

1040 Kalite Çeliğin Korozif Aşınma Davranışına Farklı Oranlarda İlave Edilen Borun Etkisi

Engin ÇEVİK^{1*}, Ferhat SARIÇAM²

¹ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye

² Teknoloji Transfer Ofisi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye

*¹ engincevik@karabuk.edu.tr, ² ferhatsrcm78@hotmail.com

(Geliş/Received: 04/01/2021;

Kabul/Accepted: 12/04/2021)

Öz: Bu çalışmada; farklı oranlarda (3-15-30 ppm) bor ilavesi ile üretilen 1040 kalite ıslah çeliklerinin korozif aşınma davranışları incelenmiştir. Yapılan çalışma ile korozif ortamda aşınmaya maruz kalan çeliklerin aşınma dayanımının artırılması ve bu şartlar altında ilave edilebilecek maksimum bor miktarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, farklı oranlarda bor ilave edilen 1040 kalite ticari çelikler, korozif aşınma davranışlarının belirlenmesi amacıyla ağırlıkça %3,5 sodyum klorür (NaCl) içeren çözelti içerisinde, 10, 20 ve 40 N olmak üzere üç farklı yük altında korozif aşınma testlerine tabi tutulmuşlardır. Sonrasında aşınma sonrası hacimsel kayıpları belirlemek için yüzey profilometresi çalışmaları yapılmıştır. Son olarak aşınmış yüzey görüntüleri için taramalı elektron mikroskopundan faydalanılarak aşınma karakteristikleri belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda 1040 kalite çeliklerde 15 ppm'e kadar ilave edilen bor, mekanik ve tribolojik özellikler açısından pozitif etki gösterirken bu orandan sonra negatif etki göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Bor, AISI 1040, korozif aşınma.

Effect of Boron Addition on Corrosive Wear Behaviour of AISI 1040 Steel

Abstract: In this study; the corrosive wear behaviour of 1040 quality steels produced with the addition of boron in different proportions (3-15-30 ppm) was investigated. With this study, it is aimed to increase the wear resistance of steels exposed to abrasion in corrosive environment and to determine the maximum amount of boron that can be added under these conditions. In this context, 1040 grade commercial steels with different proportions of boron were subjected to corrosive wear tests under three different loads (10, 20 and 40 N) in 3.5% sodium chloride (NaCl) solution to determine their corrosive wear behaviour. Subsequently, surface profilometry studies were conducted to determine volumetric losses after wear tests. Finally utilizing a scanning electron microscope images of worn surfaces for wear characteristics were determined. In the studies carried out, boron added up to 15 ppm in 1040 quality steels showed a positive effect in terms of mechanical and tribological properties, but after this rate, it had a negative effect.

Key words: Boron, AISI 1040, corrosive wear.

1. Giriş

Çelik uzun yıllardır kullanılmasına rağmen hala gelişmeye açık bir malzeme olarak ön plana çıkmaktadır. Örneğin; çeliklerin kimyasal bileşimleri optimize edilerek fiziksel özellikleri geliştirilebilmektedir. Hammadde sorunu yaşanmayacak bir elementin ilavesi ile imalat sektöründe hâlihazırda kullanılan çeliklerin özelliklerinin iyileştirilmesinin endüstriye bir katma değer kazandıracığı düşünülmektedir. Bilindiği üzere, dünya bor rezervinin %73'lük kısmı ülkemiz topraklarında bulunmaktadır. Bunun yanında bor, çeliklere ilave edildiğinde daha üstün aşınma, korozyon ve mukavemet özellikleri kazandırmaktadır [1-9].

Bor ve bor bileşikler makine ve metalürji sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Demir esaslı malzemelerde alaşım elemanı olarak kullanıldığında borun %0,1'in altında olması gerekir [1, 10]. Çünkü bu oranın üzerinde ilave edilen bor miktarları çeliklerde yüksek sıcaklıkta kırılmalara, dökme demirde ise çatlamalara neden olur [1]. Bor çeliklerde % 0,007 oranına kadar sertleştirme derinliğini artırır, dökme demirlerde ise % 0,005'e kadar grafitin çekirdeklenmesine ve yapının düzgün bir şekilde dağılmasına sebep olur [1, 3]. Takım çeliklerine bor ilavesi sertleşme kabiliyetini arttırmaktadır [1,4]. Paslanmaz çeliğe ppm mertebesinde bor ilavesi, kaynak kabiliyetini, sürünme direncini, taneler arası korozyon direncini, nötron absorpsiyon kapasitesini arttırmakta, sıcak yırtılmaları önlemektedir [1]. Uzunsoy, % 0,6 oranında bor ilavesinin 316 kalite paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerini pozitif yönde etkilediğini ve aşınma hızını düşürdüğünü rapor etmiştir [11]. Diğer

* Sorumlu yazar: engincevik@karabuk.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-4863-8762, ² 0000-0001-8319-7459

yandan Çarboğa yapmış olduğu çalışmada 1040 çeliklerinde bor ilavesinin belirli bir orana (23 ppm) kadar aşınma dayanımını arttırdığını bu oran sonrasında aşınma dayanımını olumsuz etkilediğini rapor etmişlerdir [10].

Bor ilavesinin çeliklerin korozyon davranışlarına olan etkilerine baktığımızda ise farklı türde çelikler için farklı sonuçlar karşımıza çıkmaktadır. Düşük karbonlu beynitik çeliklere yapılan bor ilavesi korozyon direncini artırırken Reyes vd. yapmış olduğu çalışmada ise TWIP çeliklerine yapılan bor ilavesi korozyon direncini olumsuz yönde etkilemektedir [1, 12, 13]. Karacif ve arkadaşları tarafından SAE 1020 çeliğine alaşım elementi olarak ppm mertebesinde ilave edilen bor elementi bütün oranlarda korozyon direncini olumsuz yönde etkilemiştir [14].

Orta karbonlu çelikler, mukavemeti ve yüksek sertliği nedeniyle mühendislik, madencilik, inşaat ve ziraat alanlarında yaygın olarak kullanılır [10]. İmalat sektöründe aşınma kaynaklı problemlerin önüne geçilebilmesi amacıyla ıslah çelikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat özellikle korozif ortam söz konusu olduğunda kullanılan çelik malzemelerin aşınma hızı artmakta ve bu da malzeme ve ekonomik kayıplara yol açmaktadır.

Borlu çelikler üzerinde farklı çalışmalar yapılmıştır. Fakat bu çalışmaların tamamı ya aşınma davranışlarının belirlenmesine ya da bor kaplama yapılarak korozyon dirençlerinin geliştirilmesine yöneliktir. Yapılan literatür incelemesinde korozif aşınma direncine yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Yapmış olduğumuz çalışmada ise endüstriyel uygulamalarda oldukça yaygın biçimde kullanılan 1040 kalite çeliklere belirli oranlarda (3-15-30 ppm) bor elementi ilave edilerek korozif aşınma direncinin geliştirilmesi ve ilave edilecek optimum bor oranının belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, birçok endüstriyel alanda kullanılan 1040 kalite çeliklere Tablo 1' de belirtilen oranlarda bor ilavesi gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon ocağı ile yapılan döküm işlemi esnasında sıvı metali azottan koruma amacıyla 400 ppm titanyum ilavesinde bulunulmuştur [15]. Böylelikle azota karşı ilgisi daha fazla olan Ti ile TiN bileşiği oluşturulması ve borun elementel seviyede alaşımın içerisinde kalması hedeflenmiştir [16]. Korozif aşınma deneyleri için %200 oranında haddelenmiş alaşımların her birinden 20x30x5 mm boyutlarında numuneler çıkarılmıştır.

Tablo 1. Numunelerin spektral analiz sonuçları

Numune Kodu	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Al (%)	Cu (%)	Ti (%)	N (%)	Fe (%)	Ni (%)	Mo (%)	B (ppm)
1B3	0,41	0,21	0,95	0,015	0,008	0,16	0,08	0,061	0,039	0,013	97,92	0,045	0,011	3
1B15	0,41	0,21	0,95	0,015	0,008	0,16	0,08	0,061	0,039	0,013	97,92	0,045	0,011	15
1B30	0,41	0,21	0,95	0,015	0,008	0,16	0,08	0,061	0,039	0,013	97,92	0,045	0,011	30

Mikroyapı incelemesi için numunelere kaba ve ince zımparalama işlemleri sonrasında parlatma ve dağlama (%5 Nitrik Asit-%95 Etanol) işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında mikroyapı incelemeleri ilk olarak Clemex yazılıma sahip Nikon Eclipse MA200 marka optik ışık mikroskobu ve EDX donanımlı Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem SEM cihazı ile yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu çalışmaları korozif aşınma deneyleri sonrasında yüke ve bor içeriğine bağlı olan aşınmış yüzey incelemeleri ile sonlandırılmıştır. Üretilen numunelerin detaylı faz incelemeleri 3 derece/dakika tarama hızında Rigaku marka XRD cihazı ile yapılmıştır.

Numunelerin sertlik ölçümleri vickers (HV5) sertlik yöntemi kullanılarak QNESS marka mikro sertlik cihazında gerçekleştirilmiştir.

Korozif aşınma testleri % 3,5 NaCl çözeltisi içerisinde, üç farklı yük (10 N, 20 N ve 40 N), 60 mm/s aşınma hızı ve 250 metre aşınma mesafesinde UTS Tribometer T 10 test cihazı kullanılarak uygulanmıştır. Bütün testlerde 6 mm çapında 52100 çelik bilye kullanılmıştır. Aşınma deneyleri sonrasında her bir numunede meydana gelen hacimce kayıpların hesaplanabilmesi için, izin derinliğine (h) ve genişliğine (L) bağlı olarak aşınma izinin enine yönünde en az 3 farklı bölgeden ölçüm alınmıştır. Ölçümler 2 mm çapında standart bir prob kullanılarak Mitutoyo SJ-410 yüzey pürüzlülük cihazı ile gerçekleştirilmiş ve aşınma kayıpları cihaza entegre yazılım sayesinde otomatik olarak hesaplanmıştır.

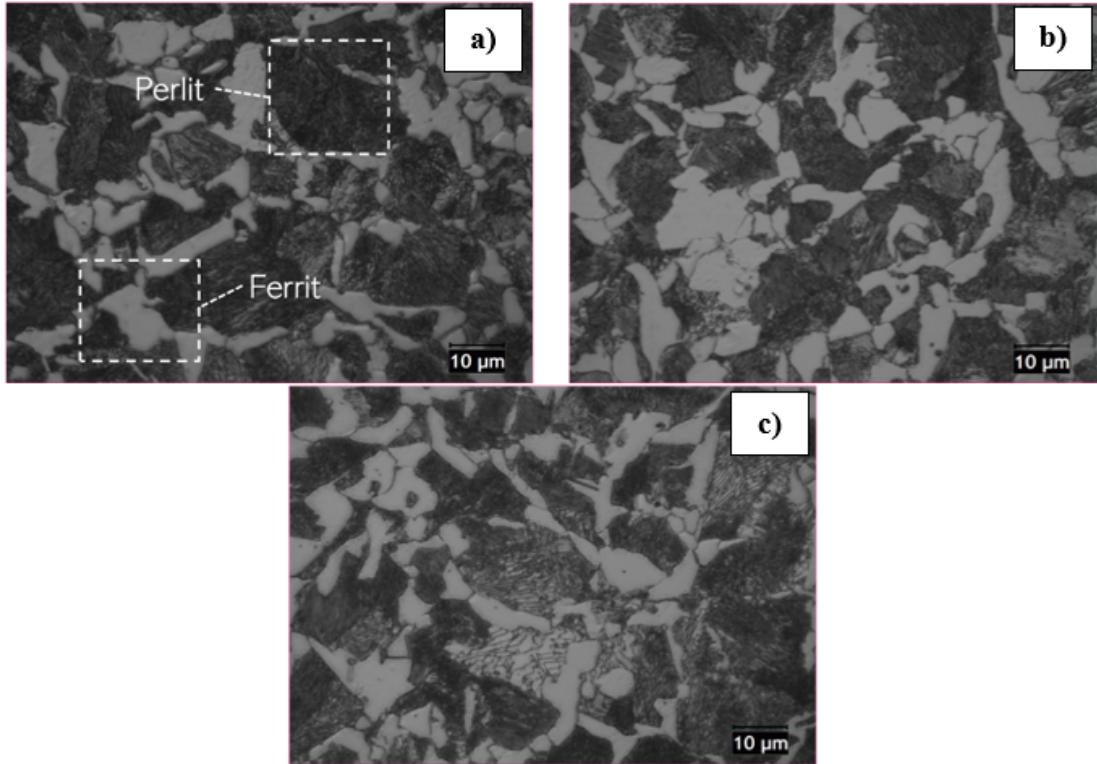
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. XRD ve Mikroyapı Analizleri

3, 15 ve 30 ppm bor içeren 1040 kalite çeliklere ait mikroyapı görüntüleri Şekil 1’de verilmektedir. 3 ppm bor içeren numunelerden alınan mikroyapı görüntülerinden de anlaşıldığı gibi haddeleme sonrası tanelerin dönüşümünün tamamen gerçekleştiği ve perlitin ferrite göre daha yoğun olduğu görülmektedir. Beyaz ile görülen bölgelerde ferrit siyah deniz kabuğu şeklinde görülen bölgelerde ise perlitik yapı hâkimdir.

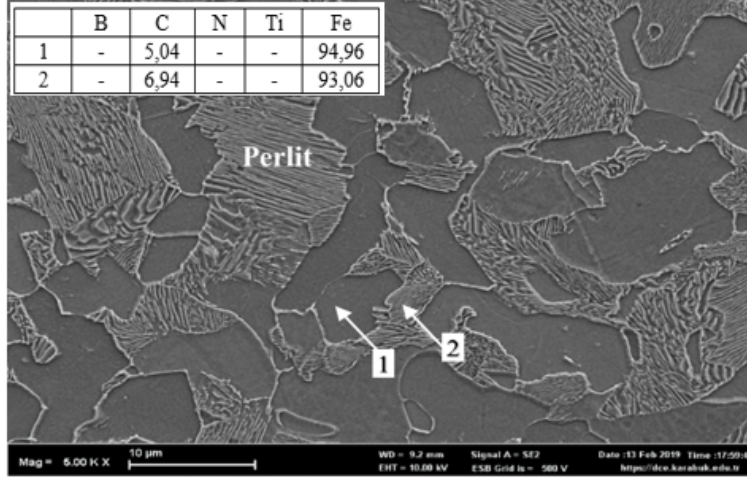
15 ppm bor içeren numuneye ait mikroyapı fotoğraflarında 3 ppm bor içeren malzemelere göre, bor oranının artmasıyla birlikte perlitik yapıda daha belirgin bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Tanelerin eş eksenli olduğu ve perlitik yapının mikroyapıda homojen dağıldığı görülmektedir.

Belirli bir orana kadar ilave edilen bor tane sınırlarını düşürmekte ve ferrit fazının çekirdeklenmesini geciktirmektedir fakat optimum oranın üzerinde yapılan ilavelerde karbürü veya nitrürlü yapıların tane sınırlarında uygun arayüzey sağlayıcı olarak davranması ferrit fazının çekirdeklenmesini de kolaylaştırmaktadır [17-19]. Özellikle bor ilavesi 30 ppm olduğunda mikroyapı fotoğraflarında bu durum (ferrit fazının yoğunluğu) açıkça görülmüştür (Şekil 1-c).



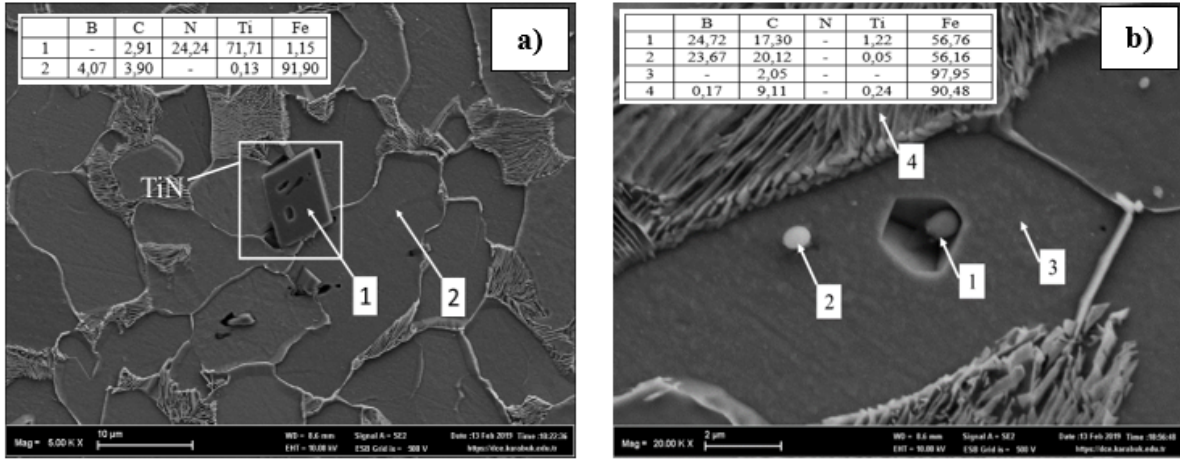
Şekil 1. a)3 ppm b)15 ppm c)30 ppm bor içeren 1040 kalite çeliğe ait numunelerin mikroyapı görüntüleri

SEM analizleri sonucunda ikincil elektron yöntemi kullanılarak mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. EDX nokta analizi sonucunda bor, karbon, azot, titanyum ve demir elementleri tespit edilmiştir.



Şekil 2. 3 ppm bor içeren numuneye ait SEM görüntüsü

3ppm bor içeren numunenin SEM incelemesi sırasında elde edilen mikroyapı görüntüleri ve EDX sonuçları Şekil 2' de verilmiştir. 1 numaralı bölgeler ferrit, 2 numaralı bölgeler ise perlit fazlarından oluşmaktadır.



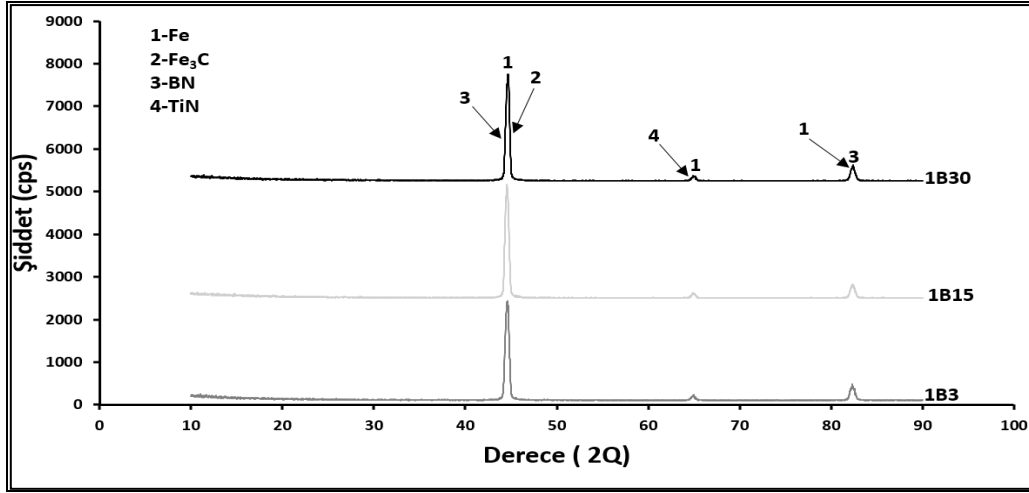
Şekil 3. 30 ppm bor içeren numuneye ait SEM görüntüleri

30 ppm bor içeren numuneye ait 5000 büyütmede SEM görüntüsü ve EDX analizi Şekil 3-a'da verilmiştir. SEM-EDX analizine göre 2 numaralı noktada %4,07 oranında bor olduğu görülmüştür. 1 nolu bölgede ise %24,24 oranında azot ve %71,71 oranında Ti tespit edilmiştir. Yapı içerisindeki bu fazın TiN olduğu düşünülmektedir [1].

30 ppm bor içeren numuneye ait 20000 büyütmede SEM görüntüsü ve EDX analizi Şekil 3-b'de verilmiştir. SEM-EDX analizine göre 1 numaralı noktada % 24,72 oranında bor olduğu görülmüştür.

Ayrıca Şekil 3-b'de 30 ppm bor içeren numuneye ait SEM görüntüsünde farklı boyutlarındaki küresel parçalarda yapılan noktasal analizlerde artan bor oranıyla birlikte özellikle 1 ve 2 nolu bölgelerde yüksek oranlarda bor elementi tespit edilmiştir. Bor oranının artmasıyla birlikte Şekil 3-b de gösterilen küresel noktaların da arttığı tespit edilmiştir. Bor içeren malzemelerde TiN'lere daha az oranlarda rastlanmaktadır.

Farklı oranlarda bor içeren AISI 1040 kalite çeliklere ait XRD analizleri Şekil 4'de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere yapılan XRD analizi yapılan SEM çalışmalarını destekler niteliktedir. Şöyle ki, artan bor ilavesi ile SEM analizinde belirttiğimiz BN ve TiN türü bileşikler XRD analizi ile de tespit edilmiş ve grafikte de gösterilmiştir.



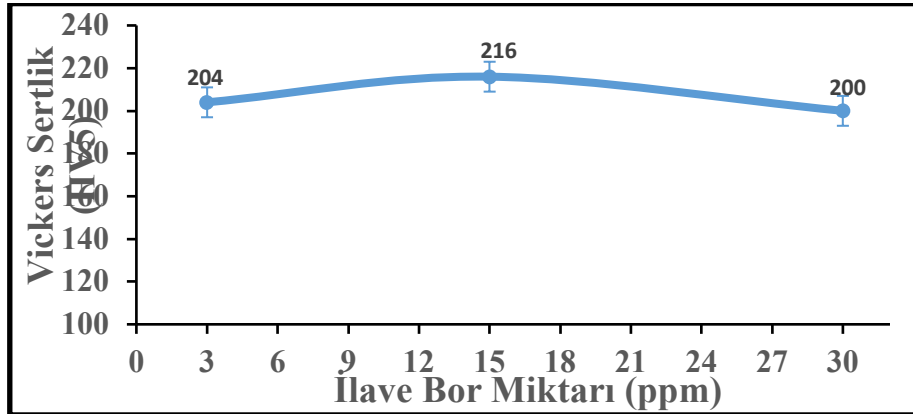
Şekil 4. Farklı oranlarda bor içeren 1040 kalite çeliklere ait XRD sonuçları

3.2. Sertlik testleri

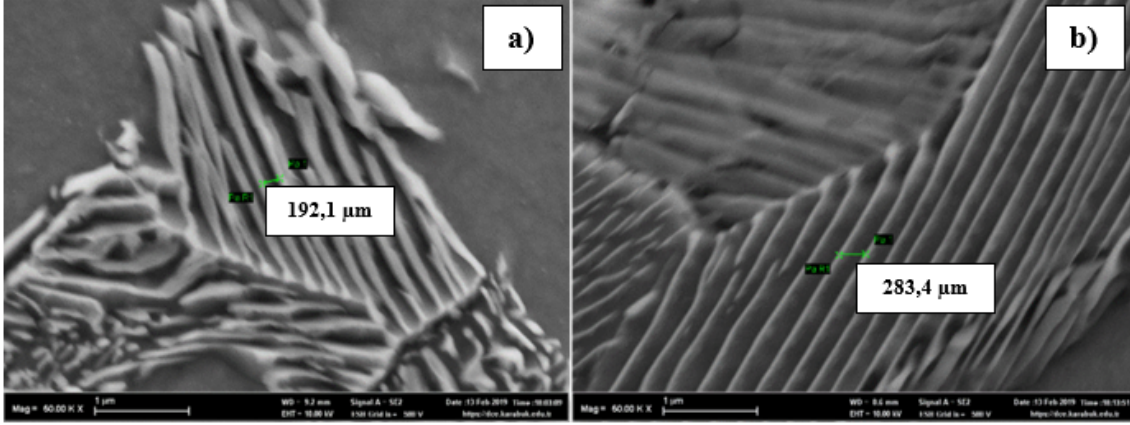
Numunelerde beş farklı bölgeden sertlik ölçümleri yapılmış ve bunların ortalamaları sonuç olarak Şekil 5’ de verilmiştir.

3 ppm bor içeren numune ile 15 ppm bor içeren numune kıyaslandığında %7 civarında sertlik artışı gözlenmiştir. Bu artışın sebebi, 15 ppm bor içeren numunede ferrit fazının daha az olması ve ilave edilen bor ile nitrürlü bileşiklerin oluşma potansiyelinin daha fazla olmasıdır. Çelik alaşımlarına eser miktarda ilave edilen bor, sertleşebilirlikte önemli bir katkı sunmakta olup, TTT diyagramlarındaki ferrit ve perlit burunlarını diyagramın sağna doğru çekmektedir. 1040 çeliklerinde ortalama sertlik sonuçları kıyaslandığında, 15 ppm seviyesindeki bor miktarı sertlik artışı açısından optimum oran olarak görülmüştür. Bu değer üzerinde bor ilavesi sertlikte düşüşe neden olmuştur. Bu durum daha fazla bor ilavesi ile yapı içerisinde homojenlik sağlanamaması ve tane sınırlarında nitrür fazların yoğun olarak birikmesi böylelikle mukavemette düşüşe neden olmasıyla açıklanabilir [17-19].

Yapılan literatür taramasında 17 ppm bor ilavesine kadar bor miktarı ile sertliklerin arttığı gözlenmiştir. 4140 çeliklerine 17 ppm değerinin üzerinde bor katılmasıyla mikroyapıda daha ince tane boyutu ve iğnemsî morfoloji gözlemlenmesine rağmen sertlikte ani düşüş meydana gelmiştir [12]. Genel olarak çelik alaşımlarında hem literatüre göre hem de çalışmamızda yapmış olduğumuz deneysel çalışmalara göre bor ilavesi tane sınır enerjisini düşürerek ferrit fazının çekirdeklenmesini geciktirmesi sebebiyle sertlik artışını sağlamaktadır. Fakat belli bir oranın üzerinde yapılan ilavelerde karbürlü veya nitrürlü yapıların tane sınırlarında uygun arayüzey sağlayıcı olarak davranıp ferrit fazının çekirdeklenmesini kolaylaştırması sebebiyle sertlik değerlerinde azalmalara neden olmaktadır [10, 12, 17, 19].



Şekil 5. Farklı oranlarda bor içeren 1040 kalite çeliklere bor ilavesinin sertliğe etkisi

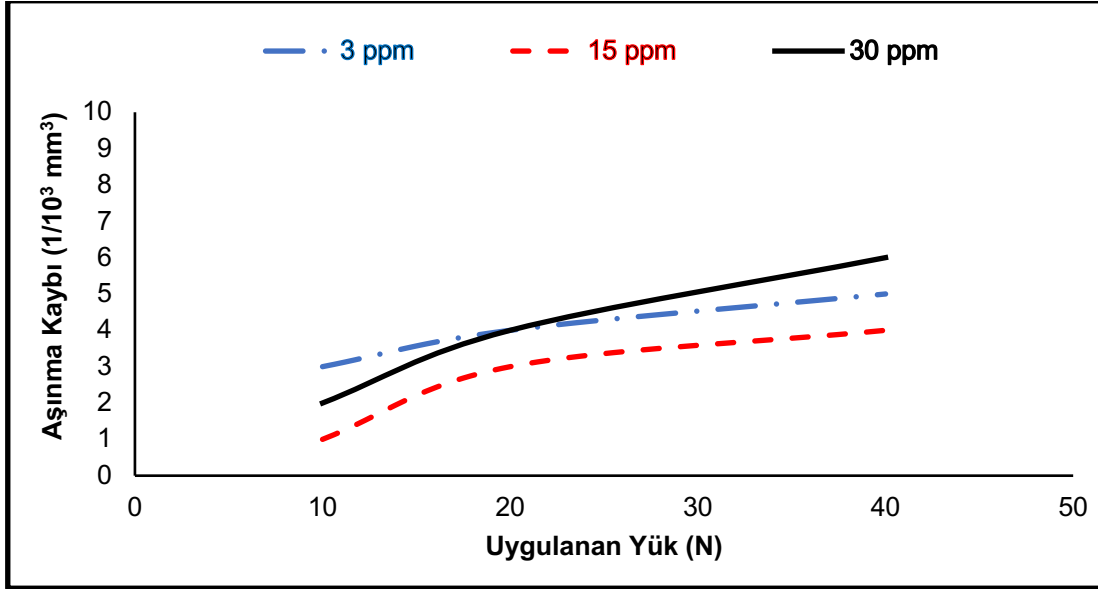


Şekil 6. (a) 3 ppm ve (b) 30 ppm bor içeren numunelere ait SEM görüntüsü.

Diğer yandan bilindiği üzere perlitik çeliklerde lameller arası mesafenin düşürülmesi mekanik özellikleri pozitif yönde etkilemektedir [20]. En düşük ve en yüksek oranda bor içeren 1040 kalite çeliğin perlitik yapısına baktığımızda yüksek oranda ilave edilen bor, ferritin çekirdeklenmesini kolaylaştırdığından, perlit yapıda lameller arası mesafeyi genişlettiği düşünülmektedir. Şekil 6' ya baktığımızda yüksek oranda bor ilavesi sonrası daha geniş lameller arası mesafeye sahip perlit yapısı görülmektedir. Bunun sonucu olarak 30 ppm bor içeren numunede daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir.

3.3. Korozif aşınma testleri

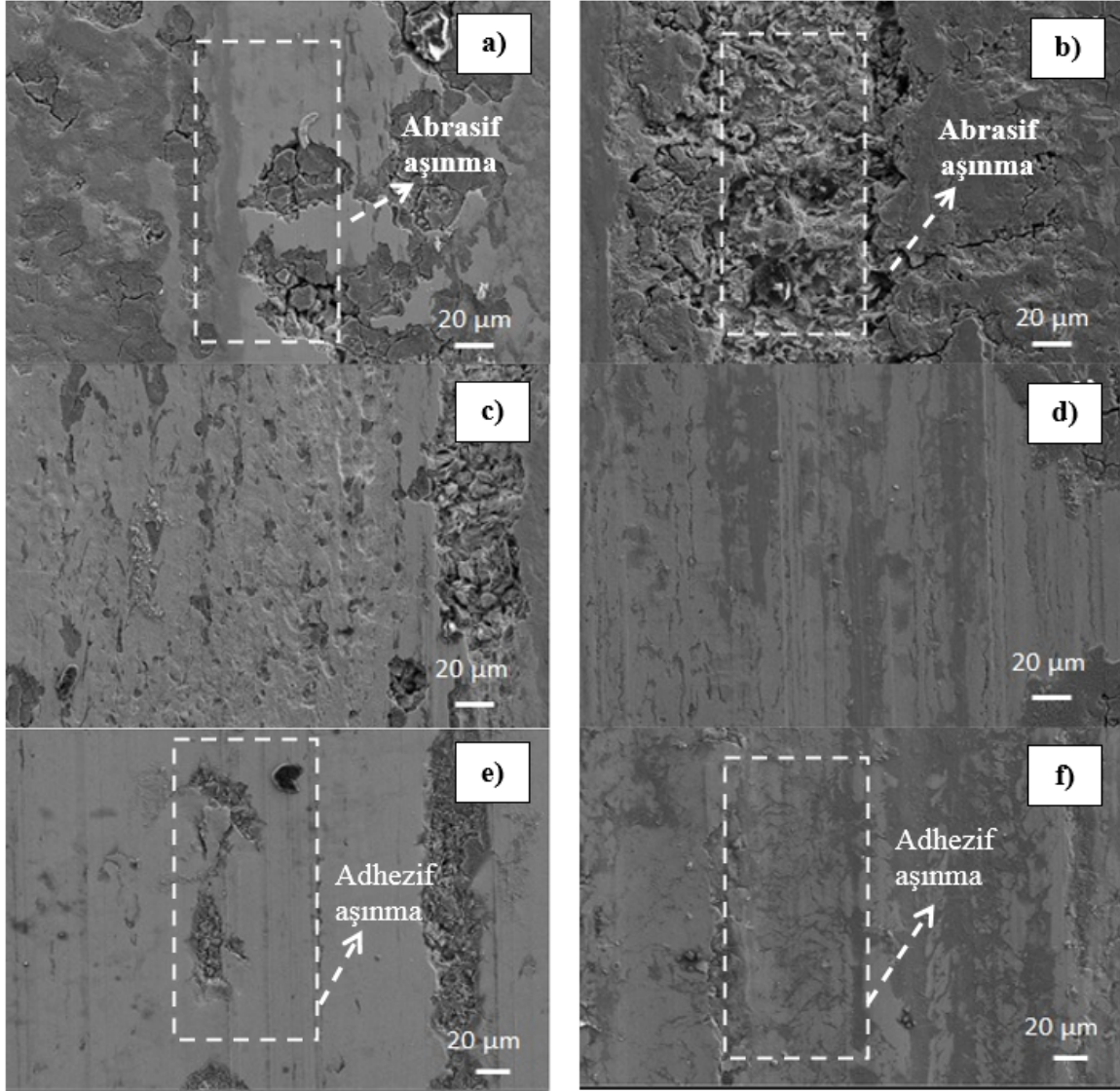
Korozif aşınma testleri sonrası yüzey pürüzlülük ölçümleri alınarak yapılan hacimsel kayıp hesaplamaları Şekil 7' de verilmiştir. Her ne kadar yüksek yükde (40 N) 30 ppm bor içeren numunelerde en yüksek ağırlık kayıpları görülsede özellikle düşük yükte (10 N) artan bor ilavesi ile aşınma dayanımında ciddi oranlarda iyileşmeler sağlanmıştır. Bor ilavesi ile aşınma kaybının azalmasının borun çeliğin sertleşebilirliğine olan pozitif katkısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca bor ilavesi ile oluşan BN ve TiN gibi ikincil fazların aşınma dayanımını arttırdığı görülmektedir. 1040 kalite çelikleri değerlendirdiğimizde hem düşük hem de yüksek yüklerde en yüksek aşınma dayanımı 15 ppm bor ilavesi ile elde edilmiştir. Fakat yüksek yüklerde 15 ppm bor ilavesinin üzerinde bor ilavesi yapıldığında oluşan ikincil fazlar ferrit alanını genişlettiğinden sertlikte düşümlere neden olduğu için en yüksek aşınma kayıpları da 30 ppm bor içeren numunede gerçekleşmiştir.



Şekil 7. 1040 kalite çelikler için uygulanan yüke bağlı olarak hacimce aşınma kayıpları

Aşınmanın genel bir kuralı olarak, malzemenin sertliğinin artması aşınma direncini artırır. Ancak bu sertlik artışı sonunda eğer malzeme gevrekleşiyorsa yüksek yüklerde aşınma direnci olumsuz yönde etkilenebilir. Şekil 7'ye baktığımızda 10 N yük uygulandığında 30 ppm bor içeren numune 3 ppm bor içeren numuneye kıyasla daha yüksek aşınma dayanımı göstermektedir. 20 ve 40 N aşınma yüklerinde ise tam tersi durumla karşılaşmıştır. Yüksek yüklerde aşınma esnasında bor ve titanyum ilavesi ile yapıda çökelen ikincil fazların ve partiküllerin yüksek yüklerde yapıdan koparak ağırlık kaybını arttırdığı düşünülmektedir.

Görülen bu hacimsel kayıplar sertlik sonuçlarıyla da uyumludur. Diğer yandan Cheng vd. çeliklerin korozyonunun iki aşamada gerçekleştiğini belirtmiştir. İlk aşamayı pasif bir oksit tabakasının oluşumu, ikinci aşamayı ise bu tabakanın tahrip olup oyuklanmanın gerçekleşmesi olarak tanımlamışlardır [21]. Yapmış olduğumuz korozyon testlerinde hem korozyon hem de sürtünmenin etkisi düşünüldüğünde korozyon ortamı nedeniyle serbestleşen ikincil fazların sürtünmenin etkisi ile yapıdan ayrılıp aşınma kayıplarını arttırdığı düşünülmektedir.



Şekil 8. 3 ppm bor içeren (a) 10N (c) 20N (e) 40N ve 30 ppm bor içeren (b) 10N (d) 20N (f) 40N numuneye ait aşınma SEM görüntüleri

Archard yasasına göre bir malzemenin sertliği ne kadar yüksek olursa yüzeydeki aşınma kaybı daha az olur ve aşınma direnci daha yüksek olması beklenir. Sertlik sonuçları da göz önünde bulundurulduğunda aşınma performansları ve sertlik direnci bor ilavesiyle gelişmiş fakat belli bir eşik değeri aşıldığında aşınma performansının olumsuz yönde etkilendiği görülmüştür. Sonuç olarak, aşınma direncinin artması ve aşınma derinliğinin daha az olması yapı içerisindeki yağlayıcı özellik gösterebilen bor ilavesinin yüzey sertliğini önemli bir ölçüde artırmasına ve numune ile karşıt malzeme arasındaki temas alanının azaltılmasına bağlıdır.

Şekil 8’de 3 ppm ve 30 ppm oranında B ilave edilmiş numunelerin farklı yükler altındaki aşınmış yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. Numunelerin genel olarak daha sert bir yüzeye karşı abrasif bir aşınmaya ve plastik deformasyona maruz kaldıkları görülmektedir. Aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntülerine baktığımızda düşük yüklerde korozyonun daha aktif olduğu görülmekte abrasif aşınmaya ilaveten korozif aşınma görülmektedir. Yüksek yüklerde baktığımızda ise daha çok adhezif aşınma karakteristiği görülmektedir. Şöyle ki yüksek yüklerde aşınma iz genişliği ve derinliği artarken aşınma neticesinde kopan malzemelerin yüksek yük etkisinde yüzeye sıvandığı tespit edilmiştir. Eşik değer üzerinde yapılan bor ilavesi sonucunda yapı içerisinde oluşan BN, TiN vb. fazların yüksek yüklerde kopup ayrılmasıyla yüzeyde görülen oyuklanmaların da arttığı görülmüştür.

4. Genel Sonuçlar

Ticari 1040 kalite ıslah çeliklerine farklı oranlarda bor ilavesi yapılarak vakumsuz indüksiyon ocağında alaşımlama işlemi gerçekleştirilmiş ve üretilen alaşımların mikroyapı incelemeleri, sertlik ve metal-metal korozif aşınma deneylerinden aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir.

1. Üretilen alaşımlarda bor ve titanyum ilavesi sonrasında SEM'in EDX dedektörü ile BN, BC ve TiN fazlarının oluşumu tespit edilmiştir. Artan bor ilavesi ile oluşan bu fazların hacminin ve miktarının arttığı belirlenmiştir. 15 ppm' in üzerinde yapılan bor ilavesi sonrası perlitik yapıda lameller arası mesafenin genişlediği tespit edilmiştir.
2. 1040 kalite çeliklere 15 ppm bor ilavesi sonrasında alınan sertlik değerlerinde %7 oranında bir artış kaydedilmiştir.
3. Aşınma yükünün artması ile ağırlık kayıplarında artış gözlenmiştir. 1040 kalite çelikte 15 ppm'e kadar ilave edilen bor ile uygulanan bütün yüklerde aşınma dayanımında artış gözlenmiştir.
4. 30 ppm bor ilavesi hem sertlik değerlerini hem de korozif aşınma dayanımını olumsuz olarak etkilemiştir.
5. Aşınma sonrası SEM fotoğraflarına göre düşük yüklerde korozif ve abrasif aşınma mekanizması görülürken yüksek yüklerde daha çok adhezif aşınma mekanizmasının hâkim olduğu görülmüştür.

5. Teşekkür

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan ettiler.

Kaynaklar

- [1] Çarboğa C. Düşük karbonlu çeliklere bor ilavesinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi. Doktora Tezi 2010; Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [2] Wang Z, Li Y, Wang G, Liu H. Effects of boron content on the microstructure and mechanical properties of twin-roll strip casting borated steel sheets. *Mater. Sci. Eng. A* 2020; 793, 1-14.
- [3] Murathan ÖF, Kocatepe K, Erdoğan M. The effect of high boron additions on the microstructure of cast steel. *Bor Dergisi* 2020; 5(2), 108-114.
- [4] Musa M, Mohammed AG, Muhammad A. Wear properties of boron added high strength low alloy (HSLA) SAE 8620 steel. *Journal of Metals, Materials and Minerals* 2018; 28 (1), 22-29.
- [5] Wang XM, He XL. Effect of boron addition on structure and properties of low carbon bainitic steels. *ISIJ Int.* 2002; 42, 621-633.
- [6] He B, Xiu W, Huang M. Effect of boron on bainitic transformation kinetics after ausforming in low carbon steels. *J. Mater. Sci. Technol.* 2017; 33 (12), 1494-1503.
- [7] Frydman S, Letkowska B. Properties of boron steel after different heat treatments. *IX International Congress Machines, Technologies, Materials* 2012; 72-74.
- [8] Aydın E. Isıl işlem parametrelerinin bor katkılı östenitik çelik üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi 2011; İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] Turkan, N. Bor alaşımlı çelikler ve yüksek zorlamalara karşı kullanılan bor alaşımlı yeni semantasyon çelikleri. *Bilimsel Madencilik Dergisi* 1963; 3 (11), 743-748.
- [10] Çarboğa C, Kurt B, Dal S. Investigation of wear and microstructure properties of AISI 1040 steel with different boron content. *UDCS' 19 Fourth International Iron and Steel Symposium* 2019; 482-484.
- [11] Uzunsoy D. Investigation of dry sliding wear properties of boron doped powder metallurgy 316L stainless steel. *Mater. Des.* 2010; 31, 3896-3900.
- [12] Aksoy T. Farklı oranlarda bor ilavesinin 4140 çeliğinin korozif aşınma özelliklerine etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi 2019; Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [13] Reyes AE, Guerrero GA, Alvarez FF, Alcalá JFC, Salinas A, Figueroa IA, Rodríguez GL. Influence of the as-cast and cold rolled microstructural conditions over corrosion resistance in an advanced TWIP steel microalloyed with boron. *J. Mater. Res. Technol.* 2020; 9 (3), 4034-4043.
- [14] Karacif K, Çarboğa C, ve Candemir D. Düşük oranlarda bor içeren az karbonlu çeliklerin asidik ve tuzlu ortamlarda korozyon özelliklerinin incelenmesi. *Bor Dergisi.* 2019; 4 (1) , 39-45.
- [15] Llewellyn, DT and Cook WT. Metallurgy of boron-treated low-alloy steels. *Metals Technology.* 1974; 1 (1), 517-529.
- [16] Taylor KA and Hansen, SS. The boron hardenability effect in thermomechanically processed, direct-quenched 0.2 Pct C steels. *Metallurgical Transactions A.* 1990; 21 (6), 1697-1708.
- [17] Fountain RW, Chipman J. Solubility and Precipitation of Boron Nitride in Iron-Boron Alloys. *Transactions Of The Metallurgical Society of AIME* 1962; 224, 599-606.
- [18] Karlsson L, Nordén H, Odelius, H. Non-equilibrium grain boundary segregation of boron in austenitic stainless steel-I. Large scale segregation behaviour. *Acta Metall. Sinica* 1988; 36 (1), 1-12.

- [19] Morral JE, Cameron TB. A model for ferrite nucleation applied to boron hardenability. *Metall. Trans. A* 2007, 8 (11), 1817–1819.
- [20] Özcan MM. Mikroalaşımli ve sementasyon çeliklerinin yorulma davranışlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi 2005; İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [21] Cheng YF, Wilmott M, Luo JL. Role of chloride ions in pitting of carbon steel studied by the statistical analysis of electrochemical noise. *Appl. Surf. Sci.* 1999; 152 (3), 161–168.