

## Borurización

### Boriding

*Martín Ortiz Domínguez<sup>a</sup>, Arturo Cruz Avilés<sup>b</sup>, Isaías Simón Marmolejo<sup>c</sup>*

#### Abstract:

Boriding is a thermochemical surface treatment that involves the diffusion of boron into a metal base, much like carburizing and nitriding. To carry out this process, the substrate must be in contact with a boron-rich substance (Available as solid powder, paste, liquid, or gas) and maintained at high temperatures, typically ranging from 700 to 1200°C. During this heating, boron atoms move from the surface into the metal lattice, engaging with the metal's atoms and any alloying elements to create borides. This interaction leads to the development of a borided layer. Additionally, fluidized bed techniques can be utilized for boriding. Alternative methods to achieve boride layer deposition without relying on thermochemical activation include plasma vapor deposition (PVD), ion implantation, and plasma spray techniques.

#### Keywords:

*Boriding, carburizing, nitriding, PVD*

#### Resumen:

La boruración es un tratamiento termoquímico de superficies que implica la difusión de boro en una base metálica, de forma muy similar a la carburación y la nitruración. Para llevar a cabo este proceso, el sustrato debe estar en contacto con una sustancia rica en boro (Disponible en forma de polvo sólido, pasta, líquido o gas) y mantenerse a altas temperaturas, que suelen oscilar entre los 700 y los 1200°C. Durante este calentamiento, los átomos de boro se desplazan desde la superficie a la red metálica, interactuando con los átomos del metal y cualquier elemento de aleación para crear boruros. Esta interacción conduce al desarrollo de una capa borurada. Además, pueden utilizarse técnicas de lecho fluidizado para la boruración. Entre los métodos alternativos para lograr la deposición de capas de boruro sin depender de la activación termoquímica se incluyen la deposición de vapor de plasma (PVD), la implantación de iones y las técnicas de pulverización de plasma.

#### Palabras Clave:

*Borurización, carburación, nitruración, PVD*

### Introducción

Las capas de boruro duro pueden desarrollarse en la mayoría de los metales y aleaciones de ingeniería, ofreciendo impresionantes propiedades físicas y químicas. Sin embargo, las aleaciones de aluminio y magnesio son excepciones debido a sus bajos puntos de fusión, mientras que el cobre no forma boruros estables. Estas capas de boruro poseen valores de dureza

extremadamente altos, hasta 2000 HV en el caso de los aceros y hasta 3370 HV en el TiB<sub>2</sub>, junto con un bajo coeficiente de fricción superficial. Estas características excepcionales se deben a los enlaces covalentes entre los átomos de boro. Por consiguiente, el tratamiento del acero mediante boruración supera con creces al carburado y la nitruración, ya que proporciona una resistencia notable frente a los metales fundidos, lo cual es crucial para las aplicaciones en matrices, así como a los ácidos y álcalis

<sup>a</sup> 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](mailto:martin_ortiz@uaeh.edu.mx)

<sup>b</sup> 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](mailto:arturo_cruz8085@uaeh.edu.mx)

<sup>c</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-2116-6192>, Email: [isaiasm@uaeh.edu.mx](mailto:isaiasm@uaeh.edu.mx)

diluidos no oxidantes (Bortec, 2017; Stewart, 1997; Ortiz-Domínguez et al. 2024; Ortiz-Domínguez et al. 2022; Sinha, 1991; Petrova y Suwattananont, 2005).

### Fundamentos científicos

El proceso de boronización de los aceros al carbono da lugar a la formación de dos fases de boruro distintas, principalmente FeB en la superficie y Fe<sub>2</sub>B debajo de ella. El espesor de la capa de boruro resultante sobre el sustrato de acero depende de la duración y la temperatura del tratamiento. El crecimiento de la capa de boruro viene determinado por la difusión del boro dentro de las subcapas FeB y Fe<sub>2</sub>B, que se produce perpendicularmente a la superficie de la probeta. Esta difusión conduce a un espesor de la capa de boruro que sigue una ley de crecimiento parabólico, lo que indica que la tasa de aumento del espesor disminuye con el tiempo.

$$d^2 = k(t - t_0) \quad (1)$$

donde  $d$ ,  $t$  y  $t_0$  son: el espesor de la capa de boruro, el tiempo de tratamiento y el tiempo de incubación, respectivamente, y  $k$  es la constante de velocidad de crecimiento del boro. Cuanto mayor sea la temperatura de boronización y/o el tiempo de tratamiento, mayor será el grosor de la capa de boruro (Morales et al. 2024; Ortiz-Domínguez et al. 2024; Ortiz-Domínguez et al. 2022; Sen et al. 2005).

### Influencia de los elementos de aleación

La composición y la estructura de las capas de boruro influyen en las propiedades mecánicas de las aleaciones boruradas. En las capas de boruro de hierro puro, aceros no aleados de bajo contenido en carbono y aceros de baja aleación se suele observar una configuración en diente de sierra. A medida que aumentan los elementos de aleación y/o el contenido de carbono en el acero, la morfología en diente de sierra de la capa de boruro se vuelve menos definida, dando paso a una interfaz más suave en los aceros de alta aleación.

Excepto el níquel, el cobalto y el manganeso, la mayoría de los elementos de aleación dificultan el crecimiento de la capa de boruro creando una barrera de difusión que limita la difusión del boro en el acero al tiempo que aumenta la cantidad de FeB dentro de la capa. Materiales como el carbono, el silicio y el aluminio son insolubles en la fase FeB-Fe<sub>2</sub>B y, por lo tanto, son empujados hacia delante durante el crecimiento de la capa. La presencia de silicio y aluminio tiende a favorecer la formación de estructuras frágiles.

Esto conduce al desarrollo de una fase de ferrita más blanda debajo de la capa de boruro, que tiene una baja capacidad de carga, un escenario conocido como el efecto cáscara de huevo. Para evitar la formación de ferrita en los aceros destinados a la boruración, es aconsejable que los contenidos de aluminio y silicio no superen el 0.8%. Además, durante el proceso de boruración, el carbono pasa de la capa de boruro a la matriz, reaccionando con el boro para producir borocementita Fe<sub>3</sub>(B,C) como una capa distinta situada entre el Fe<sub>2</sub>B y la matriz (Morales et al. 2024; Ortiz-Domínguez et al. 2024; Stewart 1997; Sinha 1991).

### Propiedades de las capas boruradas

#### Materiales ferrosos

El recubrimiento boronizado, reconocido por su elevada dureza y su bajo coeficiente de fricción superficial, desempeña un papel esencial a la hora de abordar mecanismos de desgaste clave como la adherencia, la abrasión y la fatiga superficial (Petrova et al. 2007). Esto resulta especialmente ventajoso para los componentes de acero con bajo contenido en carbono y de acero aleado de alta resistencia, que forman las fases Fe<sub>2</sub>B y FeB. Por el contrario, el acero inoxidable austenítico tiende a mostrar únicamente la fase FeB pulida debido a la importante cantidad de elementos de aleación presentes.

La morfología de las capas de boruro suele parecerse a una estructura en diente de sierra, dependiendo de la composición de la aleación, que presenta una capa exterior de FeB ortorrómbico que contiene un 16.3 wt% en peso de boro y posee una dureza que oscila entre 1900 y 2100 HV. Bajo ella se encuentra una capa interior de Fe<sub>2</sub>B tetragonal centrado en el cuerpo, que contiene un 8.83 wt% en peso de boro y posee una dureza de entre 1800 y 2000 HV. La interfaz irregular típica de la capa borurada y el sustrato en aceros de baja aleación surge de la significativa anisotropía en el coeficiente de difusión del boro dentro de la red tetragonal (Golpalakrishnan, Ramakrishnan, Shankar, & M., 2002). A medida que los átomos de boro migran hacia el interior desde la superficie del sustrato, se produce primero la formación de Fe<sub>2</sub>B, siguiendo un mecanismo de crecimiento en tres pasos:

1.- El crecimiento comienza principalmente en la superficie del sustrato que está en contacto con la fuente de boruro, dando lugar a la formación de cristales aciculares de Fe<sub>2</sub>B. Estos cristales suelen tener su eje [001] orientado en paralelo a la superficie del sustrato, lo

que da lugar a una red de cristales con orientaciones variadas.

2.- A medida que los cristales superficiales entran en contacto entre sí, se ven obligados a crecer hacia el interior debido a la red metálica, lo que ayuda a mantener la forma acicular.

3.- A medida que la capa sigue espesándose, la mayoría de los cristales ajustan su eje de crecimiento (dirección [001]) para volverse perpendiculares a la superficie de reacción. Esta reorientación ayuda a minimizar la resistencia mecánica de los cristales vecinos en crecimiento, dando como resultado final una capa de Fe<sub>2</sub>B altamente orientada a lo largo de la dirección [002] (Ortiz-Domínguez et al. 2024; Martini y Palombarini 2004).

El coeficiente de dilatación del Fe<sub>2</sub>B ( $2.9 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ ) es menor que el del hierro ( $5.7 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ ), lo que hace que la fase Fe<sub>2</sub>B permanezca en compresión tras el enfriamiento. Por el contrario, el coeficiente de dilatación del FeB ( $8.7 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ ) es mayor que el del hierro y el del Fe<sub>2</sub>B, lo que hace que se encuentre en tensión. Esta diferencia en la tensión residual puede crear condiciones propicias para la formación de grietas en la interfaz FeB-Fe<sub>2</sub>B, especialmente cuando el componente experimenta un choque térmico y/o mecánico (Dearnley y Bell 1985; Sinha 1991).

Aunque en la mayoría de las capas de boruro hay pequeñas cantidades de FeB, no son perjudiciales si no son continuas. Sin embargo, cuando se forma una capa continua de FeB, puede provocar un desprendimiento de capas. La dureza de la capa de boruro en el acero al carbono liso suele oscilar entre 1600 y 2000 HV y permanece estable hasta 650°C, en contraste con la dureza del acero carburizado, que suele rondar los 650-950 HV. Esta mayor dureza hace que los aceros boronizados sean especialmente resistentes al desgaste abrasivo. Además, la presencia de capas de boruro disminuye la probabilidad de soldadura en frío, lo que mejora las propiedades de desgaste adhesivo.

El boronizado también mejora la resistencia de los aceros aleados a la corrosión de los ácidos clorhídrico, sulfúrico y fosfórico. Cabe señalar que los aceros carburizados pueden someterse a un tratamiento de boronización seguido de un tratamiento de endurecimiento posterior sin comprometer la calidad de la capa de boruro. La mayoría de los aceros para herramientas también se pueden reendurecer después de la boruración, siempre que la temperatura de austenitización se mantenga por debajo de 1100°C, ya que superar esta temperatura podría provocar la fusión del eutéctico de boruro de hierro

(Ortiz-Domínguez et al. 2024; Stewart 1997; Petrova et al. 2007).

El grosor de los revestimientos boronizados varía en función del sustrato utilizado. Por ejemplo, durante un tratamiento de 4 horas a 850 °C, el acero liso con bajo contenido en carbono AISI 1018 muestra una estructura de recubrimiento de dientes de sierra de boro con un grosor medio de 75.76 µm. Del mismo modo, el AISI 4340, que es un acero de aleación de alta resistencia, también muestra esta estructura de dientes de sierra, pero con una profundidad media ligeramente menor de 57.40 µm, presentando fases FeB y Fe<sub>2</sub>B en la capa. Por el contrario, el acero inoxidable AISI 304 mostró una capa plana y más fina, con una profundidad media de tan solo 10.21 µm.

Además, una distinción significativa entre el acero de baja aleación y el acero inoxidable 304 está en la composición de las capas. Tanto el AISI 1018 como el AISI 4340 desarrollan una capa con una fase externa FeB y una fase interna Fe<sub>2</sub>B, mientras que el acero inoxidable 304 presenta únicamente una capa FeB. Las pruebas de microdureza revelaron que los aceros de baja aleación presentaban valores de dureza que oscilaban entre 1.400 y 2200 HV para el AISI 1018, entre 1800 y 2200 HV para el AISI 4340 y entre 1,434 HV para el acero inoxidable AISI 304 (Morales et al. 2024; Stewart 1997; Petrova et al. 2007).

Además, la resistencia a la oxidación de todos los tipos de acero mejoró cuando se sometieron a condiciones de 600°C (Petrova and Suwattananont 2005).

### Metales no ferrosos

Los materiales no féreos, como el titanio, el níquel, el cobalto y las aleaciones a base de molibdeno, junto con los metales refractarios, sus aleaciones y los carburos cementados, pueden sufrir boruración. Entre ellos, las aleaciones de níquel y cobalto son las que se boruran con más frecuencia. La dureza de los boruros de níquel varía entre 900 y 1600 HV, y presentan propiedades de desgaste y corrosión similares a las de los boruros de hierro.

Un reto notable de las aleaciones de níquel es su vulnerabilidad al desgaste adhesivo, sobre todo en entornos con electrolitos ácidos calientes, que pueden erosionar la capa superficial de óxido de níquel-cromo. En tales condiciones, componentes como compuertas, bolas, asientos o actuadores lineales roscados pueden sufrir agarrotamiento, gripado o desgaste por rozamiento, incluso con una presión de contacto moderada.

Los problemas derivados de la eliminación de la capa superficial de óxido de níquel-cromo no se limitan a los entornos corrosivos; cualquier acción que altere esta fina capa protectora supone un riesgo en aplicaciones con contacto entre componentes. Esto puede incluir abrasiones por partículas o movimientos de deslizamiento, que pueden dañar la capa de óxido. Además, las agresiones químicas, como la exposición a gases reductores calientes procedentes de los tubos de escape, también pueden deteriorar esta capa protectora, dando lugar a un desgaste adhesivo caracterizado por un elevado coeficiente de fricción.

Afortunadamente, estos retos se han abordado, o reducido significativamente, en determinadas aplicaciones mediante el proceso de boruración. Esta técnica de transformación altera la capa superficial de los componentes de aleación de níquel, convirtiéndola en un complejo compuesto intermetálico de boruro de níquel (Curtis 1993).

La capa de boruro, cuyo espesor suele oscilar entre 0.0125 y 0.05 mm en las aleaciones de níquel, actúa como una fuerte barrera mecánica que impide el contacto directo entre metales. Los componentes fabricados con aleaciones de níquel boruradas son resistentes a problemas como el agarrotamiento, el gripado o el desgaste por fricción, que a menudo afectan a los componentes de aleaciones de níquel en entornos difíciles (Curtis 1993). En el caso de las aleaciones con base de níquel, como Inconel 625 e Inconel 718, puede observarse una estructura multicapa boronizada de  $Ni_2B$ ,  $Ni_3B$  y  $Ni_4B_3$ . En el caso de las aleaciones de titanio, se observa una capa rica en boro de TiB monofásico.

Sin embargo, las técnicas tradicionales de boruración en baño salino y en paquete son inadecuadas para tratar el titanio y los metales refractarios, ya que provocan la oxidación del sustrato y la posible corrosión por los compuestos activadores de los paquetes comerciales. Estos problemas pueden provocar porosidad en la capa de boruro. Por consiguiente, el enfoque más favorable es la boruración en paquete con boro amorfo sin oxígeno (junto con una atmósfera de vacío o argón) o la boruración con gas utilizando mezclas de gas  $H_2-BCl_3$ .

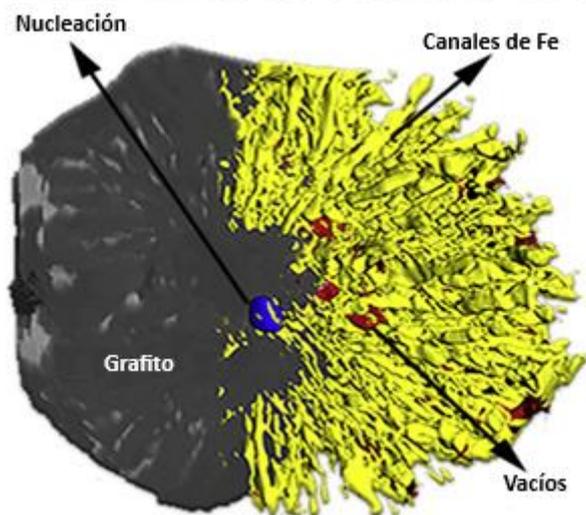
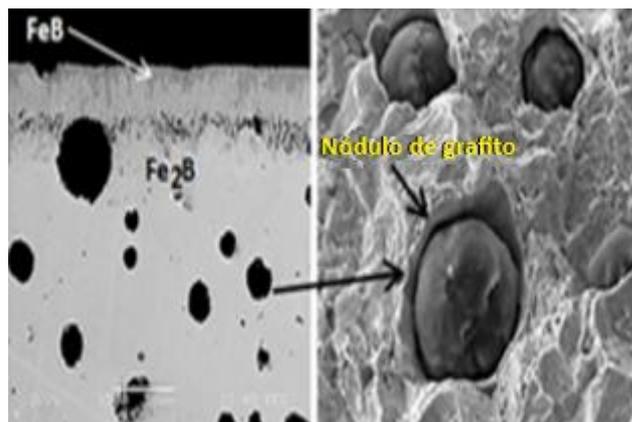


Figura 1. Aspecto de la capa depositada por tratamiento de boruración en fundición dúctil austemplado, mediante el proceso de boruración en paquete. Fuente: Elaboración propia.

La microdureza de las capas de boruro formadas sobre titanio y metales refractarios es significativamente mayor en comparación con la microdureza de las capas de boruro formadas sobre cobalto y níquel. La introducción de elementos de aleación adecuados puede mejorar la dureza de las capas de boruro sobre todos estos metales (Morales et al. 2024; Ortiz-Domínguez et al. 2024; Ortiz-Domínguez et al. 2022; Sinha 1991; Petrova et al. 2007).

La incorporación de elementos de aleación en el níquel, el cobalto y el titanio ralentiza la velocidad de crecimiento de las capas de boruro. Las propiedades de desgaste de los carburos sinterizados que contienen al menos un 6% de ligante de níquel o cobalto pueden mejorarse mediante la boruración, ya que el boro es aceptado por los ligantes blandos de cobalto y níquel. Estos elementos forman boruros que envuelven las partículas de carburo de wolframio, aumentando así la dureza general de la aleación sin cambiar las partículas en sí. Por el contrario, las capas de boruro en tántalo, niobio, wolframio,

molibdeno y níquel no muestran la morfología en forma de diente que se observa en el titanio (Sinha 1991; Petrova et al. 2007).

Las Figuras 1, 2 y 3 ilustran las capas depositadas mediante tratamiento de boruración en los siguientes sustratos: fundición dúctil austemplado, acero inoxidable AISI 304 y acero para herramientas AISI H13 (Sinha 1991; Galibois et al. 1980; Fichtl 1981).

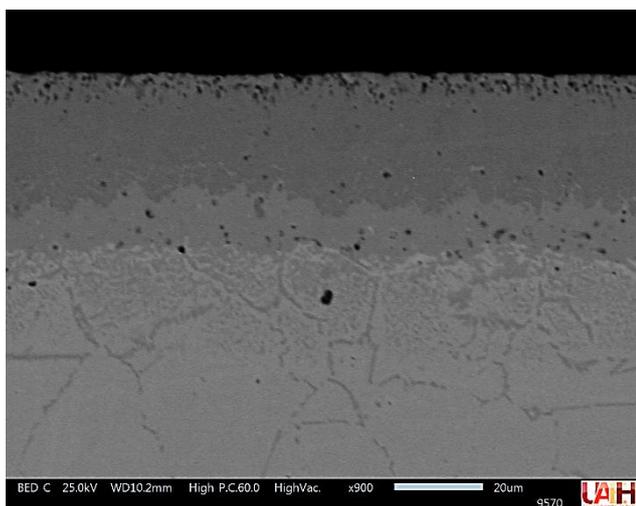


Figura 2. Aspecto de la capa depositada por tratamiento de boruración en acero inoxidable AISI 304, mediante el proceso de boruración en paquete. Fuente: Elaboración propia.

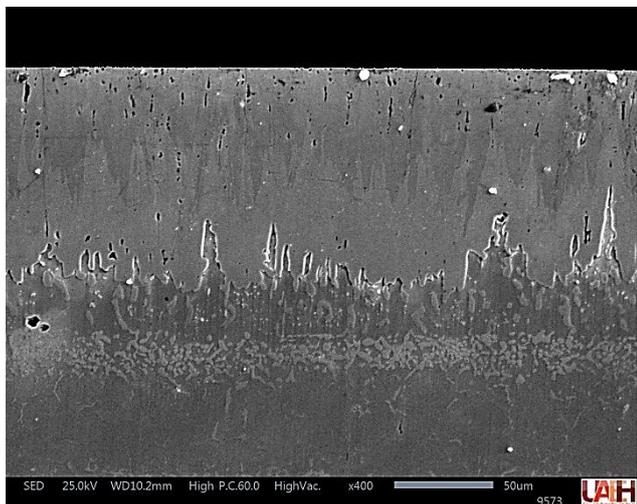


Figura 3. Aspecto de la capa depositada por tratamiento de boruración en acero para herramientas AISI H13, mediante el proceso de boruración líquida. Fuente: Elaboración propia.

## Técnicas de boruración

### Boruración en fase sólida

El borurado en caja es la técnica más utilizada debido a su relativa seguridad y sencillez. Una de las principales ventajas de este método es que requiere un equipo mínimo, por lo que puede utilizarse en casi cualquier taller de templado que disponga de hornos para operaciones de cementación.

El proceso en sí consiste en incrustar los componentes en polvos borurantes que consisten principalmente en fuentes de boro como el carburo de boro ( $B_4C$ ), el ferroboro o el boro amorfo. Estos polvos se combinan con diluyentes inertes como  $SiC$  o  $Al_2O_3$ , junto con un compuesto activador que puede ser  $KBF_4$ ,  $NaBF_4$ ,  $(NH_4)_3BF_4$ ,  $NH_4Cl$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $BaF_2$  o  $Na_2B_4O_7$ . Además, ciertas formulaciones desarrolladas en el Institut fur Harterei Technik de Bremen sirven de base para polvos comerciales como «Ekabor» y «Durboride». Estos productos comerciales suelen tener una composición de 5 wt% en peso de  $B_4C$ , 5 wt% en peso de  $KBF_4$  y 90 wt% en peso de  $SiC$  (Ortiz-Domínguez et al. 2020; Morales et al. 2024; Ortiz-Domínguez et al. 2024; Ortiz-Domínguez et al. 2022).

A medida que aumenta el contenido de  $B_4C$ , la acción de boruración se hace más fuerte y aumenta la cantidad de  $FeB$  que constituye la capa. La proporción considerablemente menor del boruro  $FeB$  formado por la técnica del polvo conduce a una ausencia de agrietamiento debido a una disminución de la tensión residual ( $Fe_2B$  = tensión de compresión y  $FeB$  = tensión de tracción). Esto representa una gran ventaja de esta técnica sobre la técnica de la pasta (Ortiz-Domínguez et al. 2024; Sinha 1991; Galibois et al. 1980; Fichtl 1981; Kulka M., Current Trends in Boriding Techniques, 2019).

### Borurado en pasta

Esta técnica se utiliza comercialmente sobre todo cuando la boruración en paquete plantea dificultades, como cuando resulta difícil alcanzar con un polvo características reentrantes específicas o cuando el proceso de enmascaramiento resulta demasiado costoso o requiere demasiado tiempo. Normalmente, las pastas de borurizado consisten en una suspensión de  $B_4C$  y criolita ( $Na_3AlF_6$ ) o una mezcla de polvo de borurizado convencional ( $B_4C-KBF_4-SiC$ ) combinada con un aglutinante orgánico como nitrocelulosa en acetato de butilo o una solución acuosa de metilcelulosa. Estas pastas comerciales se presentan en forma viscosa y soluble en agua, lo que permite diversas consistencias adecuadas para el cepillado o la pulverización. Tras aplicar la pasta, se deja secar y se aplican capas

adicionales hasta alcanzar un espesor de 1-2 mm. A continuación, los componentes se someten a calentamiento -ya sea inductivo, resistivo o en hornos convencionales- a temperaturas que oscilan entre 800 y 1000°C, siempre bajo atmósfera protectora (Ortiz-Domínguez et al. 2024; Ortiz-Domínguez et al. 2022; Sinha 1991).

### Boruración en fase líquida

Existen dos técnicas de tratamiento de boruración: (a) químico y (b) electrolítico, que suelen realizarse a temperaturas superiores a 900°C. El tamaño de los componentes y su complejidad están limitados por las dimensiones del baño, ya que deben soportar el choque térmico durante la inmersión y la retirada; de lo contrario, pueden producirse distorsiones y grietas. Tras el tratamiento, es necesario eliminar el exceso de sal y boro sin reaccionar, lo que puede resultar costoso y llevar mucho tiempo. Además, los costes de mantenimiento de ambas técnicas son significativos porque es necesario recargar regularmente la sal debido al aumento de la viscosidad del baño causado por la acumulación de productos de reacción, lo que puede afectar negativamente a la consistencia de la boruración (Dearnley y Bell, 1985).

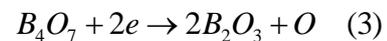
### Boruración en baño salino químico

La mayoría de los tratamientos consisten en reducir el bórax fundido ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) a temperaturas entre 900-950°C para disminuir la viscosidad del baño, lo que facilita una transferencia adecuada de calor y masa. La práctica no emplea SiC para la reducción del bórax debido a su tendencia a aumentar la viscosidad del baño. En su lugar, se suele añadir  $\text{B}_4\text{C}$ , a menudo en torno al 30 wt% en peso. Estudios recientes sugieren que los baños de bajo coste con bórax, complementados con ferrotitanio y aluminio, pueden producir eficazmente capas de alta calidad. El proceso de boronización puede mejorarse aún más sustituyendo hasta un 20 wt% en peso de  $\text{B}_4\text{C}$  por ferroaluminio, ya que actúa como reductor más eficaz. En particular, se obtuvieron mejores resultados con una mezcla de baño salino compuesta por un 55 wt% en peso de bórax, un 40-50 wt% en peso de ferroboro y un 4-5 wt% en peso de ferroaluminio. También existe la posibilidad de añadir simplemente aluminio al bórax para la formación de la capa de boruro, en la que el bórax sirve no sólo como medio para disolver los constituyentes de la capa anterior, sino también como proveedor de boro, participando así activamente en el proceso. La capa de boruro se forma mediante reacciones entre el hierro del sustrato y el boro generado a partir de la reducción química del bórax por el aluminio, siguiendo procesos como  $\text{Fe} + \text{B} = \text{FeB}$  o  $2\text{Fe} + \text{B} = \text{Fe}_2\text{B}$  (Allaoui,

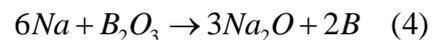
Bouaouadja, & Saindeman, 2006; Dearnley y Bell 1985; Sinha 1991).

### Boruración electrolítica

Se trata de la técnica de boruración comercial más antigua y fue ideada en la década de 1930 en la URSS. El recipiente, normalmente de grafito, contiene bórax fundido, que se calienta por resistencia o mediante una bobina de inducción. El componente, unido al cátodo, y el ánodo de grafito se sumergen en el bórax fundido mientras se hace pasar corriente eléctrica entre ellos. En su estado fundido, el bórax está formado por iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ) e iones de tetraborato ( $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$ ), que migran hacia el cátodo y el ánodo debido al campo eléctrico. Los iones de tetraborato se neutralizan y se reducen a ácido bórico, liberando oxígeno naciente en el proceso.



El oxígeno reacciona con el ánodo de grafito, formando CO. Los iones de sodio se neutralizan en la región del cátodo y reaccionan con el ácido bórico:



De este modo, se crea un alto potencial de boruración en las proximidades del cátodo (Chernov, Anfinogenov, & Veselov, 1999; Sinha 1991).

### Boruración en fase gaseosa

La boruración en fase gaseosa puede realizarse mediante la descomposición térmica del diborano ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ), la reducción de un haluro de boro, a menudo  $\text{BCl}_3$  con hidrógeno, o utilizando compuestos orgánicos de boro como  $(\text{CH}_3)_3\text{B}$  y  $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{B}$ . Sin embargo, el diborano no es comercialmente viable debido a su toxicidad (con un límite tóxico inferior de 0,1 ppm, en contraste con los 10 ppm del altamente peligroso cianuro de hidrógeno) y a su naturaleza explosiva, que requiere equipos complejos. Además, el diborano sigue siendo bastante caro, incluso cuando se diluye con hidrógeno (Kulka, Makuch, PerteK, & Maldzinski, 2013; Makuch, Kulka, & Mikołajczak, 2017; Sinha 1991).

### Boruración por plasma

La boruración por plasma es eficaz tanto para aleaciones ferrosas como no ferrosas. Este proceso utiliza mezclas de gases como  $\text{BCl}_3\text{-H}_2\text{-Ar}$  o  $\text{B}_2\text{H}_6\text{-H}_2$  en una cámara de descarga luminosa para facilitar la difusión del boro en el sustrato. También pueden emplearse gases alternativos como  $\text{B}(\text{OCH}_3)_3$  y  $\text{BF}_3$ . En particular, la mezcla  $\text{BCl}_3\text{-H}_2\text{-Ar}$  permite el tratamiento a temperaturas más bajas (alrededor de 600°C), lo que resulta más eficiente

energéticamente en comparación con otros métodos y proporciona un mejor control tanto de la composición como de la profundidad de la capa borurada. Además, los tiempos de tratamiento son más cortos debido al mayor potencial de boro en comparación con el proceso de paquete. Sin embargo, un inconveniente importante de la boruración por plasma es la extrema toxicidad de los gases implicados, que ha limitado su adopción comercial (Bartsch & Leomhardt, 1999); Kaestner, OIFe, & Rie, 2001; Sinha 1991).

### **Boruración multicomponente**

Las técnicas mencionadas implican la difusión consecutiva de boro junto con uno o varios elementos metálicos en las regiones superficiales y cercanas a la superficie de sustratos metálicos, principalmente acero. Aunque los baños de sales electrolíticas y los métodos en pasta son opciones viables, la atención suele centrarse en los métodos en paquete. Los procesos de boruración multicomponente pueden ejecutarse en pasos simultáneos o consecutivos. Esto incluye la boruración y metalizaciones simultáneas (en las que se difunden especies metálicas), así como la boruración conductora seguida de metalización, o viceversa. A pesar de las propiedades beneficiosas que se consiguen, la boruración multicomponente se ha aplicado en casos limitados dentro de la industria.

Las principales formas de boruración multicomponente son la borocromización, la boroaluminización, la borosiliconización y la borovanadización, y se están desarrollando nuevos procesos. Los resultados preliminares sugieren que el uso de borocromo-titanio (denominado borocromotitanizado) puede dar lugar a una dureza superficial que alcanza los 4000 HV, lo que es notable para producir algunas de las superficies más duras disponibles.

Este método de boruración multicomponente da lugar a revestimientos caracterizados por una elevada resistencia al desgaste y a la oxidación, una mayor protección contra la corrosión y una mayor resistencia a la fatiga. Por lo general, se obtienen resultados óptimos cuando el tratamiento de boruración se complementa con un tratamiento de metalización. Se cree que las capas resultantes consisten en una solución sólida de boruro de hierro incrustado en hierro, junto con el metal adicional introducido mediante el proceso de metalizado (Dearnley y Bell, 1985).

### **Aplicaciones**

La elevada dureza de los materiales borurados los hace idóneos para resistir al desgaste, en particular a las

partículas abrasivas. Los componentes utilizados en el desgaste por deslizamiento pueden ver prolongada su vida útil gracias al borurado (por ejemplo, los anillos de acero utilizados en las máquinas de hilado textil, las guías de hilo textil de cable de acero y los bogies de la suspensión).

Se ha estudiado la resistencia al desgaste abrasivo del acero inoxidable borurado y del Ti-6Al-4 V para su posible aplicación como revestimiento resistente a la erosión en palas de rotor de borde de ataque para helicópteros. Las pruebas realizadas con polvo de la carretera han demostrado que la vida útil de los materiales se multiplica por 50 en comparación con los no tratados. Una aplicación tradicional de la boruración es la protección de los moldes de acero utilizados para fabricar ladrillos cerámicos. Esta técnica también se emplea eficazmente para proteger moldes de acero y tornillos de extrusión en la producción de plásticos que contienen cargas y pigmentos abrasivos, como  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $B_4C$  y mica. Además, estos materiales presentan una buena resistencia a los humos de HCl producidos durante la descomposición del PVC, lo que aumenta su valor en diversas aplicaciones industriales.

La resistencia a la corrosión de los codos de tuberías de acero de alta aleación utilizados para el transporte de monómero de cloruro de vinilo, que contiene trazas de vapor de HCl, se ha cuadruplicado mediante boruración. Las capas de boruro desarrolladas sobre acero al carbono liso también ofrecen resistencia al  $H_2SO_4$  diluido y al  $H_3PO_4$ . Sin embargo, las propiedades de fatiga por rodadura de los aceros aleados borurados son muy pobres en comparación con los aceros carburizados y nitrurados a altas cargas de contacto (2000 N), y probablemente por este motivo la boruración de engranajes se limita a los de diseño de tornillo en los que se minimiza la carga transversal de los dientes del engranaje (Dearnley y Bell 1985).

El borurizado puede utilizarse como revestimiento multifuncional en diversas aplicaciones de automoción, como engranajes, válvulas, émbolos y discos de acero. También es eficaz en maquinaria de producción para componentes como tornillos de extrusoras, pernos, boquillas, transmisiones de engranajes, bombas y matrices de herramientas (Petrova et al. 2007). A continuación, se enumeran varias aplicaciones que ponen de relieve el uso de tratamientos de boruración para distintos tipos de aceros y piezas mecánicas (Fichtl 1981).

- Acero **AISI 1020** - Engranajes, ejes de bombas

- Acero **AISI 1043** - Pasadores, anillos guía, discos de rectificado, pernos, insertos de fundición, boquillas, mangos
- Acero **AISI 1138** - Manguitos de protección de ejes, mandriles
- Acero **AISI 1042** - Elementos de remolino, boquillas (para quemadores de aceite), rodillos, pernos, placas de compuerta, placas de compuerta
- Acero **AISI W1** - Mandriles de sujeción, barras guía
- Acero **AISI D3** - Casquillos, herramientas de prensado, placas, mandriles, punzones, matrices
- Acero **AISI C2** - Matrices de embutición, expulsos, guías, pasadores de inserción, placas de compuerta, matrices de doblado
- Acero **AISI H11** - Émbolos, cilindros de inyección, bebederos
- Acero **AISI H13** - Orificios, lingoteras, matrices superiores e inferiores y matrices para conformado en caliente, discos
- Acero **AISI H10** - Matrices de moldeo por inyección, rellenos, matrices superiores e inferiores y matrices para conformado en caliente
- Acero **AISI D2** - Rodillos roscados, rodillos de conformado y prensado, matrices y troqueles de prensado, rodillos de grabado
- Acero **AISI D6** - Rodillos de enderezado
- Acero **AISI S1** - Matrices de prensado y embutición, mandriles, camisas, troqueles, anillos de cuello
- Acero **AISI D2** - Matrices de embutición, rodillos para laminado en frío
- Acero **AISI L6** - Matrices de extrusión, pernos, insertos de fundición, matrices de forja, forjas de caída, matrices de estampado, almohadilla de presión y matrices
- Acero **AISI 02** - Moldes, matrices de doblado, herramientas de prensa, rodillos de grabado, casquillos, matrices de embutición, barras guía, discos, punzones de perforación
- Acero **AISI E52100** - Bolas, rodillos, barras guía, guías piezas para equipos de fundición de metales no ferrosos, piezas para herramientas no magnetizables (tratables térmicamente).
- Acero **AISI 4140** - Herramientas y matrices de prensado, tornillos de extrusión, rodillos, barriles de extrusión, válvulas antirretornos
- Acero **AISI 4150** - Placas base de boquillas
- Acero **AISI 5115** - Ruedas dentadas helicoidales, barras guía, columnas guía
- Acero **AISI 6152** - Placas de empuje, dispositivos de sujeción, muelles de válvulas, contactos de muelles
- Acero **AISI 302** - Cajas de tornillos, casquillos
- Acero **AISI 316** - Pantallas de agujeros perforados o ranurados, piezas para las industrias textil y del caucho
- Acero **AISI 410** - Componentes de válvulas, racores
- Acero **AISI 420** - Componentes de válvulas, vástagos de émbolo, racores, guías, piezas para plantas químicas, ejes, husillos, válvulas

### Conclusiones

En conclusión, la borurización es un proceso termoquímico altamente eficaz para mejorar las propiedades superficiales de los metales, especialmente en términos de dureza, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión. A través de la difusión controlada de átomos de boro en la superficie de un sustrato metálico, se logra formar una capa de boruros extremadamente duros, lo que extiende significativamente la vida útil de las piezas tratadas.

Este tratamiento es ideal para aplicaciones donde los componentes están sometidos a condiciones extremas de fricción, abrasión o ambientes agresivos. Sin embargo, debido a su naturaleza a alta temperatura, requiere precauciones específicas para evitar distorsiones o formación de capas frágiles.

En resumen, la borurización representa una solución técnica valiosa para industrias que demandan componentes con alto rendimiento superficial, combinando durabilidad, resistencia química y estabilidad térmica.

### Referencias

- Allaoui, O., Bouaouadja, N., & Saindernan, G. (2006). Characterization of boronized layers on a XC38 steel. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 3475-3482. doi:<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.238>
- Bartsch, K., & Leomhardt, A. (1999). Formation of iron boride layers on steel by d.c.-plasma boriding and deposition processes. *Surface and Coatings Technology*, 116-119, 386-390. doi:<https://doi.org/10.1016/>
- Bortec. (7 de Julio de 2017). [bortec.de](https://bortec.de/en/boronizing/). Obtenido de Bortec: <https://bortec.de/en/boronizing/>

Acero **AISI 4317** - Engranajes cónicos, engranajes de tornillo y rueda, ejes, componentes de cadenas

- Chernov, Y. B., Anfinogenov, A. I., & Veselov, I. N. (1999). Special features of the technology of boronizing steel in a calcium chloride melt. *Metal Science and Heat Treatment*, 41, 511-515. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02466541>
- Curtis, D., (1993). Case hardening nickel alloys, *Mater. Design* 14(6), 349–350.
- Dearnley, P.A., Bell, T., (1985). *Surf. Eng.* 3, 203–217.
- Fichtl, W., (1981). Boronizing and its practical applications, *Mater. Eng.* 2, 276–286.
- Galibois, A., Boutenko, O., Voyzelle, B., (1980). Mécanisme de Formation des Couches Borurées Sur Les Aciers a Haut. Carbone-II – Technique des Poudres. *Acta Metall.* 28, 1765–1771
- Golpalakrishnan, P., Ramakrishnan, S. S., Shankar, P., & M., P. (2002). Interrupted boriding of medium-carbon steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1475–1485. doi:<https://doi.org/10.1007/s11661-002-0070-0>
- Kaestner, P., Olf, J., & Rie, K.-T. (2001). Plasma-assisted boriding of pure titanium and TiAl6V4. *Surface and coatings Technology*, 142-144, 248-252. doi:[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01244-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01244-0)
- Kulka, M. (2019). *Current Trends in Boriding Techniques*. Poznan, Poland: Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-06782-3>
- Kulka, M., Makuch, N., Perte, K., & Maldzinski, L. (2013). Simulation of the growth kinetics of boride layers formed on Fe during gas boriding in H<sub>2</sub>-BCl<sub>3</sub> atmosphere. *Journal of Solid State Chemistry*, 199, 196-203. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jssc.2012.12.029>
- Makuch, N., Kulka, M., & Mikołajczak, D. (2017). Corrosion Behavior of Hard Boride Layer Produced on Nimonic 80A-Alloy by Gas Boriding. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2059-2527. doi:<https://doi.org/10.1007/s12666-017-1113-y>
- Martini, C., Palombarini, G., (2004). Mechanism of thermochemical growth of iron borides on iron, *J. Mater. Sci.* 39, 933–937.
- Morales-Robles, Á.J.; Ortiz-Domínguez, M.; Gómez-Vargas, O.A.; Moreno-González, M.d.l.L., (2024) Boronize Coatings Studied with a New Mass Transfer Model. *Materials*, 17, 5309. <https://doi.org/10.3390/ma17215309>
- Ortiz-Domínguez, M.; Morales-Robles, Á.J.; Gómez-Vargas, O.A.; Moreno-González, G., (2024). Surface Growth of Boronize Coatings Studied with Mathematical Models of Diffusion. *Metals*, 14, 670. <https://doi.org/10.3390/met14060670>
- Ortiz-Domínguez, M.; Gómez-Vargas, O.A.; Bárcenas-Castañeda, M.; Castellanos-Escamilla, V.A., (2022). Comparison and Analysis of Diffusion Models: Growth Kinetics of Diiron Boride Layers on ASTM A283 Steel. *Materials*, 15, 8420. <https://doi.org/10.3390/ma15238420>
- Ortiz-Domínguez, M., Morales-Robles, Á., Gómez-Vargas, O., & Solís-Romero, J. (2020). Recycling of the powder-pack boriding mixture: Microstructural characterization of Fe<sub>2</sub>B Layers on ASTM A36 Steel. *Microscopy and Microanalysis*, 26(S2), 2220-2222. doi:10.1017/S143192762002084X
- Petrova, R.S., Suwattananont, N., (2005). Surface modification of ferrous alloys with boron, *J. Electron. Mater.* 34(5), 575–582.
- Petrova, R.S., Suwattananont, N., Samardzic, V., (2007). The effect of boronizing on metallic alloys for automotive applications, *J. Mater. Eng. Perform.* 31, 1059–9495, ASM International
- Sen, S., Sen, U., Bindal, C., (2005). The growth kinetics of borides formed on boronized AISI 4140. *VACUUM – Surf. Eng. Surf. Instrum. Vac. Technol.* 77, 195–202.
- Sinha, A.K., (1991). *Metals Handbook- Heat Treating-Boriding (boronizing) of Steels*, vol. 4 (ASM International, Materials Park), pp. 978–999
- Stewart, K., (1997). Boronizing protects metals against wear. *Adv. Mater. Process.* 3, 23–25