

Sertleştirilmiş AISI 51B60H Borlu Çeliğinin Abrazif Aşınma Davranışı

Ümit Er¹

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye

*(umiter@ogu.edu.tr)

Özet – Günümüzde çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanımı gün geçtikçe artmakta olan malzemelerden biri de borlu çeliklerdir. Borlu çelikler gösterdikleri üstün aşınma özellikleri ile dikkat çekmelerine rağmen tribolojik özellikleri ile ilgili çalışmalar literatürde oldukça kısıtlıdır. Bu yüzden, bu tip malzemelerin tribolojik özelliklerinin incelenmesi üzerine yapılan araştırmaların büyük önem taşıdığı bir gerçektir. Bu çalışmada; işlemsiz ve ısıl işlemlili (suda su verilerek sertleştirilmiş + temperlenmiş) AISI 51B60H borlu çelik numunelerin; mikroyapı analizleri, sertlik ölçümleri ve iki farklı aşındırıcı (Al_2O_3 ve SiC’lü zımpara kağıtları) karşısındaki abrazif aşınma davranışları laboratuvar ortamında incelenmiştir. Deneyler sonucunda, ısıl işlemlili AISI 51B60H borlu çelik numunelerin işlemsiz hallerine göre sertlik değerlerinde 2 kat, abrazif aşınma dayanımlarında ise alüminyum oksitli aşındırıcı karşısında (Al_2O_3) 1.5 kat ve silisyum karbürü (SiC) aşındırıcı karşısında 1.2 katlık artışlar elde edilmiştir. Yapılan çalışmanın sonunda, suda su verilerek sertleştirilip temperleme ısıl işlemi uygulanmış AISI 51B60H borlu çeliğinin, abrazif aşınmaya maruz mühendislik uygulamalarında diğer bilinen makine imalat çeliklerine iyi bir alternatif olabileceği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler – AISI 51B60H çeliği, borlu çelikler, abrazif aşınma, aşınma, suda su verme

Abrasive Wear Behaviour of Hardened AISI 51B60H Boron Steel

Abstract – One of the materials that are increasingly used today in various engineering applications is boron steels. Though boron steels draw attentions with their superior wear characteristics, studies on the tribological properties of these materials is quite limited in the literature. Therefore, investigations of the tribological properties of these materials have great importance. In this study; untreated and heat treated (water-quenched and tempered) AISI 51B60H boron steel specimens were prepared. Microstructure analyzes, hardness measurements and abrasive wear behaviour of these material against two different abrasives (Al_2O_3 and SiC abrasive papers) were investigated in the laboratory conditions. As a result of the experiments, hardness values of heat treated AISI 51B60H boron steel specimens were increased 2 times, abrasive wear resistance was increased 1.5 times against aluminum oxide abrasives (Al_2O_3) and 1.2 times against silicon carbide (SiC) abrasives comparing to untreated ones. As a result of the study, it is concluded that the water-quenched and tempered AISI 51B60H boron steel can be good alternative to other widely known machine manufacturing steels in engineering applications where abrasive wear exist.

Keywords – AISI 51B60H steel, boron steels, abrasive wear, wear, water quenching

I. GİRİŞ

Temas halinde bulunan iki cismin bir kuvvet etkisi altında birbirleriyle bağıl hareketleri sonucunda malzeme kayıplarına uğramaları yani aşınmaları kaçınılmazdır. Adhezif, abrazif, erozif ve yorulma aşınması gibi alt dallara ayırabileceğimiz mekanik aşınma türleri içerisinde endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan aşınma sorunlarının %50’sinin abrazif aşınmadan kaynaklandığı bildirilmiştir [1]. Abrazif aşınma; madencilik uygulamalarında, minerallerin işlenmesinde, yer ve toprak işlemede ve diğer pek çok uygulamada karşımıza çıkmaktadır. Ekonomik önemi ortada olan bu konu üzerinde araştırmacılar, yeni malzeme ve/veya kullanılan malzemelerin özelliklerini iyileştirme konularında çalışmalarını sürdürmektedirler. Genel olarak, malzemelerin sertliği ile aşınma dayanımları arasında bir doğru orantı olsa da, bu durum özellikle abrazif aşınma sözkonusu olduğunda, kesin bir kural olmayıp etkili diğer faktörlerin yarattığı şartlara göre değişebilmektedir. Örneğin, tarlada çalışan bir uç demirinin aşınması üzerinde; kullanılan malzemenin kaynaklanan faktörlerin yanı sıra toprağın yapısı, yoğunluğu, nemi, direnci, içinde bulunan taşların cinsi, büyüklüğü,

miktarı ve sürme derinliği, hızı, çarpma açısı gibi faktörlerinde etkili olduğu da bilinmektedir [2-4]. Çalışma koşullarındaki tüm bu ve benzer etken faktörler aşınmayı malzemenin mekanik özellikleriyle (örneğin sertlik) kolay açıklanabilir basit bir aşınma olayı olmaktan uzaklaştırmakta, daha karmaşık bir aşınma olayına doğru sürüklemektedir [2]. Bu da, farklı çalışma koşullarında (örn. farklı karşıt cisimler karşısında) malzemelerin aşınma dayanımlarının laboratuvar ve/veya gerçek çalışma koşullarında incelenmesinin önemini ortaya çıkarmaktadır.

Makina imalat sanayinde yüksek dayanım istenen durumlarda veya zorlu koşullarda çalışacak iş parçalarında alaşimsız çeliklerin özellikleri çoğu zaman yeterli olamamaktadır. Bu yüzden alaşım elementleri ilavesi ile özellikleri iyileştirilmiş çeliklerin kullanımı ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Çelik endüstrisinde kullanılan alaşım elementlerinden biri de bor’dur ve bor, alaşım elementi olarak katıldığı çeliğe yüksek oranda sertleşme kabiliyeti kazandırması ile tanınır. Yapılan çalışmalarda, çok az miktarlarda bor elementinin ağırlıkça %0.65’e kadar karbon

içeren çeliklerde sertleşebilirliği diğer alaşım elementlerine göre oldukça önemli oranlarda arttırdığı belirtilmiştir [5-8]. Düşük alaşımli çeliklerde sertleşebilirlikteki en büyük artışın 20 – 40 ppm bor elementi ilavesi ile elde edildiği [9], yaklaşık bu oranlarda (30 ppm) bor elementi ilavesinin sertleşebilirlikte %0.6 Mn, %0.7 Cr, %0.5 Mo veya % 1.5 Ni ilavesine eşdeğer artışlar sağladığı bildirilmiştir [10].

Borlu çelikler, uygulanan ısıl işlemler sonrasında yüksek sertlik değerlerine ulaştıkları ve aynı zamanda sürtünmeye ve aşınmaya karşı çok iyi direnç gösterdikleri için ziraat aletleri, toprak işleyen aktif uçlar ve madencilik ekipmanları gibi ağır çalışma koşullarındaki uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadırlar [5,11,12]. Bunun yanı sıra, özellikle son yıllarda otomotiv üreticileri tarafından borlu çeliklerin, yapısal parçalarda hafiflik elde etmek ve darbelere maruz kalabilecek yerlerde sürücü ve yolcu güvenliğini arttırmak amacıyla da kullanılmaya başladıkları bilinmektedir [5,7,10,12]. Otomotiv sektöründe, yüksek dayanımlı borlu çelik (22MnB5) sacların sıcak şekillendirme ile kullanımının ön plana çıktığı görülmektedir [13]. Yüksek dayanımlı çeliklerin sıcak şekillendirilmesinin ana avantajı mükemmel geometrik hassasiyet ve neredeyse hiç geri yaylanma olmaksızın imalatın mümkün olmasıdır [13-15]. Borlu çeliklerin kullanımına örnek verebilecek diğer uygulama alanları ise forklift kolları [16], kar küreme araçlarının iş gören kısımları, tank paletleri, taş kırıcı ve öğütücüler, keçe tırnakları [17], petrol boru hatları ve genel makine imalatıdır [18]. Araştırmacıların, borlu çeliklerin balistik özelliklerinin [19] ve tren teker/ray malzemesi olarak kullanımı durumunda oluşabilecek etkileşimlerinin incelenmesi [12,20] gibi farklı kullanım alanlarına dönük çalışmaları ise bu tip malzemelere olan ilginin bir kanıtını ortaya koymaktadır.

Borlu çeliklerin tribolojik özelliklerini inceleyen az sayıda çalışma olduğu literatür taraması sonunda anlaşılmaktadır [5,12,21-28]. Bu nedenle esas olarak çalışmada, makine mühendisliği uygulamalarında kendine geniş kullanım alanı bulabilecek bu tip çelikler ile ilgili bilgi birikiminin artmasına katkıda bulunmak amaçlanmıştır. Bu doğrultuda yapılan çalışmada, ısıl işlem uygulanmış (suda su verme ile sertleştirme + temperleme) AISI 51B60H borlu çeliğinin abrazif aşınma davranışları laboratuvar şartlarında incelenmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada deney malzemesi olarak AISI 51B60H borlu çeliği incelenmiştir. Deney numunelerin kimyasal bileşimi, Çizelge 1’de verilmiştir.

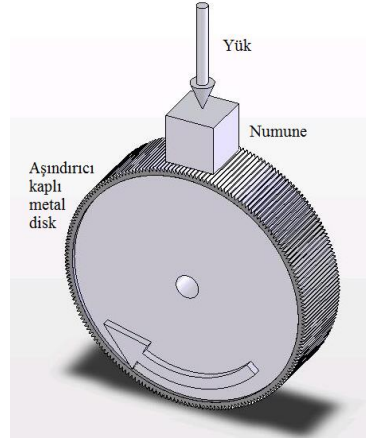
Çizelge 1. 51B60H borlu çeliğinin kimyasal bileşimi

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	B
0,63	0,24	0,91	0,009	0,004	0,87	0,01	0,1	0,0012

Aşınma deneylerinde ve incelemelerde, küp biçiminde (12.7 mm x 12.7 mm x 12.7 mm) kesilmiş her bir şarttan üçer adet numune kullanılmıştır. Isıl işlemler numuneler, suda su verme ve temperleme ısıl işlemleri ile hazırlanmıştır. Isıl işlem fırınında 850 °C östenitleme sıcaklığında 30 dakika bekletilen numuneler oda sıcaklığındaki suda su verilerek

sertleştirilmişlerdir. Sertleştirilen numunelere 200 °C’de 1 saat süre ile temperleme işlemi de uygulanmıştır. Isıl işlemler, Tavsan ısıl işlem firmasında gerçekleştirilmiştir.

Aşınma deneylerinde Plint TE53 marka aşınma test cihazı kullanılmıştır. Aşınma cihazının, aşındırma geometrisine (block on disc) ait şematik şekil, Şekil 1’de görülmektedir. Aşınma deneyleri normal oda sıcaklığı ve nem miktarına sahip laboratuvar ortamında yapılmıştır. Aşındırıcı karşıt cisim olarak alüminyum oksitli (Al₂O₃) ve silisyum karbürü (SiC) 320 gritlik zımpara kağıtları kullanılmıştır. Cihazın aşındırıcı metal diski, çift taraflı yapışkan bant kullanılarak zımpara kağıtları ile kaplanmış ve her deneme için yeni bir zımpara kağıdı kullanılmıştır. Aşınma test cihazında yapılan bu değişim ile iki-cisimli abrazif aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ağırlık kaybı cinsinden tanımlanan aşınma miktarlarının ölçümü, Precisa 125A markalı, 10⁻⁴ gr hassasiyetli hassas terazi ile yapılmıştır.



Şekil 1. Aşınma test düzeneğinin şematik gösterimi

Aşınma deneylerinde aşındırıcı zımpara kağıdı kaplı metal disk ile numune yüzeyi arasındaki temas, 42 N sabit yük ile sağlanmıştır. 42 N yük aşınma test cihazının minimum yüküdür. Tüm aşınma deneylerinde diskin dönme hızı 200 devir/dakika ve aşınmayla oluşan ağırlık kayıpları ise 500, 1500 ve 2500 tur sonunda ölçülmüştür. Aşınma deney şartları, yapılan ön deneylere göre (aşındırıcı karşıt cismin efektif ömrü dikkate alınarak) kararlaştırılmıştır.

Aşınma deneyleri 3'er kez tekrarlanmış ve aritmetik ortalamaları alınarak değerlendirilmiştir. Numunelerin ilk ağırlıkları birbirinden farklı olduğundan karşılaştırmaların daha net yapılabilmesi için aşınma miktarları, ilk ağırlığa göre her tur sonundaki yüzde ağırlık kaybı cinsinden tanımlanmıştır.

Numunelerin makrosertlik değerleri, Zwick 3106 sertlik ölçüm cihazında Rockwell C skalasında ve farklı üç noktadan yapılan ölçüm sonuçları ile bulunmuştur. Metalografik incelemeler için numuneler; Struers Discotom-5 kesme, Struers Tegrapol-21 zımparalama-parlatma ve Struers CitoPress-1 marka kalıplama cihazları kullanılarak hazırlanmışlardır. Mikroyapı görüntüleri Nikon Eclipse L150 optik mikroskopla alınmıştır.

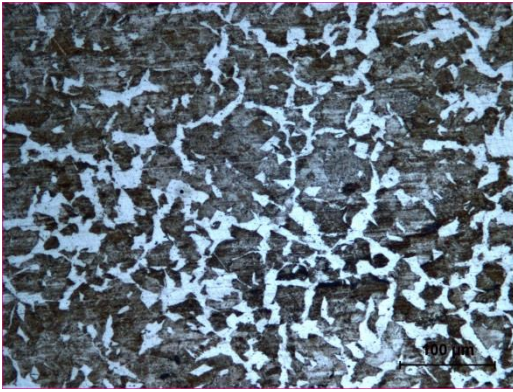
III. BULGULAR

İncelenen tüm AISI 51B60H borlu çelik numunelerin ölçülen yüzey sertlik değerleri Çizelge 2’de verilmiştir. İşlemsiz numunelere göre ısıtıl işlem uygulanmış numunelerin sertlik değerlerinin ortalama 2 kat arttığı tespit edilmiştir.

Çizelge 2. 51B60H borlu çelik numunelerin yüzey sertlikleri (HRC)

İşlemsiz	Isıl işlemlili (Sertleştirilmiş + Temperlenmiş)
29,5 – 30 – 30	59 – 61 – 63

İşlemsiz ve ısıtıl işlem uygulanmış numunelerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 2’de sunulmuştur. İşlemsiz numune ferritik-perlitik mikroyapıya sahiptir. Suda su verme ve temperleme ısıtıl işlemleri sonrasında ise AISI 51B60H borlu çelik malzemesinde mikroyapının martenzite dönüştüğü görülmektedir.



(a)



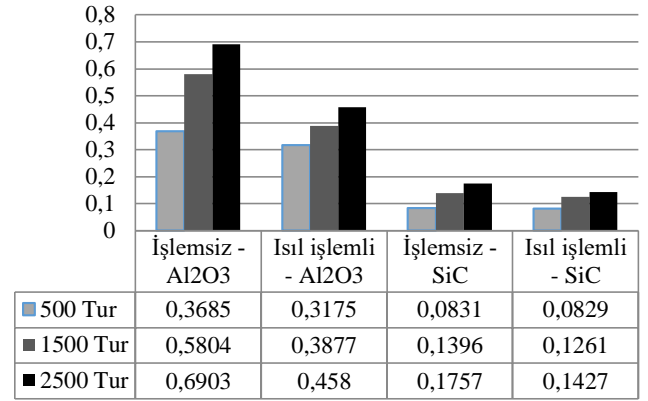
(b)

Şekil 2. AISI 51B60H çeliğinin (a) işlemsiz ve (b) ısıtıl işlemlili mikroyapı görüntüleri (%3 nital, 200X)

AISI 51B60H borlu çeliğinin, 320 gritlik alüminyum oksitli (Al_2O_3) ve silisyum karbürü (SiC) aşındırıcılar karşısında yapılan aşınma deneylerine ait aşınma miktarları Şekil 3’de verilmiştir.

İşlemsiz ve ısıtıl işlemlili (sertleştirilmiş + temperlenmiş) numunelerin aşınma deneyleri sonunda hesaplanan aşınma miktarlarının verildiği Şekil 3 incelendiğinde, her iki tip aşındırıcı karşısında artan tur sayısı ile aşınmaların belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Aşınmaların özellikle ilk 500 turlar sonunda oluştuğu da tespit edilmiştir. Özellikle

Ağırlık kayıp yüzdeleri



Şekil 3. AISI 51B60H borlu çelik numunelerin aşınma miktarları

alüminyum oksitli aşındırıcı karşısında borlu çelik numunelerin silisyum karbürü aşındırıcıya göre daha çok aşındıkları da grafiklerden anlaşılmaktadır.

İşlemsiz numuneler kendi aralarında karşılaştırıldığında, 2500 tur sonunda, alüminyum oksitli aşındırıcı karşısında AISI 51B60H borlu çelik numunelerin silisyum karbürü aşındırıcıya göre yaklaşık 4 kat daha fazla aşındıkları belirlenmiştir. Suda su verme ve sonrasında temperleme ısıtıl işlemi ile sertleştirilmiş numuneler karşılaştırıldığında ise, alüminyum oksitli aşındırıcının numuneleri diğer aşındırıcı tipine göre 3.2 kat daha fazla aşındırıldığı anlaşılmaktadır. Aynı tip aşındırıcılar karşısında işlemsiz ve ısıtıl işlemlili borlu çelik numunelerin aşınma davranışları incelenecek olursa; Al_2O_3 aşındırıcı karşısında ısıtıl işlemlili numuneler işlemsiz numunelere göre 1.5 kat daha az aşınırken, SiC aşındırıcı karşısında ısıtıl işlemlili numunelerin işlemsiz numunelere göre ise 1.2 kat daha az aşındıkları tespit edilmiştir.

IV. TARTIŞMA

AISI 51B60H borlu çeliği suda su verme işlemi ve sonrasında uygulanan temperleme ısıtıl işlemi ile sertleştirilmiş numuneleri işlemsiz numuneleri ile sertlik ve abrazif aşınma davranışları açısından incelenmiştir. Sertleştirme işleminin sonunda malzemenin makrosertlik değerlerinde beklenen yüksek artış elde edilmiştir. Sertlik değerlerindeki bu önemli artış, borlu çelikleri üstün kılan özelliklerinin en başında gelmektedir. Bulgular, düşük alaşımlı çeliklere yapılan ppm seviyelerindeki alaşım elementi olarak bor katkısının, sertleşebilirlik üzerine olan olumlu etkisinin bu malzeme için de ortaya konulduğunu göstermiştir. Aynı borlu çelik malzeme ile yapılmış literatürde bulunan çalışmada da [20], yaklaşık aynı sertlik değerlerinin elde edildiği belirlendiğinden dolayı sertlik sonuçlarının önceki çalışmalarla uyum içinde olduğu ifade edilebilir. Su verme ortamlarının borlu çeliklerin sertlik değerleri üzerinde çok önemli bir fark yaratmadıkları bilinmektedir [21,22]. Önceki çalışmaların sertlik üzerindeki bilgileri doğrultusunda, bu çalışmada, soğutma ortamı olarak, daha çevreci olması nedeni ile suda su verme işlemi tercih edilmiştir. Sertleştirmeyi takiben yapılan düşük sıcaklıklardaki temperleme ısıtıl işleminin borlu çeliklerin sertlik değerlerinde önemli bir azalmaya sebep olmadığı hatta tokluğu ve işlenebilirliği arttırdığı da bilinmektedir [17]. Bu yüzden, genel çalışma koşulları düşünülerek, çalışmada ele alınan

borlu çelik malzemeye temperleme ısıl işlemi de uygulanmıştır.

Çalışmada, AISI 51B60H borlu çelik malzemeden numuneler abrazif aşınma davranışları açısından iki farklı aşındırıcı karşısında incelenmiştir. Aşınma kayıplarının belirgin olarak ilk turlarda gerçekleştiği yapılan ara ölçümlerle tespit edilmiştir (Şekil 3). Bunun nedeninin, aşındırıcı karşıt cisim olarak kullanılan zımpara kağıtlarının aşındırıcı partikülleri arasındaki boşlukların kopan aşınma ürünleri ile henüz tam dolmamış olmasıdır. Yani, ilk turlarda (500 tur sonu) kağıtlar aşındırma işlemini tam olarak gerçekleştirmişlerdir. Sonraki ara ölçümlerde aşınma kayıplarının azalmasının nedeni olarak, zımpara kağıtlarının tanecikleri arasındaki boşlukların giderek dolmasının ve sert aşındırıcı taneciklerin de giderek vasıflarını yitirmelerinin olduğu söylenebilir.

İşlemsiz borlu çelik numuneler her iki tip aşındırıcı karşısında da beklenildiği gibi ısıl işlemli (suda su verilerek sertleştirilmiş + temperlenmiş) numunelere göre daha çok aşınmışlardır. Bu, ısıl işlemler sonunda ulaşılan yüksek sertliklerin, iki-cisimli abrazif aşınma deneyleri sonunda, borlu çelik malzemelerin aşınma dayanımlarında olumlu etkilerinin olduğunu göstermektedir.

İşlemsiz numunelerin iki farklı aşındırıcı karşısındaki abrazif aşınma davranışları bir arada incelendiğinde ise, iki-cisimli abrazif aşınma deneyleri sonunda, alüminyum oksitli aşındırıcı karşısında AISI 51B60H borlu çelik numunelerin silisyum karbürü aşındırıcıya göre yaklaşık 4 kat, ısıl işlemler karşılaştırıldığında ise 3.2 kat daha fazla aşındıkları tespit edilmiştir. Bu, alüminyum oksitli sert tanecikler içeren tip zımpara kağıtlarının işlemli veya işlemsiz AISI 51B60H borlu çeliğini silisyum karbürü zımpara kağıtlarına göre daha çok aşındırdığını göstermektedir. Bu durum, farklı seramik taneciklerin sertliği veya şekilleri ile izah edilebilir. Aşındırıcı sert taneciklerin sertlikleri karşılaştırıldığında SiC'ün Knoop sertliğinin 2600 HK, Al₂O₃'ün sertliğinin ise 2000 HK olduğu bilinmektedir. Yani daha sert olan SiC tanecikli zımpara kağıdının Al₂O₃'lü zımpara kağıdına göre numuneleri daha çok aşındırması beklenirken bu gerçekleşmemiştir. Aynı mesh sayısında deneyler yapıldığı için sert taneciklerin boyutlarının değil de keskin köşeli olup olmamalarının da aşınma davranışı üzerinde etkisi olduğu düşünülmektedir. Hardell vd.'nin 2014 yılında yayınladıkları çalışmalarında iki-cisimli abrazif test düzeneklerinde sadece alüminyum oksitli zımpara kağıtları kullanmışlar ve SEM incelemeleri ile bu tip aşındırıcıların oldukça keskin köşeli olduklarını bunun da aşınma davranışlarında etkili olduğunu belirtmişlerdir [24]. Tüm bunlar abrazif aşınma dayanımının sadece sertlik değerleri ile açıklanamayacağı gerçeğini tekrar ortaya koymakta ve önceki çalışmalarla [2-4] uyum sergilemektedir.

Aynı tip aşındırıcı karşısında sertleştirilmiş borlu çelik numunelerin abrazif aşınma dayanımları incelendiğinde ise, Al₂O₃ aşındırıcı karşısında işlemsiz numunelere göre 1.5 kat daha az aşındıkları, SiC aşındırıcı karşısında da işlemsiz numunelere göre 1.2 kat daha az aşındıkları tespit edilmiştir. Aynı tip aşındırıcılar karşısındaki bu durum, artan sertlik ile abrazif aşınma dayanımındaki artış şeklinde izah edilebilir. Hardell vd.'i de [24], suda su verme ile sertleştirdikleri

22MnB5 borlu çeliği ile gerçekleştirdikleri iki-cisimli abrazif aşınma testleri (sadece 60 gritlik Al₂O₃ zımpara kağıdı) sonunda, inceledikleri borlu çeliğin abrazif aşınma dayanımında işlemsiz numunelerine göre yaklaşık 1.35 katlık bir iyileşme olduğunu tespit etmişlerdir. Bu da, aynı tip aşındırıcı karşısında bulunan aşınma sonuçlarının önceki çalışmalarla uyumlu olduğunu göstermektedir.

V. SONUÇ

Endüstriyel alanlarda yaşanan aşınma probleminin büyük bir kısmını abrazif aşınma tek başına oluşturmaktadır. Ekonomik anlamda büyük önem arz eden bu durum üzerine çeşitli araştırmalar dolayısı ile süregelmektedir. Günümüzde çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanımı gün geçtikçe artan borlu çeliklerin çeşitli endüstri kollarında aşınma sorununa karşı da başarıyla kullanıldıkları bilinmektedir. Üstün mekanik ve teknolojik (işlenebilirlik, kaynak edilebilirlik vb.) özellikleri bilinen borlu çeliklerin tribolojik özellikleri ile ilgili çalışmalar ise literatürde oldukça kısıtlıdır. Bu yüzden, bu çalışmada esas olarak akademik literatüre katkı amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda çalışmada; işlemsiz ve ısıl işlemli (suda su verilerek sertleştirilmiş + temperlenmiş) AISI 51B60H borlu çelik numunelerin; mikroyapı analizleri, sertlik ölçümleri ve iki farklı aşındırıcı (Al₂O₃ ve SiC'lü zımpara kağıtları) karşısındaki abrazif aşınma davranışları laboratuvar ortamında incelenmiştir. Deneyler sonucunda, ısıl işlemli AISI 51B60H borlu çelik numunelerin işlemsiz hallerine göre sertlik değerlerinde 2 kat, abrazif aşınma dayanımlarında ise alüminyum oksitli aşındırıcı karşısında (Al₂O₃) 1.5 kat ve silisyum karbürü (SiC) aşındırıcı karşısında 1.2 katlık artışlar elde edilmiştir. Özetle, suda su verilerek sertleştirilip temperleme ısıl işlemi uygulanmış AISI 51B60H borlu çeliğinin, özellikle silisyum karbürü aşındırıcılar içeren, iki-cisimli abrazif aşınmaya maruz mühendislik uygulamalarında, diğer makine imalat çeliklerine göre iyi bir alternatif olabileceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] A. Misra and I. Finnie, "A Review of the Abrasive Wear of Metals", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 104, 94-101, 1982.
- [2] H.J. Yu and S.D. Bhole, "Development of a prototype abrasive wear tester for tillage tool materials", *Tribology International*, 23, 309-316, 1990.
- [3] Z. Owsiak, "Wear of Spring Tine Cultivator Points in Sandy Loam and Light Clay Soils in Southren Poland", *Soil and Tillage Research*, 50, 333-340, 1999.
- [4] U. Er and B. Par, "Wear of plowshare components in SAE 950C steel surface hardened by powder boriding," *Wear*, 261, 251-255, 2006.
- [5] J. Hardell, E. Kassfeldt and B. Prakash, "Friction and wear behaviour of high strength boron steel at elevated temperatures of up to 800 °C", *Wear*, 264, 788-799, 2008.
- [6] J. Cai, J. Lin, J. Wilsius and T. A. Dean, "Theoretical and experimental investigations on austenization of a boron steel", *Metal Forming*, 2, 183-189, 2008.
- [7] B. M. Kapadia, "Effect of boron additions on the toughness of heat-treated low-alloy steels", *J. Heat Treat.*, 5(1), 41-53, 1987.
- [8] E. P. Degarmo, J. T. Black and R. A. Kohser, *Materials and processes in manufacturing*, Collier Macmillan Canada, 1038 p., 1984.
- [9] A. Özsoy, "Çeliğin borlanması borür tabakası, geçiş zonu ve ana matrisin özelliklerinin iyileştirilmesi", Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 100 s., 1991.
- [10] M. M. Arıkan ve G. Başman, "Otomotiv endüstrisi için yeni çelik ürünler ve özellikleri", *I. Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu*, Karadeniz Ereğli Zonguldak, 387-400, 2001.

- [11] Ü. Er, “Borlu çelikler ve tarımsal mekanizasyonda kullanım alanları”, 25. *Ulusal Tarımsal Mekanizasyon Kongresi*, Isparta, 425-428, 2009.
- [12] E. Kassfeldt and J. Lundmark, “Tribological properties of hardened high strength boron steel at combined Rolling and sliding condition”, *Wear*, 267, 2287-2293, 2009.
- [13] H. Karbasian and A. E. Tekkaya, “A review on hot stamping”, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 2103-2118, 2010.
- [14] A. Turetta, S. Bruschi and A. Ghiotti, “Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations”, *Journal of Materials Processing Technology*, 177, 396-400, 2006.
- [15] O. Kurumahmut, “22MnB5 çelik sacların elektrikli ısıtma ile sıcak şekillendirilmesinin deneysel analizleri”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 147 s., 2009.
- [16] N. I. Kobasko, M. A. Aronov, J. A. Powell, L. C. F. Canale and G. E. Totten, “Improved production of automotive parts by intensive quench processing”, *La Metallurgia Italiana*, 2, 13-22, 2006.
- [17] Anonymous, “Raex®B Boron Steels”, *Rautaruukki Steel*, 8 p., 2004.
- [18] E. L. Chipres, I. Mejia, C. Maldonado, A. B. Jacuinde and J. M. Cabrera, “Hot ductility behavior of boron microalloyed steels”, *Materials Science and Engineering A*, 460-461, 464-470, 2007.
- [19] M. Uslu, “Docol 22MnB5 çeliğinin balistik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 132 s., 2007.
- [20] F.H. Çakır, F. Bozkurt, O.N. Çelik ve Ü. Er, “Demiryolu Uygulamaları İçin Sertleştirilmiş İki Çeşit Borlu Çeliğin Tribolojik İncelenmesi”, *Ejoir Elektronik Mesleki Gelişim ve Araştırma Dergisi*, 3, IWCEA Özel Sayısı, 145-154, 2015.
- [21] Ü. Er ve H. Gaşan, “Bazı borlu çeliklerin toprak işleme aletlerinin uç demirlerinde kullanımının laboratuvar koşullarında incelenmesi”, 23. *Ulusal Tarımsal Mekanizasyon Kongresi*, Çanakkale, 293-296, 2006.
- [22] Ü. Er, “The abrasive wear behaviour of boron steels”, *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(2), 59-70, 2004.
- [23] Ü. Er, “15B35H borlu çeliğinin kuru kayma koşullarında sürtünme ve aşınma davranışının incelenmesi”, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25, 75-82, 2011.
- [24] J. Hardell, A. Yousfi, M. Lund, L. Pelcastre and B. Prakash, “Abrasive wear behaviour of hardened high strength boron steel”, *Tribology*, 8(2), 90-97, 2014.
- [25] K. Pawlak, B. Bialobrzaska and L. Konat, “The influence of austenitizing temperature on prior austenite grain size and resistance to abrasion wear of selected low-alloy boron steel”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16, 913-926, 2016.
- [26] B. Bialobrzaska and P. Kostencki, “Abrasive wear characteristics of selected low-alloy boron steels as measured in both field experiments and laboratory tests”, *Wear*, 328-329, 149-159, 2015.
- [27] S. Hernandez, J. Hardell, H. Winkelmann, M.R. Ripoll and B. Prakash, “Influence of temperature on abrasive wear of boron steel and hot forming tool steels”, *Wear*, 338-339, 27-35, 2015.
- [28] D. Singh, D.P. Mondal, O.P. Modi and K. Sethi, “Low stress abrasive wear response of boron steel under three body abrasion: effect of heat treatment and peening intensities”, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 17, 208-218, 2010.