

Bortemperlenmiş AISI 1040 Çeliğinin Yüzey Özelliklerinin ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

¹Yılmaz YALÇIN, ^{*1}Yusuf KAYALI ve ²Giray NİŞLİ

^{*1}Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Türkiye.

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Türkiye.

Özet

Bu çalışmada, bortemperlenmiş AISI 1040 çeliğinin yüzey özellikleri ve aşınma davranışları incelenmiştir. Disk şeklinde hazırlanan aşınma numuneleri EKABOR®2 tozu içinde gömülerek 900 °C’ de 1, 3, 5 saat borlanmıştır. Borlama işleminden sonra numuneler hızla 250°C, 350°C, 450°C sıcaklıklardaki tuz banyosuna aktararak 1 saat temperlenmiştir. Daha sonra numuneler oda sıcaklığına soğutulmuş ve bol su ile yıkanarak kurutulmuştur. Bortemperlemenin etkisini görebilmek için bazı numunelere sadece borlama işlemi uygulanmıştır. İşlemsiz, borlanmış ve bortemperlenmiş numunelerin mikroyapı özellikleri optik mikroskop ile incelenmiştir. Bu aşamada, XRD ile kaplama tabakasının bileşimi belirlenerek, tabaka kalınlıkları ölçülmüş ve matris yapısı incelenmiştir. Sonraki aşamada borlanmış ve bortemperlenmiş numunelere 10 N ve 20 N yük altında ball-on disc aşınma deneyleri uygulanmıştır. Aşınma izlerinden aşınma hızları belirlenmiş ve aşınma türünü belirleyebilmek için izler taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, AISI 1040 çeliğinin mikroyapısının ve aşınma davranışının bortemperleme şartlarına bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Borlanan ve bortemperlenen numunelerin kaplama tabakası hemen hemen aynı bileşim ve yapıda olmasına karşılık matris yapının değiştiği gözlenmiştir. Sonuç olarak artan yük ve azalan borlama süresi ile aşınma hızının arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: AISI 1040 Çeliği, Borlama, Bortemperleme, Aşınma

Abstract

Surface properties and wear behavior of boro-tempered AISI 1040 steel are investigated in this study. Disc shaped samples embedded in Ekabor®2 powder were boronized at 900 °C for 1, 3, and 5 hours. Following the boronizing, immediately a tempering treatment was applied to the samples for 1 hour in a salt bath at 250 °C, 350 °C, and 450 °C. All the samples cooled down to the room temperature were washed with water and dried. A number of boronized samples were not tempered in order to make comparisons between only boronized and boro-tempered materials. Three sets samples were prepared in this study; untreated, boronized, and boro-tempered. Selected samples from these three groups were investigated for microstructure by optical microscopy. A coating top layer and matrix were analyzed by X-ray diffraction (XRD) for phase structure, and also thicknesses were determined. Boronized and boro-tempered samples were tested for wear behavior by ball-on disc tests under 10 N and 20 N loads. Wear rates were determined from wear lines and scanning electron microscopy (SEM) was also used in order to study wear type. All the results observed in this study show that both the microstructure and wear behavior of AISI 1040 steel change with boro-tempering treatment conditions. Even though structure and composition of the coating layer is the same for both boronized and boro-tempered samples, matrix structures are found to be different. In general, increasing load and decreasing boronizing temperature correspond to higher wear rates.

Key Words: AISI 1040 Steel, Boronizing, Borotempering, Wear.

1. Giriş

Aşınma, günümüz endüstrisinde çok ciddi ekonomik kayıplara neden olan problemlerin başında gelmektedir. Malzemelere uygulanan çeşitli yüzey kaplama işlemleri ile aşınma, korozyon, sertlik, süneklik, yorulma gibi mekanik ve tribolojik özelliklerinin bir veya bir kaçını geliştirmek mümkündür [1].

Yüzey kaplama işlemleri bir malzemenin yüzeyine, bir metal, ametal veya organik madde ile kaplayarak, malzemeyi hem görünüş, hem de fiziksel ve kimyasal bakımdan daha dayanıklı hale getirmek amacıyla yapılmaktadır [2]. Özellikle son yıllarda metalik malzemelerin termo-kimyasal yöntemlerle kaplanması önem kazanmıştır [3]. Borlama işlemi de termo-kimyasal kaplama yöntemlerinden biridir [4,5]. Borlama, bor atomlarının difüzyonu ile malzeme yüzeyinde borürlerin (FeB and Fe₂B) oluşturulduğu termo-kimyasal bir yüzey işlemidir [6, 7]. Malzemenin dış yüzeyindeki borür tabakası malzeme içine uzanan bir difüzyon bölgesiyle desteklenmektedir. Borlama endüstriyel olarak, yapı çelikleri, dökme çelikler, sinterlenmiş demir gibi çoğu demir esaslı ve demir dışı metallere uygulanabilmektedir [8]. Küresel grafitli ve gri dökme demirler de başarılı bir şekilde borlanabilmektedir [9].

Borlama, kutu, sıvı, gaz ve pasta ve kutu borlama gibi klasik yöntemlerle ve gelişmiş tekniklerle (plazma destekli borlama işlemi) yapılabilir [10]. Çeliklerin yüzeyinde oluşan demir borürlerin sertliği 1600 HV değerinin üzerindedir. Borlama, çizilme, aşınma ve korozyona karşı direnci geliştirmektedir [9]. Östemperleme ısıl işlemi ile yüksek mukavemet, kırılma tokluğu ve yorulma direnci gibi üstün özellikler elde edilirken [11], borlama işlemi ise mükemmel aşınma direnci, yüksek yüzey sertliği ve korozyon direnci sağlamaktadır. Böylece, eğer, iki ısıl işlem yani borlama ve östemperleme birleştirilebilirse, yüksek mukavemete, sertliğe ve yüksek aşınma direncine sahip bir AISI 1040 çeliği üretilebilecektir. Bu yeni ısıl işlem “**bortemperleme**” olarak adlandırılmaktadır [10, 12]. Çalışmanın amacı, borlanmış ve bortemperlenmiş AISI 1040 çeliğinin aşınma davranışlarını tespit etmektir.

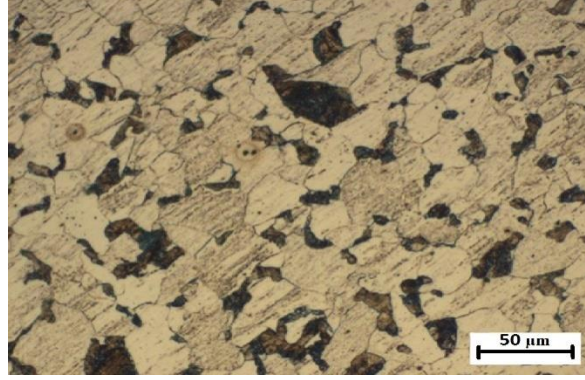
3. Materyal Ve Metod

3.1 Deneysel Malzeme ve Isıl İşlem

Deneysel çalışmalarda, kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilen AISI 1040 çeliği kullanılmıştır. 25 mm çapında çubuk şeklindeki çelik malzemeler Bursa Çelik Makine San. Tic. Ltd. Şirketinden temin edilmiştir. Şekil 1’de AISI 1040 çeliğinin içyapı görüntüsü verilmiştir. Çeliğin ferritik + perlitik içyapıya sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 1. AISI 1040 çeliğinin kimyasal bileşimi.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%Fe
0,42	0,22	0,74	0,01	0,02	0,08	0,13	0,01	0,3	98



Şekil 1. Deneilerde kullanılan AISI 1040 çeliğinin optik mikroyapısı.

Borlama işlemini gerçekleştirmek için tel rezistanslı kuyu tipi fırın kullanılmıştır. Fırın atmosferik şartlara açık olup, fırın hassasiyeti ± 1 °C'dir. Temperleme işleminde ise P1d (Oransal İntegral Türev Kontrolör) kontrollü tuz banyosu fırını kullanılmış olup fırın hassasiyeti ± 5 °C'dir. Temperleme işleminde kullanılan soğutma ortamı, % 50 NaNO₃ + % 50 KNO₃ tuzlarının karışımından oluşmaktadır.

Deney numuneleri paslanmaz çelik kutu içerisinde ticari Ekabor®2 tozuna gömüldükten sonra kutu bir kapakla kapatılmıştır. Paslanmaz çelik pota fırının içine yerleştirilip, 900 ± 1 °C'de 1, 3, 5 saat olmak üzere üç farklı bekleme süresinde borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işleminden sonra numuneler hızlı bir şekilde borlama fırınından alınarak potadan çıkartılıp 250°C, 350°C, 450°C'deki bulunan tuz banyosu içerisine transfer edilmiştir. Tuz banyosunda 60 dakika bekletildikten sonra fırın dışına alınan numuneler oda sıcaklığına soğutulmuş ve bol su ile yıkayıp kurutulmuştur. Borlama ve bortemperleme işlemlerinin etkisini ayrı ayrı görebilmek için bazı numunelere sadece borlama işlemi uygulanmıştır. Tüm ısı işlem şartları ve kısa gösterimleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Tüm ısı işlem şartları ve kısaltma gösterimleri.

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Temperleme sıcaklığı (°C)	Kısa Gösterimi	
900	1	250	BT1-250	
	3		BT3-250	
	5		BT5-250	
	1	350	BT1-350	
	3		BT3-350	
	5		BT5-350	
	1	450	BT1-450	
	3		BT3-450	
	5		BT5-450	
		1	YOK	B1
		3		B3
		5		B5

2.2. Metalografik İnceleme

Deneyi numunelerinden kesilen parçalar metalografik olarak hazırlanıp %2 Nital ile dağlandıktan sonra Olympus BX-60 marka optik mikroskop yardımıyla kesitten kaplama tabakası ve matris mikroyapısı incelenmiştir. Yine aynı numuneler borür tabakasının bileşimini belirlemek için X-ışını difraksiyon analizinde kullanılmıştır. X-ışını difraksiyon analizleri $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda= 1.5406 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılan Shimadzu XRD-6000 marka X-ışını difraktometresi ile gerçekleştirilmiştir.

2.3 Aşınma Testi

Borlama ve bortemperleme işlemine tabi tutulan numunelerin tribolojik özelliklerini incelemek için bilye-disk aşınma cihazı kullanılmıştır. Numuneler oda sıcaklığında (25 °C) 10 N ve 20 N yükler altında ve sabit kayma hızında (yaklaşık 0,3 m/s) 60 dakika boyunca kuru ortamda 8 mm çapındaki WC-Co bilyeye karşı aşındırılmıştır. Aşınma hızı, Perthometer M2 marka pürüzlülük cihazından elde edilen aşınma izleri kullanılarak aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

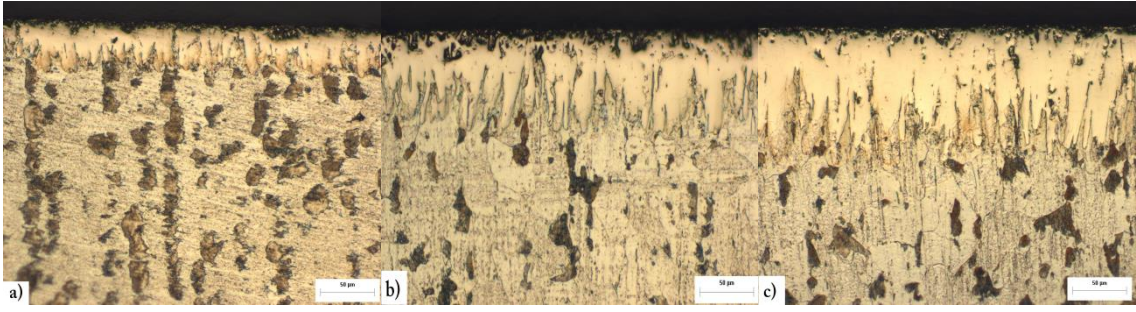
$$\text{Aşınma hızı} = \frac{\text{Aşınan hacim miktarı}}{\text{Toplam iz uzunluğu}} \quad (\text{mm}^3/\text{m})$$

3. Sonuçlar Ve Değerlendirme

3.1. Kaplama tabakası ve mikroyapı

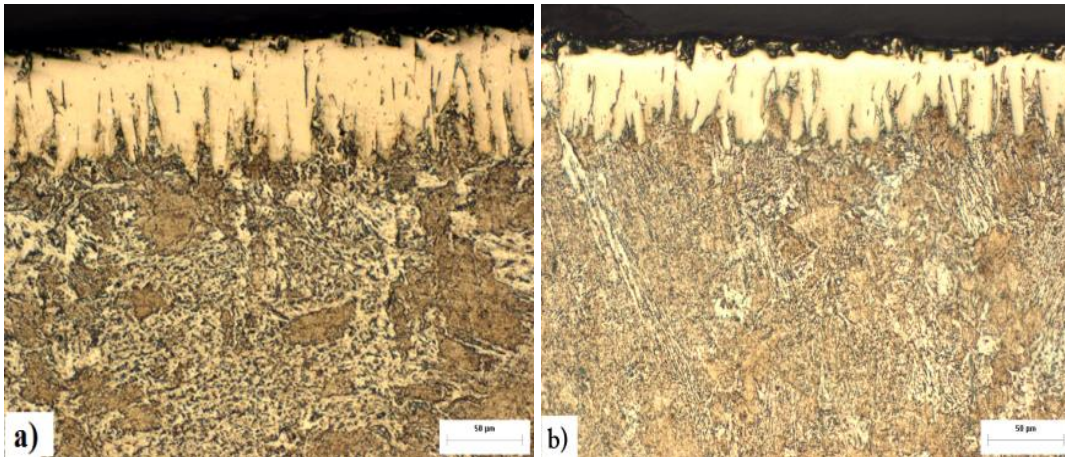
Metalografik olarak hazırlanan borlanmış numunelerin optik mikroyapıları Şekil 2' de ve bortemperlenmiş numunelerin optik mikroyapı görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. Bütün numunelerin içyapısı en dışta borür tabakası, kaplama-matris ara yüzeyi ve matristen oluştuğu mikro yapılardan açıkça görülmektedir. Yüzeyde oluşan kaplama tabakası dişsel bir morfolojiye sahiptir.

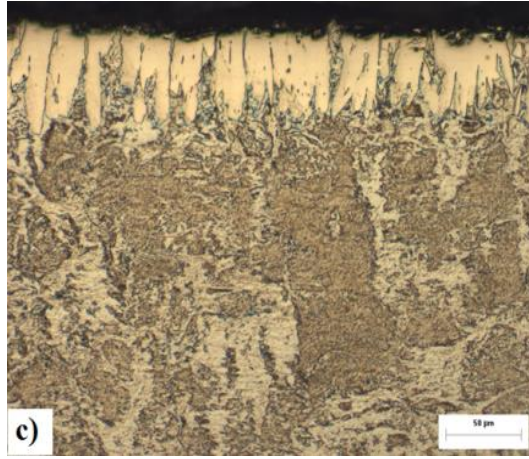
Sadece borlanan ve borlama potası içinde oda sıcaklığına soğutulan numunelerin mikroyapıları incelendiğinde (Şekil 2) bortemperlenen numunelerde olduğu gibi kaplama tabakası, geçiş bölgesi ve matris yapısından oluştuğu anlaşılmaktadır. Her üç borlama süresi için matris yapının işlemsiz AISI 1040 çeliğine benzer olarak ferritik + perlitik olduğu görülmektedir. Ancak borlama süresinin artmasıyla sadece yapının kabalaşmasıyla kalmayıp hadde yapısını karakterize eden bantlaşmanın da kaybolduğu dikkat çekmektedir. Ferritik + perlitik içyapı soğuma hızının oldukça yavaş olmasıyla beklenen bir durumdur. Yüksek sıcaklıkta kısa süreler hadde yapısının bozulması (homojenleşme) tam gerçekleşmezken 5 saatlik borlama süresinde neredeyse homojen bir mikroyapıya ulaşılmıştır.



Şekil 2.900 °C'de a) 1 saat, b) 3 saat ve c) 5 saat süre ile borlanan numunelerin optik mikroyapı görüntüleri.

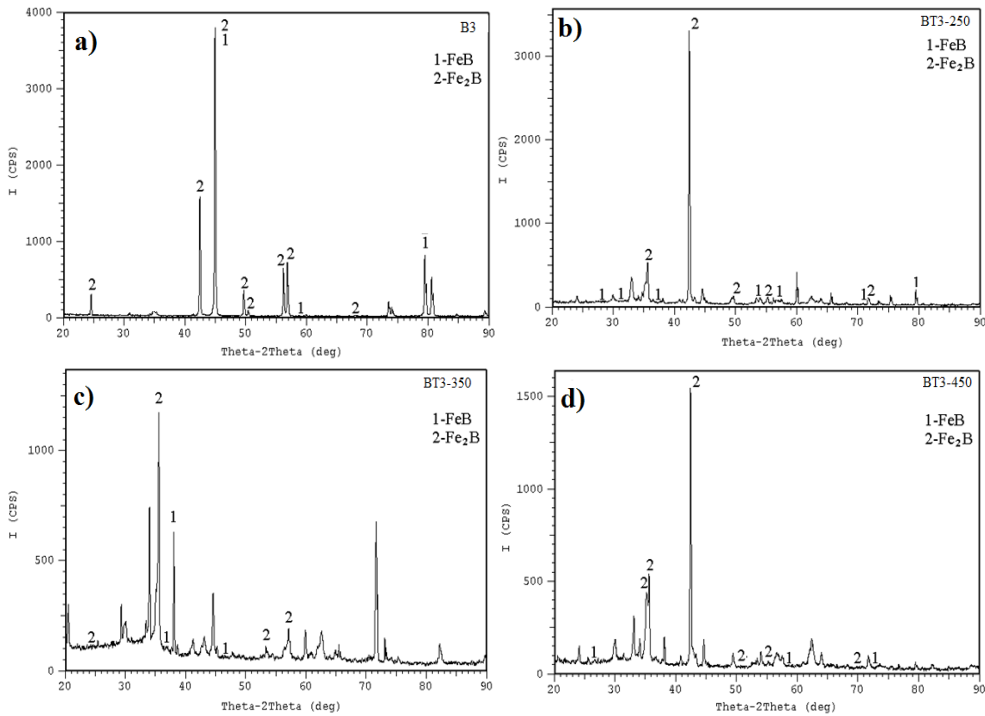
Optik mikroyapı resimleri dikkatle incelendiğinde, bor temperleme ısıl işlem şartlarının malzeme matris yapısı ve kaplama tabakasının kalınlığını etkilediği görülmektedir. Bor temperlenen numunelerin mikroyapılarına bakılacak olursa matris yapısının izotermal dönüşüm sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Borlama işleminden sonra 250 °C'de yapılan bir temperleme işlemiyle alt beynit yapısı oluşmaktadır (Şekil 3a) Bu şartlarda borür tabakasının altında ferrit iğnelerinin büyüme hızının yüksek, karbon difüzyon hızının nispeten düşük olmasından dolayı ince alt beynit matris oluşmaktadır. 350 °C'de ise 250 °C'de temperlenen matris yapısına benzeyen ancak daha kaba bir yapı oluşmaktadır (Şekil 3b). Bu durumda ferrit çekirdek sayısı daha az ve karbon yayınma hızı daha yüksektir. Böylece dönüşüm daha kaba bir yapıya sahip üst beynit oluşumuyla sonuçlanır. Daha yüksek izotermal dönüşüm sıcaklığına (450 °C) soğutma sırasında TTT diyagramında perlit burnunun kesilmesi ile perlitik bir yapının oluşumuna neden olduğu düşünülmektedir. Yani beynitik dönüşüm için yeterince itici güç sağlanamamaktadır. Şekil 3c incelendiğinde matris yapının gerçekten de beynitten ziyade son derece ince bir perlitik yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ferrit miktarının oldukça az olduğu dikkat çekmektedir.





Şekil 3. 900 °C'de 3 saat süre ile borlandıktan sonra a) 250 °C, b) 350 °C ve c) 450 °C'de 1 saat temperlenen numunelerin optik mikroyapı görüntüleri.

Bortemperlenen numunelerde temperleme sıcaklığının kaplama tabakasının bileşimine etkisini görebilmek amacıyla bu kez 3 saatlik borlama süresi sabit tutularak seçilen numunelerden alınan XRD grafikleri Şekil 4'de verilmiştir. Aynı şekilde XRD grafiklerinden kaplama tabakasının FeB ve Fe₂B fazlarından oluştuğu anlaşılmaktadır. Fe₂B fazının baskın olduğu açıkça görülmesine rağmen temperleme sıcaklığının faz miktarlarına etkisi konusunda kesin bir hükme varmak zor görünmektedir.



Şekil 4. 900 °C'de a) 3 saat borlanan ve 3 saat borlandıktan sonra b) 250 °C, c) 350 °C, d) 450 °C'de 1 saat temperlenen numunelere ait XRD analizleri.

Borlama ve bortemperleme şartlarına bağlı olarak ölçülen borür tabaka kalınlıkları Tablo 3'de verilmiştir. Tablo 3'den açıkça görülmekte ki, tabaka kalınlığını temperleme sıcaklığından ziyade borlama süresi etkilemektedir. Hem sadece borlanan hem de farklı sıcaklıklarda temperlenen numunelerde artan borlama süresiyle tabaka kalınlığı doğrusal olarak

artmaktadır. Artan borlama süresiyle borür tabaka kalınlığının artması beklenen bir durumdur ve elde edilen sonuçlar literatürle uyum göstermektedir [13]. Borlama işlemi yayınmaya dayalı termo-kimyasal bir olay olduğundan borlama süresinin artmasıyla borür tabaka kalınlığı artmaktadır.

Tablo 3.Borlama ve bortemperleme işlemleri sonrasında ölçülen tabaka kalınlıkları.

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Temperleme sıcaklığı (°C)	Kısa Gösterimi	Tabaka Kalınlığı (µm)
900	1	250	BT1-250	26,7
	3		BT3-250	66,7
	5		BT5-250	88,3
	1	350	BT1-350	28,1
	3		BT3-350	53,5
	5		BT5-350	80,3
	1	450	BT1-450	27,9
	3		BT3-450	48,1
	5		BT5-450	69,8
	1	YOK	B1	35,1
	3		B3	64,3
	5		B5	91,7

Diğer taraftan tabaka kalınlığına borlama işleminden sonra uygulanan temperleme sıcaklığının da etki ettiği anlaşılmaktadır. Artan temperleme sıcaklığıyla tabaka kalınlığının düşme eğiliminde olduğu görülmektedir. 1 saatlik borlamadan sonra uygulanan temperleme sıcaklığının tabaka kalınlığına fazla bir etkisinin olmadığı, 3 ve 5 saatlik borlama süreleri için ise artan temperleme sıcaklığı ile tabaka kalınlığının önemli oranda düştüğü tespit edilmiştir.

3.2. Aşınma özellikleri

Borlanan ve bortemperlenen tüm numunelerin yüzey pürüzlülükleri aşınma deneyine tabi tutulmadan önce ölçülmüş ve sonuçlar Tablo 4'de verilmiştir.

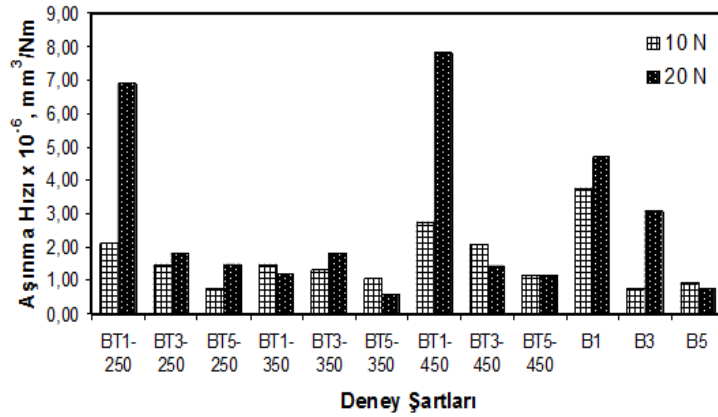
Tablo 4.Borlama ve Bortemperleme işleminden sonra ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri.

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Temperleme sıcaklığı (°C)	Kısa Görünüm	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	
900	1	250	BT1-250	1,634	
	3		BT3-250	1,712	
	5		BT5-250	1,493	
	1	350	BT1-350	1,029	
	3		BT3-350	1,294	
	5		BT5-350	1,169	
	1	450	BT1-450	1,670	
	3		BT3-450	1,892	
	5		BT5-450	1,544	
	1	YOK	B1	0,463	
	3		B3	0,614	
	5		B5	0,564	
	İşlemsiz AISI 1040			işlmz	0,072

Tablo 4 dikkatle incelendiğinde bazı önemli sonuçlara ulaşılmaktadır. Dikkat çekici sonuçların başında borlama ve bortemperleme işlemlerinin yüzey pürüzlülüğünü artırmasıdır. İşlemsiz numunenin yüzey pürüzlülüğü ortalama 0,072 μm iken bu değer borlama ile 0,46-0,62 civarlarına, bortemperleme ile ise yaklaşık 1,9 μm civarına yükselmiştir.

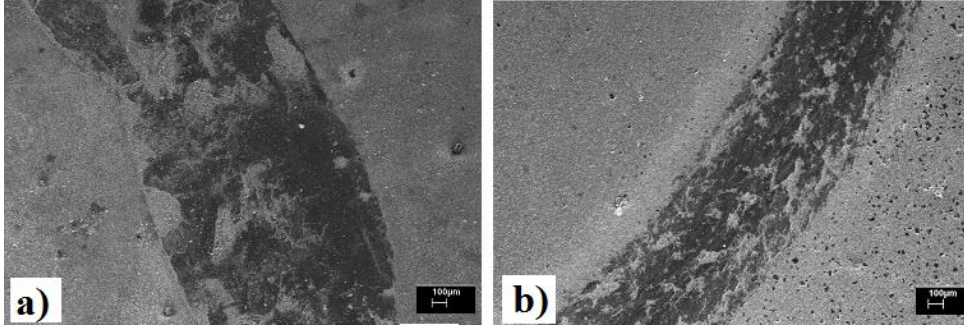
Pürüzlülüğe borlama süresi ve temperleme sıcaklığının da etki ettiği görülmektedir. Sadece borlanan ve bortemperlenen bütün numunelerde en yüksek pürüzlülüğün 3 saatlik borlama işleminde elde edilmesi dikkat çekmektedir. Bununla birlikte minimum değerler bazen 1 saatlik (350 °C'de temperlenen ve sadece borlanan numunelerde) bazen de 5 saatlik borlama süresinde (250 °C ve 450 °C'de temperlenen) elde edilmiştir. Temperleme sıcaklığının etkisine bakıldığında ise bütün borlama süreleri için en düşük pürüzlülüğün 350 °C'de elde edilmiştir.

Şekil 5'den de görülebileceği gibi aşınma hızına etki eden en önemli faktörler borlama süresi ve uygulanan yüküdür. Genel olarak artan borlama süresinin aşınma hızına olumlu etki ettiği anlaşılmaktadır. 20 N yük altında BT-350 grubu ve 10 N yük altında B grubu hariç tutulursa diğer bütün şartlarda artan borlama süresi ile aşınma hızında azalma kaydedilmiştir. Yükün 10 N'dan 20 N'a artırılması genel olarak aşınma hızını artırmıştır. 1 saat borlama sürelerinde aşınma hızlarının çok yüksek olması dikkat çekmektedir. 250 °C de temperlenen numuneler, yükün 20 N seçilmesi durumunda 10 N yüke göre bütün borlama sürelerinde daha yüksek aşınma hızı göstermişlerdir. Bununla birlikte diğer şartlarda 5 saatlik borlama süresi, 20 N yük altında 10 N yüke göre daha düşük aşınma hızları sergilemiştir. Tüm veriler dikkate alındığında 350 °C'de bortemperleme yapmanın ve borlama süresinin uzun tutulmasının aşınma direnci açısından olumlu sonuçlar verdiği söylenebilir.



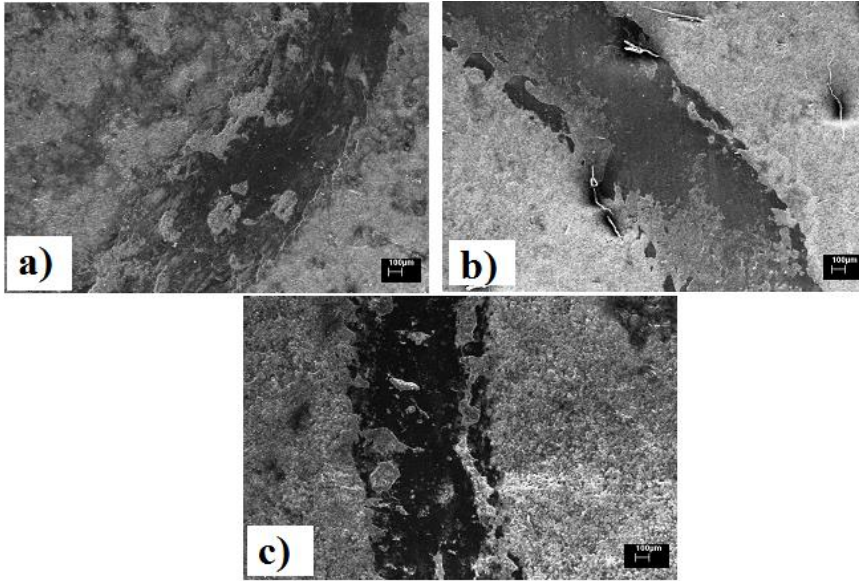
Şekil 5. Deneş Şartları-Aşınma Hızı grafiğı.

Aşınma türlerini belirleyebilmek için seçilen numunelerin aşınma izleri SEM'de incelenmiştir. 1 ve 3 saat borlanan numunelerin 10 N yük altındaki aşınma izlerinden çekilen SEM görüntüleri Şekil 6'de görülmektedir. Aşınmaya birçok mekanizmanın birlikte katkıda bulunduğu söylenebilir. Başlangıçta abrasif aşınmanın etkili olduğu, zaman ilerledikçe tabakanın kırılarak kalktığı ve matrise ulaşıldığı düşünülmektedir. Bilyenin matrisle temas etmesi sonucunda kırılan kaplama tabaka kalıntılarının abrasif aşınmaya, kaymanın ise adhesif aşınmaya neden olabileceği sanılmaktadır. SEM görüntülerine yakından bakıldığında sayılan aşınma türlerinin izleri görülebilmektedir. Ayrıca iz genişliğinden 1 saat borlanan numunenin daha fazla aşındığı açıkça görülebilmektedir.



Şekil 6. a) 1 ve b) 3 saat borlanan numunelerin 10 N yük altındaki aşınma izlerinden çekilen SEM görüntüleri.

Aynı borlama süresinde temperleme sıcaklığının aşınma izleri incelendiğinde (Şekil 7) iz genişliklerinin çok fazla değişmediği dolayısıyla aşınma hızlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Aşınmanın yükün etkisiyle borür tabakasının kırılması şeklinde gerçekleştiği söylenebilir.



Şekil 7. 900 °C'de 3 saat borlanıp a) 250 °C, b) 350 °C ve d) 450 °C'de 1 saat temperlenen numunelerin 10 N yük altındaki aşınma izlerinden çekilen SEM görüntüleri.

Sonuçlar

900 °C'de 1, 3 ve 5 saat borlandıktan sonra havada soğutulan veya farklı sıcaklıklarda (250, 350 ve 450 °C) izotermal işleme bor temperlenen AISI 1040 çeliğinin yüzey özellikleri ve aşınma davranışlarını belirlemek için yapılan çalışmalar ile aşağıdaki genel sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Tüm koşullarda, numune yüzeylerinde FeB ve Fe₂B'dan oluşan testere dişi olarak tarif edilen bir borür tabakası oluşmuştur.

2. Borür tabakasının kalınlığı borlama süresi ve temperleme sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Artan borlama süresi ile tabaka kalınlığı artmaktadır. Temperleme sıcaklığının artması tabaka kalınlığında az da olsa azalmaya neden olmuştur.
3. Temperleme sıcaklığı ve/veya borlamadan sonraki soğutma işlemi matris yapısını etkilemektedir. Temperleme sıcaklığının artmasıyla birlikte matris yapısı alt beynit, üst beynit ve perlit şeklinde oluşmaktadır. Borlama işleminden sonra havada soğutma faz oranlarını çok fazla değiştirmese de sıcak haddeleme belirtileri olan bantlaşmayı ortadan kaldırmaktadır.
4. Borlama ve bortemperleme işlemi, deneylerde kullanılan numunelerin yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır.
5. Borlama ve bortemperleme işlem şartları aşınma hızını etkilemektedir. Artan borlama süresi aşınma direncine olumlu katkıda bulunurken, en uygun temperleme sıcaklığının üst beynit matris yapısının elde edildiği 350 °C olduğu belirlenmiştir.
6. Uygulanan yükün artması genelde aşınma hızını arttırmaktadır. Ancak 250 °C temperleme sıcaklığı hariç diğer koşullarda artan yük ile aşınma direncinde bir artış görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Sarıca, B. Farklı Kalite Çeliklere Uygulanan Yüzey Kaplama İşlemlerinin Aşınma Davranışlarına Etkisi. Yüksek Lisans. İ.T.Ü., Fen Bil. Ens., İstanbul, 2005.
- [2] Uysal, M. CrN, TiN Kaplanmış ve Kaplanmamış AISI 304 Paslanmaz Çeliğin Korozyon Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üni. Fen Bilimler Ens. Ankara, 2006.
- [3] Kayalı, Y. Borlanmış AISI 316 L Paslanmaz Çeliğin Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi AKÜ, Fen Bilimler Ens. Afyon, 2011.
- [4] Sinha, A. K. Boriding (Boronising). ASM Handbook, Vol. 4, J. Heat Treating; 1991, pp. 437–447.
- [5] Özbek, İ., Sen, Ş., İpek, M., Bindal, C., Zeytin, S., Uçışık, A.H. A Mechanical Aspect of Borides Formed on The AISI 440C Stainless Steel. Vacuum 73; 2004, pp.643-648.
- [6] Bindal, C. Az Alasım ve Karbon Çeliklerinde Borlama ile Yüzeye Kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tespiti. Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bil. Ens., İstanbul, 1991.
- [7] Tabur, M., İzçiler, M., Gul, F., Karacan, I. Abrasive Wear Behaviour of Boronized AISI 8620 Steel. Wear 266; 2009, pp.1106-1112.
- [8] Yalcin Y., Taktak S., Yazıcı A.M. Küresel grafitli dökme demirin bortemperlenmesi. 4. International Advanced Technologies Symposium, Selçuk Üni, Konya; 2005, pp. 934-940.
- [9] Sen U., Sen S. and Yılmaz F. Structural Characterization of Boride Layer on Boronized Ductile Irons. Surface and Coatings Technology, 176; 2004, pp. 222–228.
- [10] Kayalı, Y. Bortemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Mekanik Özellikleri ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Y. Lis. Tezi AKÜ, Fen Bilimler Ens. Afyon, 2006.
- [11] Yalçın, Y ve A.M. Yazıcı. The Effect Of Boro-Tempering Heat Treatment On The Properties Of Ductile Cast Iron. Kovove Mater, 45; 2007, 51-57.
- [12] Kayalı, Y. Yalcin, Y. The Effects of Boro-tempering Heat Treatment on Microstructure Properties of Ductile Iron. Materials and Design 32; 2011, 1414-1419.
- [13] Şen, U. Küresel Grafitli Dökme Demirin Bor Kaplanması ve Kaplama Özellikleri. Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimler Ens., İstanbul, 1997.