

Modificación superficial del acero AISI 4340 mediante tratamiento termoquímico

Resumen

Este estudio evalúa el borurado por empaquetamiento en polvo a 950 °C durante 4 horas en acero AISI 4340, con el fin de observar sus mejoras mecánicas. Los análisis microestructurales y de microdureza mostraron un aumento notable de la dureza superficial, triplicando la del material base. Además, se confirmó la formación de boruros de hierro y la presencia de boro en la superficie, evidenciando mejoras mecánicas significativas.

Introducción

Los tratamientos termoquímicos mejoran las propiedades de los materiales (Czerwinski, 2012), destacando el borurado, que satura la superficie con átomos de boro mediante difusión térmica (Campos-Silva & Rodríguez-Castro, 2015; Kulka, 2019). Este proceso, realizado por empaquetamiento en polvo, se lleva a cabo a temperaturas entre 850 y 1200 °C (Hosmani et al., 2014; Petrova, 2012) para lograr la formación de fases como FeB y Fe₂B (Sen et al., 2005; Carrera Espinoza et al., 2024). Gracias a su incremento en la dureza y resistencia al desgaste (Safarpour & Ekrami, 2022), el borurado es útil en aplicaciones industriales exigentes (Bourithis et al., 2002; Czerwinski, 2012).

Metodología

El acero AISI 4340 fue tratado térmicamente mediante templado a 850 °C por 2 horas y revenido a 250 °C por 2 horas. Posteriormente, se aplicó el proceso de borurado por empaquetamiento en polvo a 950 °C durante 4 horas. Para su caracterización, se analizaron la microestructura con un microscopio óptico ZEISS STEMI 508, la adherencia de la capa mediante ensayos VDI 3198 con un equipo OMAG 206 EX-2, y la dureza superficial con pruebas de microdureza Vickers usando un microduruómetro Micromet 6010.

Resultados

En la Ilustración 1 se presenta la micrografía del acero AISI 4340 sometido únicamente a tratamiento térmico convencional de templado y revenido, la cual sirve como referencia para comparar con el tratamiento superficial. En contraste, la Ilustración 2 muestra el acero tras el borurado, donde se observa la formación clara de la capa borurada.

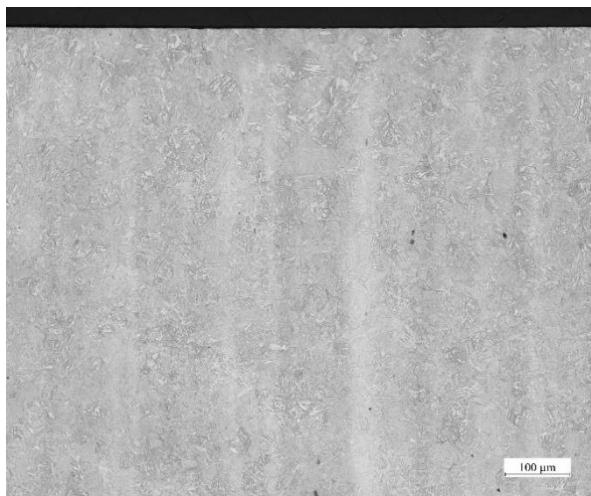


Ilustración 1: Micrografía del acero AISI 4340 (20 x)

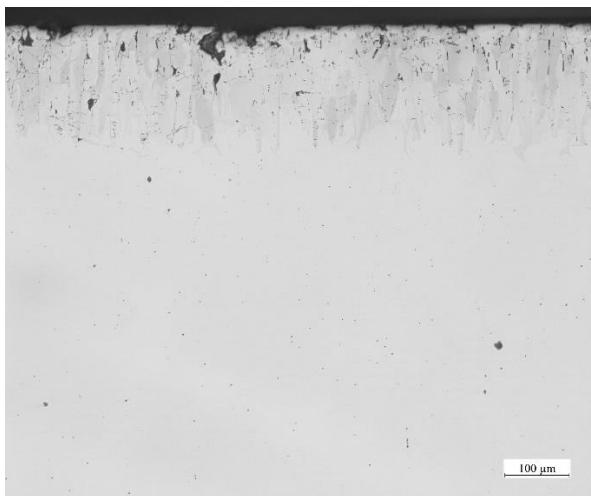


Ilustración 2: Capa borurada en el acero AISI 4340 (20 x)

Las pruebas de microdureza Vickers mostraron una diferencia significativa entre ambas muestras. El acero tratado solo con templado y revenido presentó una dureza promedio de 324.2 HV_{0.05}, mientras que la muestra borurada alcanzó los 908.9 HV_{0.05}. Esta diferencia representa un incremento de aproximadamente 300% en la dureza superficial, confirmando la efectividad del tratamiento para mejorar las propiedades mecánicas del acero.

La Ilustración 3 muestra las microindentaciones de dureza Vickers tanto en la muestra base como en la borurada. En la Ilustración 4 se representa gráficamente el perfil de dureza, y en la Ilustración 5 se observa la presencia de grietas radiales y delaminaciones características de los modos de falla HF2 y HF3, lo que indica una adherencia aceptable de acuerdo con la norma VDI 3198.

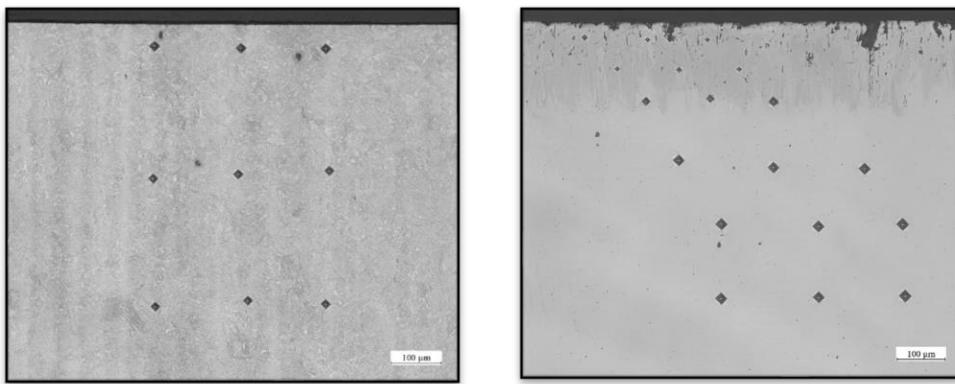


Ilustración 3: Microindentaciones en la muestra templada y revenida (20 x)

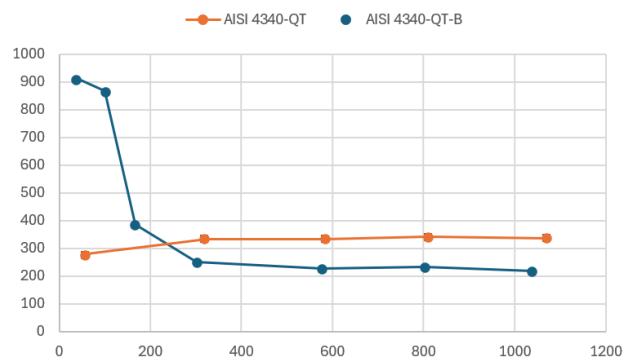


Ilustración 4: Microdureza Vickers del material borurado a 950 °C por 4 h

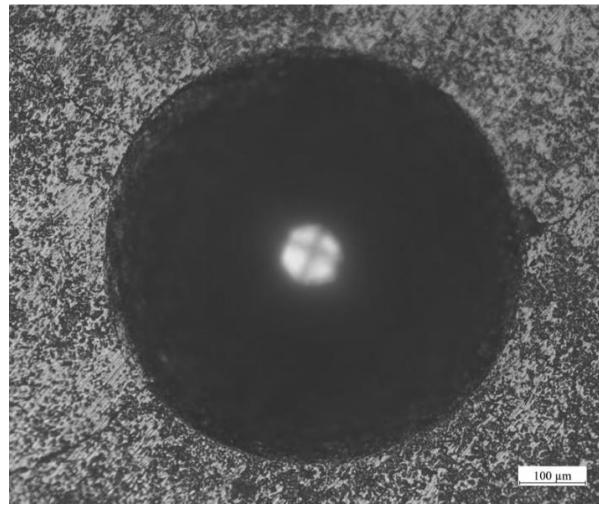


Ilustración 5: VDI del AISI 4340 borurado a 950 °C por 4 h (20 x)

Conclusión

En este estudio se llevó a cabo una comparación entre la caracterización metalográfica y el análisis mecánico de un acero AISI 4340 en su estado base (templado y revenido) y tras ser sometido a un tratamiento termoquímico de borurado. Los resultados obtenidos evidencian una mejora significativa en las propiedades mecánicas del material tratado. En particular, se observó un incremento en la dureza superficial de aproximadamente 300%, dando un valor $324.2 \text{ HV}_{0.05}$ en el acero base y $908.9 \text{ HV}_{0.05}$ en el acero borurado.

Referencias:

- Bourithis, L., Papaefthymiou, S., & Papadimitriou, G. D. (2002). Plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: Microstructure and wear properties. *Applied Surface Science*, 200(1-4), 203-218. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(02\)00901-7](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)00901-7)
- Campos-Silva, I. E., & Rodríguez-Castro, G. A. (2015). Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels. En E. J. Mittemeijer & M. A. J. Somers (Eds.), *Thermochemical surface engineering of steels* (pp. 651-702). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-592-4.00018-8>
- Carrera Espinoza, R., Alvarez Vera, M., Wettlaufer, M., Kerl, M., Barth, S., Moreno Garibaldi, P., Díaz Guillen, J. C., Hernández García, H. M., Muñoz Arroyo, R., & Ortega, J. A. (2024). Study on the tribological properties of DIN 16MnCr5 steel after duplex gas-nitriding and pack boriding. *Materials*, 17(3057). <https://doi.org/10.3390/ma17133057>
- Czerwinski, F. (2012). *Thermochemical treatment of metals*. InTech. <https://doi.org/10.5772/51566>
- Hosmani, S. S., Kuppusami, P., & Goyal, R. K. (2014). *An introduction to surface alloying of metals*. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06593-4>
- Kulka, M. (2019). Trends in thermochemical techniques of boriding. En *Current trends in boriding* (pp. 1-38). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23918-4_1
- Petrova, L. (2012). Progress in theory and practice of thermochemical treatment of steels. *International Heat Treatment and Surface Engineering*, 6(4), 168-170.
- Safarpour, M., & Ekrami, A. (2022). The effect of bainite volume fraction on wear behavior of AISI 4340 ferrite-bainite dual-phase steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31, 8687-8698. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06905-2>
- Sen, S., Sen, U., & Bindal, C. (2005). An approach to kinetic study of borided steels. *Surface and Coatings Technology*, 191(2-3), 274-285. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.03.040>

Sobre los autores:

Damian Gutierrez Sosa

Contacto: damian.gutierrezsa@udlap.mx

Valeria López López

Contacto: valeria.lopez1z@udlap.mx

Ismael López Rodríguez

Contacto: ismael.lopezrz@udlap.mx

Francisco Javier Romero Álvarez

Contacto: francisco.romeroaz@udlap.mx

Dr. Rafael Carrera Espinoza

Decano de la Escuela de Ingeniería de la UDLAP desde 2024 y profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Industrial y Mecánica desde 2016. Es Doctor y Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica por el IPN, e Ingeniero Electromecánico por el ITT. Realizó una estancia posdoctoral en el Tecnológico de Monterrey, campus Estado de México, en el área de ingeniería de superficies. Ha colaborado en investigación con instituciones de Brasil y Alemania, y es miembro del SNII nivel 1, así como de diversas redes científicas nacionales e internacionales.

Contacto: rafael.carrera@udlap.mx

Dr. Melvyn Alvarez Vera

Profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Industrial y Mecánica de la UDLAP desde 2021. Es Doctor en Ingeniería de Materiales por la UANL, Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica por el CENIDET e Ingeniero Mecánico por el Instituto Tecnológico de Oaxaca. Su investigación se enfoca en diseño mecánico, biomecánica, tribología, ingeniería de superficies y diseño de uniones. Ha publicado 37 artículos JCR, presentado 17 ponencias internacionales y cuenta con 9 patentes otorgadas. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores nivel 1.

Contacto: melvyn.alvarez@udlap.mx

Dr. Pablo Moreno Garibaldi

Profesor de tiempo completo en el Departamento Académico de Ingeniería Industrial y Mecánica de la UDLAP. Es Doctor y Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica, así como Licenciado en Ingeniería Aeronáutica por el Instituto Politécnico Nacional. Su línea de investigación se centra en el diseño de prótesis personalizadas e instrumental médico mediante herramientas CAD-CAM-CAE. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores nivel 1.

Contacto: pablo.moreno@udlap.mx