Frontiers in Research
Volumen 5, Número 1, 2025, 47-52
DOI: 10.71350/30624533123
ISSN: 3062-4533

Artículo

Acero austenítico con recubrimiento de carburo de silicio para mitigar la corrosión en generadores de transformadores

Ricardo Reyes Hernández[1], **David Juárez Romero**[2], **Horacio Martínez Valencia**[2], **Armando Huicochea Rodríguez**[1], **Tabaí Torres Díaz**[1], **Luis Adrián López Pérez**[1]

[1] Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), Materiales, México
[2] Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto de Ciencias Físicas, Recubrimientos Superficiales, México

Resumen

Los transformadores son equipos de última generación que apoyan la solución de algunos de los principales problemas que afectan a la población mundial, como la desalinización del agua. Los equipos de intercambio de calor que los componen se ven afectados por la corrosión. Durante décadas se han buscado los mejores materiales para su diseño; sin embargo, la búsqueda continúa, dejando un área de mejora continua. En este trabajo, proponemos un acero austenítico con recubrimiento de carburo de silicio para el diseño de generadores de transformadores, que cumple con los requisitos para el diseño de estos equipos. El carburo de silicio es un material cerámico con un alto coeficiente de transferencia de calor, su principal característica, lo que lo hace ideal para el diseño de intercambiadores de calor. También es un buen protector contra la corrosión de los aceros. La microestructura del material compuesto se analizará mediante un microscopio electrónico de barrido y su composición mediante un instrumento de difracción de rayos X. El material se caracterizará en términos de corrosión y su comportamiento mecánico.

Historial
Received 29.08.2025
Accepted 02.11.2025

Palabras clave
Austenitic steel, silicon carbide,coating, transformer generator

Abstract

Transformers are state-of-the-art equipment that supports the solution to some of the main problems affecting the world's population, such as water desalination. The heat exchange equipment that they comprise is affected by corrosion. For decades, the best materials for their design have been sought; however, the search continues, leaving an area for continuous improvement. In this work, we propose an austenitic steel with a silicon carbide coating for the design of transformer generators, which meets the requirements for the design of this equipment. Silicon Carbon is a ceramic material with a high heat transfer coefficient, its main characteristic, making it ideal for the design of heat exchangers. It is also a good protector against corrosion of steels. The microstructure of the composite material will be analyzed using a scanning electron microscope and its composition using an X-ray diffraction instrument. The material will be characterized in terms of corrosion and its mechanical behavior.

Corresponding Author Ricardo Reyes Hernández Universidad Autónoma del Estado de Morelos - Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, 62209, Cuernavaca, Morelos, México

This is an open access article under the CC BY 4.0 license.

Introducción

Los Transformadores son equipos utilizados para algunos de los principales servicios como lo es la Generación de energía eléctrica, para solución de problemas que son de carácter mundial como lo es la desalinización de agua, la purificación de agua y para mejorar el medio ambiente como recolectar el CO_2. Sus aplicaciones son de gran importancia que por eso es fundamental mantener la mejora continua en sus procesos, observando a conciencia los detalles que mitiguen su eficiencia, su adecuado funcionamiento, que reduzcan su vida útil y que entorpezcan de algún modo su operación.

Los Transformadores están formados por equipos generalmente metálicos de intercambio de calor los cuales presentan fallas principalmente debido a corrosión, a vibraciones fuertes de compresores, a su uso fuera de las condiciones de Diseño de los equipos. Debido a esto se llegan a presentar fugas que vuelven inestable la operación y que pueden llegar a ser causas de riesgo latente. Incluso se han llegado a reportar explosiones a causa de las fugas y de las mezclas de soluciones que reaccionan. Por eso es de vital importancia mantener estos equipos monitoreados, en buenas condiciones de operación, dentro de las condiciones de operación de Diseño y manufacturados con los materiales adecuados para soportar las cargas de trabajo, los fluidos de operación y las reacciones exotérmicas que suceden en el proceso. Procesos no controlados de corrosión contraen un alto costo económico. La corrosión ha derribado construcciones, aviones, industrias químicas, etc (Asrar et al; 2016).

Los Transformadores a menudo emplean LiBr en sistemas de refrigeración por absorción debido a sus propiedades higroscópicas, su solubilidad en agua a 20 °C y su capacidad de reducir la presión de vapor de agua en un 80 % aproximado sin embargo es altamente corrosivo a altas temperaturas y tiende a cristalizar a altas concentraciones (Baboukani et al; 2018, Arteaga et al; 2012). Abds también encontró cristalizaciones debidas a LiBr en aceros niquel-Cobre (Elhamid et al; 2020)

Karen menciona que el LiBr es muy utilizado en los sistemas de refrigeración como absorbente, pero que resulta ser muy agresivo para los materiales de diseño de los equipos como el acero al carbón el cual es elegido por ser muy económico y en diferentes aceros incluso en los aceros inoxidables 304 y 316L (Larios et al; 2022).

Uno de los principales problemas que se presentan es a causa de la elección de materiales incorrectos para realizar los procesos. Algunos ejemplos de materiales de construcción que se han utilizado son acero al Carbón, Titanio, aceros Níquel-Cromo, Aceros inoxidables y otras aleaciones, buscando el material idóneo que reduzca los daños por corrosión y aumente la vida útil de los equipos. Sin embargo hasta la fecha se siguen buscando mejores materiales ya que la degradación de los metales continúa siendo el principal problema de los equipos, es un problema que causa pérdidas económicas, de eficiencia, de vida útil de los equipos y que afecta además la seguridad. En la búsqueda de mejores materiales para equipos de transformadores se han utilizado aceros con recubrimientos, cromatos, molibdatos, nitratos. Sarmiento uso ethylene glycol en la solución de H_2O+LiBr como inhibidor de la corrosión (Sarmiento et al; 2009). Refrigeración por absorción debido a su alta resistencia a la corrosión (Sarmiento et al; 2013).

Figura 1. Bomba de Calor **Figura 2.** Corrosión por hendidura

Método

Se desarrollará un acero austenítico inoxidable 316L con un recubrimiento de Carburo de Silicio. La deposición de Carburo de Silicio en la superficie del acero 316L se llevara a cabo por el método de ablación por láser pulsado (PLD) que es un método que se ha utilizado para depositar carburo de Silicio en aceros inoxidables. Se cortaran unas muestras del material para realizar su caracterización de composición con un equipo de Difracción de Rayos X, y microestructural en el microscopio electrónico de Barrido (SEM). Se caracterizará el material en su comportamiento a la corrosión mediante la técnica de polarización potenciodinamica. Se analizaran las gráficas obtenidas. Se caracterizara el acero en su comportamiento mecánico, realizando pruebas de dureza y/o microdureza, desgaste, fatiga y de tensión, analizando los resultados obtenidos. Se realizaran en todo momento inspecciones visuales tanto de los materiales como del comportamiento de los mismos durante las pruebas realizadas.

Resultados y Discusión

Uno de los factores que se debe tomar en cuenta durante el Diseño de un Generador es la adecuada elección de los materiales de construcción. Existen algunas reglas básicas como la de no utilizar aceros diferentes en su construcción porque se presentaría corrosión Galvánica, ya que al usar dos materiales diferentes se forma una pila galvánica, lo que aumenta de forma drástica la velocidad de corrosión del proceso, degradando rápidamente el ánodo. Los equipos de transformadores generalmente fallan por fatigas, grietas, corrosión, oxidación, ataque de Hidrogeno; para minimizar esto se requiere de la adecuada selección de los materiales de Diseño (Ali et al; 2020).

Helbert al pasivar el acero 316L reporta que tiene mayor resistencia a la corrosión (Helbert et al; 2022). Un material que no es atacado de una forma muy agresiva por una sustancia puede ser atacado severamente por otra. Por jemplo el Tungsteno que es un material que resiste la corrosión a temperaturas elevadas y con soluciones agresivas como ácidos, es atacado por agua oxigenada.Xie Junjun en su trabajo reportó que el acero 316L es atacado de una manera muy agresiva por los iones Cl (Xie et al; 2020).

Una restricción que existe es el Coeficiente de conductividad térmica de los materiales, ya que algunos investigadores al buscar métodos que reduzcan la corrosión de los equipos acuden a recubrimientos que reducen el Coeficiente de conductividad de calor en el Generador. Para la función para la que están diseñados los Generadores de Transformadores el coeficiente de conductividad térmica es la variable más importante y reducirla causaría la reducción de la eficiencia del equipo. El material que se propone en este trabajo cumple con todos los objetivos para ser un material adecuado para Generadores, ya que:

1.- El Carburo de Silicio es un material con una excelente conductividad térmica (Alta) entre 110 y 270 W/mK para grados de alta pureza, lo cual asegura que no reduce el coeficiente de conductividad térmica del acero. Eso equivale a una conductividad térmica muy alta, aproximadamente de 5 a 13 veces mayor que la conductividad del acero inoxidable.

2.- El Carburo de Silicio le da al acero una excelente resistencia a la corrosión.

3.- Tiene una alta resistencia al choque térmico.

Figura 3. Corrosión por picadura en carcaza

Figura 4. Productos de corrosió

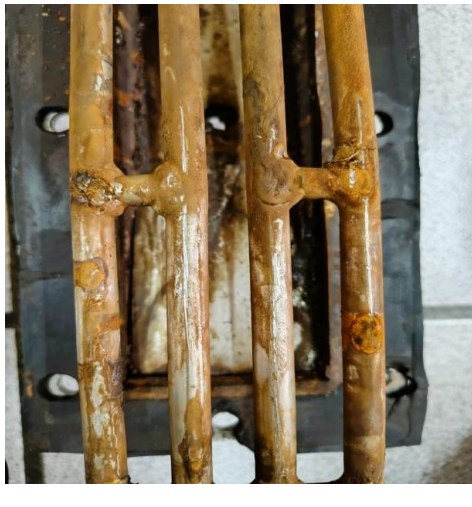
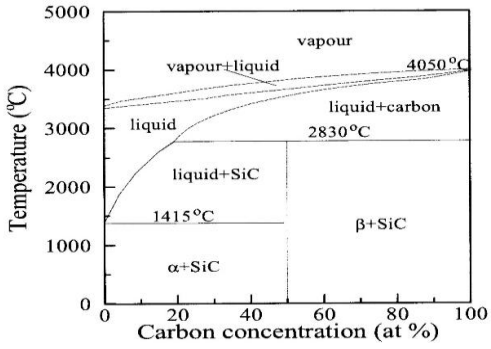


Figura 5. Fouling en tubos

Figura 6. Daño por fouling y esfuerzos



β = Estructura cúbica
α =Estructura hexagonal y romboédrica

Figura 7. Diagrama de fase

Figura 8. Carburo de Silicio

4.- Resistencia al desgaste

5.- Es Químicamente estable

6.- Dureza muy alta

7.- Temperatura de Sublimación es 2300 ºC a 2500 ºC. Esto significa que pasa directamente del estado sólido al estado gaseoso sin pasar por el estado líquido, pero a una temperatura muy alta.

El Carburo de Silicio en su composición está formado generalmente por 30% de C y 70% de Si. Es un material cerámico.

Conclusiones e Implicaciones

Se espera que el acero inoxidable 316L con recubrimiento de Carburo de Silicio sea una base en la elección de futuros materiales adecuados para el Diseño de Generadores en Transformadores por sus propiedades de protección contra la corrosión y su alta conductividad térmica, lo que lo pondría a la vanguardia de aceros utilizados para Construcción de Generadores.

Declaraciones

Agradecimientos: Los autores agradecen al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) de la UAEM.

Conflictos de intereses: Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses.

Financiamiento: Esta investigación no recibió ninguna subvención específica de agencias de financiamiento en los sectores público, comercial o sin fines de lucro.

Orcid ID

Ricardo Reyes Hernández https://orcid.org/0009-0000-7474-5126

David Juárez Romero https://orcid.org/0000-0003-0942-9738

Horacio Martínez Valencia https://orcid.org/0000-0002-0695-3457

Armando Huicochea Rodríguez https://orcid.org/0000-0002-4067-0143

Tabaí Torres Díaz https://orcid.org/0000-0002-0695-3457

Luis Adrián López Pérez https://orcid.org/0000-0001-8718-2465

Referencias

Asrar, N., MacKay, B., Birketveit, Ø., Stipanicev, M., Jackson, J., Jenkins, A., ... Vittonato, J. (2016). La corrosión: La lucha más extensa. *Oilfield Review*, *28*(2), 36-51.

Abd Elhamid, S., Attia, A., & Abd-El-Wahab, S. (2020). Corrosion behaviour of copper–nickel alloys in LiBr solutions: A comparative study. *Egyptian Journal of Chemistry*, *63*(3), 907-919. https://doi.org/10.21608/ejchem.2019.14884.1916

Ali, M., Ul-Hamid, A., Alhems, L. M., & Saeed, A. (2020). Review of common failures in heat exchangers–Part I: Mechanical and elevated temperature failures. *Engineering Failure Analysis*, *109*, 104396.

Arteaga, C. C., Calderón, J. P., Sedano, C. C., & Rodríguez, J. A. (2012). Comparison of corrosion resistance of carbon steel and some stainless steels exposed to LiBr-H2O solution at low temperatures. *International Journal of Electrochemical Science*, *7*(1), 445-470. https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)13351-7

Baboukani, A. R., Ashrafi, A., & Saatchi, A. (2018). Investigation the effects of Na2MoO4 as an inhibitor on electrochemical corrosion behavior of 316L stainless steel in LiBr solution. *Zastita Materijala*, *59*(1), 108-116. https://doi.org/10.5937/ZasMat1801110Z

Helbert, V., Rioual, S., Le Bozec, N., & Thierry, D. (2022). Corrosion behavior of additively manufactured AISI 316L stainless steel under atmospheric conditions. *Materials and Corrosion*, *73*(11), 1833-1843.

Larios-Galvez, A. K., Lopez-Sesenes, R., Sarmiento-Bustos, E., Rosales, I., Uruchurtu-Chavarin, J., Porcayo-Calderon, J., & Gonzalez-Rodriguez, J. G. (2022). Corrosion behavior of steels in LiBr–H2O–CaCl2–LiNO3 systems. *Metals*, *12*(2), 279. https://doi.org/10.3390/met12020279

Sarmiento, E., González-Rodriguez, J. G., Ramirez-Arteaga, A. M., & Uruchurtu, J. (2013). Corrosion inhibition of 316L stainless steel in LiBr + ethylene glycol + H2O by using inorganic inhibitors. *International Journal of Electrochemical Science*, *8*(12), 12417-12433.

Sarmiento-Bustos, E., González-Rodriguez, J. G., Uruchurtu, J., & Salinas-Bravo, V. M. (2009). Corrosion behavior of iron-based alloys in the LiBr + ethylene glycol + H2O mixture. *Corrosion Science*, *51*(5), 1107-1114.

Xie, J. J., Ningyu, H., Sun, X., & Zhan, J. Y. (2020). Corrosion behavior of 316L stainless steel under Cl− corrosion medium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *711*(1), 012058.