



15B35H BORLU ÇELİĞİNİN KURU KAYMA KOŞULLARINDA SÜRTÜNME VE AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Ümit ER

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, 26480 Eskişehir, umiter@ogu.edu.tr

Geliş Tarihi:02.05.2011 Kabul Tarihi: 30.06.2011

ÖZET

Borlu çelikler, son zamanlarda çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanımı gün geçtikçe artmakta olan malzemelerdir. Bu tip malzemelerin tribolojik özelliklerinin incelenmesi üzerine yapılan araştırmaların ekonomik anlamda büyük önem taşıdığı da bir gerçektir. Bu çalışmada; işlemsiz, suda su verilerek sertleştirilmiş ve sertleştirme sonrası temperlenmiş 15B35H borlu çelik malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışları deneysel olarak kuru kayma koşullarında incelenmiştir. Numunelerin yüzey sertlik değerleri, ortalama sürtünme katsayıları ve aşınma oranları ölçülmüş ve ayrıca mikroyapı analizleri de yapılmıştır. Numunelerin tümünde benzer ve kararlı sürtünme davranışları gözlemlenirken, ısıtılmış numunelerin sertlik değerlerinde ve aşınma dayanımlarında önemli artışlar elde edilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda, 15B35H borlu çeliğinin, kayma aşınmasına maruz mühendislik uygulamalarında bilinen diğer makine imalat çeliklerine göre iyi bir alternatif olabileceği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Borlu çelikler, 15B35H, kuru kayma aşınması, sürtünme, ısıtılmış işlem

AN INVESTIGATION OF THE FRICTION AND WEAR BEHAVIOUR OF 15B35H BORON STEEL UNDER DRY SLIDING CONDITIONS

ABSTRACT

Recently, boron steels are the materials getting more widely used in engineering applications. It is the fact that investigations of tribological properties of the materials have economically great importance. In this study, dry sliding wear behaviour of untreated, hardened with water quenching and tempered after hardening 15B35H boron steel specimens were experimentally investigated in the laboratory conditions. Surface hardnesses, mean coefficient of frictions and specific wear rates were measured and also microstructure analyses of specimens were conducted. It is observed that, while all the specimens showed similar and relatively stable friction behaviour, hardness values and wear resistance of the heat treated specimens were significantly improved. As a result of the study, it is concluded that the 15B35H boron steel can be good alternative to other widely known machine manufacturing steels in engineering applications where sliding wear exist.

Key Words: Boron steels, 15B35H, dry sliding wear, friction, heat treatment

1. GİRİŞ

Bor ve bor türevi ürünlerin endüstriyel anlamda uygulama alanlarından biri de çelik endüstrisidir. Bor'un, alaşım elementi olarak katıldığı çeliğin sertleşme kabiliyeti üzerindeki olumlu etkisi 1940'lı yıllardan beri bilinse de [1] borlu çeliklere olan ilgi 1970'lerdeki petrol krizinin yaşandığı yıllarda artmıştır [2-3]. Kriz, otomotiv endüstrisinde, daha hafif dolayısıyla daha az yakıt tüketimi sağlayacak yeniliklere ihtiyacın olduğu gerçeğini ortaya çıkarmış ve böylelikle yeni malzeme ve/veya malzemelere uygulanabilir işlemlere ilişkin araştırmalar hız kazanmıştır. Bu yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda, çok az miktarlarda bor elementinin ağırlıkça %0.65'e kadar karbon içeren çeliklerde sertleşebilirliği diğer alaşım elementlerine göre önemli oranlarda artırdığı belirtilmiştir [2-5]. Düşük alaşımlı çeliklerde sertleşebilirlikteki en büyük artışın 20 – 40 ppm bor elementi

ilavesinde elde edildiği [6], yaklaşık bu miktarlarda (30 ppm) bor elementi ilavesinin sertleşebilirlikte %0.6 Mn, %0.7 Cr, %0.5 Mo veya %1.5 Ni ilavesine eşdeğer artışlar sağladığı bildirilmiştir [7].

Borlu çelikler, uygulanan ısı 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 [2,8,9]. Bunun yanı sıra, özellikle son yıllarda otomotiv üreticileri tarafından borlu çeliklerin, yapısal parçalarda hafiflik elde etmek ve darbelere maruz kalabilecek yerlerde sürtücü ve yolcu güvenliğini arttırmak amacıyla da kullanılmaya başladıkları bilinmektedir [2,4,7,9-13]. Otomotiv sektöründe, yüksek dayanımlı borlu çelik (22MnB5) sacların sıcak şekillendirme ile kullanımının ön plana çıktığı görülmektedir [14]. Yüksek dayanımlı çeliklerin sıcak şekillendirilmesinin ana avantajı mükemmel geometrik hassasiyet ve neredeyse hiç geri yaylanma olmaksızın imalatın mümkün olmasıdır [13-17]. Borlu çeliklerin korozyon dirençlerinin de yüksek olduğu ve özellikle düşük karbonlu bey nitelik çeliklere Cu-B ilavesi ile üretilen çeliklerin, savaş gemilerinin, köprülerin ve petrol platformlarının yapımında kullanıldıkları da bilinmektedir [18]. Borlu çeliklerin kullanımına örnek verebilecek diğer uygulama alanları ise forklift kolları [19], kar küreme araçlarının iş gören kısımları, tank paletleri, taş kırıcı ve öğütücüleri, kepçe turnakları [20], petrol boru hatları ve genel makine imalatıdır [21]. Araştırmacıların, borlu çeliklerin balistik özelliklerinin [22] ve tren teker/ray malzemesi olarak kullanımı durumunda oluşabilecek etkileşimlerinin incelenmesi [9] gibi farklı kullanım alanlarına dönük çalışmaları ise bu tip malzemelere olan ilginin bir kanıtını ortaya koymaktadır.

Mühendislik malzemelerinin mekanik özelliklerinin yanı sıra işlenebilirlik özellikleri de makine imalat sektöründe çalışanlar için oldukça önemlidir. Kaynak edilebilirlik, sertleşme ve şekil değiştirme kabiliyeti gibi işlenebilirlik özellikleri ile mekanik özellikleri incelendiğinde, borlu çeliklerin eşit sertleşebilirlik değerlerine sahip sade karbonlu çeliklere göre daha iyi sonuçlar ürettiği bildirilmiştir [4]. Borlu çeliklerde, su verme sırasında oluşan çarpılma ve çatlakların ve ayrıca kaynak işleminde ısı tesiri altındaki bölgedeki çatlak oluşumlarının bilinen alaşımlı çeliklere göre daha az gözlemlendiği de bilinmektedir. Kapadia (1987), borlu çeliklerin darbe dayanımlarıyla ilgili çalışmasında, incelediği üç farklı borlu çeliğin karşılaştırıldıkları düşük alaşımlı benzer karbonlu çeliklerle tokluk özellikleri açısından neredeyse aynı sonuçları verdiğini rapor etmiştir. Düşük alaşım içeriğine sahip olmalarından dolayı borlu çeliklerin kaynağı da zor değildir. Yaygın olarak kullanılan tüm kaynak yöntemleri bu tip çeliklerin kaynak işleminde de kullanılabilirler.

Borlu çeliklerin tribolojik özelliklerini inceleyen az sayıda çalışma olduğu literatür taraması sonunda anlaşılmaktadır [2,9,23,24]. 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 farklı ısı işlemler uygulanmış 15B35H borlu çeliğinin kuru kayma aşınması şartlarında tribolojik özellikleri incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

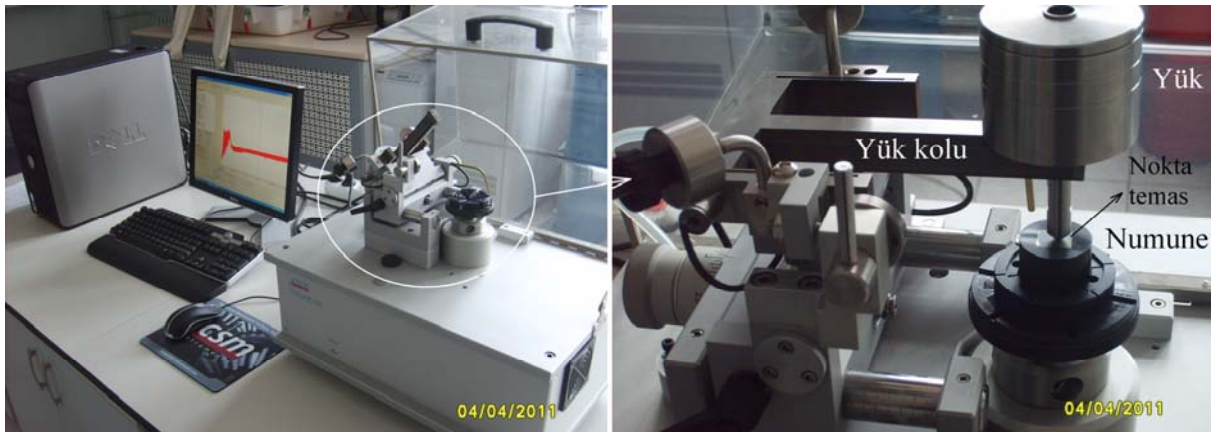
Çalışmada test malzemesi olarak 15B35H borlu çeliği seçilmiştir. Deneyler ve incelemelerde küp biçiminde (12.7x12.7x12.7 mm³) hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Üç gruba ayrılan numunelerin kimyasal bileşimi, ısı işlem durumları ve aşınma deneyleri öncesi yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. Isıl işlem fırınında 880 °C östenitleme sıcaklığında 30 dakika bekletilen numuneler oda sıcaklığındaki suda su verilerek sertleştirilmişlerdir. Sertleştirilen numunelerden bazılarında 200 °C'de 1 saat süre ile temperleme işlemi uygulanmıştır.

Çizelge 1. Numunelerin; ısı işlem durumları, kimyasal bileşimleri (% ağırlık) ve başlangıç yüzey pürüzlülük değerleri

İşlem	Kimyasal bileşim (% ağırlık)						Yüzey pürüzlülük değerleri (Aşınma deneyleri öncesi)
	C	Si	Mn	B	P	S	R _a (µm)
İşlemsiz	0.33	0.22	1.13	0.0012	0.01	0.03	0.26
Sertleştirilmiş							0.30
Temperlenmiş							0.32

Isıl işlemlerde Protherm PLF 150/9 fırın, sertlik ölçümlerinde Zwick 3106 makrosertlik cihazı kullanılmıştır. 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.

Kuru ortam kayma aşınması deneyleri CSM marka aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Aşınma deneylerine ait parametreler Çizelge 2’de verilmiştir. Aşınma oranının belirlenmesinde Mitutoyo SJ-400 marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazından yararlanılmıştır. Aşınma deneyleri öncesinde tüm deney numunelerinin yüzeyleri yaklaşık aynı pürüzlülük değerlerine getirilmeye çalışılmış ve böylelikle farklı yüzey pürüzlülüklerinin aşınmaya olabilecek etkisi en aza indirgenmiştir. Aşınma öncesi tüm numunelerin yüzeyleri alkol ile temizlenmiştir. Aşındırıcı karşıt cisim olarak 3 mm çapında ve küreselliği garantili tungsten karbür (WC) küre kullanılmıştır. Bu geometri ile (ball-on-disk) aşındırıcı küre ve aşındırılacak yüzey arasında nokta temas sağlanmıştır. Aşınma deneyleri sonunda numunelerin aşınmış bölgeleri JEOL-JSM 5600LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve elektron dağılım spektroskopisi (EDS) ile incelenmiştir.



Şekil 1. Aşınma test cihazı

Çizelge 2. Aşınma test parametreleri

İz yarıçapı	3.02 mm	Aşınma tipi	Kuru ortam kayma aşınması
Lineer hız	2.50 cm/s	Aşınma geometrisi	Nokta temas (Ball-on-disk)
Yük	10 N	Aşındırıcı karşıt cisim	WC, küre, Ø 3 mm
Toplam mesafe	40 m	Ortam koşulları	Durgun hava, oda sıcaklığı, % 32 bağıl nem
Veri toplama hızı	10 Hz	Yüzey temizleme	Alkol

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

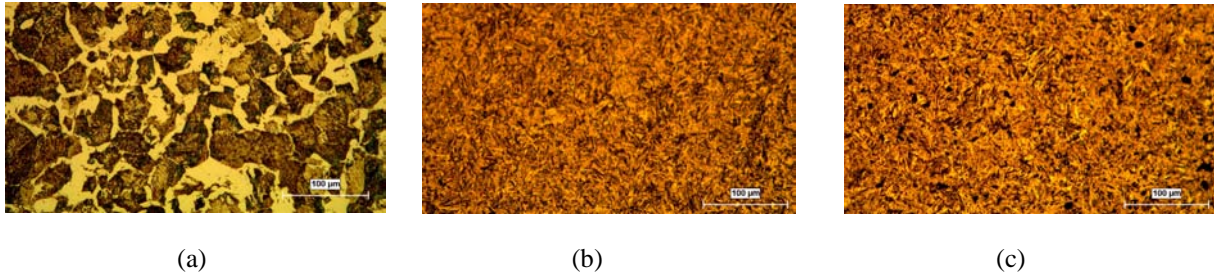
İncelenen tüm numunelerin ortalama yüzey sertlik değerleri Çizelge 3’de verilmiştir. 15B35H borlu çeliğinin uygulanan sertleştirme ısıl işlemi sonunda sertliğinin işlemsiz malzemeye göre 2.5 kat arttığı, temperleme ısıl işlemi sonrasında da sertlik değerinde önemli bir düşüşün olmadığı tespit edilmiştir. İncelenen malzemede, suda veya yağda su vermeye sertleştirmenin uygulanabilir olduğu, farklı soğutma ortamlarının sertliğe etkisinin ise çok az olduğu bilinmektedir [23-25]. Bu nedenle çalışmada, zararlı atıklar içermeyen su, soğutma ortamı olarak

seçilmiştir. Ölçülen ortalama yüzey sertlik değerlerinin önceki çalışmalarda [23] bulunanlarla uyumluluk sergilediği tespit edilmiştir.

Çizelge 3. Isıl işlem durumlarına göre numunelerin ortalama yüzey sertlik değerleri (HRC)

İşlemsiz	Sertleştirilmiş	Temperlenmiş
22	55	52

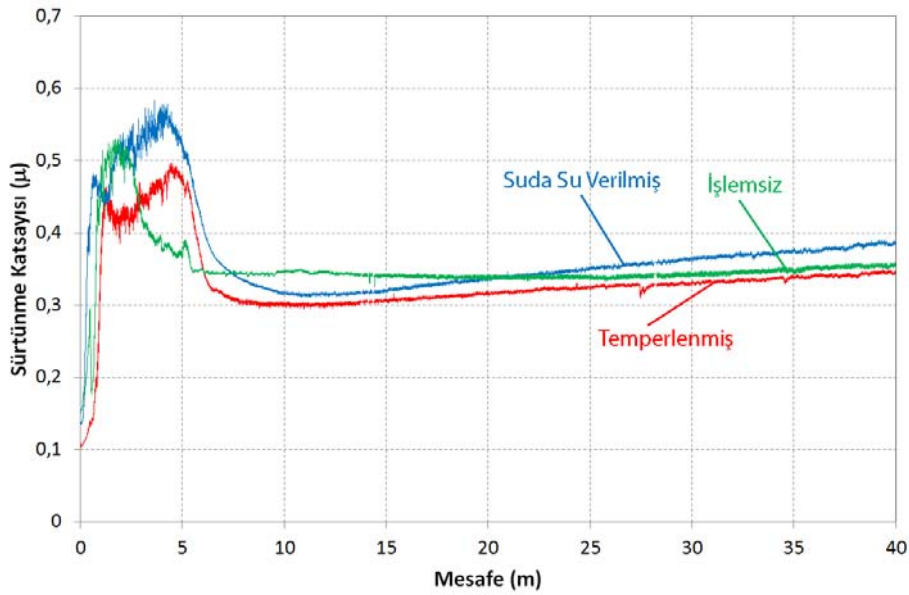
İşlemsiz ve ısıl işlem uygulanmış numunelerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 2’de görülmektedir. İşlemsiz numune ferritik-perlitik mikroyapıya sahiptir. Su verme sonrasında ise yapının tamamen martenzite dönüştüğü görülmektedir. Temperlenmiş numunelerdeki yapının, su verilmiş numunelerdeki yapıya oldukça benzediği de yine gözlenen bir diğer durumdur.



Şekil 2. Mikroyapı görüntüleri (%3 Nital, 200X) (a) İşlemsiz, (b) Sertleştirilmiş ve (c) Temperlenmiş

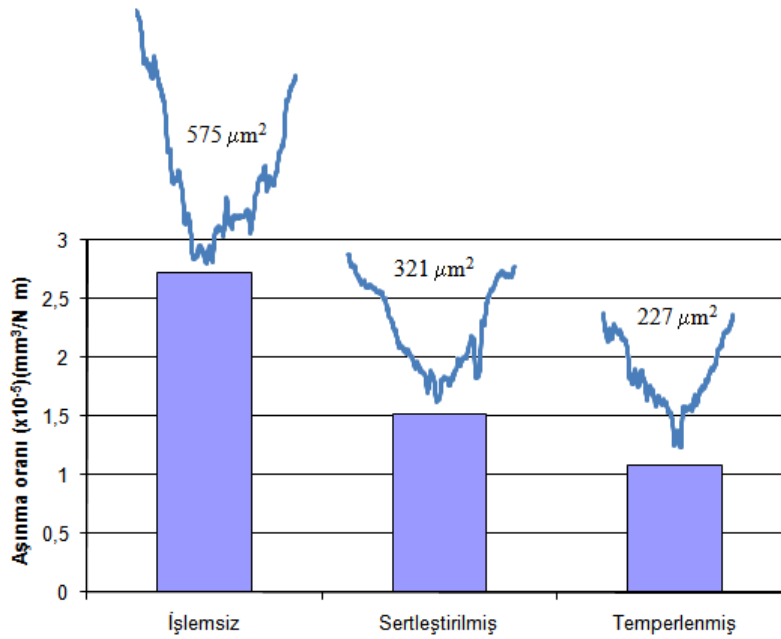
Ortalama sürtünme katsayılarının mesafeye göre değişimlerini gösteren sürtünme eğrileri Şekil 3’de verilmiştir. İşlemsiz, sertleştirilmiş ve temperlenmiş numunelerde ölçülen ortalama sürtünme katsayıları (μ) sırasıyla; 0.351, 0.369 ve 0.333’tür. Deneylerde kullanılan borlu çelik numunelerin, tungsten karbür aşındırıcı küre karşısında kuru ortam kayma deneyleri sonunda birbirlerine oldukça yakın ortalama sürtünme katsayısı değerlerine sahip oldukları görülmektedir.

Her üç numunede de sürtünme eğrilerinin, sürtünmenin ilk anlarında yüksek değerler ve kararsızlıklar içerirken, deneylerin başlangıcından 6 – 8 metre sonra ise daha kararlı ve düzgün bir davranış sergiledikleri görülmektedir. Bilindiği gibi birçok metal havada bir miktar oksitlenmekte ve birkaç dakika içinde yüzeylerinde ince bir oksit filmi oluşmaktadır. Bu ince oksit filmi iki metal temasını engellediğinden adhezyon azalmakta bu da düşük sürtünme katsayısı değerlerine neden olmaktadır. Eğer sürtünme koşullarında uygulanan normal yük bu ince oksit filmi kırılmaya yetecek büyüklükte ise oksit filmi parçalanır ve temiz metal-metal teması sağlanır. Bu tip temas ise yüksek adhezyon ve yüksek sürtünmeye neden olur [26]. Yapılan deneylerde ilk metrelerde tüm numunelerde yüksek sürtünme katsayısının gözlenmesinin nedeni başlangıçta yüzeyde bulunan oksit filminin kırılmasıyla temiz metal-metal temasının sağlanmasıdır. Sürtünmenin ilerleyen aşamalarında ise normal yük ve sürtünme hızının etkisi ile ara yüzey sıcaklığı artmaktadır. Ara yüzey sıcaklığının artması metallerin oksidasyonunu arttırmakta bu da ara yüzeyde yeni oksit filmi tabakasının oluşmasına ve kalınlığının artmasına neden olmaktadır. Ara yüzeydeki oksit filmi daha düşük kesme mukavemetli bir tabaka olduğundan ve bu tabaka katı yağlayıcı gibi davrandığından bu süreçte sürtünme katsayısı daha düşük değerlerde seyretmektedir. Aşınma yüzeylerinden alınan EDS analiz sonuçları ara yüzeylerde oksit filminin oluştuğunu göstermektedir (Şekil 5). Kassfeldt ve Lundmark, 2009 yılındaki borlu çeliklerin tribolojik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında benzer sürtünme katsayılarını ve kuru ortam için yine benzer sürtünme davranışlarını vurgulamışlardır [9]. Isıl işlem uyguladıkları borlu çelikte ortalama sürtünme katsayısını kuru kayma aşınması koşullarında 0.38 değerinde bulduklarını belirtmişlerdir. Bu sonuç, çalışmadaki ısıl işlem uygulanmış numuneler için değerlerdeki paralellliği sergilemektedir.



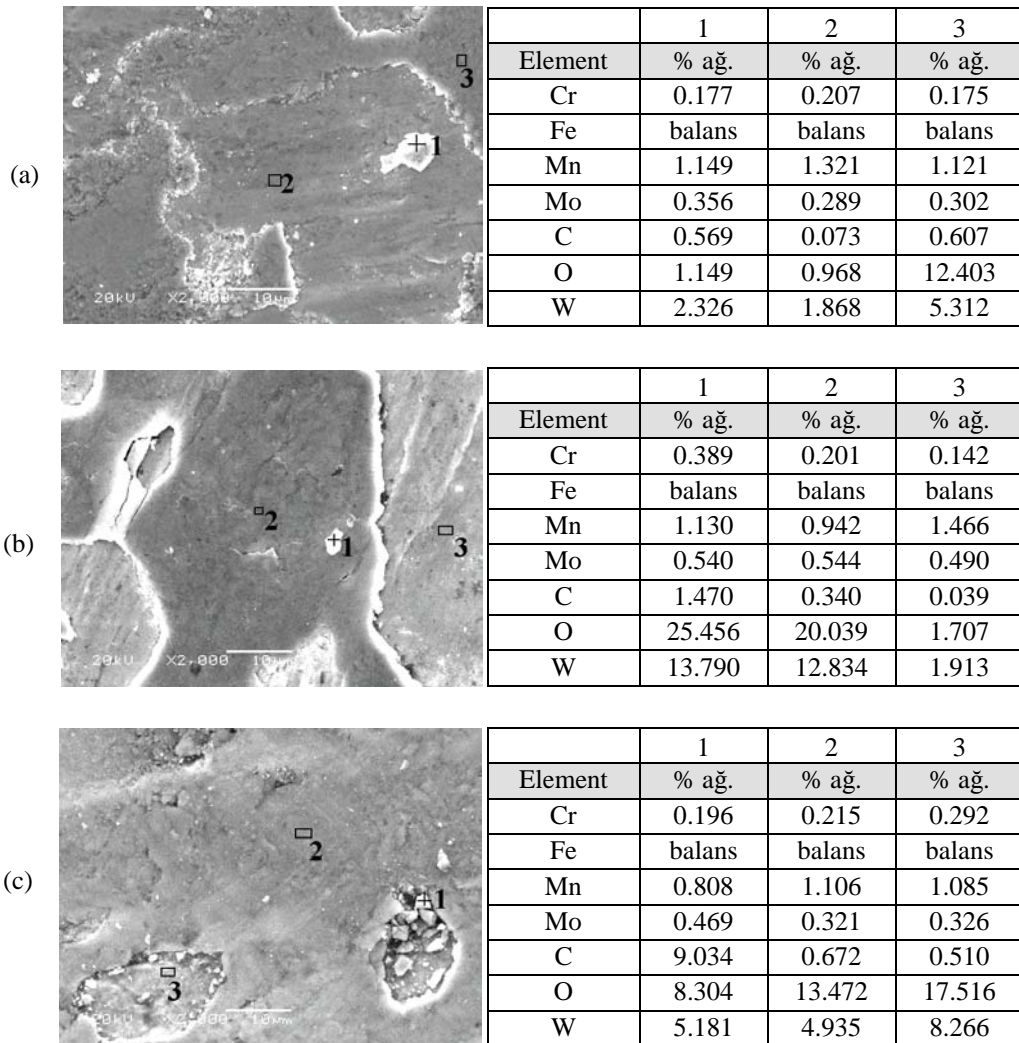
Şekil 3. Ortalama sürtünme katsayıları (μ) – mesafe (m) grafikleri

Aşınma deneyleri sonunda yüzey pürüzlülük cihazı ile belirlenen aşınma izlerinin alanları aşınma oranlarını hesaplamada kullanılmışlardır. Şekil 4'de, numunelerin aşınma oranları ve bu oranların bulunmasında yararlanılan aşınma izlerine ait alanlar görülmektedir. Beklenildiği gibi en çok aşınma işlemsiz numunede gerçekleşmiştir. Onu sırasıyla sertleştirilmiş ve temperlenmiş numuneler takip etmektedir. İşlemsiz duruma göre sertleştirilmiş numunelerin 1.8 kat, temperlenmiş numunelerin de 2.5 kat daha az aşındıkları tespit edilmiştir. 15B35H borlu çeliğinin uygulanan ısı işlemler sonunda kuru ortam kayma aşınması koşullarındaki aşınma direncinin önemli oranda arttığı görülmektedir.



Şekil 4. Farklı ısı işlem durumları, aşınma iz alanları ve hesaplanan aşınma oranları

Bilindiği gibi, aşınma davranışlarını yorumlamada, aşınmış bölgelerde yapılmış SEM ve EDS incelemeleri de büyük önem taşımaktadır. Numunelerin aşınmış bölgelerinin SEM görüntüleri ve EDS analizlerine ait bulgular Şekil 5’de verilmiştir. SEM/EDS incelemeleri sonunda aşınmış kısımların tamamında aşındırıcı karışık cisimden aşındırılan yüzeylere malzeme transferi olduğu anlaşılmıştır. İncelenen borlu çeliğin bileşiminde bulunmayan W, EDS analizinde tespit edilmiştir. Bu, kuru ortam kayma aşınmasında beklenen yapışmayı (adhezyon) temsil etmektedir. Şekil 5a’da görülen işlemsiz numune incelendiğinde aşındırıcı bilyeden malzeme transferinin daha çok sıvanma şeklinde olduğu anlaşılmıştır. Isıl işlem uygulanmış numunelerde de (Şekil 5b-c), artan sertlikle orantılı olarak aşındırıcı bilyeden kopmuş ve sistemden uzaklaştırılmamış daha çok sert parçacığın malzeme yüzeyine yine sıvanma şeklinde transfer olduğu gözlenirken oksit yapıların varlığı da belirlenmiştir. Sertleştirilmiş ve temperlenmiş numunelerin aşınma yüzeylerinde EDS analizleri ile belirlenen yüksek oksijen miktarı bu numunelerde oksit yapıların ve dolayısıyla oksidatif aşınmanın da tribo-sistem üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Yine bu iki numunenin EDS analizleri karşılaştırıldığında temperlenmiş numunenin aşınma bölgesindeki oksijen miktarının sertleştirilmiş numuneden daha az olduğu görülmektedir. Daha fazla oksitlenme daha fazla aşınma kaybı anlamına geleceğinden temperlenmiş numunenin aşınma direnci sertleştirilmiş numuneye göre daha yüksek olmuştur. Artan sertlikle aşınmanın azaldığı fakat aralarında kesin ve doğru bir orantı da olmadığı sertleştirilmiş ve temperlenmiş numunelerin sonuçları karşılaştırıldığında söylenebilir.



Şekil 5. Aşınma bölgelerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri (a) İşlemsiz, (b) Sertleştirilmiş ve (c) Temperlenmiş

4. SONUÇ

Borlu çelikler, yüksek aşınma dayanımı gerektiren çeşitli uygulamalarda ve özellikle son yıllarda otomotiv sektöründe kullanımı gittikçe yaygınlaşan malzemelerdir. Bu tip malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ve/veya incelenmesi üzerine yapılan araştırmaların ekonomik anlamda büyük bir önem taşıdığı da gerçektir. Bu çalışmada; işlemsiz, suda su verilerek sertleştirilmiş ve sertleştirme sonrası temperleme ısıl işlemi uygulanmış numuneler üzerinde 15B35H borlu çeliğinin sürtünme ve aşınma davranışları deneysel olarak kuru kayma koşullarında incelenmiştir. Uygulanan ısıl işlemlerle, 15B35H borlu çeliğinde yüksek sertlik değerlerinin elde edilmesinin ve kuru ortam kayma aşınma direncinin de artırılmasının mümkün olduğu anlaşılmıştır. Suda su verme yöntemi ile sertleştirilen numunelerde işlemsizlere göre 2.5 kat daha yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür. Optik mikroyapı incelemelerinde işlemsiz numunelerde ferritik-perlitik mikroyapı, ısıl işlem uygulanmış numunelerde ise tamamıyla martenzitik yapı gözlenmiştir. Temperlenmiş numunelerdeki mikroyapı ve elde edilen sertlik değerleri üzerinde temperleme ısıl işleminin sıcaklık ve süresine bağlı olarak sertleştirilmiş numunelere göre önemli değişikliklerin olmadığı belirlenmiştir.

15B35H borlu çeliğinin tribolojik özellikleri kuru ortam kayma aşınması deneyleri ile incelenmiştir. Farklı ısıl işlem uygulanmış numunelerle yapılan sürtünme ve aşınma deneyleri sonunda, WC (tungsten karbür) aşındırıcı küre karşısında tüm numunelerin birbirlerine çok yakın ortalama sürtünme katsayıları değerleri ve sürtünme eğrileri sergilediği tespit edilmiştir. Burada, oluşan oksit formların katı yağlayıcı görevi görerek tüm numunelerde benzer sürtünme davranışlarına neden olduğu düşünülmektedir. Aşınma bölgelerinde yapılan EDS analiz bulguları da bu kanıyı desteklemektedir. Aşınma oranlarını belirlemede yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük cihazı yardımıyla aşınma izleri bulunmuş ve aşınma bölgelerinin alanları ölçülmüştür. En az aşınma temperlenmiş numunelerde olmuştur. Temperlenmiş numunelerin işlemsizlere göre yaklaşık 2.5 kat daha az aşındığı tespit edilmiştir. Aşınma bölgelerinde yapılan SEM/EDS çalışmalarında ise, karşıt cisimden incelediğimiz borlu çelik yüzeyine, her deney koşulunda, malzeme transferi gerçekleştiği anlaşılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda incelenen çeliğin, ısıl işlemler ile sertlik ve aşınma dayanımında önemli artışların elde edildiği, tüm inceleme koşullarında ise kararlı sürtünme davranışları sergilediği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, metal-metal sürtünmenin söz konusu olduğu mühendislik uygulamalarında, 15B35H borlu çeliğinin geleneksel makine imalat çeliklerine göre iyi bir alternatif olduğu söylenebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonunun 200315015 ve 200815008 numaralı projeleri kapsamında alınan cihazlarla gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] W. Crafts, "Deep-hardening boron steels", United States Patent Office, Patent No: 2.280.283, 4 p. (1942).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] B. M. Kapadia, "Effect of boron additions on the toughness of heat-treated low-alloy steels", J. Heat Treat., 5(1), 41-53 (1987).
- [5] E. P. Degarmo, J. T. Black and R. A. Kohser, "Materials and processes in manufacturing", Collier Macmillan Canada, 1038 p. (1984).

- [6] A. Özsoy, "Çeliğin borlanması borür tabakası, geçiş zonu ve ana matriksin özelliklerinin iyileştirilmesi", Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 100 s. (1991).
- [7] 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).
- [8] Ü. Er, "Borlu çelikler ve tarımsal mekanizasyonda kullanım alanları", 25. Ulusal Tarımsal Mekanizasyon Kongresi, Isparta, 425-428 (2009).
- [9] E. Kassfeldt and J. Lundmark, "Tribological properties of hardened high strength boron steel at combined Rolling and sliding condition", *Wear*, 267, 2287-2293 (2009).
- [10] M. Merklein, J. Lechier and M. Geiger, "Characterisation of the flow properties of the quenchenable ultra high strength steel 22MnB5", *Ann. CIRP*, 55(1), 229-236 (2006).
- [11] M. Naderi, L. Durrenberger, A. Molinari and W. Bleck, "Constitutive relationships for 22MnB5 boron steel deformed isothermally at high temperatures", *Materials Science and Engineering A*, 478, 130-139 (2008).
- [12] Z. W. Xing, J. Bao and Y. Y. Yang, "Numerical simulation of hot stamping of quenchenable boron steel", *Materials Science and Engineering A*, 499, 28-31 (2009).
- [13] M. Naderi, V. Uthaisangsuk, U. Prahl and W. Bleck, "A numerical and experimental investigation into hot stamping of boron alloyed heat treated steels", *Steel Research Int.*, 79(2), 77-84 (2008).
- [14] H. Karbasian and A. E. Tekkaya, "A review on hot stamping", *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 2103-2118 (2010).
- [15] A. Turetta, S. Bruschi and A. Ghiotti, "Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations", *Journal of Materials Processing Technology*, 177, 396-400 (2006).
- [16] D. Mohr and F. Ebnoether, "Plasticity and fracture of martensitic boron steel under plane stress conditions", *International Journal of Solids and Structures*, 46, 3535-3547 (2009).
- [17] O. Kurumahmut, "22MnB5 çelik sacların elektrikli ısıtma ile sıcak şekillendirilmesinin deneysel analizleri", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 147 s. (2009).
- [18] X. M. Wang and X. L. He, "Effect of boron addition on structure and properties of low carbon bainitic steels", *ISIJ International*, 42(S), 38-46 (2002).
- [19] 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).
- [20] Anonymous, "Raex®B Boron Steels", Rautaruukki Steel, 8 p. (2004).
- [21] 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).
- [22] M. Uslu, "Docol 22MnB5 çeliğinin balistik özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 132 s. (2007).
- [23] 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).
- [24] Ü. Er, "The abrasive wear behaviour of boron steels", *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(2), 59-70 (2004).
- [25] Online: http://www.arcelormittal.com/fce/repository/transfer/EN_Update3_040105.pdf, "Quenchenable boron steel", Arcelor FCS Commercial Magazine, (2011).
- [26] B. Bhushan, "Principles and applications of tribology", John Wiley and Sons USA, 1020 p. (1999).