

# Energía de activación para la difusión del boro durante la borurización de un acero de bajo carbono

J. Merced Martínez<sup>1</sup>, Marissa Vargas<sup>1</sup>, Alberto Arenas<sup>1</sup>, Víctor H. Gutiérrez<sup>2</sup> y Ana M. Herrera<sup>1</sup>  
Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales<sup>1</sup>, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería<sup>2</sup>  
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo<sup>1</sup>, Instituto Politécnico Nacional<sup>2</sup>  
Mineral de la Reforma, Hgo.<sup>1</sup>; Zacatecas, Zac.<sup>2</sup>; México  
jmartinez\_ptc@upjr.edu.mx, [marissav, arenas, mherrera]@uaeh.edu.mx

**Abstract**— The iron boride layer ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) formed on the surface of a low carbon steel SAE 1005 was used to study the growth kinetics and the activation energy of boron diffusion in steel; using the mass balance equation at the  $\text{Fe}_2\text{B}$ /substrate interface and the parabolic growth law considering that the layer begins to grow after an incubation time ( $t_0$ ). The presence of a single layer of iron boride was identified by X-ray diffraction and the morphology saw-tooth type by optic microscopic. The activation energy was calculated by an Arrhenius equation, which for this study was determined at  $133.8 \text{ kJ mol}^{-1}$ .

**Keyword**— Activation energy, Arrhenius, boronizing, steel, SAE1005.

**Resumen**— La capa de boruro de hierro ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) formada en la superficie de un acero de bajo carbono SAE 1005 se empleó para estudiar la cinética de crecimiento y la energía de activación de la difusión de boro en el acero; empleando la ecuación de balance de masa en la interfase  $\text{Fe}_2\text{B}$ /sustrato y la ley de crecimiento parabólico, considerando que la capa comienza a crecer después de un tiempo de incubación ( $t_0$ ). La presencia de una capa monofásica de boruro de hierro fue identificada por Difracción de Rayos X y la morfología tipo dientes de sierra por microscopía óptica. La energía de activación se calculó mediante una ecuación tipo Arrhenius, que para este estudio se determinó en  $133.8 \text{ kJ mol}^{-1}$ .

**Palabras claves**— Acero, Arrhenius, borurización, energía de activación, SAE1005.

## I. INTRODUCCIÓN

Los tratamientos termoquímicos aportan propiedades para aplicaciones específicas como: disminuir el coeficiente de fricción, aumentar la resistencia a la corrosión y mejorar las propiedades tribológicas [1, 2] logrando extender la vida útil en las piezas de hierro utilizadas en los sistemas mecánicos [3]. La borurización es un tratamiento termoquímico de endurecimiento superficial que consiste en calentar el material entre 973 a 1273 °K durante 1 a 12 h [4] en contacto con un polvo sólido, una pasta, un líquido o un gas rico en boro. El tratamiento con boro de materiales ferrosos da como resultado la formación de una sola o doble fase en la capa de boruros [1] con una alta dureza superficial que puede llegar a valores de 1800 HV. La capa de boruro monofásica consiste en boruro de di-fierro ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) mientras que la capa bifásica se compone de una fase oscura exterior de monoboruro de fierro ( $\text{FeB}$ ) y una fase brillante interior de boruro de di-fierro ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ). La formación de una o doble fase depende de la disponibilidad de boro durante el tratamiento. En general, es deseable la formación de una sola fase ya que es común la formación de grietas en la interfase  $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$  [5] provocando la descamación y el desprendimiento de la capa cuando se aplica una tensión mecánica o incluso la separación cuando la parte tratada es sometida a un choque térmico y/o mecánico. El proceso de borurización consta de dos tipos de reacción. La primera reacción es la nucleación que se lleva a cabo en la superficie de la pieza a tratar. La velocidad de nucleación depende del tiempo y la temperatura necesarios para la formación de una capa de boruro delgada y compacta. La segunda reacción es el crecimiento de la capa que se encuentra en función de la difusión del boro en el hierro y este a su vez de la temperatura [6]. El espesor de la capa de borurización corresponde con la aplicación deseada; por regla general las capas delgadas de 15 a 20  $\mu\text{m}$  se utilizan para la protección contra el desgaste adhesivo como la conformación de troqueles sin arranque de

virutas y herramientas metálicas por estampado, mientras que las capas gruesas (90 a 200  $\mu\text{m}$ ) evitan el desgaste erosivo en herramientas para la extrusión de plásticos y la industria cerámica.

El estudio en la cinética de crecimiento de las capas de boruro de hierro en materiales ferrosos se ha incrementado en los últimos años [1,2,3,5,7]. Los modelos tradicionales de difusión [8,9,10] sugieren que las capas FeB y Fe<sub>2</sub>B obedecen la ley de crecimiento parabólico:

$$d^2 = k \cdot t \quad (1)$$

donde,  $d$  es el espesor promedio de la capa borurada (m),  $k$  representa una constante de crecimiento parabólico ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ) y  $t$  es el tiempo de tratamiento (s). El principal factor que limita el crecimiento de las capas boruradas, en los modelos donde se considera la ley de crecimiento parabólico, es la difusión de boro. En una gráfica de  $d^2$  vs.  $t$ , se observa que la pendiente aumenta para cada tratamiento a temperatura constante, por lo que la constante de crecimiento parabólico,  $k=k_0e^{-(Q/RT)}$ , tiene un comportamiento tipo Arrhenius; donde,  $k_0$  es una constante pre-exponencial que refleja la frecuencia de las colisiones de los átomos de boro con los de hierro,  $Q$  ( $\text{Jmol}^{-1}$ ) es la energía de activación del sustrato,  $T$  ( $^\circ\text{K}$ ) es la temperatura absoluta en Kelvin y  $R$  ( $\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) es la constante universal de los gases ideales. En ese tipo de modelos, se admite que las capas boruradas se forman instantáneamente al tiempo  $t=0$ , no se toma en cuenta el periodo de incubación de los boruros [2,3,4,11]. En la práctica, la correcta selección de los parámetros del proceso es trascendental para alcanzar el grosor esperado en la capa borurada [12,13]. El análisis de la cinética de crecimiento de las capas boruradas es un instrumento útil para la optimización del tratamiento termoquímico de borurización [14,15,16]. Es por ello que se han propuesto otros modelos para evaluar la cinética de crecimiento de las capas boruradas en función de las variables del proceso, considerando que la capa de boruro no comienza a constituirse instantáneamente, sino después de un determinado tiempo de incubación, ( $t_0$ ) en el que ya se posee 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 la capa. A partir del perfil inicial, una capa de boruros de hierro comienza a formarse y se extiende lentamente al interior del sustrato. La existencia del instante y del perfil inicial mencionado ( $f(x(t))$ ), son realmente una consecuencia de los procesos de incubación y coalescencia [16] de la fase en la etapa inicial de su gestación [5]. Una de las propiedades importantes de una capa.

## II. PARTE EXPERIMENTAL

El tratamiento de borurización se realizó en un sustrato de hierro por empaquetamiento en una mezcla de polvos compuesta por 30% en peso de ácido bórico, 30% en peso de bórax y el resto de carburo de silicio a las temperaturas de 1073, 1173, 1223 y 1273  $^\circ\text{K}$ . La composición del hierro se muestra en la Tabla I. Los sustratos de  $10 \times 5 \times 5$  mm se desbastaron con lijas de carburo de silicio con tamaño de partícula 240, 320, 400, 600, 1000, 2000 por último se pulieron con paño de microfibra y alúmina de  $0.05\mu\text{m}$ .

Tabla I. Composición química del acero SAE1005 (% peso).

C	Mn	Si	Cr	Cu	Ni	P	S	Fe
0.036	0.57	0.19	0.014	0.03	0.031	0.0019	0.0079	Balance

El proceso se llevó a cabo introduciendo los sustratos pulidos en una caja de  $100 \times 150 \times 70$  mm de placa de acero de  $\frac{1}{4}$  de pulgada. La caja se colocó dentro de un horno NABERTHERM® precalentado a la temperatura de los tratamientos. Al terminar el tratamiento las muestras fueron retiradas de la caja, enfriadas a temperatura ambiente, preparadas metalográficamente y atacadas con Nital al 3%.

### A. Técnicas de caracterización

#### I) Microscopía óptica (MO)

En el estudio se utilizó un Microscopio Metalográfico marca Olympus con el software para el análisis de imágenes PaxIt, las micrografías se obtuvieron a 200X para medir el espesor de la capa de boruro de hierro.

#### II) Difracción de rayos X (DRX)

El difractómetro que se empleó es de la marca Inel modelo Equinox 2000 de óptica simple, con un tamaño de paso de  $0.0315^\circ$  en el rango de  $2\theta$  de  $10^\circ$  a  $110^\circ$ , equipado con una fuente de radiación de  $\text{CoK}_{\alpha 1}$  con  $\lambda=0.178901\text{nm}$  y un monocromador de germanio. Las condiciones de trabajo de la tensión y corriente de trabajo se establecieron en 30kV y 20mA respectivamente, el portamuestras fue de plástico, tiempo de barrido 10 minutos; la identificación de los picos se efectuó con las fichas estándar del Crystallography Open Database (COD) del software Match versión 1.9.

## III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### A. Microscopía óptica

Los átomos de boro debido a su tamaño relativamente pequeño (radio atómico de  $0.9 \text{ \AA}$ ), pueden difundirse fácilmente en aleaciones ferrosas resultando en la formación de una capa monofásica de  $\text{Fe}_2\text{B}$  o bifásica ( $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$ ) con una composición definida. La dinámica de crecimiento de la capa de boruro consta de tres etapas [7], Durante la primera etapa los cristales de  $\text{FeB}$  (el primer producto que se forma) creció sobre la superficie metálica hasta cubrir la pieza por completo. Durante la segunda etapa los cristales de  $\text{FeB}$  crecieron y formaron  $\text{Fe}_2\text{B}$  hacia el interior del metal, y en la tercera etapa todos los cristales de  $\text{Fe}_2\text{B}$  crecieron en una orientación cristalográfica preferente [001] dando lugar a morfología tipo diente de sierra [8] como se muestra en las Figuras 1(a), (b) y (c).

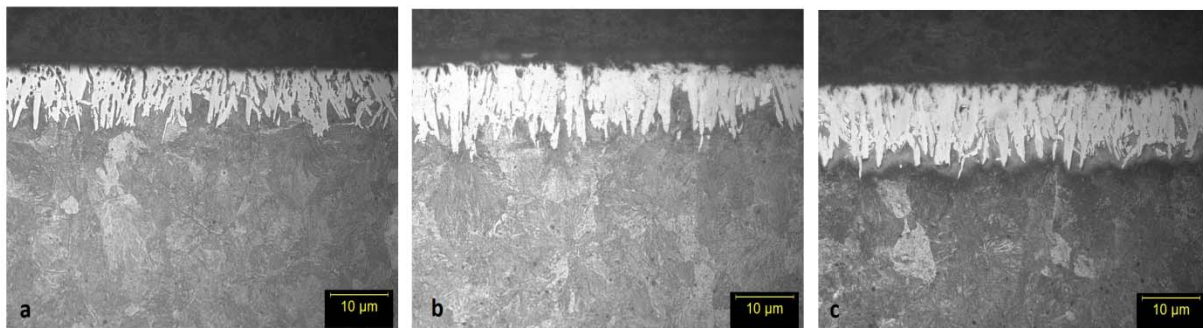


Fig. 1. Micrografías a 200X de la capa de boruro de hierro ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) a 1273 K durante (a) 2, (b) 3 y (c) 4 horas.

El espesor de la capa es un parámetro importante en las propiedades finales de la pieza, debido a la forma irregular propia del boruro de hierro la medición se realizó de acuerdo al procedimiento descrito por Keddam et al. [1], ecuación (2), que consistió en realizar varias mediciones en distintos puntos del sustrato y posteriormente promediarlas, como se ejemplifica en la Figura 2.

$$d_{\text{Fe}_2\text{B}} = \frac{\sum_{i=1}^n L_{i,\text{Fe}_2\text{B}}}{n} \quad (2)$$

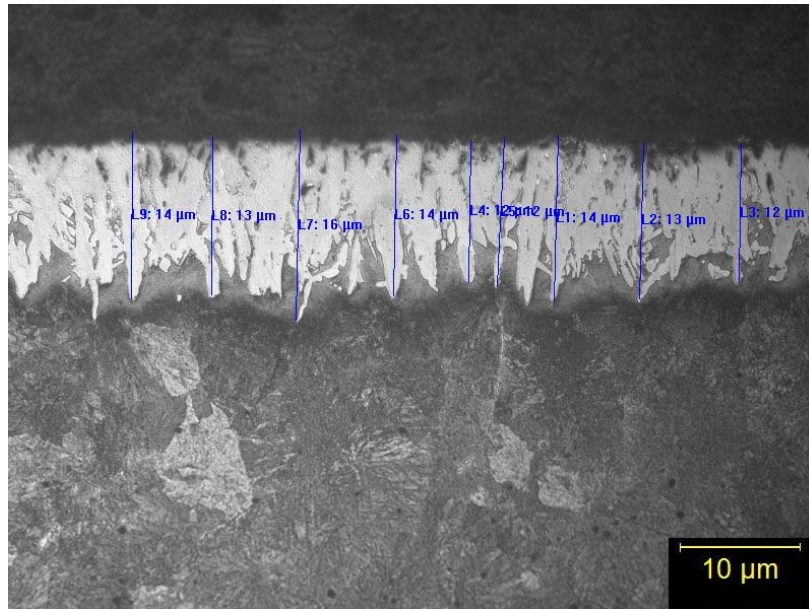


Fig. 2. Representación esquemática de la forma de medir el espesor de la capa de boruro.

El crecimiento de espesor de la capa de boruro de hierro depende de la temperatura y el tiempo del tratamiento, es decir a mayor temperatura el espesor de la capa es más grande como se muestra en la Tabla II. El mayor espesor de la capa se debió a que la difusividad del boro en el hierro, aumenta con la temperatura. El crecimiento del espesor de la capa de boruro con la temperatura es característico de un tratamiento termoquímico en el cual el mecanismo que predomina es el de la difusión, en este caso una difusión intersticial.

Tabla II. Resultados del espesor de la capa del proceso de borurizado con bórax

Temperatura (°K)	1073	1173	1223	1273
Tiempo (h)	Espesor de la capa (μm)			
1	1.47	6.45	8.47	10.48
1.3	4.30	10.73	18.24	23.17
2	8.36	19.57	29.63	37.91
4	18.00	30.14	45.71	60.04

### B. Difracción de rayos X (DRX)

Los patrones de DRX de la Figura 3 corresponden a las muestras boruradas a 1073, 1173, 1223 y 1273 °K durante 3.5 horas. Los resultados indicaron que después del periodo de tiempo del tratamiento la superficie del acero está totalmente cubierta por una capa que: (i) se compone mayoritariamente de Fe<sub>2</sub>B, (ii) cuyo espesor va de 18.00 a 60.01 micras y (iii) la capa de Fe<sub>2</sub>B tiene una estructura cristalográfica tetragonal en donde la dirección [0 0 1] corresponde a la de la difusión del boro.

A altas temperaturas el crecimiento de la capa de boruro es aceptable atribuírsela a la difusión del B, como se observa en el difractograma de la Figura 3 correspondiente a la temperatura de 1073 °K donde ya se observan los picos característicos del Fe<sub>2</sub>B a valores de 2θ de 49.94°, 52.57° y 66.35°; el de FeB en 78.67° y el de Fe en 96.14°. A 1173 °K se observan los mismos picos característicos del Fe<sub>2</sub>B, pero a partir del pico ubicado en 52.57° los demás mostraron mayor intensidad con respecto al difractograma anterior. En el difractograma a 1223 °K, a partir del pico en 49.94° se observa un desplazamiento de los

picos hacia la derecha con respecto a los valores característicos de  $2\theta$  para cada ángulo. El desplazamiento ocurre por el efecto de los esfuerzos residuales en el material debido a la temperatura empleada en el tratamiento. En el tratamiento a 1273 °K se observa un comportamiento similar que la temperatura anterior, además de una disminución en la intensidad de los picos, lo cual indica un menor tamaño de cristal. La menor intensidad de los picos a 1223 y 1273 °K se puede deber al agotamiento de boro en la interfase B/FeB o B/Fe<sub>2</sub>B de esta observación se deduce que durante el proceso el contenido de boro juega un papel esencial en la determinación de la composición y el espesor de la capa de boruro.

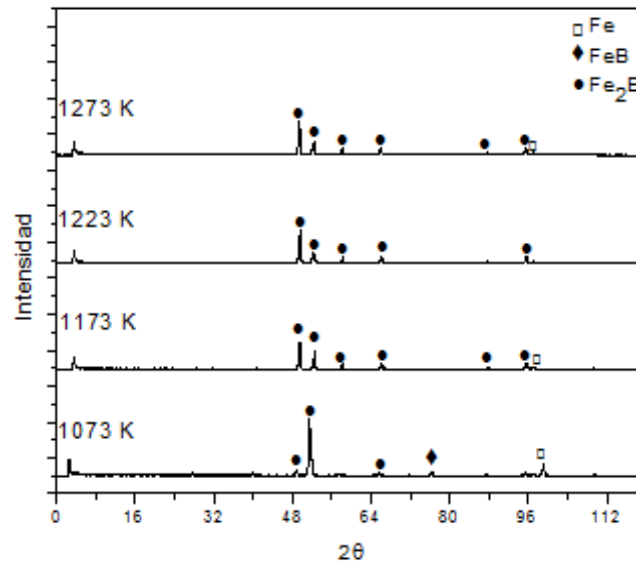


Fig. 3. Patrones de difracción del estudio de Rayos X para las muestras boruradas durante 3.5 h

Al inicio del proceso el potencial de boro es suficientemente alto para formar la fase de FeB en la superficie del acero. Cuando se produce una película continua y delgada FeB, cualquier formación adicional de FeB depende de la difusión de boro a través de esta capa para llegar a la interfase FeB/Fe, resultando en la formación y el crecimiento de la fase Fe<sub>2</sub>B en la interfase FeB/Fe. Por lo tanto, mientras la concentración de boro es mayor a la concentración de boro en la fase FeB, la fase Fe<sub>2</sub>B va a crecer. A medida que el proceso continúa, la concentración de boro se agota con el tiempo y cuando se alcanza el límite inferior de la fase de FeB se llega al término de crecimiento de esta fase. Así que desde este punto si no hay suficiente B o la presencia de la fase FeB, la fase Fe<sub>2</sub>B dejará de producirse [11] y de acuerdo a la cinética de la reacción esta fase en contacto con el hierro se descompone nuevamente en FeB lo que repercute en la disminución en la intensidad de los picos en los difractogramas. Por lo tanto, cuando los tiempos de tratamiento y las temperaturas aumentan las capas de Fe<sub>2</sub>B tienden a ser de mayor espesor, aumentando así las tensiones mecánicas en la interfase debido a las distorsiones en esta zona lo que provoca un desplazamiento en los picos característicos.

### C. Cinética de la reacción de borurizado

Se considera que las capas de boruro crecen en forma parabólica en la dirección del flujo de difusión y perpendicular a la superficie del sustrato. Por lo tanto, la dependencia con respecto al tiempo del espesor de las capas de boruro se puede describir con la ecuación (3):

Los modelos de difusión tradicionales proponen que la capa de Fe<sub>2</sub>B tiende a seguir la ley de crecimiento parabólico:

$$d^2 = v^2 = k_{Fe_2B}t \quad (3)$$

Donde  $v^2$  es el espesor de la capa de boruro,  $k_{Fe_2B}$  es la constante de crecimiento parabólico y  $t$  es el tiempo de tratamiento.

El principal factor que impide el crecimiento de la capa borurada es la difusión del boro en el hierro. Al graficar  $v^2$  contra  $t$ , la pendiente de cada línea aumenta al incrementar temperatura de tratamiento, lo anterior indica que la constante de crecimiento parabólico tiene un comportamiento tipo Arrhenius, ecuación (4):

$$k_{Fe_2B} = k_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

En la ecuación anterior  $k_0$  es la constante preexponencial,  $Q$  la energía de activación del sustrato,  $R$  la constante universal de los gases ( $8.314 \times 10^{-3} \text{ kJmol}^{-1}$ ) y  $T$  la temperatura absoluta en K. La última consideración en la difusión tradicional es considerar que la capa de boruro se comienza a formar en el tiempo  $t=0$ . En este trabajo se consideró que el crecimiento de la capa borurada es después de transcurrido un periodo de tiempo, llamado tiempo de incubación  $t_0$  (T) que depende únicamente de la temperatura del tratamiento y se calcula extrapolando las líneas rectas hacia la abscisa de graficar  $v^2$  contra  $t$ , es decir, cuando  $v^2=0$ . Con los resultados de la medición de los espesores de la capa borurada mostrados en la Tabla II, se graficó  $v^2$  vs  $t$ , Figura 4.

Las pendientes de las líneas rectas de la figura anterior representan las constantes de crecimiento parabólico de acuerdo a la expresión (5) propuesta por Campos-Silva [16]:

$$v^2 = k_{Fe_2B}^2 t_v = k_{Fe_2B}^2 (t - t_0^{Fe_2B}(T)) \quad (5)$$

Donde  $t$  es el tiempo del tratamiento y  $t_0^{Fe_2B}$  es el tiempo de incubación. En el periodo de incubación del boruro de hierro se forma una película base que termina con la formación de los primeros boruros de hierro y en la gráfica representa la intercepción con el eje de las abscisas. En la Tabla 4 se muestran los tiempos de incubación para cada temperatura.

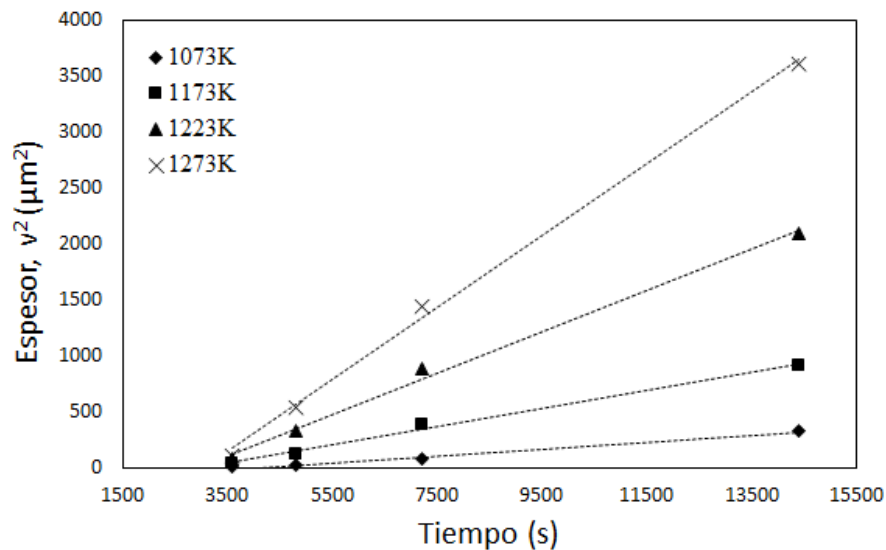


Fig. 4. Gráfica de los espesores de las capas boruradas ( $v^2$ ) en función del tiempo de tratamiento ( $t$ )

Tabla IV. Constantes de crecimiento parabólico y tiempos de incubación

Temperatura (K)	Constante de crecimiento $k_{Fe_2B}^2 t_v (\mu m^2 s^{-1})$	Tiempo de incubación $t_0^{Fe_2B} (s)$
1073	0.03070	4128.339
1173	0.08090	3026.082
1223	0.18480	2940.043
1273	0.32140	3075.731

Para el cálculo de los coeficientes de difusión del boro en el hierro (Tabla V) se empleó la ecuación (6) propuesta por Ortíz-Domínguez [17]:

$$D_{Fe_2B} = k_{Fe_2B}^2 \frac{C_{low}^{Fe_2B} - 2C_0 + C_{up}^{Fe_2B}}{4(C_{low}^{Fe_2B} - C_{up}^{Fe_2B})} \tag{6}$$

Donde  $C_{low}^{Fe_2B} - C_{up}^{Fe_2B}$  representan la mínima y máxima concentración de boro en la capa de boruro ( $C_{low}^{Fe_2B} \approx 8.83 \text{ wt\%B}$  y  $C_{up}^{Fe_2B} \approx 9.0 \text{ wt\%B}$ ) y  $C_0$  es la concentración inicial de boro aproximadamente igual a  $35 \times 10^{-4} \%$  en peso de B. los valores de las concentraciones se obtuvieron del diagrama de equilibrio del sistema binario hierro-boro en que se muestra la existencia de dos fases de boruros de hierro:  $Fe_2B$  con 8.83 % en peso B mínimo y 9.0 % en peso de % B máximo, aproximadamente [17].

Tabla V. Coeficientes de difusión del boro ( $D_{Fe_2B}$ ) obtenidos de la ecuación (4)

Temperatura (K)	Coefficiente de difusión $D_{Fe_2B} (m^2 s^{-1})$
1073	$8.0494 \times 10^{-13}$
1223	$4.84537 \times 10^{-12}$
1173	$2.12116 \times 10^{-12}$
1273	$8.42697 \times 10^{-12}$

Considerando que el sistema tiene un comportamiento tipo Arrhenius de acuerdo con la siguiente ecuación (7) [17]:

$$\ln D_{Fe_2B} = \ln D_0 - \left( \frac{Q}{RT} \right) \tag{7}$$

La pendiente de la gráfica de  $\ln D_{Fe_2B}$  contra el inverso de la temperatura, Figura 5, es igual a  $(-Q/R)$ .

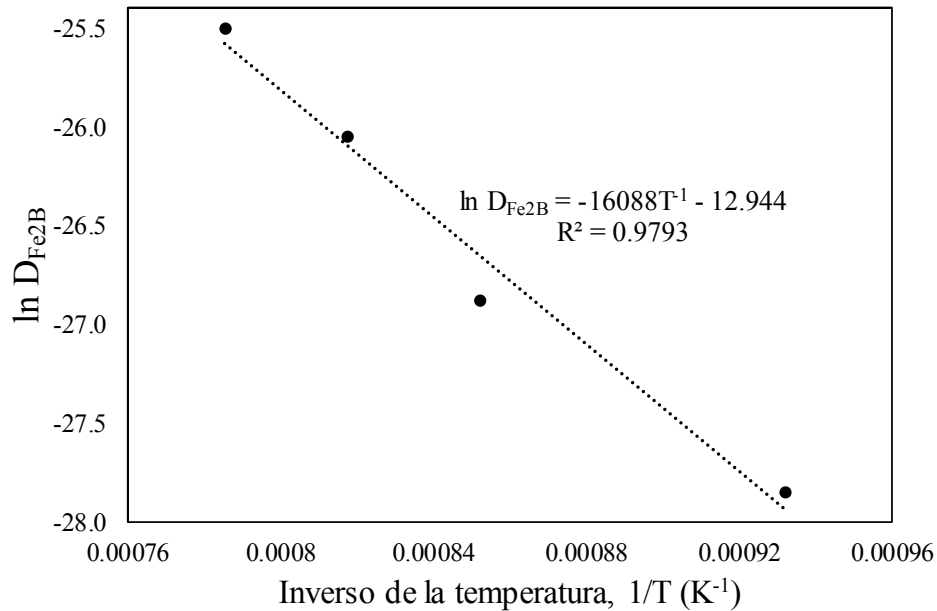


Fig. 5. Gráfica del  $\ln D_{Fe2B}$  vs  $t$  para determinar la energía de activación en el hierro

Por lo que el coeficiente de difusión expresándolo mediante la ecuación (7) para el proceso de borurización por empaquetamiento en bórax, ácido bórico y carburo de silicio del hierro en un rango de temperatura de 1073 a 1273 K se puede expresar de la manera siguiente, ecuación (8):

$$D_{Fe_2B} = 2.3905 \times 10^{-6} \exp\left(-\frac{133.8 \text{ kJmol}^{-1}}{RT}\right) \quad (8)$$

Donde  $133.8 \text{ kJmol}^{-1}$  es la energía de activación, que representa la energía necesaria para provocar la difusión del B en la capa de boruro. El valor de la energía de activación que se obtuvo es congruente con los reportados en otras investigaciones como se muestra en Tabla VI.

Tabla VI. Energías de activación de algunos aceros

Acero	Rango de temperatura (°K)	Medio de borurización	Energía de activación (kJmol <sup>-1</sup> )
Hierro Armco®	1073-1273	Gaseoso	120.65 [14]
AISI 1018	1173-1273	Empaquetamiento	172.75 [15]
AISI 4140	1123-1273	Pasta	173 [13]
Este trabajo	1073-1273	Empaquetamiento	133.8

#### IV. CONCLUSIONES

Se realizó el proceso de borurización por empaquetamiento en una mezcla de polvos compuesta por ácido bórico, bórax y carburo de silicio a diferentes temperaturas con la finalidad de establecer la energía de activación para la difusión de boro en el hierro utilizando una ecuación de difusión en la cual se considera que los boruros comienzan a formarse después de un tiempo de incubación. La energía de activación se relacionó mediante una ecuación tipo Arrhenius. El espesor y composición de la capa fueron caracterizados mediante MO y DRX, respectivamente, concluyendo lo siguiente: (i) el análisis por MO confirmó que las capas de boruro crecieron proporcionalmente con la temperatura. Al aumentar



la temperatura incrementa la velocidad de difusión del boro confirmando que el mecanismo de reacción fue por difusión intersticial de boro en el hierro; (ii) el análisis por DRX confirmó que la capa de boruro fue bifásica, formada por  $\text{Fe}_2\text{B}$  y  $\text{FeB}$ , en el tratamiento a 1073 K y sólo compuesta por  $\text{Fe}_2\text{B}$  en las temperaturas de 1123, 1073 y 1223 °K, y (iii) se calculó la energía de activación de este tratamiento termoquímico de borurización siendo este valor similar a los reportados en la literatura.

## RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de PRODEP y la UPJR para la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] Keddam M., Kulka M., Makuch N., Pertek A., Maldzinski L., “A kinetic model for estimating the boron activation energies in the  $\text{FeB}$  and  $\text{Fe}_2\text{B}$  layers during the gas-boriding of Armco iron: effect of boride incubation times,” *Applied Surface Science*, vol. 298, pp. 155-163, 2014.
- [2] Bataev I. A., Golkovskii M. G., Bataev A. A., Losinskaya A. A., Dostovalov R. A., Popelyukh A. I., Drobyaz E. A., “Surface hardening of steels with carbon by non-vacuum electron-beam processing,” *Surface and Coatings*, vol. 242, pp. 64–169, 2014.
- [3] Reza Bateni M., Szpunar J. A., Wang X., Li D. Y., “Wear and corrosion wear of medium carbon steel and 304 stainless steel,” *Wear*, vol. 260, pp. 116-122, 2006.
- [4] Garcia-Bustos E., Figueroa-Guadarrama M. A., Rodríguez-Castro G. A., Gómez-Vargas O. A., Gallardo-Hernández E. A., Campos-Silva I., “The wear resistance of boride layers measured by the four-ball test,” *Surface & Coatings Technology*, vol. 215, pp. 241–246, 2013.
- [5] Becker E. P., “Trends in tribological materials and engine technology,” *Tribology International*, vol. 37, pp. 569-575, 2004.
- [6] Li G., Chen J., Guan D., “Friction and wear behaviors of nanocrystalline surface layer of medium carbon steel,” *Tribology International*, vol. 43, pp. 2216-2221, 2010.
- [7] Tabur M., Izciler M., Gul F., Karacan I., “Abrasive wear behavior of boronized AISI 8620 steel,” *Wear*, vol. 266, pp. 1106-1112, 2009.
- [8] Kayali Y., Gunes I., Sinan U., “Diffusion kinetics of borided AISI 52100 and AISI 440C steels,” *Vacuum*, vol. 86, pp. 1428-1434, 2012.
- [9] Campos I., Bautista O., Ramírez G., Islas M., De La Parra J., Zúñiga L., “Effect of boron paste thickness on the growth kinetics of  $\text{Fe}_2\text{B}$  boride layers during the boriding process,” *Applied Surface Science*, vol. 243, pp. 429-436, 2005.
- [10] H. Yang, X. Wu, Z. Yang, S. Pu y H. Wang, “Enhanced boronizing kinetics of alloy steel assisted by surface mechanical attrition treatment,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 590, pp. 388-395, 2014.
- [11] B. Selcuk, R. Ipek, M. B. Karamis y V. Kuzucu, “An investigation on surface properties of treated low carbon and alloyed steels (boriding and carburizing),” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 103, pp. 310-317, 2000.
- [12] Campos I., Bautista O., Ramírez G., Islas M., De La Parra J., Zúñiga L., “Effect of boron paste thickness on the growth kinetics of  $\text{Fe}_2\text{B}$  boride layers during the boriding process,” *Applied Surface Science*, vol. 243, pp. 429-436, 2005.
- [13] M. Tabur, M. Izciler, F. Gul y I. Karacan, “Abrasive wear behavior of boronized AISI 8620 steel,” *Wear*, vol. 266, pp. 1106-1112, 2009.
- [14] Kartal, I., Eryilmaz, O.L., Krumdick, G., Erdemir, A., Timur, S., “Kinetics of electrochemical boriding of low carbon steel,” *Applied Surface Science*, vol. 257, pp. 6928-6934, 2011

- [15] Anthymidis K. G., Maragoudakis N., Stergioudis G., Haidar O., Tsipas D. N., "A comparative study of boride coatings obtained by pack cementation method and by fluidized bed technology," *Materials Letters*, vol. 57, pp. 2399-2403, 2003.
- [16] I. Campos-Silva, M. Ortiz-Domínguez, O. Bravo-Bárcenas, M. A. Doñu-Ruiz, D. Bravo-Bárcenas, C. Tapia-Quintero y M. Y. Jiménez-Reyes, "Formation and kinetics of FeB/Fe<sub>2</sub>B layers and diffusion zone at the surface of AISI 316 borided steels," *Surface & Coatings Technology*, vol. 205, pp. 403-412, 2010.
- [17] Ortiz Domínguez M., "Contribución de la modelación matemática en el tratamiento termoquímico de borurización," Tesis que para obtener el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica. IPN, México, D. F., 2013.