

Obtención y caracterización de recubrimientos Zn-Al-Cu por inmersión en caliente sobre aceros de bajo carbono^(*)

J. Cervantes*, A. Barba*, M.A. Hernández*, J. Salas*, J.L. Espinoza*, C. Dénova*,
G. Torres-Villaseñor***, A. Conde**, A. Covelo**** y R. Valdez*

Resumen

El presente estudio describe los trabajos desarrollados para generar y caracterizar recubrimientos de aleaciones Zn-Al-Cu sobre aceros de bajo carbono, mediante tecnología de inmersión en caliente. Los trabajos incluyen la determinación del proceso de preparación y la definición de los parámetros que permiten obtener el recubrimiento. Los recubrimientos obtenidos fueron sometidos a procesos de laminación en frío y a tratamientos de recocido en diferentes temperaturas y a diversos tiempos. Las piezas se caracterizaron empleando técnicas de microscopía óptica y electrónica, ensayos de microdureza, análisis químico puntual mediante microsonda, ensayos de embutido, ensayos de desgaste y de corrosión en solución de cloruro de sodio, empleando técnicas electroquímicas. Los recubrimientos muestran resistencia a la corrosión y al desgaste en presencia de cloruro de sodio, por lo que constituyen una alternativa de costo atractivo para su aplicación en zonas costeras y donde se requiera una adecuada resistencia al desgaste adhesivo.

Palabras clave

Recubrimientos; Inmersión en caliente; Corrosión; Desgaste; Formabilidad.

Development of Zn-Al-Cu coatings by hot dip coated technology: preparation and characterization

Resumen

In the present study, research concerning Zn-Al-Cu coatings on low carbon steels has been conducted in order to characterize different properties obtained by a hot-dip coated process. The results include preparation procedure as well as the processing parameters of the coatings. The obtained coatings were subjected to a cold rolling process followed by an anneal heat treatment at different temperatures and under different time conditions. The structural characteristics of coatings have been investigated by optical and electron microscopy. The mechanical properties were obtained by using micro-hardness testing, deep drawing and wear tests whereas chemical analyses were carried out using the SEM/EDAX microprobe. The corrosion properties were achieved by using a salt spray fog chamber and potentiodynamic tests in a saline solution. The coatings are resistant to corrosion and wear in the presence of sodium chloride, therefore, the coatings could be an attractive alternative for application in coastal areas, and adequate wear adhesive resistance.

Palabras clave

Coatings; Hot dip; Corrosion; Wear; Formability.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos para obtener recubrimientos mediante tecnologías de inmersión en caliente y en particular el galvanizado, se vienen usando como una estrategia fundamentalmente de protección contra la corrosión ante diferentes ambientes, especialmente urbanos, en los que su comportamiento resulta muy satisfac-

torio en términos generales. Sin embargo, en ambientes costeros, en los que la humedad y la concentración de cloruro de sodio suelen ser elevados, la resistencia a la corrosión de los aceros galvanizados puede disminuir sensiblemente. Algunas propuestas de solución a esta limitación incluyen la generación de recubrimientos con altos contenidos de aluminio (aluminizado por inmersión en caliente), o la elaboración de

^(*) Trabajo recibido el día 1 de marzo de 2013 y aceptado en su forma final el día 7 de junio de 2013.

* Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA), Dpto. de Materiales y Manufactura, Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, 2º. Nivel Edificio "T", México, 04510 D. F. *E-mail: arbapin5@gmail.com*

** Dpto. de Corrosión y Protección, (CENIM-CSIC), Av. Gregorio del Amo 8, Madrid, 28040, España.

*** Dpto. de Materiales Metálicos y Cerámicos, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM, Ciudad Universitaria, México, 04510 D. F.

****Dpto. de Metalurgia. Facultad de Química. UNAM.

recubrimientos de aleaciones Zn-Al con diversos porcentajes de aluminio: 5% Al (Galfan) o Zn-55% Al (Galvalume, Zinalume) y otras variantes con diferentes proporciones de aluminio.

Las aleaciones Zn-Al constituyen un grupo de materiales metálicos extensamente utilizados. Son aleaciones que presentan una buena combinación de propiedades mecánicas y con una densidad intermedia entre aceros y aleaciones de aluminio. Sus propiedades también son competitivas con aleaciones de cobre, con la ventaja de una menor densidad^[1].

En las últimas décadas se han desarrollado varias aleaciones Zn-Al, con contenidos de aluminio mayores que las aleaciones convencionales para fundición a presión. Estas aleaciones tienen excelentes propiedades para la fundición, buenas propiedades mecánicas, buena maquinabilidad y resistencia a la corrosión a temperaturas bajas, además de bajo costo inicial^[2] y la opción de un comportamiento superplástico.

Si a estas aleaciones binarias Zn-Al se añaden pequeñas cantidades de elementos de aleación, que han demostrado mejorar su rendimiento, específicamente cobre y magnesio, entonces su número y usos crecen. Sin embargo, si se consideran sólo las aleaciones binarias Zn-Al, en los últimos años su uso se ha extendido a muy diversos campos (Lan *et al.*^[3], Choudhury y Das^[4], Kushibe *et al.*^[5]). Además, se ha ampliado el estudio de la respuesta superplástica de estas aleaciones a través de procesos tales como ECAP (extrusión en canal angular)^[6]. Cabe señalar, que en relación con su comportamiento frente a diferentes medios corrosivos, se han publicado una serie de trabajos en donde se destacan las relaciones entre la microestructura y el comportamiento de estas aleaciones. Así, por ejemplo, Li^[7], Tsopani *et al.*^[8], Ares *et al.*^[9], reportan una mejora en el comportamiento del recubrimiento con un Zn-25Al con una velocidad de corrosión 2 a 3 veces más baja que el Zn-55Al-Si. Se reporta que las capas de Zn-25Al sobre aceros al carbono, presentan productos de corrosión asociados a la formación de óxidos o hidróxidos de zinc, lo que no ocurre con el recubrimiento de Zn-55Al, en donde los productos de corrosión son óxidos o hidróxidos de hierro, menos protectores.

Estos resultados se suman a los de Osorio *et al.*^[10], quienes concluyen que la velocidad de corrosión de estas aleaciones depende de: (a) la velocidad de enfriamiento durante la solidificación, (b) de la distribución de soluto, lo cual depende del elemento aleante agregado y (c) del tipo de comportamiento, anódico o catódico, que presente cada componente de la aleación.

En un trabajo de valoración mediante ensayos de corrosión atmosférica, de recubrimientos de Zn, Al y Zn/Al sobre aceros al carbono, a nivel iberoameri-

cano, Morcillo *et al.*^[11], informa que los recubrimientos Zn-5Al y Zn-15Al, proporcionan una condición de protección catódica que los recubrimientos de Al-13Si y Zn-55Al no ofrecen.

Por su parte Wang, Xiong *et al.*^[12], valoraron mediante SEM, TEM y Difracción de rayos X, el efecto de la adición de cobre a recubrimientos de Zn-30Al depositados por medio de técnicas de proyección térmica y señalan que el mejor comportamiento se logró con la adición de 1% Cu, que se encuentra en solución.

Las aleaciones Zinalco, que se han desarrollado en la UNAM, presentan porcentajes de aluminio de alrededor de 20%, y pequeños contenidos de cobre. Las aleaciones se han caracterizado en cuanto a su microestructura y propiedades, a la vez que se han desarrollado diversas tecnologías de proceso, tales como fundición, laminación y extrusión. Adicionalmente, en el caso particular de México, estas aleaciones constituyen una opción para el mejor aprovechamiento del zinc, recurso abundante en el país y subutilizado.

Las aleaciones Zinalco presentan mayores niveles de resistencia mecánica (del orden de 300 a 350 Mpa), que el aluminio, con una densidad 5,4 g/cm³, y con la posibilidad de obtener respuesta superplástica. La fusión de estas aleaciones resulta más sencilla y con menor gasto de energía que las del aluminio, en razón de que el intervalo de temperaturas en que ocurre la fusión (420-480 °C), es menor que en el caso del aluminio y sus aleaciones.

En lo relativo a las aleaciones Zinalco, trabajos de Genesca y Uruchurtu^[13], Singer *et al.*^[14], Grovas, Pérez y Genesca^[15], Cota *et al.*^[16], Hernández *et al.*^[17], reportan, después de evaluar la resistencia a la corrosión de estas aleaciones en una solución NaCl 0,5 M, la formación de una película pasiva de Al₂O₃, que parece formarse espontáneamente. Adicionalmente, mencionan que los resultados de ruido electroquímico mostraron un comportamiento típico de materiales que forman un óxido protector.

Tomando en cuenta los resultados reportados en relación a la resistencia a la corrosión de estas aleaciones y las limitaciones del galvanizado convencional en medios con altos contenidos de cloruros, en esta investigación se planteó como objetivo el desarrollar una tecnología, mediante inmersión en caliente, que permitiera generar recubrimientos de aleaciones Zn-Al-Cu y caracterizarlos de modo amplio a fin de evaluar sus posibilidades de aplicación.

2. PROCESO EXPERIMENTAL

Se prepararon mediante corte, probetas de 26x90 mm, y otras de dimensiones adecuadas para cada uno de

los ensayos a realizar, en acero AISI 1018 de composición C-0,18%, Si-0,25% y Mn-0,75%. Posteriormente, se sometieron a un proceso de preparación que incluye una limpieza con percloroetileno con permanencia en el baño de 5 a 10 min, un decapado con una solución de ácido clorhídrico al 10%, usando tiourea como inhibidor, durante 6 min, y posteriormente se realizó la activación de la superficie (flujado), empleando para ello una solución de cloruro de zinc y cloruro de amonio 1:1 en la que se colocaron las piezas durante 5 min. A continuación las piezas se colocaron en el baño de zinalco fundido a 600 °C durante 1 a 5 min y se enfriaron parte de ellas en agua y otras al aire. A algunas piezas se les aplicó recocidos a 320 °C en un horno Lindbergh, a tiempos de 1, 2, 3, 4 y 5 h. Un grupo de probetas revestidas, se sometieron a procesos de laminación, utilizando una laminadora Hille experimental, usando una velocidad de laminación de 10 pies/min y realizando dos pasos de 20% de deformación por pasada, a 300 °C.

Posteriormente, se cortaron secciones transversales de piezas recubiertas, que fueron montadas en baqueta y lijadas con lijas de carburo de silicio de números 180 hasta 600, seguido esto de operaciones de pulido con alúmina de 0,3 μm y de 0,05 μm . Las piezas se observaron en un microscopio metalográfico Olympus y en un microscopio electrónico de barrido Philips XL20, donde se realizaron observaciones del aspecto y espesor del recubrimiento. Con ayuda de la microsonda acoplada a este último microscopio, se efectuaron determinaciones del perfil de composición química de los recubrimientos sin y con recocido posterior.

Los valores de microdureza de los recubrimientos se determinaron empleando para ello un microdurómetro Vickers marca Leitz, Wetzlar Germany 8068, con una carga de 100 g, realizando, al menos, diez indentaciones en cada una de las zonas de los recubrimientos caracterizados.

Se realizaron también ensayos de corrosión en cámara de niebla salina, con base en la Norma ASTM B-117, para lo cual se cortaron probetas aluminizadas y zinalquizadas por inmersión en caliente de 2,5x1,5 cm, colocando las muestras y pesándolas en una báscula analítica de sensibilidad de 0,0001 g, sacando las piezas y limpiándolas cada 24 horas. La temperatura de la cámara fue de 35 °C, con ciclos de trabajos de 59 min de trabajo por un minuto de paro por cada 24 horas y una concentración de NaCl de 5%. La prueba se realizó durante 10 días.

Con la finalidad de evaluar el comportamiento a la corrosión de los recubrimientos, se aplicaron también ensayos electroquímicos de polarización a lo largo de 3 días en probetas de acero AISI 1018 sin recubrimiento y de piezas aluminizadas y galvanizadas

por inmersión en caliente, como medio de comparación con las zinalquizadas por inmersión en caliente. Para ello se montaron 3 probetas de cada material dentro de una celda electroquímica empleándose soluciones de NaCl y de NaSO₄ al 3% en peso en agua, utilizándose como electrodo auxiliar el grafito y como electrodo de referencia calomel saturado. El equipo empleado fue un potencióstato PGP201 de Radiometer Copenhagen conectado a una computadora personal, con potencial máximo de salida de +/- 4,095 V, con resolución de 1 mV.

Adicionalmente, se realizaron pruebas a láminas de acero AISI 1018 zinalquizadas por inmersión en caliente, para evaluar sus propiedades mecánicas y determinar su diagrama de conformabilidad límite. Para obtener este tipo de diagrama, se empleó un método de grabado electroquímico para generar un mallado circular y se realizaron pruebas de embutido mediante el ensayo Erichsen en una máquina universal de pruebas mecánicas servohidráulica marca Instron model 1331. A partir de los datos aportados por este ensayo se empleó una técnica para medir la deformación en la malla por efecto del embutido y obtener información acerca de las propiedades mecánicas de los recubrimientos.

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Una serie de experimentos iniciales permitieron determinar que los parámetros de operación adecuados para lograr un recubrimiento de aspecto apropiado fueron: un intervalo de temperaturas entre 550 y 600 °C y un tiempo de inmersión de 5 min. La figura 1 muestra el aspecto del recubrimiento después de ser extraída la pieza del baño y enfriada al medio ambiente.

Los espesores de recubrimiento obtenidos oscilaron entre 100 y 200 μm . Se puede distinguir una microestructura de granos equiaxiales en la zona externa (superior en la figura 1), en la que se presentan dos tonalidades: una que corresponde a una fase α rica en aluminio y otra a la fase β rica en zinc, que constituyen las fases presentes, producto de la aleación Zinalco. Adicionalmente, hay una segunda zona (inferior en la figura), a la que hemos denominado "intermetálico" aledaña al sustrato de acero de bajo carbono, en la que se ha constatado que se presentan diferentes combinaciones Al-Fe-Zn, considerando, en primera instancia, lo que se reporta en la literatura en los procesos de galvanizado y aluminizado por inmersión en caliente de aceros de bajo carbono.

Los resultados provenientes del análisis químico puntual de la zona exterior de una probeta zinalquizada, se muestran en la figura 2, donde se puede ver

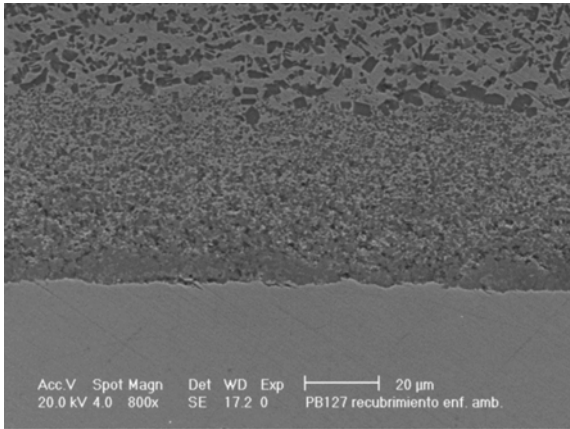


Figura 1. Aspecto del recubrimiento después de ser extraída la pieza del baño.

Figure 1. Coating appearance after hot dip process.

que primordialmente hay una composición similar a la de las aleaciones Zinalco. Cuando se obtiene el análisis químico en la zona cercana al sustrato (Fig. 3), la proporción de aluminio es mayor y la de hierro y zinc es muy semejante, lo que muy probablemente es reflejo de la formación de compuestos intermetálicos en los que participan estos elementos y que son de mayor dureza. Una posible interpretación es que fundamentalmente estarían constituidos por compuestos Fe-Al con participación de zinc, lo cual estaría en concordancia con el incremento de microdureza que se reporta líneas adelante.

La microdureza, como se observa en la tabla I, presentó valores entre 170 y 200 Vickers, en la zona externa y en la zona de intermetálicos alcanzó, como se puede ver, valores entre 286 y 350 Vickers, que son durezas superiores a la dureza del sustrato.

La microestructura de los recubrimientos, al cabo de 1, 2 y 3 h de recocido a 320 °C es similar a la microestructura de la figura 1, esto es, no presentan cambios significativos. Sin embargo, con el recocido de 4 y 5 h, presentan una microestructura de tipo perlítico, que también puede producirse a partir de una aleación de tipo eutectoide como la del Zinalco, cuando se enfría lentamente, lo cual se ha asociado a que la aleación, al calentarse, se acerca al equilibrio como producto del tratamiento aplicado. Acompañan a este tratamiento, como un inconveniente adicional, como se puede observar en la figura 4, la presencia de porosidades en la zona de los intermetálicos, producto de la significativa difusión provocada por los tratamientos térmicos aplicados.

La figura 5 presenta una comparación de la pérdida de peso que se obtuvo en el ensayo de niebla salina, al cabo de 10 días, para el acero AISI 1018 sin recubrimiento y la de probetas zinalquizadas por inmersión en caliente y sometidas a diversos tratamientos posteriores, reflejándose que bajo todas las condiciones, el acero zinalquizado presenta una mejor respuesta que el acero sin revestir. Cabe destacar que la probeta zinalquizada y enfriada al medio ambiente, laminada a 20% de reducción y recocida 1 h, fue la que presentó menor pérdida de peso.

La figura 6 muestra las curvas de polarización del acero 1018 sin recubrimiento y las del propio acero

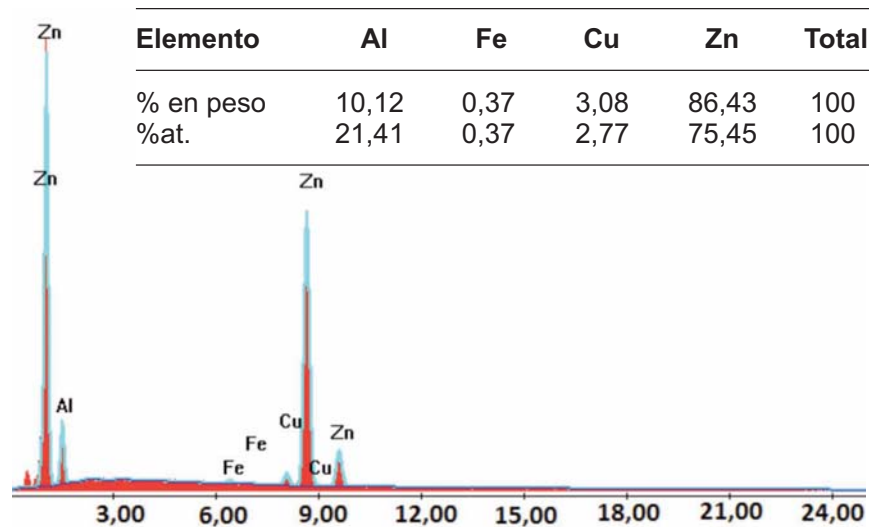


Figura 2. Análisis químico en la zona externa del recubrimiento.

Figure 2. Chemical analysis in the outer zone of the coating.

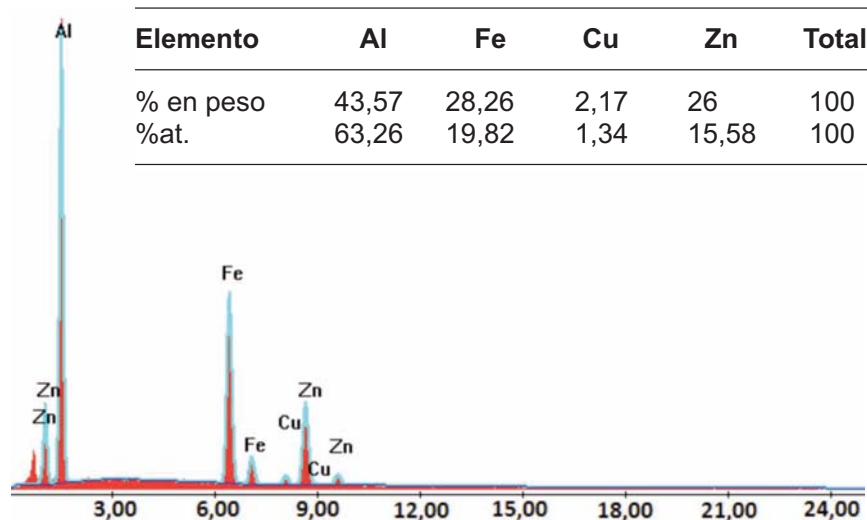


Figura 3. Análisis químico del recubrimiento en la zona aledaña al sustrato.

Figure 3. Chemical analysis of the coating close to the substrate.

Tabla I. Microdurezas Vickers (HV100 g) de aceros zinalquizados por inmersión en caliente en diversas zonas del recubrimiento

Table I. Vickers microhardness (HV100 g) of zinalquized steels hot dip coating in different areas

Probeta	Dureza HV (zona externa)	Dureza HV (zona intermetálicos)
4	207	332
3	206	297
1	181	351
2	170	286

con recubrimiento de aluminizado, galvanizado y zinalquizado por inmersión en caliente. Cabe destacar que el sistema que presenta mejor comportamiento electroquímico en resistencia a la corrosión corresponde al aluminizado seguido del zinalquizado, galvanizado y finalmente el acero 1018. Lo anterior se debe tanto a los potenciales de corrosión desarrollados, como a la corriente registrada a lo largo del barrido potenciodinámico, lo cual se reafirma con los valores presentados en la tabla II.

El aluminizado, en el ramal anódico, presenta una zona de pasivación que abarca varias decenas de milivoltios. Sin embargo, el zinalquizado tan sólo

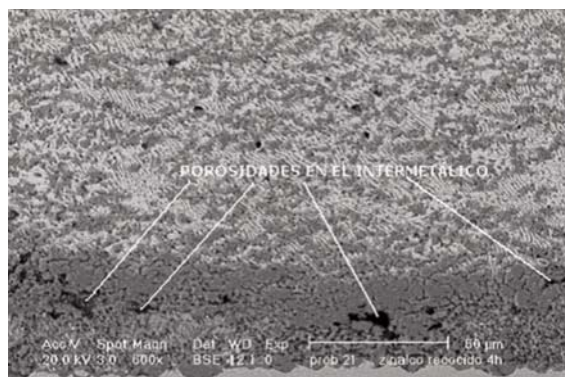


Figura 4. Presencia de porosidades en la zona de intermetálicos, producto de la significativa difusión provocada por los tratamientos térmicos aplicados.

Figure 4. Porosities in the intermetallic matrix caused by diffusion process after heat treatment.

presenta una incipiente zona pasiva para dar paso a una continua zona de transpasivación. Por otro lado, el galvanizado no presenta en ningún momento ningún tipo de zona pasiva como los casos anteriores, lo que se interpreta como el hecho de que el sistema desarrolla procesos de oxidación constantes a potenciales anódicos. Aunque el potencial de corrosión del galvanizado es más catódico que el del zinalquizado, la corriente asociada en la zona anódica del primer sistema es mucho más alta que la presentada por el zinalquizado, lo que significa menor protección

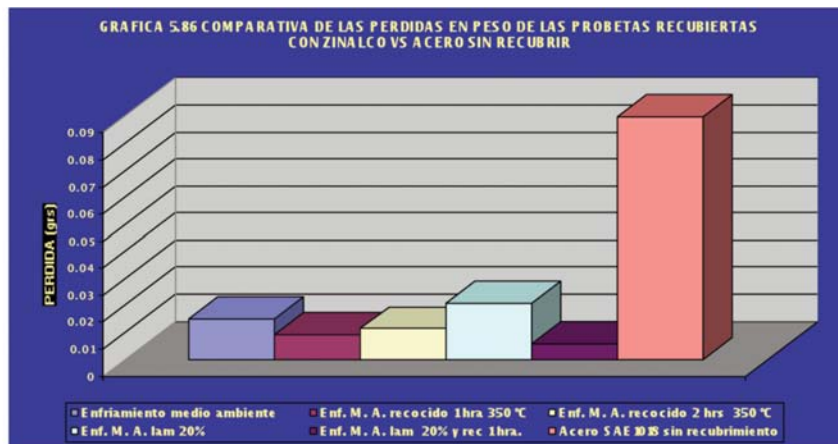


Figura 5. Pérdida en peso en ensayo de cámara de niebla salina después de 10 días.

Figure 5. Weight loss data in salt spray fog chamber after 10 days.

frente al proceso de oxidación. Para que se desarrolle el proceso anódico en el zinalquizado se requieren potenciales anódicos a -1.000 mV/ECS, mientras que para el galvanizado el proceso de oxidación comienza a registrarse a partir de -1.100 mV/ECS, lo que indica mayor facilidad al desarrollo del proceso de corrosión.

Finalmente, el acero 1018, metal desnudo, exhibe a potenciales anódicos (-700 mV/ECS) una zona de activación que perdura hasta el final del ensayo (-500 mV/ECS), lo que indica un fuerte grado de oxidación respecto a los otros sistemas.

Los estudios del comportamiento mecánico (Fig. 7) mostraron que el recubrimiento de Zinalco presenta baja ductilidad (menor al 15%), si se

Tabla II. Gráfica del cambio de comportamiento catódico a anódico, velocidad de prueba 60 mV/min

Table II. Graphical cathodic behavior change anodic 60 mV/min speed test

Material prueba	Acero 1018	Aluminizado	Zinalquizado	Galvanizado
Potencial [mV]	-897	-953	-1.109	-1.036
Corriente [log i]	-5,54	-6,32	-6,48	-5,37

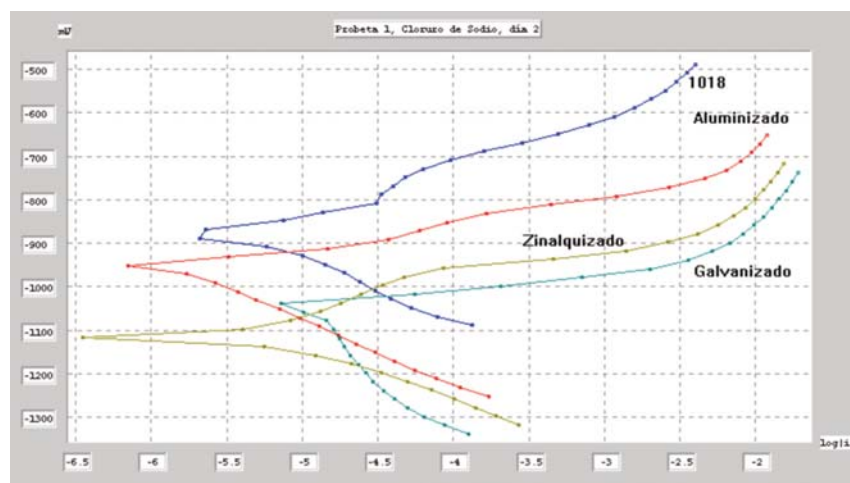


Figura 6. Curvas de polarización de los recubrimientos en acero 1018.

Figure 6. Polarization curves of steel 1018 coated.

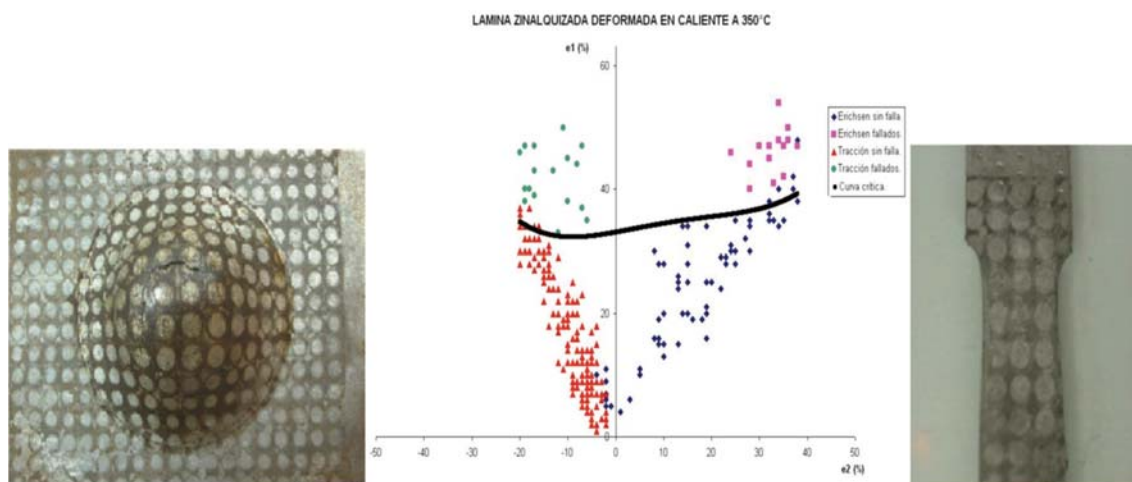


Figura 7. Probeta deformada a 350 °C y su gráfica de conformabilidad límite.

Figure 7. Deformed sample at 350 °C with its limit conformability test.

deforma en frío y aun a temperaturas del orden de 300 °C. Sin embargo, si se deforma a 350 °C, la ductilidad se incrementa a niveles del 35%, lo que está asociado a la buena ductilidad que las aleaciones de Zinalco presentan a temperatura elevada.

El resultado de la evaluación del desgaste adhesivo proveniente de los aceros zinalquizados por inmersión en caliente presenta una mejoría respecto al acero desnudo como se puede observar en la figura 8. Ello se puede asociar, en nuestra opinión, a la presencia de intermetálicos Al-Fe-Zn en la zona aledaña al recubrimiento. Es conveniente destacar, que aun con el cambio en las condiciones de prueba, la resistencia al desgaste adhesivo, es evidente.

De acuerdo con los resultados anteriores, se pueden sintetizar algunos aspectos destacados de los recubrimientos logrados.

El recubrimiento está constituido por una zona externa de granos equiaxiales con una composición cercana a la de la aleación Zinalco, que proporciona una mejor resistencia a la corrosión que la que presenta el acero galvanizado, en virtud de que, a diferencia de la capa externa del galvanizado, en este caso, se forma, primordialmente, una capa pasiva de óxido de aluminio. La presencia del zinc en la composición de la zona cercana al sustrato, a la que hemos denominado zona de intermetálicos, tiene un efecto importante en el comportamiento de este tipo de compuestos. Si se compara con el comportamiento de la capa de aluminizado por inmersión en caliente, donde dicha zona está constituida por combinaciones Al-Fe, de elevada dureza y fragilidad, en el caso del zinalquizado la dureza es mayor que la del galvanizado pero no se presentan los agrietamientos que se evidencian al observar capas de aluminizado por immer-

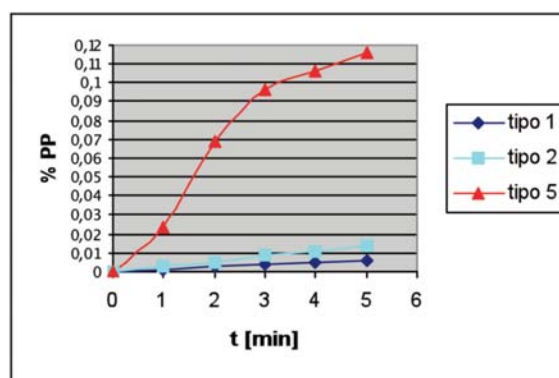


Figura 8. Comportamiento en desgaste adhesivo del acero sin recubrimiento (curva tipo 5) y de los aceros zinalquizados por inmersión en caliente (curvas tipos 1 y 2).

Figure 8. Adhesive wear behavior of uncoated steel (type 5) and hot dip zinalquized steels (types 1 and 2).

sión en caliente (Fig. 9). Estos resultados se corresponden con la propuesta de Genescá^[13 y 16], y con las conclusiones obtenidas por Li^[7], en la que se menciona que un recubrimiento Zn-25% Al presenta mejor resistencia a la corrosión por picaduras que la aleación Zn-55% Al-Si y también explica el mejor comportamiento en desgaste adhesivo de estos recubrimientos en relación con los recubrimientos de aluminizado por inmersión en caliente.

En cuanto al comportamiento mecánico, se puede concluir, después de los ensayos aplicados, que el recubrimiento presenta suficiente ductilidad y, por

tanto, se puede laminar a temperaturas elevadas, superiores a 300 °C. Los cambios microestructurales que es posible provocar en el recubrimiento con la aplicación de tratamientos de recocido requieren largos tiempos de proceso, para pasar de una condición de dos fases separadas: α , rica en aluminio y β , rica en zinc, a una morfología laminar eutécticoide de las propias fases y que dichos cambios no están acompañados de modificaciones de gran magnitud en las propiedades mecánicas, de tal forma que la aplicación de tratamientos térmicos no resulta recomendable para estos recubrimientos.

Una consideración inicial respecto del costo del zinalquizado por inmersión en caliente, permite visualizar que, aunque estos recubrimientos serán más costosos que los del galvanizado, en razón de la adición de aluminio, la mejor respuesta en atmósferas marinas permite proponerlo como una alternativa digna de ser considerada, tomando en cuenta que será posible incrementar la vida útil de componentes, equipos e instalaciones aplicando esta novedosa tecnología y que, por otro lado, será más económica que los recubrimientos Zn-55Al y, por supuesto, que el aluminizado por inmersión en caliente. Para países como México que no cuenta con depósitos de bauxita, y sí con reservas de minerales de zinc, constituye una opción para mejorar el rendimiento de bienes, construcciones y equipos que estén instalados en zonas costeras u otras, que sean muy agresivas para el galvanizado con la ventaja adicional de una muy buena resistencia al desgaste adhesivo y la posibilidad de aprovechar de mejor modo los recursos de zinc disponibles en México.

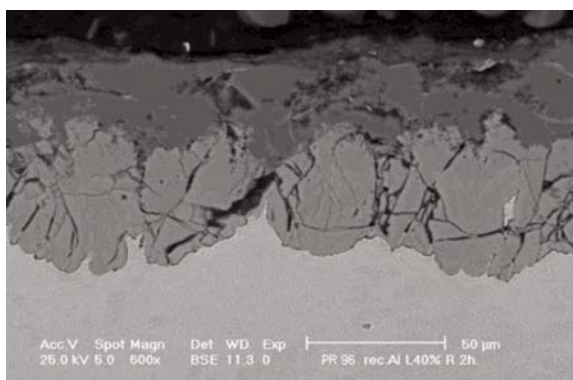


Figura 9. Recubrimiento de acero aluminizado por inmersión en caliente y posteriormente, laminado 40% y recocido durante 2 h.

Figure 9. Hot dip aluminized coated steel. Cold rolled 40% and annealed for 2 h.

4. CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado una tecnología que ha permitido obtener un recubrimiento de una aleación Zn-Al-Cu, por inmersión en caliente, que presenta una mejor resistencia a la corrosión, en ambientes marinos, que el acero galvanizado.
- El recubrimiento logrado está constituido de dos zonas: una exterior de una composición prácticamente semejante a la de la aleación Zinalco, que proporciona buena resistencia a la corrosión ante soluciones de cloruro de sodio. Este comportamiento está asociado a la formación de una capa pasiva, fundamentalmente formada de óxido de aluminio y una región interior, aledaña al sustrato, en la que se considera que se generan y presentan compuestos intermetálicos Al-Fe-Zn, de mayor dureza y de menor fragilidad que los que se presentan en las capas de aluminizado por inmersión en caliente, constituidas por combinaciones de Al-Fe, que contribuyen, por cierto, a que el recubrimiento presente una muy buena resistencia al desgaste adhesivo.
- El recubrimiento presenta una ductilidad reducida, a temperaturas bajas, aunque puede conformarse con facilidad a temperaturas del orden de 300 y 350 °C.
- El recubrimiento conseguido se constituye en una alternativa de mejor rendimiento en ambientes marinos, respecto al galvanizado, a un costo razonable, con una buena resistencia al desgaste adhesivo y de menor costo en relación al aluminizado por inmersión en caliente o a otras opciones como el recubrimiento Zn-55Al, además de que aprovecha un recurso abundante y subutilizado en México.

REFERENCIAS

- [1] G. Torres-Villaseñor, Y. Hua y C. Piña-Barba, *Proceedings of the 3rd International Conference on Zn-Al Alloys*, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM, 1994.
- [2] K.H.W. Seah, S.C. Sharma y B.M. Girish, *Corros. Sci.* 39 (1997) 1-7.
- [3] C.J. Lan, T.S. Chin, P.H. Lin y T.P. Perng, *J. New Mat. Electrochem. Syst.* 9 (2006) 27-32.
- [4] P. Choudhury y S. Das, *Mater. Sci. Technol.* 19 (2003) 535-537.
- [5] A. Kushibe, K. Makii, L.F. Chiang, T. Tanaka, T. Kohzu y K. Higashi, *Mater. Sci. Forum* 475-479 (2005) 3.055-3.060.
- [6] T. Tanaka y K. Higashi, *Mater. Trans.* 45 (2004) 1.261-1.265.

- [7] Y. Li, *Bull. Mater. Sci.* 24 (2001) 355-360.
- [8] C. Panagopoulos y A. Tsopani, *Int. J. Corros.* (2011) Article ID 540196.
- [9] A. Ares, L. Gassa, S. Gueijman y C. Schvezov, *Parámetros de solidificación versus Resistencia a la corrosión de aleaciones ZA4, ZA16, ZA27*, Anales AFA, Vol. 19, 2007, pp. 160-166.
- [10] W. Osorio, C. Freire y A. García, *J. Alloy Compd.* 397 (2005) 179-191.
- [11] Z. Panossian, L. Mariaca, M. Morcillo, S. Flores, J. Rocha, F. Peña, J. Herrera, F. Corvo, M. Sánchez, O. Rincón, G. Prydibailo y J. Simancas, *Surf. Coat. Tech.* 190 (2005) 244-248.
- [12] F. Wang, B. Xiong, Y.H. Zhang, Z. Liu, X. Li y Ch. Qu, *Mater. Sci. Eng. A.* 532 (2012) 100-105.
- [13] J. Genesca y J. Uruchurtu, *Proceedings of the 3rd International Conference on Zn-Al alloys*, Ed. por G. Torres-Villaseñor, Y. Hua y C. Piña-Barba, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM, México, 1994, pp. 215-218.
- [14] G. Torres, A. Ugalde, L. Hernández y I.L. Singer, *Corros. Sci.* 24 (1985) 159.
- [15] T. Grovas, T. Pérez y J. Genesca, *Proceedings of the 3rd International Conference on Zn-Al alloys*, Ed. por G. Torres-Villaseñor, Y. Hua y C. Piña-Barba, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM, México, 1994, pp. 225-229.
- [16] J. Genesca y L. Cota-Araiza, *Proceedings of the 3rd International Conference on Zn-Al alloys*, Ed. por G. Torres-Villaseñor, Y. Hua y C. Piña-Barba, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM, México, 1994, pp. 237-242.
- [17] L. Hernández, *Corrosión en un medio vapor-agua de la aleación eutectoide Zn-Al con diferentes microestructuras*, Folleto Técnico N° 71, Instituto de Geología y Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, 1981.