

BOR YAYINIMIYLA YÜZEYİ SERTLEŞTİRİLMİŞ AISI 1030 VE AISI 1050 ÇELİKLERİNİN ABRAZİF AŞINMA DAYANIMLARININ İNCELENMESİ

Ümit ER ¹, Bilal PAR ²

ÖZET: Bu çalışmada AISI 1030 ve 1050 sade karbon çeliklerine 950 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerde katı ortamda toz borlama tekniği ile yüzey sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Elde edilen numuneler aynı çeliklerin işlemsiz halleriyle abrazif aşınma dayanımları açısından laboratuvar ortamında incelenmiştir. Çalışmada, elde edilen borlu tabakaların kalınlıkları ve yüzey sertlik değerleri de ölçülmüştür. Borlamayla AISI 1030 ve 1050 çeliklerinin işlemsiz hallerine göre yüzey sertliklerinde ve abrazif aşınma dayanımlarında oldukça yüksek oranda artışlar elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Borlama, abrazif aşınma

THE INVESTIGATION ON ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF SURFACE HARDENED AISI 1030 AND AISİ 1050 STEELS BY BORONIZING

ABSTRACT: In this study, the abrasive wear resistance of surface hardened AISI 1030 and 1050 plain carbon steel specimens by pack boronizing method at 950 °C for 2, 4 and 6 hours are investigated. The specimens hardened by boronizing and the untreated specimens made of the same kind of steels are experimentally compared in laboratory conditions. The surface hardness values and the observed boride layer thickness are measured. At the end of the study we observed that surface hardness and abrasive wear resistance of boronized AISI 1030 and 1050 steels are much better than the untreated ones.

KEYWORDS: Boronizing, abrasive wear

^{1,2}Osmangazi Üniversitesi, Müh.Mim.Fak., Mak.Müh.Böl., 26480 Batı Meşelik, ESKİŞEHİR

I. GİRİŞ

Yüzlerce farklı kullanım alanına sahip olan bor ve bor türevi ürünlerin endüstriyel anlamda yeni sayılabilecek uygulama alanlarından biri de çeliklerde bir tür yüzey sertleştirme yöntemi olarak kullanımlarıdır. Borlama adı verilen bu yöntem ilk kez 1895 yılında Moissan tarafından gerçekleştirilmiştir. Borlamanın kendisine endüstriyel kullanım alanları bulabilen bir yüzey sertleştirme işlemi olması ise, ancak 1970'li yıllarda olmuştur [1-2-3]. Bu yöntemle yüzey sertleştirme, gelişmiş ülkelerde sıklıkla kullanılmasına rağmen, dünyadaki bilinen bor madeni rezervlerinin % 63'üne sahip olan ülkemizde henüz yeterince tanınmamakta ve yeterince uygulanmamaktadır [4]. Bor verici ortamda bulunan bor atomlarının yüksek sıcaklıklarda, genelde demir esaslı malzemelere belirli sürelerde etki ettirilerek, yayındırılmasıyla gerçekleştirilen borlama sonunda; malzeme yüzeyinde çok sert, aşınma ve korozyon dirençli ve düşük sürtünme katsayılı bir tabakanın elde edilmesi mümkün olmaktadır. Uygulandığı malzemeye kazandırdığı aşınma dayanımı ile öne çıkan, böylelikle ekonomik anlamda da çok önemli bir tasarruf sağlatabilen borlama işlemi, diğer termo-kimyasal yüzey yayılım işlemlerine göre pek çok açıdan üstünlük de sağlamaktadır [1-2-3].

Borlama; alaşımsız ve alaşımlı çeliklere, dökme demirlere, demir dışı metal ve alaşımlarına (Ni, Co, Mo, Ti), bu alaşımların toz metalurjisi yöntemiyle üretilen tozlarına, bazı süper alaşımlar ile sermetler gibi birçok malzeme grubuna uygulanabilir [5]. İşlem şartları ana malzemeye bağlı olsa da genellikle 800° – 1050° C sıcaklıklar ve 1 – 8 saat arası değişen sürelerde uygulanır [6-7].

II. BORLAMA VE BORLAMA YÖNTEMLERİ

Borlama, metal iş parçası yüzeyine bor atomlarının yayındırılarak sert borür tabakalarının oluşmasının sağlandığı bir termokimyasal yüzey sertleştirme işlemidir [2-5-6]. Katı, sıvı, gaz ve plazma ortamlarda yapılabilir. Borlama işlemiyle elde edilen oldukça sert, yüksek korozyon ve aşınma dayanımlı borür tabaka veya tabakalar, ısı enerjisi yardımıyla iş parçası yüzeyindeki metalik latislere bor atomlarının yayındırılması ve burada esas malzeme atomlarıyla birlikte uygun borürlerin oluşturulmasıyla sağlanır.

Eğer demir bazlı malzemeler borlanıyorsa, demir borürler elde edilir [7]. Borlama işlemi, yüksek sıcaklık etkisi altında, bor atomu kaynağı ile malzeme yüzeyi arasında oluşan kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlara dayanmaktadır. İşlem, sabit sıcaklıkta veya termal çevrimli olarak uygulanabilmektedir [3].

Tüm yüzey özelliklerini iyileştirme yöntemlerinde olduğu gibi borlamada da işlem öncesi yapılması gereken bazı ön hazırlıklar söz konusudur. İşlemden önce iş parçasının üzerinde -varsa- bulunan yağ film tabakasının ve kesme sıvılarının tam anlamıyla temizlenmesi gerekmektedir. İşlemin uygulanacağı yüzeyde paslanma varsa tel fırça ile parçanın temizlenmesi zorunludur. Parça yüzeyinin düzgünlüğünün borlama kalitesine etkisi olduğundan; yüzeyler, mümkün olduğunca düzgün hale getirilerek parçalara işleme tabi tutulmalıdır. Borlama sonucu, parçaların boyutlarında, elde edilen bor tabakası kalınlığının % 20-30'u oranında bir büyüme olduğundan, borlanacak işlem parçasında bu durum göz önünde bulundurularak ilk ölçülendirilme yapılmalıdır [2].

Tüm borlama yöntemlerinin birbirlerine göre bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Günümüz endüstrisinde en çok kabul görmüş ve kendine daha geniş uygulama alanı bulmuş olan yöntem ise, pratik ve ekonomik oluşu nedenleriyle, katı ortamda borlama yöntemi olmuştur.

II.1. Katı Ortamda Borlama

Katı ortamda toz bor vericilerle yapılan borlama yani kutu borlama işlemi, kutu karburizasyonuna benzer [3-6]. Borlanan malzemeye ve elde edilmek istenen bor tabakası kalınlığına bağlı olarak genellikle 800 – 1050 °C sıcaklık aralığında, bir saat ve daha uzun sürelerde işlem gerçekleştirilir [2]. Toz bor verici karışımlar; bor verici bileşikler (Bor karbür, saf bor, vb.), alkali metaller, aktivatörler ve dolgu maddelerinin belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilir [3]. Buradaki karışım oranları ve tozların tanecik büyüklüğü işlem uygulanacak malzemeye göre değişmektedir.

Borlama toz karışımları, işlem uygulanacak malzemenin şekline uygun imal edilmiş ısıl dirençli çelik kutularda, parçanın etrafını en az 1 cm kalınlıkta kaplayacak biçimde

doldurulur. Kutunun üstü sızdırmaz bir kapakla kapatılıp işlem normal atmosferde yapılabilir; ya da işlem, kutunun veya fırının içinin koruyucu gaz atmosferiyle korunduğu ortamlarda yapılabilir. Borlanmış parçaların üzerindeki karışım kalıntıları tel fırça yardımıyla kolayca kaldırılabilir. Toz karışımlarla kısmi borlama da yapılabilir [1].

Bu yöntemin avantajları; işlem basitliği, oldukça düzgün yüzeylerin elde edilmesi, gerekli ekipmanların kolay bulunabilmesi ve ucuz olmaları, toz bileşimin kolayca değiştirilebilir olması ve işlem sonu parça yüzeyinin kolay temizlenebilmesidir [3-8]. Bu yöntemin yaygın olarak kullanılmasının nedeni avantajlarının diğer borlama yöntemlerinin avantajlarına göre daha çok olmasıdır. Dezavantajları ise işlem parametrelerinin kontrol yeteneğinin kötü olması, otomasyonun mümkün olmaması ve atık ürünlerinin çevreye zararlı olmasıdır [5].

Katı ortamda toz bor verici karışımlardan başka pasta borlama bileşikleriyle de borlama yapılabilmektedir. Bu durumda cam suyu ve gliserin gibi maddeler bağlayıcı olarak kullanılır [3]. Kısmi borlama uygulamalarına pasta borlayıcılar daha uygundur. İş parçasının borlanacak bölgelerine pasta bir veya daha çok kez sürülebilir. İşlem öncesi pasta sürülmüş kısmın tam olarak kurutulması gereklidir. Pasta borlamasında koruyucu gaz atmosferi olması zorunludur. İşlem sonunda kalıntılar kolaylıkla temizlenebilir [2].

III. BORLU TABAKALARIN GENEL ÖZELLİKLERİ

Borlu tabaka veya tabakaların özelliklerini; malzeme bileşimi, borlama ortamındaki bor atomlarının kimyasal aktiviteleri, borlama işlem sıcaklığı ve süresi, ilave ısı işlemler ve seçilen borlama yöntemi etkiler [9]. Eğer demir bazlı veya çelik bir malzeme borlanıyorsa, iki fazlı ($FeB+Fe_2B$) veya tek fazlı (FeB veya Fe_2B) demir borür tabakaları malzeme yüzeyinde elde edilir [10]. İki fazlı demir borürler, ortamda aşırı bor atomu varsa veya malzeme yüksek alaşımlı bir malzeme ise meydana gelmektedir. Termal uzama katsayıları farklı olduğundan bu iki fazın aynı anda bulunması istenmez. Ana malzeme ile borür tabaka arayüzeyinde morfolojik incelemeler yapıldığıdaysa iki farklı tip yapı gözlenir. Birincisi, sade karbonlu ve az alaşımlı çeliklerde görülen testere dişi tipindeki girintili – çıkıntılı arayüzey formu, ikincisi de yüksek karbonlu ve yüksek

alaşımlı çeliklerde gözlenen daha düz formdaki arayüzey tipidir. Testere dişli tip veya dişli tip yapı göreceli olarak daha düzgün olan arayüzeye göre mekanik özellikler açısından daha iyi sonuçlar sergiler. Bunun da nedeni, testere dişi şeklindeki sınır yapının borür tabakanın ana malzemeye çok daha iyi tutunmasını sağlamasıdır [2-11]. Demir borür tabaka yapıları incelendiğinde, iki fazlı demir borür tabakalarına karşı tek Fe₂B fazına sahip testere dişi görünümündeki tabakalar, endüstriyel uygulamalarda daha düşük kırılma gösterdiğinden tercih edilir [6-12].

Borlama sonucu elde edilen en büyük kazanç sertliktir. Borlama ile karbon çeliklerinde 1800 – 2000 HV, alaşım çeliklerde 2500 – 2800 HV ve yüksek hız çeliklerinde 2800 – 3300 HV'lik yüzey sertlikleri elde edilebilir. Ticari çeliklerde elde edilebilen 1800 – 2000 HV'lik sertlik değerleri, yaklaşık olarak korundumun (Al₂O₃) sertlik değerine eşittir [3]. Kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı, karburizasyonla sertleştirilmiş tabakanın sertliğinin azalmasına böylece de aşınmaya uygun hale gelmesine neden olurken borlu tabakalarda böyle bir sorun yaşanmaz. Çünkü, bor yayılımı ile ulaşılan 1400 – 2000 HV'lik yüksek sertlik değerleri ve yapı formu, 900 – 1000 °C'lerde bile kaybolmamaktadır ve bu özellik yüzey yayılım işlemleri içinde sadece borlamaya ait bir özelliktir [11-13]. Ayrıca borun oksijene karşı ilgisi fazla olduğundan yüzeyde koruyucu ince bir oksit film tabakası oluşmakta ve bu oksit film tabakası yüzeyde katı yağlayıcı vazifesi görüp, sürtünmeli aşınma sırasında metal – metal temasını geciktirerek sürtünme katsayısını düşürmekte ve yüzeylerin birbirine kaynamasını engellemektedir [14]. Borlamayla Wolfram karbürün sertliğine eşdeğer bir sertlik ve teflonunkine (PTFE) yakın sürtünme katsayıları elde edilir [3]. Relatif aşınma direnci yalnız sertliğe bağlı değil aynı zamanda gevreklik gibi bazı fiziksel ve mekanik özelliklere de bağlıdır [15]. Bu yüzden borlu tabakaların aşınma davranışlarının, kullanılacakları düşünülen yerlerde incelenmesi ve ön denemelere göre karar verilmesi, çok sert fakat aynı zamanda kırılma eğilimli olan bu tip yapılar için önemlidir.

IV. MATERYAL VE METOD

IV.I. Materyal

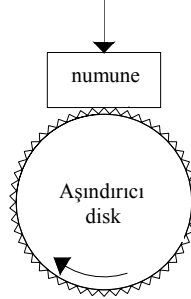
Bu çalışmada, borlanmış sade karbonlu AISI 1030 ve 1050 çeliklerinin işlemsiz hallerine göre yüzey sertlik ve abrazif aşınma dayanımlarında oluşan değişimler incelenmiştir. Denemeye alınan çeliklerin Eskişehir KOSGEB laboratuvarlarında belirlenen kimyasal bileşimleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Deney malzemelerinin % ağırlık cinsinden kimyasal bileşimleri

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Sn	Cu
AISI 1030	0.308	0.222	0.747	0.013	0.017	0.250	0.050	0.288	0.014	0.008	0.252
AISI 1050	0.492	0.221	0.718	0.011	0.010	0.149	0.054	0.125	0.021	0.012	0.261

Aşınma test cihazının şekil ve boyutlarına uygun olarak deney numuneleri (her bir şart için 3’er tane) hazırlanmıştır. Borlama işleminden önce numunelerin yüzeyleri sırasıyla 400, 800 ve 1200 meshlik SiC’lü sulu zımpara kağıtlarıyla zımparalanmış ve sonra alkolle temizlenip kurulanmışlardır. Aşınma deneylerinde Plint TE53 marka aşınma test cihazı kullanılmıştır. Aşınma test cihazının şematik şekli Şekil 1’de görülmektedir. Aşınma deneyleri normal oda sıcaklığı ve nem miktarına sahip laboratuvar ortamında yapılmıştır. Aşındırıcı karşıt cisim olarak alüminyum oksitli (Al_2O_3) 500 gritlik zımpara kağıtları kullanılmıştır. Cihazın aşındırıcı metal diski, çift taraflı yapışkan bant kullanılarak zımpara kağıtlarıyla kaplanmış ve her numune için yeni bir zımpara kağıdı kullanılmıştır. Aşındırma işleminden sonra numunelerin ağırlıklarında ortaya çıkan değişimlerin ölçümü Precisa 125A markalı, 10^{-4} gr hassasiyetli terazi ile yapılmıştır. Aşınma deneyleri tamamlandıktan sonra aşındırılan numuneler, sertleştirilmiş örneklerle uygun kesme diski kullanılarak düşük kesme hızında kesilmiş ve Struers marka Labopress-3 model sıcak kalıplama cihazıyla kalıba alınmıştır. Metalografik yöntemlere uygun olarak zımparalanıp parlatılan numuneler % 2’lik nitelle dağlandıktan sonra borür tabakaların mikro yapıları Olympus PMG3 marka optik mikroskopla incelenmiştir. Borlu tabakaların kalınlıklarının ölçümü optik mikroskoba monte edilebilen cihazın kendi optik mikrometresi yardımıyla ölçülmüştür. Yüzey sertlikleri

ölçümü Shimadzu HMV-2000 mikrosertlik ölçüm cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Yüzey sertliklerinin ölçümünde 50 gr yük, 20 sn süre ile uygulanmıştır.



Şekil 1. Aşınma test düzeneğinin şematik gösterimi.

IV.II. Metod

Borlama işlemi, katı ortamda Ekabor[®]2 toz bor verici karışımıyla ısıl dirençli çelik kutular içerisinde 950 °C sıcaklık ve 2, 4, 6 saat işlem sürelerinde gerçekleştirilmiştir. İşlem sıcaklığında gerekli süre bekletilen kutu fırından çıkartılmış ve üzerine su dökülerek soğutulmuştur. Soğuyan kutunun içinden numuneler çıkartılıp temizlenerek incelemelere hazır hale getirilmişlerdir.

Aşınma deneylerinde aşındırıcı zımpara kağıdı kaplı 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 100 devir/dakika seçilmiş ve aşınmayla oluşan ağırlık kayıpları 250, 500, 1000, 1500, 2000 ve 2500 tur sonunda ölçülmüştür. Aşınma deneyleri 3'er kez tekrarlanmış ve aritmetik ortalamaları alınarak değerlendirilmiştir. Her numunenin ilk ağırlıkları birbirinden farklı olduğundan aynı cins malzeme türü içinde karşılaştırmanın daha kolay yapılabilmesi için ağırlık kayıpları, ilk ağırlığa göre her tur sonundaki yüzde ağırlık kaybı cinsinden tanımlanmıştır.

Borür tabakalarının yüzey sertlik değerleri borlu tabaka alanlarının ortasından yapılan 10'ar ölçümle belirlenmiştir. Borür tabakaların kalınlıklarıysa, net görülen uzun 10 adet dişin uzunluklarının ortalaması alınarak tek bir değer cinsinden belirlenmiştir.

V. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

AISI 1030 ve 1050 çeliklerinin işlemsiz ve 950 °C’de 2, 4, 6 saat borlanmış numunelerinde ölçülen minimum ve maksimum yüzey sertlik değerleri Çizelge 2’de ve borlama sonucu elde edilen borlu tabaka kalınlığı ortalamaları Çizelge 3’de verilmiştir. Şekil 2’de 950 °C’de 6 saat borlama işlemi sonucu elde edilen borlu tabakaların mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Çizelge 2 incelendiğinde borlama sonucu malzemelerin yüzey sertlik değerlerinin işlemsiz hallerine göre yaklaşık 8 – 10 kat arttığı görülmektedir. Ortalama borlu tabaka kalınlıkları incelendiğinde ise aynı malzeme için artan işlem süresinin tabaka kalınlığının düzenli olarak artmasına neden olduğu gözlenmiştir. İncelemeye alınan sade karbonlu çelik malzemelerde artan karbon miktarının elde edilen borlu tabaka kalınlıklarını belirgin bir şekilde azalttığı buna karşılık yüzey sertlik değerlerinde ise az da olsa artışa neden olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 2. Ölçülen minimum ve maksimum yüzey sertlik değerleri (HV_{0.05})

Malzeme	İşlem şartları			
	İşlemsiz	Borlama 950 °C – 2 saat	Borlama 950 °C – 4 saat	Borlama 950 °C – 6 saat
AISI 1030	153-170	1298-1648	1211-1523	1504-1716
AISI 1050	225-235	1224-1693	1362-1839	1314-1892

Çizelge 3. Ortalama borlu tabaka kalınlıkları (µm)

Malzeme	İşlem şartları		
	Borlama 950 °C – 2 saat	Borlama 950 °C – 4 saat	Borlama 950 °C – 6 saat
AISI 1030	73.80	82.30	118.20
AISI 1050	68.20	75.15	108.70

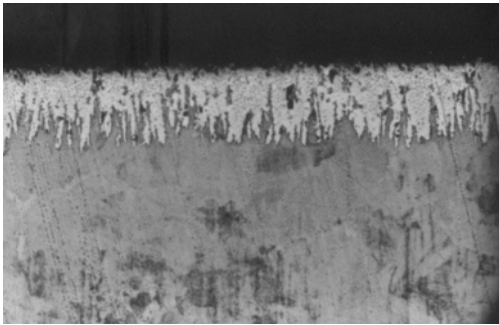
Abrazif aşınma deneylerinde bulunan ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamaları AISI 1030 malzemesi için Çizelge 4’de ve AISI 1050 malzemesi için Çizelge 5’de verilmiştir. Şekil 3’de her iki malzemenin abrazif aşınma deneyleri sonunda bulunan ağırlık kayıp yüzdelerinin karşılaştırıldığı grafik görülmektedir.

Çizelge 4. Al₂O₃-500 grit aşındırıcı karşısında işlemsiz ve 950 °C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları

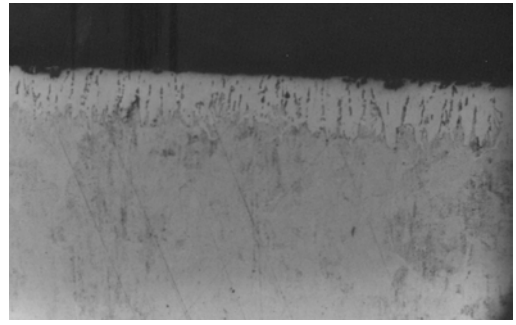
Malzeme AISI 1030	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kayıp yüzdeleri (x 10 ⁻³)					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
İşlemsiz	245.33	321.99	395.59	474.56	540.49	612.56
Borlama 950 °C-2 s	36.05	44.49	53.70	60.60	65.21	69.81
Borlama 950 °C-4 s	24.41	36.62	48.83	53.41	58.75	64.86
Borlama 950 °C-6 s	37.71	43.87	47.72	53.11	59.26	63.88

Çizelge 5. Al₂O₃-500 grit aşındırıcı karşısında işlemsiz ve 950 °C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1050 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları

Malzeme AISI 1050	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kayıp yüzdeleri (x 10 ⁻³)					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
İşlemsiz	164.08	252.31	359.12	434.97	518.55	557.25
Borlama 950 °C-2 s	33.95	43.99	51.70	56.34	60.97	66.37
Borlama 950 °C-4 s	26.19	36.20	46.58	53.14	57.75	65.07
Borlama 950 °C-6 s	38.33	42.17	47.54	52.14	56.74	62.11

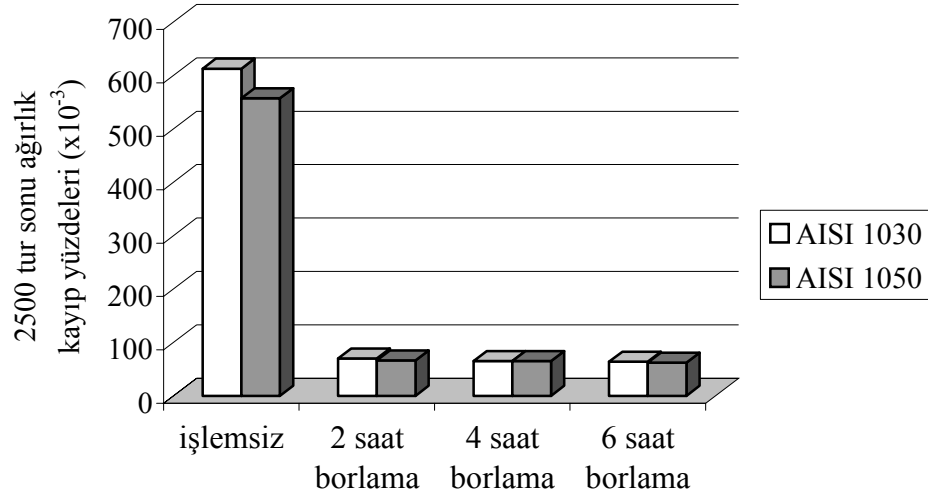


(a)



(b)

Şekil 2. 950 °C'de 6 saat borlanmış (a) AISI 1030 (b) AISI 1050 mikroyapı fotoğrafları.



Şekil 3. AISI 1030 ve 1050 malzemelerinin abrazif aşınma deneyleri sonunda bulunan ağırlık kayıp yüzdelerinin karşılaştırılması.

Sade karbonlu çelik numunelerle (AISI 1030 ve 1050) yapılan abrazif aşınma deney sonuçları incelendiğinde borlanmış çeliklerin alüminyum oksit aşındırıcısına karşı çok büyük oranlarda abrazif aşınma dayanımı kazanmış oldukları belirlenmiştir. Bu malzemelerin işlemsiz hallerinin aşınma davranışları incelendiğinde artan karbon miktarıyla artan yüzey sertliğinin abrazif aşınma dayanımını olumlu yönde etkilediği gözlenmiştir. Çizelge 4 ele alındığında, AISI 1030 çeliğinde; 2, 4 ve 6 saatlik süreler sonunda, borlanmış numunelerin işlemsiz numunelere göre Al₂O₃-500 grit aşındırıcı karşısında 8.77, 9.44, 9.58 kat ve Çizelge 5 ele alındığında, AISI 1050 çeliğinde aynı süreler borlanmış numunelerin işlemsizlere göre Al₂O₃-500 grit aşındırıcı karşısında 8.39, 8.56 ve 8.97 kat daha az aşındıkları tespit edilmiştir.

Aynı malzemede artan borlama işlem süresiyle, artan borlu tabaka kalınlığı aşınmanın azalmasına neden olurken; farklı karbon miktarına sahip iki malzeme karşılaştırıldığında elde edilen borür tabakaların yaklaşık aynı aşınma davranışını sergiledikleri gözlenmiştir. Bu da, borlanmış sade karbonlu çeliklerin abrazif aşınma dayanımında kullanılan altlık malzemesinin karbon oranının ne derece önemli olup olmadığının belirlenmesi için araştırmaların farklı karbon miktarları içeren malzemelerle genişletilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] A.G.von Matuschka, "Boronizing", Carl Hanser Verlag, München Wien, 1980.
- [2] H.J. Hunger and G. Trute, "Boronizing to Produce Wear-Resistant Surface Layers", Heat Treatment of Metals, Vol.2, pp. 31-39, 1994.
- [3] A. Özsoy, "Çeliğin Borlanması Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi", Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir, 1991.
- [4] Anonim, "Bor Dosyası", TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni, Cilt 1-2, ss. 6-25, 2001.
- [5] M. Karakan, A. Alsaran ve A. Çelik, "Plazma Borlama", Mühendis ve Makine, Cilt 43, Sayı 512, ss. 51-54, 2002.
- [6] I.M. Hutchings, "Surface Engineering in Tribology, Chapter 8, In: Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials", Edward Arnold Pub., London, 1992.
- [7] W. Fichtl, N. Trausner and A.G.von Matuschka, "Boronizing with Ekabor", Elektroschmelzwerk Kempten GmbH, 1987.
- [8] C. Meriç, S. Şahin and S.S. Yılmaz, "Investigation of the Effect on Boride Layer of Powder Particle Size Used in Boronizing with Solid Boron-Yielding Substances", Materials Research Bulletin, Vol.35, pp. 2165-2172, 2000.
- [9] D.N. Tsipas and J. Rus, "Boronizing of Alloy Steels", Journal of Materials Science Letters, Vol.6, pp. 118-120, 1987.
- [10] J. Subrahmanyam and K. Gopinath, "Wear Studies on Boronized Mild Steel", Wear, Vol.95, pp. 287-292, 1984.

[11] T.S. Eyre, “Effect of Boronising on Friction and Wear of Ferrous Metals”, *Wear*, Vol.34, pp. 383-397, 1975.

[12] J. Rus, C. Luis De Leal and D.N. Tsipas, “Boronizing of 304 Steel”, *Journal of Materials Science Letters*, Vol.4, pp. 558-560, 1985.

[13] S.L. Evtifeev and A.S. Sin’kovskii, “Method of Improving the Heat Resistance of Parts Working Under Conditions of Discontinuous Lubrication”, *Metal Science and Heat Treatment (USSR)*, Vol.27, No.7-8, pp. 627-629, 1985.

[14] F. Nair, M.B. Karamış ve A. Taşdemirci, “Endüstriyel Uygulamalarda Borlanmış Çeliklerin Aşınma Davranışının İncelenmesi”, 8. Denizli Malzeme Sempozyumu, 26-28 Nisan 2000, Denizli, Bildiri Kitabı, ss. 334-343.

[15] E.V. Shadrichev and S.I. Rummyantsev, “Wear Kinetics of a Two-Phase Boride Layer”, *Metal Science and Heat Treatment (USSR)*, Vol.24, No.7-8, pp. 495-498, 1982.