

## Introducción

El acero galvanizado continuo por inmersión en caliente es producido casi exclusivamente en líneas de recubrimiento en las que el zinc fundido contiene una pequeña cantidad de aluminio. Éste ha sido el caso durante muchos años y es, de hecho, la razón principal por la que la plancha galvanizada es usada hoy en día para una amplia variedad de productos muy exigentes. La adición del aluminio no se lleva a cabo para mejorar el comportamiento contra la corrosión, sino para asegurar una buena adherencia del recubrimiento durante la formación de la plancha. Este artículo explica la influencia del aluminio y por qué es tan importante para la fabricación y usos exitosos de las planchas galvanizadas por inmersión en caliente.

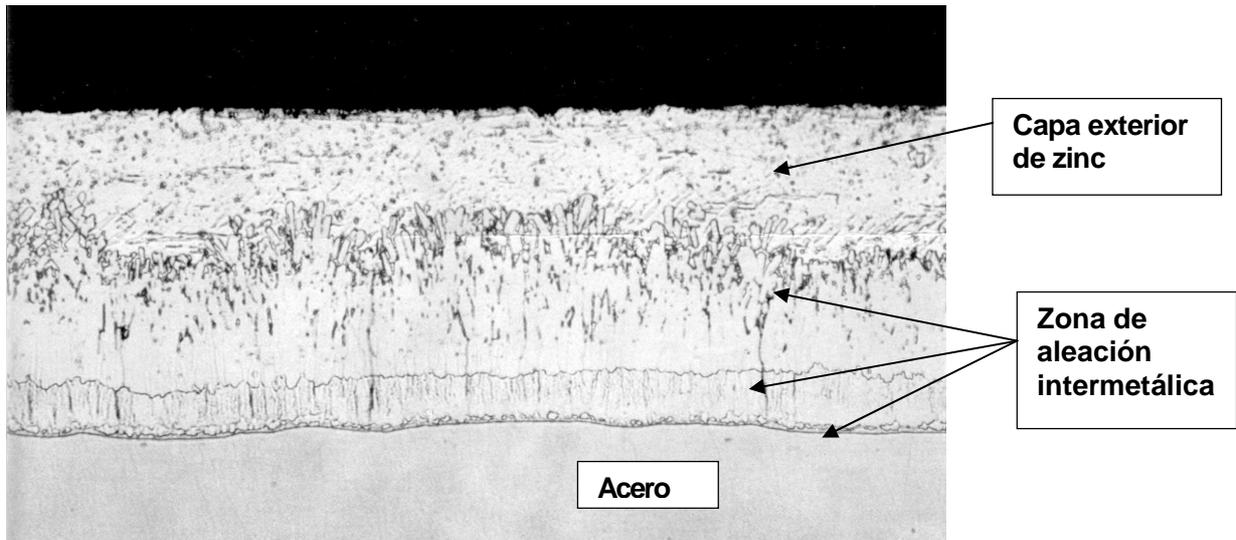
## Metalurgia del Recubrimiento

La plancha galvanizada por inmersión en caliente es fabricada sumergiendo las planchas de acero, como una banda continua, en un baño (paila) de zinc fundido. El proceso se explica en detalle en el *GalvInfoNote* 2.1 y nuevamente en el *GalvInfoNote* 2.3. Ambos lados de la plancha de acero se encuentran muy limpios y libres de óxido de superficiales al introducirlos en el baño de recubrimiento. Por lo general, la plancha es acero enrollada en frío y recibe un tratamiento de recocido en línea a temperaturas superiores a los 650°C (1200°F) en la entrada a la paila o recipiente, y luego es enfriado a aproximadamente a 470-490°C (875-925°F) antes de entrar al baño. El zinc, que funde a 419°C (787°F), se encuentra con frecuencia a una temperatura de 465°C (870°F). La plancha de acero tiene suficiente resistencia a las altas temperaturas, de tal manera que puede ser tensionada, tanto a través del horno de recocido, como en el baño de zinc sin rasgar o deformarse.

Durante el tiempo en que la plancha es sumergida en el baño (en algunas líneas de recubrimiento, tan brevemente como ~2 segundos), el acero y el zinc fundido reaccionan metalúrgicamente. ¿Qué ocurre? Los átomos de la superficie de la plancha de acero, los cuales están en estado sólido, interactúan con los átomos de zinc del baño, que se encuentran en estado fundido. Esta interacción se llama **difusión**. Los átomos de zinc se mueven en dirección del acero y los átomos de hierro en el acero migran hacia el zinc fundido. El resultado es la formación de una capa sólida "aleada" entre el acero y el zinc fundido. Esta capa contiene átomos de zinc y hierro en proporciones específicas, y es denominado un compuesto **ínter metálico**. La unión de los átomos de diferentes metales es conocida como **aleación** y la zona de difusión que se forma durante el galvanizado es una **aleación ínter metálica**. Es esta zona de aleación, la cual cuando se forma apropiadamente, provee un excelente enlace entre el acero y el recubrimiento de zinc.

Fuerzas de tensión superficial causan que una capa exterior del zinc fundido se adhiera a la plancha cuando sale del baño de metal fundido. Después de que el exceso de zinc es limpiado, el líquido que queda se solidifica cuando enfría por debajo de 420°C (787°F). El producto final (acero galvanizado) consiste en un núcleo de acero, con una capa de aleación ínter metálica y una capa exterior de zinc en ambas superficies.

Si el baño de zinc estuviera libre de aluminio, un corte transversal del recubrimiento se vería de manera similar a la que se muestra en la Figura 1.



**Figura 1: Corte transversal del recubrimiento producido en un baño de galvanizado libre de aluminio**

Las capas de **aleación inter metálicas** mostradas en la Figura 1 son una mezcla de átomos de zinc y hierro. Éstas proveen un alto grado de enlazamiento entre el acero y la capa exterior de zinc. Desafortunadamente, estas aleaciones tienen una ductilidad muy pobre, es decir, son muy duras y frágiles. Cuando el acero es conformado, existe una alta probabilidad de producirse grietas en la capa de la aleación, y que el recubrimiento de zinc se deslamine. Este comportamiento limita seriamente la capacidad de conformar las planchas en diversas formas, tales como: tazas embutidas, paneles para techos, selladoras de ajuste, o defensas para automóvil altamente tensionadas.

## Superando la Frágil Capa de Aleación

Una capa de aleación es vital para alcanzar una buena unión metalúrgica entre el acero y el zinc. Esta capa debe también ser continua (estar sobre toda la superficie de la plancha) para que el recubrimiento esté libre de poros. Sin interferir con la formación de una zona de enlaces de aleación, ¿cómo puede cambiarse la naturaleza de la aleación de tal manera que sea posible que forme de maneras intrincadas o enmarañadas)?

Hace más de 50 años, se descubrió que la adición de una pequeña cantidad de aluminio en el baño de recubrimiento era una solución perfecta para este problema. Inicialmente, la razón por la cual funcionó tan efectivamente no era comprendida, pero se observó que tener aluminio en el baño de zinc hacía que la capa de aleación sea muy pequeña en comparación con las que se formaba en un baño libre de aluminio. El aluminio es un inhibidor que disminuye en gran medida la velocidad de reacción entre el zinc y el hierro. Esta capa más delgada, y de ahí más dúctil, permite que la plancha recubierta sea conformada o moldeada en muchas formas complejas sin perder la adhesión del recubrimiento, ya que no es propenso a desarrollar grandes grietas internas.

Usar aluminio, a un nivel de aproximadamente 0.15%, se convirtió en una norma para los baños de galvanizado en líneas continuas. Hasta el día de hoy se utiliza la práctica de adición de aluminio; sin embargo, en la actualidad existe una mayor comprensión de la metalurgia del aluminio en el zinc, dando como resultado que la concentración de aluminio sea controlada más estrechamente. Algunos fabricantes usan entre 0.20 y 0.25% de aluminio, pero las normas de buena práctica involucran el uso de alrededor de 0.15 a 0.19%. Cuando se realizan recubrimientos de zinc y hierro (*galvannea*), el nivel de aluminio es reducido al rango entre 0.12 y 0.14%.

Aunque la adición de tan pequeña cantidad de aluminio tiene una pronunciada influencia en la capacidad de formar planchas galvanizadas, no tiene mucho efecto en los otros atributos del producto. Por ejemplo, su influencia en el comportamiento real frente a la corrosión es insignificante. Debido a que el aluminio tiende a concentrarse en la capa de aleación, y en cierta medida, en la superficie del zinc, puede afectar negativamente otros factores tales como: soldadura por puntos, la soldadura, y la aparición de la "corrosión blanca". Sin embargo, estos inconvenientes son insignificantes en comparación con los beneficios que el aluminio ejerce sobre la capacidad de formar una plancha sin pérdida de adhesión del recubrimiento.

## Por qué el Aluminio Cambia la Capa de Aleación

¿Cómo puede esta pequeña cantidad de aluminio tener una influencia tan pronunciada en la velocidad de crecimiento de la capa de aleación? Esto es porque cuando el aluminio en este nivel se encuentra en el baño del recubrimiento, el compuesto de aleación normal entre zinc y hierro,  $\text{FeZn}_7$ , que se forma en la superficie del acero (y crece a alta velocidad), ya no es el compuesto más estable. El aluminio tiene una mayor afinidad con el hierro que el zinc, así que inmediatamente (dentro de los 0,15 segundos)<sup>1</sup> luego de que el acero entra al baño de recubrimiento, el compuesto intermetálico estable que se forma no es un compuesto de zinc y hierro sino uno de aluminio y hierro, o sea,  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ . Esta capa de aleación (conocida también como capa **barrera** o **capa de inhibición**) es extremadamente delgada y retarda la reacción entre el zinc y el hierro. Para el momento en que la banda deja el baño (~2 - 4 segundos después) algo de zinc es llevado a esta capa de aleación, pero su naturaleza es completamente diferente a aquella que ocurre en la ausencia de aluminio. Es una capa ternaria, muy delgada, de una aleación compuesta aproximadamente de 45% Al, 35% Fe y 20-35% Zn ( $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_x$ ). En vez de la alta velocidad de difusión que ocurre cuando el zinc líquido y el hierro sólido forman una aleación binaria en un baño libre de aluminio,  $\text{FeZn}_7$ , la velocidad de difusión es ahora dependiente de las características de transporte del zinc a través de la barrera creada por el compuesto de aluminio y hierro. La reacción entre el zinc y el hierro es retardada, y el resultado neto es que el espesor final de la capa de aleación es mucho menor que cuando depende de la velocidad de aleación a través de una zona de aleación creciente de zinc y hierro.

La naturaleza de la capa de aleación, cuando se añade aluminio al baño de galvanizado, es presentada en la Figura 2. La capa de aleación es la capa delgada vista cerca al fondo de la micrografía. Cuando la capa de aleación es así de delgada, la plancha recubierta puede ser doblada o moldeada en muchas formas útiles sin que la capa de aleación se agriete y cause pérdida de adherencia en el recubrimiento.

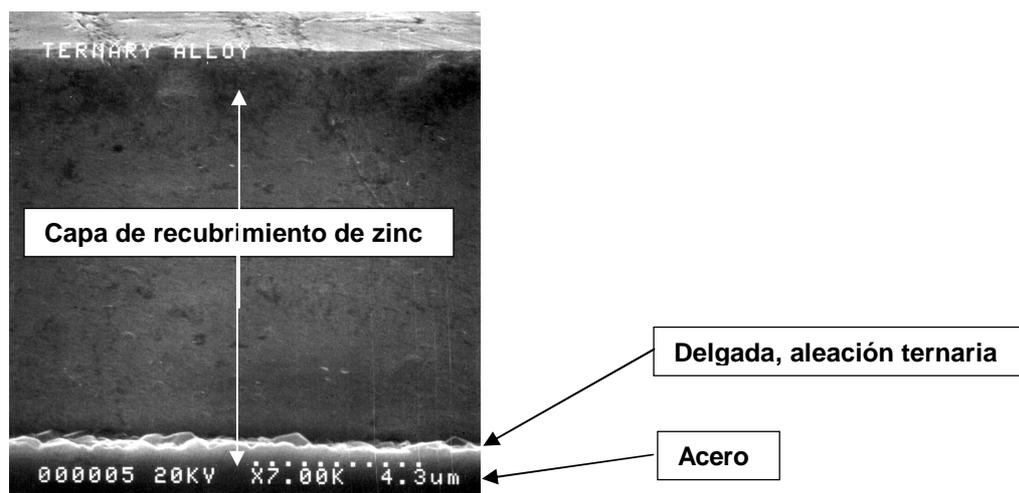


Figura 2: Corte transversal del recubrimiento galvanizado de un baño que contiene aluminio (ampliado 7000X)

¡**Qué descubrimiento!** Este descubrimiento independiente permitió el desarrollo de la gran industria del galvanizado continuo, la misma que hoy produce más de 25 millones de toneladas anuales de planchas galvanizadas y *galvanneal* sólo en Norte América. El producto de estas líneas es utilizado en muchas aplicaciones, incluso aquéllas que requieren que soporten conformados muy severos.

## Contenido de Aluminio en el Recubrimiento

Recuerde que para la producción de galvanizado, el baño de recubrimiento de zinc contiene entre 0.15 y 0.17% de aluminio. Cuando un recubrimiento obtenido en dicho baño es posteriormente analizado, se encuentra que tiene contenido real de aluminio entre 0.25 y 0.40%. ¿Cómo ocurre este aparente incremento? La respuesta se encuentra en la fuerte afinidad que el aluminio tiene con el hierro. La aleación que se forma inicialmente es  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  -por peso, más de 55% aluminio. El aluminio en realidad se concentra en la interfase acero y zinc y se arrastra fuera del baño con la plancha enrollada. El espesor de la capa de inhibición es independiente de la masa (peso) del recubrimiento. Ésta es la razón por la que un recubrimiento de menor masa (peso) contiene un mayor porcentaje global de aluminio. La cantidad y el método de la adición de aluminio al baño se debe tener en cuenta en situaciones que causan variaciones la cantidad de retiro, por ejemplo, recubrir planchas de calibre ligero (alta área de superficie) con un recubrimiento delgado de zinc remueve el aluminio a una tasa mucho más alta que manejar planchas de calibre pesado con un recubrimiento más grueso. Hay otros factores que controlan la cantidad de aluminio en el recubrimiento, tales como: tiempo de inmersión, cantidad de adición de aluminio, temperatura del baño de zinc y el tipo de acero. *Fossen* y su equipo discuten estos temas en un documento presentado en **Galvatech '95**<sup>2</sup>. Todos estos factores deben ser considerados al planear cómo reabastecer el aluminio en el baño. La mayoría de productores de galvanizado, con la asistencia de sus proveedores de zinc; han desarrollado algoritmos de adición de aluminio para sus recipientes o pailas de zinc. Estos modelos predicen los niveles de aluminio dependiendo de la mezcla del producto y estipulan cómo agregar zinc que contiene aluminio para mantener la cantidad de aluminio en el baño en la concentración deseada.

Además del alto porcentaje de aluminio en la capa de inhibición, las capas atómicas más externas en la superficie de zinc contienen una gran cantidad de aluminio. Esto sucede debido al rechazo de la solución durante el congelamiento del recubrimiento de zinc, el cual fuerza al aluminio a la superficie. Con el fin de que ésta pueda enlazarse con el zinc, se diseñan tratamientos de pasivación química y repintado para remover las pocas capas atómicas con alto contenido de aluminio de la superficie.

## El Aluminio en Recubrimientos *Galvanneal*

Producir planchas *galvanneal* involucra compuestos crecientes de zinc y hierro a través de todo el recubrimiento, de tal manera que tenga aproximadamente entre 9 y 10% de contenido real de hierro. Para una descripción completa de cómo son fabricadas las planchas *galvanneal*, ver *GalvInfoNote 1.3*. Ya que la presencia de aluminio restringe dramáticamente el crecimiento de la capa de aleación, ¿Cómo afecta esto a la producción de planchas *galvanneal*?

El recalentamiento de la plancha enrollada necesario para producir planchas *galvanneal* reinicia la reacción de difusión entre el zinc y el hierro. En breves segundos el calor rompe la capa de inhibición de aluminio y hierro. Para que esto ocurra consistentemente se requiere un control del aluminio que no era posible en los primeros días del galvanizado continuo. Producir planchas *galvanneal* depende de que el zinc y el acero se aleen a una velocidad suficientemente alta para que la difusión de hierro se forme a través de todo el recubrimiento y pueda completarse en un rango razonable de tiempo (que permita que la producción pueda llevarse a cabo tasas económicas). La inhibición de las capas *galvanneal* formadas en los baños de zinc son generalmente más delgadas que aquéllas formadas en los baños de galvanizado<sup>1</sup>. De hecho, la capa de inhibición formada en baños de aluminio más altos puede no permitir que la reacción de plancha *galvanneal* proceda adecuadamente en el tiempo designado. Cuando la concentración del baño es reducida a menos de 0.15% (en el rango entre 0.12 y 0.14%), la capa de aleación ternaria es suficientemente delgada, y de la composición correcta, el recalentamiento permite que la cantidad requerido de difusión ocurra en cuestión de segundos.

Después de que el recubrimiento se ha convertido a *galvanneal*, ya no existe la interfase de aleación aluminio y hierro. Ésta, y la pequeña cantidad de aluminio extra en la superficie, se difundirán en el recubrimiento de zinc y hierro.

Un fabricante que hace tanto productos galvanizados como *galvanneal* en la misma línea de recubrimiento utiliza por lo general entre 0.15 y 0.19% de aluminio para la producción planchas *galvanneal*, y luego permite que el nivel de aluminio descienda a menos de 0.15% para hacer planchas *galvanneal*. En la práctica, esto no es tan fácil como parece, ya que la transición necesita ser lograda en un intervalo rápido. Para esto, se necesita un control preciso de la cantidad de aluminio, y requiere capacidad de medir con precisión.

## Resumen

La acción inhibidora del aluminio en un baño de galvanizado fue un descubrimiento importante. Las líneas de galvanizado continuo alrededor del mundo ahora usan aluminio en sus baños de zinc. A través de los años, mucho se ha aprendido acerca de la metalurgia del aluminio en los baños de galvanizado, lo que a su vez ha influido grandemente en las prácticas del proceso. El uso del aluminio para reducir el espesor de la capa de aleación es, sin duda, el desarrollo que ha permitido que el galvanizado continuo por inmersión en caliente se vuelva la gran industria que es la actualidad.

### Referencias:

- 1) S.E. Price, et al, *Formation and development of aluminum inhibition layers during galvanizing/galvannealing*, La Revue de Metallurgie-CIT, Mars 1999, pp. 381-393
- 2) E. Fossen, et al, *Aluminum Control on Stelco's Z-Line*, Proceedings Galvatech '95, pp. 795-800

Copyright© 2007 – ILZRO

---

### Renuncia de responsabilidad:

Los artículos, reportes de investigación y datos técnicos se proveen únicamente con fines informativos. Aunque quienes los publican intentan proveer información precisa y actual, la Organización Internacional de Investigación del Zinc y el Plomo no garantiza los resultados de la investigación o información reportada en esta comunicación y renuncia a cualquier responsabilidad por daños que surjan de confiar en los resultados de las investigaciones u otra información contenida en esta comunicación, incluyendo, sin limitación, daños incidentales o consecuencias.