

Historia y evolución de la borurización: más de dos siglos de desarrollo científico y tecnológico

History and evolution of boronization: More than two centuries of scientific and technological development

Martín Ortiz Domínguez ^a

Abstract:

Boriding is one of the most effective thermochemical surface-hardening treatments used in modern engineering to improve wear, erosion, corrosion, and fatigue resistance of metallic components. Although boriding is currently considered a mature technology within surface engineering, its development is the result of more than two centuries of scientific advances related to boron chemistry, physical metallurgy, and solid-state diffusion. This paper reviews the historical evolution of boriding from the discovery of boron in 1808 to recent developments involving numerical simulation, artificial intelligence, and multiscale modeling. Major historical milestones are analyzed, including the study of iron-boron equilibrium diagrams, the identification of FeB and Fe₂B phases, the development of the first industrial boriding processes, and the emergence of mathematical models for predicting boride layer growth. Furthermore, the contributions of key researchers who significantly advanced this technology are discussed, together with current trends focused on process optimization, additive manufacturing, and industrial digitalization. The review demonstrates that boriding remains one of the most active research fields in surface engineering due to its outstanding mechanical properties and broad scientific opportunities.

Keywords:

Boriding, surface engineering, boron diffusion, thermochemical treatments, metallurgy history, Fe₂B

Resumen:

La borurización es uno de los tratamientos termoquímicos de endurecimiento superficial más eficaces utilizados en la ingeniería moderna para incrementar la resistencia al desgaste, la erosión, la corrosión y la fatiga de componentes metálicos. Aunque actualmente constituye una tecnología madura dentro de la ingeniería de superficies, su desarrollo ha sido el resultado de más de dos siglos de avances científicos relacionados con la química del boro, la metalurgia física y la difusión en estado sólido. El presente trabajo revisa la evolución histórica de la borurización desde el descubrimiento del elemento boro en 1808 hasta los desarrollos más recientes basados en simulación numérica, inteligencia artificial y modelado multiescala. Se analizan los principales hitos históricos, incluyendo el estudio de los diagramas de equilibrio hierro-boro, la identificación de las fases FeB y Fe₂B, el desarrollo de los primeros procesos industriales de difusión de boro y la aparición de modelos matemáticos para predecir el crecimiento de capas boruradas. Asimismo, se discuten las contribuciones de investigadores que han impulsado significativamente el avance de esta tecnología y se presentan las tendencias actuales orientadas hacia la optimización de procesos, manufactura aditiva y digitalización industrial. La revisión demuestra que la borurización continúa siendo una de las áreas más activas dentro de la ingeniería de superficies debido a la combinación de excelentes propiedades mecánicas y amplias posibilidades de investigación científica.

Palabras Clave:

Borurización, ingeniería de superficies, difusión de boro, tratamientos termoquímicos, historia de la metalurgia, Fe₂B

Introducción

La modificación de las propiedades superficiales de los materiales ha sido una de las principales estrategias para

incrementar el desempeño y la vida útil de los componentes mecánicos sometidos a condiciones severas de servicio. A lo largo de la historia, el desarrollo de la ingeniería de superficies ha permitido diseñar

^a 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

tratamientos capaces de mejorar la resistencia al desgaste, la corrosión, la fatiga y la oxidación, preservando simultáneamente las propiedades mecánicas del núcleo del material. Esta filosofía ha impulsado el desarrollo de numerosos procesos termoquímicos que actualmente constituyen una parte esencial de la manufactura avanzada y de la ingeniería de materiales (Gay-Lussac y Thénard, 1811).

Entre los tratamientos de difusión más ampliamente utilizados se encuentran la carburización, la nitruración, la nitrocarburización, la cromización, la aluminización y la borurización. Dentro de este grupo, la borurización ha adquirido una relevancia especial debido a la extraordinaria combinación de dureza, estabilidad química y resistencia al desgaste que presentan las capas de boruros metálicos formadas sobre la superficie de los materiales. Estas capas pueden alcanzar durezas superiores a 1800–2200 HV y conservar un excelente comportamiento frente al desgaste abrasivo, adhesivo y erosivo, incluso en ambientes altamente agresivos (Davy, 1808).

El proceso de borurización consiste en introducir átomos de boro mediante difusión en estado sólido hacia el interior del sustrato metálico a temperaturas comprendidas generalmente entre 800 y 1050 °C. Como resultado del tratamiento se forman compuestos intermetálicos de elevada estabilidad termodinámica. En los aceros, las fases predominantes corresponden a FeB y Fe₂B, cuya presencia, espesor y morfología dependen de diversos factores, entre ellos la temperatura de tratamiento, el tiempo de exposición, el potencial químico del medio borurante y la composición química del acero, especialmente el contenido de elementos aleantes como Cr, Mo, V, Ni y Si (Okamoto, 2004). Como consecuencia de estas propiedades, la borurización se ha consolidado como una tecnología ampliamente utilizada en sectores industriales donde los componentes operan bajo condiciones extremas de fricción, impacto, corrosión y elevadas temperaturas. Herramientas de corte, moldes para conformado, engranes, válvulas, componentes automotrices, equipos petroquímicos y elementos destinados a la generación de energía constituyen algunos ejemplos de aplicaciones en las que este tratamiento ha demostrado mejoras significativas en el desempeño y la durabilidad de los materiales.

El desarrollo alcanzado por la borurización es el resultado de más de dos siglos de investigación científica. Sus fundamentos se remontan al descubrimiento del boro a principios del siglo XIX y al posterior avance de disciplinas como la metalurgia física, la termodinámica, la difusión en estado sólido y la ciencia de materiales. Estos avances

permitieron comprender los mecanismos de formación de los boruros, establecer los principios que gobiernan su crecimiento y consolidar la borurización como uno de los tratamientos termoquímicos más importantes dentro de la ingeniería moderna de superficies (Massalski, 1990). En este contexto, el presente artículo tiene como propósito presentar una revisión histórica de la evolución de la borurización, destacando los principales acontecimientos científicos, tecnológicos e industriales que han contribuido a su desarrollo, desde el descubrimiento del boro hasta las actuales técnicas de simulación, modelado matemático, caracterización avanzada e inteligencia artificial aplicadas a la ingeniería de superficies (Massalski, 1990).

Descubrimiento del boro y los primeros antecedentes de la borurización

La historia de la borurización tiene sus raíces en el descubrimiento del elemento boro a principios del siglo XIX. En 1808, los químicos franceses Joseph Louis Gay-Lussac y Louis Jacques Thénard lograron aislar parcialmente este elemento mediante la reducción química del ácido bórico con potasio metálico, marcando el inicio de las investigaciones científicas sobre este metaloide (Lakhtin y Kogan, 1976). De manera independiente, ese mismo año, el científico británico Humphry Davy obtuvo resultados similares utilizando técnicas electroquímicas basadas en electrólisis, contribuyendo significativamente al conocimiento de las propiedades químicas del boro y ampliando las posibilidades para su estudio (Matuschka, 1980).

La Figura 1 presenta una recreación de un laboratorio químico característico de principios del siglo XIX, representando el entorno científico en el que se desarrollaron los experimentos que condujeron al descubrimiento del boro. Estos trabajos marcaron el inicio del estudio sistemático de los compuestos de boro y sentaron las bases para el posterior desarrollo de la borurización como tratamiento termoquímico aplicado a materiales metálicos.



Figura 1. Recreación de un laboratorio químico de principios del siglo XIX, época en la que se realizaron los primeros experimentos que condujeron al descubrimiento del boro en 1808, acontecimiento fundamental para el desarrollo posterior de la borurización y la ingeniería moderna de superficies. Fuente: Elaboración propia.

Durante la segunda mitad del siglo XIX, el progreso en la obtención de boro de mayor pureza fue impulsado por el químico francés Henri Moissan, quien, mediante el empleo del horno eléctrico desarrollado por él mismo, logró sintetizar diversos boruros metálicos y estudiar sus propiedades físicas y químicas. Sus investigaciones demostraron la extraordinaria dureza y estabilidad de estos compuestos, estableciendo las primeras bases metalúrgicas para comprender la interacción entre el boro y los metales, aspecto que posteriormente sería fundamental para el desarrollo de los procesos industriales de borurización (Moissan, 1895).

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX comenzaron a publicarse los primeros estudios sobre la formación de boruros en hierro, níquel, cobalto y otros metales de interés tecnológico. Aunque en aquella época aún no existía el concepto moderno de tratamiento termoquímico por difusión, estas investigaciones demostraron que el boro reaccionaba con diversos metales para formar compuestos intermetálicos de elevada dureza y estabilidad química. Estos hallazgos constituyeron los antecedentes científicos directos de la borurización moderna y abrieron el camino para el estudio sistemático de los sistemas metal-boro durante las primeras décadas del siglo XX.

Desarrollo de los diagramas de equilibrio Fe-B y comprensión de los boruros (1900–1940)

Durante las primeras décadas del siglo XX, el avance de la metalurgia física permitió estudiar de manera sistemática la interacción entre el hierro y el boro. En este contexto, el sistema hierro-boro (Fe-B) despertó un creciente interés debido a la extraordinaria dureza observada en los compuestos intermetálicos formados durante tratamientos térmicos experimentales (Moissan, 1895). Los primeros estudios de equilibrio de fases permitieron establecer la existencia de dos compuestos principales dentro del sistema: el monoboruro de hierro (FeB) y el diboruro de hierro (Fe₂B), los cuales constituyen las fases características de las capas formadas durante la borurización (ver Figura 2 y 3).

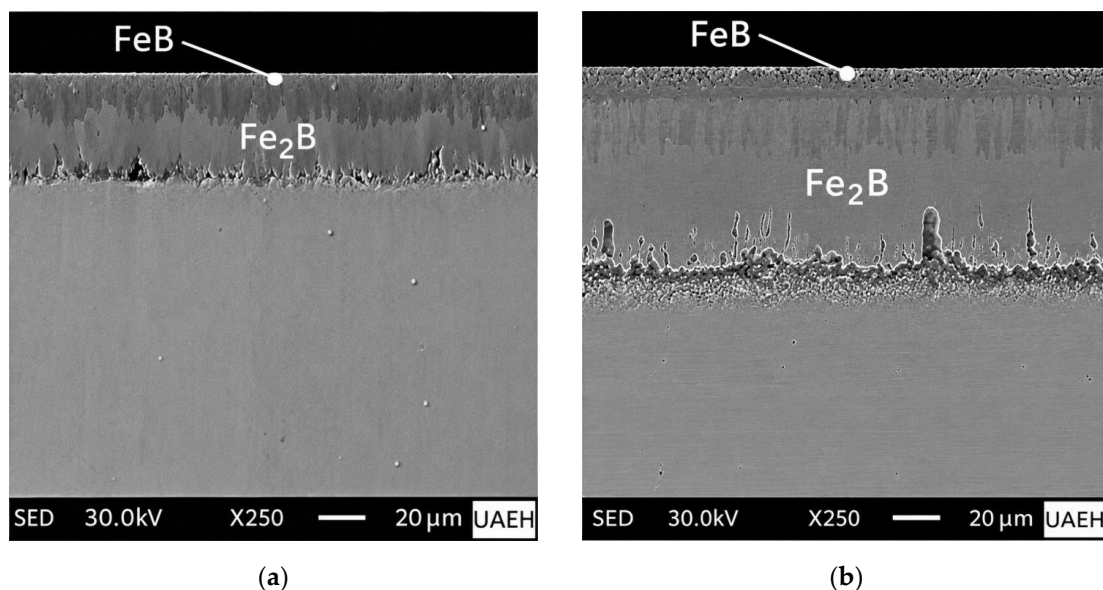


Figura 2. Microfotografías obtenidas mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) de secciones transversales de acero inoxidable AISI 420 expuestas a 1273 K durante distintos periodos de tiempo: (a) 4 h y (d) 8 h. Fuente: Elaboración propia.

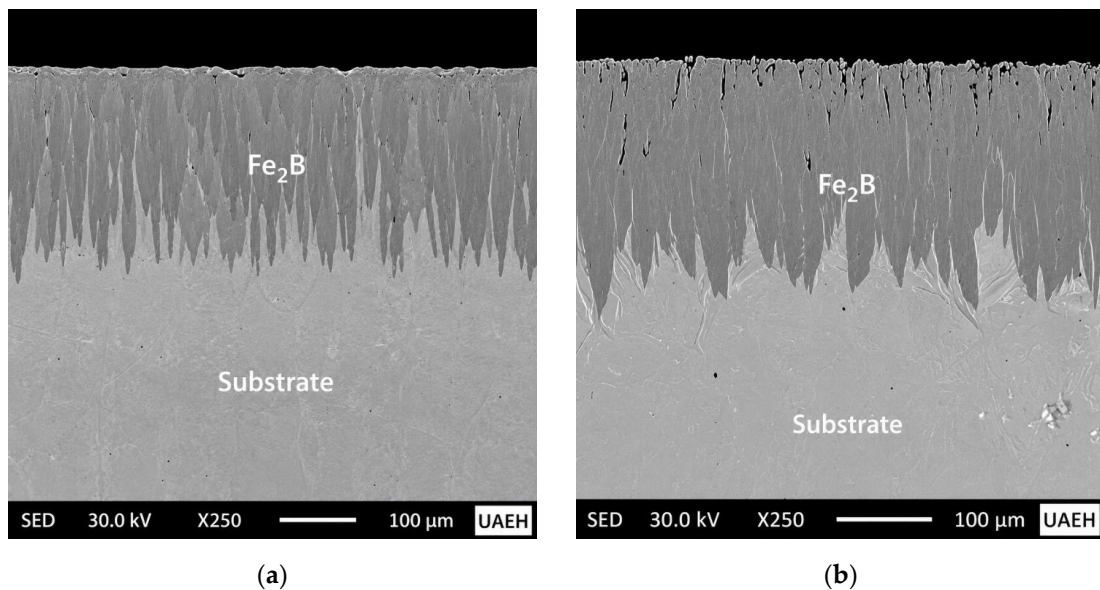


Figura 3. Microfotografías obtenidas mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) muestran las secciones transversales de los recubrimientos borados formados en la superficie del acero 35NiCrMo₄. El acero se trató a una temperatura elevada de 1273 K durante distintos tiempos de exposición: (a) 6 h y (b) 8 h. Fuente: Elaboración propia.

La fase FeB, cuya estructura cristalina es ortorrómbica, presenta el mayor contenido de boro y una dureza extremadamente elevada; sin embargo, su menor tenacidad y mayor fragilidad limitan su aplicación en

componentes sometidos a cargas dinámicas o esfuerzos de impacto. La estructura cristalina correspondiente a esta fase se muestra en la Figura 4.

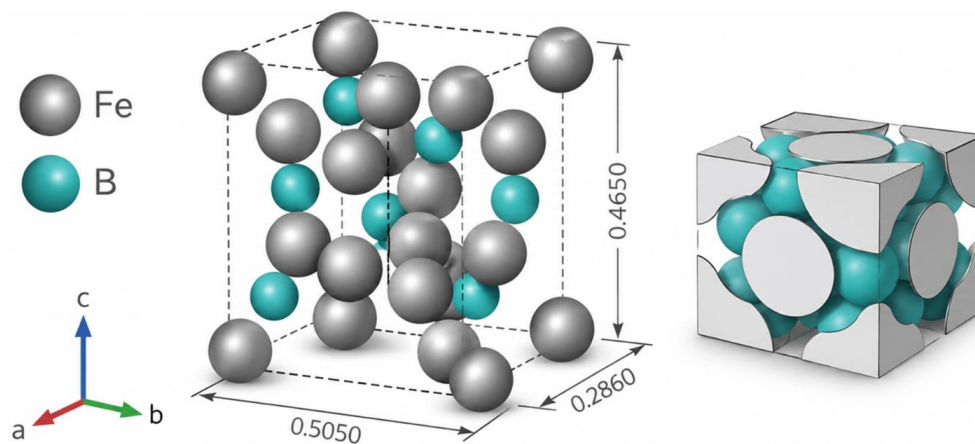


Figura 4. Estructura cristalina ortorrómbica del monoboruro de hierro (FeB). Los átomos de hierro (Fe) se representan en color gris, mientras que los átomos de boro (B) se muestran en color azul turquesa. La figura ilustra la celda unitaria ortorrómbica junto con una representación tridimensional del empaquetamiento atómico, destacando la distribución espacial de ambos elementos dentro de la red cristalina. Esta fase se caracteriza por su elevado contenido de boro, alta dureza y mayor fragilidad en comparación con la fase Fe₂B. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, en la Figura 5, se presenta la fase Fe₂B cristaliza en una estructura tetragonal centrada en el cuerpo (Body-Centered Tetragonal, BCT), proporcionando un mejor equilibrio entre dureza, tenacidad y estabilidad mecánica. Debido a estas

características, constituye la fase de mayor interés en los tratamientos industriales de borurización, ya que permite obtener capas compactas, adherentes y con excelente resistencia al desgaste.

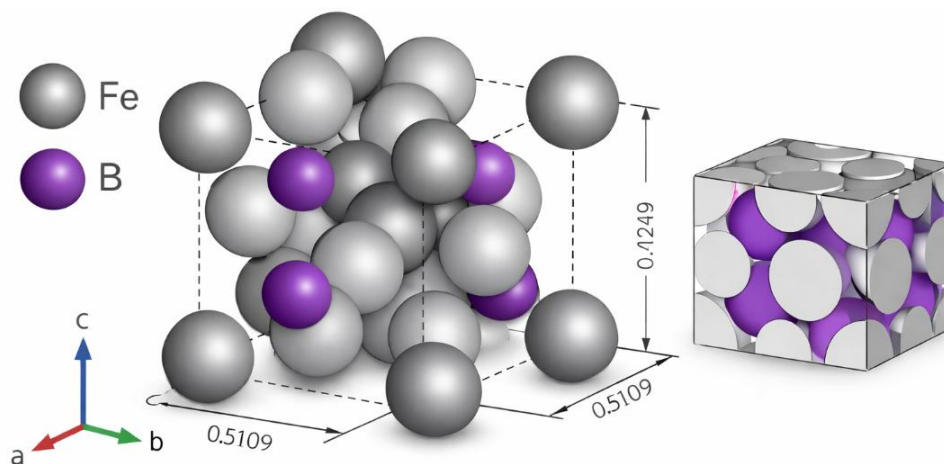


Figura 5. Estructura cristalina tetragonal centrada en el cuerpo (Body-Centered Tetragonal, BCT) de la fase diboruro de hierro (Fe_2B). Los átomos de hierro (Fe) se representan en color gris, mientras que los átomos de boro (B) se muestran en color púrpura. La figura presenta la celda unitaria de la estructura cristalina junto con una representación tridimensional del empaquetamiento atómico, ilustrando la distribución espacial de ambos elementos dentro de la red cristalina. La fase Fe_2B se caracteriza por su elevada dureza, buena estabilidad termodinámica y mayor tenacidad relativa en comparación con la fase FeB , razón por la cual constituye el principal objetivo en la mayoría de los tratamientos industriales de borurización. Fuente: Elaboración propia.

Las investigaciones desarrolladas durante este periodo demostraron que ambas fases poseen valores de dureza considerablemente superiores a los obtenidos mediante tratamientos térmicos convencionales, como el temple y el revenido, evidenciando el enorme potencial del boro como elemento endurecedor y motivando el desarrollo de estudios orientados a comprender los mecanismos de formación y crecimiento de las capas boruradas (Fick, 1855). Paralelamente, la construcción progresiva del diagrama de equilibrio hierro-boro (Fe-B) permitió establecer las regiones de estabilidad termodinámica de

las distintas fases presentes en el sistema, constituyendo uno de los avances científicos más importantes para la comprensión de la borurización. La Figura 6 muestra el diagrama de fases Fe-B, donde se representan las regiones de equilibrio en función de la temperatura y de la concentración de boro. En la zona rica en hierro se distinguen las fases alotrópicas $\alpha\text{-Fe}$, $\gamma\text{-Fe}$ y $\delta\text{-Fe}$, así como las regiones bifásicas donde coexisten con los compuestos intermetálicos Fe_2B y FeB .

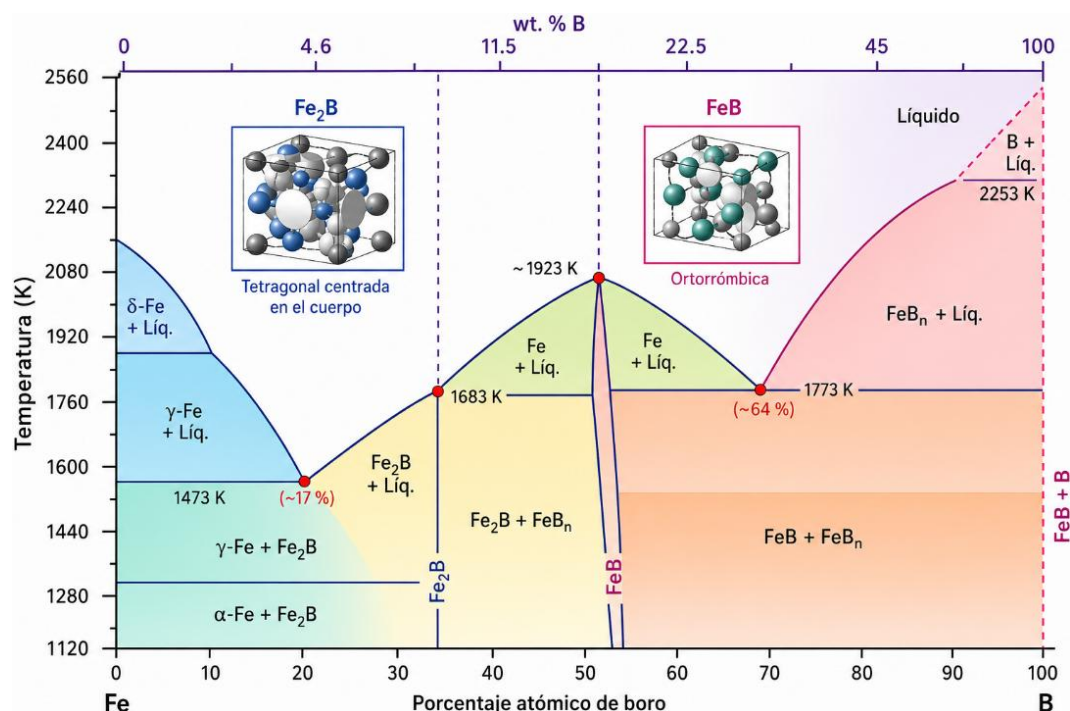


Figura 6. Diagrama de equilibrio del sistema hierro-boro (Fe-B), que muestra las regiones de estabilidad de las diferentes fases en función de la temperatura y del porcentaje atómico de boro. Se identifican las fases alotrópicas del hierro (α -Fe, γ -Fe y δ -Fe), los compuestos intermetálicos Fe_2B (estructura tetragonal centrada en el cuerpo) y FeB (estructura ortorrómica), así como las principales regiones bifásicas y de coexistencia con la fase líquida. Este diagrama constituye una herramienta fundamental para comprender la formación de las capas boruradas, las transformaciones de fase y el diseño de tratamientos de borurización orientados a la obtención de recubrimientos con propiedades mecánicas optimizadas. Fuente: Elaboración propia.

Desde el punto de vista de la ingeniería de superficies, este diagrama constituye una herramienta fundamental para comprender las condiciones bajo las cuales se favorece la formación de capas monofásicas de Fe_2B o sistemas bifásicos $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$. En tratamientos realizados con un potencial moderado de boro se promueve el crecimiento preferencial de la fase Fe_2B , mientras que un potencial químico elevado favorece la formación de una capa superficial de FeB sobre el Fe_2B previamente desarrollado. Debido a la mayor fragilidad de la fase FeB , la mayoría de las investigaciones actuales se orientan a optimizar las condiciones del tratamiento para obtener recubrimientos monofásicos de Fe_2B con un comportamiento mecánico más favorable (Crank, 1975).

El conocimiento de las transformaciones de fase, los límites de solubilidad y las temperaturas invariantes descritos por el diagrama Fe-B constituye la base para el diseño de tratamientos de borurización, el análisis de la cinética de crecimiento de las capas y el desarrollo de los modelos matemáticos de difusión empleados actualmente en la ingeniería moderna de superficies.

Nacimiento de la borurización industrial (1940–1960)

El desarrollo de la borurización como tratamiento termoquímico con aplicaciones industriales comenzó a consolidarse entre las décadas de 1940 y 1960, periodo durante el cual numerosos grupos de investigación en Europa y Norteamérica dirigieron sus esfuerzos hacia el mejoramiento superficial de herramientas, matrices y componentes mecánicos sometidos a condiciones severas de desgaste, fricción y corrosión (Kulka, 2019). La creciente demanda de materiales con mayor vida útil, impulsada inicialmente por las necesidades tecnológicas derivadas de la Segunda Guerra Mundial y posteriormente por el acelerado desarrollo industrial de la posguerra, favoreció la búsqueda de nuevos tratamientos de endurecimiento superficial capaces de superar las limitaciones de los procesos convencionales.

Durante este periodo se desarrollaron los primeros métodos prácticos de borurización por difusión en estado sólido, los cuales consistían en introducir las piezas metálicas dentro de recipientes herméticamente sellados que contenían mezclas pulverulentas ricas en boro. Estas

mezclas estaban constituidas principalmente por carburo de boro (B_4C) como fuente del elemento difusor, bórax como agente fundente, activadores químicos destinados a incrementar el potencial de boro y materiales inertes, generalmente carburo de silicio (SiC), utilizados para controlar la actividad química del medio borurante y favorecer una distribución homogénea del calor durante el tratamiento (Morgado et al., 2022).

Las piezas eran calentadas normalmente entre 800 y 1000 °C durante varias horas, condiciones bajo las cuales los átomos de boro difundían hacia el interior del acero formando capas continuas de boruros de hierro con una característica morfología dentada o aserrada. La elevada adherencia de estas capas al sustrato, junto con su estabilidad química y su sobresaliente resistencia al desgaste, despertó un creciente interés tanto en la comunidad científica como en el sector industrial. Los resultados obtenidos representaron un avance significativo respecto a los tratamientos termoquímicos disponibles en aquella época. Mientras que la carburización permitía alcanzar durezas del orden de 700 HV y la nitruración producía superficies cercanas a 1100 HV, las capas boruradas desarrolladas mediante difusión podían superar fácilmente los 1800 HV, e incluso aproximarse a 2000 HV, proporcionando además una resistencia al desgaste considerablemente superior (Kulka y Makuch, 2018).

Estas ventajas impulsaron la incorporación de la borurización en herramientas de corte, matrices para

conformado, engranes, componentes de bombas, válvulas y diversos elementos utilizados en la industria metalmeccánica. El éxito alcanzado en estas primeras aplicaciones industriales favoreció el registro de las primeras patentes relacionadas con la difusión de boro en materiales ferrosos, sentando las bases para el desarrollo de procesos cada vez más controlados y reproducibles que, con el paso del tiempo, darían origen a las técnicas modernas de borurización empleadas en la actualidad.

La Figura 7 presenta una representación esquemática del procedimiento experimental utilizado en los laboratorios metalúrgicos durante la consolidación de la borurización como tratamiento industrial. El proceso inicia con el corte y la preparación de las probetas, seguido de las operaciones de lijado y acondicionamiento superficial necesarias para garantizar una adecuada calidad metalográfica. Posteriormente, las muestras son sometidas al tratamiento termoquímico, donde ocurre la difusión de átomos de boro hacia el interior del material. Una vez concluido el tratamiento, las probetas son montadas en resina y pulidas hasta obtener una superficie libre de deformaciones, adecuada para su caracterización microestructural. Finalmente, mediante técnicas de microscopía óptica se evalúan el espesor, la continuidad y la morfología de las capas formadas. La micrografía incluida muestra una capa borurada con la característica interfaz dentada asociada al crecimiento de la fase Fe_2B , morfología típica de los procesos de difusión del boro en materiales ferrosos.

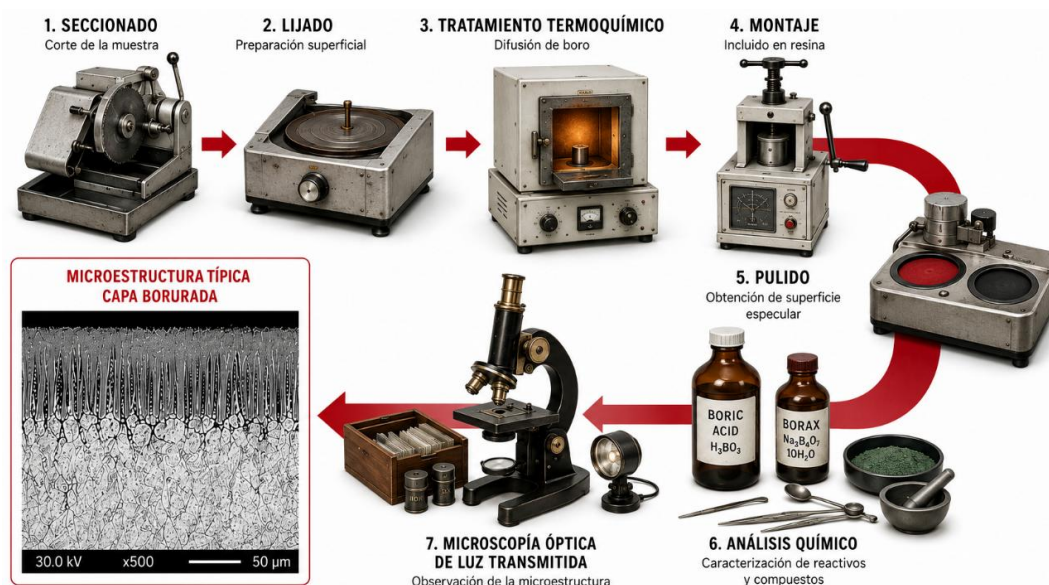


Figura 7. Esquema representativo del procedimiento experimental utilizado durante las décadas de 1940 y 1950 para la preparación metalográfica y caracterización de materiales sometidos a tratamientos termoquímicos. El proceso incluye las etapas de seccionado, lijado, tratamiento termoquímico, montaje en resina, pulido, análisis químico y observación microscópica, culminando con la evaluación microestructural de la capa borurada formada sobre la superficie del material. Fuente: Elaboración propia.

Consolidación científica y expansión tecnológica (1960–1980)

Las décadas de 1960 y 1970 representaron un punto de inflexión en la evolución de la borurización, ya que durante este periodo el tratamiento dejó de ser únicamente una técnica de endurecimiento superficial para convertirse en un proceso ampliamente estudiado desde el punto de vista científico y aplicado de forma creciente en diversos sectores industriales. Instituciones de investigación ubicadas principalmente en Europa Oriental, Alemania, Francia, Estados Unidos y la antigua Unión Soviética desarrollaron programas experimentales orientados a comprender los fenómenos físicos que gobiernan la formación y el crecimiento de las capas boruradas. Las investigaciones se centraron en el estudio de la cinética de crecimiento, la evolución microestructural, la resistencia al desgaste, el comportamiento frente a la corrosión, la estabilidad a altas temperaturas y las propiedades tribológicas de los materiales tratados (Morgado et al., 2022).

Entre los investigadores que realizaron aportaciones decisivas durante esta etapa destaca Vladimir I. Lakhtin, cuyos trabajos permitieron establecer las bases científicas para comprender los mecanismos de difusión del boro y la formación de las capas de boruros en aceros y otras aleaciones metálicas. Sus investigaciones contribuyeron significativamente a la optimización de los parámetros de tratamiento y favorecieron la incorporación de la borurización en aplicaciones industriales destinadas a incrementar la vida útil de herramientas y componentes sometidos a condiciones severas de servicio (Kulka y Makuch, 2018). Los estudios metalográficos realizados durante este periodo demostraron que las capas de boruro presentan una característica morfología dentada o aserrada, originada por la difusión preferencial de los átomos de boro a través de direcciones cristalográficas específicas del sustrato. Esta geometría favorece el anclaje mecánico de la capa al material base y constituye una de las principales características microestructurales de los aceros borurados (Kulka, 2021). Asimismo, se estableció que la composición química del acero ejerce una influencia determinante sobre la velocidad de crecimiento, el espesor y la morfología de las capas formadas.

En particular, se comprobó que elementos aleantes como el cromo, molibdeno, vanadio, tungsteno y níquel modifican el proceso de difusión del boro al alterar la movilidad atómica y la estabilidad termodinámica de las fases presentes. Como consecuencia, estos elementos pueden favorecer la formación de capas monofásicas de Fe_2B o sistemas bifásicos $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$, modificando la

morfología de la interfaz y el comportamiento mecánico de los recubrimientos (Ortiz-Domínguez et al., 2026; Morales-Robles et al., 2024; Ortiz-Domínguez et al., 2017; Ortiz-Domínguez et al., 2024).

Durante este periodo también comenzaron a realizarse comparaciones sistemáticas entre la borurización y otros tratamientos termoquímicos superficiales, como la carburización, la nitruración y la carbonitruración. Los resultados demostraron que las superficies boruradas ofrecen una resistencia significativamente superior al desgaste abrasivo, al desgaste adhesivo, a la erosión por partículas sólidas y al contacto metal-metal, manteniendo además una elevada estabilidad en ambientes de alta temperatura y medios químicamente agresivos. Estas ventajas consolidaron a la borurización como una de las tecnologías de endurecimiento superficial con mayor potencial para aplicaciones industriales de alto desempeño. Hacia finales de la década de 1970, la borurización ya era considerada una tecnología madura y confiable para la protección de herramientas de conformado, matrices, engranes, componentes de bombas, válvulas, moldes para la industria metalúrgica y otros elementos sometidos a condiciones extremas de operación. Su adopción industrial estuvo respaldada por el creciente conocimiento de los mecanismos de difusión, el perfeccionamiento de los parámetros de tratamiento y la disponibilidad de técnicas de caracterización capaces de evaluar con precisión la calidad de las capas obtenidas.

La Figura 8 presenta una comparación esquemática del comportamiento tribológico de diferentes tratamientos termoquímicos superficiales mediante tres tipos de evaluación: desgaste abrasivo, erosión y contacto metal-metal. En el primer gráfico se muestra la pérdida de masa registrada durante un ensayo de desgaste tipo *pin-on-disk*, donde la borurización presenta el menor nivel de desgaste en comparación con la carburización, la nitruración y la cementación. El segundo gráfico corresponde a ensayos de erosión mediante impacto de partículas abrasivas de Al_2O_3 , evidenciando nuevamente una reducción significativa de la pérdida de material en las superficies boruradas. Finalmente, el tercer gráfico representa la carga crítica soportada bajo condiciones de desgaste adhesivo por contacto metal-metal, observándose que la borurización alcanza los valores más elevados, lo que confirma su mayor capacidad para resistir esfuerzos superficiales severos.

En conjunto, estos resultados consolidaron el reconocimiento de la borurización como uno de los tratamientos termoquímicos más eficientes para incrementar la resistencia al desgaste y prolongar la vida

útil de componentes mecánicos, sentando las bases para el desarrollo de nuevas técnicas de procesamiento y de

los modelos matemáticos de difusión que comenzarían a consolidarse durante las décadas siguientes.

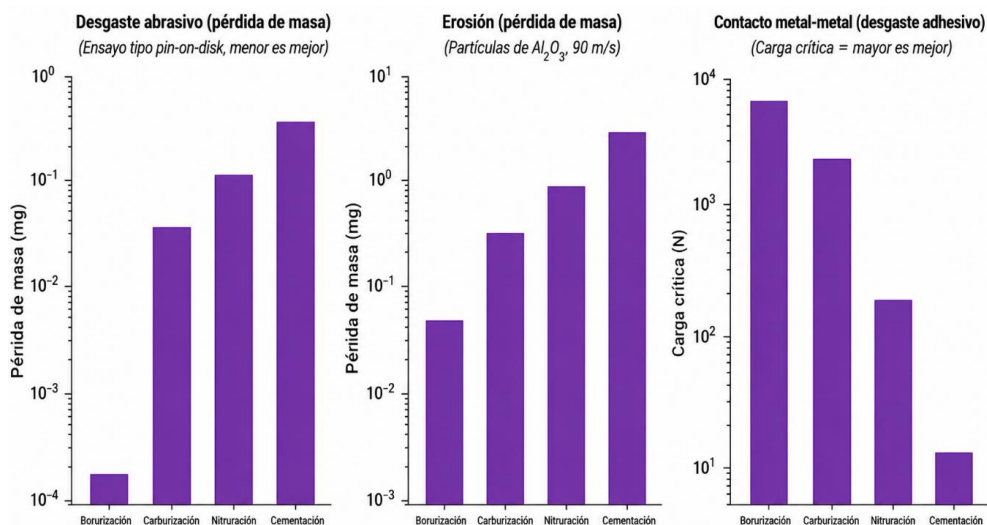


Figura 8. Comparación del desempeño de la borurización frente a otros tratamientos termoquímicos convencionales mediante ensayos de desgaste abrasivo, erosión y contacto metal-metal. Los resultados muestran que las capas boruradas presentan la menor pérdida de masa durante los ensayos de desgaste y erosión, así como la mayor carga crítica soportada en condiciones de contacto adhesivo, evidenciando su superior resistencia superficial respecto a la carburización, nitruración y cementación. Fuente: Elaboración propia.

Desarrollo de los primeros modelos matemáticos de crecimiento de capas boruradas (1980–2000)

La consolidación de la borurización como proceso industrial generó la necesidad de desarrollar herramientas capaces de predecir el crecimiento de las capas boruradas sin depender exclusivamente de procedimientos experimentales. Esta necesidad impulsó, durante las décadas de 1980 y 1990, el desarrollo de modelos matemáticos fundamentados en los principios de la difusión en estado sólido, la conservación de masa y la termodinámica de interfaces. Estos modelos permitieron describir la cinética de crecimiento de las fases Fe_2B y FeB , así como optimizar las condiciones de tratamiento para diferentes materiales y aplicaciones industriales. La base teórica de estos desarrollos se encuentra en la teoría de difusión propuesta por Adolf Fick en el siglo XIX. En particular, la Segunda Ley de Fick se convirtió en la ecuación fundamental para describir el transporte de átomos de boro dentro del sustrato metálico durante el tratamiento de borurización:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

donde $C(x, t)$ representa la concentración de boro, D el coeficiente de difusión, x la distancia medida desde la superficie y t el tiempo de tratamiento. La aplicación de esta ecuación permitió demostrar que el crecimiento de las capas boruradas está gobernado principalmente por mecanismos de difusión. Como consecuencia, numerosos estudios experimentales confirmaron que el espesor de la capa sigue un comportamiento parabólico, expresado mediante la relación:

$$d^2 = k_p t, \quad (2)$$

donde d representa el espesor de la capa de boruro, k_p corresponde a la constante parabólica de crecimiento y t es el tiempo de tratamiento. El comportamiento parabólico indica que la velocidad de crecimiento disminuye progresivamente conforme aumenta el espesor de la capa, debido a que los átomos de boro deben recorrer distancias de difusión cada vez mayores para alcanzar la interfaz de reacción. Este fenómeno constituye una de las principales evidencias de que la difusión es el mecanismo que controla el crecimiento de las capas boruradas. Durante este periodo comenzaron a desarrollarse modelos matemáticos cada vez más sofisticados, incorporando principios de conservación de masa, balances de flujo en interfaces móviles, condiciones de frontera dependientes de la concentración y criterios termodinámicos para describir la formación

simultánea de las fases Fe_2B y FeB . Estas contribuciones permitieron mejorar significativamente la capacidad predictiva de los modelos y establecer relaciones cuantitativas entre la temperatura, el tiempo de tratamiento y el espesor final de la capa.

Entre las aportaciones más relevantes de esta etapa destacan los trabajos de Brakman y colaboradores, quienes introdujeron modelos basados en balances de masa para describir el crecimiento de capas de Fe_2B ; posteriormente, diversos investigadores extendieron estos planteamientos incorporando coeficientes de difusión dependientes de la temperatura, energías de activación y condiciones de frontera móviles, lo que permitió obtener modelos con una elevada concordancia respecto a los resultados experimentales. Los avances alcanzados entre 1980 y 2000 marcaron el inicio de una nueva etapa en el estudio de la borurización, en la cual la modelación matemática comenzó a desempeñar un papel tan importante como la experimentación. Desde entonces, los modelos de difusión se han convertido en herramientas fundamentales para diseñar tratamientos termoquímicos, optimizar parámetros de procesamiento y predecir el crecimiento de las capas boruradas en una amplia variedad de materiales de ingeniería.

Diversificación tecnológica y nuevos procesos de borurización (1990–2010)

Durante las décadas de 1990 y principios del siglo XXI, la borurización experimentó una importante diversificación tecnológica impulsada por la creciente demanda de procesos más eficientes, reproducibles y adaptables a las necesidades de la industria moderna. Aunque la borurización en medio sólido continuó siendo el procedimiento más ampliamente utilizado, las limitaciones asociadas al control del potencial químico de boro, los prolongados tiempos de tratamiento y la necesidad de procesar componentes con geometrías complejas motivaron el desarrollo de nuevas variantes del proceso convencional (Genel, 2003). En este contexto, la borurización en polvo (Powder-Pack Boriding) se consolidó como la técnica de mayor aplicación industrial debido a su simplicidad, bajo costo y facilidad de implementación. Este método emplea mezclas pulverulentas constituidas principalmente por carburo de boro como fuente del elemento difusor, activadores químicos y materiales inertes que permiten controlar la actividad del boro durante el tratamiento. Su versatilidad ha favorecido su aplicación en herramientas, moldes y componentes mecánicos de diversas dimensiones.

Paralelamente, la borurización en pasta surgió como una alternativa para el tratamiento localizado de superficies específicas, permitiendo proteger únicamente las zonas sometidas a desgaste sin necesidad de tratar la totalidad del componente. Esta característica resultó especialmente atractiva para piezas de geometría compleja o para componentes donde únicamente determinadas regiones requieren endurecimiento superficial. Otra variante desarrollada durante este periodo fue la borurización líquida, basada en el empleo de baños de sales fundidas con elevada actividad química. Este procedimiento permitió incrementar la velocidad de difusión del boro y mejorar la uniformidad de las capas obtenidas, aunque su aplicación industrial quedó limitada debido a los riesgos ambientales y a las dificultades asociadas con el manejo de sales a altas temperaturas.

De forma simultánea, la borurización gaseosa comenzó a utilizar atmósferas reactivas controladas que facilitaron un mayor control del potencial químico del boro y de las condiciones de procesamiento. Este método representó un avance importante en la obtención de capas más homogéneas y en la reducción de defectos superficiales, aunque requirió equipos más sofisticados y un control preciso de la composición gaseosa. Uno de los avances tecnológicos más significativos de este periodo fue el desarrollo de la borurización por plasma, también conocida como borurización asistida por descarga luminiscente. A diferencia de los procesos convencionales, esta técnica utiliza un plasma de baja presión para activar las especies de boro y favorecer su difusión hacia el sustrato. Como consecuencia, fue posible reducir considerablemente los tiempos de tratamiento, disminuir el consumo energético y obtener un mejor control sobre la microestructura y el espesor de las capas formadas. Además, la menor temperatura de procesamiento permitió minimizar deformaciones dimensionales y preservar las propiedades del material base, aspectos de gran importancia para componentes de alta precisión.

Las investigaciones desarrolladas entre 1990 y 2010 demostraron que las propiedades finales de las capas boruradas dependen no solamente de la temperatura y del tiempo de tratamiento, sino también del método de borurización empleado. Factores como el potencial químico del medio, la velocidad de difusión del boro, la composición del sustrato y las condiciones de procesamiento determinan la formación de capas monofásicas de Fe_2B o de sistemas bifásicos $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$, influyendo directamente en la dureza, la resistencia al desgaste, la adhesión y el comportamiento tribológico del recubrimiento (Kulka, 2021). La diversificación de las

técnicas de borurización representó un cambio importante en la ingeniería de superficies, ya que permitió seleccionar el proceso más adecuado en función de las características del material, la geometría del componente y las condiciones específicas de servicio. Estos avances sentaron las bases para el desarrollo de tecnologías más sofisticadas que, a partir de la segunda década del siglo XXI, comenzaron a incorporar herramientas de simulación computacional, modelado matemático y métodos de inteligencia artificial para optimizar el diseño de los tratamientos termoquímicos.

La era moderna: simulación, caracterización avanzada y modelado multiescala (2010–Actualidad)

Durante la última década, la investigación en borurización ha experimentado un crecimiento significativo gracias al desarrollo de técnicas avanzadas de caracterización experimental y al incremento de la capacidad computacional disponible para el análisis de materiales. La integración de herramientas experimentales de alta resolución con modelos numéricos ha permitido comprender con mayor profundidad los mecanismos responsables de la nucleación, el crecimiento y la evolución microestructural de las capas boruradas, favoreciendo el diseño de tratamientos cada vez más eficientes y controlados. En la actualidad, la caracterización de las capas de boruro combina diversas técnicas complementarias. La microscopía óptica (OM) continúa siendo una herramienta fundamental para la determinación del espesor de capa y el análisis de la morfología de la interfaz. Por su parte, la microscopía electrónica de barrido (SEM), acompañada de espectroscopía de dispersión de energía (EDS), permite estudiar la microestructura y la distribución elemental del boro y de los elementos aleantes presentes en el material. De manera complementaria, la difracción de rayos X (XRD) posibilita la identificación de las fases cristalinas formadas durante el tratamiento, mientras que la difracción de electrones retrodispersados (EBSD) proporciona información detallada sobre la orientación cristalográfica, la textura y la evolución microestructural de las capas boruradas. Técnicas de mayor resolución, como la microscopía electrónica de transmisión (TEM), junto con ensayos de nanoindentación instrumentada, permiten analizar la estructura cristalina, la presencia de defectos y las propiedades mecánicas locales de las fases Fe_2B y FeB con una precisión sin precedentes.

Paralelamente, el modelado matemático ha experimentado una evolución notable mediante la incorporación de métodos numéricos avanzados capaces

de resolver problemas de difusión con fronteras móviles y geometrías complejas. Actualmente, la solución de las ecuaciones de difusión emplea técnicas basadas en el método de los elementos finitos, diferencias finitas, volúmenes finitos y formulaciones tipo Stefan, permitiendo describir con elevada precisión la evolución temporal de las interfaces entre el sustrato y las capas de boruro. Estas metodologías constituyen la base del denominado modelado multiescala, el cual integra fenómenos que ocurren desde la escala atómica hasta la escala macroscópica del componente. Uno de los avances más importantes de los últimos años ha sido el desarrollo de modelos capaces de predecir simultáneamente el espesor de las capas boruradas, los coeficientes de difusión, la energía de activación, la distribución de la concentración de boro y la evolución temporal de las interfaces Fe_2B /sustrato y $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$. La incorporación de estos parámetros ha permitido mejorar significativamente la capacidad predictiva de los modelos y reducir el número de ensayos experimentales requeridos para optimizar las condiciones de procesamiento. De manera complementaria, los métodos basados en la teoría del funcional de la densidad (Density Functional Theory, DFT) han permitido estudiar la estructura electrónica, la distribución de carga, la naturaleza de los enlaces químicos y la estabilidad cristalográfica de las fases Fe_2B y FeB a nivel atómico. Estos estudios han proporcionado una comprensión más profunda de la relación existente entre la estructura cristalina y las propiedades mecánicas de los boruros de hierro, fortaleciendo el vínculo entre la mecánica cuántica y la ingeniería de superficies.

Con el propósito de comprender el origen atómico de las propiedades mecánicas y estructurales de la fase Fe_2B , durante los últimos años se han incorporado técnicas de simulación basadas en la Teoría del Funcional de la Densidad (Density Functional Theory, DFT). Estas herramientas permiten estudiar la distribución electrónica de los materiales, proporcionando información fundamental sobre la naturaleza de los enlaces químicos, la estabilidad cristalográfica y las propiedades físicas de los compuestos intermetálicos. A diferencia de las técnicas experimentales convencionales, los cálculos de primeros principios permiten analizar el comportamiento de los electrones sin recurrir a parámetros empíricos, constituyendo una herramienta de gran utilidad para la ingeniería moderna de materiales. La fase Fe_2B cristaliza en una estructura tetragonal centrada en el cuerpo perteneciente al grupo espacial $I4/mcm$ (No. 140).

En esta estructura, los átomos de hierro ocupan las posiciones cristalográficas 8g, mientras que los átomos de boro se localizan en las posiciones 4a y 8h, formando

una red ordenada altamente estable. La disposición periódica de ambos elementos favorece la formación de enlaces Fe–B de elevada fortaleza, responsables de la excelente dureza, resistencia al desgaste y estabilidad térmica características de esta fase.

La Figura 9 muestra la estructura cristalina de la fase Fe_2B junto con el mapa de densidad electrónica obtenido mediante cálculos DFT. La distribución de la densidad electrónica revela una marcada acumulación de carga alrededor de los átomos de boro y a lo largo de los enlaces Fe–B, evidenciando la intensa interacción química existente entre ambos elementos. Las regiones representadas en color rojo corresponden a zonas de mayor densidad electrónica, mientras que las tonalidades azul y verde indican regiones con menor concentración de carga. Estos resultados ponen de manifiesto que los

átomos de boro desempeñan un papel determinante en la estabilidad estructural de la fase Fe_2B , actuando como centros de acumulación electrónica que fortalecen la red cristalina. En consecuencia, la elevada rigidez de los enlaces Fe–B limita el movimiento de dislocaciones dentro del material, fenómeno que explica los altos valores de dureza —superiores a 1800 HV— y la excelente resistencia al desgaste reportados para las capas monofásicas de Fe_2B obtenidas mediante tratamientos de borurización. Asimismo, este tipo de análisis constituye una herramienta indispensable para establecer la relación entre la estructura atómica y las propiedades macroscópicas de los recubrimientos borurados, permitiendo optimizar el diseño de nuevos materiales mediante simulación computacional antes de su validación experimental.

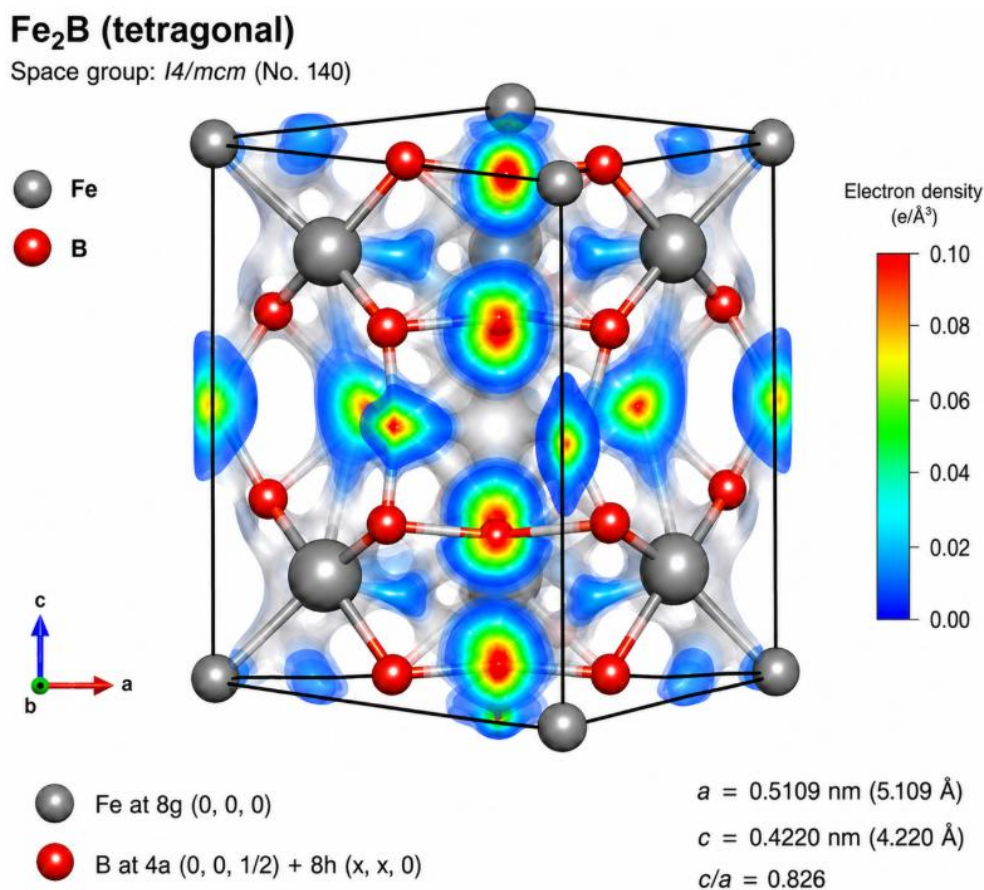


Figura 9. Estructura cristalina tetragonal de la fase Fe_2B (grupo espacial $I4/mcm$, No. 140) superpuesta con el mapa de densidad electrónica obtenido mediante cálculos de la Teoría del Funcional de la Densidad (DFT). Los átomos de hierro (Fe) se representan en color gris y los átomos de boro (B) en color rojo. La escala de colores (azul–rojo) indica la distribución de la densidad electrónica, donde las regiones en rojo corresponden a una mayor acumulación de carga electrónica y las regiones en azul a una menor densidad. La concentración de carga alrededor de los átomos de boro y a lo largo de los enlaces Fe–B evidencia la naturaleza del enlace químico responsable de la elevada estabilidad estructural, dureza y resistencia mecánica características de la fase Fe_2B . Fuente: Elaboración propia.

La Figura 10 muestra la estructura cristalina de la fase FeB, la cual cristaliza en un sistema ortorrómbico perteneciente al grupo espacial Pnma (No. 62). En esta representación, los átomos de hierro (Fe) se muestran en color gris, mientras que los átomos de boro (B) se representan en color rojo. La celda unitaria ilustra la disposición periódica de ambos elementos y permite apreciar la geometría característica de esta fase intermetálica. Sobre la estructura cristalina se presenta un mapa de densidad electrónica obtenido mediante cálculos de Teoría del Funcional de la Densidad (Density Functional Theory, DFT). La escala de colores, ubicada en el lado derecho de la figura, representa la distribución de la densidad electrónica en unidades de $e/\text{\AA}^3$, donde las regiones de color azul indican una baja concentración de electrones, mientras que las zonas verdes, amarillas y rojas corresponden a una acumulación progresivamente mayor de carga electrónica.

Se observa que la mayor concentración de densidad electrónica se localiza alrededor de los átomos de boro y en las regiones comprendidas entre los átomos de hierro y boro. Este comportamiento evidencia la existencia de una fuerte interacción química entre ambos elementos, característica de los enlaces Fe–B, los cuales son responsables de la elevada estabilidad estructural de la fase FeB. La distribución de carga también indica un importante grado de hibridación electrónica entre los orbitales del hierro y del boro, contribuyendo a la formación de una red cristalina rígida y altamente resistente. Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, la intensidad de estos enlaces explica la

elevada dureza que caracteriza a la fase FeB, la cual puede superar los 2000 HV dependiendo de las condiciones de procesamiento. Sin embargo, la naturaleza de su estructura ortorrómbica y la elevada concentración de boro también provocan una menor tenacidad y mayor fragilidad en comparación con la fase Fe₂B. Por esta razón, durante los tratamientos de borurización generalmente se busca controlar el potencial químico del boro para favorecer el crecimiento de capas monofásicas de Fe₂B, evitando la formación excesiva de FeB cuando se requieren componentes sometidos a cargas dinámicas o de impacto.

Los parámetros cristalográficos mostrados en la figura corresponden a las dimensiones de la celda unitaria ortorrómbica, definidas por las constantes de red a , b y c , así como por el volumen de la celda unitaria. Estos parámetros describen la geometría tridimensional de la estructura cristalina y constituyen información fundamental para la simulación atomística, el cálculo de propiedades electrónicas y la comprensión de los mecanismos de difusión del boro durante los procesos de borurización. En conjunto, esta representación cristalográfica y el mapa de densidad electrónica proporcionan una visión detallada de la relación entre la estructura atómica y las propiedades de la fase FeB, demostrando que la distribución electrónica y la configuración de los enlaces Fe–B son los principales factores responsables de su alta dureza, estabilidad química y comportamiento mecánico dentro de las capas boruradas.

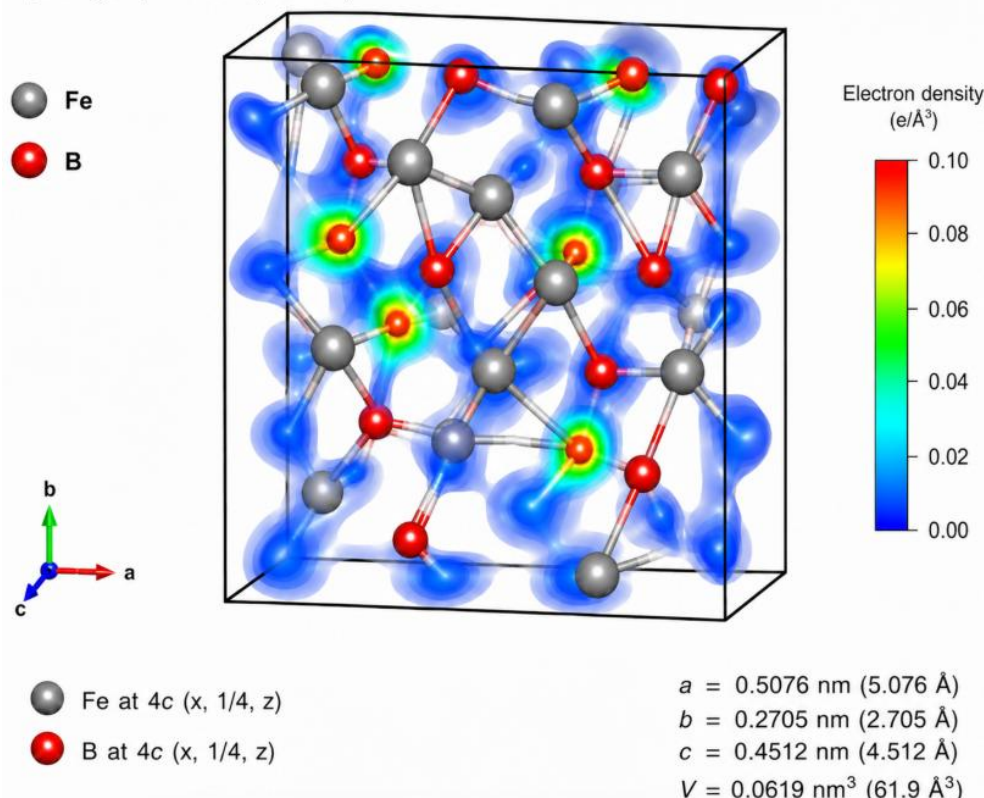
FeB (ortorrómbica)Space group: *Pnma* (No. 62)

Figura 10. Estructura cristalina ortorrómbica de la fase FeB (grupo espacial *Pnma*, No. 62) superpuesta con el mapa de densidad electrónica obtenido mediante cálculos de la Teoría del Funcional de la Densidad (DFT). Los átomos de hierro (Fe) se representan en color gris, mientras que los átomos de boro (B) se muestran en color rojo. La escala de colores (azul-rojo) indica la distribución de la densidad electrónica, donde las regiones rojas corresponden a una mayor acumulación de carga electrónica. La concentración de carga alrededor de los átomos de boro y a lo largo de los enlaces Fe–B evidencia la fuerte interacción química responsable de la elevada dureza y estabilidad estructural de la fase FeB. Fuente: Elaboración propia.

Más recientemente, la incorporación de técnicas de inteligencia artificial, aprendizaje automático (*Machine Learning*) y análisis masivo de datos ha abierto nuevas perspectivas para la optimización de los tratamientos de borurización. Estas herramientas permiten identificar relaciones complejas entre las variables de procesamiento, predecir el comportamiento de nuevos materiales y acelerar el diseño de tratamientos termoquímicos mediante modelos predictivos con elevados niveles de precisión. La integración de técnicas avanzadas de caracterización, simulación numérica, modelado multiescala, mecánica cuántica e inteligencia artificial ha convertido a la borurización en una de las tecnologías más estudiadas dentro de la ingeniería moderna de superficies. Esta evolución continúa impulsando el desarrollo de nuevos materiales y tratamientos con aplicaciones en sectores estratégicos como la industria aeroespacial, automotriz, biomédica, energética y de manufactura avanzada, consolidando a la

borurización como una tecnología clave dentro del paradigma de la Industria 4.0.

Con el fin de evaluar la estabilidad termodinámica de las fases presentes en el sistema hierro–boro, es común emplear cálculos de primeros principios basados en la Teoría del Funcional de la Densidad (DFT). Una de las herramientas más utilizadas para este propósito es el diagrama de energía de formación (convex hull), el cual permite identificar las composiciones termodinámicamente estables y distinguirlas de aquellas que son metaestables o inestables. La Figura 11 presenta el diagrama de energía de formación del sistema Fe–B a 0 K. En el eje horizontal se representa la fracción atómica de boro, mientras que el eje vertical corresponde a la energía de formación por átomo. La línea negra continua, conocida como convex hull, conecta las fases de menor energía libre y representa el conjunto de compuestos termodinámicamente estables. Los puntos que se

localizan sobre esta línea corresponden a fases estables, mientras que aquellos situados por encima representan estructuras metaestables o inestables que, en condiciones de equilibrio, tienden a transformarse en las fases de menor energía.

Se observa que la fase FeB presenta el mínimo global de energía de formación, indicando una elevada estabilidad termodinámica dentro del sistema Fe–B. Asimismo, la fase Fe₂B también se localiza sobre la envolvente convexa, lo que confirma su estabilidad y explica su frecuente formación durante los tratamientos de borurización. La existencia simultánea de ambas fases constituye la base termodinámica para comprender la

formación de capas monofásicas de Fe₂B o sistemas bifásicos FeB/Fe₂B, dependiendo del potencial químico del boro y de las condiciones de procesamiento. El análisis de la energía de formación obtenido mediante DFT proporciona información fundamental para comprender la secuencia de formación de los boruros de hierro, validar modelos termodinámicos y predecir la estabilidad de nuevas fases intermetálicas. En combinación con estudios de difusión y caracterización experimental, este tipo de diagramas constituye una herramienta de gran importancia para el diseño y optimización de tratamientos de borurización.

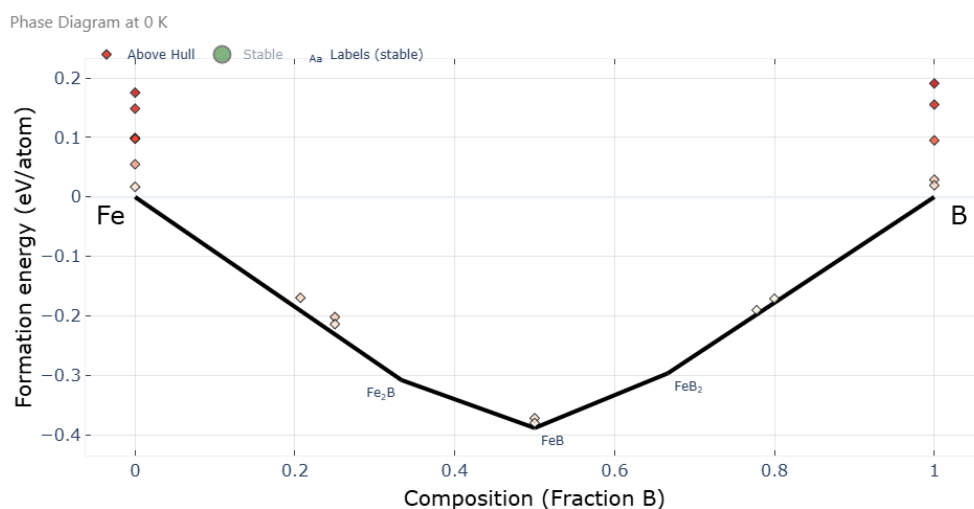


Figura 11. Diagrama de energía de formación (convex hull) del sistema hierro–boro (Fe–B) obtenido mediante cálculos de la Teoría del Funcional de la Densidad (DFT) a 0 K. El eje horizontal representa la fracción atómica de boro, mientras que el eje vertical corresponde a la energía de formación por átomo. La línea negra identifica las fases termodinámicamente estables del sistema, entre las que destacan Fe₂B y FeB, mientras que los puntos situados por encima de la envolvente convexa corresponden a estructuras metaestables o inestables. Este diagrama permite evaluar la estabilidad relativa de los compuestos intermetálicos y constituye una herramienta fundamental para el estudio termodinámico de las capas formadas durante los procesos de borurización.

Investigadores que han marcado la evolución de la borurización

El crecimiento sostenido de la investigación en borurización durante las últimas décadas ha estado acompañado por la participación de numerosos grupos científicos que han contribuido significativamente al desarrollo de esta tecnología. El análisis bibliométrico realizado permitió identificar a los investigadores con mayor impacto en la evolución del conocimiento relacionado con la difusión del boro, la formación de las fases FeB y Fe₂B, el modelado matemático del crecimiento de las capas y la optimización de los tratamientos termoquímicos. La Figura 8 muestra la distribución de los principales autores de acuerdo con su

productividad científica dentro de esta área de investigación.

Desde un punto de vista histórico, uno de los investigadores que sentó las bases de la borurización moderna fue Vladimir I. Lakhtin, cuyos trabajos publicados durante las décadas de 1960 y 1970 permitieron comprender los mecanismos de formación de las capas boruradas, la influencia de la composición química del acero y el efecto de los parámetros de tratamiento sobre las propiedades finales del recubrimiento. Sus investigaciones constituyen una referencia obligada en la ingeniería de superficies y contribuyeron decisivamente a la incorporación de la borurización en aplicaciones industriales. Otro

investigador de gran relevancia es Hans Brakman, quien introdujo algunos de los primeros modelos matemáticos basados en balances de masa para describir el crecimiento de las capas de Fe_2B mediante difusión. Sus aportaciones marcaron el inicio de la modelación cuantitativa de la borurización y sirvieron de fundamento para el desarrollo de numerosos modelos cinéticos empleados actualmente en la predicción del espesor de las capas boruradas.

Entre los investigadores contemporáneos con mayor producción científica destaca Mourad Keddad, profesor de la Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Argelia. Su trabajo se ha centrado en el desarrollo de modelos analíticos y numéricos para describir la difusión del boro en materiales metálicos, incorporando balances de masa, condiciones de frontera móviles y formulaciones tipo Stefan. Asimismo, ha realizado importantes contribuciones a la determinación experimental de coeficientes de difusión y energías de activación en diferentes sistemas de borurización, consolidándose como uno de los autores más citados en esta área. Dentro del contexto latinoamericano sobresale Iván Enrique Campos-Silva, investigador del Instituto Politécnico Nacional (IPN) de México. Sus investigaciones abarcan la borurización en polvo, pasta y plasma, así como el estudio de la influencia de las variables de procesamiento sobre la cinética de crecimiento, la microestructura y las propiedades mecánicas de las capas boruradas. Además, ha contribuido al desarrollo de modelos predictivos y ha formado una de las escuelas de investigación más importantes en tratamientos termoquímicos dentro de América Latina.

En Europa, Michal Kulka, profesor de la Poznań University of Technology, ha realizado aportaciones significativas relacionadas con la modificación superficial mediante tratamientos híbridos que combinan la borurización con procesos asistidos por láser y otras técnicas de ingeniería de superficies. Sus investigaciones han permitido establecer relaciones entre la microestructura, la distribución de fases y el

comportamiento mecánico de los recubrimientos, especialmente en términos de dureza, resistencia al desgaste, fatiga y comportamiento tribológico. Más recientemente, investigadoras como Natalia Makuch han contribuido al estudio de nuevos procesos de borurización, particularmente en el análisis microestructural, la caracterización avanzada y la evaluación del comportamiento mecánico de capas obtenidas mediante técnicas modernas de procesamiento. Sus trabajos reflejan la evolución de la investigación hacia enfoques multidisciplinarios que integran experimentación, simulación computacional y modelado numérico.

Asimismo, en los últimos años, Martín Ortiz-Domínguez ha realizado contribuciones relevantes en el desarrollo de modelos matemáticos para describir el crecimiento de capas monofásicas y bifásicas de boruro, así como en la determinación de coeficientes de difusión, energías de activación y análisis de la cinética de crecimiento en diversos aceros de ingeniería. Sus investigaciones también incluyen la caracterización microestructural mediante microscopía óptica, SEM, XRD y EBSD, así como estudios basados en la Teoría del Funcional de la Densidad (DFT) para comprender el origen atómico de las propiedades de la fase Fe_2B . Estas contribuciones han ampliado el conocimiento sobre la relación entre la difusión del boro, la evolución microestructural y el comportamiento mecánico de los recubrimientos borurados. Las aportaciones de estos investigadores han permitido transformar la borurización de un tratamiento termoquímico convencional en una tecnología altamente especializada de ingeniería de superficies. Gracias al desarrollo de nuevos modelos matemáticos, técnicas avanzadas de caracterización y métodos computacionales de simulación, actualmente es posible diseñar tratamientos con un elevado grado de precisión, favoreciendo su aplicación en sectores como la manufactura avanzada, la industria automotriz, la generación de energía, la industria aeroespacial y la metalurgia moderna (Morales-Robles et al., 2025).

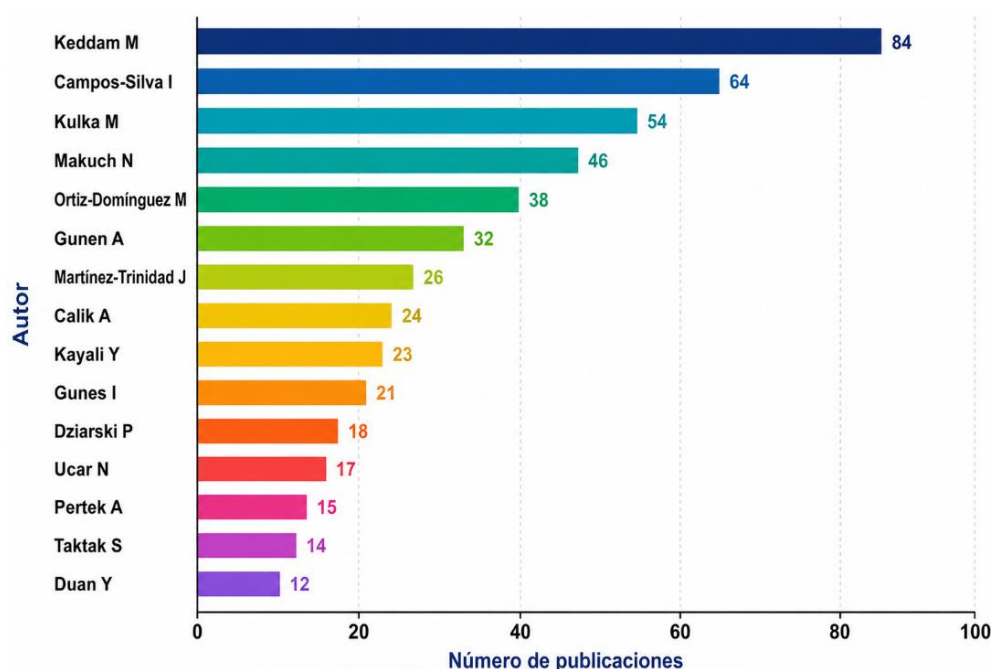


Figura 7. Principales autores que han contribuido al desarrollo científico de la borurización, clasificados de acuerdo con el número de publicaciones registradas en la literatura especializada. Destacan las contribuciones de Mourad Keddám, Iván Enrique Campos-Silva, Michal Kulka, Natalia Makuch y Martín Ortiz-Domínguez, cuyas investigaciones han abordado aspectos relacionados con la cinética de crecimiento de capas boruradas, modelado matemático, difusión de boro, caracterización microestructural y evaluación de propiedades mecánicas y tribológicas. La distribución observada refleja el liderazgo y la influencia de estos investigadores en la evolución del conocimiento sobre los tratamientos termoquímicos de borurización. Sus trabajos abarcan desde estudios experimentales de crecimiento de capas hasta modelos avanzados de difusión y predicción cinética.

Tendencias futuras

Las perspectivas de desarrollo de la borurización apuntan hacia la integración de tecnologías digitales, herramientas computacionales avanzadas y nuevos procesos de manufactura, con el propósito de incrementar la eficiencia, sostenibilidad y capacidad predictiva de los tratamientos termoquímicos. En este contexto, la investigación actual no solo busca optimizar la formación de las capas boruradas, sino también diseñar procesos inteligentes capaces de adaptarse a las necesidades específicas de cada aplicación industrial.

Una de las líneas de investigación con mayor potencial corresponde a la integración de la manufactura aditiva con la borurización. La posibilidad de fabricar componentes metálicos mediante impresión 3D y posteriormente modificar sus propiedades superficiales mediante difusión de boro abre nuevas oportunidades para la producción de piezas con geometrías complejas, elevada resistencia al desgaste y un mejor desempeño mecánico. De manera paralela, la inteligencia artificial (IA) y las técnicas de aprendizaje automático (*Machine Learning*) están transformando el diseño de los

tratamientos termoquímicos. Mediante el análisis de grandes volúmenes de datos experimentales y simulaciones numéricas, estos algoritmos permiten establecer relaciones entre las variables de procesamiento y las propiedades finales de las capas boruradas, facilitando la predicción del espesor, los coeficientes de difusión, la energía de activación, la dureza y el comportamiento tribológico con altos niveles de precisión.

Otra tendencia emergente es el desarrollo de gemelos digitales (*Digital Twins*), capaces de reproducir virtualmente el proceso de borurización en tiempo real. Estos modelos integran información proveniente de simulaciones, sensores y datos experimentales para predecir la evolución de las capas durante el tratamiento, optimizar los parámetros de operación y reducir tanto los tiempos de desarrollo como los costos asociados a la experimentación. La optimización energética de los procesos de borurización constituye igualmente un objetivo prioritario dentro del marco de la manufactura sostenible. En este sentido, las investigaciones actuales buscan disminuir el consumo energético, reducir las emisiones asociadas al tratamiento y desarrollar medios

borurantes con menor impacto ambiental, manteniendo al mismo tiempo la calidad y reproducibilidad de las capas obtenidas.

El campo de aplicación de la borurización también continúa expandiéndose hacia nuevos materiales de ingeniería. En particular, la modificación superficial de superaleaciones, aleaciones de titanio, aceros inoxidables, materiales refractarios y biomateriales representa una línea de investigación de gran interés para las industrias aeroespacial, energética y biomédica, donde se requieren componentes con elevada resistencia al desgaste, la corrosión y la fatiga. Finalmente, el desarrollo de procesos híbridos, que combinan la borurización con tecnologías como el tratamiento por láser, plasma, deposición física de vapor (PVD) y deposición química de vapor (CVD), constituye una de las estrategias más prometedoras para obtener recubrimientos multifuncionales con propiedades superiores a las alcanzadas mediante tratamientos convencionales. Estas combinaciones permiten mejorar el control microestructural, incrementar la adherencia de las capas y adaptar las propiedades superficiales a condiciones específicas de servicio.

Estas líneas de investigación reflejan la evolución de la borurización hacia una disciplina cada vez más apoyada en la simulación computacional, la ciencia de datos y la ingeniería digital. La integración de modelos multiescala, inteligencia artificial, gemelos digitales y técnicas avanzadas de caracterización permitirá desarrollar tratamientos termoquímicos más eficientes, sostenibles y altamente predictivos, consolidando a la borurización como una de las tecnologías con mayor potencial dentro de la ingeniería moderna de superficies.

Conclusiones

La evolución histórica de la borurización constituye un claro ejemplo del desarrollo progresivo de la ciencia e ingeniería de materiales, integrando conocimientos provenientes de la metalurgia física, la termodinámica, la difusión en estado sólido, la mecánica cuántica y la simulación computacional. Desde el descubrimiento del boro en 1808 hasta la implementación de modelos multiescala e inteligencia artificial en la actualidad, este tratamiento termoquímico ha experimentado una transformación continua que ha permitido ampliar significativamente su campo de aplicación y mejorar el desempeño de los materiales metálicos. A lo largo de más de dos siglos de investigación, el conocimiento del sistema hierro-boro, la identificación de las fases FeB y Fe₂B, el establecimiento de los diagramas de equilibrio y

el desarrollo de modelos matemáticos fundamentados en las leyes de difusión de Fick han permitido comprender los mecanismos responsables del crecimiento de las capas boruradas. Asimismo, el empleo de técnicas avanzadas de caracterización, como la microscopía electrónica, la difracción de rayos X, la difracción de electrones retrodispersados y los métodos de primeros principios basados en la Teoría del Funcional de la Densidad (DFT), ha proporcionado una visión integral de la relación entre la estructura cristalina, la distribución electrónica y las propiedades mecánicas de los boruros de hierro.

La diversificación de los procesos de borurización y la incorporación de nuevas metodologías de simulación han permitido optimizar el diseño de tratamientos termoquímicos para una amplia variedad de materiales y aplicaciones industriales. En este contexto, la integración de modelos predictivos, métodos numéricos, inteligencia artificial y gemelos digitales representa una nueva etapa en la ingeniería de superficies, orientada hacia el desarrollo de procesos más eficientes, sostenibles y con una elevada capacidad de predicción. Finalmente, el análisis histórico realizado evidencia que la borurización continúa siendo una de las áreas de investigación con mayor dinamismo dentro de la ingeniería de superficies. Los avances recientes en manufactura aditiva, simulación multiescala, aprendizaje automático y caracterización avanzada permiten anticipar que esta tecnología seguirá desempeñando un papel fundamental en el desarrollo de materiales de alto desempeño para aplicaciones en los sectores automotriz, aeroespacial, energético, biomédico y de manufactura avanzada. En consecuencia, la combinación de investigación experimental, modelado matemático y simulación atomística continuará impulsando la innovación y consolidando a la borurización como uno de los tratamientos termoquímicos más relevantes para la ingeniería moderna de materiales.

Referencias

- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*, 2nd ed. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Davy, H. (1808). "Electro-chemical researches on the decomposition of the earths," *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 98, pp. 333–370.
- Fick, A. (1855). "On liquid diffusion," *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 10, pp. 30–39.
- Gay-Lussac, J. L. and Thénard, L. J. (1811). *Recherches physico-chimiques faites sur la pile*, Paris, France.

- Genel, K. (2003). "Boriding kinetics and mechanical properties of borided steels," *Materials Science and Engineering A*, vol. 347, pp. 311–314, 2003.
- Kulka, M. and Makuch, N. (2018). "Microstructure and properties of borided layers," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 816–830.
- Kulka, M. (2019). *Current Trends in Boriding: Techniques*. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland.
- Kulka, M. (2021). *Laser Surface Modification of Borided Layers*. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland.
- Lakhtin, V. I. and Kogan, S. A. (1976). *Diffusion Boriding of Steels*. Moscow, Russia: Mashinostroenie Publishers.
- Massalski, T. B. (1990). *Binary Alloy Phase Diagrams*, 2nd ed. Materials Park, OH, USA: ASM International, 1990.
- Matuschka, J. (1980). *Boronizing*. Munich, Germany: Carl Hanser Verlag.
- Mittemeijer, E. J. (2010). *Fundamentals of Materials Science: The Microstructure-Property Relationship Using Metals as Model Systems*. Berlin, Germany: Springer.
- Moissan, H. (1895). *Le Four Électrique*. Paris: G. Steinheil.
- Morales-Robles, Á. J., Ortiz-Domínguez, M., Gómez-Vargas, O. A. and Moreno-González, M. L. (2024). "Boronize Coatings Studied with a New Mass Transfer Model," *Materials*, vol. 17, no. 21, Art. No. 5309. <https://doi.org/10.3390/ma17215309>
- Morales-Robles, A. J., Ortiz-Domínguez, M., Cardoso-Legorreta, E., & Cruz-Avilés, A. (2025). Análisis bibliométrico: Borurización. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 12(Especial), 1-13. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/sahagun/article/view/14955/12776>
- Morgado-González, I., Ortiz-Domínguez, M. and Keddám, M. (2022). "Characterization of Fe₂B layers on ASTM A1011 steel and modelling of boron diffusion," *Materials Testing*, vol. 64, no. 1, pp. 55–66, <https://doi.org/10.1515/mt-2021-2007>.
- Okamoto, H. (2004). "B-Fe (Boron-Iron)," *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, vol. 25, no. 3, pp. 297–298, 2004.
- Ortiz-Domínguez, M., Gómez-Vargas, O. A., Vergara-Vázquez, J. C., Palacios-Grijalva, L. N., Moreno-González, M. L., Cruz-Victoria, T. J. (2026). "Modeling the growth behavior of Fe₂B coatings using the inverse Stefan method" *Materials Testing*. <https://doi.org/10.1515/mt-2025-0520>
- Ortiz-Domínguez, M., Gómez-Vargas, O. A., Keddám, M., Arenas-Flores, A. and García-Serrano, J. (2017). "Kinetics of boron diffusion and characterization of Fe₂B coatings on AISI 9840 steel," *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, vol. 53, pp. 534–547, <https://doi.org/10.1134/S2070205117030169>
- Ortiz-Domínguez, M., Morales-Robles, Á. J., Gómez-Vargas, O. A., Moreno-González, G. (2024). "Growth of Boronize Coatings Studied with Mathematical Models of Diffusion," *Metals*, vol. 14, Art. no. 670. <https://doi.org/10.3390/met14060670>