

DESDE 2013 https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI



Publicación Semestral Pädi Vol. 12 No. Especial 5 (2024) 185-190

Modificación de recubrimientos de fosfato de manganeso con nanopartículas de WC Modification of manganese phosphate coatings with WC nanoparticles

E.A. Altamirano-Cortez^a, M. Molina-Morales¹, J. Reyes-Miranda¹, O. Barrios-Hernández¹, A. Garrido-Hernández¹, M.A. Barrón-Meza¹

^a Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Departamento de Materiales, Av. San Pablo No. 420 Col. Nueva el Rosario C.P. 02128, Alcaldía Azcapotzalco, CDMX.

Resumen

En este trabajo, se estudió la modificación de recubrimientos de fosfato de manganeso con nanopartículas de carburo de tungsteno (WC) para mejorar sus propiedades mecánicas y estructurales. Se prepararon cinco tipos de recubrimientos con diferentes concentraciones de WC (0, 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 g-L⁻¹), los cuales fueron depositados sobre sustratos de acero AISI/SAE 1020 mediante el método de conversión química. Se realizaron análisis de microdureza Vickers, peso por unidad de área, morfología mediante microscopía óptica y microscopia electrónica de barrido, y caracterización estructural mediante difracción de rayos X. Los resultados mostraron que la dureza de los recubrimientos aumentó significativamente al incrementar la concentración de WC, con un máximo incremento del 108.63% para la muestra con 2 g-L⁻¹ de WC en comparación con el recubrimiento sin nanopartículas. Además, la presencia de WC refinó la morfología cristalina, reduciendo el tamaño de los cristales de fosfato de manganeso y mejorando la homogeneidad del recubrimiento.

Palabras Clave: Fosfato de manganeso, carburo de tungsteno, acero AISI/SAE 1020, morfología hexagonal.

Abstract

This study focuses on the modification of manganese phosphate coatings with tungsten carbide (WC) nanoparticles to improve their mechanical and structural properties. Five types of coatings with different WC concentrations (0, 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 g-L⁻¹) were prepared and deposited on AISI/SAE 1020 steel substrates through a chemical conversion method. Microhardness Vickers, weight per unit area, morphology via optical and scanning electron microscopy, and structural characterization by X-ray diffraction were analyzed. The results indicated a significant increase in hardness with higher WC concentrations, with a maximum increase of 108.63% for the coating with 2 g-L⁻¹ WC compared to the nanoparticle-free coating. Additionally, the presence of WC refined the crystalline morphology, reducing the size of manganese phosphate crystals and enhancing the coating's homogeneity.

Keywords: Manganese phosphate, nanoparticles, tungsten carbide, AISI/SAE 1020 steel, hexagonal morphology.

1. Introducción

El fosfatizado es un proceso muy utilizado a nivel industrial, debido a su amplia aplicación en superficies ferrosas y no ferrosas (Chao-Min, 2006). Existen diferentes tipos de fosfatizado, entre los más comunes son el de hierro, zinc y manganeso, estos pueden ser aplicados en la superficie del sustrato por medio de dos procesos: aspersión e inmersión. Dichos recubrimientos, afectan la apariencia, la resistividad eléctrica, la dureza de la superficie, la absorción y otras propiedades de superficie del metal. La reacción que forman estos recubrimientos involucra el ataque químico sobre el metal, lo que conlleva al desgaste del orden de una centésima a una milésima de pulgada del metal (Hafeez, M.A, 2020). Es de suma importancia saber que son fundamentales en los procesos metal mecánicos ya que preparan las superficies

Historial del manuscrito: recibido el 04/10/2024, última versión-revisada recibida el 08/11/2024, aceptado el 13/11/2024, publicado el 12/12/2024. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial5.13913



^{*}Autor para la correspondencia: joremi@azc.uam.mx

Correo electrónico: al2173001460@azc.uam.mx (E.A. Altamirano-Cortez), al2242801012@azc.uam.mx (Mariana Molina-Morales), joremi@azc.uam.mx (Joan Reyes-Miranda), al2212800641@azc.uam.mx (O. Barrios-Hernández, agh@azc.uam.mx (Aristeo Garrido-Hernández), bmma@azc.uam.mx (Miguel Ángel Barrón-Meza)

metálicas para acabados finales de pintura, tratamientos subsecuentes de maquinado, aumento de dureza superficial y resistencia al desgaste.

La protección del acero a través de recubrimientos de conversión química juega un papel muy importante a nivel industrial. Asimismo, actualmente no existe información suficiente acerca del proceso de fosfatizado modificado con partículas cerámicas duras, por ejemplo, con carburo de tungsteno. El carburo de tungsteno presenta eficientes propiedades como un alto punto de fusión, alta dureza, alta densidad y una excelente resistencia a la corrosión y al desgaste (Molina Claros, 2016); al adicionar nanopartículas de WC se espera un mayor rendimiento en la resistencia al desgaste de los recubrimientos de fosfato de manganeso.

A pesar de que la incorporación de nanopartículas duras en recubrimientos de fosfato de manganeso no es muy común, si lo es en aleaciones Ni-P con el objetivo de incrementar la dureza y, por lo tanto, la resistencia al desgaste, a través de la incorporación de partículas cerámicas duras tales como ZrO_2 (Luo et al. 2018), Al₂O₃ (Zhou et al. 2008, Hamdy et al. 2007), TiO₂ (Shozib et al. 2021), Saravanan et al. 2020) WC (Luo et al. 2015) y SiC (Ghavidel et al. 2020), entre otros. Con la incorporación de este tipo de partículas en los recubrimientos se ha demostrado que, dependiendo del tamaño de partícula y de su concentración permiten obtener recubrimientos compactos, gruesos y de grano fino.

M. Tamilselvi y col. (Tamilselvi et al. 2015) incorporaron nanopartículas de SiO₂ en recubrimientos de fosfato de zinc depositados en acero medio carbono. Ellos encontraron que el SiO₂ redujo la energía de activación del proceso de fosfatizado, lo que provocó un incremento en los sitios de nucleación y por lo tanto se obtuvieron recubrimientos más pesados con tamaños de grano pequeño.

B. Diaz y col. (Díaz et al. 2016) analizaron la influencia de la incorporación de carbono en baños de fosfato de zinc. Asimismo, estudiaron la resistencia al desgaste y encontraron que las partículas de carbono permitieron obtener una estructura de fosfato de zinc más compacta y con menor porosidad, por lo que los resultados tribológicos arrojaron una reducción en el coeficiente de fricción y por lo tanto una mayor resistencia al desgaste en comparación con los recubrimientos que no contienen las partículas de carbono.

En el presente proyecto se analizan las propiedades estructurales y mecánicas de recubrimientos de fosfato de manganeso $Mn_3(PO_4)_2$ modificados con nanopartículas de carburo de tungsteno (WC) y depositados sobre sustratos de acero 1020 a través del método de conversión química. Se llevaron a cabo análisis de dureza, espesores, peso por unidad de área, difracción de rayos X y morfología. La dureza de los recubrimientos se ve incrementada con el aumento en la concentración de nanopartículas de WC ya que actúan como refinador de grano.

2. Metodología

2.1. Preparación de los sustratos de acero AISI/SAE 1020.

Para la preparación de los sustratos, se utilizó una lámina de acero AISI/SAE 1020, con calibre de lámina del número 20 (0.85 mm). Se cortaron 10 sustratos cuyas dimensiones son

aproximadamente de 2.5 cm de ancho x 5 cm de largo. Posteriormente, se eliminó el exceso de rebaba de las orillas del sustrato, utilizando una esmeriladora de banco. Después, los sustratos de acero se limpiaron mecánicamente en una cabina de sandblast con un abrasivo DURALUM 80 GV, con la finalidad de remover óxidos superficiales y preparar una superficie de anclaje para el recubrimiento de fosfato. Una vez limpiados mecánicamente los sustratos de acero, se procedió a desengrasar las placas en una solución alcalina de NaOH (2M) y jabón comercial para eliminar agentes contaminantes en la superficie metálica. Finalmente, se enjuagaron las placas en agua caliente a una temperatura de 50°C durante 30 segundos.

2.2. Preparación de los baños de fosfato de manganeso con nanopartículas de WC y proceso de fosfatado.

Para preparar 0.350 L de solución de fosfato de manganeso se utilizaron los siguientes reactivos H₃PO₄, MnO, HNO₃, el procedimiento se describe a continuación: En un vaso de precipitado se disolvieron 6.59 g-L⁻¹ de MnO en 21 g/L de HNO₃, posteriormente, se agregaron 8.24 g-L⁻¹ de H₃PO₄, el cual actuó como fuente de fosfato. Posteriormente, esta mezcla fue vertida lentamente en un vaso de precipitado con agua para obtener un volumen de baño de 0.350 L. Finalmente, se agregaron las nanopartículas de WC al baño de fosfato de manganeso en diversas proporciones como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Concentración de nanopartículas de WC en el baño de fosfato d	le
manganeso	

manganeso.		
Muestra	[WC] (g-L ⁻¹)	
A1 (testigo)	0	
A2	0.5	
A3	1	
A4	1.5	
A5	2	

Una vez preparados los sustratos y los baños de fosfatado, se realizaron los depósitos mediante la inmersión de los sustratos metálicos en el baño de fosfato de manganesonanopartículas de WC. Los baños de fosfatado se calentaron a una temperatura de 90°C con agitación constante y el depósito se realizó durante 30 minutos (Nguyen et al., 2022; Zang et al., 2020). Después de este tiempo, los recubrimientos depositados sobre el acero se enjuagaron en agua corriente con el fin de remover parte de la solución remanente del baño adherido al recubrimiento y evitar la aparición de manchas blancas en la superficie de los recubrimientos.

2.3. Caracterización de dureza, morfología y estructura cristalina.

Para la determinación de la dureza superficial de los sustratos recubiertos, se realizó el ensayo de dureza Vickers Hardness con una carga de 25 gramos. Se realizaron 10 indentaciones por muestra, y se determinó el promedio. La caracterización por microscopia óptica se llevó a cabo usando un microscopio óptico, modelo OLYMPUS PMG3 para la inspección de la microestructura superficial de los recubrimientos y determinar su homogeneidad y si no hay fracturas en el recubrimiento. La microscopia electrónica de barrido se realizó en un equipo de la marca ZEISS. Para la evaluación de la estructura cristalina de los recubrimientos de fosfato de manganeso-nanopartículas de WC, se usó un difractómetro de Rayos X SIEMENS D-500, con una radiación Cu-K α radiación de 0.15405 nm y a un tamaño de paso de 0.03° en un rango de 20 a 40°.

2.4. Determinación del peso por unidad de área.

Para determinar el peso por unidad de área, se escogieron dos sustratos, el sustrato testigo y el que presento mayor dureza (A5). Primero, se midieron las dimensiones de los sustratos escogidos. Posteriormente, se agregaron 100 ml de acetona en un vaso de precipitados y se sumergieron los sustratos durante 15 segundos con la finalidad de remover grasas o suciedades. Después, se pesa el recubrimiento anclado al sustrato y posteriormente se introducen en una solución de ácido crómico (H₂CrO₄) durante un minuto a una temperatura de 75°C con el fin de remover el recubrimiento. El procedimiento de remoción del recubrimiento se realizó agregando 5.31 g de ácido crómico en 100 ml de agua destilada. Una vez finalizado el tiempo de remoción, se enjuagan en agua caliente (50°C) y posteriormente en acetona, finalmente se secó con la ayuda de una secadora. Después, se pesó nuevamente el sustrato de acero 1020 (recubrimiento removido) y se determina la diferencia que corresponderá al peso del recubrimiento de fosfato de manganeso-nanopartículas WC.

3. Discusión de Resultados

3.1. Determinación de dureza Vickers

En la Figura 1 se presentan los promedios y la desviación estándar de dureza Vickers de los recubrimientos de fosfato de manganeso modificados con nanopartículas de carburo de tungsteno (WC). El efecto de la adición de las nanopartículas de carburo de tungsteno en los recubrimientos de fosfato de manganeso consiste principalmente en incrementar casi de forma lineal la dureza a medida que incrementa la concentración de las nanopartículas. Para el caso de la muestra sin nanopartículas (A1) se obtiene una dureza promedio de 511.37 HV, debido a que el recubrimiento solo tiene una matriz de fosfato de manganeso.

Para las muestras A2, A3, A4, y A5 se observa un incremento en la dureza en un 12.8%, 46.06%, 71.68% y 108.63%, respectivamente, tomando como referencia la muestra testigo. El incremento de la dureza está en función de la concentración de nanopartículas de WC, de forma significativa, se aprecia un incremento de la dureza con el incremento de la concentración de nanopartículas de WC. Aunque para el caso de la muestra testigo y la muestra A2 la diferencia en la dureza de los recubrimientos no es grande, así como la muestra A3 y A4, si se observa una relación entre la dureza y la concentración de nanopartículas de WC. De acuerdo con (Molina Claros, 2016) el incremento de la dureza es directamente proporcional a la concentración de WC, sin embargo, a una mayor concentración de WC la morfología

empieza a cambiar, así como el tamaño de cristales, por lo que la dureza se ve afectada significativamente.



Figura 1. Durezas Vickers de los recubrimientos de fosfato de manganeso-NPs WC.

3.2. Morfología de los recubrimientos por microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido.

En la Figura 2 se muestran las imágenes obtenidas en el microscopio óptico de los recubrimientos de fosfato de manganeso modificados con las nanopartículas de carburo de tungsteno. Como puede apreciarse, se tiene la presencia de dos fases, una fase clara que corresponde al fosfato de manganeso precipitado sobre la superficie metálica del sustrato y una fase oscura que corresponde al Fe, es decir, este proviene de la superficie del sustrato, entonces el ácido fosfórico reacciona con el hierro formando un fosfato de hierro, correspondiente a un fosfato de hierro insoluble que se forma simultáneamente con el recubrimiento de fosfato de manganeso. Se aprecia también que a medida que aumenta la concentración de nanopartículas cerámicas, se forman cristales de fosfato muy finos en la superficie del acero, (Gómez Macías, 2020). También es posible la presencia de óxido de hierro a consecuencia de la degradación cristalina que tiene lugar en todo el proceso de fosfatizado, esto ocurre debido a un fenómeno de acidificación que se localiza en el interior de los cristales, es decir, defectos en los cristales como lo son picaduras, grietas, poros que pueden favorecer a este fenómeno, de tal modo que, durante la acidificación, la superficie del cristal y el defecto tendrán fácil acceso al oxígeno (Alvarado García, 2017). Las zonas distorsionadas se deben a la morfología del recubrimiento ya que, al no ser uniforme, es difícil lograr un enfoque completo con el microscopio óptico. Además, en la mayoría de los recubrimientos se logra percibir zonas más oscuras, esto se debe a la presencia de las nanopartículas de WC. Para la muestra A3 de la Figura 2, se observa una mayor distribución de las nanopartículas de WC sobre la superficie, ya que, hay una menor presencia de la fase clara que corresponde al fosfato de manganeso.



Figura 2. Micrografía de los recubrimientos de fosfato de manganeso con NPs de WC. Imágenes tomadas a 100x.

Para la muestra A4 de la Figura 2, se hace presencia de una fase color marrón, representa al óxido de hierro debido al fenómeno de acidificación descrito anteriormente. Estos defectos que provocan la presencia de oxido, se pueden llevar a cabo debido a una disminución en el pH, ya que es un punto importante para el proceso de fosfatizado durante el crecimiento de los cristales. En la muestra A5 de la Figura 2 se observan zonas con cristales de fosfato de menor tamaño en comparación de las muestras A1 a A4, esto se debe a la alta concentración de nanopartículas de WC, al aumentar la concentración tiende a disminuir el tamaño de cristales, por lo que las nanopartículas actúan como refinadores de los granos de fosfato de manganeso.

En la Figura 3 se muestran las imágenes de microscopia electrónica de barrido para las muestras A1 y A5 (2 g-L⁻¹ WC). Las imágenes que se presentan se tomaron a una magnificación de 500 X y la escala de referencia corresponde a 10 µm. Para la muestra testigo, que corresponde solamente a fosfato de manganeso, se logra apreciar un recubrimiento de cristales de fosfato de manganeso, existiendo una cantidad mínima de hierro en dichos cristales. Estos cristales adoptan una forma prismática irregular, que varían en forma y tamaño. Se aprecia, además que los cristales crecen uno sobre otro, pero el crecimiento es interrumpido, esto debido a los defectos presentes en ellos, como lo son la formación de capas incompletas, ya que delimitan el crecimiento del cristal y a su vez crea poros. Para la muestra A5, en donde se agregó una concentración de 2 g/L de nanopartículas de WC, se observa un refinamiento en los cristales a comparación de la muestra testigo. Existe un aumento en cantidad de cristales, esto debido al efecto de la adición de las nanopartículas y se aprecia la morfología de los cristales fosfatados del tipo hexagonal. En términos de tamaño de cristal, la muestra A1 exhibe tamaños promedio de 9±2 µm de ancho, mientras que para la muestra A5, la cual tiene una concentración de 2 g-L-1 exhibe tamaños menores de 5±2 μm de ancho.



Figura 3: Imágenes de microscopia electrónica de barrido de las muestras A1 (testigo) y A5 (2 g-L⁻¹).

La adición de 2 g/L de nanopartículas provocó que haya una mayor cantidad y tamaño de los cristales fosfatados. Asimismo, en las zonas señaladas en círculos azules de la Figura 3 hay un mayor refinamiento de dichos cristales, esto posiblemente a causa de una mayor nucleación y un menor crecimiento de cristales (Díaz Freire, 2014). De acuerdo con (Massa W. 2005), la morfología de los fosfatos de manganeso son del tipo prisma hexagonal simple y al agregar una mayor cantidad de nanopartículas, se observa la presencia de estructuras jerárquicas de los cristales fosfatados (círculos rojos), específicamente se observan cristales traslapados en diferentes direcciones.

3.3. Análisis estructural de los recubrimientos de fosfato de manganeso modificados con NPs de WC.

En los difractogramas mostrados en la Figura 4, se aprecian los picos característicos a 20.5 ° 27 ° y 32.5 ° que coinciden con la carta cristalográfica de la fase β '-Mn₃(PO₄)₂, correspondiente a la carta JCPDS 01-073-1088, lo cual nos indica que los recubrimientos fueron depositados de manera exitosa, es decir, el recubrimiento de fosfato está compuesto por la fase hurealita siendo la principal estructura cristalina del fosfato de manganeso. Las muestras 2, 3, 4 y 5 muestran picos característicos entre un intervalo de 29-30.5 ° que coinciden con la carta cristalográfica JCPDS 03-1096. Cabe mencionar, que

la mayor intensidad de estos picos se observa en las muestras 4 y 5 debido a la alta concentración de nanopartículas de WC. Para los picos característicos de las muestras 2, 3, 4 y 5 que se presentan después de los 35° , corresponden al patrón de DRX de W₂C, de acuerdo con la carta cristalográfica JCPDS20-1315.



Figura 4. Difractogramas de los recubrimientos de fosfato de manganeso modificados con NPs de WC. La fase β '-Mn₃(PO₄)₂, corresponde a la carta JCPDS 01-073-1088.

3.4. Determinación del peso por unidad de área.

Para determinar el peso por unidad de área, se escogieron dos sustratos, el sustrato testigo y el que presento mayor dureza (A5). Primero, se midieron las dimensiones de los sustratos escogidos y se pesaron en una balanza analítica. Se sumergieron en una solución de ácido crómico (H_2CrO_4) y se pesó nuevamente el sustrato de acero 1020 (recubrimiento removido) para determinar la diferencia que corresponderá al peso del recubrimiento de fosfato de manganesonanopartículas WC y de la muestra testigo.

Para el caso de la muestra testigo, se obtuvo un peso por unidad de área de 2.122 g-pie⁻², mientras que para la muestra A5 con una concentración de 2 g-L-1 se obtuvieron 3.473 gpie⁻². Este resultado indica que las nanopartículas de WC promueven un incremento en el espesor de los recubrimientos, lo que es útil para aplicaciones en donde existen condiciones de desgaste severo.

4. Conclusiones

Al adicionar nanopartículas de carburo de tungsteno al baño de fosfato de manganeso, se logra incrementar la dureza en el recubrimiento, debido a las óptimas propiedades que presentan, de tal forma que se obtiene un incremento porcentual del 108.63% en la muestra A5 (2 g-L⁻¹) respecto a la muestra testigo a la que no se le agregaron nanopartículas de carburo de tungsteno.

Al aumentar la concentración de nanopartículas de WC, la dureza aumentó casi linealmente de 511 HV hasta 1065 HV.

Asimismo, la adición de las nanopartículas modifica la morfología de los recubrimientos y afecta ligeramente la homogeneidad de las partículas de fosfato de manganeso, ya que las NPs actuaron como refinadores de grano.

De acuerdo con microscopia óptica, la concentración que presento óptimos resultados fue de 1.5 g/L de nanopartículas de WC al baño, ya que se visualizó una mejor morfología en los cristales fosfatados y homogeneidad en cuanto a tamaño y forma de los mismos. A nivel microestructural y de acuerdo con las imágenes de microscopia electrónica de barrido, se logra observar una excelente distribución de las nanopartículas de WC, sin embargo, se apreciaron zonas oxidadas debido a la disminución del pH del baño de fosfato.

De acuerdo con los resultados de peso por unidad de área, este tuvo un aumento significativo en el peso por unidad de área pasando de 2.122 g-pie⁻², mientras que para la muestra A5 con una concentración de 2 g-L-1 se obtuvieron 3.473 g-pie⁻². Dicho resultado indica que las nanopartículas de WC no influyen en el crecimiento del recubrimiento, por el contrario, ayudan a mantener recubrimientos densos y con espesores mayores.

Agradecimientos

Los autores agradecen los recursos e instalaciones proporcionados por la Universidad Autónoma Metropolitana para para llevar a cabo la experimentación y caracterización realizadas en este trabajo.

Referencias

- Alvarado García, M. Á. 2017. Influencia del potencial, concentración y pH en el fosfatizado electroquímico y su capacidad como inhibidor de la corrosión de un acero AISI SAE 1018. Ciudad de México: UAM Azcapotzalco.
- Chao-Min, W., Han-Chih, L., & Wen-Ta, T. (2006). Effects of temperature and applied potential on the microstructure and electrochemical behavior of manganese phosphate coating. *Surface and Coatings Technology*, 201, 2994-3001. https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2006.06.010
- Díaz, B., Freire, L., Mojío, M., & Nóvoa, X. R. (2016). Effect of carbon on the corrosion and wear performance of Zn-phosphate layers. *Electrochimica Acta*, 202, 299–309. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.12.083
- Ghavidel, Nafiseh, Saeed Reza Allahkaram, Reza Naderi, Mohamad Barzegar, and Hamidreza Bakhshandeh. (2020). Corrosion and Wear Behavior of an Electroless Ni-P/Nano-SiC Coating on AZ31 Mg Alloy Obtained through Environmentally-Friendly Conversion Coating. Surface and Coatings Technology 382, 125156. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125156.
- Gómez Macías, J., Conejo Flores, R., García González, J. M., & Fuentes Aceituno, J. C. 2020. Effect of the type of steel and its surface finish on the kinetics of phosphatized with manganese. *Revista de ingeniería innovativa*, 4, 15, 1-17.
- Hafeez, M. A., Farooq, A., Zang, A., Saleem, A., & Deen, K. M. (2020). Phosphate chemical conversion coatings for magnesium alloys: a review. *Journal of Coatings Technology and Research*, 17(4), 827–849. https://doi.org/10.1007/s11998-020-00335-2
- Hamdy, A. S., Shoeib, M. A., Hady, H., & Abdel Salam, O. F. (2007). Corrosion behavior of electroless Ni-P alloy coatings containing tungsten or nano-scattered alumina composite in 3.5% NaCl solution. *Surface and Coatings Technology*, 202(1), 162–171. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.05.030
- Massa, W., Yakubovich, O. V., & Dimitrova, O. V. (2005). A novel modification of manganese orthophosphate Mn3(PO4)2. Solid State Sciences, 7(8), 950–956. https://doi.org/10.1016/J.SOLIDSTATESCIENCES.2005.03.005

- Molina Claros, J. 2016. Efecto de la adición de nanopartículas de carburo de tungsteno en la microestructura y resistencia al desgaste de un recubrimiento base níquel obtenido mediante el proceso de plasma transferido por arco. Saltillo, Coahulia, México: Corporación mexicana de investigación en materiales.
- Nguyen, T. L., Cheng, T. C., Yang, J. Y., Pan, C. J., & Lin, T. H. (2022). A zinc–manganese composite phosphate conversion coating for corrosion protection of AZ91D alloy: growth and characteristics. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 2965–2980. https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2022.06.079
- Luo, Hong, Michael Leitch, Yashar Behnamian, Yongsheng Ma, Hongbo Zeng, and Jing Li Luo. (2015). Development of Electroless Ni-P/Nano-WC Composite Coatings and Investigation on Its Properties. Surface and *Coatings Technology*, 277, 99–106. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.07.011.
- Luo, Hong, Michael Leitch, Hongbo Zeng, and Jing Li Luo. (2018). Characterization of Microstructure and Properties of Electroless Duplex Ni-W-P/Ni-P Nano-ZrO 2 Composite Coating. *Materials Today Physics* 4, 36–42. https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2018.03.001.
- Saravanan, I., A. Elayaperumal, A. Devaraju, M. Karthikeyan, and A. Raji. (2020). Wear Behaviour of Electroless Ni-P and Ni-P-TiO2 Composite

Coatings on En8 Steel. *Materials Today: Proceedings*, January. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.007.

- Shozib, Imtiaz Ahmed, Azlan Ahmad, Md Shokor A. Rahaman, Ahmad Majdi Abdul-Rani, Mohammad Azad Alam, Mohammadali Beheshti, and Iqbal Taufiqurrahman. (2021). Modelling and Optimization of Microhardness of Electroless Ni-P-TiO2composite Coating Based on Machine Learning Approaches and RSM. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1010–25. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.063.
- Tamilselvi, M., P. Kamaraj, M. Arthanareeswari, and S. Devikala. (2015). Nano Zinc Phosphate Coatings for Enhanced Corrosion Resistance of Mild Steel. *Applied Surface Science* 327, 218–25. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.11.081.
- Zang, L., Chen, Y., Wu, Y., Zheng, Y., Chen, H., You, D., Li, L., & Li, J. (2020). Comparative tribological and friction behaviors of oil-lubricated manganese phosphate conversion coatings with different crystal sizes on AISI 52100 steel. Wear, 458–459, 203427. https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2020.203427
- ZHOU, Guang hong, Hong yan DING, Fei ZHOU, and Yue ZHANG. 2008. "Structure and Mechanical Properties of Ni-P-Nano Al2O3 Composite Coatings Synthesized by Electroless Plating." Journal of Iron and Steel Research International 15 (1): 65–69. https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60014-X.