

## EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE CRECIMIENTO DEL BORO EN UNA FUNDICIÓN DE HIERRO GRIS ENDURECIDO EMPLEANDO EL PROCESO BORURIZACIÓN DE EMPAQUETAMIENTO EN CAJA

M. Ortiz-Domínguez<sup>a,b</sup>, D. Sánchez-Campos<sup>b</sup>, M. A. Abreu-Quijano<sup>a</sup>, V. J. Hernández-Garrido<sup>a</sup>, R. Cruz-Trejo<sup>a</sup>, C. G. Rosales-Xicoténcatl<sup>a</sup>, A. Arenas-Flores<sup>b</sup>, A. Cruz-Avilés<sup>a</sup>, Y. Muñoz-Sánchez<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior de Ciudad Sahagún-Ingeniería Mecánica, Carretera Cd. Sahagún-Otumba s/n, Zona Industrial CP. 43990, Hidalgo, México.

<sup>b</sup>UAEH-AACTyM, Carr. Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, Mineral de la Reforma. CP. 42184. Hidalgo, México. martin\_ortiz@uaeh.edu.mx

### RESUMEN

En el presente estudio se evalúa la cinética de difusión del boro en una fundición de hierro gris durante el proceso de borurización base polvo. Esta técnica de endurecimiento superficial produce en el material la formación de una base característica, Fe<sub>2</sub>B. El tratamiento termoquímico se realizó a las temperaturas de 1123, 1173, 1223 y 1273 K con tiempos de 2, 4, 6 y 8 h. Empleando la ecuación de balance de masa en la interface de crecimiento Fe<sub>2</sub>B/substrato ( $\Delta C(dx/dt)_{x=v-2\epsilon D^{1/2}t^{1/2}} = J_{in}(x)_{x=v} - J_{out}(x)_{x=v+d_v}$ ) y sin la consideración de un perfil de concentración de boro a lo largo de la fase Fe<sub>2</sub>B, se determinó la movilidad del boro en la superficie del sustrato ( $D_{Fe_2B}$ ), con la influencia del tiempo de incubación,  $t_0^{Fe_2B}$ . La morfología de la capa Fe<sub>2</sub>B fue observada a través de microscopía óptica. Los estudios metalográficos mostraron que la capa borurada presenta un morfología aserrada en la interface de crecimiento para todas las muestras endurecidas. Los espesores de las capas fueron medidos con ayuda del software MSQ PLUS. La fase Fe<sub>2</sub>B fue identificada a través de la técnica difracción de rayos X. Finalmente, el valor estimado de la energía de activación del boro fue comparado con la literatura.

**Palabras Clave:** Energía de activación, Adherencia, Borurización, Modelo de difusión, Cinética de crecimiento.

### ABSTRACT

In this study, the growth kinetics of boron on gray cast iron substrate by powder-pack boriding process was carried out. This superficial hardening technique produce the formation of a single-phase (Fe<sub>2</sub>B). Thermochemical treatment for gray cast iron was made in the temperature range of 1123-1273 K for treatment times ranging from 2 to 8 h. The boron diffusion coefficient in the Fe<sub>2</sub>B layers was estimated by solving the mass balance equation ( $\Delta C(dx/dt)_{x=v-2\epsilon D_{Fe_2B}^{1/2}t^{1/2}} = J_{in}^{Fe_2B}(x)_{x=v} - J_{out}^{Fe}(x)_{x=v+d_v}$ ) at the (Fe<sub>2</sub>B/substrate) interface with an inclusion of boride incubation time. The morphology of Fe<sub>2</sub>B layers was observed by optical microscopy. Metallographic studies showed that the boride

layer has a saw-tooth morphology in all the samples. The layer thickness measurements were done with the help of MSQ PLUS software. The  $\text{Fe}_2\text{B}$  phase was identified by XRD. The estimated value of boron activation energy was compared to the literature data.

**Keywords:** Activation energy, Adherence, Boriding, Diffusion model, Growth kinetic.

## 1. INTRODUCCIÓN

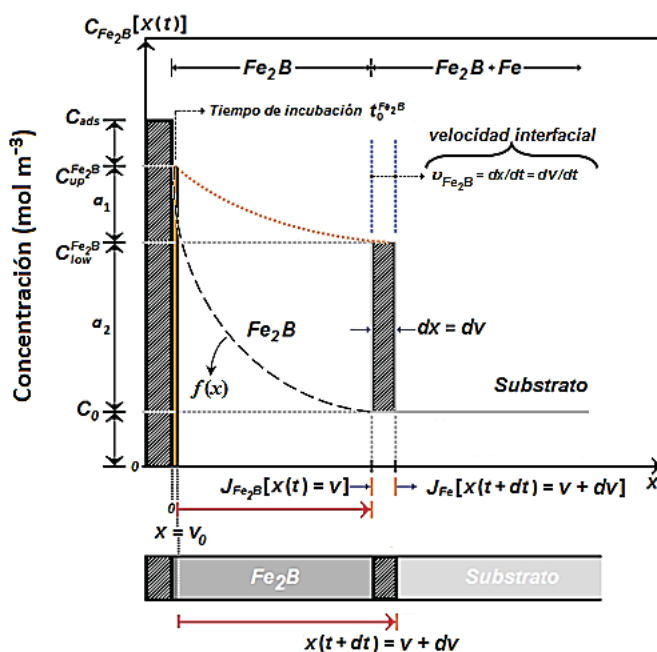
La borurización es un tratamiento termoquímico empleado para el endurecimiento de superficies de aleaciones ferrosas y no ferrosas [1]. En el tratamiento de borurización, los átomos de boro<sup>1</sup> debido a su tamaño es más pequeño en comparación con los átomos de hierro<sup>2</sup> se difunden con relativa facilidad en la superficie de la pieza para formar boruros de hierro en el rango de temperatura de 973-1323 K [1-2]. Después de aplicar el proceso de borurización, la capa formada en la medios sólidos. Dependiendo de la temperatura del proceso, la composición superficie del acero incrementa la dureza superficial, disminuye el desgaste y la corrosión [2-3]. El proceso de borurización se puede realizar en forma líquida, gaseosa o en química del sustrato, el potencial del medio borurante y tiempo de tratamiento, es posible formar una monocapa ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) o una bicapa ( $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ ) [4]. La fase  $\text{FeB}$  con una estructura cristalina ortorrómbica con un contenido de boro de  $100.5 \times 10^3 \text{ mol m}^{-3}$ , mientras que la fase  $\text{Fe}_2\text{B}$  tiene una estructura cristalina tetragonal centrada en el cuerpo con un contenido de boro de  $59.2 \times 10^3 \text{ mol m}^{-3}$  [5]. La formación de una doble capa ( $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ ) se puede obtener ajustando el potencial químico del boro en el medio borurante [6]. El crecimiento y morfología de las fases boruradas puede verse afectada por los elementos de aleación en el material base [7]. En aplicaciones prácticas, la selección de los parámetros del proceso es muy importante para alcanzar el espesor deseado de capa borurada [8]. Una estimación de la cinética de crecimiento de las capas boruradas es una herramienta conveniente para la optimización y automatización del proceso de borurización [9]. Con este fin, diferentes modelos han sido reportados en la literatura para simular la cinética de crecimiento de las capas boruradas en función de los parámetros del proceso pero sin la consideración del periodo de incubación ( $t_0^{\text{Fe}_2\text{B}}$ ) [10]. En estos modelos se asume que los boruros de hierro crecen de manera instantánea ( $t=0$ ). En el presente estudio se determina una nueva ecuación que permite estimar los espesores de capa de la fase  $\text{Fe}_2\text{B}$  a través de un modelo de difusión de transferencia de masa para la simulación de la cinética de crecimiento de los boruros de hierro formados en la superficie de una fundición de hierro gris, en el rango de temperaturas de 1123-1273 K empleando la técnica de borurización de polvo [11]. En este modelo de difusión se propone una ecuación de balance de masa en la interfase de crecimiento  $\text{Fe}_2\text{B}$ /sustrato sin considerar un perfil de concentración de boro a lo largo de la fase borurada. Asimismo, se asume que los boruros de hierro obedecen la ley de crecimiento parabólico ( $v = 2\varepsilon D_{\text{Fe}_2\text{B}}^{1/2} t^{1/2}$ ) para estimar el coeficiente de difusión del boro en la fase  $\text{Fe}_2\text{B}$  ( $D_{\text{Fe}_2\text{B}}$ ). Combinando el coeficiente de difusión y la ley de crecimiento parabólico es posible estimar el espesor de capa en la fase  $\text{Fe}_2\text{B}$  en función de la temperatura y tiempo de tratamiento.

<sup>1</sup>El radio atómico de un átomo de boro es de  $87 \times 10^{-12} \text{ m}$ .

<sup>2</sup>El radio atómico de un átomo de hierro es de  $155.8 \times 10^{-12} \text{ m}$ .

## 1.1 MODELO DE DIFUSIÓN

En la propuesta del modelo de difusión, se ha partido de la suposición de que las capas no comienzan a formarse instantáneamente ( $t = 0$ ), sino a partir de un cierto periodo de incubación,  $t_0^{Fe_2B}$  en el cual ya se tiene un perfil inicial no nulo  $f(x(t))$  de boro disociado en la capa superficial del metal (ver Figura 1), cuando comienza la formación de capas.  $C_{up}^{Fe_2B}$  representa el límite superior de concentración de boro en la capa  $Fe_2B$ ,  $C_{low}^{Fe_2B}$  es el límite inferior de concentración de boro en la capa  $Fe_2B$ ,  $t$  representa el tiempo de tratamiento (s),  $v$  es la profundidad de la capa (m) y  $v_0$  representa una película base en la etapa de nucleación de unos nanómetros de espesor ( $\approx 5$  nm), la cual puede ser considerada cero ( $v_0 \approx 0$ ) en comparación con el espesor de la capa borurada ( $v$ ).



**Figura 1.** Perfil de concentración del boro en la capa  $Fe_2B$ .

El término  $C_{ads}^{Fe_2B}$  representa la concentración de boro adsorbido en la superficie del material. Si el área unitaria de la interfase plana  $Fe_2B/Fe$ , se mueve una distancia  $dv$  en un tiempo  $dt$ , (donde  $t$  representa el tiempo efectivo de formación de la fase) en el volumen ( $dv \cdot 1 \cdot 1$ ), como se puede apreciar en la Figura 1, es decir, el incremento  $dv$  del espesor de capa  $Fe_2B$  en un tiempo  $dt$  ocurre bajo el consumo simultáneo de la capa de espesor  $dv$  del substrato. Por lo que, la acumulación de átomos de boro en el incremento  $dv$  se puede expresar de la siguiente manera:

$$\left( \frac{C_{low}^{Fe_2B} - 2C_0 + C_{up}^{Fe_2B}}{2} \right) (1 - \frac{dx}{dt}) \Big|_{x=v} \hat{i} = \vec{J}_{in}^{Fe_2B}(x=v)(1 - \frac{dx}{dt}) - \vec{J}_{out}^{Fe_2B}(x=v+dv)(1 - \frac{dx}{dt}). \quad (1)$$

Por otro lado, hay un flujo de átomos de boro hacia la interfase de la fase  $Fe_2B$  igual a  $\vec{J}_{in}^{Fe_2B}(x=v) = - \{D_{Fe_2B} dC_{Fe_2B}[x(t)]/dx\}_{x=v} \hat{i}$  y un flujo saliente de la interfase en la fase  $Fe$  igual a  $\vec{J}_{out}^{Fe}(x=v+dv) = - \{D_{Fe} dC_{Fe}[x(t)]/dx\}_{x=v+dv} \hat{i}$ , en un tiempo  $dt$ . La Ecuación (4), representa la conservación de la masa. Las concentraciones  $C_{up}^{Fe_2B}$ ,  $C_{low}^{Fe_2B}$  y  $C_0$  de la Ecuación (4) son expresadas en porcentaje en ( $mol\ m^{-3}$ ). Con  $C_0 \approx 0$ ,  $C_{up}^{Fe_2B} = 100.5 \times 10^3\ mol\ m^{-3}$  y  $C_{low}^{Fe_2B} = 59.2 \times 10^3\ mol\ m^{-3}$ . La relación usual entre el flujo y el gradiente de concentración están dados por la primera ley de Fick y si se asume que el perfil de concentración de boro en la fase  $Fe_2B$  y en el sustrato  $Fe$  sólo depende de la posición  $x(t)$ , por lo que se tiene:

$$\vec{J}_{in}^{Fe_2B}(x=v) = -D_{Fe_2B} \frac{dC_{Fe_2B}[x(t)]}{dx} \Big|_{x=v} \hat{i}; \vec{J}_{out}^{Fe}(x=v+dv) = -D_{Fe} \frac{dC_{Fe}[x(t)]}{dx} \Big|_{x=v+dv} \hat{i} = 0, \quad (2)$$

donde  $D_{Fe_2B}$  es el coeficiente de difusión del boro a través de la fase  $Fe_2B$  y  $D_{Fe}$  es el coeficiente de difusión del boro en el sustrato. La suposición de que  $\vec{J}_{out}^{Fe}(x=v+dv) = 0$ , tiene que ver con que la solubilidad<sup>3</sup> del boro en la fase  $Fe$  (sustrato) es muy baja ( $C_0 \approx 0$ ). Combinando las Ecuaciones (1) y (2) se produce lo siguiente:

$$\left( \frac{C_{low}^{Fe_2B} - 2C_0 + C_{up}^{Fe_2B}}{2} \right) \left( \frac{dx(t)}{dt} \right) \Big|_{x(t)=v} \hat{i} = -D_{Fe_2B} \frac{dC_{Fe_2B}[x(t)]}{dx} \Big|_{x(t)=v} \hat{i}. \quad (3)$$

En cuanto al término  $dx(t)/dt$ , la posición depende del tiempo desde que se asume que el crecimiento de las capas boruradas obedecen la ley de crecimiento parabólico:

$$v = 2\varepsilon D_{Fe_2B}^{1/2} t^{1/2} = 2\varepsilon D_{Fe_2B}^{1/2} (t_v + t_0^{Fe_2B})^{1/2}. \quad (4)$$

El término  $t_v$  en la Ecuación (4) representa el tiempo efectivo de formación de la capa  $Fe_2B$  y  $\varepsilon$  determina el parámetro de normalización de crecimiento de la fase  $Fe_2B$ . Reescribiendo la Ecuación (3), se tiene:

<sup>3</sup>La solubilidad es una medida de la capacidad de disolverse una determinada sustancia (átomos de boro) en un determinado solvente (sustrato).

$$\left( \frac{C_{low}^{Fe_2B} - 2C_0 + C_{up}^{Fe_2B}}{2} \right) \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 dt \Big|_{x(t)=v} = -D_{Fe_2B} dC_{Fe_2B}[x(t)] \Big|_{x(t)=v} \quad (5)$$

Evaluando el lado izquierdo de la Ecuación (5) en  $v = 2\varepsilon D_{Fe_2B}^{1/2} t^{1/2} = 2\varepsilon D_{Fe_2B}^{1/2} (t_v + t_0^{Fe_2B})^{1/2}$ , integrando ambos lados, correspondiendo ambos límites de integración, obteniéndose lo siguiente:

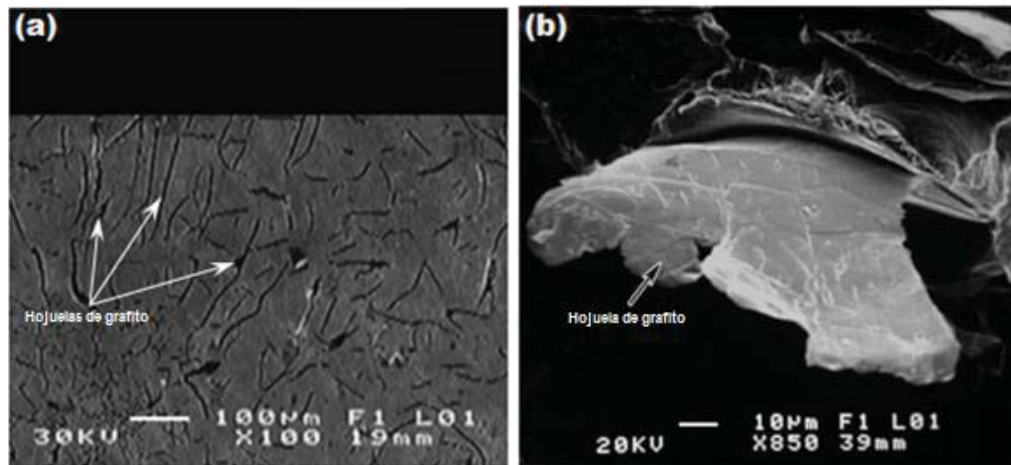
$$\left( \frac{C_{low}^{Fe_2B} - 2C_0 + C_{up}^{Fe_2B}}{2} \right) 4\varepsilon^2 D_{Fe_2B} \int_{t_0^{Fe_2B}}^t \frac{dt}{t} = -D_{Fe_2B} \int_{C_{up}^{Fe_2B}}^{C_{low}^{Fe_2B}} dC_{Fe_2B}[x(t)] \Big|_{x(t)=v} \quad (6)$$

Finalmente se tiene:

$$\varepsilon^2 = 2 \left( C_{up}^{Fe_2B} - C_{low}^{Fe_2B} / C_{up}^{Fe_2B} - 2C_0 + C_{low}^{Fe_2B} \right) / \ln(t / t_0^{Fe_2B}) \quad (7)$$

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se empleó una fundición de hierro gris con una composición química que se presenta en la Tabla 1. Las probetas fueron cortadas en un torno de control numérico (CNC) HASS, para eliminar los esfuerzos residuales en las muestras creados por el endurecimiento por deformación, fueron recristalizadas a 923 K. Como consecuencia del corte de las probetas, las superficies tienen un acabado rugoso y generalmente desigual. En la Figura 2, se presenta la microestructura de la fundición de hierro gris antes de aplicar el tratamiento.

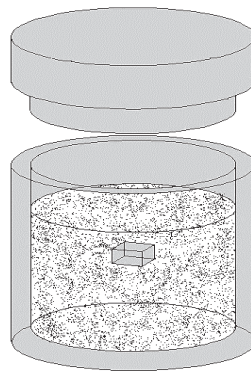


**Figura 2.** (a) Microestructura de la fundición de hierro gris antes del tratamiento, (b) Microfotografía de una hojuela de grafito.

**Tabla 1.** Composición química en wt. % del sustrato empleado en el proceso de borurización polvo.

Tipo de acero	C	Mn	Si	P	S	Cr	N	Sn	Cu
Fundición de hierro gris	3.44- 3.45	0.5- 0.6	1.7- 1.77	---	---	0.2	---	---	0.45- 0.5

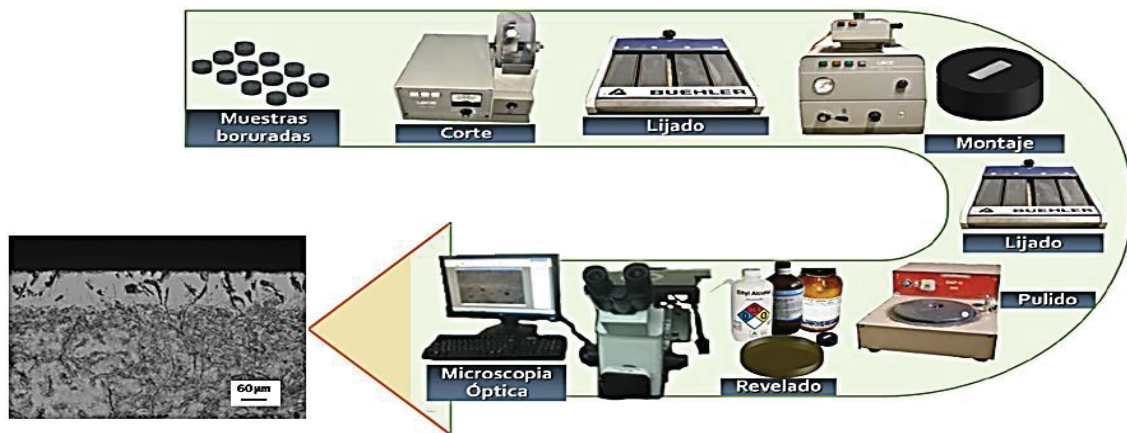
Para el tratamiento de borurización en polvo con la técnica de empaquetamiento en caja utilizando carburo de boro ( $B_4C$ ) (Durborid-mezcla de polvo fresco), fluoroborato de potasio ( $KBF_4$ ) como activador principal, carburo de silicio ( $SiC$ ) como principal diluyente y oxígeno del medio circundante en la atmósfera ( $O_2$ ) induciendo la reacción de boro con la superficie del sustrato y se emplean contenedores de acero inoxidable AISI 304L grado médico, debido a que son menos propensos al efecto del calor y la descarburización. El contenedor se coloca en una mufla convencional en el rango de temperaturas de  $1123 \leq T \leq 1273$  K a los tiempos de tratamiento de 2 h, 4 h, 6 h y 8 h. Continuando con el proceso de borurización de empaquetamiento en caja. Se introducen las piezas a borurar en el contenedor, en su interior debe contener una mezcla de carburo de boro (Durborid-mezcla de polvo fresco), posteriormente se sella. El esquema de colocación de la probeta se presenta en la Figura 3.

**Figura 3.** Esquema de colocación de la probeta dentro del contenedor de acero inoxidable 304L con la mezcla de polvos.

El estudio de la cinética de crecimiento, requiere de fotomicrografías de los cortes transversales de las probetas, por lo que éstas fueron cortadas transversalmente, utilizando un disco de diamante serie 15HC con diámetro de 127 mm y un espesor de 0.5 mm; posteriormente, las muestras se encapsularon en bakelita (polvo fenólico) o lucita, con una altura máxima de 25 mm, como lo establece la norma de Preparación Metalográfica de Especímenes ASTM-E3, con esto se asegura el adecuado desbaste de las mismas. El ataque químico se realizó con nital con una concentración de 2% de  $HNO_3$  diluido con 98 % de etanol o metanol de alta pureza con tiempo de exposición de aproximado de 5 s. Una sobre exposición al reactivo puede quemar la superficie de la muestra,



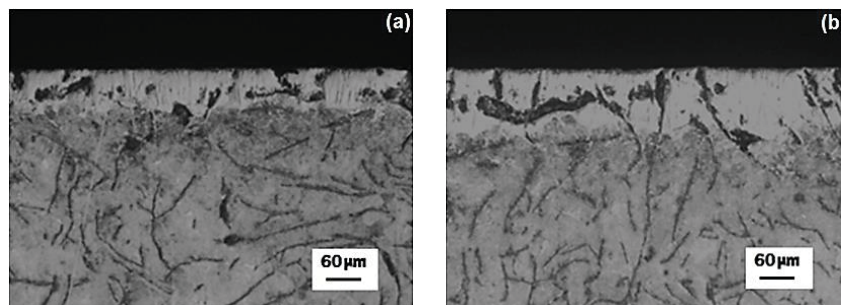
imposibilitando la visualización de su microestructura. Asimismo, para evitar la oxidación de los especímenes se sumergieron en alcohol, agua y posteriormente se secaron con aire comprimido (libre de partículas húmedas). Utilizando un microscopio óptico de sistema invertido Olympus GX51, utilizando diferentes magnificaciones de acuerdo al tamaño de la capa borurada formada en la superficie del sustrato. En la Figura 4, se presentan los pasos del proceso metalográfico para revelar la capa borurada.



**Figura 4.** Representación esquemática del proceso metalográfico para determinar la microestructura y la estimación del tamaño de la capa borurada formada en la superficie de la fundición de hierro gris.

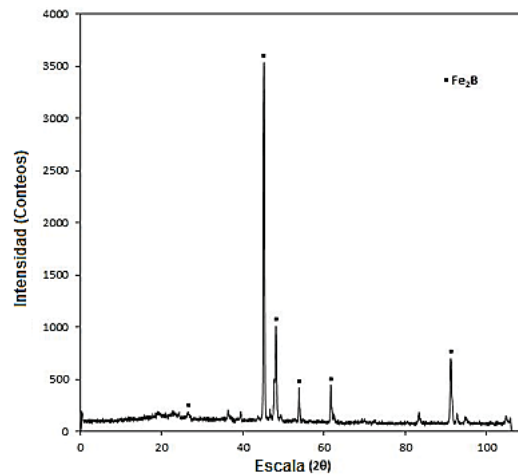
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 5, se presentan las micrografías del hierro puro borurado con la técnica de borurización de polvo, para diferentes temperaturas y tiempos de tratamiento.



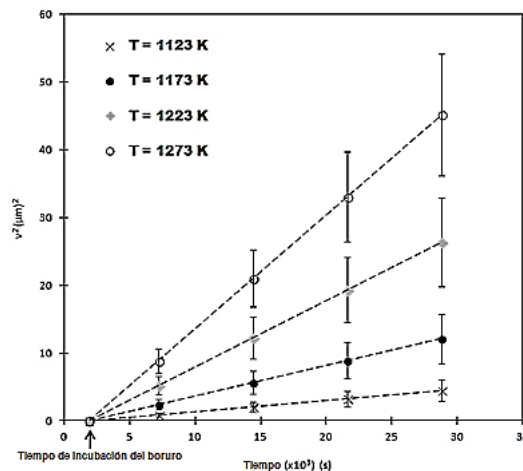
**Figura 5.** Morfología aserrada de la capa  $\text{Fe}_2\text{B}$  formada en la superficie con una fundición de hierro gris con la técnica de borurización en polvo con: (a) 2 h y (b) 8 h de tiempo de tratamiento a la temperatura de 1173 K.

Para verificar la presencia de la fase  $\text{Fe}_2\text{B}$  sobre la superficie de los aceros, se realizó un análisis por difracción de rayos X, aplicando sobre la superficie de la pieza borurada radiación  $\text{CoK}_\alpha$  con una longitud de onda de  $1.7889 \text{ \AA}$ . En la Figura 6, se comprueba la presencia de la fase  $\text{Fe}_2\text{B}$ .



**Figura 6.** Patrón de difracción de rayos X originado durante la detección de la fase  $\text{Fe}_2\text{B}$  en la superficie de la fundición de hierro gris con una temperatura de  $1273 \text{ K}$  y  $8 \text{ h}$  de tiempo de tratamiento.

Continuando con el análisis de los resultados, en la Figura 7 se presentan los resultados de los espesores obtenidos de la medición de las capas boruradas en la fase  $\text{Fe}_2\text{B}$  para el proceso de borurización en polvo para la fundición de hierro gris. De acuerdo con la Ecuación (4) ( $v = 2\varepsilon D_{\text{Fe}_2\text{B}}^{1/2} t^{1/2} = 2\varepsilon D_{\text{Fe}_2\text{B}}^{1/2} (t_v + t_0^{\text{Fe}_2\text{B}})^{1/2}$ ), se graficó  $v^2$  vs.  $t$  como se puede apreciar en la Figura 7.



**Figura 7.** El cuadrado de los espesores de las capas boruradas ( $v^2$ ) como función del tiempo de tratamiento ( $t$ ) (ver Ecuación (4)) con la técnica de borurización de empaquetamiento en caja.

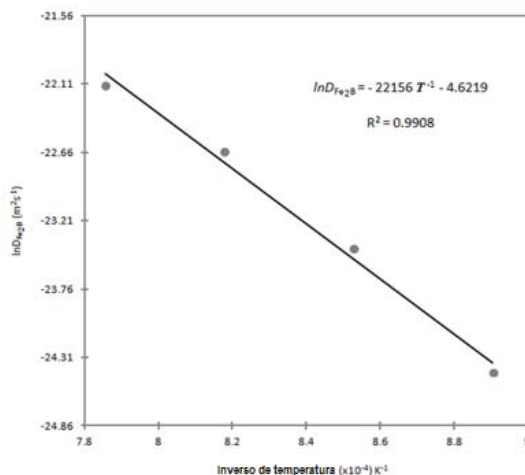


Las pendientes de las líneas rectas de la Figura 7, representan las constantes de crecimiento parabólico ( $4\epsilon^2 D_{Fe_2B}$ ) de la Ecuación (4). La nucleación del boruro de hierro en la interfase gas/sólido sólo toma lugar después de que la concentración de boro en esta interfase excede un valor crítico  $C_{ads} > C_{up}^{Fe_2B}$ . La acumulación de boro en la interfase gas/sólido tiene que ver con la adsorción natural de los átomos de boro, en el interior del material, todos los enlaces químicos (metálicos) de los átomos de hierro están satisfechos. En cambio por definición la superficie representa una discontinuidad de esos enlaces. Para esos enlaces incompletos, es enérgicamente favorable el reaccionar con lo que se encuentra disponible, y por ello se produce de forma espontánea. En el periodo de incubación del boruro de hierro  $t_0^{Fe_2B} = 31$  min, se forma una película base ( $v_0$ ), la cual termina con la aparición de los primeros boruros de hierro y justamente es en la intercepción con el eje de las abscisas en el gráfico de  $v^2$  vs.  $t$ . En la Tabla 2 se presentan las constantes de crecimiento parabólico respecto a cada temperatura obtenidas de la Figura 7. Asimismo, se menciona el valor del parámetro de normalización de crecimiento de la fase  $Fe_2B$  obtenido de la Ecuación (7).

**Tabla 2.** Parámetro de normalización de crecimiento y constantes de crecimiento como una función de la temperatura de tratamiento.

Temperatura (K)	Tipo de capa	$\epsilon^2$ (Adimensional)	$4\epsilon^2 D_{Fe_2B}$ ( $\mu m^2 s^{-1}$ )
1123	$Fe_2B$	$1.689625 \times 10^{-3}$	$1.66 \times 10^{-1}$
1173			$4.52 \times 10^{-1}$
1223			$9.81 \times 10^{-1}$
1273			$16.8 \times 10^{-1}$

Asumiendo un comportamiento Arrheius de los coeficientes de difusión presentados en la Tabla 2, la energía de activación  $Q_{Fe_2B}$  es obtenida de la pendiente del gráfico que se presenta en la Figura 8.



**Figura 8.** La pendiente de  $\ln D_{Fe_2B}$  vs.  $1/T$  determinan la energía de activación  $Q_{Fe_2B}$  en la fundición de hierro gris.

A partir de la ecuación del ajuste de la Figura 8, se expresa el coeficiente de difusión ( $Fe_2B$ ) vía la relación de Arrhenius ( $D_{Fe_2B} = D_0 \exp(-Q/RT)$ ) para los procesos de borurización en el rango de temperaturas de tratamiento de  $1123 \leq T \leq 1273$  K en la fundición de hierro gris como:

$$D_{Fe_2B} = 1.0 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{157.58 \text{ kJmol}^{-1}}{RT}\right). \quad (8)$$

De la Ecuación (8),  $R$  es la constante universal de los gases ( $= 8.314 \text{ J/mol K}$ ), y  $T$  representa la temperatura absoluta (K). El valor de la energía de activación<sup>4</sup>  $Q_{Fe_2B}$  indica la energía necesaria para estimular la difusión de boro a lo largo de la dirección cristalográfica [001] en la fase  $Fe_2B$ . Considerando la expresión para el coeficiente de difusión del boro en la Ecuación (8), es posible expresar la ley de crecimiento parabólico (ver Ecuación (8)) como sigue:

$$v = 2\varepsilon D_0^{1/2} \exp(-Q_{Fe_2B}/2RT) t^{1/2} = 2(1.61975 \times 10^{-12})^{1/2} \left(1.0 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{157.58 \text{ kJmol}^{-1}}{RT}\right)\right)^{1/2} t^{1/2}. \quad (9)$$

## CONCLUSIONES

La cinética de crecimiento de las capas  $Fe_2B$  formadas en la superficie de una fundición de hierro gris fue estimada para el proceso de borurización en polvo usando un modelo de difusión. El modelo considera la influencia del tiempo de incubación, tiempo y temperatura de tratamiento. Se asumió

<sup>4</sup>Un átomo que se difunde debe escurrirse entre los átomos circundantes para ocupar su nueva posición. El átomo que se difunde, debe atravesar una barrera de energía potencial (energía de activación).

que las capas obedecen la ley de crecimiento parabólico. Finalmente, el modelo de difusión desarrollado, puede ser utilizado para estimar los espesores de las capas boruradas en diferentes aleaciones ferrosas y no ferrosas para un conjunto de condiciones experimentales, lo que permitirá facilitar la optimización y automatización de los procesos de borurización.

## AGRADECIMIENTOS

El trabajo descrito en el presente artículo fue financiado por la beca otorgada por PRODEP y CONACyT. Asimismo, le agradezco al Ing. Martín Ortiz Granillo, *Director de la Escuela Superior de Ciudad Sahagún-UAEH*, México, por las facilidades para concluir este trabajo de investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

1. VON MATUSCHKA, A. Boronizing. Second ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 1980. Sections 2-6, p. 11–55. ISBN: 085501640X.
2. FICHTL, Walter. Boronizing and its Practical Applications. *Materials in Engineering*, 2004, vol. 2, p. 276–286. ISSN: 0264-1275.
3. SINGHAL, S. C. A hard diffusion boride coating for ferrous materials. *Thin Solid Films*, 1977, vol. 45, p. 321–329. ISSN: 0040-6090.
4. GONZÁLEZ FERNÁNDEZ DE CASTRO, Milagrosa. Boración de aceros. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Madrid, España, 1999.
5. MASSALSKI, T. B. Binary Alloys Phase diagrams, Second ed. USA: ASM International, 1990, vol. 1, p. 211–213. ISBN: 9780-87170-4030.
6. MARTINI, C., PALOMBARINI, G., and CARBUCICCHIO, M. Mechanism of thermochemical growth of iron borides on iron. *J. Mater. Sci*, 2004, vol. 39, p. 933–937. ISSN: 0022-2461
7. GOEURIOT, P., THEVENOT, F., and DRIVER, J. H. Surface treatment of steels: Borudif, a new boriding process. *Thin Solid Films*, 1981, vol. 78, p. 67–76. ISSN: 0040-6090.
8. CAMPOS-SILVA, I., ORTIZ-DOMÍNGUEZ, M., BRAVO-BÁRCENAS, O., DOÑU-RUIZ, M. A., BRAVO-BÁRCENAS, D., TAPIA-QUINTERO, C., and JIMÉNEZ-REYES, M. Y. Formation and kinetics of FeB/Fe<sub>2</sub>B layers and diffusion zone at the surface of AISI 316 borided steels. *Surface and Coatings Technology*, 2010, vol. 205, p. 403–412. ISSN: 0257-8972
9. CAMPOS-SILVA, I., ORTIZ-DOMÍNGUEZ, M., CIMENOGLU, H., ESCOBAR-GALINDO, R., KEDDAM, M., ELIAS-ESPINOSA, M., LÓPEZ-PERRUSQUÍA, N. A diffusion model for the growth of the Fe<sub>2</sub>B layer in pure iron. *Surface Engineering*, 2011, vol. 27, p. 189–195. ISSN: 0267-0844.
10. ORTIZ-DOMÍNGUEZ, M., HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, E., MARTÍNEZ-TRINIDAD, J., KEDDAM, M., CAMPOS-SILVA, I. A kinetic model for analyzing the growth kinetics of Fe<sub>2</sub>B layers in AISI 4140 steel. *Kovove Mater.*, 2010, vol. 48, p. 1–6. ISSN: 1338-4252.
11. CAMPOS-SILVA, I., ORTIZ-DOMÍNGUEZ, M., KEDDAM, M., LÓPEZ-PERRUSQUÍA, N., CARMONA-VARGAS, A., ELIAS-ESPINOSA, M. Kinetics of the formation of Fe<sub>2</sub>B layers in gray cast iron: Effects of boron concentration and boride incubation time. *Applied Surface Science*, 2009, vol. 255, p. 9290–9295. ISSN: 0169-4332.