

Jorge Luis Rosales López, Mauricio Olivares Luna e Iván Enrique Campos Silva



La borurización: una técnica para aumentar la vida útil de los metales y reducir residuos ambientales

Resumen

Se examina la evolución del tratamiento de borurización, el cual aumenta la durabilidad de los metales y reduce los residuos ambientales. Iniciamos con un repaso histórico del caso del Iron Bridge, primer puente metálico del mundo, construido en 1779, que enfrentó desafíos significativos de oxidación y corrosión. Desde entonces, los avances en la ciencia de materiales han permitido desarrollar técnicas como el borurado por empaquetamiento de polvo, que enriquece la superficie metálica con átomos de boro para aumentar su vida útil.

Abstract

This article examines the evolution of boriding, a treatment that increases the durability of metals and helps reduce environmental waste. It begins with a historical overview of the Iron Bridge, the world's first metal bridge, built in 1779, which faced major problems of oxidation and corrosion. Since then, advances in materials science have led to techniques such as powder-pack boriding, which enriches metal surfaces with boron atoms to extend their service life.

Recientemente, el Grupo de Ingeniería de Superficies del Instituto Politécnico Nacional ha innovado con la borurización en caja asistida por corriente directa pulsante (BCDP), que utiliza corriente eléctrica para acelerar la formación de capas de boruro, disminuyendo el tiempo y los residuos generados. Mediante un experimento casero se ilustra cómo la corriente eléctrica puede optimizar el proceso, subrayando el impacto positivo de esta técnica en la conservación de recursos y protección del ambiente.



■ **El problema de la oxidación y los desperdicios metálicos**

■ ¿Te has preguntado alguna vez cómo podemos hacer que los metales duren más tiempo sin oxidarse? Actualmente, investigadores, industrias y gobiernos buscan soluciones para preservar el medio ambiente y nuestro planeta.

La siguiente anécdota ilustra cómo el cuidado y la mejora de las propiedades de los metales pueden contribuir a este objetivo. En 1779, en Shropshire, Inglaterra, se construyó el primer gran puente de hierro fundido del mundo, conocido como Iron Bridge, sobre el río Severn. Este puente no sólo constituyó un avance monumental en la ingeniería, sino que también simbolizó la capacidad humana de moldear materiales para el beneficio social. Sin embargo, al paso de los años, enfrentó desafíos como la oxidación y la corrosión, debido al contacto con la humedad y con el aire, hasta que, finalmente, en 1934 se prohibió el paso de vehículos por él y en 1950 ya nadie volvió a cruzar el puente.

Una preocupación global actual es la generación de residuos. En México, por ejemplo, la acumulación de desechos metálicos es especialmente alarmante. De acuerdo con el indicador “Residuos sólidos urbanos generados, por tipo de residuo. Metales (miles de toneladas)” del Banco de Indicadores del INEGI, la generación de residuos metálicos en México aumentó de aproximadamente 1.3 millones de toneladas en 2008 a 1.6 millones en 2017. Estos residuos no sólo representan un reto en términos de gestión, sino que también afectan de manera significativa el medio ambiente.

■ **Soluciones tradicionales y modernas**

■ ¿Y si pudiéramos “vacunar” a los metales contra la oxidación? Regresando al ejemplo del Iron Bridge, años después, ingenieros y científicos descubrieron que se podía proteger estructuras similares de la degradación causada por el óxido mediante el tratamiento del hierro con ciertos químicos y técnicas. Al igual que cuidamos una reliquia familiar o un objeto de gran valor personal, el tratamiento de los metales permite extender su vida útil y preservar su integridad para futuras generaciones.

Para enfrentar el problema de la rápida acumulación de residuos metálicos, científicos de todo el mundo investigan cómo mejorar las propiedades de los metales para extender su vida útil y reducir la necesidad de reemplazar herramientas y componentes metálicos con frecuencia. Uno de los métodos clásicos es el borurado por empaquetamiento de polvo (BPP). Este tratamiento, que ha sido objeto de estudio en México desde mediados de la década de los noventa, consiste en enriquecer la superficie metálica con átomos de boro, proceso que genera compuestos conocidos como boruros, que se destacan por incrementar notablemente la resistencia del metal al desgaste y a la corrosión (Campos-Silva y cols., 2009).

El procedimiento del BPP implica situar el metal dentro de un contenedor relleno de un polvo rico en boro y calentar el conjunto a temperaturas que oscilan entre 850 y 1000 °C. A estas altas temperaturas los átomos de boro migran hacia la superficie del metal y crean una capa protectora de boruro. Aunque este método ha probado ser eficaz en diversos metales, como los utilizados en la construcción y en la industria aeroespacial, no está exento de desafíos. El proceso puede durar entre 6 y 24 horas, lo que resulta en un uso ineficiente de los recursos materiales y energéticos.

Para mejorar esta técnica, investigadores de todo el mundo han implementado distintas fuentes de energía. Algunas técnicas de borurado no sólo dependen de la temperatura, sino también de la energía eléctrica. Por ejemplo, el Grupo de Ingeniería de Superficies (GIS) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) en México ha creado una técnica avanzada llamada borurización en caja asistida por corriente directa pulsante (BCDP). Esta nueva técnica utiliza corriente eléctrica durante la difusión del boro a alta temperatura, lo que reduce drásticamente el tiempo necesario para formar la capa de boruro (Campos-Silva y cols., 2021).

■ **Experimento casero para entender el papel de la electricidad en el borurado**

■ Para entender cómo la aplicación de la corriente eléctrica mejora la eficiencia del tratamiento y acor-



ta el tiempo de formación de una capa protectora de boruros, el lector puede realizar un experimento en casa. Necesitará objetos cotidianos como una cuchara, dos vasos de cristal llenos con agua hasta las tres cuartas partes y colorante vegetal oscuro. Si tiene un gotero para el colorante, mucho mejor. También necesitará un cronómetro, que puede ser un reloj de mano o un teléfono inteligente.

Para comenzar, hay que colocar el primer vaso en una superficie plana y esperar por un minuto para asegurarse de que el agua esté completamente quieta. Después de ese minuto, hay que acercarse al colorante justo sobre la superficie del agua, sin tocarla, y dejar caer unas gotas dentro del vaso. El tiempo que tarda el colorante en dispersarse completamente y llegar al fondo del vaso en este experimento es muestra de un proceso conocido como difusión, que es bastante lento y, podría decirse, **estocástico**. Puede verse que el colorante no se va directamente al fondo, sino que se mueve en varias direcciones, probablemente tocando las paredes del vaso antes de llegar al fondo.

A continuación, hay que tomar el segundo vaso y repetir el procedimiento, pero esta vez, antes de añadir el colorante, se debe agitar el agua suavemen-

te con la cuchara, creando un movimiento circular durante unos 10 segundos. Al tomar el tiempo que tarda el colorante en llegar al fondo, se verá que la dispersión es mucho más rápida debido al movimiento. Esto nos ayuda a comprender por qué la agitación actúa como una fuerza que guía y acelera el proceso de difusión, similar a la del campo eléctrico que impulsa los átomos de boro hacia la superficie del material en la técnica de BCDP.

Este fenómeno es similar a lo que sucede en la borurización asistida por corriente directa pulsante, donde el campo eléctrico funciona como una fuerza que impulsa los átomos de boro hacia la superficie del material acelerando el proceso y, por lo tanto, reduciendo el tiempo y los residuos generados en comparación con otros métodos de borurado.

■ **Del borurado tradicional al borurado con asistencia eléctrica: los últimos 30 años**

■ Como mencionamos, el borurado es un proceso que ha demostrado ser muy útil para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales metálicos. En México, el primer experimento no se hizo con polvos, sino con una pasta especial. En 1997, Meléndez y su equipo evaluaron cuatro materiales metálicos expuestos a este proceso. Ellos observaron que el tratamiento resultaba en una capa de boruros muy dura, especialmente en aquellos aceros con menos elementos aleantes. Además, estas capas protegían al material del desgaste mucho mejor que cualquier tratamiento térmico usado en aquel entonces.

Avanzamos hasta 2009, cuando por primera vez en México se experimentó con polvos especiales para introducir átomos de boro en un hierro fundido. El equipo estudió cómo crecía la capa de boruros usando un modelo matemático y descubrieron que este crecimiento dependía de factores como la temperatura, el tiempo de exposición al tratamiento y el tipo de metal utilizado (Campos-Silva y cols., 2009).

Avanzando hasta 2019, el equipo de investigación dio un paso innovador al introducir un campo eléctrico durante el proceso de borurado en una aleación usada para prótesis (Campos-Silva y cols., 2019). Si bien este enfoque revolucionario aceleraba

◀ **Estocástico**
Se refiere a un comportamiento aleatorio e impredecible.

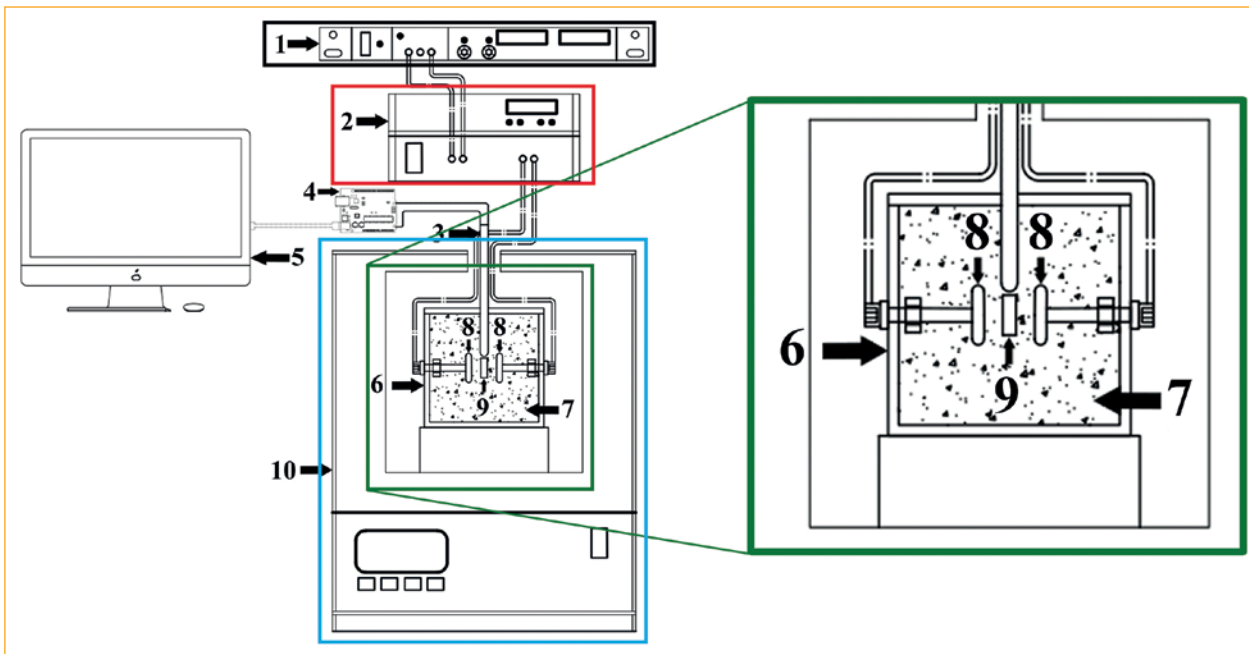


Figura 1. Diagrama esquemático del sistema utilizado en el bcdp: 1) Fuente de alimentación. 2) Dispositivo electrónico de control programable. 3) Sensor de temperatura. 4) Tarjeta de adquisición de datos. 5) Computadora empleada para monitorear los parámetros de proceso. 6) Contenedor de acero inoxidable. 7) Mezcla de polvo borurante. 8) Electrodo. 9) Muestra a tratar. 10) Horno eléctrico para tratamientos térmicos (Olivares-Luna y cols., 2024).

el tratamiento, enfrentaba el desafío de lograr una capa de boruros más uniforme en todo el material. Para conseguirlo, se colocaron electrodos dentro del contenedor del tratamiento a fin de crear una corriente eléctrica, pues se esperaba que este campo eléctrico ayudara a transportar boro hacia la superficie del material, acelerando el crecimiento de la capa protectora de boruros. Sin embargo, se dieron cuenta de que el espesor de la capa no era uniforme debido a la dirección de la corriente eléctrica.

El gran salto ocurrió en 2021, cuando Campos-Silva y su equipo implementaron un dispositivo electrónico que permitió cambiar la dirección del campo eléctrico de manera simétrica durante el tratamiento. Esto aseguró que los átomos de boro se transportaran de manera uniforme a todas las caras del material, logrando un crecimiento rápido y homogéneo de la capa de boruros.

■ ■ ■ **El papel de la ciencia mexicana en la tecnología de la borurización**

■ Imagina un sistema compuesto por cuatro elementos principales: un horno de convección (Figura 1,

en azul), una fuente de alimentación, un contenedor de acero con electrodos (Figura 1, en verde) y un dispositivo de control electrónico (Figura 1, en rojo). Este conjunto representa un importante avance tecnológico y un ejemplo del ingenio mexicano, desarrollado por investigadores del Instituto Politécnico Nacional.

El funcionamiento es fascinante: la fuente de alimentación envía energía eléctrica que es dirigida y controlada por el dispositivo electrónico, que no sólo cambia la dirección de la corriente, sino también protege al sistema de posibles problemas eléctricos. Los electrodos, conectados a través de alambres resistentes a altas temperaturas, ayudan a transmitir la energía necesaria para el proceso químico del borurado dentro del contenedor, que se sitúa en el horno, y mantenerlo a la temperatura adecuada.

■ ■ ■ **¿Qué observarías tú?**

■ En este proceso tiene un papel crucial un fenómeno conocido como electromigración, el cual alude a un movimiento forzado de átomos dentro de un material, debido a la corriente eléctrica. Durante

el borurado, este fenómeno ayuda a que los átomos de boro se transporten hacia el material, donde forman una capa de boruros que protege y fortalece el metal.

Aunque parezca que la corriente eléctrica hace todo el trabajo, es importante recordar que la temperatura del tratamiento es la que realmente controla el proceso. La corriente eléctrica “asiste” a la temperatura, haciendo que el proceso sea más eficiente (Rosales-López y cols., 2025).

¿Te imaginas siendo parte de este emocionante campo de la ciencia de materiales? ¿Qué crees que podríamos mejorar con esta técnica?

Jorge Luis Rosales López

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional.
Jrosales1401@alumno.ipn.mx

Mauricio Olivares Luna

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional.
molivares1800@alumno.ipn.mx

Iván Enrique Campos Silva

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional.
icampos@ipn.mx

Referencias específicas

- Campos-Silva, I., M. Ortiz-Domínguez, M. Keddam *et al.* (2009), “Kinetics of the formation of Fe₂B layers in gray cast iron: Effects of boron concentration and boride incubation time”, *Applied Surface Science*, 255:9290-9295. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.07.029>.
- Campos-Silva, I., O. Franco-Raudales, J. A. Meda-Campaña *et al.* (2019), “Growth Kinetics of CoB-Co₂B Layers Using the Powder-Pack Boriding Process Assisted by a Direct Current Field”, *High Temperature Materials and Processes*, 38:158-167. Disponible en: <https://doi.org/10.1515/htmp-2018-0013>.
- Campos-Silva, I., E. J. Hernández-Ramírez, A. Contreras-Hernández *et al.* (2021), “Pulsed-DC powder-pack boriding: Growth kinetics of boride layers on an AISI 316 L stainless steel and Inconel 718 superalloy”, *Surface and Coatings Technology*, 421:127404. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127404>.
- Castillo-Vela, L. E., I. Mejía-Caballero, J. L. Rosales-López *et al.* (2023), “The influence of a pulsed-DC field on the growth of the Fe₂B layer and the electrical behavior of the boriding media”, *Vacuum*, 210:111846. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111846>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (s. f.), “Residuos sólidos urbanos generados, por tipo de residuo. Metales (Miles de toneladas)”, *Banco de Indicadores*, Estados Unidos Mexicanos, 2008-2017. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/>, consultado el 7 de mayo de 2026.
- Meléndez, E., I. Campos, E. Rocha y M. A. Barrón (1997), “Structural and strength characterization of steels subjected to boriding thermochemical process”, *Materials Science and Engineering A*, 234-236:900-903. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00389-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00389-4).
- Olivares-Luna, M., J. L. Rosales-López, L. E. Castillo-Vela *et al.* (2024), “Insights on the Pulsed-DC Powder-Pack Boriding Process: The role of the electric charge on the growth of the boride layer and the semiconductor behavior of the boriding media”, *Surface and Coatings Technology*, 480:130588. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130588>.
- Rosales-López, J. L., M. Olivares-Luna, L. E. Castillo-Vela *et al.* (2025), “Insights on the Pulsed-DC Powder-Pack Boriding Process: Effect of current density and electric field implications on the FeB and Fe₂B growth kinetics”, *Surface and Coatings Technology*, 502:131965. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.131965>.