

Desarrollo de un modelo matemático y validación experimental del crecimiento de las capas Fe₂B sobre acero AISI 1518

Development of a Mathematical Model and Experimental Validation of the Growth of Fe₂B Layers on AISI 1518 Steel

Erick Pérez López ^a, Arturo Cruz Avilés ^b, Jorge Zuno Silva ^c, Martín Ortiz Domínguez ^d

Abstract:

AISI 1518 steel was subjected to a powder boronizing process in the temperature range of 1123–1273 K for treatment times ranging from 2 to 8 h. A compact, single-phase Fe₂B layer formed on the surface of the steel. The boriding mixture consisted of 20% B₄C, 10% KBF₄, and 70% SiC. Various experimental techniques were used to characterize the borided samples, including scanning electron microscopy (SEM) coupled with energy-dispersive spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD). An alternative model, based on the integral mass balance equation, was used to estimate the boron diffusion coefficients in the Fe₂B layers formed over the temperature range of 1123–1273 K. Finally, the activation energy for boron diffusion in AISI 1518 steel was determined and compared with values reported in the literature. In addition, the proposed model was validated by comparing the experimental thickness of the Fe₂B layer—obtained at 1253 K after 2 h of treatment—with the thickness predicted by the model.

Keywords:

Incubation time, iron boride, growth kinetics, activation energy, integral method

Resumen:

El acero AISI 1518 fue sometido a un proceso de borurización en polvo en el intervalo de temperaturas de 1123–1273 K durante tiempos de tratamiento de 2 a 8 h. En la superficie del acero se formó una capa compacta y monofásica de Fe₂B. La mezcla borurizante estuvo compuesta por 20 % de B₄C, 10 % de KBF₄ y 70 % de SiC. Para la caracterización de las muestras boruradas se emplearon diversas técnicas experimentales, entre ellas microscopía electrónica de barrido (SEM) acoplada con espectroscopía de dispersión de energía (EDS) y difracción de rayos X (XRD). Se utilizó un modelo alternativo, basado en la ecuación integral de balance de masa, para estimar los coeficientes de difusión del boro en las capas de Fe₂B formadas en el intervalo de temperaturas de 1123–1273 K. Finalmente, se determinó la energía de activación para la difusión del boro en el acero AISI 1518, comparándose con los valores reportados en la literatura. Además, el modelo propuesto fue validado mediante la comparación entre el espesor experimental de la capa de Fe₂B, obtenido a 1253 K después de 2 h de tratamiento, y el espesor predicho por el modelo.

Palabras Clave:

Tiempo de incubación, boruro de hierro, cinética de crecimiento, energía de activación, método integral

Introducción

La borurización es un tratamiento termoquímico que consiste en modificar químicamente la superficie de

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0007-4083-9862>, Email: pe489709@uaeh.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-0455-1646>, Email: arturo_cruz8085@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-1997-5399>, Email: jorge_zuno@uaeh.edu.mx

^d Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-4475-9804>, Email: martin_ortiz@uaeh.edu.mx

componentes metálicos con el propósito de incrementar significativamente su dureza, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión (Sinha, 1991). Este proceso se lleva a cabo normalmente en un intervalo de temperaturas comprendido entre 700 y 1000 °C, dependiendo del medio de borurización empleado (Nam et al., 1998; Mitrokhovich et al., 1982; Simonenko et al., 1982; Gunes y Ozcatal, 2015; Keddarn et al., 2017) Como resultado de la difusión del boro hacia el interior del material, se forma una capa superficial de boruros de hierro con elevada resistencia al desgaste. Dependiendo de las condiciones del tratamiento y de la composición química del acero, la capa de boruro puede estar constituida por una capa monofásica de Fe_2B o por una configuración bicapa formada por FeB y Fe_2B . Para aplicaciones industriales, la configuración monofásica de Fe_2B suele preferirse frente a la bicapa $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$, debido a que la fase FeB presenta una mayor dureza, pero también una mayor fragilidad y un coeficiente de expansión térmica más elevado. En consecuencia, durante el enfriamiento pueden generarse grietas que se propagan a lo largo de la interfaz $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$, reduciendo la integridad mecánica del recubrimiento.

Existen diversos procesos para producir capas de boruro resistentes al desgaste, entre los que destacan la borurización en estado sólido (en polvo), líquida, gaseosa y por plasma. Sin embargo, la borurización en polvo ofrece ventajas importantes, tales como la facilidad para modificar la composición del medio borurizante, la simplicidad del equipo utilizado y su bajo costo de operación. Desde el punto de vista cinético, numerosos modelos matemáticos han sido desarrollados para describir el crecimiento de las capas de boruro sobre diferentes sustratos metálicos (VillaVelázquez-Mendoza et al., 2014; Campos et al., 2007; Campos et al., 2006; Ramdan et al., 2008; Campos et al., 2003; Brakman et al., 1989; Gómez-Vargas et al., 2017; Mebarek et al., 2017; Keddarn et al., 2017; Keddarn et al., 2018; Yu et al., 2005). Estos modelos permiten estimar parámetros fundamentales del proceso, como el coeficiente de difusión del boro, la energía de activación y la evolución del espesor de la capa en función de la temperatura y del tiempo de tratamiento.

Por ejemplo, VillaVelázquez-Mendoza et al. (2014) emplearon la metodología de superficie de respuesta para estudiar la evolución de las capas de boruro producidas mediante borurización en pasta sobre acero AISI 1018, en el intervalo de temperaturas de 1073–1273 K, analizando simultáneamente la influencia de la temperatura, el tiempo de tratamiento y la rugosidad superficial del sustrato. Mediante un análisis de varianza (ANOVA), concluyeron que la temperatura de

borurización constituye el parámetro con mayor influencia sobre el espesor de la capa de boruro. Los autores Campos et al. (2007) emplearon una red neuronal y modelos basados en mínimos cuadrados para investigar la cinética de borurización del acero AISI 1045. En su estudio, se produjo una capa monofásica de Fe_2B mediante el proceso de borurización en pasta, en el intervalo de temperaturas de 1193–1273 K, modificando el contenido de pasta borurizante. Ambos enfoques fueron validados experimentalmente para muestras boruradas a 1223 K durante 5 h, variando el espesor de la pasta entre 2 y 5 mm.

Posteriormente, Campos et al. (2006) utilizaron la técnica de lógica difusa para investigar la cinética de crecimiento de capas de Fe_2B sobre la superficie del acero AISI 1045, también mediante borurización en pasta. Los resultados experimentales del espesor de la capa de boruro fueron comparados con los valores obtenidos mediante el modelo de lógica difusa, observándose una buena concordancia entre ambos conjuntos de datos. Se concluyó que la aplicación de la lógica difusa constituye una alternativa eficaz para el modelado de la cinética de crecimiento de las capas de boruro.

Por otra parte, Ramdan et al. (2008) aplicaron el modelo de campo de fases (phase-field) para simular el perfil de concentración de boro a través de las capas de Fe_2B formadas sobre hierro Armco, utilizando datos experimentales reportados previamente por Inok [10]. Este enfoque cinético fue desarrollado a partir de la energía libre de Gibbs–Landau, empleando la información termodinámica del diagrama de fases Fe–B y diversos parámetros físicos del material, tales como la energía interfacial y el espesor de la interfaz. Durante la formulación del modelo de campo de fases, se asumió que la fase Fe_2B mantenía una composición estequiométrica. Asimismo, Campos et al. (2003) desarrollaron un modelo de difusión simplificado basado en el modelo cinético propuesto por Brakman et al. (1989). Dicho modelo considera el principio de conservación de la masa en la interfaz $\text{Fe}_2\text{B}/\text{sustrato}$ durante la formación de la capa de Fe_2B sobre hierro Armco por efecto de la difusión del boro, teniendo en cuenta la diferencia en el volumen molar entre la fase Fe_2B y el sustrato. Para estimar el coeficiente de difusión del boro en la fase Fe_2B , se asumió un perfil lineal de concentración de boro a través de la capa, en el intervalo de temperaturas comprendido entre 1223 y 1323 K.

Recientemente, Gómez-Vargas et al. (2017) propusieron un modelo matemático para investigar la cinética de crecimiento de las capas de Fe_2B sobre acero AISI 1025 en el intervalo de temperaturas de 1123–1273 K. Este

modelo cinético se fundamentó en el principio de conservación de la masa en la interfaz Fe_2B /sustrato. Se consideró un perfil no lineal de concentración de boro que satisface la solución de la segunda ley de Fick para este problema de difusión. Además, se introdujo un parámetro cinético adimensional, en el cual se asumió que el tiempo de incubación para la formación de las capas de Fe_2B era independiente de la temperatura de borurización. Por otra parte, Mebarek et al. (2017) emplearon un modelo de difusión para predecir el espesor de las capas de boruro durante la formación de Fe_2B sobre acero XC38, resolviendo la ecuación de balance de masa en la interfaz Fe_2B /sustrato y utilizando el concepto de concentración superficial de boro, en lugar de considerar los límites superior e inferior de concentración de boro en la fase Fe_2B .

Estos diferentes enfoques pueden utilizarse para seleccionar el espesor óptimo de las capas de boruro de acuerdo con las aplicaciones industriales de los materiales borurados. El objetivo principal del presente trabajo es caracterizar las capas de Fe_2B formadas sobre acero AISI 1518 e investigar su cinética de crecimiento. Con este propósito, se propone un modelo alternativo de difusión basado en el método integral (Keddad et al., 2017; Keddad et al., 2018) para estudiar la cinética de formación de las capas de Fe_2B sobre acero AISI 1518. El modelo supone un perfil no lineal de concentración de boro a través de la capa de Fe_2B , considerando además la existencia de un tiempo de incubación para la formación de dicha capa. Como ventaja respecto a otros modelos, se obtuvo una ecuación sencilla que relaciona el coeficiente de difusión del boro en la fase Fe_2B con el cuadrado de la constante de crecimiento parabólico en la interfaz Fe_2B /sustrato. Mediante esta ecuación, se estimaron los coeficientes de difusión del boro en la fase Fe_2B y la energía de activación para la difusión del boro en el acero AISI 1518, dentro del intervalo de temperaturas de 1123–1273 K. Finalmente, el modelo de difusión propuesto fue validado experimentalmente utilizando una condición adicional de borurización (1253 K durante 2 h).

Modelo de difusión

La mezcla de polvo empleada durante el tratamiento termoquímico estuvo constituida por 33.5 % de B_4C , 61.1 % de SiC y 5.4 % de KBF_4 . Al alcanzar su temperatura de descomposición, el tetrafluoroborato de potasio se transforma en fluoruro de potasio y trifluoruro de boro, de acuerdo con la siguiente reacción (ver Figura 1):



Los haluros volátiles de boro, principalmente BF_2 y BF , actúan como especies transportadoras de boro hacia la superficie del acero. Una vez que el BF_2 gaseoso alcanza el sustrato, se disocia y libera boro activo, representado como $[B]$. Posteriormente, estas especies reaccionan y permiten la incorporación y difusión del boro en la superficie metálica. Las principales reacciones químicas asociadas con la formación del recubrimiento de Fe_2B pueden expresarse como:

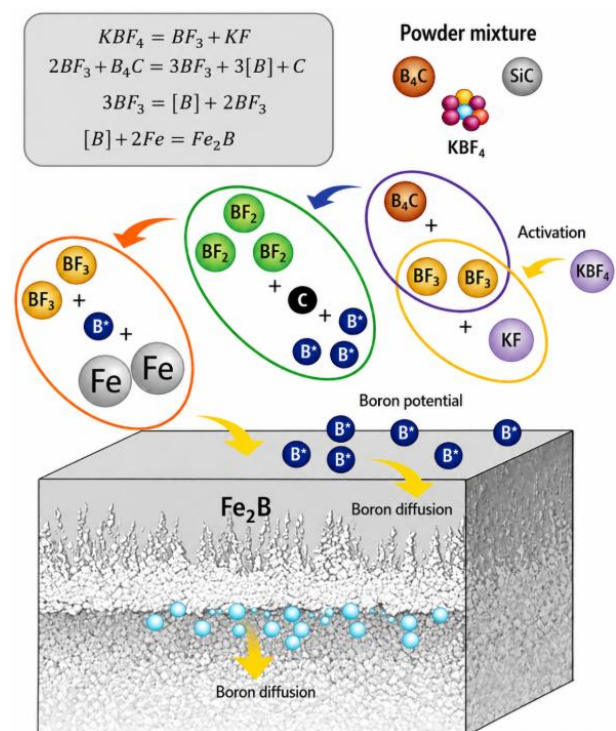
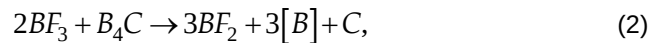


Figura 1. Representación esquemática del mecanismo de formación de la capa Fe_2B durante la borurización en polvo. El activador KBF_4 genera especies gaseosas de fluoruro de boro que reaccionan con el carburo de boro (B_4C), liberando átomos de boro activos. Estos átomos son transportados hacia la superficie del acero, donde se adsorben y difunden hacia el interior del sustrato, promoviendo la formación y crecimiento de la capa de diboruro de hierro (Fe_2B). Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2 muestra esquemáticamente el perfil de concentración de boro dentro de la capa de Fe_2B . Al

entrar en contacto con el medio borurante, los átomos de boro se adsorben sobre la superficie del acero y posteriormente se difunden hacia el interior de la red cristalina, formando inicialmente una solución sólida saturada.

Una vez transcurrido un tiempo de incubación superior a $t_0^{Fe_2B}$, comienza la formación de la capa de Fe_2B . A partir de ese instante, el recubrimiento crece de manera continua y adquiere una morfología compacta, caracterizada por un frente de crecimiento irregular o aserrado.

El parámetro C_{ads}^B representa la concentración de boro adsorbido en la superficie del sustrato. Por su parte, $C_{up}^{Fe_2B}$ corresponde al límite superior de concentración de boro en la fase Fe_2B , equivalente aproximadamente a 9 % en peso de B, mientras que $C_{low}^{Fe_2B}$ representa el límite inferior, estimado en 8.83 % en peso de B.

La variable $x(t) = u$, expresada en metros, define la posición de la interfase Fe_2B /sustrato y, en consecuencia, el espesor instantáneo de la capa borurada. Debido al estrecho intervalo de homogeneidad de la fase Fe_2B , las concentraciones de boro en la superficie y en la interfase se mantienen dentro de un rango muy reducido, cercano a 1 % atómico de boro (Brakman et al., 1989). El término C_0 , equivalente a 35×10^{-4} wt. % B, representa el límite de solubilidad del boro en el sustrato; por su pequeña magnitud, puede considerarse despreciable.

Las condiciones iniciales y de frontera del problema de difusión se establecen de la siguiente manera.

Condición inicial

$$C_{Fe_2B}(x, t_u = 0) = C_0 = 35 \times 10^{-4} \text{ wt. \% B.} \quad (5)$$

Condiciones de frontera

En la superficie externa de la capa, al finalizar el periodo de incubación:

$$C_{Fe_2B}(x = u_0 \approx 0, t_u = t_0^{Fe_2B}) = C_{up}^{Fe_2B} = 9 \text{ wt. \% B, para } C_{ads} > 9 \text{ wt. \% B,} \quad (6)$$

En la interfase entre la capa de Fe_2B y el sustrato:

$$C_{Fe_2B}(x = u, t_u = t_u) = C_{low}^{Fe_2B} = 8.83 \text{ wt. \% B,} \quad (7)$$

para $C_{ads} < 8.83 \text{ wt. \% B.}$

El parámetro u_0 representa el espesor inicial de la capa incipiente de Fe_2B . En términos prácticos, su valor se considera aproximadamente igual a cero y corresponde al instante en el que aparecen los primeros boruros de hierro, una vez concluido el periodo de incubación característico del proceso de borurización.

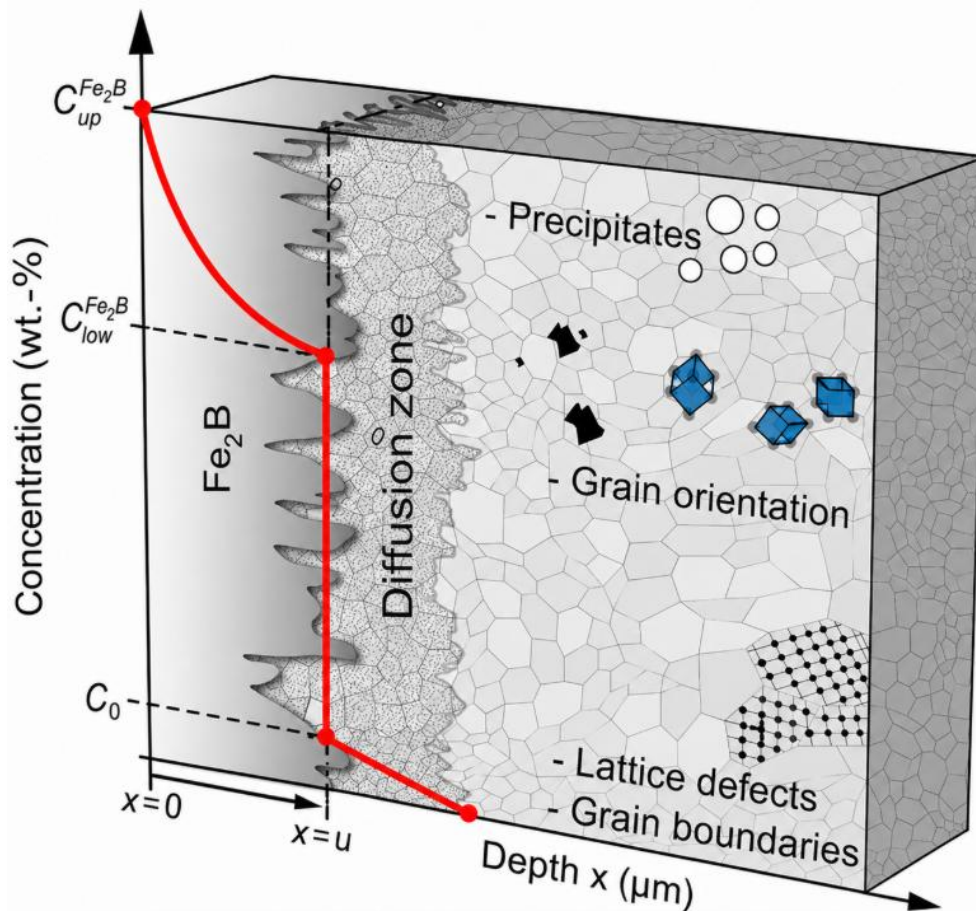


Figura 2. Representación esquemática del perfil de concentración de boro a través de la capa de Fe_2B y la zona de difusión, incluyendo la posición de la interfase $x = u$, los límites de concentración $C_{\text{Fe}_2\text{B}}^{\text{up}}$, $C_{\text{Fe}_2\text{B}}^{\text{low}}$ y C_0 , así como los principales rasgos microestructurales del sustrato. Fuente: Elaboración propia.

El perfil de concentración de boro puede describirse mediante la segunda ley de Fick, expresada como:

$$\frac{\partial C_{\text{Fe}_2\text{B}}(x, t_u)}{\partial t_u} = D_{\text{Fe}_2\text{B}} \frac{\partial^2 C_{\text{Fe}_2\text{B}}(x, t_u)}{\partial x^2}. \quad (8)$$

Cuando el coeficiente de difusión del boro depende únicamente de la temperatura de borurización, el perfil de concentración dentro de la capa de Fe_2B puede aproximarse mediante una expansión en serie de Taylor:

$$C_{\text{Fe}_2\text{B}}(x, t_u) = C_{\text{Fe}_2\text{B}}(a, t_u) + \left. \frac{\partial C_{\text{Fe}_2\text{B}}(x, t_u)}{\partial x} \right|_{x=a} (x-a) + \left. \frac{\partial^2 C_{\text{Fe}_2\text{B}}(x, t_u)}{\partial x^2} \right|_{x=a} \frac{(x-a)^2}{2!}. \quad (9)$$

para:

$$0 \leq x \leq u.$$

Tomando $a = u$ como punto de expansión y considerando la condición de frontera dada por la Ecuación (7), el perfil de concentración de la Ecuación (9) puede escribirse como:

$$C_{\text{Fe}_2\text{B}}(x, t_u) = C_{\text{Fe}_2\text{B}}^{\text{low}} + \left. \frac{\partial C_{\text{Fe}_2\text{B}}(x, t_u)}{\partial x} \right|_{x=u} (x-u) + \left. \frac{\partial^2 C_{\text{Fe}_2\text{B}}(x, t_u)}{\partial x^2} \right|_{x=u} \frac{(x-u)^2}{2!}. \quad (10)$$

Las concentraciones de boro mostradas en la Figura 2, $C_{\text{Fe}_2\text{B}}^{\text{up}}$, $C_{\text{Fe}_2\text{B}}^{\text{low}}$ y C_0 , permanecen constantes y se determinan a partir del diagrama de fases presentado en la Figura 2. Bajo estas condiciones específicas, el

balance de masa en la interfase móvil Fe₂B/sustrato puede formularse como:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{C_{up}^{Fe_2B} + C_{low}^{Fe_2B} - 2C_0}{2} \right) \left(\frac{dx}{dt_u} \right) \Big|_{x=u} \\ &= J_{in}^{Fe_2B}(x) \Big|_{x=u} - J_{out}^{Fe}(x) \Big|_{x=u+du} \\ &= -D_{Fe_2B} \left(\frac{\partial C_{Fe_2B}(x, t_u)}{\partial x} \right) \Big|_{x=u} \\ & - \left(-D_{Fe} \left(\frac{\partial C_{Fe}(x, t_u)}{\partial x} \right) \Big|_{x=u+du} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

El término,

$$t_u (= t - t_0^{Fe_2B})$$

representa el tiempo efectivo de formación de la fase Fe₂B, expresado en función del tiempo total de tratamiento t y del tiempo de incubación $t_0^{Fe_2B}$, ambos en segundos.

Asimismo, $J_{in}^{Fe_2B}(x, t_u)$, expresado en átomos $m^{-2} s^{-1}$, representa el flujo de boro que ingresa a la fase Fe₂B, mientras que $J_{out}^{Fe}(x, t_u)$ corresponde al flujo de boro que se dirige hacia el sustrato. Por su parte, D_{Fe_2B} es el coeficiente de difusión del boro en la fase Fe₂B, con unidades de $m^2 s^{-1}$, mientras que D_{Fe} representa el coeficiente de difusión del boro en el acero base.

Los coeficientes de difusión incluidos en la Ecuación (11) se consideran independientes de la concentración. En consecuencia, el gradiente de concentración en el sustrato puede despreciarse y no existe un flujo significativo de boro desde la capa de Fe₂B hacia el interior del acero, es decir:

$$J_{out}^{Fe}(x, t_u) \Big|_{x=u+du} = 0$$

Bajo esta consideración, y tomando u como el espesor instantáneo de la capa, la Ecuación (11) se reduce a:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{C_{up}^{Fe_2B} + C_{low}^{Fe_2B} - 2C_0}{2} \right) \left(\frac{dx}{dt_u} \right) \Big|_{x=u} \\ &= -D_{Fe_2B} \left(\frac{\partial C_{Fe_2B}(x, t_u)}{\partial x} \right) \Big|_{x=u}. \end{aligned} \quad (12)$$

Multiplicando ambos lados de la Ecuación (12) por $\partial x / \partial t_u$, se obtiene:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial C_{Fe_2B}(x, t_u)}{\partial t_u} \right) \Big|_{x=u} \\ &= -\frac{1}{D_{Fe_2B}} \left(\frac{C_{up}^{Fe_2B} + C_{low}^{Fe_2B} - 2C_0}{2} \right) \left(\frac{du}{dt_u} \right)^2. \end{aligned} \quad (13)$$

Al combinar las Ecuaciones (8) y (13), resulta:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial^2 C_{Fe_2B}(x, t_u)}{\partial x^2} \right) \Big|_{x=u} \\ &= -\frac{1}{D_{Fe_2B}^2} \left(\frac{C_{up}^{Fe_2B} + C_{low}^{Fe_2B} - 2C_0}{2} \right) \left(\frac{du}{dt_u} \right)^2. \end{aligned} \quad (14)$$

De manera equivalente, la Ecuación (12) puede reorganizarse para expresar el gradiente de concentración en la interfase como:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial C_{Fe_2B}(x, t_u)}{\partial x} \right) \Big|_{x=u} \\ &= -\frac{1}{D_{Fe_2B}} \left(\frac{C_{up}^{Fe_2B} + C_{low}^{Fe_2B} - 2C_0}{2} \right) \left(\frac{du}{dt_u} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Finalmente, al sustituir las Ecuaciones (14) y (15) en la Ecuación (10), se obtiene la expresión del perfil de concentración de boro dentro de la capa de Fe₂B:

$$\begin{aligned} C_{Fe_2B}(x, t_u) &= C_{low}^{Fe_2B} \\ & - \frac{1}{D_{Fe_2B}} \left(\frac{C_{up}^{Fe_2B} + C_{low}^{Fe_2B} - 2C_0}{2} \right) \left(\frac{du}{dt_u} \right) (x-u) \\ & - \frac{1}{D_{Fe_2B}^2} \left(\frac{C_{up}^{Fe_2B} + C_{low}^{Fe_2B} - 2C_0}{2} \right) \left(\frac{du}{dt_u} \right)^2 \frac{(x-u)^2}{2}. \end{aligned} \quad (16)$$

Al aplicar posteriormente la condición de frontera establecida en la Ecuación (6), puede obtenerse la relación cinética que describe la evolución temporal del espesor de la capa de Fe_2B .

Al aplicar la condición de frontera establecida en la Ecuación (6) al perfil de concentración definido por la Ecuación (16), se obtiene:

$$C_{up}^{\text{Fe}_2\text{B}} = C_{low}^{\text{Fe}_2\text{B}} + \frac{1}{D_{\text{Fe}_2\text{B}}} \left(\frac{C_{up}^{\text{Fe}_2\text{B}} + C_{low}^{\text{Fe}_2\text{B}} - 2C_0}{2} \right) \left(\frac{du}{dt_u} \right) u - \frac{1}{D_{\text{Fe}_2\text{B}}^2} \left(\frac{C_{up}^{\text{Fe}_2\text{B}} + C_{low}^{\text{Fe}_2\text{B}} - 2C_0}{2} \right) \left(\frac{du}{dt_u} \right)^2 \frac{u^2}{2}. \quad (17)$$

La Ecuación (17) puede reorganizarse de la siguiente forma:

$$u \left(\frac{du}{dt_u} \right) - u^2 \frac{1}{2D_{\text{Fe}_2\text{B}}} \left(\frac{du}{dt_u} \right)^2 = 2D_{\text{Fe}_2\text{B}} \left(\frac{C_{up}^{\text{Fe}_2\text{B}} - C_{low}^{\text{Fe}_2\text{B}}}{C_{up}^{\text{Fe}_2\text{B}} + C_{low}^{\text{Fe}_2\text{B}} - 2C_0} \right). \quad (18)$$

Para simplificar su resolución, se introducen los parámetros auxiliares a y b , definidos como:

$$a = \frac{1}{2D_{\text{Fe}_2\text{B}}}, \quad (19)$$

y

$$b = 2D_{\text{Fe}_2\text{B}} \left(\frac{C_{up}^{\text{Fe}_2\text{B}} - C_{low}^{\text{Fe}_2\text{B}}}{C_{up}^{\text{Fe}_2\text{B}} + C_{low}^{\text{Fe}_2\text{B}} - 2C_0} \right). \quad (20)$$

Al sustituir las Ecuaciones (19) y (20) en la Ecuación (18), se obtiene la ecuación diferencial:

$$u \left(\frac{du}{dt_u} \right) - au^2 \left(\frac{du}{dt_u} \right)^2 = b. \quad (21)$$

La solución general de la Ecuación (21) puede expresarse como:

$$u^2 = \frac{1 - \sqrt{1 - 4ab}}{a} t_u + C_1. \quad (22)$$

La constante de integración C_1 se determina considerando que, al comenzar el crecimiento efectivo de la capa, se cumple:

$$t_u = 0$$

y el espesor inicial de la capa es aproximadamente nulo:

$$u = u_0 \approx 0.$$

Al sustituir estas condiciones en la Ecuación (22), se obtiene:

$$0 = \left(\frac{1 - \sqrt{1 - 4ab}}{a} \right) (0) + C_1,$$

por lo tanto:

$$C_1 = 0.$$

Finalmente, al sustituir $t_u = t - t_0^{\text{Fe}_2\text{B}}$, se obtiene:

$$u^2 = \left(\frac{1 - \sqrt{1 - 4ab}}{a} \right) (t - t_0^{\text{Fe}_2\text{B}}). \quad (23)$$

De esta manera, el tiempo de incubación se resta una sola vez y la formulación es consistente con la definición del tiempo efectivo de crecimiento. Sustituyendo las definiciones de a y b , dadas por las Ecuaciones (19) y (20), la expresión anterior se transforma en:

$$u^2 = 2D_{\text{Fe}_2\text{B}} (t - t_0^{\text{Fe}_2\text{B}}) \left(1 - \sqrt{1 - 4 \left(\frac{C_{up}^{\text{Fe}_2\text{B}} - C_{low}^{\text{Fe}_2\text{B}}}{C_{up}^{\text{Fe}_2\text{B}} + C_{low}^{\text{Fe}_2\text{B}} - 2C_0} \right)} \right). \quad (24)$$

La Ecuación (24) puede expresarse en la forma de una ley de crecimiento parabólico:

$$u^2 = 4\varepsilon_{\text{Fe}_2\text{B}}^2 D_{\text{Fe}_2\text{B}} (t - t_0^{\text{Fe}_2\text{B}}), \quad (25)$$

donde $\varepsilon_{\text{Fe}_2\text{B}}^2$ es un parámetro adimensional asociado con el intervalo de concentración de boro en la fase Fe_2B , definido como:

$$\varepsilon_{Fe_2B}^2 = \frac{1 - \sqrt{1 - 4 \left(\frac{C_{up}^{Fe_2B} - C_{low}^{Fe_2B}}{C_{up}^{Fe_2B} + C_{low}^{Fe_2B} - 2C_0} \right)}}{2} = 9.6 \times 10^{-3}. \quad (26)$$

La Ecuación (26) demuestra que el cuadrado del espesor de la capa de Fe_2B es directamente proporcional al tiempo efectivo de crecimiento. Este comportamiento confirma que la evolución de la capa está controlada principalmente por la difusión del boro a través de la fase Fe_2B .

Detalles experimentales

Material y tratamiento de borurización

El material empleado para el proceso de borurización en polvo fue acero AISI 1518. La composición química del acero AISI 1518 (en porcentaje en peso) se presenta en la Tabla 1. Las muestras tuvieron forma cúbica con

dimensiones de 10 mm × 10 mm × 10 mm. Antes del tratamiento de borurización, las muestras fueron pulidas, limpiadas por ultrasonido en una solución de alcohol y agua desionizada durante 15 min a temperatura ambiente, y posteriormente secadas y almacenadas en condiciones de cuarto limpio. Después, las muestras se colocaron dentro de un recipiente cilíndrico cerrado, en contacto con una mezcla de polvos compuesta por 20 % de B_4C , 10 % de KBF_4 y 70 % de SiC . El proceso de borurización en polvo se llevó a cabo en un horno convencional bajo una atmósfera de argón puro, en el intervalo de temperaturas comprendido entre 1123 y 1223 K. Para cada temperatura se seleccionaron cuatro tiempos de tratamiento (2, 4, 6 y 8 h). Una vez finalizado el tratamiento de borurización, el recipiente fue retirado del horno y enfriado lentamente hasta temperatura ambiente.

Tabla 1. Composición química del acero AISI 1518 (porcentaje en peso). Fuente: Elaboración propia.

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.15–0.21	0.20–0.40	1.10–1.40	0.040	0.050	Balance

Técnicas experimentales

Las muestras boruradas y las muestras sin tratamiento fueron seccionadas transversalmente para la caracterización microestructural utilizando una máquina de corte de precisión LECO VC-50. Las secciones transversales de las capas de boruro obtenidas fueron observadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) utilizando un equipo JEOL JSM 6300 LV.

Para el estudio cinético, el espesor de la capa de boruro fue determinado automáticamente mediante el software MSQ PLUS. Con el fin de garantizar la reproducibilidad de las mediciones, se realizaron setenta mediciones en diferentes secciones de las muestras boruradas para estimar el espesor de la capa de Fe_2B , definido como el valor promedio de la longitud de los dientes de boruro (Kunst y Shaaber, 1967).

La fase formada sobre la superficie de las muestras boruradas fue identificada mediante difracción de rayos X (XRD) utilizando un difractómetro Equinox 2000, empleando radiación $CoK\alpha$ con una longitud de onda de $\lambda = 0.179$ nm.

Resultados y discusión

Observaciones por SEM y análisis EDS

La Figura 3 presenta las micrografías obtenidas por SEM de las secciones transversales de las capas de Fe_2B formadas sobre la superficie del acero AISI 1518 borurado a 1173 K para diferentes tiempos de tratamiento. Las capas de boruro obtenidas presentan una morfología compacta y densa, caracterizada por una interfaz aserrada en todas las condiciones de borurización. Esta morfología favorece una buena adherencia de la capa al sustrato (Medvedovski, 2016). El espesor de la capa de Fe_2B aumenta con el incremento del tiempo de tratamiento de borurización, debido a que la difusión de los átomos de boro hacia el sustrato es un fenómeno termoactivado. El espesor de la capa de Fe_2B varió desde 55.8 ± 10.5 μm para un tratamiento de 2 h hasta 149.3 ± 22.5 μm para 8 h, a una temperatura de 1173 K.

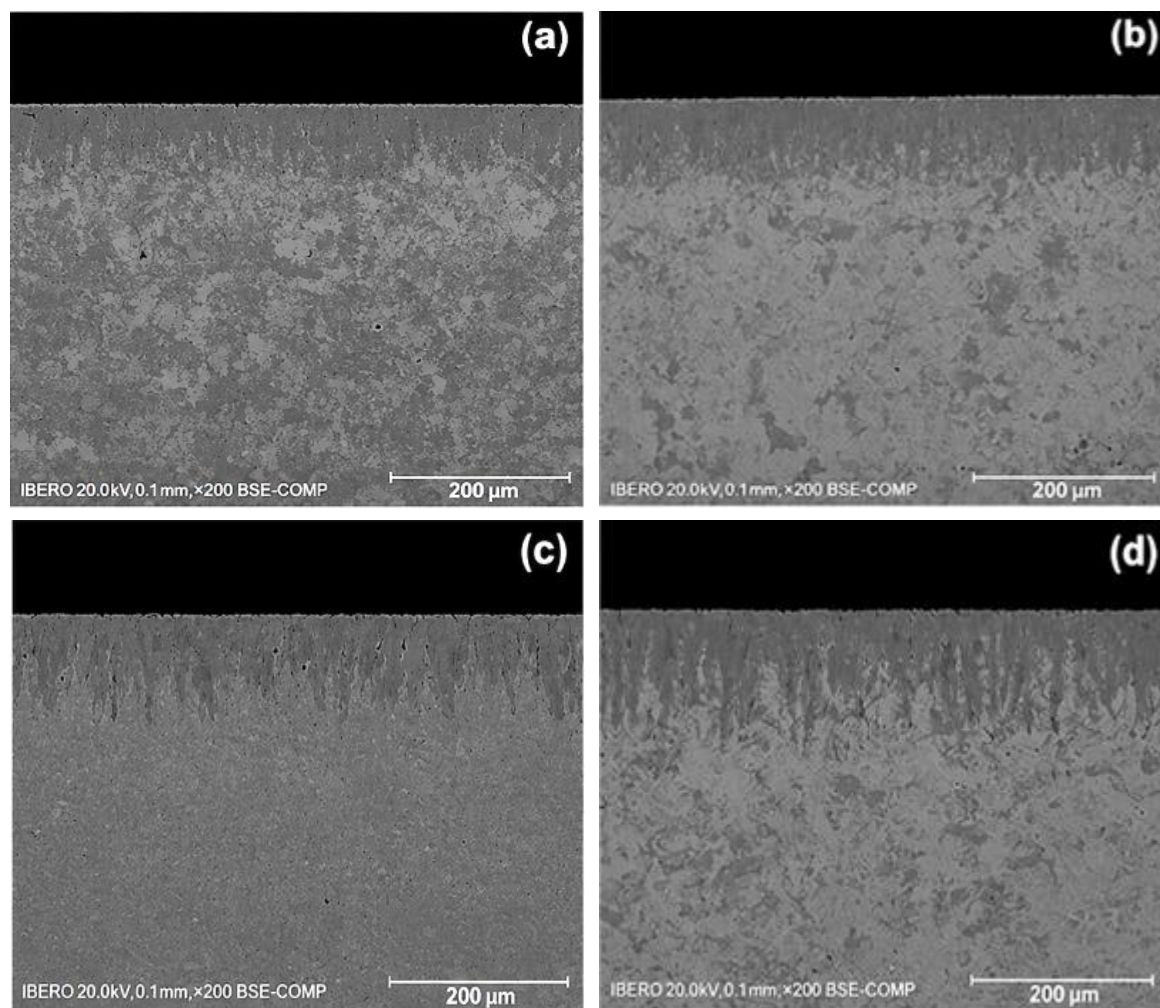


Figura 3. Micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de las secciones transversales del acero AISI 1518 borurado a 1173 K durante diferentes tiempos de tratamiento: (a) 2 h, (b) 4 h, (c) 6 h y (d) 8 h. Fuente: Elaboración propia.

El análisis mediante EDS se llevó a cabo tanto sobre la superficie de la muestra borurada como en la vecindad de la interfaz capa de boruro/sustrato, tal como se muestra en la Figura 4. La Figura 4(a) revela la presencia de hierro como elemento mayoritario, acompañado por boro en la superficie. La combinación de estos elementos da lugar a la formación de la fase Fe_2B , como consecuencia del proceso de nucleación y crecimiento de los cristales de

Fe_2B . La Figura 4(b) muestra el análisis EDS realizado en la proximidad de la interfaz Fe_2B /sustrato, donde se detectaron los elementos hierro, carbono, silicio y manganeso. El carbono y el silicio difunden hacia la zona de difusión del boro, formando compuestos sólidos tales como silicoboruros ($\text{FeSi}_{0.4}\text{B}_{0.6}$ y FeSiB) y borocementita ($\text{Fe}_3\text{B}_{0.67}\text{C}_{0.33}$) (Dukarevich et al., 1973).

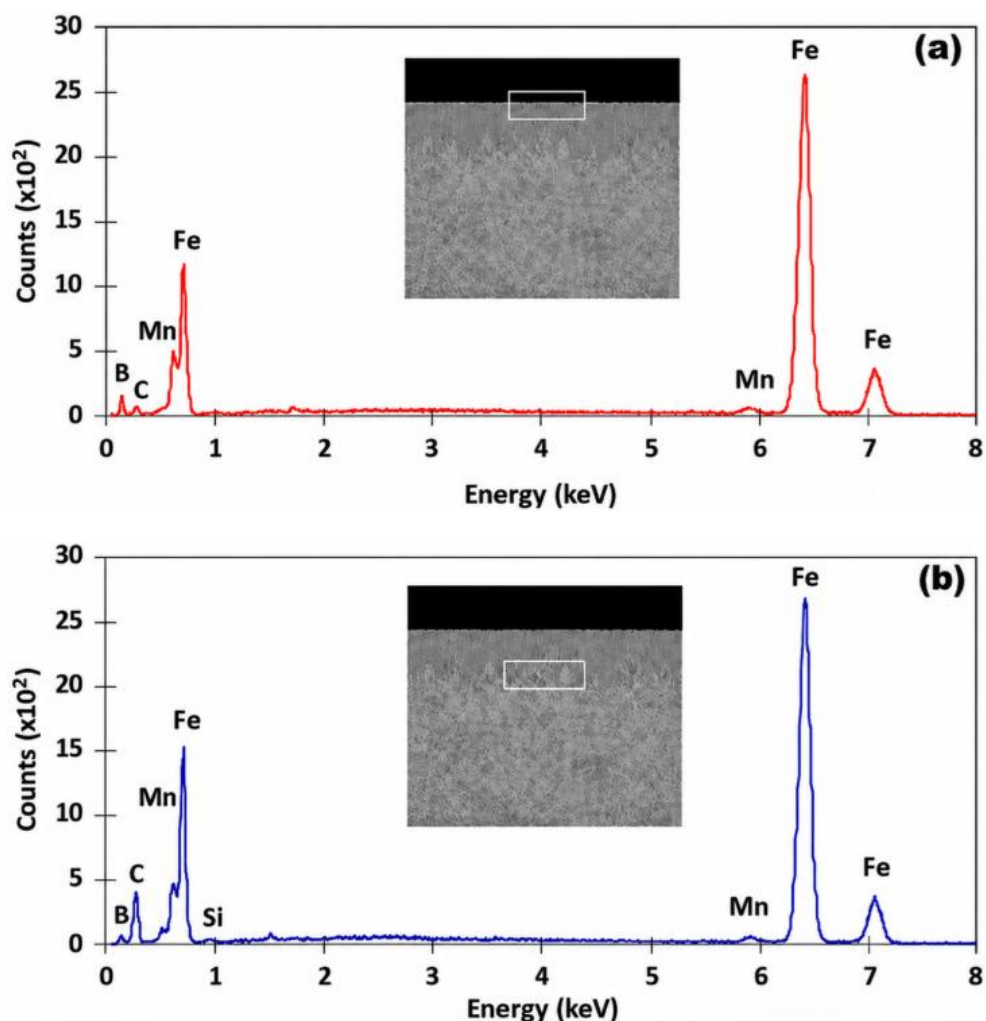


Figura 4. Espectros de EDS obtenidos sobre la micrografía SEM de la sección transversal del acero AISI 1518 borurado a 1173 K durante 8 h. (a) Espectro EDS obtenido en la superficie de la capa borurada. (b) Espectro EDS obtenido en la interfaz Fe_2B /sustrato. Fuente: Elaboración propia.

Análisis por difracción de rayos X

La Figura 5 presenta el patrón de difracción de rayos X (XRD) obtenido sobre la superficie del acero AISI 1518 borurado mediante el proceso de borurización en polvo a 1273 K durante 8 h. El patrón de difracción confirmó la formación de una capa monofásica de Fe_2B sobre la superficie del acero AISI 1518. Los picos de difracción presentan diferencias en su intensidad como consecuencia de las orientaciones cristalográficas preferenciales de los cristales de Fe_2B . Asimismo, el crecimiento de la capa de Fe_2B muestra un comportamiento altamente anisotrópico, de acuerdo con lo reportado en la literatura (Palombarini y Mozharov, 1987).

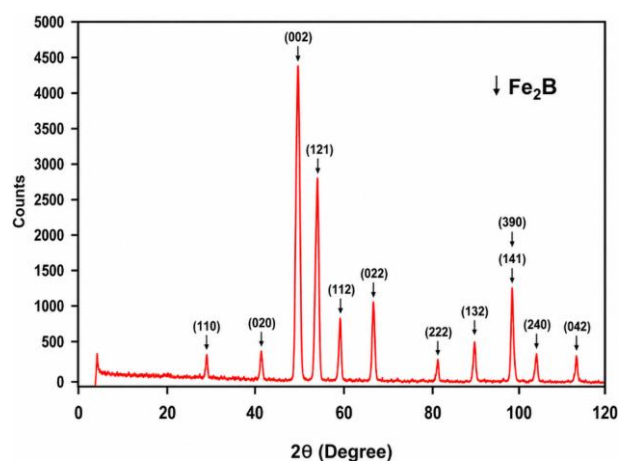


Figura 5. Patrón de difracción de rayos X (XRD) obtenido en la superficie del acero AISI 1518 borurado a 1273 K durante 8 h. Fuente: Elaboración propia.

Cinética de crecimiento de las capas de Fe₂B

El modelo de difusión requiere datos cinéticos para estimar los valores del coeficiente de difusión del boro en las capas de Fe₂B, dentro del intervalo de temperaturas de 1123–1273 K, utilizando la Ec. (25). La Figura 6 presenta la evolución del cuadrado del espesor de la capa de Fe₂B en función del tiempo de borurización para diferentes temperaturas de tratamiento.

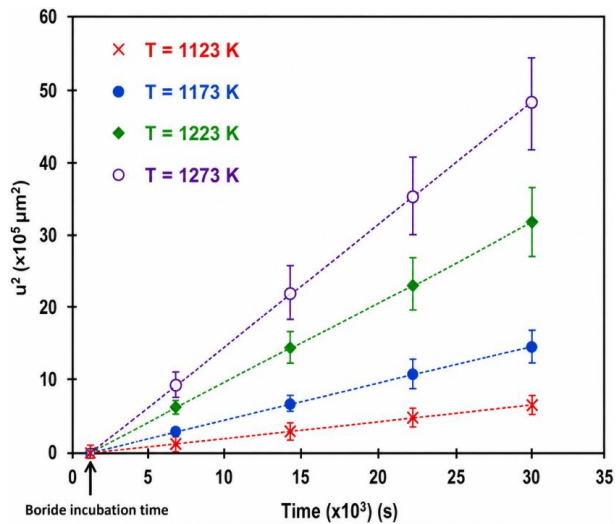


Figura 6. Evolución del cuadrado del espesor de la capa de Fe₂B en función del tiempo de borurización para diferentes temperaturas de tratamiento. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2 muestra los valores experimentales de las constantes de crecimiento parabólico en la interfaz Fe₂B/sustrato, junto con los correspondientes tiempos de incubación obtenidos a partir de la Figura 6.

Tabla 2. Valores experimentales de las constantes de crecimiento parabólico en la interfaz Fe₂B/sustrato, junto con los correspondientes tiempos de incubación de la capa de boruro. Fuente: Elaboración propia.

Temperatura (K)	Constante experimental de crecimiento parabólico, k ($\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-0.5}$)	Tiempo de incubación de la capa de boruro, $t_0^{Fe_2B}$ (T) (s)
1123	0.5000	2025
1173	0.7416	2025
1223	1.0909	2025
1273	1.3491	2025

Estos datos se determinaron representando el cuadrado del espesor de la capa de Fe₂B en función del tiempo, de acuerdo con la Ec. (26). Además, se observa que el tiempo de incubación es independiente de la temperatura de borurización. La Figura 7 muestra la dependencia del coeficiente de difusión del boro en la fase Fe₂B con la temperatura, de acuerdo con la relación de Arrhenius.

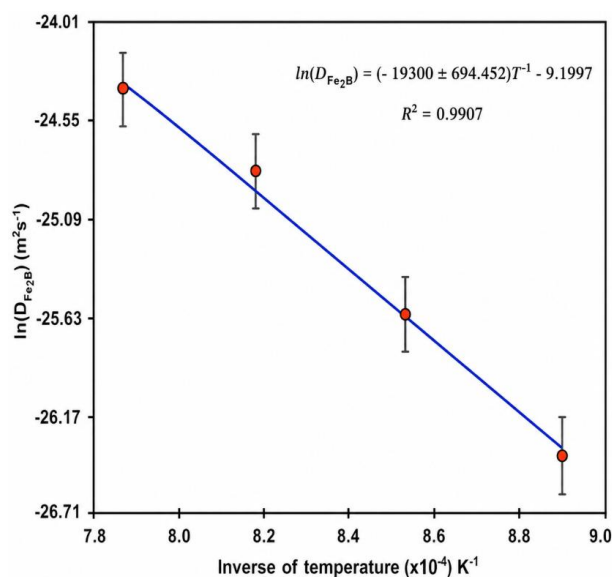


Figura 7. Dependencia del coeficiente de difusión del boro en la fase Fe_2B con la temperatura de borurización. Fuente: Elaboración propia.

La expresión del coeficiente de difusión del boro en la capa de Fe_2B puede obtenerse fácilmente mediante un ajuste lineal dentro del intervalo de temperaturas de 1123–1273 K:

$$D_{Fe_2B} = 1.07 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{(160.45 \pm 5.7) \text{ kJ/mol}}{RT}\right) \quad (27)$$

donde:

- $R = 8.314 \text{ J mol}^{-1} K^{-1}$ es la constante universal de los gases.
- T es la temperatura absoluta, expresada en kelvin (K).

La Tabla 3 compara el valor de la energía de activación para la difusión del boro en el acero AISI 1518 con los valores reportados en la literatura para distintos materiales borurados (hierro Armco y diversos aceros (Keddham et al., 2017; Campos et al., 2003; Kulka et al., 2013; Kartal et al., 2011; Taktak, 2006; Uslu et al., 2007; Altinsoy et al. 2013)). Se observa que los valores publicados de la energía de activación dependen de diversos factores, tales como:

- el intervalo de temperaturas considerado;
- el método de borurización empleado;
- la composición química del material tratado;
- el procedimiento de cálculo utilizado;
- el mecanismo de difusión del boro.

Tabla 3. Comparación de la energía de activación para la difusión del boro reportada para algunos materiales borurados. Fuente: Elaboración propia.

Material	Método de borurización	Energía de activación ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	Intervalo de temperatura (K)	Referencia
Hierro Armco	Gaseosa	87.857 (FeB); 117.508 (Fe_2B)	1073–1273	[26]
Hierro Armco	Pasta	151 (Fe_2B)	1223–1323	[12]
Acero AISI 1018	Electroquímica	172.75 ± 8.6 (FeB + Fe_2B)	1123–1273	[27]
Acero AISI 440C	Borurización por plasma en pasta	134.62 (FeB + Fe_2B)	973–1073	[7]
Acero AISI 304	Baño de sales	253.035 (FeB + Fe_2B)	1073–1223	[28]
Acero AISI P20	Borurización en polvo	200 (FeB + Fe_2B)	1073–1223	[29]
Acero AISI 1020	Borurización en polvo	164.356 (Fe_2B)	1073–1223	[30]
Acero AISI 1518	Borurización en polvo	160.45 ± 5.7 (Fe_2B)	1123–1273	Este trabajo

Las diferencias observadas en los valores de energía de activación indican que las etapas que controlan la velocidad del proceso de difusión son diferentes para la borurización en polvo y la borurización en pasta, así como para la borurización en fase gaseosa (Keddham et al.,

2017; Campos et al., 2003; Gómez-Vargas et al., 2017; Kulka et al., 2013). En el trabajo realizado por Alfintov et al. (2013), la energía de activación para la difusión del boro en el acero AISI 1020 fue considerablemente mayor que la obtenida en el presente estudio (160.45 ± 5.7

$\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) para el acero AISI 1518. Este valor de energía de activación representa la energía necesaria para el movimiento de los átomos de boro a través de la trayectoria de menor resistencia dentro de la red cristalina tetragonal centrada en el cuerpo de la fase Fe_2B , minimizando las tensiones generadas durante el crecimiento de la capa (Palombarini y Carbucicchio, 1987).

Respecto a la naturaleza de los recubrimientos de boruro, Palombarini y Carbucicchio (1984) reportaron que la morfología aserrada de la interfaz capa de boruro/sustrato en aceros de baja aleación puede explicarse mediante el crecimiento preferencial de las puntas de las agujas de boruro. En el presente trabajo, las observaciones mediante SEM revelaron que muchas de las agujas de boruro presentan una naturaleza dendrítica, tal como fue reportado por Nimhan y Hutchings (1986). La naturaleza columnar de esta interfaz es consecuencia del crecimiento lateral, similar al observado durante la solidificación de aleaciones metálicas y metales puros (Rodríguez-Castro et al., 2012).

Validación experimental del modelo de difusión

La validez del modelo de difusión fue verificada mediante la comparación entre el espesor experimental de la capa de Fe_2B , obtenido a 1253 K durante 2 h de tratamiento, y el espesor predicho por el modelo de difusión mediante la Ec. (28). La expresión utilizada para estimar el espesor de la capa de Fe_2B es:

$$u(t) = \sqrt{4\varepsilon_{\text{Fe}_2\text{B}}^2 D_{\text{Fe}_2\text{B}} (t - t_0^{\text{Fe}_2\text{B}})}. \quad (28)$$

Tabla 4. Comparación entre el espesor experimental de la capa de Fe_2B , obtenido a 1253 K durante 2 h, y el espesor predicho mediante el método integral, considerando un contenido superior de boro del 9 % en peso en la fase Fe_2B . Fuente: Elaboración propia.

Condiciones de borurización	Espesor experimental de la capa de Fe_2B (μm)	Espesor simulado de la capa de Fe_2B mediante la Ec. (18) (μm)
1253 K durante 2 h	102.6 ± 12.2	89.6

Desde un punto de vista práctico, y para este tipo de acero, el conocimiento de las variables que controlan el tratamiento de borurización resulta de gran importancia para seleccionar el espesor óptimo de la capa de Fe_2B ,

La Figura 8 presenta la micrografía SEM de la sección transversal de la muestra borurada a 1253 K durante 2 h.

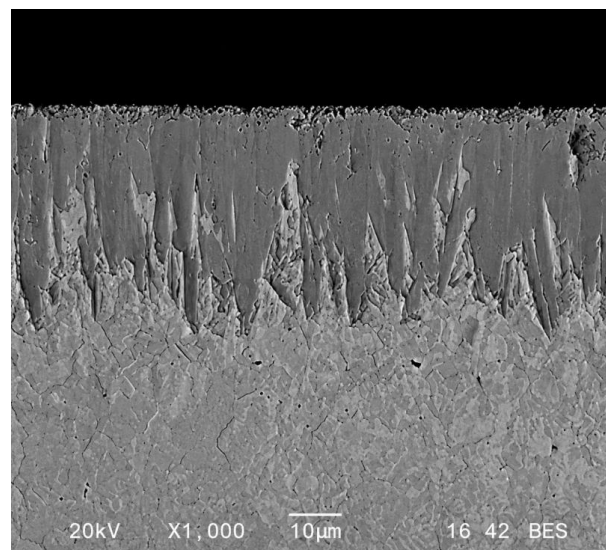


Figura 8. Micrografía obtenida mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de la capa de Fe_2B formada sobre el acero AISI 1518 borurado a 1253 K durante 2 h. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4 compara el espesor experimental de la capa de Fe_2B , obtenido bajo esta condición de tratamiento, con el valor predicho mediante la Ec. (28) para un contenido superior de boro en la fase Fe_2B igual al 9 % en peso. Los resultados muestran una excelente concordancia entre el espesor experimental y el espesor calculado por el modelo de difusión.

de acuerdo con los requerimientos de servicio de cada aplicación industrial.

Conclusiones

En el presente trabajo, el acero AISI 1518 fue sometido a un proceso de borurización en polvo utilizando una mezcla compuesta por 20 % de B₄C, 10 % de KBF₄ y 70 % de SiC, en un intervalo de temperaturas de 1123 a 1223 K y para tiempos de tratamiento comprendidos entre 2 y 8 h.

Se obtuvo una configuración monofásica de Fe₂B, la cual fue observada en todas las micrografías SEM, presentando una morfología aserrada característica. La naturaleza cristalina de esta capa de boruro fue confirmada mediante difracción de rayos X (XRD).

La cinética de crecimiento de las capas de Fe₂B siguió una ley de crecimiento parabólico. Se obtuvo una

solución particular de un sistema de ecuaciones diferenciales algebraicas (DAE) para estimar los coeficientes de difusión del boro en las capas de Fe₂B dentro del intervalo de temperaturas de 1123–1273 K.

Con base en los datos experimentales, la energía de activación para la difusión del boro en el acero AISI 1518 fue estimada en 160.45 ± 5.7 kJ·mol⁻¹. Este valor representa la energía necesaria para superar la barrera energética asociada con la difusión del boro a lo largo de la dirección cristalográfica preferencial [100].

Además, el modelo de difusión propuesto fue validado experimentalmente utilizando una muestra borurada a 1253 K durante 2 h. Se obtuvo una excelente concordancia entre el espesor experimental de la capa de Fe₂B y el valor predicho por el modelo matemático.

Lista de símbolos	
Símbolo	Descripción
$u(t)$	Espesor de la capa de Fe ₂ B (μm).
$a(t)$ y $b(t)$	Parámetros dependientes del tiempo.
k	Constante de crecimiento parabólico de la capa de Fe ₂ B (μm·s ^{-1/2}).
t	Tiempo de tratamiento (s).
$t_0^{Fe_2B}(T)$	Tiempo de incubación de la capa de boruro (s).
$C_{up}^{Fe_2B}$	Límite superior del contenido de boro en Fe ₂ B (= 9 % en peso).
$C_{low}^{Fe_2B}$	Límite inferior del contenido de boro en Fe ₂ B (= 8.83 % en peso).
C_{ads}^B	Concentración de boro adsorbido en la capa de boruro (% en peso).
C_0	Solubilidad del boro en la matriz (≈ 0 % en peso).
$C_{Fe_2B}[x, t]$	Perfil de concentración de boro en la capa de Fe ₂ B (% en peso).
D_{Fe_2B}	Coefficiente de difusión del boro en la fase Fe ₂ B (m ² ·s ⁻¹).

Referencias

Altinsoy, I., Celebi Efe, F. G., Ipek, M., Ozbek, I., Zeytin, S., & Bindal, C. (2013). Microstructure and mechanical properties of borided AISI 52100 steel. *AIP Conference Proceedings*, 1569, 43–46. <https://doi.org/10.1063/1.4849228>

Brakman, C. M., Gommers, A. W. J., & Mittemeijer, E. J. (1989). Boronizing of iron and steel: Phase identification and kinetics. *Journal*

of *Materials Research*, 4(6), 1354–1370. <https://doi.org/10.1557/JMR.1989.1354>

Campos, I., Islas, M., González, E., Ponce, P., & Ramírez, G. (2006). Growth kinetics of Fe₂B layers on AISI 1045 steel. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 2717–2723. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.05.016>

Campos, I., Islas, M., Ramírez, G., VillaVelázquez, C., & Mota, C. (2007). Growth kinetics of boride layers on Armco iron. *Applied Surface Science*, 253(14), 6226–6231. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.01.082>

- Campos, I., Oseguera, J., Figueroa, U., Garcia, J. A., Bautista, O., & Kelemenis, G. (2003). Kinetic study of boron diffusion in Fe₂B layers on low carbon steel. *Materials Science and Engineering: A*, 352(1–2), 261–265. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00910-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00910-3)
- Dukarevich, I. S., Mozharov, M. V., & Shigarev, A. S. (1973). Structure and properties of boride coatings on steel. *Metal Science and Heat Treatment*, 15(2), 160–162. <https://doi.org/10.1007/BF00679753>
- Gómez-Vargas, O. A., Keddad, M., & Ortiz-Domínguez, M. (2017). Simulation of the growth kinetics of Fe₂B layers on AISI 1018 steel. *High Temperature Materials and Processes*, 36(2), 197–208. <https://doi.org/10.1515/htmp-2015-0158>
- Goodman, T. R. (1964). Application of integral methods to transient nonlinear heat transfer. En T. F. Irvine Jr. & J. P. Hartnett (Eds.), *Advances in Heat Transfer* (Vol. 1, pp. 51–122). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70092-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70092-2)
- Gunes, I., & Ozcatal, M. (2015). Investigation of the boriding kinetics of AISI 5160 steel. *Materiali in Tehnologije / Materials and Technology*, 49(5), 759–763.
- Kartal, G., Eryilmaz, O., Krumdick, G., Erdemir, A., & Timur, S. (2011). Fast boriding of iron and steels by electrochemical means. *Applied Surface Science*, 257(15), 6928–6934. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.03.035>
- Keddad, M., Chegroune, R., Kulka, M., Panfil, D., Ulker, S., & Taktak, S. (2017). A kinetic model for estimating the Fe₂B layer thickness on AISI 1010 steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70(5), 1377–1385. <https://doi.org/10.1007/s12666-016-0933-2>
- Keddad, M., Elias-Espinosa, M., Ortiz-Domínguez, M., Simón-Marmolejo, I., & Zuno-Silva, J. (2017). Characterisation and growth kinetics of Fe₂B layers on AISI 8620 steel. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 11(6), 563–585. <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2017.089408>
- Keddad, M., Ortiz-Dominguez, M., Elias-Espinosa, M., Arenas-Flores, A., Zuno-Silva, J., Zamarripa-Zepeda, D., & Gomez-Vargas, O. A. (2018). Growth kinetics of Fe₂B layers on AISI 1020 steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 49(5), 1895–1907. <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4545-0>
- Krukovich, M. G., Prusakov, B. A., & Sizov, I. G. (2016). Plasticity of boronized layers. En *The components and phases of systems 'boron-iron' and 'boron-carbon-iron'* (Springer Series in Materials Science, Vol. 237, pp. 13–21). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30113-6_2
- Kulka, M., Makuch, N., Pertek, A., & Maldzinski, L. (2013). Microstructure and properties of boride layers formed on steel. *Journal of Solid State Chemistry*, 199, 196–203. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2012.12.029>
- Kunst, H., & Schaaber, O. (1967). Beobachtungen beim Borieren von Stahl. *Härterei-Technische Mitteilungen*, 22, 275–292.
- Mebarek, B., Benguelloula, A., & Zanoun, A. (2017). Effect of boride incubation time during the formation of Fe₂B phase. *Materials Research*, 20(6). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR2017-0647>
- Medvedovski, E. (2016). Advanced boride-based coatings for industrial applications. *Advanced Engineering Materials*, 18(1), 11–33. <https://doi.org/10.1002/adem.201500185>
- Mitrokhovich, N. N., Fetisov, V. P., & Lipchin, N. N. (1982). Structure and properties of borided carbon steel. *Metal Science and Heat Treatment*, 24(6), 415–417. <https://doi.org/10.1007/BF00713702>
- Nam, K. S., Lee, K. H., Lee, S. R., & Kwon, S. C. (1998). Characterization of boride layers formed on steel. *Surface and Coatings Technology*, 98(1–3), 886–890. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00216-8](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00216-8)
- Ninham, A. J., & Hutchings, I. M. (1986). Erratum: Assessment of the erosion resistance of borided steel. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 4(6), 2827–2831. <https://doi.org/10.1116/1.573685>
- Okamoto, H. (2004). B-Fe (boron-iron) system. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 25(3), 297–298. <https://doi.org/10.1007/s11669-004-0128-3>
- Palombarini, G., & Carbuicchio, M. (1984). Phase composition of boride layers grown on iron. *Journal of Materials Science Letters*, 3(9), 791–794. <https://doi.org/10.1007/BF00721245>
- Palombarini, G., & Carbuicchio, M. (1987). Growth of boride layers on iron and ferrous alloys. *Journal of Materials Science Letters*, 6(4), 415–416. <https://doi.org/10.1007/BF01756781>
- Ramdan, R. D., Takaki, T., & Tomita, Y. (2008). Phase-field simulation of Fe₂B phase growth kinetics. *Materials Transactions*, 49(11), 2625–2631. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2008169>
- Rodríguez-Castro, G., Campos-Silva, I., Martínez-Trinidad, J., Figueroa-López, U., Arzate-Vázquez, I., Hernández-Sánchez, E., & Hernández-Sánchez, J. (2012). Mechanical properties of Fe₂B layers on AISI 1045 steel. *Kovove Materialy*, 50(5), 357–364.
- Simonenko, A. N., Shestakov, V. A., & Poboinya, V. N. (1982). Kinetic aspects of boride layer growth on steels. *Metal Science and Heat Treatment*, 24(5), 360–361. <https://doi.org/10.1007/BF00702812>
- Sinha, A. K. (1991). Boriding (Boronizing) of steels. *Journal of Heat Treating*, 4(4), 437–447.
- Smol'nikov, E. A., & Sarmanova, L. M. (1982). Properties of borided steels used for tool manufacturing. *Metal Science and Heat Treatment*, 24(11), 785–788. <https://doi.org/10.1007/BF00699450>
- Taktak, S. (2006). A study on the friction and wear behaviour of borided AISI 4140 steel. *Journal of Materials Science*, 41(22), 7590–7596. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0848-1>
- Uslu, I., Comert, H., Ipek, M., Ozdemir, O., & Bindal, C. (2007). Evaluation of tribological properties of borided AISI 4140 steel. *Materials & Design*, 28(1), 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.06.004>
- VillaVelázquez-Mendoza, C. I., Rodríguez-Mendoza, J. L., Ibarra-Galván, V., Hodgkins, R. P., López-Valdivieso, A., Serrato-Palacios, L. L., Leal-Cruz, A. L., & Ibarra-Junquera, V. (2014). Kinetic study of boron diffusion on AISI 1045 steel. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 8(1), 71–91. <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2014.059292>
- Yu, L. G., Chen, X. J., Khor, K. A., & Sundararajan, G. (2005). Fe₂B phase growth kinetics in borided iron. *Acta Materialia*, 53(8), 2361–2368. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.01.043>