

Estructura y caracterización de recubrimientos de galvanizado por inmersión en caliente de aceros de bajo carbono sumergidos en medio ácido

Structure and characterization of hot-dip galvanized coatings of low carbon steels immersed in acidic medium

Ruiz-Gallegos, M. D.; López-García, R. D.; Hernandez-Ávila, J.; Cerecedo-Saenz, E.; Salinas-Rodríguez, E.; Maldonado-Reyes, A.

M. D. Ruiz-Gallegos

milton-ruiz-24@hotmail.com

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cd. Victoria, México

R. D. López-García

dlgitecv@hotmail.com

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cd. Victoria, México

J. Hernandez-Ávila

herjuan@uaeh.edu.mx

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

E. Cerecedo-Saenz

eduardoc@uaeh.edu.mx

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

E. Salinas-Rodríguez

salinasr@uaeh.edu.mx

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

A. Maldonado-Reyes

armar_y2@kotmail.com

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cd. Victoria, México

Resumen: En el presente trabajo se realizó el análisis estructural y de propiedades mecánicas (microdureza) en recubrimientos de galvanizado por inmersión continua en caliente sobre láminas de acero de bajo C, sometiendo a diferentes temperaturas en un baño líquido de Zn previamente inmersas en una solución de 1M de HCl y con tiempos de inmersión variables, con la finalidad de determinar las condiciones ideales en el proceso de galvanizado, obteniendo un nivel de dureza adecuada. Así mismo, se realizó un análisis instrumental por difracción de rayos X (DRX), identificándose el Zn con PDF [96-230-0115] de estructura cristalina BCC con 4.51% de cristalinidad y 1# de tamaño de cristalito, y PDF [96-901-0309] con estructura cristalina FCC con 21.21% de cristalinidad y 2#; se identificó Jarosita, demostrando que una inmersión en medio ácido provoca una hidrólisis de hierro y extracción de fósforo y azufre de la matriz de acero. El espesor de los recubrimientos formados así como las fases intermetálicas encontradas fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), mientras que para determinar la dureza de los recubrimientos formados se utilizó un microdurómetro para escala Vickers. El objetivo del trabajo fue elucidar las condiciones que favorecen una buena adherencia de recubrimientos de Zn sobre láminas de acero, evitando la formación de compuestos intermetálicos los cuales perjudican la calidad del recubrimiento.

Palabras clave: Galvanizado, inmersión en caliente, estructura cristalina, DRX, MEB.

Abstract: In the present work, the structural and mechanical properties (microhardness) analysis was performed on hot-dip galvanized coatings on low-C steel sheets, evaluated to different temperatures in a liquid Zn bath previously immersed in a 1M solution of HCl and with variable immersion times, in order to determine the ideal conditions in the galvanizing process, obtaining an adequate level of hardness. Likewise, an instrumental analysis was performed by X-ray diffraction (XRD), identifying the Zn with PDF [96-230-0115] of crystalline structure BCC with 4.51% crystallinity and 1Å of crystallite size, and PDF [96-901-0309] with FCC crystal structure with 21.21% crystallinity and 2Å; Jarosite was

Padi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

ISSN-e: 2007-6363

Periodicidad: Semestral

vol. 8, núm. 15, 106-111, 2020

sitioweb@uaeh.edu.mx

Recepción: 06 Abril 2020

Aprobación: 13 Abril 2020

Publicación: 05 Julio 2020

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/595/5953115004/>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

identified, showing that an immersion in an acid medium causes a hydrolysis of iron and extraction of phosphorus and sulfur from the steel matrix. The thickness of the coatings formed as well as the intermetallic phases found were analyzed using scanning electron microscopy (SEM), while a Vickers scale microdurometer was used to determine the hardness of the coatings formed. The objective of the work was to elucidate the conditions that favor a good adhesion of Zn coatings on steel sheets, avoiding the formation of intermetallic compounds which harm the quality of the coating.

Keywords: Galvanized, hot dip, crystal structure, DRX, MEB.

1. INTRODUCCIÓN

A finales del siglo XVIII Maullin, (Shibli *et al.*, 2015), realizó la primera inmersión de acero en baños de Zn líquido, como recubrimiento protector contra la corrosión, y demostró la gran eficacia como inhibidor de la misma, de ahí, que el galvanizado en caliente es la técnica más utilizada en el campo de la protección metálica en la actualidad. Los recubrimientos del galvanizado por inmersión en caliente consisten en un conjunto heterogéneo de diferentes capas que se forman debido a las protecciones metalúrgicas entre el hierro (Fe) y el zinc (Zn) cuando se sumerge el material en el baño de Zn fundido, este tipo de protección es llamado recubrimiento de barrera, debido a que cubre completamente la superficie del acero protegiéndolo de la corrosión. Después de la solidificación, el recubrimiento consiste de una capa externa de 100% Zn conocida como fase (η -eta) seguida de otras capas internas llamadas capas de aleación que consisten en fases intermetálicas de Fe-Zn tales como la fase zeta (ζ) (94%Zn - 6%Fe), fase delta (δ) (90%Zn - 10%Fe), y fase gamma (Γ) (75%Zn - 25%Fe) la acción de sacrificio del Zn protege el acero incluso cuando se produce daño o una pequeña discontinuidad en su superficie.

El galvanizado en caliente es una de las técnicas de protección más importantes debido a su bajo costo, y a su cinética de formación de recubrimiento, porque se adapta a diferentes procesos con diferente volumen de producción (Cocco *et. al.*, 2017a).

Por otro lado, en lo referente a la caracterización de la capa de inhibición Fe-Al (Morimoto *et. al.*, 1997) menciona que esta capa inicial actúa como una barrera de difusión durante la adherencia del galvanizado, evitando la interacción entre Fe y Zn fundido, lo que a su vez inhibe la formación de compuestos intermetálicos del tipo Fe-Zn.

Así mismo, en lo referente a la caracterización del galvanizado en caliente (Delvasto *et. al.*, 2012) caracterizaron los residuos sólidos obtenidos de dos procesos distintos de galvanizado en caliente por inmersión, tales como polvos y escorias procedentes de la industria de galvanizado, encontrando que los polvos están constituidos principalmente por Zn metálico con 98% en peso, donde ambas escorias de galvanizado presentaron Zn muy similar, escoria A 71% y escoria B 75% e.p.

En ese mismo contexto (Rico, 2012) estudió la estructura y caracterización de los recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente, sobre aceros y concluyen que debido a la composición química del baño, se modifica considerablemente la estructura cristalina del recubrimiento. De acuerdo a (Marder, 2000) la estructura cristalina del recubrimiento de galvanizado por inmersión en caliente, está compuesta por una capa eta (η -HCP), capa zeta (ζ -Monoclínica), capa delta (δ -Hexagonal), capa gamma (Γ -BCC).

Por otro lado, en lo referente a la composición química cabe mencionar que (Pistofidis *et. al.*, 2007), estudiaron el efecto del bismuto (Bi) en la estructura cristalina de los recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente de Zn, y concluyeron que la adición de Bi no afecta la morfología de los recubrimientos galvanizados para una concentración de hasta 2.0% en peso.

Además, (Cocco *et. al.*, 2017b) evaluaron la influencia de estaño (Sn) y titanio (Ti) sobre el daño de las fases en las capas de recubrimiento de galvanizado por inmersión en caliente en piezas dobladas. Y con respecto a las fases intermetálicas, menciona que la presencia de Ti permite obtener espesores de recubrimiento más grandes. Las pruebas de flexión mostraron valores más altos de resistencia con la presencia de las fases intermetálicas de Zn-Sn que las fases de Zn-Ti, a pesar de que los espesores de los recubrimientos de Zn-Ti son más grandes que los recubrimientos de Zn-Sn.

Rico and Carrasquero, 2017, realizaron un estudio sobre el efecto de la composición química en el comportamiento mecánico de recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente, obteniendo resultados que indican que los recubrimientos galvanizados sometidos a esfuerzos mecánicos, dependen básicamente de la microestructura que estos presentan principalmente en la ductilidad y la adherencia.

Así mismo, (Bicao *et. al.*, 2007) mencionan que los recubrimientos de galvanizado crecen más rápido cuando la temperatura es cercana de 480°C para mismos tiempos de inmersión estudiados.

Por otro lado, (Balloy *et. al.*, 2007), estudiaron el comportamiento de ácidos grasos y aceites minerales en la superficie de piezas de acero durante el galvanizado llegando a la conclusión que es posible reemplazar el flujo de cloruro industrial convencional utilizado en la galvanización por un aceite vegetal como el aceite de linaza. Además, que también es posible utilizar un aceite mineral añadido con una función ácida. En efecto, en su trabajo muestran que un aceite mineral que protege bien el acero de la corrosión, pero sin ninguna función ácida, conduce a un resultado muy malo en el galvanizado, con áreas no recubiertas y una pobre adherencia del recubrimiento.

Aunque el proceso de galvanizado por inmersión continua en caliente, ha sido ampliamente estudiado por muchos investigadores durante las últimas décadas (Monojit *et. al.*, 2010; Jiaojiao *et. al.*, 2019; Parvini and Rafiezadeh, 2009; Dasheng *et. al.*, 2016; Peng *et. al.*, 2007), aún existen áreas de oportunidad para mejorar aspectos como la adherencia del Zn en el sustrato de Fe evitando la disolución de Fe, y el mejoramiento de las propiedades mecánicas en general. Por lo tanto el objetivo del presente trabajo, es contribuir en la generación de conocimiento aplicado que contribuya a resolver problemas de las condiciones en el proceso de galvanizado en caliente. Para ello, se estudiaron a detalle las variables críticas del proceso de galvanizado, y se presentan los parámetros óptimos de operación que garantizan la buena adherencia de este tipo de recubrimientos, además de mantener en niveles adecuados la dureza de los recubrimientos para evitar tanto la concentración de esfuerzos residuales que conducen a la fractura del mismo, como a una buena ductilidad de la lámina para procesos posteriores de conformado mecánico.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la presente investigación fueron utilizadas 7 muestras, el acero SAE 1018 con composición química de 0.19% e.p de C, 0.77% e.p. de Mn, 0.052% e.p. de S y 0.040 % e.p. de P, la técnica utilizada fue por combustión LECO en un instrumento modelo CS-244 para los elementos C y S, mientras que para los demás elementos se utilizó espectrometría de emisión óptica por chispa en un espectrómetro marca SPECTRO modelo LABS. Las piezas a galvanizar se limpiaron primero con la técnica de sand blast para eliminar de la superficie óxidos e impurezas, posteriormente, se cortaron los testigos de 10 pulgadas por 1 pulgada de largo y ancho respectivamente y el espesor de la lámina fue de 1.5 mm. Para fundir el Zn, se utilizó un horno de piso de material refractario provisto de un mechón para altas temperaturas, el crisol utilizado fue de material grafito de 1 pulgada de espesor de pared, y con capacidad promedio de 10 Kg, se vertió el contenido de 3 Kg de aleación de zinc/aluminio de 99% Zn y 0.005% Al, para su fusión, mientras que la temperatura fue regulada por un termopar digital situado en medio del baño líquido. Antes de la inmersión en el baño, las láminas de acero fueron sumergidas en una solución de 1 M de HCL y se precalentaron a una temperatura entre 200-350°C, después, se sumergieron las láminas precalentadas y tratadas con la solución ácida en el baño líquido de zinc fundido a diferentes temperatura y de diferentes tiempos de permanencia.

Las muestras con el recubrimiento de Zn fueron cortadas con un disco abrasivo de SiC (en tamaños de 2 cm x 1 cm) y se montaron en baquelita para facilitar su manejo. Posteriormente, las muestras fueron desbastadas con lijas de SiC con granulometrías desde 120 hasta 2400 partículas/pulgada². Después, se pulieron sobre paños rotatorios utilizando pasta de diamante de 3 y 1 μm y alúmina de 1 μm . Para revelar la microestructura se utilizó el reactivo nital al 2% (100 ml de alcohol etílico y 2 ml de ácido nítrico HNO_3) las muestras se sumergieron en la solución durante un tiempo de 15 s. La observación microestructural se realizó mediante un microscopio metalográfico marca Olympus modelo Vanox AHMT-3. A partir de las imágenes obtenidas se realizó la medición de las capas que forman el recubrimiento. Para la identificación de fases, la morfología y la composición semicuantitativa se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB) JOEL modelo JSM-IT3000 dotado con un espectrómetro de dispersión de energía de rayos-X (EDS) marca Oxford. Para el análisis la estructura e identificación de las fases cristalinas se utilizó un difractómetro marca Inel modelo Equinox 2000 con detector CPS (Curved Position Sensitive Detector), con una base de datos MATCH. La dureza del material fue evaluada mediante un microdurómetro Vickers con una carga aplicada de 200 gf por un tiempo de prueba de 30s por cada indentación. El procedimiento se realizó de acuerdo a la norma ASTM E92.

2.1 Difracción de rayos X

A partir de muestras de polvo de una porción superficial de la probeta galvanizada preparada para analizarse en difracción de rayos X; se midieron los picos junto a los valores de cada radiación $K\alpha_1$ que fueron obtenidos en el difractómetro de detector curvo. Posteriormente fueron calculados y resueltos analíticamente para los valores angulares de θ hasta 110 grados; además, se listaron los valores 2θ para α ; fueron calculados la distancia interplanar, parámetro de red, índices de Miller, el tamaño de cristalita, la cristalinidad de cada fase, y se siguió el proceso para completar el patrón de difracción de Rayos-X.

En la Figura 1, se presenta el difractograma de la muestra que contiene sustrato del acero estudiado recubierto con Zn, sometida a 60 segundos de calentamiento y en un medio ácido (HCL, 1 M) con un tiempo de 60 segundos de inmersión a una temperatura de 474 °C dentro del baño de Zn.

Para el experimento 1, en la Figura 2, se identificaron 11 picos, y se indexaron, se enumeraron los PDF para conocer el contenido en cada pico, el Zn cuyo PDF es [96230-0115] con $d = 2.55$ SC hexagonal con un parámetro de celda $a = 5.1489$ Å, Si [96901-1999] con $d = 3.13$ SC Cúbico con un parámetro de celda $a = 5.4309$ Å, Jarosita [96901-0309] con $d = 2.34$ SC hexagonal con parámetro de celda $a = 7.3521$ Å, S [96100-7142] con $d = 3.97$ SC monoclinico con parámetro de celda $a = 7.4340$ Å, Fe [96101-1199] con $d = 2.14$ SC cubico con parámetro de celda $a = 4.3030$ Å, se calcularon índices de Miller para conocer su estructura cristalina como sigue: Zn [111] FCC, Si [311] Hexagonal, Jarosita [311] Hexagonal, Hematita [111], se puede observar en el ángulo 2θ 41° se encuentra el Zn.

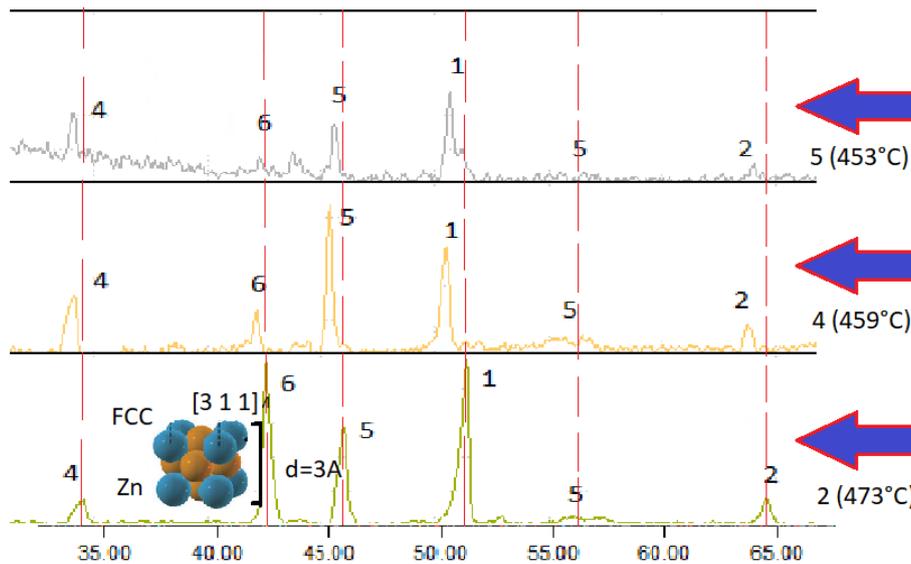


FIGURA 3.

-Tres muestras similares a diferentes temperaturas, #2 sumergida a 473°C, #4 sumergida a 459°C y #5 sumergida a 453°C.

En la Figura 4, se determinó la estructura cristalina utilizando el método analítico para una estructura cúbica de acuerdo a (Suryanarayana et. al., 1998). Determinando que esta presenta una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC).

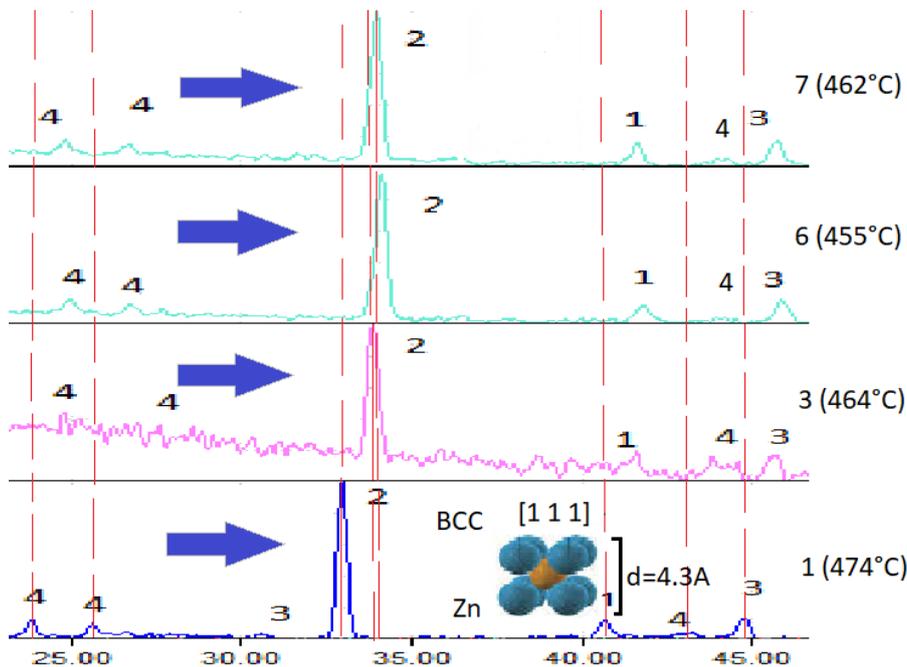


FIGURA 4.

-Cuatro muestras similares a diferentes temperaturas, #1 sumergida a 474°C, #3 sumergida a 464°C, #6 sumergida a 455°C y #7 sumergida a 462°C.

También, se presenta en el primer espectro, muestra 1 a 474°C, muestra 3 a 464 °C y muestra 6 a 455 °C, un aumento del ángulo 2θ , y por lo tanto, una contracción de la celda cristalina (Suryanarayana et.al., 1998), mientras en el espectro de la muestra 7 a 462°C se observa que se vuelve a expandir un poco la celda,

así mismo, los cálculos realizados muestran los espectros 3 y 6 que presentan una estructura cristalina BCC y la muestra 7 una estructura FCC.

Dado que las temperaturas de las 7 muestras analizadas son relativamente cercanas y la composición química se mantienen constante (teóricamente) y lo que cambia es el tiempo de inmersión en el baño ácido, posiblemente se puede atribuir que el cambio de estructura cristalina está relacionada con el tiempo de inmersión en la solución acida a la que son sometidas las probetas para su limpieza antes de su galvanizado.

También se debe considerar que debido a que algunas muestras presentaron mejor adherencia del recubrimiento en la lámina de acero (área totalmente cubierta del recubrimiento) a consecuencia de utilizar el medio ácido, fueron formadas sobre el sustrato las capas de recubrimiento gamma (Γ), delta (δ), zeta (ζ) y eta (η) y alguna de estas presenta este tipo de fases que favorecen a presentar un tipo de estructura cristalina FCC.

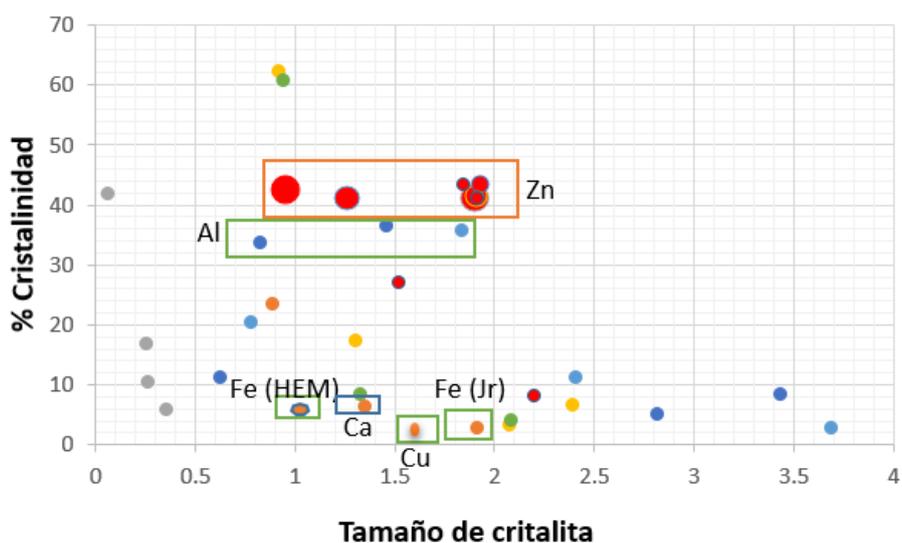


FIGURA 5.
-Cristalinidad contra tamaño de cristalita.

En la Figura 5, se muestra la relación entre el tamaño de cristalita contra la cristalinidad. Como se puede observar las fases de hematites y de metales base como el Cu se ubican en las zonas de muy baja cristalinidad no mayor a 10 %, en el rango de mediana la jarosita de 25 % y la de mayor cristalinidad la tienen el Zn arriba de 40%. Entre tanto, el zinc se encuentra en un tamaño de cristalita de rango de 0.8-2.0 #, esa diferencia se da posiblemente por las variables que existen en el proceso de galvanizado y quizá con mayor importancia el tiempo de inmersión en un baño ácido.

2.2 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).

En la Figura 6, se presenta una imagen mediante electrones secundarios de una zona cercana entre la lámina de acero y el recubrimiento. Se analizaron 4 zonas (A, B, C y D) dentro de la muestra debido a las diferentes morfología presentes, con el objeto de conocer su composición química y observar también la diferencia en las morfología presentes. De acuerdo a los análisis obtenidos mediante EDS la zona A corresponde a compuestos intermetálicos Fe-Zn ricos en Fe compuestos formados por la disolución de la lámina, la zona B corresponde al Zn del recubrimiento, la zona C es el Fe de la lámina y la zona D representa una porosidad causada por el desprendimiento del recubrimiento de Zn. De acuerdo a las mediciones la capa de recubrimiento sobre la lámina se encuentra en el rango de 250 a 280 μm .

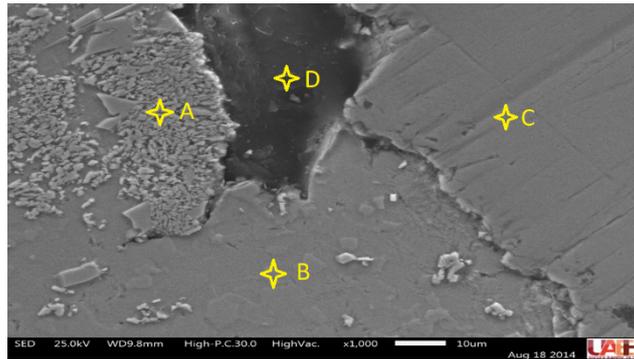


FIGURA 6.
-Microfotografía de lámina galvanizada 1000x.

En la Figura 7, se muestra el espectro D, los elementos presentes en el material donde se observa como elementos mayoritarios el Zn, O, C y Fe, el Zn perteneciente al recubrimiento de galvanizado, el Fe y el C de la lámina, y el O de una porosidad.

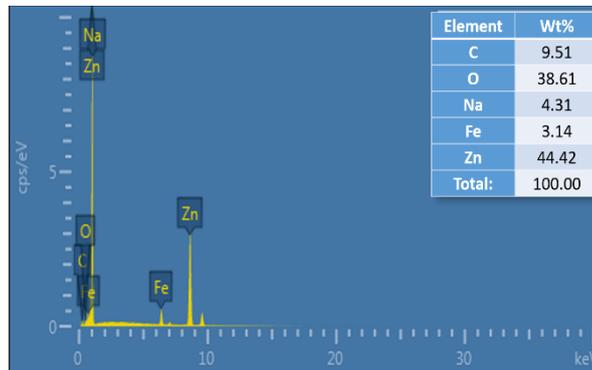


FIGURA 7.
- Análisis EDS de la zona D de la Figura 6.

2.3 Formación de capas intermetálicas

En la Figura 8, se muestra una fotomicrografía típica del recubrimiento de galvanizado, donde se presentan las diferentes fases que forman el recubrimiento, entre más cercana se encuentre del acero base el contenido de Fe es mayor (Marder, 2000).

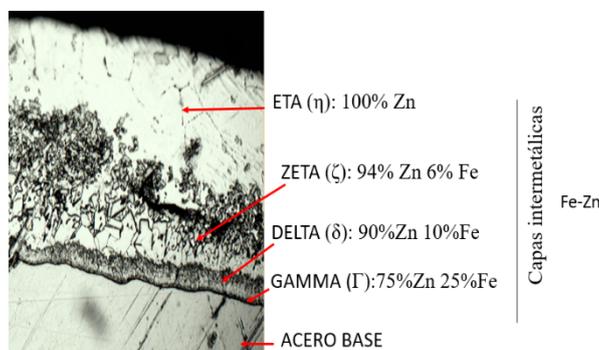


FIGURA 8.
Porcentaje de Zn y Fe de capas intermetálicas.

Para realizar las mediciones de las capas intermetálicas formadas durante la galvanización en caliente se utilizó el software Image-Pro, en la Figura 9 se muestra la fotomicrografía de la muestra #2, donde se puede observar las mediciones realizadas en las diferentes fases.

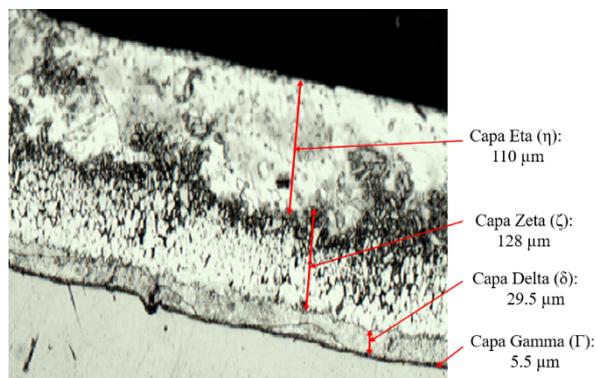


FIGURA 9.
Medición de capas intermetálicas.

2.4 Microdureza Vickers (HV)

Las propiedades mecánicas tales como la resistencia mecánica, la ductilidad y la dureza en las láminas galvanizadas dependerán en gran medida del óptimo control durante el proceso de inmersión en caliente. Por lo tanto, controlar las diferentes variables que intervienen en este proceso resulta fundamental y crítico. Es conocido que la capa externa del recubrimiento es casi 100% Zn (eta- η) la cual absorbe cualquier esfuerzo o impacto externo, si por alguna razón esta capa se desprendiera la siguiente capa del recubrimiento gamma (Γ) seguirá protegiendo al material. Es importante que durante el proceso de inmersión de las láminas de acero en el Zn sean controladas las reacciones metalúrgicas. La disolución de Fe proveniente de la lámina comienza a saturar el baño líquido, lo que ocasiona que pequeñas partículas de Fe y Fe-Zn comiencen a estar presentes tanto en el líquido como en el recubrimiento. Los compuestos intermetálicos Fe-Zn formados en las capas del recubrimiento concentran altos niveles de esfuerzos que son perjudiciales para la lámina galvanizada, ya que al aplicarse un proceso posterior de conformado mecánico como el doblado puede generar agrietamiento o fractura en el recubrimiento dejando expuesto el Fe de la lámina al medio ambiente provocando la oxidación y corrosión del material.

Ha sido reportado que para obtener óptimas propiedades mecánicas, la dureza en el recubrimiento debe estar en rangos de 50 a 340 HV, para la capa eta (η): 70 HV, capa zeta (ζ): 180 HV, capa delta (δ): 250 HV y capa gamma (Γ): 320 HV, (Marder, 2000), (Parvini and Rafiezadeh, 2009). Para conocer la distribución de la dureza de los recubrimientos formados sobre el sustrato de acero, se realizaron ensayos de laboratorio para determinar el grado de microdureza en escala Vickers que se presentaban en el recubrimiento de acuerdo a las diferentes condiciones de inmersión. Se estudiaron 7 muestras y se realizaron 3 indentaciones y se obtuvo el promedio y la desviación estándar (σ) de cada una.

En la Tabla I, se puede observar, que las muestras analizadas presentan una tendencia en el incremento de la escala de microdureza, conforme estas permanecieron mayor tiempo en el baño líquido. Lo anterior se puede atribuir a que a medida que las muestras son inmersas en el baño de Zn pequeñas cantidades de Fe son disueltas por la reacción química, y comienzan a acumularse en el baño líquido. Las partículas más pequeñas comienzan a precipitarse en la superficie del líquido y posteriormente son arrastradas por el recubrimiento, formando una cantidad de compuestos o fases intermetálicas. Con mayor presencia de Fe en el baño de Zn, la formación de compuestos intermetálicos Fe-Zn incrementa, y con ello el aumento en la dureza del recubrimiento.

TABLA I.
- Resultados microdureza Vickers en láminas galvanizadas.

Muestra	HV1	HV2	HV3	Suma	Prom	σ
1	248	254	260	762	254	6
2	238	253	280	771	257	21,28
3	256	269	267	792	264	7
4	261	276	273	810	270	7,93
5	268	280	280	828	276	6,92
6	298	305	312	915	305	7
7	300	308	319	927	309	9,53

3. CONCLUSIONES

Mediante DRX, se identificó el Zn BCC con 4.51% de cristalinidad y 1# de tamaño de cristalito, Zn con FCC con 21.21% de cristalinidad y 2#; se identificó Jarosita que demuestra que una inmersión en medio ácido provoca una hidrólisis de hierro y extracción de fósforo y azufre de la matriz de acero. Posiblemente se puede atribuir el cambio de estructura cristalina al tiempo de inmersión en la solución ácida donde son sometidas las probetas para su limpieza antes del galvanizado en caliente, favoreciendo a una mejor adherencia del recubrimiento sobre la lámina de Fe. Investigaciones futuras, se pueden enfocar en estudiar a profundidad el efecto del tiempo y medios ácidos sobre la adherencia de estos recubrimientos.

Así mismo, mediante MEB-EDS, se determinó que el promedio de las capas de galvanizado en caliente miden entre 250 a 280 μm , para los tiempos y las condiciones que se estudiaron.

Los ensayos de dureza mostraron que la presencia de Fe disuelto en el baño líquido incrementa la formación de compuestos intermetálicos Fe-Zn y por lo tanto un aumento en la escala de dureza, una diferencia de 50 HV se observó desde las primeras inmersiones hasta la última inmersión estudiada. Por lo tanto, se deben buscar condiciones óptimas para inhibir esta disolución y evitar el incremento acelerado de estos compuestos.

A partir de los análisis realizados en este trabajo se puede concluir que existen condiciones ideales para el proceso de galvanizado en caliente asegurando una buena adherencia del recubrimiento sobre la lámina de Fe, para el caso de estudio una temperatura de 473°C, 1 min de precalentamiento de la lámina antes de la inmersión y 2 minutos de inmersión sobre el baño líquido lograron producir un recubrimiento uniforme capaz de inhibir la corrosión, y con niveles de dureza adecuados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de la beca CONACYT con No. CVU: 928755, al apoyo y las facilidades brindadas por la UAEH al realizar mi trabajo de investigación y al CINVESTAV Unidad Saltillo.

REFERENCIAS

- Balloy, D., Dauphin, J., Tissier, J., 2007. Study of the comportment of fatty acids and mineral oils on the surface of steel pieces during galvanization. Elsevier 202, 479-485. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.06.021
- Bicao, P., Jianhua, W., Xuping, S., Zhi, L., Fucheng, Y., 2007. Effects of zinc bath temperature on the coatings of hot-dip galvanizing. Elsevier 202, 1785-1788. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.07.044
- Cocco, V., Iacoviello, F., D'Agostino, L., Natali, S., 2017. Sn and Ti influence on damage of bent hot-dip galvanizing phases. Elsevier 3, 224-230. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.04.052

- Dasheng W., Hao t., Changjun W., Jianhua W., Xuping S., 2016. Effect of silicon on the reaction between solid iron and liquid Zn-22.3 Wt% Al bath. Elsevier 305, 29-35. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.07.081
- Delvasto, P., Ramos, J., Gonzales, O., Durán, C., Domínguez, R., Moncada, P., 2012. Caracterización de residuos sólidos procedentes de dos procesos distintos de galvanizado en caliente por inmersión. METALURGIA 48, 33-44. DOI: 10.3989/revmetalm.1131
- Jiaojiao L., An D., Yongzhe f., Xue Z., Ruina M. Jianjun W., 2019. Efectos shot-blasting pretreatment on microstructures of hot.dip galvanized coating. Elsevier 364, 218-224. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.02.075
- Marder A., 2000. The metallurgy of zinc-coated steel. Elsevier 45, 191-271. DOI: 10.1016 / S0079-6425 (98) 00006-1
- Monojit D., Arup K., Shiv B., 2010. Morphology and properties of hot dip Zn-Mg and Zn-Mg-Al alloy coatings on steel sheet. Elsevier 205, 2578- 2584. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.10.006
- Morimoto, Y., Mcdevitt, E., Meshii, M., 1997. Characterization of the Fe-Al inhibition layer formed in the initial stages of hot-dip galvannealing. ISIJ 37, 906-913. DOI: 10.2355/isijinternational.37.906
- Parvini A., Rafiezadeh E., 2009. Effect of aluminum on microstructure and thickness of galvanized layers on low carbón silicon-free steel. International journal of ISSI 6, 25-29. DOI: 1252/article_330593.html
- Peng B., Wang J., Su X., Li Z., Yin F., 2007. Effects of zinc bath temperature on the coatings of hot-dip galvanizing. Elsevier 202, 1785-1788. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.07.044
- Pistofidis, N., Vourlias, G., Konidaris, S., Pavlidou, E., Stergiou, A., Stergioudis, G., 2007. The effect of bismuth on the structure of zinc hot dip galvanized coatings. Elsevier 61, 994-997. DOI: 10.1016 / j.matlet.2006.06.029
- Rico, Y., 2012. Estructura y caracterización de los recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente, sobre aceros. REDIP. UNEXPO 2, 368-378. <http://redip.bqto.unexpo.edu.ve>.
- Rico, Y., Carrasquero, E., 2017. Efecto de la composición química en el comportamiento mecánico de recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente: una revisión. Ingenius 18, 30-39. DOI: 10.17163/ings.n18.2017.04
- Shibli, S., Mena, B., Remya, R., 2015. A review on recent approaches in the field of hot dip zinc galvanizing process. Elsevier 262, 210-215. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.12.054
- Suryanarayana, C., Grant, M., 1998. X-Ray Diffraction A Practical Approach. Springer Science Business Media New York. Plenum Publishing Corporation.