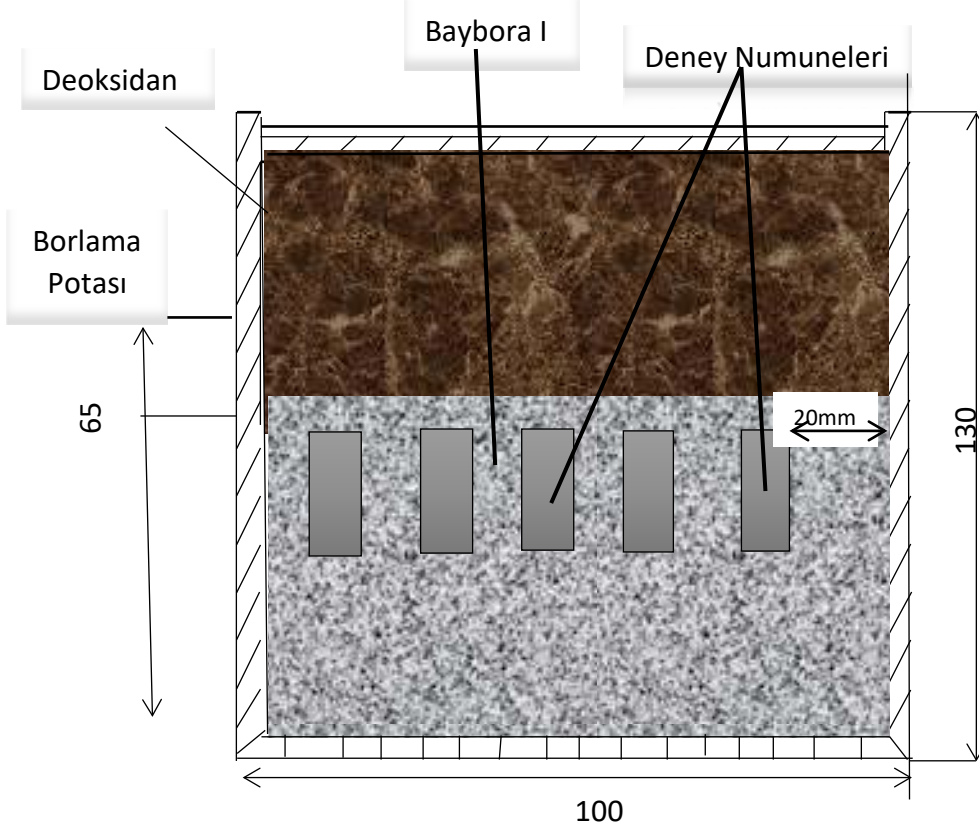
Bu çalışmada makine ve taşıt imalatında; ön aks, krank mili, aks kovani, direksiyon mili gibi parçalarda sıklıkla tercih edilen yüksek aşınma direnci altında çalışan AISI 5140 çeliği tercih edilmiştir. SAE 5140 çeliğine farklı sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanarak yapısal, mekanik ve tribolojik olarak incelenmiştir.

2.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Kimyasal bileşim ve İyileştirme 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 tezgâhı kullanılarak işlenmiştir. Hazırlanan numunelerin ilk olarak argon spektrometresi yardımıyla kimyasal bileşimleri ölçülmüştür. Baybora 1 yerli borlama tozu kullanılarak 1223K sıcaklığında 4 ve 6 saat sürelerle borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Borlama işleminde Şekil 1’de şematik resmi verilen pota kullanılmıştır. Bu pota ebatları deney numuneleri göz önünde bulundurularak 304 paslanmaz çelik malzemedan yapılmıştır. 10 adet AISI 5140 numune pota içerisine yerleştirilip, potanın içerisi 65 mm yüksekliğe kadar Baybora 1 borlama ajanı ile doldurulmuştur. Potanın kalan kısmında ise deoksidan malzeme kullanılarak numunelerin oksitlenmesi engellenmiştir. Numunelerin kenarlarında en az 1cm toz borlama ajanı ile dolu olmasına dikkat edilmiştir.

Borlama işlemi 4,3kW’ lık güce sahip ısıtma işlem fırını kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fırının sıcaklık ve süre ayarlaması yapıldıktan sonra borlama potası fırın içerisine konulup fırın sıcaklığı 950°C sıcaklığa ulaştıktan sonra 4 saat beklenmiştir. Borlama işleminden sonra borlama potası ısıtma işlem fırını içinde soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan pota içerisindeki numuneler zarar görmeyecek şekilde çıkarılarak 4 saat borlama işlemi tamamlanmıştır. Bu işlem basamakları 6 saat içinde tekrarlanmıştır. Kullanılan numune kodları Tablo 1’de verilmiştir. Her bir deney numunesi kesilmiş ve Mikro Test markalı bakalit alma cihazı kullanılarak bakalit alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yüzeyler sırasıyla 120, 240, 400, 800 ve 1200 gritlik zımpara kağıtları ile zımparalanmış ve 6 μ m, 3 μ m’ luk elmas solüsyonlar yardımıyla parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir %4’lük nital çözeltisi hazırlanıp numuneler sırasıyla 3 saniye %4’lük nital çözeltisinde bekletilerek dağlama işlemi yapılmıştır. Temizlenen numunelere etil alkol damlatılıp kurutulmuştur. Nikon Eclipse MA 100 marka optik mikroskop yardımıyla numunelere ait içyapı görüntüleri elde edilerek incelenmiştir.



Şekil 1. Deney numunelerin bor potası içindeki şematik gösterimi

Tablo 1. Borlama grubu

NUMUNE KODU	MALZEME	BORLAMA SICAKLIĞI(°C)	BORLAMA SÜRESİ(Saat)
N	41Cr 4	950	-
B4	41Cr 4	950	4
B6	41Cr 4	950	6

2.2. Mekanik Testler

1223K sıcaklığında borlanmış çeliklerin sertlik değişimleri yüzey altı boyunca incelenmiştir. Sertlik ölçümleri Galileo Durometria markalı Vickers sertlik ölçme cihazı kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler 20µm aralıklarla 100g' lık yük altında 10s bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Her numune için 10' ar ölçüm yapılmış ve bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır.

2.3. Aşınma Testleri

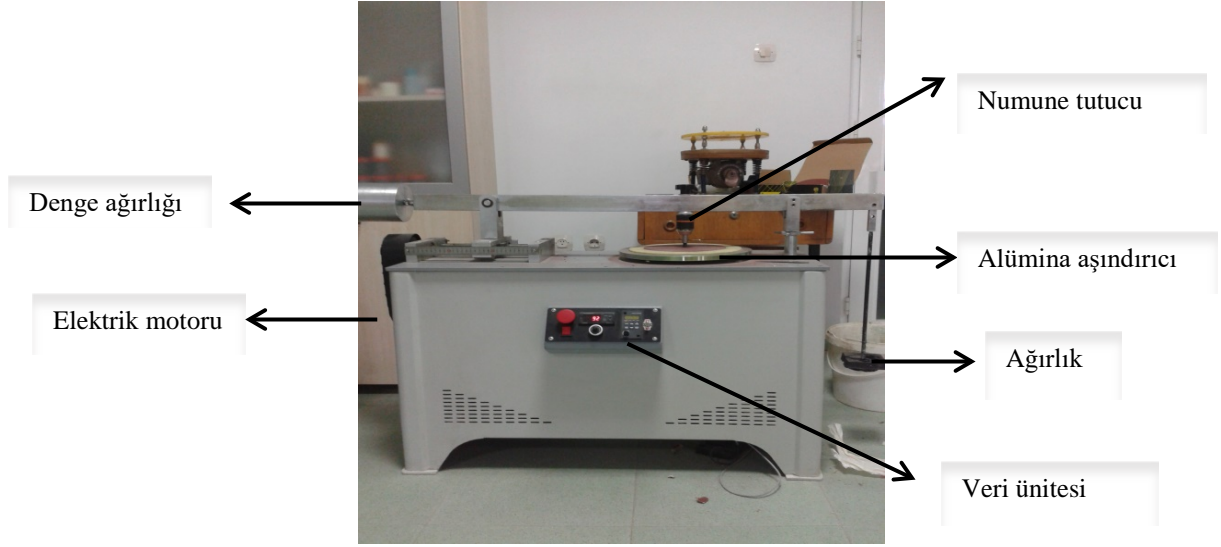
Borlama işlemine tabi tutulan numunelerin tribolojik davranışlarının incelenmesi amacıyla resmi Şekil 2' de verilen aşınma test cihazı kullanılmıştır. Cihaz bir yükleme sistemi ve hız kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Borlanan numuneler 0,5 m/sn sabit hızda 200 mm çaplı 177 µm ortalama parçacık boyutuna sahip alümina aşındırıcı kullanılarak 5-25 N yük aralığında aşınma testine tabi tutulmuştur. Deneylede numuneler 40 m' lik kayma mesafesi altında gerçekleştirilmiştir. Test parametreleri Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 2. Abrasiv aşınma şartları

NUMUNE	HIZ(m/s)	UYGULANAN YÜK(N)
N	> 0,5	>5,10,15,20,25
B4	> 0,5	>5,10,15,20,25

B6 _____ > 0,5 _____ > 5,10,15,20,25

Aşınma testi öncesi ve sonrası ultrasonik temizleyicide temizlenen numunelerin ağırlıkları 10^{-4} hassasiyetli tartım cihazı kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 2. Aşınma Test Cihazı

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

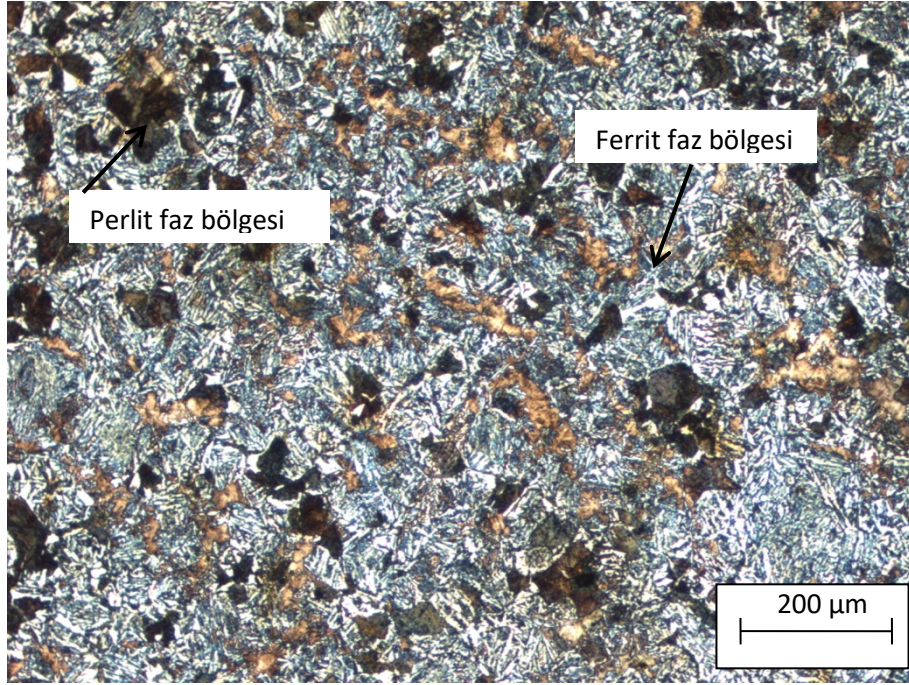
Tablo 3'de deney aşamalarında kullanılan SAE 5140 çeliğine ait argon spektrometresi kullanılarak elde edilen kimyasal bileşim verilmiştir.

Tablo 3. AISI 5140 çeliği kimyasal bileşimi

Malzeme	C%	Cr%	Mn%	P%	S%	Si%	Fe%
SAE 5140	0,414	1,01	0,671	0,021	0,0301	0,312	97,54

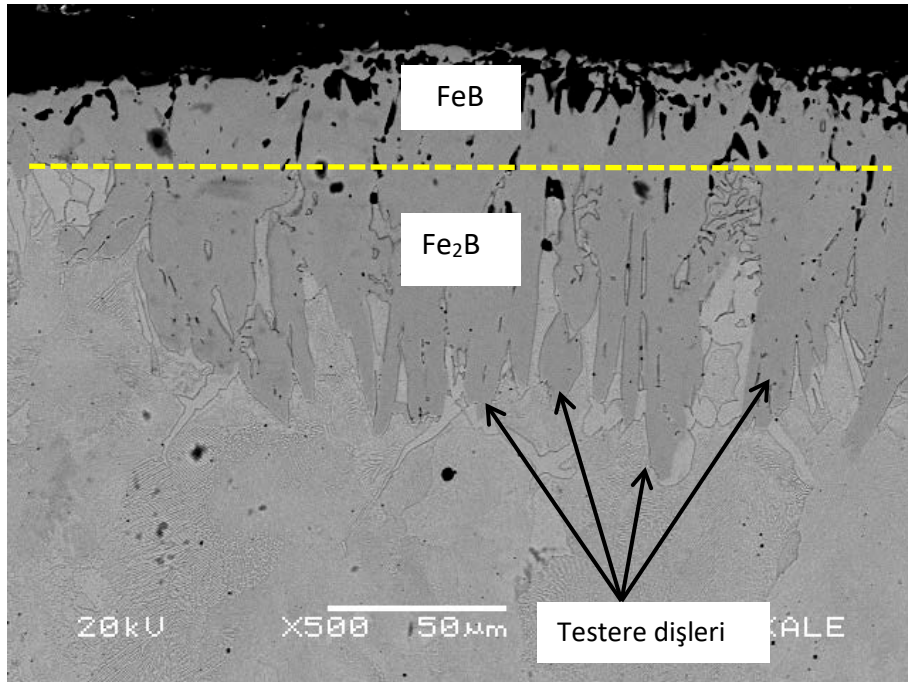
3.1. İç Yapı İncelemeleri

Borlama işlemine tabi tutulmayan SAE 5140 çeliğine ait iç yapı fotoğrafları optik mikroskop ve SEM cihazı yardımıyla elde edilmiştir. Çeliğin iç yapısının ferrit fazı ve perlit lamellerinden oluştuğu görülmüştür, Şekil 3.

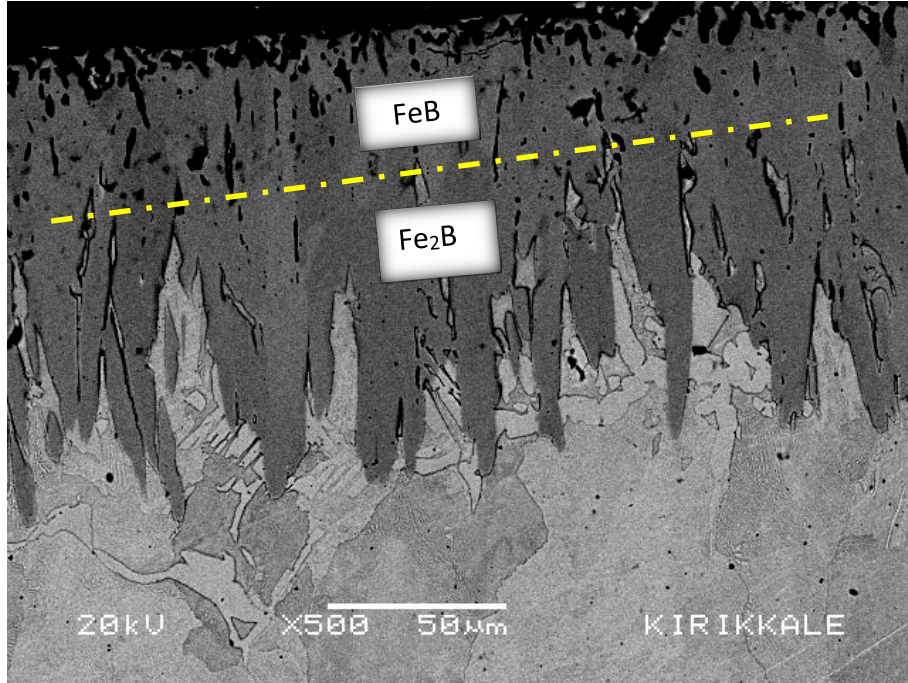


Şekil 3. N numunesine ait iç yapı optik mikroskop görüntüsü

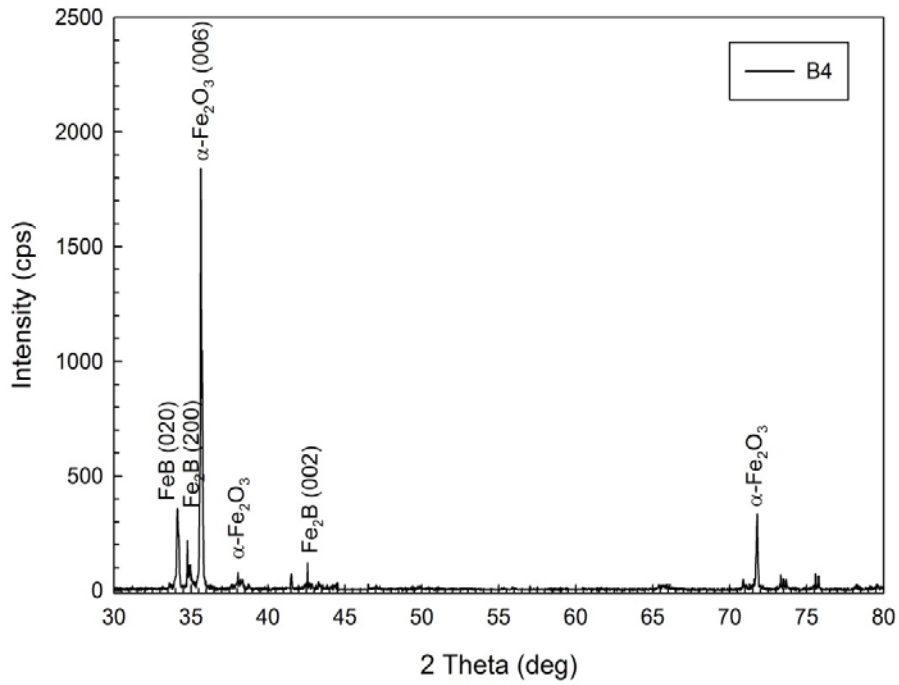
950 °C de 4 ve 6 saat süreyle borlama işlemi uygulanan AISI 5140 çeliğine ait numunelerin SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5 de verilmiştir. Numunelerinin içyapılarının ferrit, perlit ve yüzeyde borür tabakalarından oluştuğu gözlenmiştir. Borlama sıcaklık etkisiyle borun malzeme içine difüze olması şeklinde gerçekleşir. Bu difüze işlemi neticesinde FeB ve Fe₂B bileşikleri oluştuğu görülmüştür, Şekil 6 ve Şekil 7. Difüzyonun etkisiyle yüzeyde ilk borür çekirdeği oluşmaktadır. Zamanla borür çekirdeği metalin yüzeyinden içeriye doğru büyümeye devam etmektedir. Borür tabakasının diğer yönlerde büyümesi yavaş olduğu için içeri kısımda kolonsal bir yapı meydana gelir. Yapıda ilk önce Fe₂B fazı sonrasında ise yapıda yeterli miktarda bor olmasına bağlı olarak FeB oluşmaktadır. Bu yapılarda FeB fazı güçsüz ve kırılğan bir yapıya sahip iken Fe₂B fazı daha sert ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Farklı ısıl genleşme katsayılarına sahip bu iki fazın aynı yapıda oluşması numune yüzeyinde çatlamalara sebep olabilir. Bu durumun ortadan kaldırmak için FeB fazının oluşumu engellenmeli yahut oluşumun en aza indirilmesi gerekir.



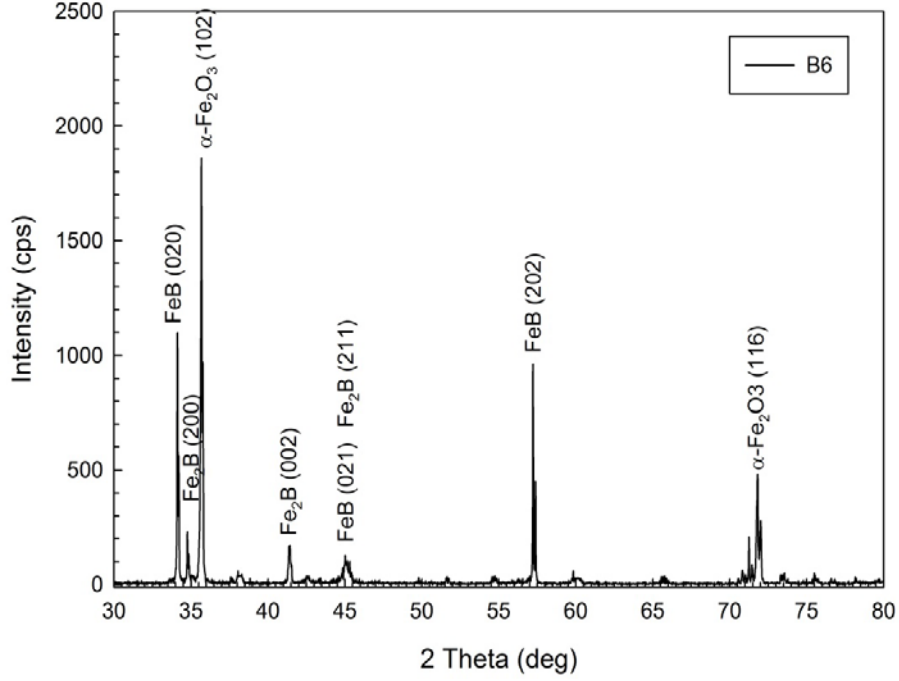
Şekil 4. B4 numunesine ait SEM görüntüsü



Şekil 5. B6 numunesine ait SEM görüntüsü



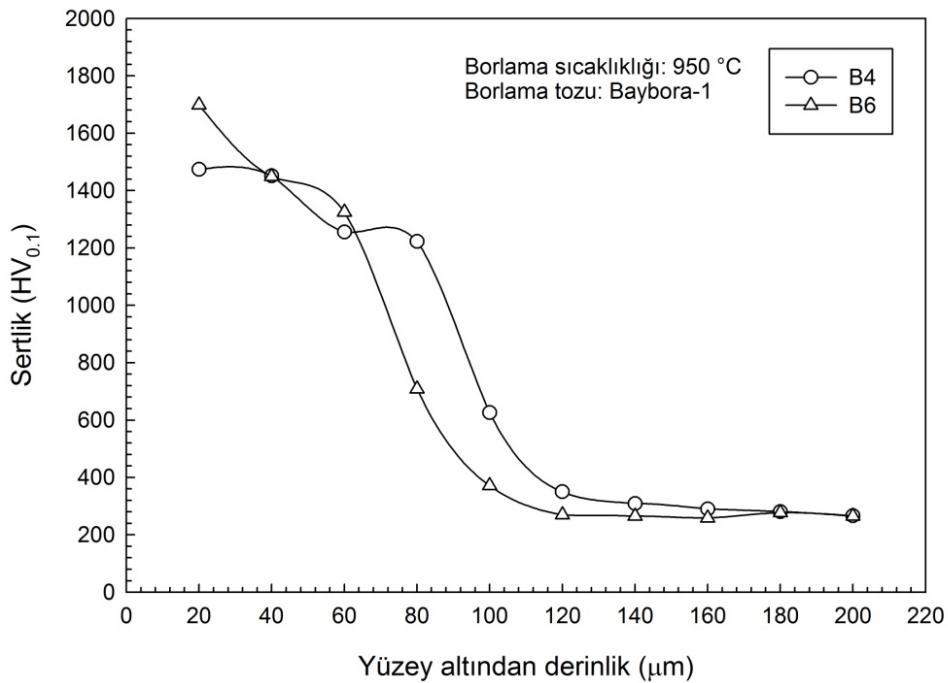
Şekil 6. 4 saat borlanmış AISI 5140 numunesinin X-ışını difraksiyon analizi



Şekil 7. 6 saat borlanmış AISI 5140 numunesinin X-ışını difraksiyon paterni

3.2. Mekanik Testler

950°C sıcaklıkta 4 ve 6 saat sürelerde olmak üzere katı borlama uygulanan AISI 5140 çeliği numunelere ait yüzey altında meydana gelen sertlik değişimlerinin yüzey altından derinliğe göre değişimleri Şekil 8.' de verilmiştir. 950°C' de gerçekleştirilen 4 ve 6 saatlik katı borlama işlemleri karşılaştırıldığında artan süreye bağlı olarak yüzeyde oluşan borür tabakası kalınlığının arttığı görülmüştür. 4 saatlik borlama neticesinde yüzeyde oluşan borür tabakası kalınlığı 90µm iken 6 saatlik borlama sonrası bu kalınlık 107,3 µm olarak ölçülmüştür.

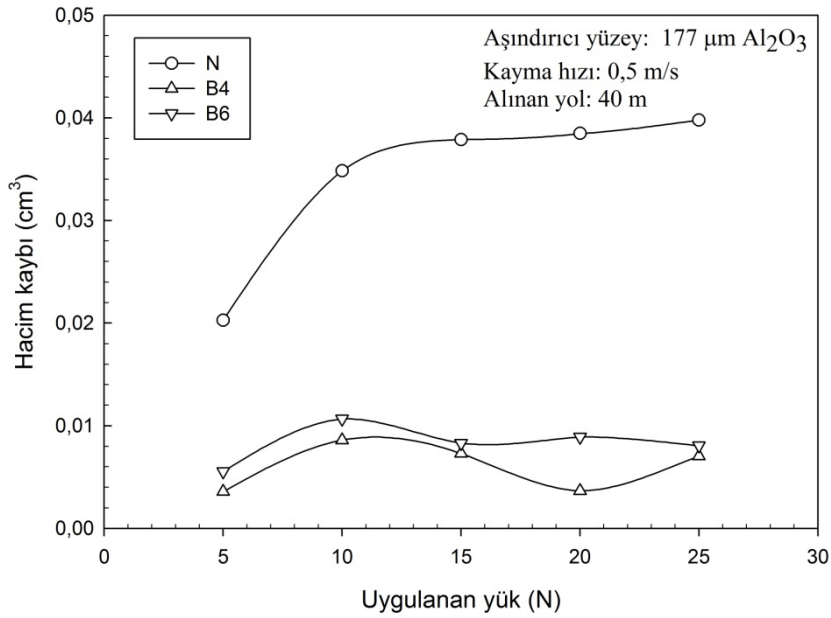


Şekil 8. Borlanmış çeliğin sertliğinin yüzey altı mesafesine göre değişimi

Borlama uygulanan AISI 5140 çeliği numunelerin hiçbir işlem görmeyen AISI 5140 çeliği numunelere göre sertlik değerleri 4-5 kat arttığı görülmüştür. Maksimum sertlik değerleri 6 saatlik süre sonunda yaklaşık 1750 HV olarak ölçülmüştür. Bu grafik incelendiğinde borlama neticesinde üç bölgenin oluştuğu görülür. Bor atomlarının difüze olduğu borür bölgesi, bor difüzyonunun azaldığı geçiş bölgesi ve ana matristir.

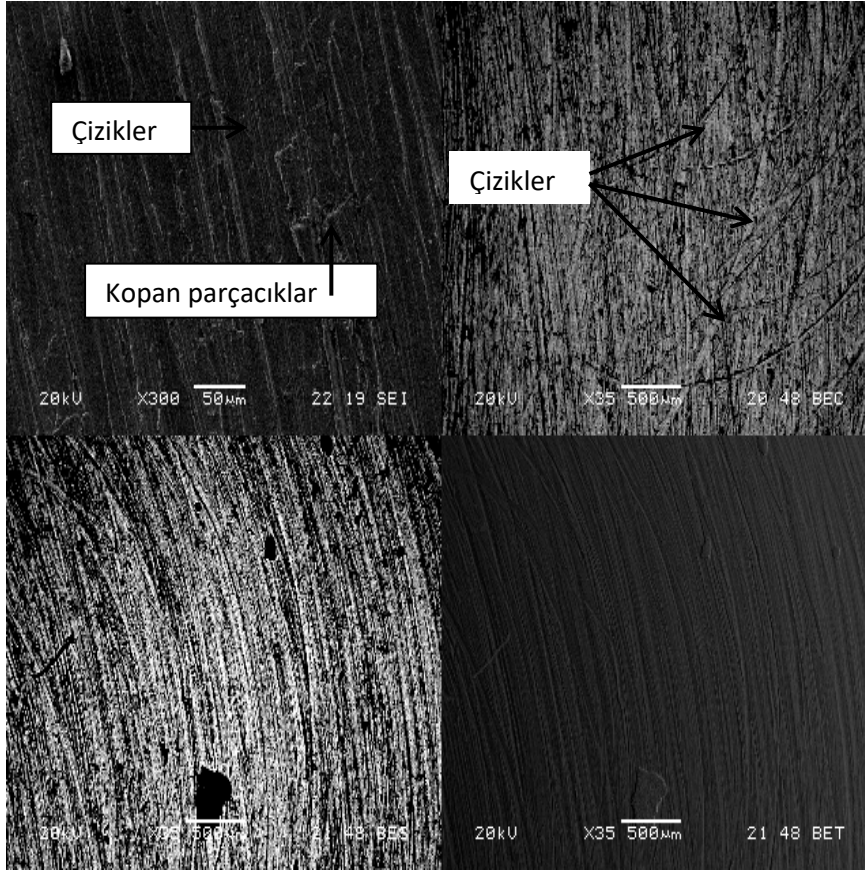
3.3. Aşınma Testi

950°C'de 4 ve 6 saatlik katı borlama işlemine 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. Numunelerde meydana gelen hacim kaybının uygulanan yüke göre değişimini gösteren eğriler Şekil 9'da verilmiştir. Uygulanan yükle numunelerde meydana gelen hacim kaybının arttığı görülmüştür. 10 N 'luk yük değerinden sonra hacim kayıplarının hemen hemen sabit değerlere ulaştığı görülmüştür. Teste tabi tutulan numuneler içerisinde en yüksek aşınma direnci 950 °C de 4 saat borlama işlemine tabi tutulan numuneden elde edilmiştir. Herhangi bir işlem görmemiş SAE 5140 çeliğinde aşınma ile meydana gelen hacim kaybının uygulanan yük ile arttığı gözlenmiştir. Artan yüke bağlı olarak yüzeyde meydana gelen deformasyon artmış ve aşınma direnci kötüleşmiştir.

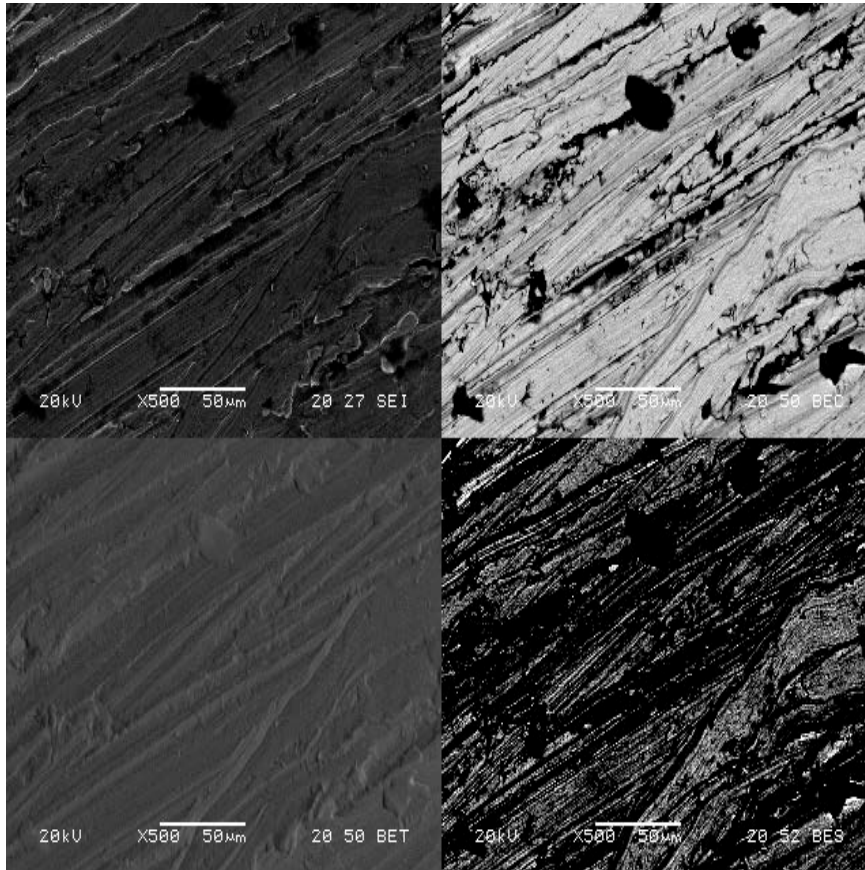


Şekil 9. Aşınma testine tabi tutulan AISI 5140 çeliğinin hacim kaybı-yük grafiği

Farklı yükler altında aşınma deneyine tabi tutulan 5140 çeliğinin aşınma yüzeylerinin SEM ve BSEM görüntüleri farklı büyütme oranlarında Şekil 10 ve 11 de verilmiştir. Aşınma yüzeylerinin kayma doğrultusu boyunca oluşan derin çiziklerden ve çukurculardan oluştuğu gözlenmiştir.



Şekil 10. N kodlu numune 15 N yük altında aşınma SEM ve BSEM görüntüleri



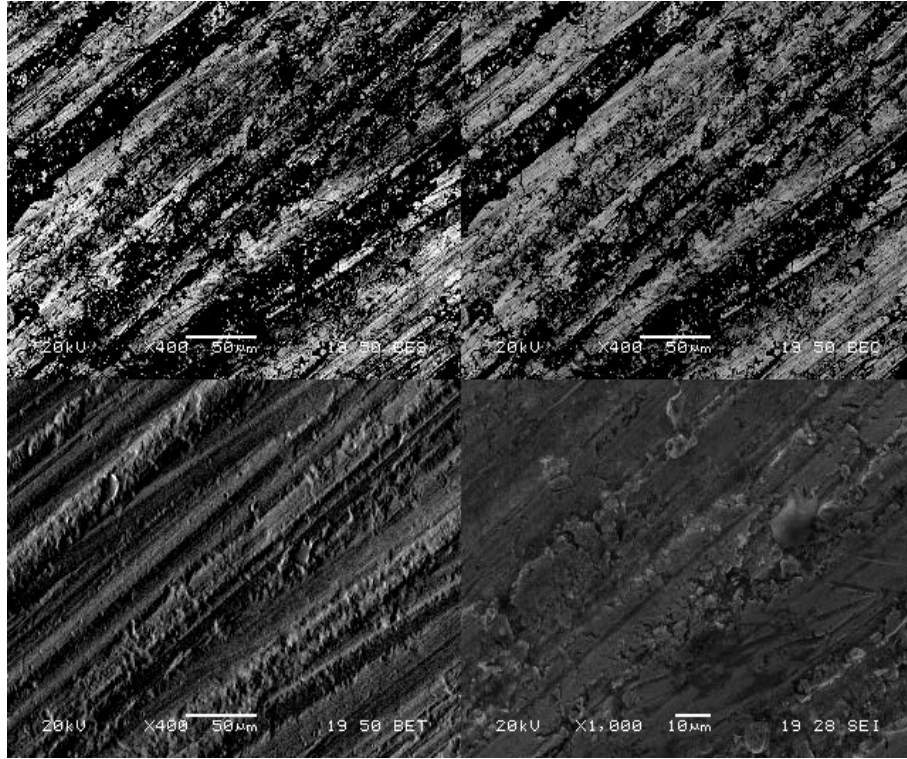
Şekil 11. N kodlu numune 25 N yük altında aşınma SEM ve BSEM görüntüleri

Yüzeyden kopan sert parçacıkların oksitlenerek yüzeyde bu tür bir plastik deformasyon oluşturduğu gözlenmiştir. Ayrıca yüzeyden kopan parçacıkların oluşturduğu çukurcukların yanında çatlak belirtilerine rastlanılmıştır. Artan yükte beraber bu çiziklerin derinliğinin ve kalınlığının arttığı görülmüştür.

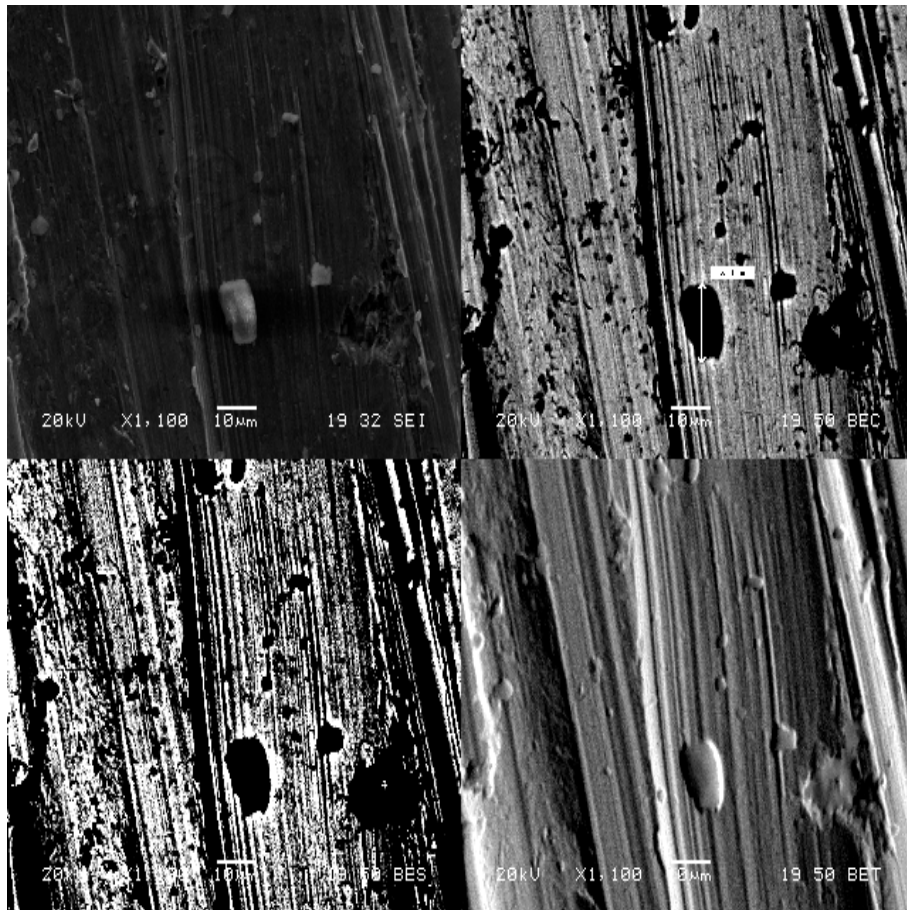
Borlanmış numunelerin farklı yükler altındaki aşınma yüzeylerinin SEM ve BSEM fotoğrafları Şekil 12-15' de verilmiştir. Yüzey işlemi yapılmayan numuneyle karşılaştırıldığında, borlanmış numunelerin yüzeyinde daha az çukurcuk buna karşın daha çok sayıda çizik olduğu gözlenmiştir. Ancak bu çiziklerin derinliği işlem görmemiş 5140 çeliğinin yüzeyinde oluşan çiziklerden daha düşük derinliğe sahiptir. Ayrıca oluşan bor tabakalarının farklı aşınma davranışı gösterdiği görülmüştür. Şöyle ki, borlama sonucu FeB ve Fe₂B fazlarından oluştuğu yapılan iç yapı ve XRD analizlerinden görülmektedir. Oluşan bu fazlardan FeB ortorombik kristal yapıya, Fe₂B ise hacim merkezli tetragonal kristal yapıya sahiptir. 4 saat borlama işlemine tabi tutulan 5140 çeliğinin yüzeyi incelendiğinde; 15 ve 25 N' luk yük altında bor tabakasını tamamen yüzeyden ayrılmamaktadır. Buna karşın 6 saat borlama işlemine tabi tutulmuş numunede 25 N yük altında bor tabakalarının tamamen yüzeyden ayrıldığı görülmüştür. Bu durumun nedeni uzun süreli borlama esnasında oluşan kırılğan ve sert bir faz olan FeB yapısı ile açıklanabilir. Şöyle ki, artan borlama süresiyle FeB fazının yapı içerisindeki miktarının arttığı XRD analizleriyle tespit edilmiştir. Ortorombik kristal yapıya sahip FeB fazının gevrek ve kırılğan bir faz olduğu bilinmektedir. Gevrek ve kırılğan arayer bileşiği olan bu faz abrasiv aşınmaya yol açarak aşınma direncini kötüleştirmektedir.



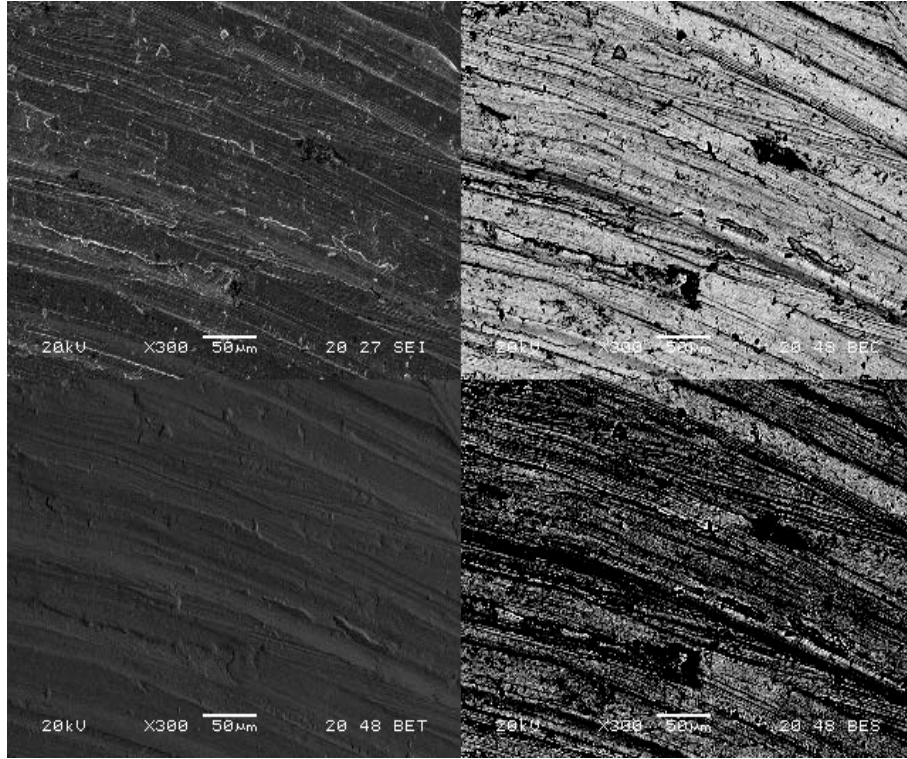
Şekil 12. B4 kodlu numune 15 N yük altında aşınma SEM ve BSEM görüntüleri



Şekil 13. B4 kodlu numune 25 N yük altında aşınma SEM ve BSEM görüntüleri



Şekil 14. B6 kodlu numune 15 N yük altında aşınma SEM ve BSEM görüntüleri



Şekil 15. B4 kodlu numune 25 N yük altında aşınma SEM ve BSEM görüntüleri

SAE 5140 çeliğine uygulanan 4 ve 6 saat borlama işleminin aşınma davranışını iyileştirdiği görülmüştür. 950°C de 4 ve 6 saatlik borlama işlemine tabi tutulan numunelerin aşınma direnci karşılaştırıldığında, 4 saat borlanan numunenin aşınma davranışının daha iyi olduğu belirlenmiştir. Bu durumun yapı içerisinde oluşan bor bileşiklerinin kristal yapısına ve hacimsel oranına bağlı olduğu gözlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada piyasada oldukça yaygın olarak kullanılan ıslah çeliklerinden biri olan 5140 çeliğine 950 °C de 4 ve 6 saat süreli katı borlama işlemi uygulanmıştır. Katı borlama işlemi Baybora-1 isimli yerli borlama ajanı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler neticesinde; mikro yapı, sertlik, aşınma ve bazı mekanik özellikler incelenmiştir. Bu işlemler neticesinde 4 ve 6 saatlik gerçekleştirilen katı borlama neticesinde 6 saatlik borlama neticesinde hem yüzeyde oluşan borür tabakası kalınlığının hem de elde edilen sertlik değerlerinin 4 saatlik borlama süresine göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sertlik ölçümleri sırasında; borür, geçiş ve ana fazdan oluşan üç farklı bölgenin oluştuğu belirlenmiştir. Borlama işlemi neticesinde yapıda FeB ve Fe₂B' den oluşan fazlar tespit edilmiştir. Bu yapılardan dış kısımda oluşan ve gevrek bir faz olmasından dolayı istenmeyen FeB ile yüksek sertliğe sahip ve iç kısımda oluşan Fe₂B'dir. 4 ve 6 saatlik iki farklı borlama süresi karşılaştırıldığında 4 saatlik borlama süresinin daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Borlama işlemiyle malzemenin aşınma direncinin 4 katlık bir iyileşme gösterdiği tespit edilmiştir. İşlemler esnasında kullanılan Baybora-1 isimli yerli borlama ajanının ithal borlama ajanlarıyla yaklaşık aynı sonuçları verdiği gözlemlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma KKU-BAP tarafından 2017/79 kod no'lu proje ile desteklenmiştir. Söz konusu kuruma verdiği mali destekten ötürü teşekkür ederiz.

REFERANSLAR

- A.Calik, O.Ozbakir and Karakas; Investigation of the erosive wear resistance of boronized ash-blowing nozzles; Acta Phys. Pol. A131, 252(2017)
- B. Matijevic; Evaluation of boride layer growth on carbon steel surfaces; Met. Sci. Heat. Treat. 56, 269 (2014)
- B. Selcuk; A study on friction and wear behaviour of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115 steels; J .Mater. Process .Technol.141,189(2003)
- B.Venkataraman and G.Sundararajan; The high speed sliding wear behaviour of boronized medium carbon steel; Surf. Coat. Tech. 73, 177(1995)

- C.Martini, G.Palombarini, G.Poli and D.Prandstraller; Sliding and abraive wear behavior of boride coating; *Wear* 256, 608 2004
- E.Atık, U.Yunker and C. Meric; The effect of conventional heat treatment and boronizing on abrasive wear and corosion of SAE 1010,SAE 1040, D2 and 304 steels;*Tribol. Int.*36, 155(2003)
- H. Hazar ; Investigation of the effects of tripropylene glycol addition to diesel fiel on combustion and exhaust emissions at an isolated diesel engine ; *Energ. Convers. Manege* 142, 62 (2017)
- H.J.Hunger and G.Trute; Boronizing to produce wear-resistant surface layers; *Heat. Treat. Met.* 21, 31 (1994)
- Khoee, S.M.M., Ergimiş Boraks Banyosunda Çeliklere Vanadyum Karbür Kaplama, İ.T.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi,112s, İstanbul, 1992.
- M.Bejar and E. Moreno; Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels; *J. Mater. Process., Technol.* 173, 352 (2006)
- M. Kulka, N. Makuch, A. Petek and L. Maldzinski; Simulation of the growth kinetics of boride layers formed on Fe during gas boriding in H₂-BCl₃ atmosphere ; *J. Solid. State. Chem.* 199, 196(2013)
- T.T. Dele –Afolabi , M. A. A. Hanim, M. Norkhairunnisa, S. Sobri and R. Calin ; Research trend in the development of macroporous ceramic compenents by pore forming addivites from naturel organic matters: A. short review; *Ceram. Int.* 43,1633 (2017)
- Ünlü B., Yılmaz S., “Bor ve Borlamanın Kullanım Alanları” *Mühendis ve Makine* sayı:552, cilt:47, 2006
- Y.Azakli and M. Tarakci; Microstructural characterisation of boried binary Fe-W alloys ; *Surf. Eng.* 34, 226(2018)
- X.Chong, Y. Jiang , R. Zhou and J. Feng ; Stability, chemical bonding behaviour, elastic properties and lattice thermal conductivity of molybdenum and tungsten borides under hydrostatic pressure ; *Ceram. Int.* 42,2117 (2016)