

Obtención y caracterización mecánica de un acero bainítico aleado con boro (10 y 20 ppm)

M. A. Sierra¹ | J. J. Olaya¹ | R. Rodríguez-Baracaldo¹

Recibido:
Enero 26 de 2012

Aceptado:
Abril 23 de 2012

Resumen

Los aceros bainíticos se han convertido en uno de los materiales que se han investigado durante la última década, debido a sus excepcionales propiedades mecánicas. La ventaja que ha tenido desarrollar este tipo de materiales es particularmente la obtención de estructuras libres de carburos que combinan una muy buena resistencia mecánica con una excelente tenacidad. Mediante este trabajo se establecieron y controlaron adecuadamente las condiciones metalúrgicas para fundir en vacío un acero bainítico aleado con 10 y 20 ppm de Boro y tratamiento termomecánico de laminación entre 1000 °C y 1200 °C. La caracterización microestructural se realizó mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, y la caracterización mecánica mediante pruebas de dureza, tracción y tenacidad a temperatura ambiente.

Los resultados obtenidos muestran resistencias últimas del orden de 1800 MPa y elongaciones de aproximadamente el 16%. Es apreciable el aumento en las propiedades mecánicas con el incremento del contenido de boro en los aceros. El boro posiblemente está actuando como agente refinador de grano y disminuye la nucleación de la ferrita en los límites de grano de la austenita, facilitando la formación de bainita.

Palabras clave: Bainita, tratamiento termomecánico, fundición, propiedades mecánicas.

Abstract

Bainitic steels have become one of the metals most widely investigated in the last decade, due to the exceptional combination of mechanical properties. The advantage of such materials is to obtain free carbide structures that combine good mechanical strength with excellent toughness. In this work were established and properly controlled conditions to cast a bainitic steel with 10 and 20 ppm of boron, and subsequently thermomechanical treatment of rolling process between 1000 °C and 1200 °C. The microstructure characterization was carried out

¹Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.
e-mail: masierrac@unal.edu.co, jjolayaf@unal.edu.co, rodriguezba@unal.edu.co

by optical microscopy and scanning electron microscopy, and mechanical characterization by hardness, strength-strain and toughness test at room temperature.

The results show an ultimate strength of 1800 MPa and elongations of 16%. Also, it is noticeable increase in mechanical properties with increasing boron content in the steels. Probably boron acts as grain refiner and decrease the nucleation of the ferrite grain on austenite boundaries, improving the formation of Bainite.

Keywords: *Bainite, thermomechanical treatment, casting, mechanical properties*

1. Introducción

El acero continúa siendo la columna vertebral de los materiales del sector transporte, construcción de maquinas y estructural; y todo hace pensar que gracias a su flexibilidad y funcionalidad seguirán siendo importantes por mucho más tiempo. En los últimos años el desarrollo en la investigación de nuevos aceros se ha centrado en la obtención de mejorar las propiedades de estos materiales buscando alternativas dentro de su propia estructura. Actualmente a nivel mundial se están incorporando entre otros metales, los aceros bainíticos avanzados, ofreciendo excelentes propiedades de alta resistencia mecánica y formabilidad que los hacen atractivos para muchas aplicaciones en donde estas exigencias son preponderantes [1-2].

Este tipo de aceros bainíticos avanzados son diseñados con muy bajas concentraciones de carbono y elementos aleantes, y procesados mediante tratamientos termomecánicos con el fin de obtener una microestructura bainítica ultrafina. Esta estructura ofrece la posibilidad de mejorar de manera simultánea la resistencia a la tracción y la tenacidad con una muy aceptable ductilidad, adicionalmente estos

aceros tienen la ventaja de poderse desarrollar a bajo costo dando la oportunidad de que la industria nacional lo pueda implementar [3].

En términos generales los aceros convencionales utilizados en estado bainítico no han mostrado gran éxito debido a la presencia de partículas de cementita en la microestructura. Su capacidad de absorber energía durante el impacto es inferior a la encontrada en los aceros templados y revenidos de composición semejante. Ahora bien, la adición de silicio evita la formación de carburos y enriquece la austenita en carbono, produciendo una microestructura formada por placas de ferrita bainítica extremadamente finas (decenas de nm), separadas por láminas delgadas de austenita enriquecida en carbono. La microestructura bainítica libre de carburos ofrece la posibilidad de obtener una combinación tanto de alta resistencia mecánica como de alta tenacidad, difícilmente obtenibles con otro tipo de acero [1].

Investigaciones recientes en estos aceros han mostrado que a través de modificaciones en la composición química se puede generar una nueva familia de aceros bainíticos. Estos cambios consisten principalmente en la reducción del contenido de silicio y carbono y la adición de elementos aleantes como el boro

para mejorar la estabilidad hasta lograr los niveles más adecuados para evitar la formación de carburos. El principal efecto del boro es la inhibición de la nucleación de la ferrita en los límites de grano de la austenita, favoreciendo así la formación de bainita. Este efecto es debido al hecho de que la segregación del boro hacia los límites de grano de la austenita disminuye la energía interfacial reduciendo los sitios preferenciales para la nucleación de la ferrita.

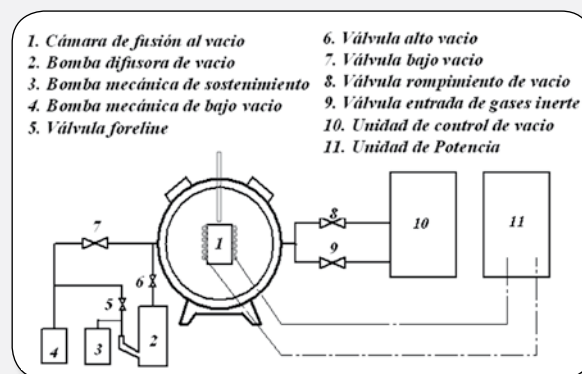
La producción de nuevos aceros bainíticos ha sido estudiada por H. Bhadeshia y sus colaboradores. En estos trabajos se ha logrado obtener aceros de alta tenacidad y de alta resistencia, conocidos como superbainíticos [4-5]. Otras investigaciones han estado más enfocadas en realizar tratamientos térmicos, o estudiar sus propiedades mecánicas o tribológicas [6].

El objetivo de esta investigación es producir un acero de alta resistencia y tenacidad a bajo costo. Para desarrollar este acero se seleccionó la siguiente composición química: Fe-0.32C-1.45Si-1.97Mn-1.26Cr-0.26Mo-0.10V aleado con boro, la cantidad de boro fue de 10 y 20 ppm (partes por millón). En esta investigación se estudia la influencia del boro sobre las propiedades mecánicas de esfuerzo máximo, dureza y tenacidad y su correlación con la microestructura.

2. Desarrollo experimental

El acero bainítico se produjo en un horno de inducción con sistema de vacío que permite hacer la colada bajo esta condición y que proporciona una capacidad máxima de vacío de 10^{-4} Pa. Este horno permite la variación de la frecuencia desde 0 hasta 9000 Hz, con potencia máxima de 75 kilovatios. La fusión se realizó a 1670°C durante 2 horas. Las fundiciones se realizaron con una presión de trabajo de 10^{-2} Pa. En la figura 1 se presenta el esquema del horno de fundición.

Figura 1. Esquema del horno de inducción al vacío.



Para obtener el acero se utilizaron ferroaleaciones en cantidades de: FeSi 1.875%, FeMn 2.595%, FeMo 0.41%, FeCr 1.93 %, FeV 0.12% y con el objetivo de aportar los elementos requeridos para alcanzar la composición química propuesta se adicionó chatarra con 65 % de acero 1020 y 35% de 1045, lo cual constituye el 93.38%. Para ajustar los contenidos de boro se adicionó 10 ppm (FeB 0.00544%) y 20 ppm (FeB 0.01088%).

Los moldes para obtener los lingotes fueron coquillas metálicas fabricadas en perfil en L de acero estructural para garantizar la obtención de un tocho de sección transversal cuadrada de 70 mm de lado que se cortaron en cubos. Los cubos se laminaron desde 1100°C hasta 900°C para obtener un espesor de 22 mm. A partir de esta temperatura se enfriaron al aire.

El análisis químico de los materiales producidos se realizó mediante un espectrómetro de emisión óptica marca UV-VIS marca BAIRD. La tabla 1 muestra un resumen de las composiciones químicas obtenidas para cada aleación.

Tabla 1. Composición química aceros obtenidos (% en peso).

acero	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	B
Base	0.29	1.5	1.9	1.4	0.3	0.1	0.0003
10 ppm	0.28	1.4	1.88	1.3	0.3	0.1	0.0017
20 ppm	0.28	1.45	1.9	1.4	0.3	0.1	0.0026

Se obtuvieron 3 aceros variando el contenido de boro en 0.0003, 0.0017 y 0.0026 % (% en peso). También se observó una variación en el contenido de carbono, que posiblemente se ha generado por una descarburización después del proceso de laminación a 1100 °C. Los otros elementos de aleación se encuentran dentro de los límites propuestos.

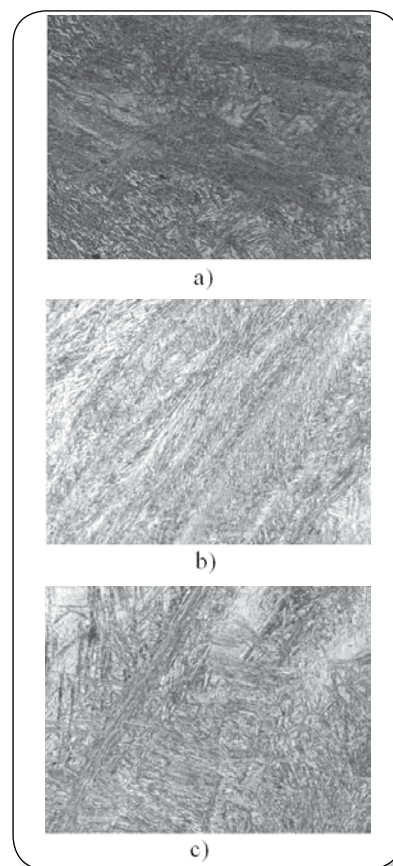
La microestructura de los aceros obtenidos fue caracterizada por microscopía óptica usando un equipo Leco y el software analizador de imágenes IA32 y microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) marca: FEI, modelo: Quanta 200. La preparación de la superficie se realizó mediante pulido y ataque con un nital al 3% usando la técnica de inmersión para revelar la microestructura bainítica. Adicionalmente se hizo un análisis fractográfico sobre las probetas de impacto mediante SEM.

Las propiedades mecánicas fueron evaluadas mediante ensayos de dureza, tensión e impacto. En las pruebas de tensión se realizaron 4 mediciones utilizando una máquina universal marca Shimadzu UH – 500 KN con microprobetas de acuerdo a la norma ASTM A 370 y censadas con un extensómetro de 25 mm. Se realizaron 3 mediciones de impacto realizadas a temperatura ambiente mediante el ensayo Charpy con entalla en V. Las pruebas de dureza se realizaron utilizando un durómetro marca Gnehm Hogen tipo G 100, se realizaron 10 mediciones sobre cada muestra, tomada después del proceso de laminación.

microconstituyente. Adicionalmente se puede observar una simetría en la disposición de las “plumas” formando una distribución más uniforme de acuerdo a lo expuesto por Valencia [7]. En este trabajo se argumenta que la orientación de las agujas tiene un patrón direccional preferente. Los resultados también indican que la bainita sigue una dirección particular, que podría descartar la presencia de martensita en la microestructura.

Cabe notar que algunas veces se puede prestar para confusiones la morfología de la bainita y la martensita. En las imágenes mostradas no está claro la formación de “agujas” agudas propias de la martensita, por el contrario, se aprecia una estructura mucho más ordenada y fina, que es típica de la bainita, normalmente superior. Sin embargo, es necesario hacer mediciones complementarias mediante microscopía electrónica de transmisión.

Figura 2. Imágenes de la microestructura tomadas con microscopía óptica a 1000X. a) 0 ppm, b) 10 ppm y c) 20 ppm



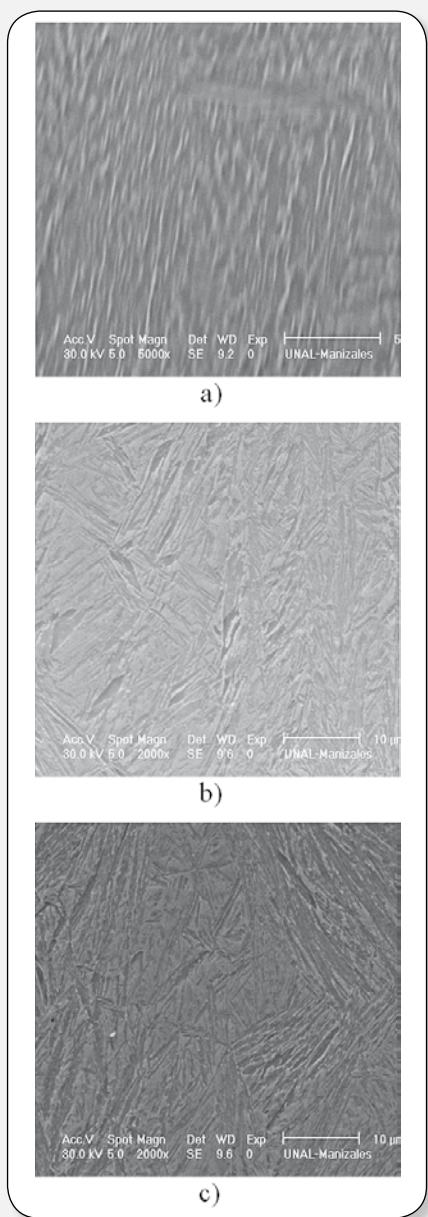
3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización microestructural

Las figura 2 presentan las microestructuras de los aceros producidos. Se puede observar una morfología asociada a la bainita como principal

La figura 3 muestra las micrografías electrónicas de barrido para cada aleación. En estos resultados se pueden observar una microestructura la mejor simetría de las plumas que corresponden a bainítica fina. Esta estructura se favorece termodinámicamente debido a que una de las funciones del boro es disminuir la energía interfacial para la nucleación de la ferrita en los límites de grano de la austenita. El boro también actúa como un agente refinador, lo cual se traduce en estructuras más finas que permiten validar el aumento de la resistencia mecánica [8].

Figura 3. Micrografías SEM. a) 0 ppm, b) 10 ppm y c) 20 ppm



3.2 Caracterización mecánica

3.2.1 Ensayo de dureza

En la tabla 2 se aprecian los resultados de dureza. Los altos valores obtenidos son propios de Bainita. Se puede observar un ligero aumento de la dureza hasta 50.6 Kg/mm² con el aumento del boro (20 ppm), posiblemente generado por un aumento de la deformación de la red. Adicionalmente, se observa que los valores obtenidos en los tres aceros son mayores que los resultados obtenidos por trabajos como Caballero y colaboradores [2-3, 8-10] y Bhadeshia [4-5,11], esta diferencia puede ser explicada al afecto refinador de grano del elemento boro y la síntesis del acero en un horno de vacío.

Tabla 2. Valores ensayo de dureza

LECTURA	ALEACIÓN			Resultados Caballero [2]
	0 ppm	10 ppm	20 ppm	
Promedio	47.7	48.6	50.6	44
Desv Est	0.94	0.51	0.69	

3.2.2 Ensayo de tensión

La figura 4 muestra los gráficos obtenidos del ensayo de tensión, junto con los resultados resumidos de las propiedades mecánicas en la tabla 3. Es apreciable el aumento en la resistencia mecánica desde 1740 MPa hasta 1820 MPa con el aumento del contenido de boro en la aleación, también se observa que a pesar de este aumento el material mantiene los valores de ductilidad medidos mediante la reducción de área y elongación. Esto posiblemente puede ser atribuido a la austenita retenida en el acero.

De esta forma los resultados de ductilidad se pueden explicar por el efecto favorable de la combinación de una fase dúctil como la austenita distribuida en una fase más dura como la bainítica. En términos generales

se puede afirmar que se tiene una alta resistencia y buena ductilidad, combinación de propiedades mecánicas equivalentes a los costos aceros de aleaciones especiales [12].

Por otro lado, los altos valores de resistencia se pueden explicar por la presencia de placas de bainita con tamaño sub-micrométrico o nanométrico, lo que genera una restricción elevada al movimiento de las dislocaciones. También se debe tener en cuenta que estos aceros se produjeron en alto vacío, que reduce el contenido de oxígeno en toda la aleación. De esta forma, se puede producir un acero con menores porcentajes de porosidad, defectos y de mayor densidad. Finalmente, se debe evaluar el efecto de la austenita retenida en la resistencia mecánica de los aceros producidos. Es probable que la austenita se transforme en martensita durante el ensayo de tracción debido al fenómeno de transformación martensítica inducido por deformación. Esta transformación incrementa la resistencia del material tal como fue sugerido en el trabajo de Bhadeshia [5].

Figura 4. Gráfico σ vs ϵ para las aleaciones. a) 0 ppm, b) 10 ppm y c) 20 ppm.

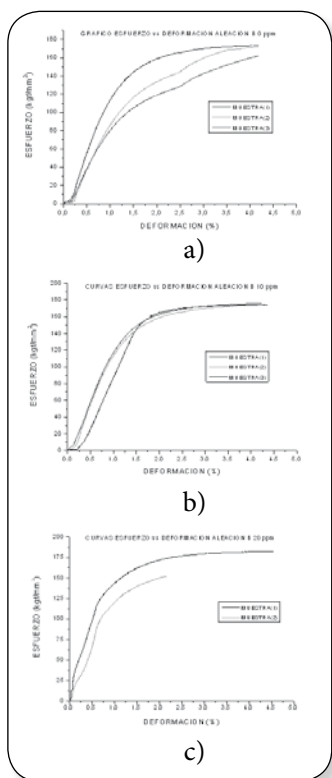


Tabla 3. Resultados Ensayos de Tensión. σ_M = esfuerzo máximo, σ_y = esfuerzo de fluencia %R.A = % de reducción de área, % Elong = % de elongación,

Muestra	σ_M (MPa)	σ_y (MPa)	%R.A	% Elong
0 ppm	1740	1440	29	17
Al 10 ppm	1770	1380	32	15
Al 20 ppm	1820	1416	26	16

4. Conclusiones

Se obtuvieron con éxito aceros bainítico (Fe-0.32C-1.45Si-1.97Mn-1.26Cr-0.26Mo-0.10V) sin alear y aleado con Boro (10 y 20 ppm) con una combinación de propiedades mecánicas; alta resistencia y buena ductilidad y tenacidad, equivalentes a los costos aceros de aleaciones especiales.

Es apreciable el aumento en las propiedades mecánicas con el incremento del contenido de boro en la aleación. El boro posiblemente actuó como agente refinador de grano y disminuya la nucleación de la ferrita en los límites de grano de la austenita, facilitando la formación de bainita. Los buenos resultados de ductilidad pueden ser atribuidos por el efecto favorable de la combinación de una fase dúctil como la austenita y la fase de alta resistencia como la bainita.

Finalmente, la producción de los aceros bainíticos en fundición en vacío seguramente permitió aumentar su resistencia, debido a una reducción del porcentaje de porosidad, inclusiones y la concentración de oxígeno en el material. Sin embargo, para corroborar su efecto, se recomienda en futuros trabajos hacer mediciones de densidad del material y composición química con otras técnicas de caracterización.

5. Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia (proyecto: 14744) por el apoyo financiero para la realización de esta investigación y el Dr. Arnoldo Bedolla Jacuinde del U M S N H. - I I M por su colaboración en laminación de los aceros bainíticos.

6. Referencias bibliográficas

- [1] SANTOFINIA M. La transformación Bainítica sin Formación de Carburos en los Aceros. Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias, Universidad Complutense de Madrid, 2006.
- [2] F.G. CABALLERO, H.K.D.H. BHAHADESHIA, K.J.A. MAWELLA, D.G. JONES Y P. BROWN. Diseño de Nuevos Aceros Bainíticos, Revista de Metalurgia 2, 38-44, 2002.
- [3] F.G. CABALLERO, M.J. SANTOFINIA, C. GARCÍA-MATEO, J. CHAO, C. GARCÍA DE ANDRÉS, Theoretical design and advanced microstructure in super high strength steels Materials and Design. 30, 2077-2083, 2009
- [4] BHADESHIA, HARRY, Bainite in steel, Institute of Materials, Minerals and Mining, 2da edición, Cambridge, 2001.
- [5] BHADESHIA, HARRY. Bainite in Silicon Steels: A New Composition-Property approach, Part II, Metals Science, 17, 411 – 419, 1983
- [6] VIAFARA C; VELEZ J M. Transformación Bainítica en aleaciones Fe-C. Ingeniería y Ciencia. Universidad EAFIT. 83-99, 2005.
- [7] VALENCIA, ASDRUBAL. Tecnología del tratamiento térmico de los aceros, Ed. Universidad de Antioquia, Medellín (Colombia), 1996.
- [8] P. ACOSTA, J.A. JIMÉNEZ, G. FROMMEYER, O. A. RUANO, Microstructural characterization of an ultrahigh carbon and boron tool steel processed by different routes, Materials Science and Engineering A206, 194-200, 1996
- [9] F.G. CABALLERO, H.K.D.H. BHADESHIA, K.J.A. MAWELLA, D.G. JONES Y P. BROWN. Bainitic Steels: Part 1, Mater. Scien. Tech. 17, 512-516, 2001.
- [10] F.G. Caballero, H.K.D.H. Bhadeshia, K.J.A. Mawella, D.G. Jones y P. Brown. Mater. Bainitic Steels: Part 2, Scien. Tech. 17, 517-522, 2001
- [11] H.K.D.H. BHADESHIA, Comments on Bainite formation kinetics in high carbon alloyed steel, Scripta Materialia, 59, 1275-1276, 2008.
- [12] KRAUSS G, Steel, processing, structure and performance. ASM International, Third printing, OHIO, USA, 2007.