

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO AL DESGASTE DE LOS ACEROS BAINÍTICOS ALEADOS CON BORO

Pedro I Lizarazo^{1}, Rodolfo Rodríguez¹, Jhon Olaya¹, Mauricio Sierra¹, Ignacio Mejía², Arnoldo Bedolla²*

1: Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

2: Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH, 58060 Morelia, Michoacan, México

*Contacto: pjlizarazoa@unal.edu.co

RESUMEN

En este trabajo se ha investigado el efecto del boro agregado en pequeñas cantidades como aleante (0 a 60 partes por millón) en nuevos aceros con estructura bainítica y bajo contenido de carbono, con el propósito de mejorar sus propiedades mecánicas. Para determinar la resistencia al desgaste en los aceros bainíticos aleado con diferentes niveles de boro, se desarrollaron ensayos de desgaste punta sobre disco tomando como referencia lo descrito en la norma ASTM-G99. Se han obtenido resultados donde la microestructura bainítica adquirió una alta resistencia al desgaste al añadir pequeñas cantidades de boro, debido a la naturaleza fina de la bainita y a la ausencia de fragilidad de las fases de cementita y martensita.

Palabras Clave: *Aceros, Bainita, Desgaste.*

ABSTRACT

In this work we have investigated the boron effect when is aggregated in small quantities as alloying (from 0 to 60 parts per million) in new steels with bainitic structure and low carbon, with the purpose to improve their mechanical properties. To determine the wear resistance in bainitic steels alloyed with boron, wear tests were carried out through pin on disk according to requirements of ASTM-G99. The results have shown that the bainitic microstructure increase the wear resistance when increase the small quantities of boron, due to the presence of fine bainite and the absence of brittleness produced by cementite and martensite phase.

Keywords: *Steels, Bainite, Wear*

1 INTRODUCCIÓN

La investigación referente a la producción de aceros bainíticos se ha venido desarrollando desde décadas atrás, específicamente durante los años 20, donde Davenport y Bain descubrieron una nueva microestructura que difería en relación a la perlita y la martensita. En 1934 esta microestructura fue denominada Bainita en honor a Bain [1]. Desde el descubrimiento de la bainita, se han diseñado y fabricado cantidad de aceros que han tenido una diversidad de diseños en relación a su composición química y han sido comercializados en un amplio rango. Los aceros bainíticos modernos presentan una gran cantidad de aplicaciones en el sector automovilístico, en

la producción de motores y en rieles para trenes entre otros, donde se han llevado a cabo estudios referentes al comportamiento que tiene esta clase de aceros frente a fenómenos como el desgaste [2].

La bainita es un microconstituyente que se obtiene mediante procesos de transformación isotérmica, generalmente a temperaturas entre 200 y 300°C. Sin embargo, para acelerar la transformación de este elemento se adicionan aleantes como el aluminio y el cobalto [3], en concentraciones inferiores al 2% dentro de la composición química del acero [4]. Los aceros bainíticos con bajo contenido de carbono han sido desarrollados mediante el empleo de procesos termomecánicos controlados y las técnicas de precipitación controlada de fases de transformación, obteniendo aceros con microestructuras bainíticas ultra finas. Se han utilizado aleantes como el silicio en cantidades entre 1.5 y 2% [5], que controla la precipitación de cementita durante la formación de bainita [6]. El boro es un elemento que permite aumentar la resistencia y la dureza de los aceros al ser agregado en pequeñas cantidades, lo cual permite sustituir ciertos elementos como el níquel y el molibdeno [7]. Este incremento en la dureza se debe a que el boro retarda la nuclealización de la ferrita, la cual es asociada con la facilidad de segregar límites del grano austenítico. La presencia de boro también incrementa el valor de otras propiedades en relación al esfuerzo y la ductilidad. [8].

Mediante ensayos de desgaste llevados a cabo en el dispositivo Pin on Disk, se obtuvieron resultados donde la microestructura bainítica adquirió una alta resistencia al desgaste, alcanzando una buena combinación de dureza y tenacidad sobre la microestructura, debido a la naturaleza fina de la bainita y a la ausencia de fragilidad de las fases de cementita y martensita, lo cual atribuye una alta resistencia al desgaste. Para el presente trabajo se utilizaron cinco probetas correspondientes a aceros bainíticos con un contenido de boro de 0, 10, 20, 40 y 60 partes por millón, donde se busca una aproximación que permita definir el comportamiento de cada acero en condiciones de desgaste en seco y los modelos que sobre este influyan, trabajando con variables fijas como la velocidad de deslizamiento y la carga aplicada, teniendo en cuenta factores como la temperatura y la humedad. El principal objetivo es conocer el comportamiento de cada uno de estos aceros tomando como referencia la distancia y el tiempo de deslizamiento, la rugosidad del material, la dureza y el análisis de las superficies desgastadas.

2 METODOLOGÍA

El ensayo se llevó a cabo mediante un equipo Pin-on-Disk, tomando como referencia lo descrito en la norma ASTM G99, cuyo proceso consiste en aplicar una carga sobre la probeta mediante un pin que se coloca perpendicularmente respecto a la superficie de esta, donde el pin permanece fijo mientras que el disco gira originando un deslizamiento relativo entre ellos en el área de contacto, lo que forma una trayectoria circular. El material del pin corresponde a un acero al cromo con un diámetro de 6.3 milímetros y una dureza de 63 RC, mientras que el disco, material a ensayar, corresponde al acero bainítico con una composición química de Fe-0.32C-1.45Si-1.97Mn-1.26Cr-0.26Mo-0.10V, donde se varía el contenido de boro en 0, 10, 20, 40 y 60 partes por millón. Los parámetros utilizados para el desarrollo del ensayo corresponde a la carga normal de 400 gramos, la velocidad de deslizamiento de 100 milímetros por segundo, el tiempo de duración del ensayo de 10 minutos (600 segundos), la distancia recorrida, de aproximadamente 68 metros, y la dureza del material.

Los aceros bainíticos fueron obtenidos mediante un proceso de fundición, donde se utilizó un horno de inducción al vacío que se encuentra en el Laboratorio de Fundición de la Universidad Nacional de Colombia. Posteriormente se realizó un proceso termomecánico de laminación en caliente, entre 800°C y 1000°C para cada acero, y posteriormente los bloques fueron enfriados al aire a temperatura ambiente para adquirir la microestructura bainítica.

De cada bloque laminado se extrajeron las probetas de forma cuadrada de 20 milímetros de lado y 5 milímetros de espesor, llevado a cabo mediante un proceso de corte realizado a través de una cortadora de disco rápido. Luego las probetas fueron sometidas a los procesos de lijado en papel de 240, 320, 400, 600 y 1200 granos por pulgada cuadrada y pulido en paños, con el fin de obtener una superficie libre de rugosidad que evita cualquier interferencia en los resultados. Los ensayos fueron llevados a cabo mediante el tribómetro CETR UMT Multi-Specimen Test System -Pin On Disk- que se encuentra en el laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Universidad Nacional.

El contenido de boro dentro de la composición química aumenta la resistencia al desgaste del material, ya que el boro permite la formación de bainita e incrementa las propiedades mecánicas del acero. Tomando como referencia lo descrito en la norma ASTM G-99 se calculó la cantidad de volumen perdido como consecuencia de la fricción producido por el movimiento relativo entre las superficies del disco y del pin a partir de la siguiente ecuación, la cual se puede encontrar en el apéndice de la norma.

$$w = 2\pi R \left[r^2 \sin^{-1}(d/2r) - (d/4)(4r^2 - d^2)^{1/2} \right] \quad (1)$$

Donde w corresponde al volumen perdido, d es el ancho de la huella, R su radio y r el radio final del pin. Posterior a esto se procede a calcular el coeficiente o tasa de desgaste teniendo en cuenta las variables como la carga aplicada, la pérdida de volumen y la distancia de deslizamiento. Esto con el fin de observar el comportamiento que tiene cada uno de los aceros bainíticos y conocer en que influye el contenido de boro en relación a su resistencia al desgaste.

$$k = \frac{w}{F_N \cdot S} \quad (2)$$

Donde k corresponde al coeficiente de desgaste, w al volumen perdido F_N a la carga aplicada y S a la distancia de deslizamiento.

3 RESULTADOS

En las siguientes figuras se pueden observar dos ejemplos de las topografías tomadas a cada una de las huellas impresas sobre cada probeta de los aceros bainíticos. Cada imagen se obtuvo mediante un microscopio de laser confocal Carl Zeiss – LSM 70, con su respectivo software, donde se utilizaron aumentos de 20x y 50x. En las imágenes se puede observar deformación plástica asociada a un desgaste severo.

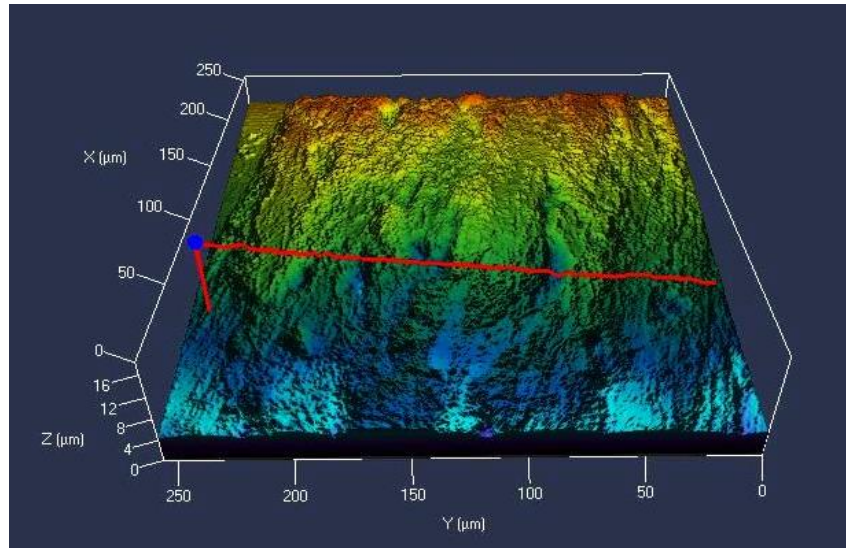


Figura 1.1.

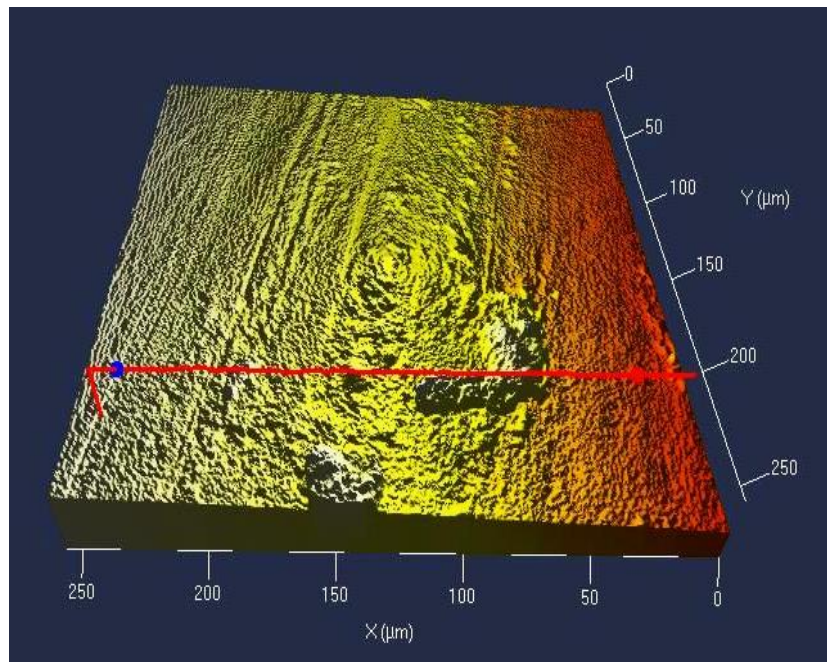


Figura 1.2..

Figura 1. Topografías de la superficie de las zonas desgastadas en la probeta o disco. 1.1) Superficie desgasta de un acero bainítico con 0 ppm de Boro. Aumento 50x. 1.2) Superficie desgasta de un acero bainítico con 20 ppm de Boro. Aumento 50x

En la figura 1 se puede observar que el daño presentado en cada una de las huellas, en función del número de ciclos y del tiempo del ensayo, se asocia a un desgaste adhesivo. Esta clase de desgaste generalmente deja como evidencia agrietamiento en la superficie. Las juntas de adhesión, las cuales se asocian a un desgaste severo, dan una idea de una fuerte interacción entre las asperezas de las superficies durante el deslizamiento. También se puede observar otra clase de

desgaste que corresponde al abrasivo, ya que se observan líneas paralelas que pudieron haber sido ocasionadas producto de un desgaste abrasivo de tres cuerpos, donde las partículas o los fragmentos desprendidos de la superficie del material desprendido se localizan entre el pin y la superficie desgastada.

Para conocer los mecanismos de desgaste, se analizaron a través del Microscopio Electrónico de Barrido FEI QUANTA 200 las huellas producidas por el deslizamiento entre la superficie del pin y el disco, que corresponde a la probeta. En figura 2 se puede observar que independientemente del contenido de boro, dentro de la composición química de cada acero los mecanismos de desgaste que predominan son el adhesivo, asociado a la deformación plástica de la superficie de la probeta y pérdida superficial de material, y el abrasivo, ocasionado como consecuencia de la presencia de partículas sobre las superficies en contacto. Sin embargo, la severidad en la huella y la cantidad de volumen removido para cada probeta está directamente relacionado con el contenido de boro.

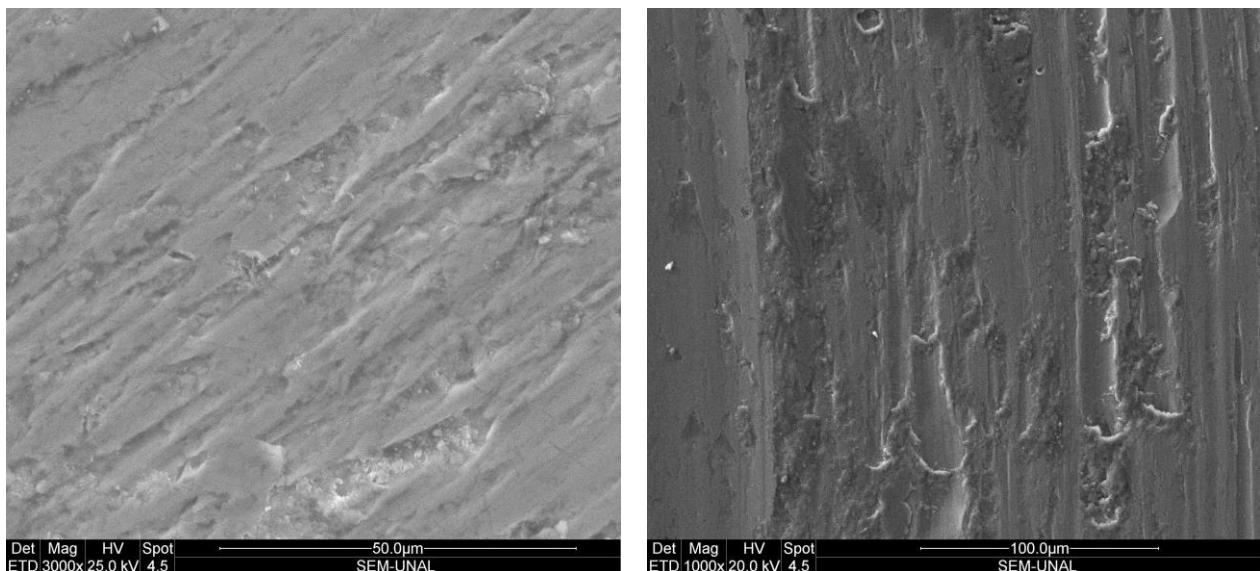


Figura 2. Superficie desgastada

Dentro del sistema tribológico, el disco es el elemento que posee la menor dureza, por lo que sobre este elemento se va a presentar mayor desgaste y por consiguiente la pérdida de material. Se observó que a medida que incrementa el contenido de boro en la composición química del acero la dureza aumenta y su resistencia al desgaste, por lo que el acero con mayor contenido de boro va a presentar menor pérdida de volumen, el cual se calculó a partir de la ecuación que se encuentra dentro de la norma ASTM G-99 y que corresponde a la ecuación 1 del numeral 2 del presente artículo. Para este cálculo influyen variables como el ancho de la huella y su profundidad, obtenidas a través de un perfilómetro. Con el cálculo del volumen perdido se determina el coeficiente de desgaste, teniendo como referencia la distancia de deslizamiento, que fue de 61 metros, y el valor de la carga, que es de 400 gramos (4 newtons).

Tabla 1. Valores de rugosidad media y profundidad.

PPM	Rugosidad	Profundidad
0	0,42403	1,67524
10	0,67004	2,22390
20	0,43145	1,78865
40	0,35046	1,39960
60	0,33696	1,35500

Luego del ensayo, durante el análisis de la cantidad de volumen perdido se encontró que a medida que incrementaba el contenido de boro los aceros experimentan una menor pérdida de volumen, calculado entre 585 mm^3 para el acero con 60 partes por millón de boro y 816 mm^3 para el acero que no tiene boro. Esta diferencia en la pérdida de volumen principalmente se asocia al desarrollo de la microestructura bainítica, obtenida a partir del incremento del boro, donde su principal efecto es la inhibición de la ferrita en el límite de grano austenítico, facilitando la formación de bainita, proporcionando de esta forma la templabilidad del acero y el aumento en sus propiedades mecánicas, favoreciendo su dureza y una mayor resistencia al desgaste. A partir del volumen removido en cada probeta, se procedió a calcular los coeficientes de desgaste, donde se encontraron valores entre $3,30 \text{ mm}^3/\text{N.m}$ para el acero con 0 partes por millón de boro y de $2,45 \text{ mm}^3/\text{N.m}$ para el acero con 60 partes por millón.

4 CONCLUSIONES

Sobre la superficie de la probeta se presentó deformación plástica, donde las asperezas que toman lugar debido a la adhesión originaron la nuclealización de las grietas situadas en la superficie.

Durante el ensayo los fragmentos de desgaste no fueron removidos, lo que generó una aglomeración en la superficie, causando indentaciones y una pequeña escala de abrasión de 3 cuerpos.

El aumento en el contenido de boro dentro de la composición química del acero bainítico permitió que este acero presentara una menor tasa de desgaste y por consiguiente una mayor resistencia.

5 AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Vicerectoría de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia Proyecto No. 14744, por la financiación de esta investigación.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Yoozbashi, M.N. Yazdani, S. Wang, T.S., “Design of a New Nanostructured, High-Si Bainitic Steel with Lower Cost Production Materials and Design”, *Materials and Design*, Vol. 32, 3248–3253, 2011.

2. Zhu, K. Oberbillig, C. Musik, C. Loison, Didier. Iung, T., “Effect of B and B +Nb on the Bainitic Transformation in Low Carbon Steels”. *Materials Science and Engineering*, Vol A 528, 4222–4231, 2011.
3. Zhang, F.C. Wang, T.S. Zhang, P. Zheng, C.L. Zhang, M. Zheng, Y.Z. “A Novel Method for the Development of a Low-Temperature Bainitic Microstructure in the Surface Layer of Low-Carbon Steel. *Scripta Materialia*, Vol. 59, 294–296, 2008.
4. Qian, L. Zhou, Q. Zhang, F. Meng, J. Zhang, M. Tian, Y. “Microstructure and Mechanical Properties of a Low Carbon Carbide-Free Bainitic Steel co-alloyed with Al and Si”. *Materials and Design*, Vol. 39, 264–268, 2012.
5. Caballero, F.G. Miller, M.K. Babu, S.S. Garcia-Mateo, C. “Atomic Scale Observations of Bainite Transformation in a High Carbon High Silicon Steel”. *Acta Materialia*, Vol. 55, 381–390, 2007.
6. Garcia, Mateo, C. Caballero, F.G. Sourmailb, T. Kuntzc, M. Cornidea, J. Smanio, V. Elvira, R. “Tensile Behaviour of a Nanocrystalline Bainitic Steel Containing 3 wt% Silicon”. *Materials Science and Engineering A*, 2012.
7. Sang Yong, S. Seung Youb, H. Byoungchul, H. Chang Gil, L. Sunghak, L. “Effects of Cu and B Addition on Microstructure and Mechanical Properties of High-Strength Bainitic Steels”. *Materials Science and Engineering*, Vol. A 517, 212–218, 2009.
8. Naderia, M. Ketabchia, M. Abbasia, M. Bleck, W. “Analysis of Microstructure and Mechanical Properties of Different Boron and Non-Boron Alloyed Steels After Being Hot Stamped”. *Procedia Engineering*, Vol. 10, 460–465, 2011.