

64



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DEL
PROCESO DE GALVANIZACION POR
INMERSION EN CALIENTE**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(*AREA MECANICA*)

PRESENTA:

PORTOS PEREZ ANDRES

DIRECTOR: DR. ARTURO BARBA PINGARRON



28263

MEXICO, D. F.

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS:

A MIS PADRES:

**LUISA PEREZ GOMEZ
ANDRES PORTOS AYALA**

A DIOS Y A MI UNIVERSIDAD

CON ESPECIAL AGRADECIMIENTO:

**AL DR. ARTURO BARBA PINGARRON
POR SU ENORME Y DESINTERESADO
APOYO EN LA ELABORACION DE
ESTE TRABAJO**

Cuando hay voluntad, se abre camino

La montaña se eleva hasta las nubes, y parece desafiar todo esfuerzo humano; pero la gente quiere hacer un viaje y ver a sus vecinos del otro lado, perforan las rocas; el tren prosigue su camino y atraviesa la montaña sin pérdida de tiempo.

Asegúrate de que estás en el buen camino y entonces síguelo

Si el camino de tu vida es seguro y correcto, no creas todo lo que oigas, ni consideres todo lo que veas; unos dicen que este camino es el correcto, otros dicen que no; ven aquí aprisa, este es el único camino a seguir. Ten precaución siempre, fijate donde pisas; no te dejes engañar, asegúrate de que estás en el verdadero camino y entonces síguelo.

INDICE

	Pag.
INTRODUCCION.....	1
CAPITULO I GENERALIDADES SOBRE LOS PROCESOS DE DIFUSION POR INMERSION EN METAL FUNDIDO.....	4
CAPITULO II CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO Y FABRICACION DE PIEZAS POR GALVANIZACION EN CALIENTE.....	14
CAPITULO III MATERIALES PARA LA GALVANIZACION EN CALIENTE.....	36
CAPITULO IV LIMPIEZA Y ACONDICIONAMIENTO DE LA SUPERFICIE..... A GALVANIZAR	61
CAPITULO V EL SECADO EN UNA LINEA DE GALVANIZACION.....	80
CAPITULO VI EL EMPLEO DE SALES EN LA GALVANIZACION POR INMERSION EN..... CALIENTE	85
CAPITULO VII CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DE RECUBRIMIENTOS OBTENIDOS POR GIC	89
CAPITULO VIII APLICACIONES DEL ACERO GALVANIZADO.....	94

CAPITULO IX AVANCES Y TENDENCIAS EN LAS APLICACIONES DEL ACERO GALVANIZADO EN LA INDUSTRIA DEL AUTOMOVIL.....	101
CAPITULO X.....	116
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	132

OBJETIVO.

El objetivo primordial del presente trabajo es recabar información amplia sobre el proceso de galvanización por inmersión en caliente, para reunir ordenar y proveer al lector interesado, de una herramienta básica para conocer, consultar o poder plantear y realizar experiencias ligadas a este proceso.

El interes en realizar este trabajo proviene del hecho de la existencia de poca información disponible en español y de la circunstancia de que nuestro país es un importante productor de zinc.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como finalidad proporcionar una información amplia sobre el proceso de galvanización por inmersión en caliente, sus propiedades y aplicaciones partiendo de los principios básicos de galvanizado.

Con muy pocas excepciones, cualquier producto comercial hecho de metal, deberá tener sus superficies adecuadamente terminadas. El objetivo principal de un recubrimiento o del acabado es generalmente mejorar la apariencia y el valor del producto. A la mayoría de los metales, se les recubre para proporcionarles una resistencia permanente a las influencias destructivas, debidas al desgaste, a la descomposición electrolítica y al contacto con la intemperie o la atmósfera corrosiva.

Antes que los metales puedan ser recubiertos, es necesario preparar la superficie convenientemente para poder conseguir una buena adherencia. Las partes se limpian por diferentes procedimientos, dependiendo del material, su tamaño, las particularidades de las superficies y la clase de recubrimiento que deba aplicárseles.

Como se sabe, el galvanizado es un recubrimiento de zinc, utilizado ampliamente para proteger específicamente el acero de bajo carbono, del deterioro atmosférico. Es un recubrimiento de bajo costo que tiene un buen aspecto y buenas propiedades para resistir el desgaste. Es posible producir una mejor apariencia, conocida como el efecto de estrellado añadiendo pequeñas cantidades de estaño y aluminio. Los baños de zinc se mantienen por lo general a 460°C aproximadamente. Para quitar los excesos de zinc del producto, se utilizan rodillos, agitadores y escobas de metal.

La inmersión en caliente es uno de los métodos de protección más antiguos que todavía hoy se utilizan. Consiste en recubrir un metal con otro, sumergiendo el metal base en un baño de metal fundido.

Los metales utilizados para recubrir están limitados por su bajo punto de fusión. Los más utilizados son el aluminio, plomo, zinc y estaño. El material base suele ser acero.

Los recubrimientos obtenidos por inmersión en caliente alcanzan espesores de entre 0.01-0.1 mm. Alcanzar un espesor u otro depende de varios factores como: temperatura del metal fundido, composición del metal base y metal fundido, tiempo de contacto substrato-metal fundido, velocidad de inmersión y extracción de la pieza en el baño y velocidad de enfriamiento posterior.

El recubrimiento obtenido por inmersión en caliente está formado por la capa o capas interior de aleación y una exterior de metal puro. La capa de aleación se forma por difusión dando lugar a diferentes compuestos metal fundido-metal base, constituyendo normalmente una capa de aleación múltiple, la cual se caracteriza por distintas composiciones y propiedades.

La capa externa de metal puro se forma al adherirse el metal fundido a la pieza cuando la pieza es extraída del baño.

La galvanización por inmersión en caliente es un proceso mediante el cual se obtienen recubrimientos de zinc sobre el acero por inmersión de la pieza en un baño de zinc fundido a una temperatura comprendida entre 445° y 465°C. El tiempo de inmersión varía de unos segundos a unos minutos como mínimo, hasta que la pieza alcanza la temperatura del baño. Puede realizarse de forma continua o discontinua.

Las razones por las cuales el acero galvanizado se ha utilizado y se sigue empleando son las siguientes:

- Proceso de complejidad controlable .
- Defectos fácilmente identificables.
- Debido a que en una inmersión total, queda la pieza en su totalidad perfecta y uniformemente cubierta.
- Debido a la reacción del zinc con el hierro se consigue un sistema compacto de varias capas perfectamente unido al acero.
- Sobre el zinc se forma una capa pequeña de carbonato pasivándose.
- Aunque desaparezcan la capa de carbonatos y el zinc metálico, quedan los recubrimientos de aleaciones Fe/Zn aún más resistentes que el zinc puro.
- Protección catódica del zinc.

Estas siete razones junto a la elevación de los costos de mantenimiento y el aumento de la agresividad atmosférica hacen que la galvanización por inmersión en caliente esté muy extendida.

En suma podemos hablar de que el proceso por inmersión en caliente es uno de los procesos utilizados para evitar la corrosión a piezas de acero alargando su vida.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES SOBRE LOS PROCESOS DE DIFUSIÓN POR INMERSIÓN EN METAL FUNDIDO

GALVANIZADO.

Uno de los procedimientos más tradicionales de modificación de la superficie de un metal es por difusión cuando su superficie está en contacto con otro metal en estado fundido. En general, este proceso tiene el nombre común de difusión por inmersión en metal fundido aunque se le dé un nombre específico que se refiere a cada metal. Con el zinc hablamos de galvanizado en caliente; con el estaño de estañado; con las aleaciones de zinc/plomo de aleaciones <<terne>>; con el aluminio de aluminizado, etcétera.

El proceso anterior se usa sobre todo con metales o aleaciones de bajo punto de fusión. Es sabido, que el aluminio es el metal de punto de fusión más elevado entre los comunes, habiendo la limitante debida a razones técnicas o económicas del costo del combustible y materiales empleados. Hace que otro tipo de procesos alternativos sean más convenientes. En lo siguiente se hará referencia con preferencia al zinc por ser el metal de uso más general como recubrimiento por inmersión en discontinuo.

Diagrama de equilibrio hierro-zinc

Las modificaciones en la superficie que sufre un metal fundido mediante inmersión como por ejemplo en el zinc, es más complejo

que el poner en contacto dos sólidos de composición diferente con temperatura cercana a la fusión.

En la superficie inicial, se produce una reacción con el líquido por la que se forman varios compuestos intermetálicos posibles de acuerdo con el diagrama de equilibrio.

En la fig 1.1 se presenta el extremo rico en zinc del diagrama Fe/Zn en el cual se ven cuatro intermetálicos entre las temperaturas de galvanización a temperatura normal 723K (450°C) y a temperatura elevada 803K (530°C). En la práctica, las dos fases gamma son muy delgadas y para los tiempos habituales de trabajo se suele denominar capa doble.

En los efectos prácticos se considera la velocidad de crecimiento de las fases que varía a medida que va creciendo cada una de ellas. Según los datos de Horstmann, la capa δ era la que crecía más rápidamente al inicio, pero al cabo de poco tiempo es la capa delta 1 la que constituye la mayor parte del espesor del recubrimiento. En ambos casos, el espesor de las capas gamma y $\delta 1$ es muy pequeño como consecuencia del mayor intervalo de concentraciones de su composición que amplía una velocidad de difusión muy elevada.

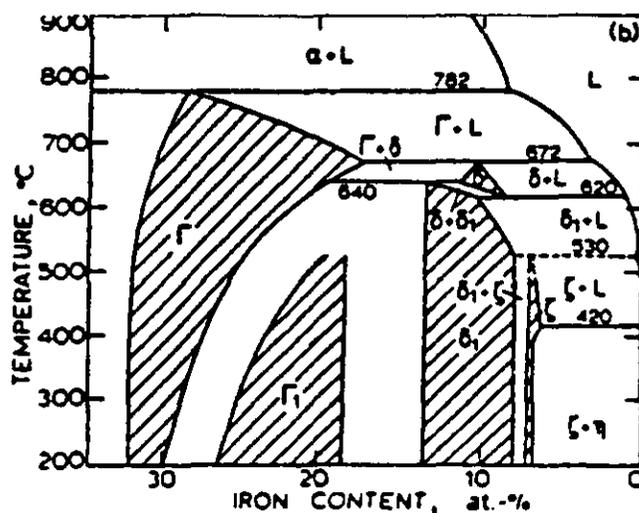


Fig 1.1 Detalle del diagrama Fe/Zn.

Descripción del proceso de galvanización por inmersión en caliente,

Etapas del proceso de la galvanización en caliente

Se denomina galvanización en caliente al proceso mediante el cual se obtienen recubrimientos de zinc sobre objetos de hierro y acero, mediante inmersión en un baño de zinc fundido.

Este proceso es de gran versatilidad y puede ser aplicado a objetos de casi cualquier tamaño y forma desde clavos, hasta tanques o elementos estructurales de gran tamaño. Este proceso proporciona a todas las piezas de hierro y acero una protección segura, duradera y económica frente a una gran variedad de medios corrosivos, tales como la atmósfera, el agua y el suelo.

Sus principales etapas son las siguientes:

- a) Eliminación de la grasa de las piezas.- Generalmente se utilizan soluciones alcalinas en caliente para limpiar manchas de grasa o aceite que pueda llevar el material que se va a someter al proceso. Estas soluciones eliminan también los restos de pintura soluble, pero no así las de vinílicas, epóxicas o bituminosas ni tampoco las escorias de soldadura. Por ello estos residuos deben eliminarse antes de enviar el material galvanizado, lo que se efectúa normalmente mediante soplete o medios mecánicos.
- b) Eliminación del óxido.- La cascarilla de laminación y el óxido superficial que puedan llevar los materiales se elimina mediante decapado por inmersión en ácidos clorhídricos o sulfúrico diluidos.
- c) Tratamiento con sales mordientes.- Tiene por objeto proteger de la oxidación la superficie recién decapada del material y facilitar la reacción entre el zinc fundido y el acero de base. En el procedimiento de galvanización por vía húmeda el tratamiento se

efectúa haciendo pasar el material por una capa de sales fundidas que flotan sobre la superficie de baño de zinc. En el procedimiento por vía seca el material se sumerge en una solución de sales y después se seca en estufa de aire caliente antes del baño de zinc fundido

- d) Inmersión en el baño de zinc.- El material se sumerge en un baño de zinc fundido que está a temperatura aproximada a 450°C. A esta temperatura se producen ciertas reacciones de difusión del zinc en la superficie del material que dan lugar a la formación de distintas capas de aleaciones zinc-hierro.

Cuando se extrae el material del baño se deja escurrir el zinc sobrante. Las piezas pequeñas se someten normalmente a centrifugación para mejorar el escurrido. Y se enfría al aire por inmersión en agua.

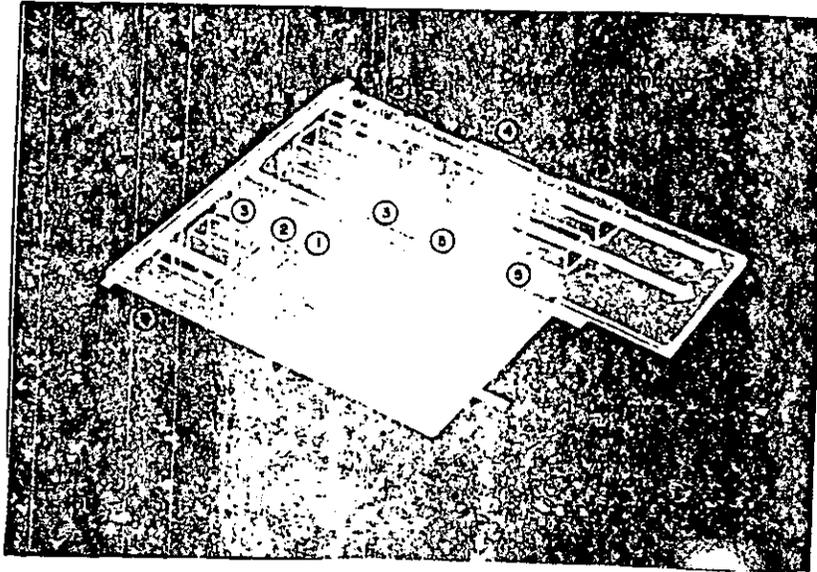
- e) Inspección.- Una vez frío el material, se inspecciona para comprobar si el recubrimiento cumple con las exigencias establecidas.

Las principales características que se determinan son :

1. Aspecto.
2. Espesor y uniformidad.
3. Posibles defectos atribuibles al diseño o forma de fabricación de las piezas. Fig I.2

fig.1.2

*Esquema de los
procedimientos de
galvanización en caliente.*



Proceso discontinuo

Limpieza previa

Para que exista difusión, la superficie de ambos materiales debe estar en contacto, lo cual exige una limpieza superficial del material a recubrir adecuada. El proceso discontinuo se clasifica atendiendo a la preparación superficial que se hace al producto que se requiere galvanizar.

En el viejo proceso, la primera operación es el desengrase de la superficie con soluciones alcalinas de sosa y carbonato.

Tras el enjuagado, donde se eliminan los restos alcalinos, se procede al decapado por el que se elimina el óxido. Se realiza a temperatura ambiente.

Para reducir la disolución simultánea del hierro durante el decapado del acero, se añaden inhibidores que reducen esta reacción de óxido/reducción. Con esto se consigue: a) no disolver hierro. b) no consumir ácido en exceso y c) evitar que ocurra la fragilización del acero por el hidrógeno desprendido.

Después del decapado sigue la inmersión directa en el baño de zinc de la pieza recubierta con las sales de hierro que actúan como fundentes en el baño de zinc. Apoyándose en la espolvorización de sales de zinc y amonio para ayudar el efecto del fúndente.

En el proceso por vía húmeda las piezas decapadas se introducen en baño de zinc, a través de una cubierta de sales fundidas de cloruros de zinc y amonio situada sobre la superficie del baño de metal fundido.

En el nuevo proceso por "vía seca", se enjuaga la pieza recién decapada para eliminar de su superficie la solución ácida de decapado; luego se sumerge en una disolución de sales de cloruro de zinc y amonio, 200-400 g/l a 330-340K (57-67°C) y después de seca al aire o en una estufa a 370K, así se consigue la cristalicen las sales sobre la superficie de la pieza.

En los tres casos, las sales sirven para que la superficie limpia del acero quede libre del contacto con el óxido superficial que existe siempre sobre la superficie del baño por lo que se consigue el contacto directo del hierro con el zinc fundido del baño.

En el nuevo proceso por vía seca que se emplea en el caso de vertido cero, el desengrase inicial se hace en medio ácido y no es necesario el enjuagado posterior. Lo siguiente es el decapado la cual tampoco es enjuagado. El material recubierto con las aguas del baño de decapado, ricos en sales ferrosos y con un pH muy bajo, se sumerge en el baño de sales que tienen un pH mucho menos ácido por lo que se produciría la precipitación de las sales de hierro.

De modo continuo se extrae de este baño una corriente de líquido que se oxida con agua oxigenada; de este modo, las sales ferrosas pasan a férricas como el hidróxido se genera por adición de

amoníaco; el precipitado se decanta y se separa de las aguas madres mediante un filtro prensa. La disolución, libre de hierro y rica en sales amoníacas se devuelven al baño después de ajustar la composición en zinc.

Este ajuste se hace aprovechando los óxidos de zinc que se recogen de la superficie del baño de metal fundido. De este modo se consigue que en el proceso no se produzca ningún otro tipo de residuo que el hidróxido férrico.

Acabado

El acabado que pueda tener las piezas sumergidas en el zinc fundido depende de la velocidad de extracción.

En el caso de piezas en general, la inmersión suele ser bastante rápida; 3m/min es una velocidad habitual. La velocidad de extracción es mucho más lenta del orden de 1m/min porque es necesario darle tiempo al zinc fundido sobre la superficie de la pieza para que se escurra sin solidificarse. Así se consigue una mayor uniformidad, un menor consumo de zinc y un acabado mucho más liso y sin irregularidades.

En el caso de tubos de pequeños diámetros y de gran longitud resulta difícil realizar este escurrido por el interior por lo que se sopla el interior del tubo con vapor para expulsar el zinc que todavía esta fundido que tendría dificultades para eliminarse.

En el caso de alambres, el galvanizado se lleva a cabo de modo continuo. Para lograr la máxima concentración del recubrimiento sobre el alambre y que el espesor sea uniforme, se puede extraer verticalmente.

También se puede hacer secando el alambre entre dos placas de asbesto.

Hay diseños específicos que permiten el galvanizado en cadenas de piezas de pequeñas dimensiones en semicontinuo o disponiéndolos en bastidores.

OTROS RECUBRIMIENTOS EN METAL FUNDIDO

Estañado

La preparación superficial de las piezas de acero es similar a la del galvanizado en caliente aunque en algunos casos puede ser necesario un tratamiento especial consistente en una breve inmersión 10 seg. a 1 min. en ácido nítrico 10-25% en volumen, a continuación del decapado en ácido clorhídrico seguido de un enjuague con agua. El baño de estaño fundido tiene una temperatura de 550-570K aprox. 280-300°C su temperatura se debe controlar $\pm 5K$ para no producir una oxidación excesiva ni generar demasiadas matas. El tiempo debe reducirse al mínimo para evitar espesores excesivos y la temperatura mantenerse suficientemente baja para evitar el amarillamiento del recubrimiento.

Emplomado

El plomo fundido no moja el acero, por lo que es necesario añadir al baño de plomo una cierta cantidad de estaño (4-20%), es el que permite que se forme un intermetálico Fe-Sn sobre la superficie del acero que ya es mojado por el plomo fundido.

La mayor presencia del estaño en el plomo disminuye la porosidad y aumenta la resistencia a la corrosión.

Aluminizado en caliente

El acero aluminizado se emplea en medios que tienen que soportar temperaturas más elevadas o ambientes más corrosivos en los que el zinc no sería resistente.

La aluminización por inmersión en caliente es un procedimiento mediante el cual se obtienen recubrimientos de aluminio sobre hierro,

por inmersión en un baño de aluminio fundido, a una temperatura comprendida entre 700 y 900°C, durante un tiempo no mayor a unos minutos.

El aluminizado es el resultado de un proceso fisicoquímico que consigue una verdadera unión entre el metal base y el recubrimiento, logrando de este modo que el material base adquiera unas propiedades superficiales equivalentes a las del aluminio que es el recubrimiento, con lo cual se logra reunir una buena resistencia frente a determinados medios corrosivos con las buenas características mecánicas del material base.

CAPÍTULO II

CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO Y FABRICACION DE PIEZAS POR GALVANIZACION EN CALIENTE

CARACTERÍSTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS GALVANIZADOS

Constitución y propiedades mecánicas

Los recubrimientos que se obtienen por galvanización en caliente están constituidos por varias capas de aleaciones zinc-hierro, fundamentalmente por tres que son: gamma, delta y zeta, y una capa externa de zinc prácticamente puro, conocido como capa η , que se forma al solidificar el zinc y que moja la superficie de las piezas al extraerlas del baño y que confiere al recubrimiento su aspecto gris metálico característico de los recubrimientos. Por otro lado, los recubrimientos galvanizados poseen la característica casi única de estar unidos metalúrgicamente al hierro o acero que constituyen el material de base, por lo que tienen muy buena adherencia. Por otro lado al estar constituidos por varias capas de aleaciones zinc-hierro que son más duras incluso que el acero y por una capa externa de zinc, que es mas blanda; forman un sistema amortiguador muy resistente a los golpes y a la abrasión. El espesor de los recubrimientos galvanizados ordinarios, puede variar entre 60 y 120 micrómetros, dependiendo del grosor y composición del material base.

Resistencia a la corrosión

La duración de los recubrimientos galvanizados expuestos a la atmósfera es prácticamente proporcional a su espesor. En la tabla I se resumen algunos datos sobre el tiempo probable de protección proporcionado por diferentes espesores de recubrimientos galvanizados en distintos tipos de atmósfera.

Los recubrimientos galvanizados se emplean también para proteger los materiales féreos de la corrosión provocada por las aguas y los suelos. Sin embargo, no sería fácil aventurar datos sobre la resistencia a la corrosión de estos recubrimientos en dichos medios, habida cuenta de que la corrosión en las aguas y terrenos con respecto a estos recubrimientos depende de muchos factores y varía dentro de intervalos muy amplios.

Tabla I.1 Promedio de años de duración

Número promedio de años de duración hasta que aparece una oxidación del 5% sobre la superficie del acero				
Espesor del Recubrimiento (μm)	Atmósfera rural	Atmósfera marina	Atmósfera urbana	Atmósfera industrial
40-80	17-35	12-20	10-15	4-8
80-120	35-50	20-35	15-25	8-12
120-200	50-75	35-50	25-40	12-18

Comportamiento frente a la galvanización de diferentes materiales de hierro y acero

Como ya se ha mencionado la obtención de los recubrimientos galvanizados se base en las reacciones de difusión.

El espesor y el aspecto del recubrimiento resultante vienen determinados por el modo en que se produce la reacción entre el zinc fundido y el material, así como de la forma de solidificación de la capa externa de zinc. El modo de producirse la reacción está influido por

una serie de factores tales como la composición del material, de las piezas, su estado superficial, la composición del baño de zinc, su temperatura y el tiempo que las piezas permanecen sumergidas.

Para precisar sobre el comportamiento frente a la galvanización de los diferentes materiales féreos, sería necesario considerar caso por caso uno de los diferentes tipos y grados de materiales en el comercio.

En líneas generales puede decirse que son susceptibles de galvanización la mayor parte de los aceros (aceros suaves al carbón y aceros de alta resistencia y baja aleación), así como el hierro y la fundición de hierro.

Chapado

La tecnología del chapado se desarrollo para aunar las mejores propiedades del metal base de recubrimiento, consiguiendo espesores de recubrimiento muy superiores a los obtenidos con los otros procedimiento. Los primeros chapados se conseguían por laminación en caliente del sustrato y del recubrimiento. Más adelant6e se introdujo la técnica de electrosoldadura y actualmente se las chapas por fusión y, sobre todo, por soldadura por explosión.

Los ejemplos más corrientes de chapado son los siguientes:

Aluminio sobre duraluminio. El aluminio puro ofrece mayor resistencia a la corrosión que el duraluminio, la cual tiene mayor resistencia mecánica que el primero.

El acero inoxidable sobre el acero al carbono. Este material metálico proporciona resistencia a la corrosión y una superficie atractiva a precios relativamente bajos. Estos chapados encuentran gran aplicación en la industria química y alimentaria.

Influencia de la galvanización sobre las características mecánicas del acero

La inmersión del acero en baño de zinc a una temperatura de unos 450°C produce, en la mayoría de los casos un efecto poco importante sobre las propiedades mecánicas del material. En algunos tipos de aceros el tratamiento de galvanización puede dar a la modificación de alguna de sus características mecánicas.

Resistencia a la tracción y resiliencia

Los valores de resistencia a la tracción, límite elástico o alargamiento y estricción de los aceros no se afectan virtualmente por el proceso de galvanización. En algunos casos, puede producirse una cierta reducción de resistencia en los aceros endurecidos por deformación en frío o tratamiento térmico, cuya magnitud depende del grado de deformación y de la naturaleza del tratamiento térmico aplicado.

Los valores de resiliencia también pueden disminuir ligeramente en relación con los de los mismos materiales envejecidos artificialmente.

Resistencia a la fatiga

La galvanización en caliente influye de manera muy distinta en la resistencia a la fatiga de los diferentes tipos de aceros. Los aceros efervescentes y los calmados con aluminio no sufren prácticamente ninguna reducción de esta propiedad, sin embargo la resistencia a la fatiga de los aceros calmados con silicio pueden reducirse considerablemente.

Fragilización de los aceros envejecidos por deformación

Ciertos tipos de acero tienen tendencia a aumentar su dureza y disminuir su ductibilidad con el tiempo a temperatura ambiente y de forma más marcada a temperaturas moderadamente altas. Este fenómeno se encuentra en aleantes que forman una solución sólida sobresaturada intersticial, tales como el carbono, el nitrógeno y el oxígeno, segregación que se produce más rápidamente cuando el material se deforma plásticamente y después sufre un calentamiento moderado.

En ciertas condiciones los aceros envejecibles experimentan una disminución muy aguda de su resistencia al impacto a la temperatura ambiente, se vuelven frágiles.

La galvanización en tanto que calienta el material puede acelerar el envejecimiento de los aceros deformados en frío. Y por lo tanto causar su fragilización, pero solamente si estos aceros son susceptibles a este fenómeno. Las investigaciones realizadas sobre este tema han permitido concluir que el factor que influye en mayor medida en la fragilización de estos aceros durante la galvanización es su grado de deformación plástica en frío. Por ello para evitar o reducir al mínimo el riesgo de la fragilización de las construcciones en acero que se vayan a galvanizar, deben tenerse en cuenta las siguientes recomendaciones:

- a) Cuando sea necesario deformar en frío un material que vaya a galvanizarse deben seleccionarse, siempre que sea posible, aceros con un contenido en carbono inferior al 0.25% y con una temperatura de transición dúctil-frágil baja.

- b) Procurar que las deformaciones en frío sean lo menos severas posibles. Así por ejemplo, en doblado, el radio de curvatura no debe ser inferior a tres veces el espesor del material.
- c) Cuando no pueda doblarse con este radio es preferible realizar la deformación en caliente, o bien dar un tratamiento térmico (a 600°C y una hora de duración por cada 25 mm de espesor del material) para aliviar las tensiones que puedan producirse por la deformación en frío.
- d) Evitar el corte en frío con cizalla de las chapas que tengan que soportar solicitaciones mecánicas importantes. Es preferible cortar con soplete.
- e) En los materiales de espesor superior a 12 mm los agujeros deben realizarse por taladro en lugar de mediante punzado. Si esto no fuera posible el punzonado debe efectuarse de unos 3 mm inferior al del agujero definitivo y luego agrandarlo hasta la medida apropiada.

En las especificaciones ASTM A143 titulada *Safeguard against Embrittlement of Hot Galvanized Structural Steel Products And Procedure for Detecting Embrittlement*, se dan más amplias recomendaciones para evitar los posibles casos de fragilización y se describen varios procedimientos para detectar esta susceptibilidad de los aceros.

Recomendaciones generales sobre diseño y fabricación

Las recomendaciones siguientes no son en algún modo imperativo para poder galvanizar pero su cumplimiento facilita la galvanización, permite obtener recubrimientos de mayor calidad y en algunos casos puede reducir los costos de proceso.

Dimensión de las piezas

Mediante la galvanización se puede proteger piezas de muy diferentes tamaños y formas, desde clavos, tornillos y herrajes en general hasta vigas, postes y depósitos de gran tamaño.

Las posibilidades de galvanización de piezas grandes viene limitada, en principio por el tamaño de los crisoles o baños de galvanización. En muchos casos, las piezas a galvanizar son demasiado grandes para poderlas sumergir de una sola vez en el crisol, pueden galvanizarse frecuentemente por sobre inmersión o por rotación del objeto sobre su propio eje.

En publicaciones como las de la Asociación Técnica Española de Galvanización titulada *Directorio de Empresas Españolas de Galvanización*, se indican los tamaños exactos de crisoles y las características más destacables de las instalaciones de galvanización existentes.

Problemas de distorsión

Algunas construcciones metálicas tienen tendencia sufrir algún tipo de distorsión cuando se galvanizan. Esto se debe a las tensiones inducidas durante la manufactura del acero así como durante la fabricación y ensablado por soldadura.

Para reducir al mínimo este riesgo los ingenieros proyectistas deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- a) Siempre que sea posible deben utilizarse perfiles laminados simétricos, tales como perfiles en I o doble T, en lugar de perfiles U o angulares.

- b) Para reducir las solicitaciones térmicas de la soldadura deben especificarse técnicas de soldaduras discontinuas (fig. II.1).

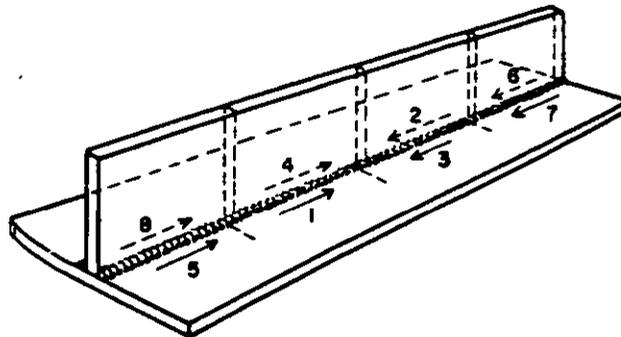


Fig. II.1

—Secuencia de soldado discontinuo en la fabricación de una viga en I para reducir las solicitaciones térmicas y evitar en lo posible los riesgos de deformación durante la galvanización.

- c) Cuando haya que doblar o deformar el acero, debe hacerse con el mayor radio de doblado posible
- d) Siempre que se pueda, es preferible construir en forma despreciable, de manera que cada conjunto o elemento pueda galvanizarse en una sola inmersión (fig. II.2).

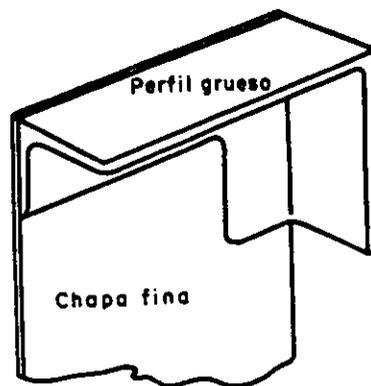


fig II.2 —Debe evitarse la combinación de materiales de masa y espesor muy diferente para reducir al mínimo los riesgos de distorsión.

- e) Debe evitarse la combinación de materiales de sección y masa muy diferentes ya que lógicamente tendrán velocidades de calentamiento y enfriamiento muy distintas así como coeficientes de expansión y contracción desiguales (fig. II.3).

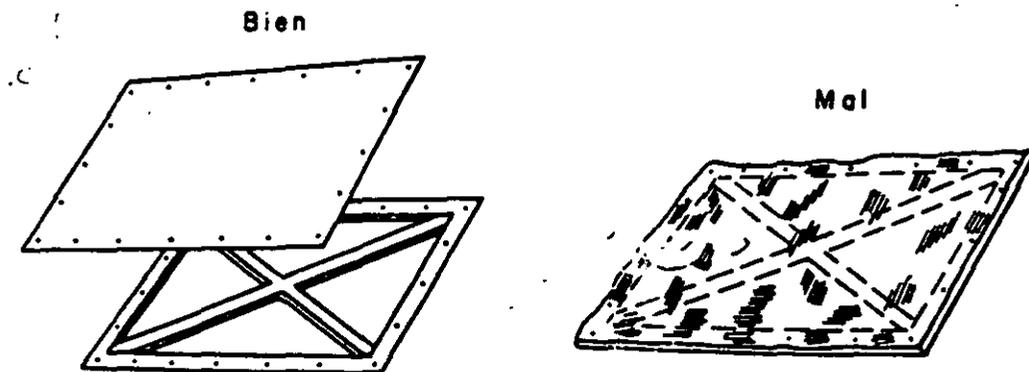


Fig. II.3 Abajo: Resultado exagerado de galvanizar una construcción mixta de plancha y perfil. Arriba: la misma construcción galvanizada por partes separadas.

En la fig. II.4 se muestran otros ejemplos de diseño inadecuados en construcciones a base chapa y sus posibles soluciones para evitar deformaciones.

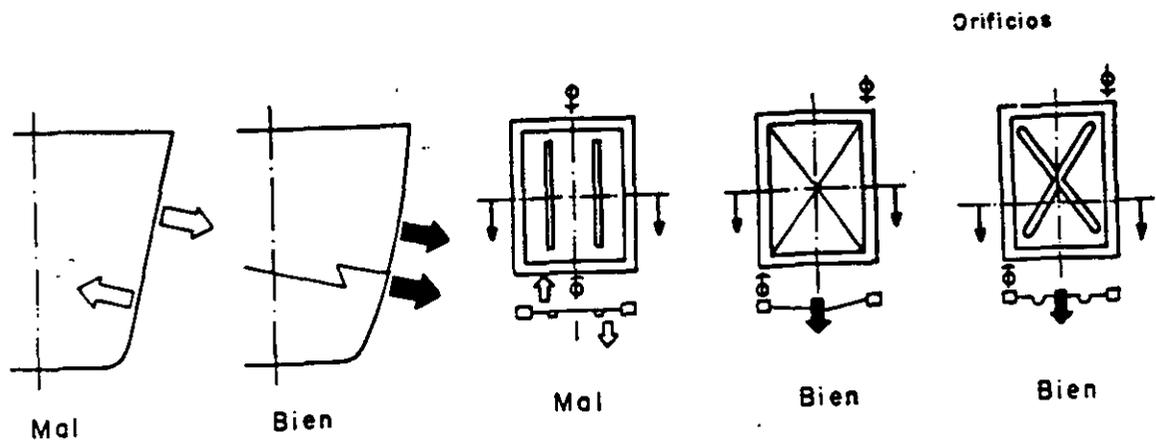


fig II.4 —Diseños inadecuados y soluciones apropiadas en construcciones a base de chapa.

Uniones soldadas

Ante todo es oportuno señalar que el tratamiento de galvanización produce un efecto de eliminación de una gran parte de las tensiones que se introducen durante los procesos de soldadura, por lo que normalmente, las estructuras soldadas y posteriormente galvanizadas poseen superior resistencia que las no galvanizadas.

Por otra parte, la galvanización de las construcciones soldadas no presentan problemas especiales aunque sea preciso tener en cuenta algunas preocupaciones para conseguir los mejores resultados.

Así por ejemplo la soldadura eléctrica por arco con electrodos revestidos deja sobre el cordón de soldadura escorias, que son solubles, en los ácidos de decapado por lo que han de ser eliminadas antes de entrar en el proceso de galvanización. Esta eliminación, que normalmente compete al fabricante se puede realizar cepillando con cepillo de alambre o chorreo con arena.

Por ello, son más recomendables los procedimientos de soldeo que no producen escorias, tales como MIG, TIG o soldeo bajo CO₂. En el caso de soldaduras de materiales gruesos son preferibles los métodos de soldeo con arco sumergido.

El material de aportación de la soldadura debe tener una composición lo más aproximada posible al de las piezas a unir, con objeto de que no se produzcan ataques diferentes en el cordón y en las partes unidas durante el decapado con ácido. Los electrodos con elevado contenido en silicio pueden dar lugar a recubrimientos galvanizados demasiado gruesos y/o de color oscuro en la zona de la soldadura.

Otro factor a tener en cuenta en el diseño de las uniones soldadas es el riesgo de que pueda entrar ácido del decapado entre las zonas solapadas que no están totalmente cerradas por el cordón de

soldadura. Este ácido atrapado se vaporiza rápidamente al sumergir las piezas en el baño de zinc y puede causar proyecciones violentas de zinc fundido con el consiguiente peligro para los operarios. Por otra parte, la vaporización rápida de este ácido al sumergir las piezas en el baño de galvanización impide la entrada del zinc fundido entre las zonas solapadas que, por lo tanto, quedan sin proteger. Por este motivo siempre que sea posible se recomienda realizar las soldaduras a tope en lugar de solape.

En la fig.II.5 se muestran diferentes diseños de uniones soldadas para evitar las uniones solapadas.

Cuando no puedan evitarse las uniones solapadas deben cerrarse completamente a lo largo de todo su contorno mediante un cordón de soldadura continua, para impedir así la entrada de líquidos entre las superficies solapadas fig.II.6. Además, cuando la superficie solapada y cerrada sea mayor de 70 cm², deben practicarse orificios de ventilación en una o ambas caras de la misma, para evitar el riesgo de explosión que se produciría por un eventual entrada de líquidos en dicha zona cerrada a través de poro de la soldadura. En la fig. II.7 se muestran algunos ejemplos típicos de uniones solapadas con sus correspondientes orificios de ventilación.

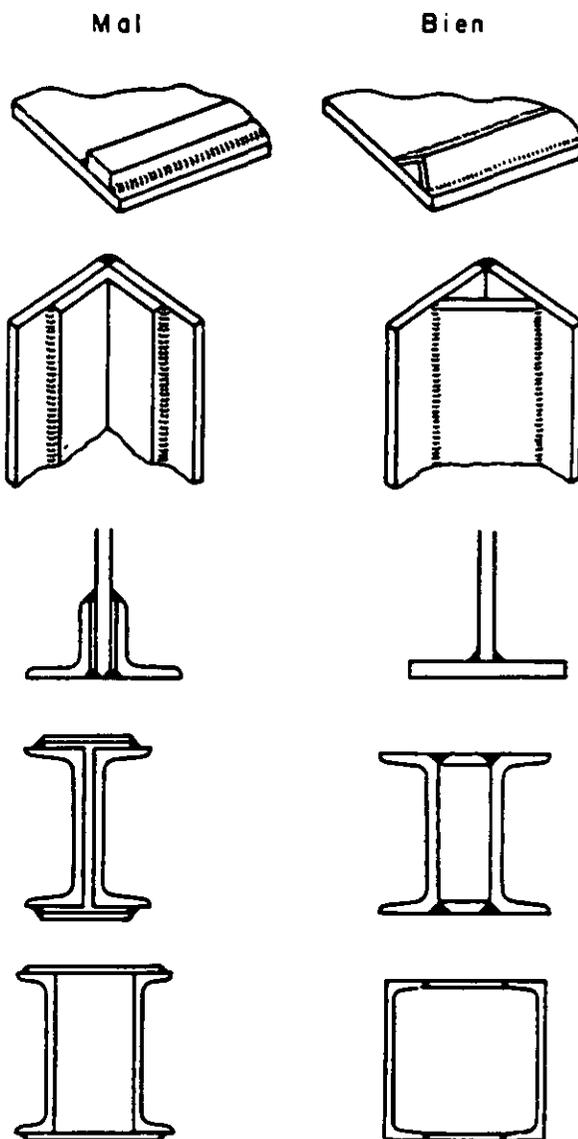


fig. 11.5 —Diseños inadecuados y sus correspondientes soluciones constructivas correctas para evitar las uniones solapadas en las construcciones soldadas que han de galvanizarse.

En la fig. 11.8 se ilustran algunos detalles constructivos a tener en cuenta en la estructuras metálicas para facilitar su galvanización. Así en la fig. 11.8a se muestran como las escuadras y cartelas de refuerzo que se sueldan a vigas y pilares deben llevar las esquinas recortadas para permitir la libre circulación y drenaje del ácido de decapado y del zinc fundido fig. 11.8b muestra que los diafragmas internos de vigas

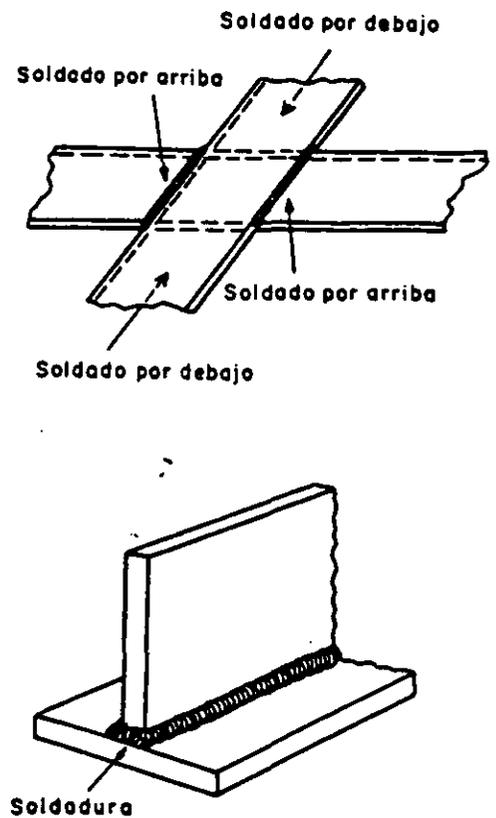


fig. 11.6 Las superficies solapadas deben cerrarse completamente a lo largo de todo su contorno mediante un cordón de soldadura continuo.

cajón o secciones rectangulares deben tener también las esquinas recortadas e incluso un agujero en su parte central si su sección es muy grande. Finalmente, la fig. 11.8c indica la situación más apropiada de los agujeros de drenaje en una viga compuesta para conseguir recubrimientos uniformes y sin manchas.

Cuerpos huecos

La galvanización de cuerpos huecos tales como depósitos, calderines, etcétera, requiere precauciones especiales para conseguir recubrimientos uniformes y libres de defectos, especialmente en las superficies interiores.

En este tipo de artículos el diseño tiene una gran importancia a efecto de facilitar su galvanización y obtener buenos recubrimientos. Un diseño adecuado debe permitir llenado rápido con zinc del cuerpo que se galvaniza, cuando este se sumerja en el zinc fundido, a cuyo efecto es necesario disponer de una o más entradas en el fondo así como agujeros de salida en la parte superior.

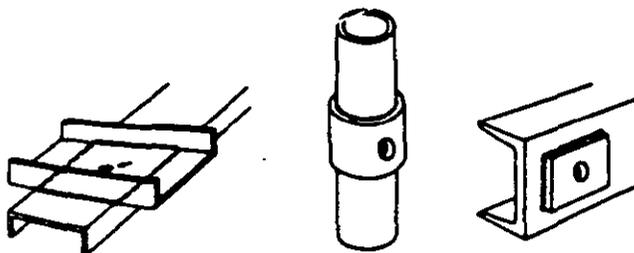


Fig. 11.7.-Las uniones con superficies solapadas mayores de 70 cm² deben llevar orificios de ventilación.

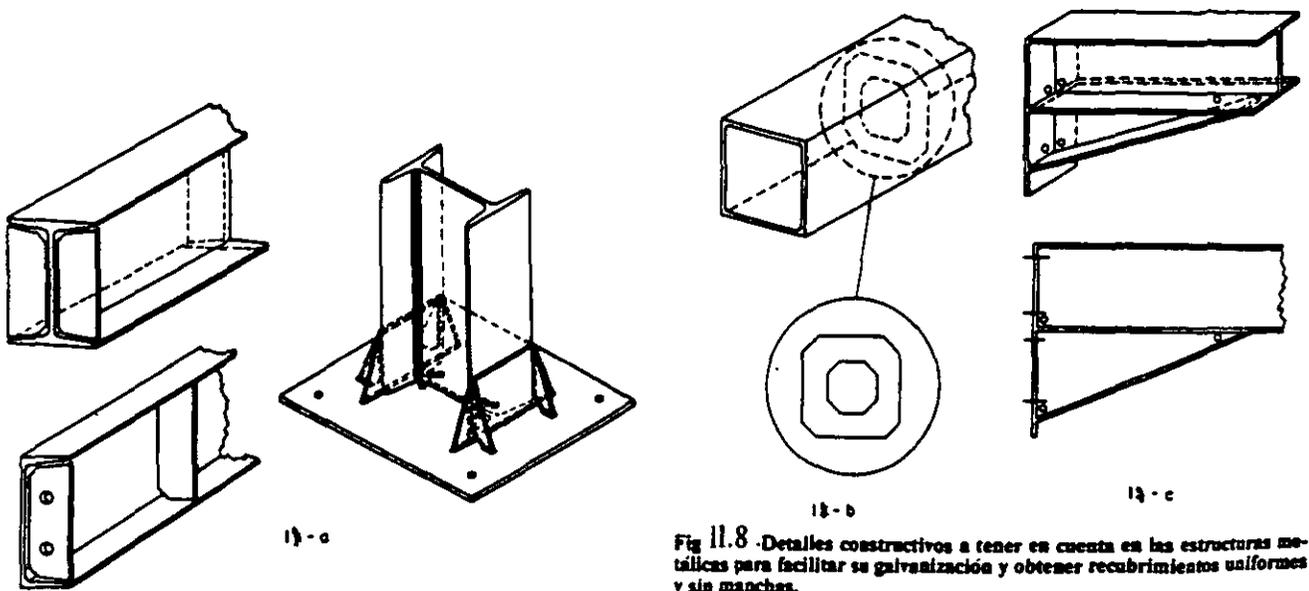


Fig. 11.8. Detalles constructivos a tener en cuenta en las estructuras metálicas para facilitar su galvanización y obtener recubrimientos uniformes y sin manchas.

Estas mismas aberturas han de servir para vaciar rápidamente al zinc del interior del cuerpo hueco y permitir la entrada libre de aire en el mismo cuando se extraiga del baño de galvanización.

Por estos motivos, la disposición más adecuada de los agujeros de llenado y salida de los gases es en los extremos de las diagonales del cuerpo fig. 11.9. El diámetro mínimo recomendable para estos agujeros es de tres pulgadas por metro de diámetro del depósito, con un mínimo, en cualquier otro caso, de dos pulgadas.

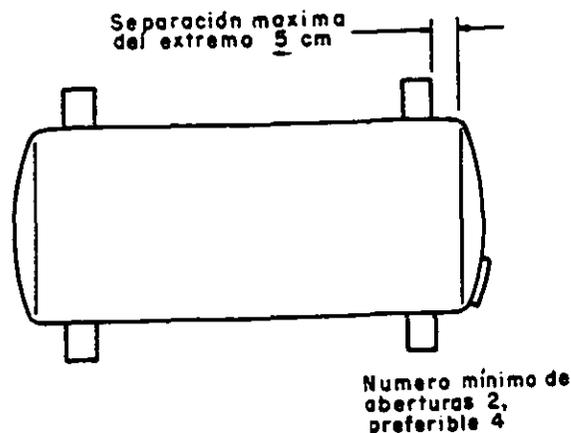


Fig. 11.9. Situación de las aberturas u orificios de ventilación y drenaje en un depósito cilíndrico. Si solamente se colocan dos aberturas es necesario situarlas en diagonal.

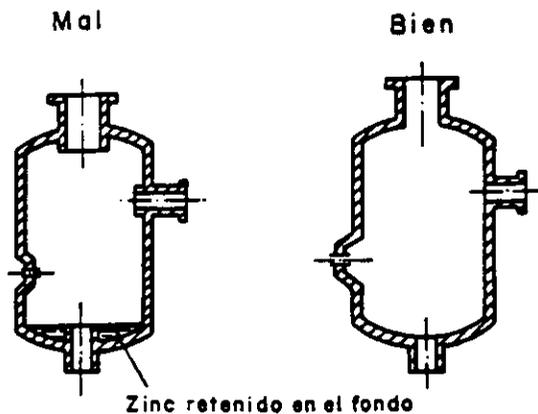


fig. II.10 Los casquillos soldados a los cuerpos huecos no deben sobresalir interiormente, para evitar los problemas de retención de líquidos y de zinc en su interior.

Los casquillos soldados a los cuerpos huecos no deben sobresalir interiormente, para evitar los problemas de retención de líquidos y de zinc en su interior (fig. II.10) caso de que se desee galvanizar un cuerpo hueco solamente por exterior, deberán colocarse uno o más tubos de respiración (según el tamaño del cuerpo) para dar la salida de los gases calientes (fig. II.11).

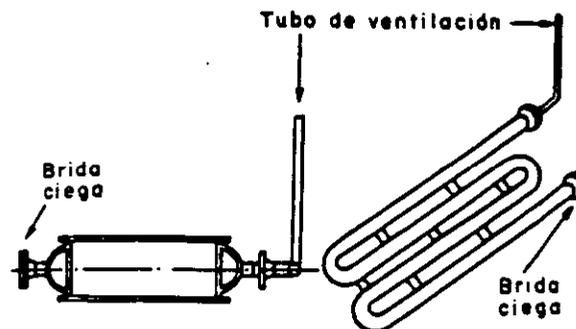


fig. II.11 — Para galvanizar cuerpos huecos solamente por el exterior es necesario colocar tubos de respiración para dar salida a los gases calientes.

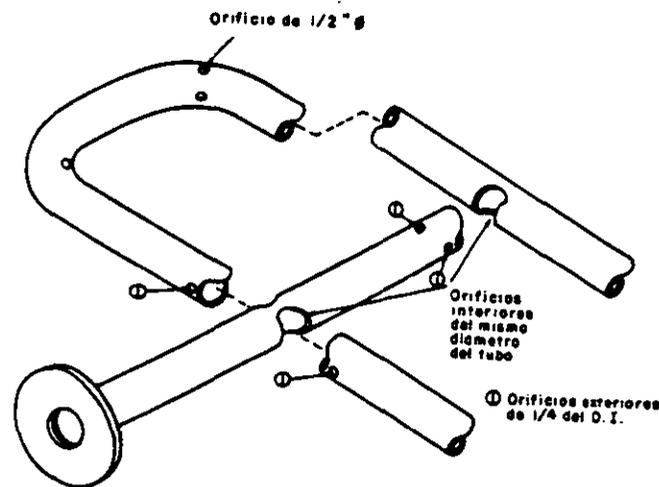


fig. 11,12 —Preparación de las uniones en forma de ingletes abiertos y disposición de los orificios de ventilación en una construcción tubular que ha de galvanizarse.

Construcciones tubulares

Los ensambles entre tubos deben hacerse en forma de ingletes abiertos interiormente, para permitir la libre circulación de las soluciones que se utilizan para la preparación superficial así como del zinc fundido. Aunque este procedimiento aumenta algo el costo de fabricación, sin embargo, reduce considerablemente el costo de la galvanización.

Las construcciones tubulares no deben tener en ningún caso partes cerradas ya que la eventual penetración en su interior de los líquidos de decapado, mordentado o lavado puede ser causa de explosión cuando el objeto se sumerja en baño de zinc fundido.

En la fig. 11.12 se muestra un ejemplo de preparación de construcción tubular con ingletes abiertos y la disposición más adecuada de los orificios de ventilación que es necesario practicar en la misma para evitar el riesgo de explosión durante la galvanización.

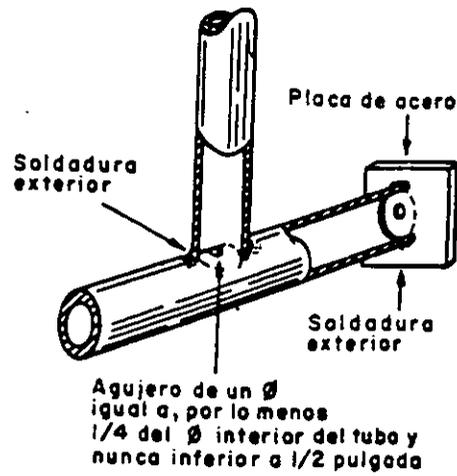


fig II.13 — Situación y tamaño de los orificios de comunicación entre los tubos para la libre circulación de los ácidos y del zinc fundido.

En el caso de que no se hayan podido preparar las uniones de los tubos en forma de ingletes abiertos, tal como se muestra en la fig. II.13, es totalmente imprescindible practicar en el tubo sobre el que se suelda un taladro, de por lo menos, un cuarto del diámetro interior del tubo y nunca inferior a $\frac{1}{2}$ pulgada (fig. II.14).

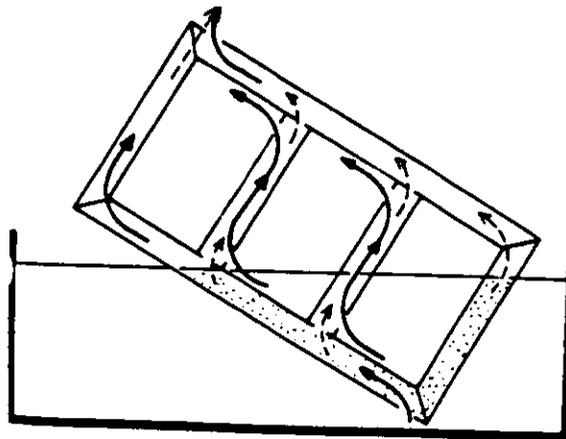


fig. II.14 Sentido de circulación del aire y del zinc durante la inmersión en el baño de galvanización de una construcción tubular con orificios de escape y ventilación adecuadamente situados en las diagonales de los tubos.

En la fig. II.15 se muestra el sentido de circulación del aire y del zinc durante la inmersión en el baño de galvanización de una construcción tubular y asimismo, la posición correcta de los orificios que deberán estar situados en las diagonales de los tubos.

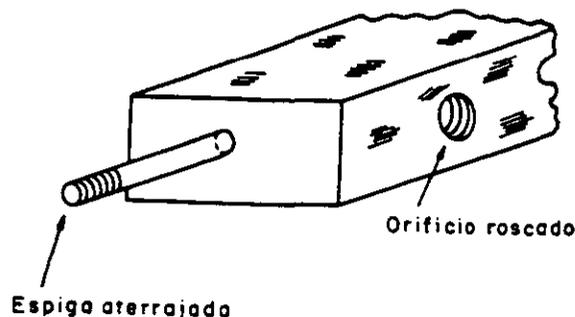


fig. II.15—Los espárragos o espigas con rosca deben atornillarse a la medida estándar antes de galvanizar la pieza y limpiar la rosca después de la galvanización para eliminar el exceso de zinc. Los orificios deben entregarse al galvanizador sin roscar y realizar esta operación una vez galvanizada la pieza.

Partes roscadas

Para el ensamblado de las estructuras metálicas galvanizadas se utilizan normalmente tornillos, tuercas y pernos galvanizados en caliente se montan por desconocimiento, con tornillería cadmiada o cincada electrolíticamente, cuya protección frente a la corrosión es muy inferior a la de la tornillería galvanizada en caliente, debido al menor espesor de aquellos recubrimientos. Esta práctica inadecuada causa de muchos problemas posterior, debido a que los puntos críticos de la construcción, que son las uniones, no quedan adecuadamente protegidos.

En la fabricación de la tornillería galvanizada debe tenerse en cuenta el incremento de dimensión que toman las roscas por el recubrimiento de zinc y que frecuentemente, impide el roscado manual de la tuerca en su correspondiente tornillo. Por ello la práctica habitual es galvanizar los tornillos una vez atornillados en negro con

la rosca estándar y, sin embargo, roscar las tuercas a sobre medida una vez galvanizadas. La norma ASTM-A-536 recomienda las holguras para las roscas de las tuercas mecanizadas después de haberlas galvanizado, como se indica en la siguiente tabla II.2.

Tabla II.2 Diámetro

Diámetro nominal (mm)	Sobredimensión en el diámetro
Hasta 16, inclusive	0,38
Mayor de 16 hasta 19	0,51
Mayor de 19 hasta 38	0,63

Para roscas de diámetro nominal superior a 38 mm es más práctico, si el cálculo mecánico lo permite, aterrajarse el tornillo con una tarraja que de lugar a una reducción de 0,63 mm en el diámetro nominal del tornillo y utilizar tuercas estándar roscadas antes de su galvanización. Aunque el roscado de las tuercas después de su galvanización elimina el depósito protector de zinc de su parte interior, esto no constituye inconveniente alguno, porque el recubrimiento galvanizado del tornillo protege igualmente al fileteado de la tuerca una vez que están ensambladas ambas piezas.

Cuando el material a galvanizar lleva incorporados orificios roscados y/o espárragos aterrajados (fig. II.1.5) debe procederse de manera análoga a como se hacen en las tuercas y tornillos. Esto es, los orificios deben entregarse al galvanizador sin rosca y realizar esta operación una vez galvanizadas las piezas, teniendo en cuenta las sobre dimensiones recomendadas. Los espárragos, por su parte, deben aterrajarse a la medida estándar antes de galvanizar y cepillarlos con cepillo de alambre, mientras están todavía en caliente después de la galvanización, para eliminar el exceso de zinc de las

roscas y facilitar así su posterior ajuste con su tuerca u orificio roscado.

En lo que respecta a las roscas macho de los manguitos que forman parte de los depósitos, calderines, etcétera, pueden seguirse dos procedimientos. Cuando las partes roscadas son de pequeño diámetro, se pueden envolver en cintas adhesivas o cualquier otro sistema de enmascaramiento para evitar que se galvanicen durante la inmersión en el baño de zinc. Si el enmascaramiento no da buenos resultados, como suele ocurrir con las roscas de diámetro grande es preciso limpiar las roscas después de la galvanización, para lo cual, la práctica habitual es recalentar la zona roscada con una lámpara de gas de o acetileno y cepillarla con cepillo de alambre. Si el calentamiento de la zona roscada no se considera conveniente por cualquier motivo particular, entonces es preciso volver a aterrajear la rosca una vez galvanizada la pieza.

Holgura radial
mínima 1/16"

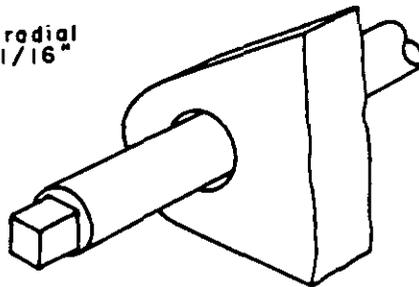


fig. 11.16 -Las partes móviles de un mismo conjunto o construcción se galvanizarán preferentemente por separado, dejando una holgura radial mínima de 1.5 mm.

Piezas de fundición

Como ya se ha indicado las piezas de fundición deben chorrearse con arena o granalla antes de la galvanización. Esta operación se efectúa normalmente en la propia fundición, ya que no todos los talleres de galvanización tienen instalaciones de chorreo.

Desde el punto de vista del diseño deben tenerse en cuenta las siguientes recomendaciones para evitarse posibles problemas en la galvanización de las piezas de fundición:

1. Para facilitar la limpieza de las piezas mediante chorreo abrasivo, es preciso evitar que éstas tengan esquinas y bordes agudos así como zonas cóncavas muy acentuadas. Igualmente, debe procurarse que los números o letras que se utilicen para la designación de estas piezas, sean de diseño grande y con curvaturas amplias.
2. Ciertos diseños con espesor de pared muy diferentes en una misma pieza pueden ser causa de distorsión y contracción que se producen al calentar las piezas, hasta la temperatura de galvanización. Por ello, los diseños equilibrados y con espesor de pared uniformes disminuyen estos riesgos.
3. La pérdida de ductibilidad que puede producirse en algunos casos en las piezas de fundición maleable durante la galvanización se puede resolver en parte con un tratamiento térmico previo, consistente en el calentamiento de las piezas a 680°C durante el tiempo necesario para que esta temperatura se alcance en todas las secciones de la misma, y posterior enfriamiento en agua fría.

Superficies solapadas

La viscosidad del zinc fundido a la temperatura de galvanización es lo suficientemente elevada como para que no pueda penetrar en espacios o rendijas con una abertura inferior a unos 1.5 mm. Por ello deben evitarse en lo posible las construcciones con superficies en contacto, como es el caso de construcciones roblonadas y algunas formas de construcciones soldadas con zonas solapadas, ya que las superficies en contacto directo no quedarían galvanizadas.

Además, la existencia de superficies solapadas pueden producir otros problemas adicionales, como por ejemplo:

- a) Defectos del recubrimiento en las zonas adyacentes a las superficies solapadas, debido a la vaporización rápida de los líquidos retenidos entre dichas superficies cuando se sumergen las piezas en el baño de zinc,
- b) riesgos de accidentes entre los operarios galvanizadores, por las proyecciones de zinc fundido que pueden provocar dicha vaporización,
- c) retención de sales de mordentado entre las superficies solapadas, que pueden ser causa de corrosiones localizadas del recubrimiento galvanizado cuando estas sales entran en contacto con la humedad ambiente.

CAPÍTULO III

MATERIALES PARA LA GALVANIZACIÓN EN CALIENTE

El material a galvanizar

La calidad del material a galvanizar es una cuestión que debe considerarse con gran interés, puesto que la reacción del hierro con el zinc del baño y, por tanto, las características del recubrimiento que así se obtiene, están ligadas a su composición química como por los factores físicos relacionados con su estado. Se pueden galvanizar no sólo una gran variedad de aceros, sino también la fundición de hierro. La mayor parte del acero laminado que se galvaniza es acero suave al carbono, bien sea acero efervescente con bajo contenido de carbono; y como calidad especial el denominado hierro puro con contenido de cobre, bien sea acero calmado con aluminio o silicio, o acero limpiado mecánicamente. También se galvanizan aceros de alta resistencia y baja aleación. Todos estos aceros pueden contener hasta un 0.20% *Cu* para mejorar su resistencia a la corrosión. El empleo de este tipo de aceros va en aumento, ya que aunque el costo de fabricación es mucho más elevado, también es considerable el ahorro de peso muerto que se consigue. Esto último tiene una repercusión muy amplia sobre el costo total (transporte, cimentaciones, ligereza de estructura, mano de obra y tiempo de construcción, entre otros factores), y hace que en algunos casos llegue a ser el óptimo económico. En la tabla III.1 se indica la composición de los distintos aceros.

Para contenidos iguales de los elementos habitualmente considerados, la clase de acero, esto es, de convertidor, eléctrico, no

parece que condicione la velocidad de ataque por el zinc ni las características del depósito. La variación del contenido de los elementos habitualmente presentes en los aceros al carbono sí puede influir sobre las características del depósito, en tanto que modifican la cinética de la reacción entre el zinc y el hierro. En la tabla II .en términos generales, pueden apreciarse que el aumento del contenido de cada uno de los cinco elementos comunes de los aceros al carbono produce un aumento de la velocidad de ataque, que puede disminuir sobrepasado un máximo (caso del silicio). Debe aclararse que el estudio de Horstmann se ha efectuado con aleaciones binarias y para tiempos de inmersión comprendidos entre 1 y 5 h; esto es, muy superiores a los que se utilizan en la práctica de la galvanización, por lo que procede considerar más detenidamente las condiciones próximas a las reales de trabajo en taller.

Aceros

El procedimiento de obtención del acero, esto es que se trate de BOF de convertidor LD o de acero eléctrico no influye apreciablemente sobre la velocidad de reacción entre el zinc y el acero. Lo que sí condiciona sensiblemente la velocidad de esta reacción es el contenido de los elementos contenidos habitualmente en los aceros, esto es carbono, fósforo, azufre, manganeso, silicio. Así por ejemplo, galvanizan bien y desarrollan recubrimientos que pueden considerarse como normales o típicos, los aceros cuyos contenidos en estos elementos no superan las proporciones que se indican a continuación:

Carbono 0.30 Fósforo 0.05 Manganeso 0.35 Azufre 0.2
Silicio 0.05.

Los demás elementos que pueden estar presentes en los aceros débilmente aleados, como son Cromo, Níquel, Niobio, Titanio y Vanadio no tienen influencia significativa en las concentraciones en que normalmente se encuentran estos tipos de aceros.

Los fabricantes y usuarios del acero galvanizado deben saber, sin embargo, que cuando el contenido en silicio del acero es superior al 0.05% como es el caso de los aceros calmados o semicalmados con silicio, puede producirse un aumento muy agudo de la reactividad del acero con el zinc fundido, lo que tiene como consecuencia la obtención de recubrimientos galvanizados generalmente de mayor espesor de lo normal y aspecto superficial gris mate, debido a un crecimiento excesivo de las capas de aleaciones hierro-zinc a expensas incluso de la capa externa de zinc puro.

La influencia del silicio no es directamente proporcional a su concentración en el acero, sino que sigue una curva del tipo de la que se muestre en la figura III.1. En ella vemos que los efectos más agudos de aumento de reactividad se producen para concentraciones del silicio comprendidas entre 0.05 y 0.15%, así como de 0.3% en adelante. Cuando el contenido de fósforo supera el 0.05%, el aumento de reactividad que provoca el silicio se puede iniciar para concentraciones de este elemento tan bajas como el 0.03%.

En la figura III.2 se muestra la estructura de un recubrimiento galvanizado en un acero con 0.35% de silicio preparada adecuadamente. Las dificultades que se encuentran algunas veces para la galvanización de estos materiales se deben fundamentalmente a que pueden presentar zonas de arena adherida o cascarilla rica en carbono que se elimina fácilmente por decapado.

Estos materiales necesitan un tratamiento de chorreado con arena o granalla antes de galvanizarlos.

La velocidad de reacción de las funciones de hierro con zinc esta muy influida por el contenido de silicio y fósforo de los mismos. La fundición más adecuada es la que contiene aproximadamente 3% y 1% de fósforo estructura del recubrimiento galvanizado en un acero con 0.35% de silicio.

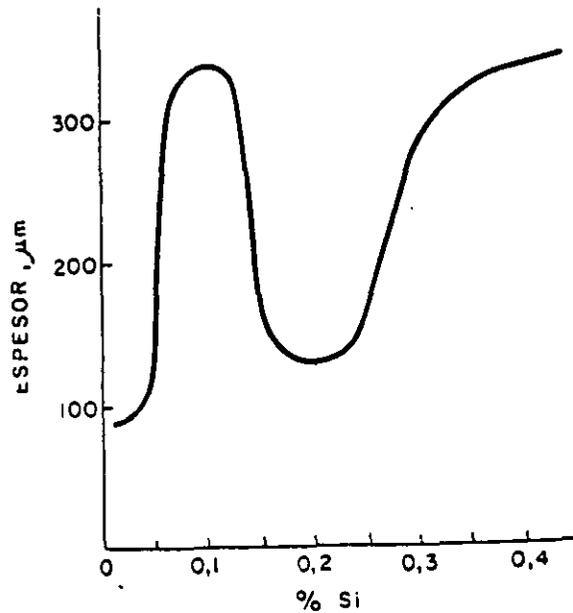


Fig. III.1 Influencia del contenido de silicio del acero sobre el espesor del recubrimiento que se obtiene en la galvanización.



Figura III.2 Micrografía de un corte transversal de un recubrimiento galvanizado obtenido sobre un acero con 0,35% de silicio.

Desde el punto de vista de la resistencia a la corrosión, los recubrimientos que se obtienen sobre los aceros con silicio tienen análogas resistencias a los que se forman sobre los aceros efervescentes o calmados con aluminio del mismo espesor, pero como generalmente son más gruesos, en la mayoría de los casos su duración es mayor.

Se debe saber distinguir entre acero fundido y fundición de hierro. Las piezas de acero se comportan a la galvanización de forma análoga al acero laminado.

La fundición gris o maleable se puede galvanizar tan fácilmente como el acero si la superficie es preparada adecuadamente. Las dificultades que se encuentran algunas veces para la galvanización de estos materiales se deben fundamentalmente a que se pueden presentar zonas con arena adherida o cascarilla rica en carbono que no se elimina fácilmente por decapado. Estos materiales necesitan un tratamiento de chorreado de arena.

Materiales laminados en caliente o forjados

El comportamiento en la galvanización de los materiales laminados en caliente o forjados vienen determinado generalmente por su composición química.

En los materiales laminados en caliente sin embargo, el proceso de galvanización suele poner de manifiesto los defectos superficiales que son fácilmente apreciables en la inspección visual del material, tales como la hoja o las inclusiones cubiertas de calamina ya que estos defectos provocan malformaciones características del recubrimiento.

Influencia del estado superficial de los materiales

El estado superficial del material condiciona también en cierta medida las características del depósito. Así por ejemplo, los aceros laminados en frío dan lugar a recubrimientos galvanizados más lisos y uniformes que los aceros laminados en caliente.

Los métodos mecánicos de limpieza de superficie como el chorreo con arena aumentan la rugosidad más que los químicos y dan lugar a una área superficial mayor, lo que tiene por consecuencia la formación de recubrimientos galvanizados más gruesos.

Combinación de materiales diferentes o con distinto estado superficial

Como ya se ha visto con anterioridad, cada material requiere unas condiciones distintas de preparación superficial y de galvanización para conseguir los mejores resultados. Por ello, no es recomendable que en una misma construcción se mezclen materiales férricos de diferente composición o con distinto estado superficial ya que se corre el riesgo de obtener recubrimientos galvanizados de aspecto no uniforme. En la fig. III.3 se muestran algunas de las combinaciones de materiales y de condiciones superficiales que deben evitarse.

Cuando no pueda evitarse la combinación de materiales distintos, es recomendable chorrear con arena todo el conjunto para eliminar todas las impurezas superficiales y conseguir que en el posterior tratamiento de decapado los distintos metales se decapen de manera más uniforme.

En cualquier caso debe informarse al galvanizador de la composición de los aceros utilizados en construcción metálica siempre que sean distintas del acero suave o de bajo contenido de carbono.

Tabla III.1 Composición de diferentes aceros

Clase	% C	% Mn	% P	% S	% Si	% Cu	Observaciones
Efervescente Limpio	0.05 - 0.10	0.25 - 0.50	0.030 Máx. (*)	0.050 Máx.	Residual	Residual	Estos aceros pueden suministrarse también con un contenido de manganeso de 0.20% Ni-residual o hasta 1.00% Cr-residual o hasta 1.00%
mecánicamente	0.05 - 0.10	0.25 - 0.50	0.030 Máx. (*)	0.050 Máx.	Residual	Residual	
Calmado con Al	0.05 - 0.10	0.25 - 0.50	0.030 Máx. (*)	0.050 Máx.	Residual	Residual	
Calmado con Si	0.05 - 0.10	0.25 - 0.50	0.030 Máx. (*)	0.050 Máx.	0.15 - 0.25	Residual	
De alta resistencia	0.05 - 0.20	0.30 - 1.30	0.030 - 0.11	0.050	Residual o hasta 0.80	Residual o hasta 0.60	La suma de los cinco primeros elementos 0.10% Máx.
Hierro puro con Cu	Mínimo posible	Mínimo posible	0.015 Máx.	0.040 Máx.	Residual	0.20 Min.	La suma de los cinco primeros elementos 0.25% Máx.
Hierro con cobre	--	--	0.015 Máx.	0.040 Máx.	Residual	0.20 Min.	La suma de los cinco primeros elementos 0.70% Máx.
Acero con cobre	0.05 - 0.10	0.25 - 0.40	0.030 Máx. (*)	0.050 Máx.	Residual	0.20 Min.	

(*) El contenido de P puede llegar hasta el 0.10% para facilitar la laminación en paquetes o para mejorar la adherencia del recubrimiento de zinc.

Para el intervalo de concentraciones de los aceros al carbono que se señala en la tabla I, y para tiempos de inmersión bajos, del orden de minutos, que son los que normalmente se utilizan en la práctica, la velocidad de ataque apenas si se modifica con el contenido de carbono, incrementándose el espesor del recubrimiento para el mismo tiempo de inmersión en un 10% al pasar el contenido de C de 0.04-0.07% a 0.15%. Para contenidos de carbono elevados, de aproximadamente 0.8%, la microestructura, condicionada principalmente por el carbono, según sea el tratamiento térmico a que se ha sometido al acero, condiciona la velocidad de ataque, siendo ésta mayor en el caso de presentarse perlita laminar que si la perlita está globulizada, y mayor, a su vez, en este caso que cuando el material está templado y revenido. El carbono mejora la adherencia del recubrimiento. Para aceros bajos en carbono se observó que la galvanización es mucho mejor cuando se encuentra la cementita en los bordes de grano que cuando lo hacen juntamente la perlita y la cementita. Esto se atribuye a la acción del hidrógeno que penetra durante el decapado en cualquier discontinuidad de la estructura de grano y que es expulsado al calentarse durante la galvanización, interfiriendo así la cristalización del zinc.

Por otra parte, se ha comprobado que el aumento del tamaño de grano provoca el incremento de la velocidad de difusión y, en suma, el del peso del recubrimiento, contrariamente a lo que hubiera podido suponerse, ya que, en principio, se suele asociar un grano fino con una mayor velocidad de difusión.

El silicio favorece un ataque rápido, sobre todo porque, incluso para contenidos moderados, disminuye sensiblemente la temperatura a partir de la cual empieza el ataque lineal; así ocurre que a 450°C el

ataque es ya de este tipo y conduce a depósitos de gran espesor y con predominio de la capa aleada. Cuando los tiempos de inmersión son cortos, del orden de minutos, los resultados que se obtienen obedecen al mismo esquema. Sandelin, para tiempos de inmersión cortos, de 30 seg. 1 y 3 min, a 454°C, ha comprobado un crecimiento del espesor del depósito, asociado a un mayor espesor de la capa de aleación, al incrementar el silicio de 0.05 a 0.1% y posteriormente a partir del 0.3%, la influencia del silicio es pequeña. Para tiempos de inmersión muy cortos (30, 45 y 60 seg.) y con condiciones que corresponden a la galvanización en continuo, no se ha confirmado el efecto apuntado por Sandelin. En los aceros que contienen silicio (hasta 0.3%) el espesor del depósito puede ser incluso inferior al de los aceros exentos de este elemento.

No obstante, para condiciones de galvanización más generales, pueden afirmarse que el silicio conduce a depósitos en los que el espesor correspondiente a la capa de compuestos intermetálicos es grande. En un acero que contenga alrededor de 0.3% Si, la capa de aleación que se forma durante la galvanización es una capa pseudoaleada, constituida por un esqueleto de cristales ζ más o menos soldados entre sí en los puntos de contacto. Los intersticios de esta estructura se encuentran llenos del zinc puro que solidificó al enfriarse. Esto hace que el depósito tenga escasa ductilidad, un color gris mate, poco vistoso, aunque la adherencia, en general, sea buena y la resistencia a la corrosión, condicionada principalmente por el espesor del recubrimiento, sea muy buena. Por este motivo, su contenido en los aceros para galvanizar es inferior al 0.3%.

Otro elemento que mejora la adherencia del recubrimiento es el fósforo, que, hasta contenidos del 0.05%, no altera el espesor del depósito, pero que para contenidos mayores parece aumentarlo.

La presencia de azufre en proporción elevada puede conducir a un ataque excesivo durante el decapado, lo que da lugar a que la superficie sea muy rugosa y el depósito poco uniforme y con escasa ductilidad.

El nitrógeno mejora la adherencia del recubrimiento; el tratamiento de nitruración en cianuro sódico (proceso Crapo) da lugar a depósitos muy adherentes.

El manganeso da lugar a una mayor velocidad de ataque y a un incremento moderado del espesor de la capa para los contenidos que corresponden a los aceros reseñados en la tabla III.1.

Los elementos cromo y níquel, característicos de los aceros débilmente aleados, aumentan tanto la velocidad de ataque como el espesor del depósito. Sin embargo, sus efectos son sensiblemente inferiores a los del silicio, de forma que el problema afecta, sobre todo, a los aceros estructurales de alta resistencia y baja aleación, cuyo contenido de silicio oscila entre 0.20 y 0.90%. Otros elementos que recientemente se van añadiendo a los aceros son el molibdeno (0.10-0.30%), niobio (0.010-0.040%), vanadio (0.020-0.070%), titanio (0.005-0.050), circonio (0.03-0.15%) y boro (0.0015-0.0035%), aunque, en general, pueden considerarse muy poco habituales todavía. La finalidad de estas adiciones es conseguir mejores resistencias mecánicas sin pérdida de condiciones de soldabilidad, y la razón de su empleo poco popularizado es en la actualidad sólo un problema económico.

El estado de la superficie del material condiciona las características del depósito, siendo preciso someter al acero a los tratamientos previos para limpiar y acondicionar debidamente la superficie que se va a recubrir. De los productos laminados, tienen preferencia los que se laminan en frío, dado que su estado superficial es mejor que el de los laminados en caliente; sin embargo, si a éstos, como ocurre con frecuencia, se les somete a una ulterior pasada en frío se obtiene una calidad superficial muy satisfactoria.

Una superficie muy regular y lisa favorece la adherencia, si bien, por otra parte, se ha comprobado que en la chapa fina laminada en frío conviene producir una cierta rugosidad para mejorar la adherencia del depósito. La presencia de tensiones internas en la superficie parece que no afecta al depósito que pueda obtenerse; no obstante, existe una tendencia al aumento de peso del recubrimiento, que crece para tiempos de inmersión elevados debido al trabajo en frío del metal base. Esta tendencia está de acuerdo con el hecho de que la deformación en frío aumenta las velocidades de difusión de los metales al modificar la estructura reticular, con lo que resulta facilitado el intercambio atómico, concretamente la difusión del hierro y del zinc. Este aumento de peso es más pronunciado en los aceros bajos en silicio. Los métodos mecánicos de limpieza de superficie aumentan la rugosidad más que los métodos químicos y dan lugar a una superficie real mayor, siendo, por lo tanto, su reactividad algo superior. La presencia de carburos en la superficie del material puede dar lugar a un comportamiento variable en la galvanización, dependiendo de las variables del proceso. Se ha comprobado que en un baño saturado de hierro y libre de aluminio no existe ninguna influencia, mientras que cuando el contenido de aluminio es

del 0.1%, trabajando a 450°C, aumenta la reactividad de los carburos, produciéndose masivamente cristales de la fase ζ ; disminuyendo la temperatura a 435°C, los carburos vuelven a perder su reactividad.

La galvanización de la fundición de hierro presenta dificultades que se resuelven en la práctica prolongando el tiempo de inmersión, para evitar la presencia de zonas sin recubrimiento protector. Así por ejemplo, frente a un tiempo de inmersión de 5 min. en el caso de piezas de acero, en las piezas de fundición se aplican tiempos de 15-20 min, e incluso de 30 min. Tal práctica, sin embargo, no es satisfactoria, pues da lugar a la formación de depósitos de gran espesor y a la de grandes cantidades de matas. La inmersión durante un tiempo reducido, unos 2-3 min. a 450°C, que permita obtener unos depósitos satisfactorios, puede conseguirse siempre que la superficie de la pieza moldeada esté exenta de restos de arena u otros materiales, lo cual puede lograrse por chorreado con granalla. Para estos tiempos de inmersión reducidos, los efectos del silicio (de 1.5 a 4%) y del fósforo (de 0.1 a 1.0%), en lo que se refiere al aumento de peso del recubrimiento y a las pérdidas de zinc, son poco acusados

Un procedimiento ensayado recientemente, y con el que se han obtenido resultados satisfactorios, se basa en la inmersión de la pieza de fundición en *NaOH* fundido a 450-500°C antes del decapado.

Este método resulta ventajoso frente al empleo del decapado en *HF*, que es de manejo peligroso, y, además, tiene gran utilidad en el caso de piezas de formas complicadas y fundiciones con gran porosidad superficial, para las cuales el chorreado con granalla resulta ineficaz.

Las sustancias orgánicas de las arenas de moldeo, el grafito y otros elementos superficiales, tales como el silicio, fósforo, azufre y manganeso, se oxidan en el *NaOH* fundido a 450-500°C y se separan como gangas mediante un lavado con agitación en agua. Este proceso es preferible al de un sobredecapado en el que tendría lugar en las piezas una gran acumulación de hidrógeno que se desprendería durante la galvanización perjudicando la formación de la capa aleada.

Cuando por determinadas razones sea precisa la inmersión de las piezas durante tiempos prolongados, sin que ello implique la formación de depósitos de un excesivo espesor ni altas pérdidas de zinc por formación de matas, se utilizan fundiciones con 3-4% *Si* y 1% *P*, los efectos del silicio sobre la formación de matas para dos contenidos de fósforo, sobre el peso del recubrimiento.

El zinc para galvanizar

El zinc que normalmente se utiliza para galvanizar es zinc térmico del 98.5% ó del 99.5%. Según la norma española UNE 37.301, los contenidos máximos de impurezas en ambas calidades han de ser los siguientes:

	Pb	Cd	Fe	Sn	Total
Zn 99.5	0.45	0.15	0.03	0.005	0.50
Zn 98.5	1.4	0.20	0.05	—	1.50

No está absolutamente claro de qué forma influyen sobre las características del depósito las impurezas contenidas hasta los límites señalados anteriormente e incluso si dentro de ellos influyen de forma alguna. De todas las impurezas citadas, las que conviene tener en cuenta son, principalmente, el plomo y el hierro.

Los datos que se pueden encontrar en la bibliografía sobre los efectos del plomo no son siempre concordantes. En primer lugar, debe tenerse en cuenta que la presencia del plomo en el zinc se debe no sólo a que el lingote de zinc de partida contenga plomo, sino también a que este elemento se adiciona en ocasiones voluntariamente al baño para que se forme una capa rica en plomo en el fondo de la cuba, a la que protege del ataque del zinc a la vez que facilita la eliminación de las matas. De cualquier forma, empleando zinc del 98.5% se formaría una capa rica en plomo, ya que su solubilidad en el zinc a 450°C es, aproximadamente, del 1.2%. Bablik y colaboradores señalan que la adición de un 0.4% *Pb* al baño, o sea, dentro de los límites de contenido de esta impureza que corresponden al *Zn* de 99.5%, provoca una fuerte disminución de la adherencia del depósito que se obtiene y que incluso, basta un 0.01% *Pb* para que ya se reduzca esta característica, por lo cual recomiendan que, siempre que interese obtener una elevada adherencia y ductilidad del depósito, debe emplearse zinc de pureza elevada. Por el contrario, otros autores señalan que, en el caso de alambres, los depósitos que se obtienen utilizando zinc de 98.5% son algo más adherentes que cuando se utiliza zinc de 99.5%; la resistencia a la corrosión de los primeros es, sin embargo, aproximadamente un 15-20% inferior a la de los depósitos con zinc del 99.5%.

Raedeker y Friehe, ensayando en chapas los efectos de contenidos de plomo de hasta el 1%, observan que la adición de este elemento al baño empeora la ductilidad del depósito aunque muy ligeramente, si bien la resistencia al ataque químico en medio industrial mejora algo. Sebisty y Edwards, empleando tiempos de hasta 4 min.

encuentran que un contenido de plomo de hasta un 1% no altera la ductilidad ni la adherencia del depósito, aunque sí su aspecto; el depósito exento de plomo era rugoso, reduciéndose la rugosidad para contenidos en el baño de 0.5-1% *Pb* y siendo inferior el brillo depósito.

Quizá, parte de la discrepancia de los resultados haya de atribuirse a los métodos de ensayo empleados en la determinación de la adherencia de los depósitos. Bablik y colaboradores la determinan midiendo en un ensayo de tracción en la dirección del espesor del depósito la tensión requerida para despegar el recubrimiento, mientras que el resto de los autores aplican los ensayos tecnológicos normales de flexión, tracción o embutición.

La presencia de hierro en el baño es inevitable, como consecuencia del ataque del acero por el zinc; independientemente del contenido inicial que tenga el zinc, el baño se satura en hierro (0.018% a 450°C) y el exceso cae al fondo de la cuba en forma de matas, cuyo contenido de hierro oscila entre el 3 y el 4%. Es conveniente efectuar con relativa frecuencia una eliminación de matas; si se puede, semanalmente. Si debido a que no se retiran las matas, el contenido de hierro llega a ser muy alto, pueden flotar algunos cristales de *Fe/Zn*, produciéndose así la formación de inclusiones en la capa de zinc de los recubrimientos que obtengan. Bablik señala que un contenido de hierro en la superficie del baño inferior a 0.05% es índice de una buena práctica de galvanización.

Según Horstmann los contenidos elevados de plomo y de hierro aumentan la viscosidad del baño y facilitan la formación de una capa de zinc puro de gran espesor, puesto que estos baños se pueden utilizar a una temperatura algo más baja.

En la galvanización de chapa se suelen agregar en algunas ocasiones una pequeña cantidad de zinc de segunda fusión, ya que la pequeña adición de estaño al baño que se realiza de esta forma, da lugar a la formación de un floreado en el depósito que, en muchos casos, es apreciado por su valor estético. Los datos aportados por Raedeker y otros permiten concluir que el estaño no tiene influencia sobre el espesor del recubrimiento ni sobre la estructura de la capa aleada hasta un contenido de 1% *Sn* en el baño. La ductilidad del recubrimiento, medida en ensayos de tracción y de plegado, baja ligeramente con el contenido de estaño, en tanto que la adherencia, según el ensayo Erichsen, permanece a niveles satisfactorios. La tendencia a la formación de manchas blancas permanece inalterada y la resistencia a la corrosión atmosférica disminuye en un 10% independientemente del contenido de estaño. En la práctica no se suelen emplear concentraciones superiores al 0.2% *Sn* en el baño de zinc.

Tabla 2 Efecto de algunos aleantes en el baño de zinc.

Elemento	Concentración	Efectos	Bibliografía
Cd	Hasta 1% (tiempos de inmersión cortos) 0.05% 1.25%	Mejora algo la resistencia a la formación de manchas blancas y moderadamente la resistencia a la corrosión atmosférica.	24
		Mejora el aspecto superficial, que queda brillante.	25
		Se obtiene una superficie rugosa sin floreado y mate.	25
Cu	Hasta 1% (tiempos de inmersión cortos, 15 segundos) 0.05% y 1.25%	Hace disminuir el espesor del recubrimiento en proporción a su concentración; no afecta, al parecer, las características de la capa aleada. Perjudica la adherencia y la ductilidad aunque parece que se mejoran a partir de 0.3% de cobre. Mejora marcadamente la resistencia a la corrosión, y probablemente reduce la tendencia a la formación de manchas blancas. El color, ligeramente amarillo que produce el cobre, puede eliminarse agregando aluminio (0.1%) al baño.	24
		Reduce el espesor del depósito y de la capa aleada para tiempos de inmersión de hasta 1 min., teniendo efectos inversos para 2 min. Para 1.25% de cobre se producen manchas en la superficie, no siendo, por tanto, admisible este nivel.	25
Sb	0.25%	Da lugar a un floreado muy marcado y a un depósito con escasa ductilidad y adherencia	25
	Hasta 1%	Eleva la resistencia a la corrosión en medio industrial reduciendo en un 20% la pérdida de peso cuando se agrega por encima de un 0.3%. Aumenta el espesor del recubrimiento, pero no mejora la resistencia a la formación de manchas blancas	21
Bi	Hasta 1%	Mejora ligeramente la resistencia a la corrosión en medio industrial; la superficie es brillante y con floreado.	21
Mg	0.1 - 1%	El recubrimiento tiene un aspecto mate grisáceo.	21

El efecto de otros elementos se recoge en la tabla III y en las figuras 8, 9 y 10, tomadas de Raedeker y colaboradores.

Tiene gran interés la influencia que, según se ha comprobado, ejercen las adiciones al baño de aleantes como el cromo, vanadio, manganeso, níquel, titanio, cobalto y circonio, entre otros. Esta influencia se ha estudiado en el cuadro de la posibilidad de galvanización de aceros de alta resistencia y baja aleación, de creciente interés como se han señalado anteriormente, con particularidad para la industria de la construcción y cuyos contenidos de silicio oscilan, en general, entre 0.1 y 0.9%; la reactividad de tales aceros frente al baño de zinc es así elevada y, por tanto, interesa reducirla mediante adiciones al baño de zinc. Estos trabajos han sido desarrollados por Sebisty y Palmer y en ellos se ha puesto de manifiesto que un 0.1% de *V*, 0.2% de *Cr*, 0.2% de *Ni* y 0.5% de *Mn* son eficaces para disminuir la reactividad elevada debida a la presencia de silicio en el acero, proporcionando así un depósito con un menor espesor de capa aleada.

En términos generales, la acción más eficaz corresponde al vanadio, que controla eficazmente el crecimiento de la capa de aleación, tanto si se galvaniza a la temperatura habitual de 450°C como a las inferiores, del orden de 430°C; las adiciones de níquel, por ejemplo, son poco eficaces a una temperatura de galvanización de 450°C, si bien actúan reduciendo el espesor de la capa de aleación cuando se galvaniza a temperaturas más bajas.

La adición de vanadio al baño se puede realizar mediante una aleación con 0.5-0.6% *V*, partiendo de una aleación media de 85% *Zn* y 15% *Al*. El peso del recubrimiento puede reducirse en un 50% galvanizando a 450°C durante 8 min. el inconveniente es que el vanadio sólo puede utilizarse trabajando en seco, ya que en húmedo reacciona con el flujo. Las adiciones de níquel, por no reaccionar con el flujo, se pueden utilizar, en principio, para trabajar, tanto por vía húmeda como por vía seca. El empleo de estas adiciones todavía no ha alcanzado la etapa de

aplicación industrial. Se piensa, sin embargo, que pueden ofrecer gran interés no sólo para los aceros que contienen silicio, sino también para los aceros utilizados normalmente en galvanización, pues conducen a un depósito de buen aspecto, homogéneo y regular, lo cual resulta muy interesante, en especial en el caso de aceros que tienen una superficie rugosa, como son los que han sido laminados en caliente.

El elemento aleante del zinc que se utiliza con mayor extensión es el aluminio. Los efectos de la incorporación del aluminio al baño de zinc para galvanizar han sido estudiados recientemente a la vista de la bibliografía existente por Hershmann a quien nos remitimos.

La acción del aluminio es la formación sobre la superficie del acero de una película delgada de un compuesto de aluminio y de hierro, cuya fórmula, para los depósitos obtenidos en baños que contienen un 0.2 a 0.5% Al, es Fe_2Al_5 ; la composición puede ser diferente para contenidos superiores de aluminio en el baño. Mientras esta película existe, el acero resulta protegido frente al zinc, de manera que la reacción del hierro con el baño es escasa. Por esta razón, se producen unos depósitos delgados, con una pequeña capa de compuestos intermetálicos, y de buena ductilidad. Al cabo de cierto tiempo de estar sumergido el material en la cuba de galvanización, la capa del compuesto Al-Fe se rompe y comienza el ataque del acero. Por analogía con la terminología que se utiliza en cinética química, el tiempo durante el cual la capa del compuesto protector permanece estable se denomina tiempo de incubación.

Lo característico de este efecto es que, para tiempos de galvanización superiores al tiempo de incubación, el ataque que el acero sufre por la acción del zinc que contiene aluminio será superior, más enérgico, que cuando el zinc está exento de este aleante. La causa y el mecanismo de este comportamiento no están claros. El ataque rápido, una vez superado el tiempo de incubación, no se produce

uniformemente sobre todo el material, sino que empieza en algunos puntos y zonas y se va extendiendo paulatinamente; la velocidad de ataque es prácticamente lineal.

La influencia de distintos factores sobre el periodo de incubación queda reflejada en el siguiente cuadro.

Factores que prolongan el periodo de incubación:

1. Aumento de Al en el baño.
2. Bajas temperaturas de galvanización.
3. Contenidos de hierro bajos en el baño.
4. Agitación.
5. Presencia de silicio en el acero

Factores que acortan el periodo de incubación:

1. Superficie rugosa a galvanizar
2. Temperaturas de galvanización altos en el baño.
3. Baños saturados de hierro.

La disminución del espesor del recubrimiento se produce hasta contenidos de aluminio de 0.2% en el baño de zinc. La capa de aleación *Fe-Zn* es muy delgada para 0.06% Al y no es perceptible para 0.08% Al en el baño. Así cuando los tiempos de galvanización son muy cortos, inferiores al periodo de incubación, lo que, por ejemplo, acaece en general en los procesos continuos como el Sendzimir, el depósito que se obtiene es delgado y tiene una ductilidad extraordinaria. La adherencia, medida según el ensayo Erichsen, y la ductilidad del depósito mejoran hasta un 0.3% Al, pero a partir de este contenido empeoran ambas propiedades. La incorporación de aluminio al depósito resulta perjudicial en tanto que produce un aumento de la tendencia a la formación de manchas

blancas (efecto perceptible ya para 0.06% Al en el baño, pero que es débil hasta un 0.15%); análogamente, la resistencia al ataque atmosférico aumenta con el contenido de aluminio.

El efecto que producen distintas adiciones al baño de zinc sobre la pérdida de peso que tiene lugar en el acero galvanizado por efecto del ataque atmosférico. Según Raedeker y colaboradores, tales efectos perjudiciales pueden compensarse, sólo en cierta medida, mediante adiciones de cadmio o de cobre al baño de zinc.

En efecto, en presencia de 0.15% Al en el baño, las propiedades de los depósitos que se tienen por adiciones aisladas de cobre (0.05%), cadmio (0.5%), antimonio (0.01%) y estaño (0.10%), se modifican poco para tiempos de inmersión cortos y temperaturas bajas (430°C). Para temperaturas más elevadas y tiempos de inmersión más prolongados esas adiciones pueden llegar a anular los efectos debidos al aluminio y dar lugar a depósitos irregulares, que tienen una ductilidad y una adherencia mediocres. Esto ocurre, en especial, cuando los elementos adicionados son cadmio y cobre en un nivel de concentración de 1.25% cada uno de ellos. En presencia de una cantidad de aluminio baja (0.05%), la presencia en el baño de cobre, cadmio, antimonio y estaño aumenta la sensibilidad del depósito a la formación de manchas blancas.

El depósito de aluminio en presencia simultánea de plomo es susceptible a un marcado ataque por el agua caliente y el vapor de agua, por lo que en tales casos, procede utilizar zinc de elevada pureza, de calidad electrolítica o extrafino.

La adición de aluminio al baño es práctica bastante extendida en la galvanización en continuo y se efectúa en forma de aleaciones madre Al-Zn (2-4% Al).

Se vio que las adiciones de manganeso, cromo, níquel, vanadio y cobalto al baño de zinc, con 0.15% Al trabajando a una temperatura de 450°C y tiempos de inmersión de hasta 4 min, no producían ninguna mejora respecto a los efectos

conseguidos por el aluminio. Por el contrario, tales adiciones resultaban poco beneficiosas, en tanto que contrarrestaban sus efectos, ya que algunas dan lugar a que el aluminio forme una mata relativamente insoluble, lo que provoca la eliminación de este elemento. Es interesante señalar que el aluminio ejerce efectos inhibidores respecto a la formación de las capas aleadas siempre que esté en solución y no si se encuentra segregado de ésta.

Los espesores que deben obtenerse dependen de las condiciones del servicio a que ha de hacer frente el objeto galvanizado, siendo lo más conveniente aplicar el espesor mínimo admisible, no sólo por razones de tipo económico, sino por otras de diferente carácter.

Así las chapas muy gruesas tienen con gran frecuencia un color superficial gris mate, debido a que los compuestos intermetálicos se han ido difundiendo hasta la superficie, y este aspecto no suele agrandar por considerarlo poco vistoso.

Por otro lado nos encontramos con el problema de la adherencia y de la ductilidad del recubrimiento. La presencia de un espesor grande de compuestos son frágiles, aunque sean resistentes al desgaste. Esto significa que si el material se deforma, pueden producirse grietas en el depósito, las cuales no obstante, no son tan perjudiciales frente a la corrosión como cuando tienen lugar una exfoliación del depósito. En el primer caso, las grietas se llena con productos de la corrosión y, además para pequeñas zonas desnudas del metal base, el carácter de sacrificio anódico del depósito de zinc continúa protegiéndolo en las grietas producidas.

La tendencia a la exfoliación no depende directa y simplemente de la cantidad de compuestos intermetálicos presente, ya que no se produce únicamente en depósitos en los que se encuentran estos constituyentes, tales como el material <<galvannealed>> (recocido después de galvanizar), sino que depende también de la adherencia de la capa aleada al metal base. Por otra parte, cuando la

película aleada es muy fina y por tanto el depósito está constituido preferentemente por la capa γ , la tendencia a la exfoliación del depósito sólo se consigue en general, para espesores pequeños, que son poco favorables desde el punto de vista de la resistencia a la corrosión. La exfoliación se produce por la presencia simultánea de la fase η y de los compuestos intermetálicos en cantidades del mismo orden.

Si bien es claro que el espesor y la composición de la capa son factores que influyen sobre la adherencia y por tanto, sobre la tendencia a la exfoliación del depósito, no puede establecerse una relación de carácter general entre la adherencia y el espesor del recubrimiento.

La formación de la capa aleada es consecuencia de la reacción entre el zinc fundido y el hierro; la cinética de la reacción se estudia, en general, determinando en función del tiempo, la pérdida de peso respecto al inicial del material que se galvaniza, después de eliminadas las capas de zinc y de aleación.

Según el intervalo de temperaturas que se considere, la pérdida de peso se relaciona con el tiempo, de acuerdo con una expresión parabólica, $\Delta P = At^{1/2}$; o lineal, $\Delta P = Bt$ en la que A y B son constantes. Así, en el intervalo 430-490°C, para el hierro puro se cumple esta relación parabólica inferior en el que la velocidad de la capa aleada (que si se admite que se adhiere al metal base, tiene un espesor proporcional al ataque experimentado por aquél) disminuye con el tiempo. Por lo tanto, aumentando el tiempo de inmersión: $\Delta P = Bt$, para tiempos de reacción prolongados cabe esperar, en este intervalo de temperaturas, la formación de recubrimientos de mayor espesor que en el anterior. La existencia del intervalo de temperaturas, la formación de recubrimientos de mayor espesor que en el anterior. La existencia del intervalo lineal es debida a que los cristales τ a los 490°C dejan de ser adherentes al metal de base, pasando así al baño. Resulta

con ello que la difusión del zinc en el hierro (mas propiamente en la capa δ_1) no está impedido, lo cual da lugar a la relación lineal del ataque al metal base.

Por encima de los 530°C se cumple nuevamente la relación parabólica entre la pérdida de peso y el tiempo, y éste es el intervalo parabólico superior.

Según cual sea la ley que corresponde el ataque, la estructura de la capa resulta diferente.

Para un acero que a 450°C reacciona según la ecuación parabólica, en el caso de un acero no calmado, la estructura visible al microscopio, consta de fases Γ , ϵ , y τ luego, la η formando un conjunto compacto. Si a esta temperatura el ataque es del tipo lineal (caso de un acero con 0.50%Si), se ve al microscopio que la fase τ no es compacta, sino que forma cristales fragmentados, frecuentemente amórfos embebidos en las fases η_1 y δ_1 ; debajo de esta zona bifásica $\eta+\delta$, con los cristales τ existe una capa de δ_1 compacta. La capa de aleaciones Γ es en general, muy delgada.

Si el ataque corresponde al intervalo superior (caso de aceros altos en carbono, la capa δ es porosa y debajo de ella δ que es muy delgada.

CAPÍTULO IV

LIMPIEZA Y ACONDICIONAMIENTO DE LA SUPERFICIE A GALVANIZAR

INTRODUCCIÓN

La aplicación de un recubrimiento sobre una superficie metálica exige como condición previa la adecuada preparación de la superficie, es decir, la ausencia de impurezas superficiales procedentes de etapas anteriores en la fabricación o en el empleo del material de que se trate.

Es evidente que la existencia de materiales extraños distribuidos irregularmente sobre la superficie dará lugar a la formación de un recubrimiento con defectos, no sólo en lo que se refiere a sus características de adherencia, continuidad de recubrimiento y resistencia a la corrosión, sino también en cuanto a la calidad estética y acabado de las superficies.

La mejor selección de la serie de procedimientos más adecuados para obtener un recubrimiento de características satisfactorias exige el conocimiento, por un lado, de las impurezas que puedan presentarse y por otro de las características de cada uno de los procedimientos.

Origen y naturaleza de las impurezas

Desde el punto de vista de su constitución química podemos establecer una división de las impurezas en tres grupos: orgánico, inorgánico y metálico.

Dentro de los compuestos de naturaleza orgánica podemos citar los humectantes y alcoholes alifáticos empleados en operaciones anteriores, ácidos grasos procedentes de residuos de pastas de pulido, hidrocarburos procedentes de los lubricantes empleados en distintas operaciones de conformado, residuos de pinturas y barnices y aceites empleados en tratamientos térmicos, etc.

Las impurezas de tipo inorgánico están constituidas, entre otras, por los óxidos, carburos e hidróxidos metálicos formados como resultado de los tratamientos térmicos, mecánicos o fruto de la corrosión. Pueden encontrarse sales como blanco de España, óxido de zinc, disulfuro de molibdeno, etc., procedentes del craqueo de productos orgánicos, abrasivos como alúmina o carburo de silicio, etc. Finalmente, las impurezas de tipo metálico son residuos de operaciones tales como corte, laminación, trefilado, etc.

La eliminación de estos compuestos se realiza en dos etapas, desengrasado y decapado.

Métodos de desengrase

1. Pirogenación

El fundamento del método consiste en la combustión de los productos grasos y para su realización puede procederse de tres formas:

a) Mediante un mechero de gas aplicado directamente sobre la superficie. Este método es muy primitivo y solamente se emplea para eliminar pequeñas manchas de pintura. Tiene el inconveniente de la elevada necesidad de mano de obra y de poder provocar calentamientos localizados en el material, que debe llevarse a la temperatura del rojo sombra, a la vez que produce un agrietamiento de la cascarilla debido a su coeficiente de dilatación, tan diferente del acero base. Naturalmente, sólo puede emplearse en superficies exteriores.

b) Una práctica frecuente, ya desechada, procuraba la eliminación de productos grasos por inmersión del material en el baño de zinc fundido a 450°C. De este modo tenía lugar una combustión reductora de los productos y, especialmente en el caso de películas de pintura, se conseguía una pérdida de adherencia debido a las tensiones provocadas por el distinto coeficiente de dilatación, entre el material base y la película superficial.

El principal inconveniente de este procedimiento, desde el punto de vista de la calidad, es la formación de residuos carbonosos que se quedan en suspensión en la masa de zinc, ya que la temperatura es demasiado baja y el medio pobre en oxígeno para conseguir una combustión completa. Además se adhieren a los recubrimientos perjudicando su aspecto superficial y constituyendo puntos en los que la corrosión se ve favorecida dada la naturaleza catódica de estos residuos frente al zinc.

Desde el punto de vista de rentabilidad del proceso debe tenerse presente que el horno y la cuba de galvanización han sido diseñados para galvanizar y no para producir craqueo térmico de restos orgánicos, lo cual significa que su empleo, es técnicamente inadecuado. Por otra parte, la operación de galvanización en un sentido estricto, es la más costosa de todo el proceso, de ahí que en buena lógica deba procurarse emplearla en galvanizar con el máximo rendimiento y que por lo tanto no debe estar ocupada en otra operación que como el desengrase puede realizarse mucho más económicamente según otros procedimientos, ya que al afectar a todo el movimiento de materiales, disminuye la rentabilidad general del proceso.

c) El proceso Sendzimir constituye, sin embargo un procedimiento eficaz de desengrase, siempre que la cantidad que exista de grasa sea pequeña. En caso contrario, va precedido de una etapa previa de desengrase generalmente electrolítica.

En el proceso Sendzimir, el material (bandas fleje o alambre) se pasa en continuo por un horno de túnel en cuya primera parte a temperatura elevada y con una atmósfera oxidante, tiene lugar la combustión de los residuos orgánicos y la oxidación superficial del mismo que en una segunda etapa, en el mismo horno será reducido por la atmósfera reductora de amoníaco craqueado.

En esta operación, en la que el diseño está subordinado entre otros al principio del desengrase por pirogenación aquella resulta por lo tanto rentable y la productividad es elevada.

Disolución en disolventes orgánicos

El fundamento del método reside en la solubilidad que las grasas, aceites antiherrumbre, lubricantes, de temple, etc., tienen en ciertos disolventes orgánicos. Conviene tener presente que por el contrario, no son solubles los pigmentos que tienen algunos lubricantes de embutición, tampoco lo son los fluidos que se emplean en las operaciones de mecanizado y que contienen bastante agua y jabones insolubles, así como virutas metálicas, ni los fundentes de base inorgánica aunque si los de base orgánica, empleados en soldadura.

Este método de desengrase, prácticamente no se emplea en galvanización por inmersión en caliente ya que el costo de la operación es elevado cuando las dimensiones del material son grandes, que es lo que ocurre habitualmente en galvanización. En general sirve para piezas pequeñas y se emplea más como penetrante en operaciones de recubrimientos electrolíticos. No obstante se va a describir las características principales de las distintas modalidades de esta operación que pudieran ser de interés económico en el caso citado de piezas pequeñas. Los disolventes más empleados en la actualidad son el tricloretileno y el percloretileno, y también el tetracloruro de carbono, cuyas características más importantes.

El desengrase se puede realizar por tres métodos que se caracterizan por el estado en que se encuentran el disolvente: en fase vapor, en fase líquida y en fase mixta.

Fase vapor.

de disminuir al máximo los costos de operación. Asimismo este disolvente no debe ser tóxico ni inflamable a las temperaturas de trabajo.

Al introducir el material frío en la zona de vapor de la cuba de desengrase en cuya parte inferior se mantiene el disolvente en ebullición, tiene lugar la condensación de éste sobre la superficie de la pieza. La temperatura relativamente elevada del condensado aumenta la solubilidad de las impurezas, mejorando la acción de limpieza. La condensación cesa cuando el material alcanza la temperatura del vapor; el material se extrae seco. Cuando sobre la superficie de la pieza existen algunas impurezas que no son solubles en el disolvente a presión, en fase vapor, contra la superficie del material. El chorro de vapor ejerce así una acción mecánica que completa la acción limpiadora, que de otro modo, sería incompleto.

Fase líquida: cuando se trabaja en la fase líquida se puede emplear una mayor número de disolventes, ya que las características que éstos deben reunir son menos exigentes que las que se piden a los disolventes que se emplean en fase vapor o mixta.

En el presente caso no importa que el calor latente de vaporización sea elevado, porque no habrá cambio de fase.

La volatilidad y la inflamabilidad pueden ser mayores ya que es menor la temperatura de trabajo.

También pueden emplearse disolventes cuya toxicidad sea mayor, ya que al ser baja la temperatura de trabajo lo es su presión de vapor y no llega a superar los niveles de concentración máximos permitidos, a que los que llegaría si se trabajara a mayor temperatura o en fase de vapor.

Inicialmente, se emplearon en fase líquida hidrocarburos alifáticos que se vieron sustituidos por hidrocarburos clorados tri y percloroetileno, metil cloroformo y di y triclorobenceno entre otros, cuya mayor ventaja es la de no ser inflamables.

También se emplean disolventes alcohólicos o cétonicos, pero normalmente en mezclas con los hidrocarburos clorados para reducir la inflamabilidad.

La temperatura de trabajo suele ser la ambiente o un poco superior y la limpieza de los materiales se favorece con agitación mecánica o ultrasónica. El procedimiento de limpieza comprende varios baños en serie que se regeneran en continuo y en contracorriente con el movimiento de los materiales. Del primer baño, que es el más contaminado se hace pasar una corriente a un vaporizador y los vapores condensados se dirigen al último baño, del que sucesivamente, pasan a los anteriores hasta cerrar el circuito en el primero. El movimiento de materiales consiste simplemente en una inmersión en el baño.

Fase mixta: cuando las piezas son pequeñas puede ocurrir que éstas alcancen la temperatura de condensación sin haberse logrado la limpieza total de su superficie. En tal caso, se completa la limpieza sumergiendo las piezas generalmente dentro de una cesta, en un líquido caliente.

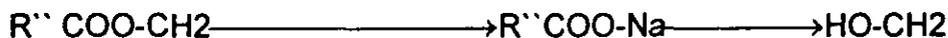
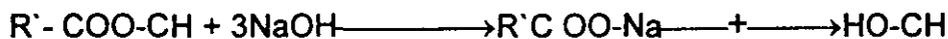
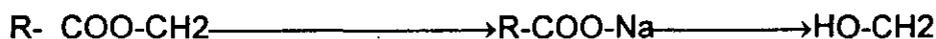
En el caso de un material muy difícil de limpiar, la secuencia de operaciones recomendables es la siguiente: inmersión en la zona de vapor hasta que alcanza la temperatura de condensación; inmersión en el líquido en ebullición cuya agitación favorece la disolución de las impurezas solubles y el desprendimiento de los restos; paso a una segunda zona de líquido en ebullición cuya agitación favorece la disolución de las impurezas solubles y el desprendimiento de los restos; paso a una segunda zona de líquido caliente pero a una temperatura menor, en la que continúa la disolución de las impurezas solubles y finalmente extracción de la pieza pasando por la zona de vapor en la que la condensación final tiene un efecto de enjuagado.

Limpieza alcalina

Primitivamente, las grasas y aceites empleados industrialmente tenían un origen vegetal o animal, por ello surgió el empleo de baños alcalinos de desengrase, cuya función era la saponificación de estos compuestos orgánicos. Esencialmente, estos cuerpos grasos están constituidos por ésteres de un ácido graso de cadena larga y un alcohol o un polialcohol, generalmente la glicerina. La reacción de formación de estos ésteres es reversible,



de ahí que pueda fácilmente desplazarse el equilibrio en sentido contrario al de su formación de las sales alcalinas (saponificación)



y simultáneamente la formación del alcohol o polialcohol, siendo ambos compuestos solubles en agua, y por lo tanto, fáciles de eliminar de la superficie del material.

Los ácidos grasos, por la polaridad del grupo COOH, son miscibles con el agua, siempre que la magnitud del resto no polar del hidrocarburo, se mantenga dentro de ciertos límites. Cuando el ácido se convierte en ésteres, la solubilidad disminuye como consecuencia de la menor polaridad del grupo -COOR, frente al -COOH. Por el contrario, la conversión en la sal alcalina incrementa notablemente la polaridad del grupo carboxilo al transformarse en -COO- Me⁺ y por ello su naturaleza hidrófila con lo que su solubilidad aumenta.

En realidad, la saponificación completa de los ésteres tiene lugar solamente en un medio fuertemente alcalino, mientras que en un baño débilmente alcalino tiene lugar una emulsión de las impurezas ya que el equilibrio esterificación-saponificación no está totalmente desplazado en ningún sentido y existen, por lo tanto aceites no saponificados que se emulsionan (fig IV.1). Esta emulsión se ve favorecida por el carácter tensoactivo que es propio de los jabones que se han formado en la saponificación y es el que permite la limpieza en baños alcalinos de pH no muy elevados. El empleo de aguas duras, ricas en cationes de metales alcalinotérreos (Ca,Mg), da lugar a la formación de jabones de estos metales que son insolubles y precipitan de la disolución, pudiendo dar lugar a la limpieza. En tal caso es necesario el empleo de productos químicos que completen estos iones en disolución (fosfatos, etc.)

En la actualidad, el reciente empleo de aceites y grasas minerales no saponificables ha hecho evolucionar la composición de los baños alcalinos de desengrase, y por lo mismo es necesario fijarse más en las características tensoactivas de los baños que en su capacidad de saponificación. Estos compuestos tensoactivos, la mayoría de los cuales son sintéticos, se caracterizan por que en su molécula pueden distinguirse dos partes de características químicas diferentes: una hidrófila y otra hidrófoba.

El mecanismo de actuación de estos compuestos es claro. La parte lipófila de la molécula se disuelve en la capa de grasa, mientras que la parte hidrófila se disuelve en la solución acuosa, como corresponde a las respectivas afinidades de su estructura molecular. La molécula actúa así como puente entre ambas fases y se admite que sus ejes son normales a la superficie interfacial, dando lugar a la formación de una película mono molecular. Ese efecto se opone al de coalescencia de los compuestos grasos, permitiendo así su fácil eliminación por enjuagado.

Existen varios tipos de compuestos tensoactivos que pueden clasificarse en los siguientes grupos: aniónicos, catiónicos, no iónicos y anfóliticos.

Los compuestos aniónicos se caracterizan por ser disociables y porque es el anión del elemento molecular humectante y emulsionante. Casi siempre son sales alcalinas de ácidos del tipo alquisulfónico y, principalmente, del tipo alquilarisulfónico. Estos agentes aniónicos solamente pueden emplearse en medio alcalino, en el cual el equilibrio



estará desplazado hacia la derecha. En medio ácido, la neutralización de los OH- producirá un desplazamiento hacia la izquierda, dando lugar a la formación del ácido no disociado que, normalmente, es insoluble en soluciones acuosas.

Los agentes tensoactivos catiónicos se emplean poco en la actualidad como agentes emulsionantes y limpiantes. Son también sales, pero en este caso es el catión el que está constituido por una cadena larga ligada a una molécula de carácter básico, por ejemplo, un derivado de amonio del tipo R-NH₃X en el que X representa un halógeno que generalmente, es el cloro.

Los agentes tensoactivos no iónicos son compuestos cuyas moléculas, al disolverse, no se disocian. Estos compuestos pueden emplearse indistintamente en medio ácido o alcalino, si bien se caracterizan más por sus buenas características emulgentes* que por los detergentes, que son menos usadas.

Existe un cuarto grupo de compuestos tensoactivos anfóliticos, pero de poca aplicación en el campo que abarcamos, por lo que solo se cita su existencia.

No tiene ningún interés emplear simultáneamente agentes aniónicos y catiónicos, ni en disolución acuosa ni en otros electrolitos, ya que daría lugar a unión electrostática de ambos extremos aniónicos y catiónicos. El compuesto así

* Líquido constituido por dos sustancias no miscibles, una de las cuales se halla dispersa en la otra en forma de gotas pequeñas.

formado tendría ambos extremos, hidrófobos (la unión electrostática tendría lugar, naturalmente, por el extremo hidrófilo de la parte lipófila) y resultaría insoluble en disoluciones acuosas floculando bien bajo forma coloidal o bien bajo forma de suspensión macrosópica.

Las características anteriormente señaladas del desplazamiento del equilibrio de los detergentes aniónicos, en medio alcalino exige la existencia de un enjuagado intermedio antes del decapado ácido. Es evidente, pues, que la ausencia de este enjuagado significará un consumo fuerte en ácido y un aumento de la salinidad por la neutralización del resto alcalino y además la inversión del sentido en que se desplaza el equilibrio de disociación al pasar de un medio alcalino a un medio ácido. Ocurriría así la rotura de la emulsión como lo que se perdería la eficacia en la limpieza, impurificándose además el baño con los ácidos y grasas orgánicas inmiscibles.

Los baños de desengrase deben tener una alcalinidad elevada porque los detergentes aniónicos actúan mejor cuanto más alto es el pH, pero deben tener también una reserva alcalina suficiente para que el consumo de álcali debido a la saponificación (no produzca una disminución del pH) utilizando una solución tampón. Por otra parte, es necesario que en la dosificación de baños se tengan jabones de metales alcalinotérreos que se forman al emplear un agua dura que son insolubles, ya que se formaría una película de precipitado que sería difícil de eliminar. Para evitar este problema, es necesario el empleo de productos ablandantes, que actúan eliminándolos de la solución por formación de complejos. También es necesario que estén presentes agentes dispersantes que sean eficaces en disoluciones diluidas como las que tienen lugar durante el enjuagado, a fin de que no tenga lugar un redéposito de los productos. Finalmente, debe procurarse, que los productos sean solubles en agua fría y fáciles de enjuagar.

La limpieza alcalina es muy apropiada como método de desengrase para los lubricantes sintéticos no pigmentados que se emplean en embutición.

Composición de los baños

En la práctica industrial, los baños alcalinos más clásicos tienen la siguiente dosificación: carbonato sódico (5-10%), hidróxido sódico (5-10%) y una pequeña adición de un jabón. La dosificación con los correspondientes sales potásicas son más caros. Algunas veces intervienen en la dosificación un pequeño porcentaje de silicatos y/o de fosfatos o de otras sales.

En la actualidad, las dosificaciones se realizan con varios de los siguientes compuestos a fin de aprovechar las ventajas características de cada uno de ellos.

- a) Hidróxidos (especialmente, hidróxido sódico). Estos compuestos son particularmente interesantes en la eliminación de pinturas viejas. Su gran ventaja es el precio bajo y el que produce una alcalinidad fuerte, ya que ésta no es debido a hidrólisis, como ocurre con las demás sales alcalinas, puesto que se produce simplemente por disolución. Sus desventajas son: las dificultades que presentan al enjuagado, su ineficacia frente a productos no saponificables, la molestia que se deriva del manejo de productos que son higroscópicos, y la inexistencia de reserva alcalina, ya que al proceder todos los iones OH^- de la disociación total del hidróxido y no tener lugar la hidrólisis no se produce, naturalmente, la formación de ningún tampón (solución reguladora).
- b) Carbonatos (casi exclusivamente carbonato sódico). Tiene menor poder saponificante que la sosa, pero su poder emulsionante es mayor; (ablandan) el agua. Además son fáciles de eliminar por enjuagado, permiten la obtención de un tampón alcalino y son baratos como productores de alcalinidad.

Como consecuencia de este mecanismo, y debido al desplazamiento del gas carbónico, la hidrólisis desplaza el equilibrio hacia la derecha hasta que,

debido a la formación de suficientes iones OH^- se alcanza el equilibrio de hidrólisis. De este modo tiene constante el pH como consecuencia del efecto tampón del carbonato.

- c) Fosfatos. Los más usados son el trisódico, el tetrapirofosfato sódico y el tripolifosfato sódico. Sus características comunes son que actúan (ablandando) el agua, favorecen la alcalinidad, se eliminan bien por enjuagado, tienen un efecto tampón notable y emulsionan muy bien.

Otra características importantes de los fosfatos es su considerable capacidad de peptización, que permite dispersar partículas grandes en otras de menor tamaño, incluso en algunos casos coloidales.

El tetrapirofosfato y el tripolifosfato sódicos tienen un marcado carácter secuestrante de iones alcalinotérreos.

El fosfato trisódico es el que se utiliza desde hace más tiempo; es el más económico, pero cada vez va siendo menos utilizado ya que, si bien da lugar a una mayor alcalinidad, su poder de (ablandamiento) del agua es menor que el de los otros fosfatos.

El tetrapirofosfato sódico (ablanda) bien el agua, formando con los iones calcio y magnesio unos compuestos solubles; es además un buen emulsificador y detergente y un buen dispersante floculante.

- d) Silicatos. Los más empleados son el metasilicato y el ortosilicato. Sus características principales son las de tener un buen poder emulsificante, ser buenos tampones a $\text{pH}=9$ que además de los dos en suspensión, el metasilicato es el más usado. El ortosilicato es más alcalino y limpio, mejor que el metasilicato, pero es más caro.

- e) Otras sales. Citaremos entre ellas, como las más usadas el tetraborato sódico, que tiene un carácter débilmente alcalino.

CASOS ESPECIALES DE LIMPIEZA

El decapado de un material engrasado es normalmente ineficaz, aunque se puedan añadir agentes tensoactivos estables en medio ácido, que facilitan la eliminación de la suciedad, según ya hemos señalado.

Un caso particular de limpieza lo constituye la realización simultáneamente del desengrase y del decapado en una sola operación. Esta se realiza en baños fosfóricos con agentes tensoactivos y disolventes orgánicos solubles en agua, como por ejemplo, el éter monobutílico del etilenglicol. También suele incluirse en la dosificación un inhibidor de decapado. En este caso la suciedad orgánica y los óxidos, siempre que la oxidación superficial no sea muy pronunciada, se eliminan por la acción de estos detergentes ácidos.

La superficie metálica, queda con un resto ácido que es muy adecuado para un posterior pintado. Debido a su elevado costo, este es casi el único caso en el que se emplea este tipo de baños, que no quedan justificados cuando no hay un interés especial en conseguir este resto ácido sobre la superficie del material.

Un punto de interés especial lo constituye el de la eliminación de capas de barnices y pinturas que, aunque no muy habitual, se presenta como necesaria con más frecuencia que la que sería de desear. Estas capas de barnices y pinturas no son siempre de fácil eliminación por los procedimientos habituales de desengrase, por lo que resulta imprescindible recurrir a procedimientos especiales en los que se emplean distintos productos según la naturaleza del barniz o de la pintura.

El procedimiento más sencillo y menos costoso consiste en mantener el material a la intemperie, a fin de que la oxidación del acero produzca el levantamiento de la pintura. El inconveniente principal es el de que se necesita mucho tiempo y que la sobreoxidación que tiene lugar en el resto de la superficie del material origina un mayor consumo de ácido en el decapado.

Los productos comerciales para la eliminación de las capas de pinturas y barnices se encuentran en forma de pasta o de polvo para diluirse en agua.

Las capas de barnices y pinturas se atacan muy fuertemente por productos a base de cloruro de metileno que es un agente muy enérgico. Como es un disolvente muy volátil, debe emplearse en mezclas que lo absorban y con atenuadores de evaporación a fin de conseguir el tiempo máximo de actuación del disolvente.

Muchos de los problemas que exigen un tratamiento especial, de limpieza son debidos a que es frecuente que el material que se desea galvanizar se marque con pinturas con el único propósito de su identificación. En tal caso debe emplearse un sistema de pintado y marcado que no interfiera con el de la preparación superficial habitual, pinturas solubles en agua o bien mediante punzonado, con lo que se conseguirá el fin deseado sin producir trastornos.

Control de los baños

Cualquiera que sea el baño elegido, el mejor procedimiento de control de la operación de desengrase consiste en llevarlo de su composición. Un trabajo correcto exige un análisis químico periódico del baño, con el fin de mantener su composición dentro de unos límites estrechos. Una simple valoración alcalimétrica permitirá conocer la alcalinidad total y la reserva alcalina del baño, dato que es muy importante.

El poder humectante se puede valorar muy sencillamente determinando el número de gotas necesario para llenar una probeta hasta un volumen dado. El tamaño de las gotas es, según se sabe, función de la concentración y la tensión superficial de la disolución y ésta varía, según los agentes tensoactivos. El volumen de una gota de agua oscila entre 0.03 y 0.05 ml. según el diámetro de la pipeta. Como puntos

de referencia mínimos y máximos se toman, respectivamente, los del baño nuevo antes y después de adicionar el agente tensoactivo.

Existen gran variedad de procedimientos de control adicional a los aquí descritos, por lo que en un momento determinado se puede remitir a la bibliografía correspondiente.

Hay diversas soluciones técnicas para resolver el problema del desengrase de materiales en las plantas de galvanizado por inmersión en caliente. La elección de uno u otro sistema depende de las características concretas de la planta, debiéndose tener presente que la introducción de esta operación, seguida del enjuagado correspondiente, dentro de las que constituyen el proceso de galvanizado, es desde el punto de vista de los costos inicial y de operación, poco importante, mientras que su no existencia puede ocasionar no solo costos extras, sino también una disminución en el rendimiento horario de procesamiento del material que tiene mayor trascendencia.

El enjuague en el proceso de galvanización

La evolución actual en la tecnología de la galvanización por inmersión en caliente ha tenido hacia una aplicación mayoritaria del proceso por vía seca. Este proceso tiene la siguiente secuencia de operaciones.

1. Desengrase (generalmente alcalino)
2. Enjuagado
3. Decapado ácido
4. Enjuagado
5. Tratamiento en disolución de sales
6. Secado
7. Galvanizado

Todas y cada una de estas operaciones tienen su importancia. Las seis primeras, para conseguir una adecuada preparación de la superficie y la última para obtener un recubrimiento de las características buscadas. Sin embargo no siempre se le tiene verdadero interés a las operaciones de enjuagado del material, que se lleva a cabo sin ningún tipo de control. Esta operación de enjuagado tiene importancia no solo por razones de calidad, sino también por razones de rentabilidad.

Importancia del enjuagado en el desengrase

Es habitual que en el proceso de galvanización por inmersión en caliente se emplea un baño alcalino como baño de desengrase. La ausencia de un enjuagado posterior o su defectuosa realización puede producir alguno de los siguientes perjuicios:

- a) Neutralización parcial del ácido del decapado.

- b) Aumento de la concentración salina del ácido de decapado, disminuyendo la fuerza iónica del baño.
- c) Inversión del equilibrio de saponificación de las grasas y aceites saponificables, impurificando el baño de ácido y disminuyendo la eficacia del desengrase.
- d) Inversión del equilibrio del agente humectante que suele ser del tipo aniónico y estable, por tanto, en medio neutro y alcalino, pero no en medio ácido.

Importancia del enjuagado del decapado

Los argumentos base que justifican el empleo del enjuagado después del decapado se derivan de que en su ausencia, tiene lugar:

1. Una impurificación del baño de sales con ácido y sales de hierro procedentes del agua que mojó la pieza. Si la concentración de contaminantes es elevada, tendrá lugar la formación de unos barroos que al depositarse sobre la superficie perjudican la calidad del recubrimiento.

En la práctica se recomienda evitar un contenido en ácido superior a 2 g/l (expresado como ácido clorhídrico) en cuyo momento es necesaria su neutralización

2. Un arrastre de las sales de hierro que han purificado el baño, hasta la cuba de zinc fundido, dando lugar a la producción de escorias.

El primero de los dos puntos señalados, y cuyas desfavorables repercusiones económicas son más inmediatas, no es sino la primera parte del problema. Se analiza ahora la importancia de la operación de enjuagado del decapado desde la óptica de la producción de escorias. En tal caso, también está resuelto el problema de la impurificación del baño de sales.

- a) Las sales de hierro procedentes de la disolución de decapado son arrastradas en el agua que moja el material hasta el baño de zinc.

- b) Las sales de hierro producidas por reacción de las sales del baño de tratamiento con el material.
- c) El ataque del material por el zinc fundido al galvanizarse.
- d) El ataque de las paredes de la cuba de acero por el zinc fundido.

En el antiguo proceso por vía seca, en el que no existían las operaciones 4, 5 y 6, las sales de hierro del decapado llegaban directamente al baño de zinc, constituyendo un frente importante de producción de escorias.

Determinación del rendimiento

Este factor depende profundamente del movimiento de materiales, agitación del baño y tiempo de contacto, por lo que sólo tiene interés su determinación en la misma planta. De cualquier forma el rendimiento es elevado y en principio puede estimarse igual o superior al 80 %.

Cáculo óptimo del enjuagado

Como ejemplo vamos a desarrollar un caso de determinación del óptimo de enjuagado de una instalación. Así podrá determinarse el número de baños necesarios para las bases de cálculo con que se opera.

Supongamos que la producción es de 3 tm/h y que su superficie específica es de 4 m²/tm y que se trabaja en tres turnos por día. el volumen de mojado es de 120 g/m² y se supone que el rendimiento en el enjuagado es del 80%. El baño de decapado tiene una concentración en ácido clorhídrico y en sales de hierro de 100 g/l. Se trata de determinar el número óptimo de baños y la concentración de los líquidos de evacuación. Supondremos que el contenido en hierro que sale de los baños de enjuagado entre íntegramente en el baño de zinc fundido.

La ecuación se puede escribir como:

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

$$Q = \frac{Q'}{\eta} \frac{vC'_o}{C'_n}$$

Y calcular así el caudal de agua necesaria en función del número de baños (n) y la concentración del agua residual (C'_n).

Por lo tanto, podemos concluir que el análisis del enjuagado nos permite calcular el número de baños necesarios para un proyecto determinado. En cualquier caso se puede estimar el caudal del agua de enjuagado necesario para conseguir mantener el baño de sales como un contenido ácido y en sales de hierro que eviten la necesidad de una recuperación o incluso de su evacuación.

CAPITULO V

EL SECADO EN UNA LINEA DE GALVANIZACION

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el proceso de galvanización por inmersión en caliente se realiza por uno de los procedimientos denominados "por vía húmeda" o por "vía seca". La diferencia entre ambos se limita al método que emplea un tratamiento con sales previo a la inmersión en el baño de zinc fundido. Como se sabe, en el proceso por "vía húmeda", las sales se encuentran fundidas sobre una parte de la superficie del baño de zinc, y, a través de él se introducen las piezas, que luego se extraen de la superficie libre del zinc fundido. En la galvanización por "vía seca", por el contrario, el tratamiento de sales se efectúa por inmersión del material en una disolución acuosa de las sales, mantenida a una temperatura aproximada de 80°C. Después de secado el material en una estufa se procede a su galvanización en el baño de zinc. Resulta así, que dependiendo de las características particulares de explotación, cualquiera de ambos procesos puede, en principio, ser el más adecuado a un caso concreto. No obstante, es de señalar que se observa una tendencia hacia el empleo generalizado del proceso por vía seca.

IMPORTANCIA DE LA OPERACIÓN DE SECADO

De la seguridad del personal

La existencia de agua sobre la pieza que se procesa da lugar a proyecciones de zinc fundido, como consecuencia de la vaporización súbita del agua al sumergir la pieza en el baño del metal fundido. El riesgo derivado de estas proyecciones es, por supuesto elevado, y el radio de peligro en los alrededores es grande. Un caso particularmente peligroso lo constituye la acumulación de grandes cantidades de agua en alguna parte de una pieza. Suele ocurrir en las soldaduras, defectuosamente realizadas o debido a un mal diseño. Si además el secado es insuficiente, el volumen de agua que se vaporiza puede llegar a hacerlo con violencia explosiva.

De la calidad del producto

Las proyecciones citadas en el caso anterior puede incidir sobre otra parte del mismo material que se está procesando, dando lugar a la formación de pegotes que afean el aspecto de este producto y obligan a un reacondicionamiento.

Un secado excesivo daría lugar, por el contrario, a un ataque de las sales al material, pudiendo llegar éstas a descomponerse si la temperatura o el tiempo de operación fueran excesivos.

De la rentabilidad del proceso

De un simple análisis del costo específico de las distintas operaciones que constituyen el proceso de galvanización, resulta evidente que el costo de la operación de galvanización es el más elevado de todo el proceso. La evidencia de este hecho encuentra eco en el gran número de trabajos que han dedicado su atención al análisis del movimiento de materiales en la planta tomando como

referencia la cuba del zinc. En un proyecto bien meditado, el número de baños necesarios en la línea de penetración del pretratamiento (dos o tres para algunas operaciones) viene condicionado por la plena y racional utilización de la cuba de zinc.

En el caso de galvanización en continuo según el proceso Sendzimir, el material entra en el baño a una temperatura superior a la del zinc fundido, y este exceso entálpico es el que permite mantener el baño fundido. En la galvanización general, es un hecho evidente y cualitativamente conocido por los galvanizadores, que el material frío al introducirse en el baño, produce un descenso de temperatura; de ahí que exista una limitación del peso máximo que puede procesarse en cada inmersión.

Podemos enumerar los efectos principales que ocasiona la introducción del material frío en el baño.

a) No se pueden conseguir producciones elevadas, ya que, como resultado de la fuerte demanda de calor que tiene lugar, se trabaja a temperaturas elevadas, y resulta difícil conseguir una regulación uniforme de la temperatura.

Puede así, dar lugar a temperaturas muy elevadas en algún punto de la cuba, produciéndose allí un enérgico ataque que se conoce con el nombre de ataque en "puntos calientes".

b) En el caso de que las inmersiones individuales sean muy pesadas, incluso aunque la producción no sea muy elevada, pueden alcanzarse sobrecalentamientos localizados en la pared como resultado de las fuerzas demandadas intermitentemente de calor y de la inercia térmica del horno.

c) Una fórmula para que el material no entre frío y que, por realizarse una inmersión muy lenta, resulten espesores de recubrimiento muy elevados, consiste en calentar previamente el material sobre la superficie de la cuba por radiación.

Este procedimiento resulta fruto del espejismo de querer aprovechar las 15

Mcal/hm² que se pierden por el baño. Este proceso es realmente antieconómico por dos razones: la primera porque, este procedimiento de secado es técnicamente muy imperfecto, es decir, se aprovechan muy pocas de las 15 Mcal/hm² que emite el baño, y la segunda, reflejo de la anterior, porque al tener que ir a tiempos de residencia prolongados para conseguir el calentamiento adecuado, el rendimiento global del proceso baja fuertemente porque disminuye la producción por estar ocupado el baño de galvanización.

Balance térmico

A la hora del diseño de una cuba de galvanización, la superficie libre de la misma viene determinada por el tamaño máximo del material que se va a procesar. Se consigue así disminuir al máximo las pérdidas por radiación desde las superficies del baño. La profundidad del baño resulta sin embargo, y en general, condicionada más que por el tamaño del material, por la necesidad de una superficie lateral mínima de calefacción. Sobre la base de una transferencia de calor de 20-25 Mcal/hm², se determina la profundidad necesaria del baño una vez fijada la producción horaria y aceptando como condiciones de diseño que la calefacción se realice a través de los dos laterales largos y en 2/3 superiores.

Aumento de la vida de la cuba

No siempre es posible el aprovechar el aumento de la capacidad de producción de una instalación ya que un diseño inadecuado de la misma hará que el punto crítico de producción descansa en la capacidad y diseño del movimiento de materiales, o que el número de baños de pretratamientos sean la etapa controlante, en cuanto a la capacidad de producción, por una falta de planeamiento original de la planta en el momento de su diseño.

No obstante, también en este caso resulta rentable la incorporación de la operación de secado, ya que al ser menor la interfase zinc fundido-acero será menor, y esto significa una mayor duración de la cuba.

Resulta por tanto evidente que la realización de la operación de secado y precalentamiento previa a la de galvanización significa o bien una mayor producción o bien mayor vida del baño, resultados ambos que justifican sobradamente su implantación en todas las plantas de galvanización.

CAPÍTULO VI

EMPLEO DE SALES EN LA GALVANIZACIÓN POR INMERSIÓN EN CALIENTE. FLUXADO.

INTRODUCCIÓN

El problema de la contaminación de ambientes industriales está recibiendo una atención creciente por la incidencia que esta realidad tiene en la higiene y seguridad en el trabajo. La inevitable proximidad de grandes núcleos urbanos a las zonas de relativa concentración industrial ha sido quizá, otra de las causas que ha provocado un aumento en el interés por resolver los distintos problemas de instalaciones, procesos u operaciones productoras de contaminación ambiental.

La industria de la galvanización por inmersión en caliente está siendo también objeto de un estudio analítico bajo la óptica de la lucha contra la contaminación. Los problemas de contaminación hacia el exterior que pueden originar estas plantas se derivan de la evacuación de los residuos ácidos de decapado, los cuales poseen además una concentración apreciable (80 g/l) de hierro disuelto como sal ferrosa. Estas sales reductoras son como se sabe, causa de que estos vertidos tengan una demanda biológica de oxígeno (DBO) muy elevada.

Otra posible fuente de contaminación en el interior de la planta, que es la que tiene mayor incidencia en cuanto a seguridad e higiene en el trabajo, se pueden señalar las que constituyen los vertidos de aguas alcalinas residuales del desengrase. En lo referente al interior por un lado, los vapores ácidos que se desprenden de las cubas de decapado y, por otro lado, los humos que se producen como resultado de la descomposición de las sales que recubren las piezas que se van a galvanizar al sumergirlas en el baño de zinc fundido.

EL TRATAMIENTO DE LAS SALES EN EL GIC

Procedimientos

Los dos procedimientos básicos de la galvanización como ya se ha mencionado en donde se emplean sales son: por vía húmeda y por vía seca.

En el proceso por vía húmeda las sales se mantienen fundidas sobre toda o sobre una parte de la superficie del baño de metal fundido y a su vez se introducen las piezas, extrayéndolas a través de la superficie limpia del baño, de la que se ha retirado la capa de sales con los óxidos superficiales y las escorias flotantes procedentes de la descomposición de las mismas sales, denominadas "natas de flujo".

En el procedimiento por vía seca, el material, después del enjuagado que sigue al decapado, se sumerge en un baño de una disolución acuosa de sales, luego se seca y finalmente se introduce en el baño de metal fundido previa separación de los óxidos superficiales que sobrenadan. La extracción tiene lugar también a través de la superficie limpia del baño.

Un sistema mixto mantiene las sales fundidas en un baño independiente y el tratamiento se efectúa por inmersión en este baño y sin secado intermedio en el de metal fundido en la forma habitual.

Ventajas e inconvenientes

La función habitual clásica de las sales es la de impedir la oxidación temporal de la superficie del material recién decapado y la eliminación del óxido superficial que se forma sobre la superficie del baño de zinc, en cantidades apreciables, si el baño está exento de aluminio o si, debido al tamaño de la pieza, la inmersión es lenta.

Los principales inconvenientes de estos baños de sales son:

- I. El bajo punto de descomposición de las mezclas que impide el precalentamiento del material a temperaturas elevadas, con lo que se mejoraría la rentabilidad de la planta.
- II. La descomposición que, de cualquier forma, tiene lugar al sumergir las piezas en el baño, la cual produce una gran cantidad de humos, con lo que:
 - a) Tiene lugar una pérdida, parcial o total, de la visión de la zona de trabajo.
 - b) Se produce un deterioro de las condiciones adecuadas de higiene en el trabajo y como consecuencia, es necesaria la instalación de extractores de gases.
 - c) Como los gases son corrosivos y el volumen de evacuación es muy grande, es necesario el empleo de instalaciones adecuadas de lavado y purificación de gases para evitar la corrosión de equipos circundantes.
 - d) Esta agitación de aire sobre el baño ocasiona una mayor pérdida de calor de la superficie del baño.
 - e) Tiene lugar, además, por esta agitación, un aumento apreciable en la producción de óxidos que flotan sobre la superficie del baño.

Podemos decir algunas características de estas mezclas de sales es que presentan las siguientes características:

- I. Son no contaminantes.
- II. Hacen innecesarios el empleo de extractores sobre la superficie del baño, que por la corriente que crean, contribuyen a enfriarlo.
- III. Hacen innecesario el empleo de instalaciones de depuración de gases.
- IV. Mejoran las condiciones de visibilidad de la planta.
- V. Originan una menor producción de natas de zinc.

VI. Crean un mejor ambiente de trabajo desde el punto de vista de la seguridad e higiene en el trabajo, por ejemplo: Trabajos más recientes han incorporado mezclas equivalentes de KCl y $ZnCl_2$

GIC. GALVANIZACIÓN POR INMERSION EN CALIENTE.

CAPÍTULO VII

CARACTERISTAS Y PROPIEDADES DE RECUBRIMIENTO OBTENIDO POR GIC

INTRODUCCIÓN

Como breve recordatorio hablaremos brevemente sobre lo que es la inmersión en caliente como uno de los métodos de protección más antiguos que todavía hoy se utilizan. Consiste en recubrir un material con otro, sumergiendo el metal base en un metal fundido.

Los metales utilizados para recubrir están limitados por su bajo punto de fusión. Los más utilizados son el aluminio, plomo, zinc y estaño. El material base suele ser acero.

Los recubrimientos obtenidos por inmersión en caliente alcanzan espesores de entre 0.01-0.1 mm. Que sea un espesor u otro depende de varios factores como: temperatura del metal fundido, tiempo de contacto substrato-metal fundido, velocidad de inmersión y extracción de la pieza del baño y velocidad de enfriamiento.

El recubrimiento obtenido por inmersión en caliente está formado por la capa o capas interiores de aleación y una exterior de metal puro.

La capa de aleación se forma por difusión dando lugar a diferentes compuestos de metal fundido-metal base, constituyendo normalmente una capa de aleación múltiple, la cual se caracteriza por distintas composiciones y propiedades.

La capa externa de metal puro se forma al adherirse el metal fundido a la pieza cuando la pieza es extraída del baño.

La galvanización por inmersión en caliente es un proceso mediante el cual se obtienen recubrimientos de zinc sobre el acero por inmersión de la pieza en un

baño de zinc fundido a una temperatura comprendida entre 445° y 465°. El tiempo de inmersión varia de unos segundos a unos minutos, como mínimo hasta que la pieza alcanza la temperatura del baño. Puede realizarse de forma continua o discontinua.

Las razones por las cuales el acero galvanizado se sigue utilizando son las siguientes:

- * Proceso no complicado y controlable con exactitud.
- * Defectos aparecen con claridad, más fácilmente perceptibles.
- * Debido a que es una inmersión total, queda la pieza en su totalidad perfecta y uniformemente cubierta.
- * Debido a la reacción del zinc con el hierro se consigue un sistema compacto de varias capas perfectamente unido al acero.
- * Sobre el zinc, se forma una pátina de carbonato pasivándose.
- * Aunque desaparezcan la pátina de carbonato y el zinc metálico, quedan los recubrimientos de aleaciones Fe/Zn aún más resistentes que el zinc puro.
- * Protección catódica del zinc.

Fundamentos

La reacción química entre el zinc y el hierro base da lugar a la formación de diferentes capas de aleación.

Como consecuencia de la temperatura de galvanización, en la microestructura de la capa sólida superficial se pueden diferenciar cinco fases, nombradas según el orden decreciente de contenido de hierro: hierro base, fase gamma (γ), fase delta (δ), fase zeta (ζ), fase eta (η), siendo esta misma sucesión el orden en que aparecen en la microestructura. Las propiedades relativas de cada una de ellas son función de la temperatura del baño, tiempo de inmersión y condiciones superficiales del metal base. fig VII.1

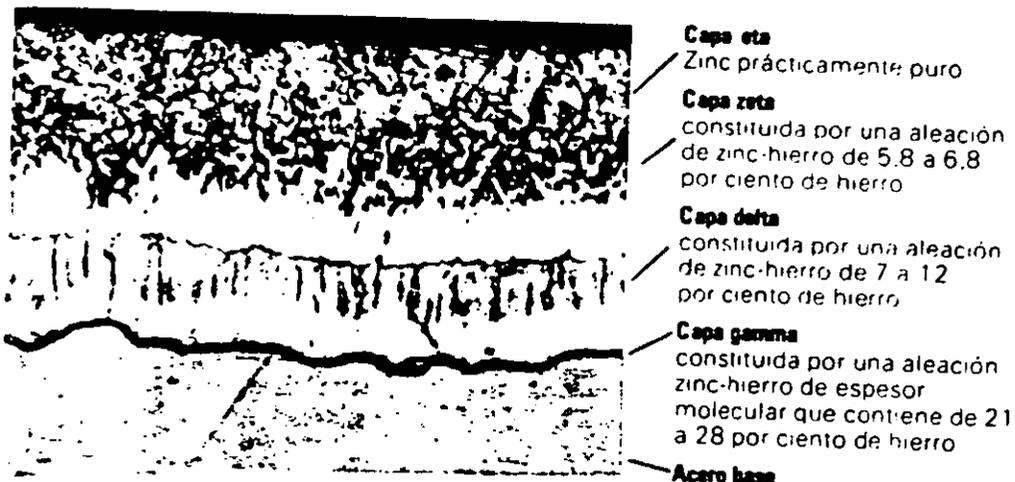


fig.VII.1

La capa eta es una capa blanda y funciona como de amortiguador. Tiene la composición del baño, dando un aspecto brillante a la pieza. La capa puede desaparecer si después del galvanizado se somete a un tratamiento térmico que favorece el crecimiento de la fase zeta a expensas de la eta.

Las capas zeta y delta son capas más duras que el hierro incluso que el acero, proporcionando gran resistencia a la abrasión.

La capa gamma es poco apreciable, aparece en la microestructura como una fina capa. Sólo en el caso de un tiempo de inmersión alto el espesor de ésta aumenta.

El espesor del recubrimiento y la adherencia son criterios para establecer la calidad de las capas. El espesor determina la vida del recubrimiento y las condiciones de servicio en que estará la pieza el factor que a su vez nos determine el espesor. Se puede decir que espesores grandes pueden tener inconvenientes como:

- Tono mate del recubrimiento
- Los compuestos intermetálicos son frágiles. Si el material se deforma puede dar lugar a grietas por una mala adherencia en espesores grandes.

Acabado de la pieza

Una vez que se tenga la pieza galvanizada se puede poner en funcionamiento sin ningún acabado. En caso de piezas que van expuestas a ambientes muy corrosivos, después del galvanizado se protegen con otros métodos, como es el caso de un pintado, de un fosfatado o cromatado.

Para pintar piezas galvanizadas se necesitan tratamientos previos que aumentan la adherencia de la pintura a la superficie. Estos tratamientos son:

- I. Limpieza, desengrase y secado.
- II. Preparación de la superficie para mejorar la interacción zinc-pintura. Se utiliza uno de los siguientes métodos:
 - Tratamiento mecánico de esmerilado.
 - Ataque químico con soluciones ácidas como el HCl dil, Cu SO₄
 - Conversión química de la superficie de zinc a compuestos complejos de zinc, insolubles, que neutralicen la interacción zinc-pintura.

Problemas que se pueden presentar en la galvanización

Uno de los problemas de la galvanización por inmersión en caliente es la pérdida de zinc por reacción con el hierro o el oxígeno atmosférico principalmente. Los residuos de zinc, en la galvanización son básicamente de tres tipos:

- ⇒ Sedimentos denominados zinc pesado o matas. Son compuestos intermetálicos de zinc-hierro principalmente, aunque también pueden ser de aluminio y níquel, si estos elementos están en los baños, quedan depositados en el fondo.
- ⇒ Cenizas. Son principalmente mezclas de zinc metálico y óxidos de zinc producidos por la reacción del zinc de baño con el oxígeno atmosférico.
- ⇒ Espuma de flujo. Obtenidas por la reacción del zinc del baño con el flujo. Son residuos formados principalmente de zinc metálico, de óxido de zinc y compuestos básicos y cloruros.

CAPÍTULO VIII

APLICACIONES DEL ACERO GALVANIZADO

EL EMPLEO DE LOS MATERIALES GALVANIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La edificación, sobre todo la de vivienda, constituye una actividad en la que el empleo de los materiales metálicos es muy reciente. El empleo de estructuras metálicas es reciente, así como los de techumbre y aditamentos metálicos. Existen un gran número de viviendas, la mayoría de ellas en zonas rurales, que carecen de algo tan elemental como una instalación de plomería para agua corriente y son mucho más, incluso en zonas urbanas, las que carecen de sistema de agua caliente o de calefacción.

Son múltiples los materiales normalizados de naturaleza metálica que podemos encontrar hoy en día en la construcción. Citemos entre ellos, el acero común pintado, el acero galvanizado, el acero inoxidable, el aluminio, el zinc, el cobre y sus aleaciones, etc. Si bien es cierto que los materiales metálicos tienen una mayor tradición en lo que se refiere a la normalización en cuanto a control de calidad y de dimensionado, no lo es menos que la puesta en obra de manera defectuosa, pueden acabar con la buena calidad del material empleado.

El acero galvanizado como material resistente a la corrosión

Uno de los procedimientos clásicos de protección contra la corrosión del acero consiste en recubrirlo con zinc. Aunque el zinc es un material anódico respecto al acero, es decir, que se corroe más fácilmente según se deduce de la respectiva

posición de ambos elementos, hierro y zinc, en la escala de potenciales de Nernst, los productos de corrosión desarrollados sobre el zinc, son en gran número de condiciones, muy adherentes y compactos por lo que, en resumen, su cinética de corrosión viene a ser mucho menor que la del acero desnudo en proporciones que oscilan entre 100 y 200 veces.

La denominación de materiales galvanizados se otorga sin demasiada precisión a todos aquellos que emplean el zinc como recubrimiento protector independientemente del proceso por el que se le aplique. Aunque en términos generales, la protección del recubrimiento depende más de la masa de zinc existente por unidad de superficie, que del proceso por el cual se aplica, existe una serie de características específicas de cada proceso, que lo hace más adecuado para el fin al que se vaya a destinar el material. Identificaremos estos distintos procedimientos:

- a) Galvanizado zincado electrolítico. Se obtiene haciendo pasar una corriente continua por una disolución, ácida o básica, que contiene zinc. El espesor de los recubrimientos conseguidos suele oscilar entre 2-3 y 10-15 micrómetros, siendo los valores más habituales los de 4-8. El aspecto es liso y brillante, lo cual lo hace adecuado para aplicaciones de carácter estético. En ningún caso debe utilizarse para exposiciones a la intemperie o en ambientes algo agresivos, ya que la pobreza de espesor le otorga una resistencia a la corrosión muy baja. Se emplea en piecerío pequeño, alambres y chapas. Su baja resistencia a la corrosión hace que algunas veces se complemente mediante la aplicación de lacas incoloras o recubrimientos de conversión como el cromatado.
- b) Metalizado con zinc. Se obtiene proyectando gotas de zinc fundido sobre la superficie a proteger. Las ventajas fundamentales de este procedimiento, es que se pueden proteger piezas de gran tamaño y que el material no sufre

ningún tipo de tratamiento térmico durante el proceso de recubrimiento, ya que la superficie nunca llega a calentarse más allá de los 200°C. Resulta un sistema de protección muy adecuado para exposición a la intemperie y tiene un acabado superficial que lo hace apto para ser pintado.

- c) Recubrimiento con pinturas de zinc. Estos productos tienen un 80-90 por ciento de polvo de zinc y el resto de óxido de zinc y se aplican sobre muy diversos vehículos en pinturas de uno o dos componentes. Tienen las ventajas de aplicación del metalizado a las que añadir, si se aplica a brocha, la de poder acceder a superficies no vistas en línea recta desde el exterior. Su principal desventaja es la incidencia del costo de la mano de obra en el precio del tratamiento.
- d) Sherardizado (galvanizado por difusión). Consiste básicamente en una difusión sólido-sólido del zinc y el hierro, que se obtiene introduciendo estos materiales en una masa de polvo de zinc y un material inerte manteniéndolos a una temperatura ligeramente por debajo del punto de fusión del zinc. Las temperaturas habituales de trabajo suelen ser 380°C. Se emplea en piecerío de pequeño y medio tamaño y su característica principal es la buena adherencia del material base y el recubrimiento y su acabado mate de aleación hierro-zinc que constituye una buena base para la pintura. El espesor del recubrimiento depende de las condiciones del proceso (sobre todo tiempo y temperatura) pero suelen estar entre los 50-100 micrómetros.
- e) Galvanizado por inmersión en caliente. Consiste básicamente en una difusión líquido-sólido que se produce al introducir un material férreo en un baño de zinc fundido. La temperatura de trabajo suele ser de 440-480°C en los procesos a temperatura convencional y de 530°C en los procesos a temperatura elevada. Las piezas pueden tener tamaño muy variable desde el piecerío hasta por ejemplo 10-15 m. de longitud. El recubrimiento está constituido como en el caso

anterior por una serie de capas aleadas de zinc-hierro que, en este caso, quedan cubiertas por una capa externa de zinc, por lo que su aspecto suele ser más brillante. En el caso de materiales galvanizados en continuo, chapas, alambre, la proporción de capa aleada es mínimo, salvo que se le de un postratamiento de recocido. Las bandas galvanizadas en continuo, pueden tener distintos acabados con grandes flores de cristales de zinc o carecer de ellas. El espesor va desde 15 a 100 micrómetros.

Acero galvanizado en el concreto

El empleo del zinc sobre las armaduras que se emplean en el concreto armado, constituye una práctica industrial habitual en muchos países, Canadá, Norteamérica, etc., que vienen aplicándolo en la construcción y en las obras públicas. Su empleo en Europa es todavía muy restringido aunque se aprecia una creciente penetración.

El argumento principal de recelo respecto a la utilización de este material reside en su presunta falta de adherencia.

El concreto suele tener un pH en torno a 12.5 pero en ocasiones cuando su contenido en álcalis es elevado, puede elevarse también el valor del pH. Esta ha sido la causa que permite explicar el fallo de algunas obras y que se debe al carácter anfótero del zinc que se disuelve como zincato, aproximadamente por encima del pH 12,5. La determinación de pH superiores a éstos ha conducido a la disolución de la capa y, en consecuencia, no se producen los efectos beneficiosos que se derivan del recubrimiento galvanizado.

Los recubrimientos galvanizados de las armaduras, resultan especialmente recomendables, en el caso de estructura de concreto de elementos prefabricados en los que las armaduras están muy próximas a la superficie del hormigón, ya que el pequeño volumen de los productos de corrosión del recubrimiento, no sólo no

hacen “reventar” el concreto, c lo ensucian con difusión de manchas de óxido, sino que contribuyen a garantizar su vida.

Tuberías galvanizadas

El empleo del acero galvanizado en las tuberías tiene una gran tradición en la construcción. Este tipo de tubería se galvaniza por procedimientos semicontinuos y se soplan por su interior con aire o vapor para facilitar su escurrido. La masa del recubrimiento, según establecen las normas, ha de ser superior a los 400g/m² que vienen a ser unos 53-55 micrómetros. Los accesorios que se emplean están también galvanizados.

Los problemas de corrosión se pueden dividir en problemas de corrosión por el exterior o por el interior. Las causas fundamentales de la corrosión por el interior, además de las debidas a un defectuoso diseño, suelen ser las siguientes: empleo de un agua con el pH excesivamente ácido o excesivamente blanda. La primera causa suele pasar desapercibida, ya que el control del pH del agua no siempre tiene en cuenta. Asimismo, un agua blanda que suele ser de gusto más agradable que un agua dura, se considera muy buena y, en consecuencia adecuada para las tuberías galvanizadas proceden del exterior. Esto resulta una paradoja, ya que en un principio, se tiene que suponer que los elementos más agresivos son los que posee el agua. La causa de estos fallos procede de una mala puesta en obra debido, en la mayoría de los casos, a una ausencia de especificaciones adecuadas para el obrero, a una limpieza inadecuada de la obra y a una serie de práctica habituales, malas prácticas, que no acaban de desecharse.

A continuación, se señalan algunas causas de estos fallos:

- 1) Empleo en los concretos de arena de playa sin lavar con un contenido elevado de cloruros.

- 2) Excesivas adiciones de CaCl_2 como acelerador del fraguado suele producir corrosión generalizada.
- 3) Empleo de peso como elemento de sujeción de las tuberías de plomo, material perfectamente compatible con el yeso. Suelen producirse picaduras a lo largo de la generatriz inferior deficientemente aireada.
- 4) Limpieza con agentes excesivamente agresivos e incontrolados que acceden a las tuberías a través de resquicios.

Exposición a la intemperie

La aplicación de materiales galvanizados en condiciones de exposición a la intemperie, es la más clásica. Así, podemos encontrarlos como piezas metálicas en balcones, puertas de garaje, cerramientos de tiendas, techumbres provistas de aislamientos, conductos de aire acondicionado, chimeneas, etcétera.

Todos estos elementos pueden tener, cuando razones estéticas así lo exijan, el complemento de la nota de color que, en el caso de bandas galvanizadas, de los alambres y de las mallas, va incorporado desde su origen, lo cual constituye un elemento garantía de calidad absolutamente indiscutible.

En el mobiliario urbano de las ciudades, supermercados o gasolineras, se dan un gran número de aplicaciones con elementos galvanizados que podemos ver en las señales de tráfico y en las barreras de carretera, etcétera.

En todos estos casos la prescripción del empleo de los materiales galvanizados se hace correctamente. Por el contrario, cuando se trata de construcción de viviendas, no resulta infrecuente encontrar en el pliego de condiciones, frases como la siguiente: *“los materiales galvanizados serán de la mejor calidad”* sin ninguna referencia, ni la masa de recubrimiento galvanizado que se desea para aquella aplicación concreta.

Hay un fallo relativamente habitual entre los materiales galvanizados fruto del almacenamiento *protegido* de los productos de su puesta en obra. En lugar de dejarlos a la intemperie y con una buena aireación, que es como van a estar en servicio, algunas veces se mantienen en sus embalajes. El resultado es que debido a la condensación de la humedad y a las bajas temperaturas nocturnas, se produce un ataque conocido con el nombre de *manchas blancas* constituidas por un polvillo no adherente de carbonato de zinc. Si este ataque no es profundo no tiene mayor importancia, pero puede darse el caso de que llegue a desaparecer casi todo el recubrimiento, con lo que el producto queda inutilizado y es necesario volverlo a galvanizar.

CAPÍTULO IX

AVANCES Y TENDENCIAS EN LAS APLICACIONES DEL ACERO GALVANIZADO EN LA INDUSTRIA DEL AUTOMÓVIL

INTRODUCCIÓN

En la década de los setenta tiene lugar una serie de hechos que configuran una nueva etapa en lo que se refiere a los criterios de producción de la industria del automóvil. Hasta esta fecha, la fabricación de vehículos había seguido una línea de crecimiento ininterrumpido. Así, desde 1980 a 1993 la tasa de crecimiento constante llevó la producción de los 17 a los 39 millones de unidades, cifra que con oscilaciones no superiores al 5%, se ha mantenido en los últimos años.

Esta realidad es consecuencia fundamental de los siguientes hechos:

- ⇒ Un endurecimiento sobre las leyes de emisión gaseosa para protección de los usuarios que tuvo una especial incidencia en las características energéticas de los combustibles, cuyo contenido en plomo se limita de 3 a 0.5 g/galón en un plazo de cinco años.
- ⇒ La aparición en los años de la primera crisis del petróleo, que se repite al finalizar el decenio, y que induce a una mayor disminución del consumo de combustible para lo cual se adoptan, entre otras, las siguientes medidas:
 1. Reducción de la masa del vehículo para así poder disminuir el consumo de combustible.
 2. Alargamiento de la vida útil del vehículo como consecuencia del incremento de su precio de costo.
 3. Mantenimiento o incremento del grado de seguridad exigido por los usuarios.

Existen tres medidas que tienen una clara relación con los problemas de la corrosión metálica. La disminución de la masa, es decir del espesor de la chapa, exige un aumento de la resistencia a la corrosión, aumento que tiene que ser todavía mayor si queremos que se alargue la vida útil del vehículo. Además, la mayor seguridad exige una mayor fiabilidad y resistencia de los sistemas de protección sobre todo en los chasis y los elementos de control del vehículo.

En consecuencia se califica al automóvil como una de las mayores víctimas de la corrosión, lo cual no resulta sorprendente si consideramos que más del 75% de su masa es metálica, la cual destaca la incidencia que la corrosión tiene sobre la seguridad de los usuarios de los vehículos.

En la corrosión de los automóviles se suele distinguir la corrosión denominada cosmética, de la corrosión perforante. La causa fundamental que la ocasiona es el grado de contaminación del medio ambiente, zonas marinas e industriales y también las zonas frías en las que es frecuente el empleo de sal para producir la fusión de la nieve durante el invierno. El objetivo que se comenzó a plantear a principios de los setenta fue el de garantizar durante cinco años contra la corrosión cosmética y durante diez contra la perforante. Es el denominado objetivo 5/10. En la actualidad ya hay algunas firmas de automóviles que garantizan durante seis años contra cualquier problema de corrosión.

Protección mediante recubrimientos metálicos: el zinc

La solución a los problemas de corrosión puede ser muy variada y va desde la sustitución de los materiales metálicos por otros no metálicos, pasando por modificaciones en el diseño que impidan o no favorezcan las condiciones en las que puede producirse corrosión hasta finalmente, el empleo de materiales más resistentes a la corrosión o protegiendo los materiales convencionales con recubrimientos que lo aislen o protejan del medio corrosivo.

Una posible solución entre estas dos últimas, consiste en emplear materiales más resistentes, cuya resistencia se consigue mediante un recubrimiento protector. Uno de los casos más claros lo constituyen los recubrimientos a base de zinc que une a sus características de recubrimiento la protección catódica que ofrece el acero.

Zincrometal

El zincrometal es un prerecubrimiento de la banda de acero que conjuga las propiedades del zinc y del cromo metálicos con los habituales de las pinturas. Su aplicación ha experimentado un crecimiento espectacular sobre todo en la industria del automóvil. El proceso de aplicación se realiza en dos etapas. En la primera, tras la limpieza y desengrase de la banda, se aplica una dispersión acuosa de polvo de zinc, cromo y otros compuestos químicos exentos de resinas, que se conoce con el nombre de Dacromet.

En estas condiciones se somete la banda a un tratamiento térmico que tiene como consecuencia la formación de una película de 2-3 μm . Si el proceso termina aquí el producto se identifica con el nombre de Dacrometal.

En el 80% de sus aplicaciones este primer recubrimiento se complementa con un segundo recubrimiento denominado Zincromet, constituido por la aplicación de una imprimación rica en zinc sobre una matriz epoxi, que se finaliza con un calentamiento de la banda con lo que se forma una película de unos 10-12 μm .

El conjunto de ambos recubrimientos se conoce con el nombre de Zincrometal y consiste en un conjunto de finas partículas esféricas de zinc y cromo con un espesor aproximado de 14 μm . Las principales ventajas de este prerecubrimiento son la versatilidad de su aplicación, su resistencia a la corrosión y la facilidad con que soporta tratamientos mecánicos (estampación) y de ensamblado (soldadura) sin mengua de su calidad.

Electro galvanizado

Básicamente este proceso consiste en la obtención de un recubrimiento de zinc por reducción de las sales de este metal aplicando corriente continua. En la celda existe un ánodo de zinc que se disuelve continuamente para mantener la concentración adecuada de zinc en el baño para su depósito sobre la banda de acero que se quiere proteger.

Las ventajas fundamentales del acero así protegido son su alta conformabilidad, las elevadas características mecánicas que se exigen al acero y el acabado superficial, prácticamente exento de defectos. Su mayor problema reside en que aumenta la masa del recubrimiento y se traduce en un incremento de consumo de la energía eléctrica y una apreciable elevación en el precio de producción.

Otra forma de resolver este problema puede ser recurrir al empleo de recubrimientos protectores complementarios o al desarrollo de electrodepositos mixtos que incluyan otros metales además del zinc.

Existen varios sistemas de aplicación del recubrimiento que, por la disposición de la banda, se denominan horizontal, vertical y radial y que tienen diferentes ventajas e inconvenientes. La masa del recubrimiento que se obtiene oscila entre 7 y 50 g/m² doble cara que viene a equivaler a un espesor de 1 a 7 μm .

El electro galvanizado constituye una alternativa industrial del galvanizado. Sus aplicaciones fundamentales son los chasis, numerosos paneles, elementos de refuerzo, suelos y bajos de los vehículos, etc. También tienen importancia otros recubrimientos en caliente como el estaño, que se emplea en los tubos de escape y el emplomado, de aplicación, sobre todo en los depósitos de gasolina.

Además del galvanizado convencional ha aparecido en el mercado un número apreciable de recubrimientos base de diferentes aleaciones de zinc y distintos

procesos que modifican las características de acabado de los recubrimientos que se conocen con diferentes nombres comerciales.

Recubrimiento galvanizado convencional

El zinc es, sin duda, el metal de mayor consumo en su aplicación como protección del acero. Aproximadamente un tercio de la producción de zinc se aplica a la galvanización en caliente en los países industrializados cifra que asciende aproximadamente a los 20 millones de toneladas anuales.

Los materiales galvanizados por inmersión en caliente que se emplean en los vehículos automóviles son muy variados: accesorios, varillas, tuercas, arandelas sujetacables, etc. Los alambres se galvanizan en continuo y pueden ser trefilados no después de su galvanización. El piccerio se suele galvanizar en cestas que giran mientras están sumergidas en el baño con pequeña velocidad 10 rpm y que hacen girar a 600 rpm una vez extraída del baño para eliminar el zinc fundido y antes de sumergirse, a los pocos segundos, en un baño de agua para evitar un crecimiento indeseable de la capa aleada.

En el caso de los vehículos pesados existe una serie de elementos como parachoques, bardas laterales, bisagras exteriores, arcos, etc., que se galvanizan por los procedimientos convencionales de inmersión en zinc a 450°C, después de haber sido fabricados.

Galvanizado por ambas caras.- En la actualidad, la mayor parte del material se galvaniza por el sistema Sendzimir en el que el pretratamiento tiene lugar en un horno cuya primera parte es oxidante y cuya segunda parte es reductora. La posibilidad de dar un tratamiento térmico simultáneo permite ofrecer una gama de materiales galvanizados con distintas características mecánicas.

El recubrimiento, que hace algunos años se hacía mediante rodillos, se realiza en la actualidad mediante una pareja de toberas situadas en ambos lados de la

banda en la zona de extracción vertical, mediante las cuales se controla el escurrido y en consecuencia, la masa del recubrimiento.

Entre las principales desventajas actuales de los aceros galvanizados por inmersión en caliente, en su aplicación en la industria del automóvil, podemos señalar las elevadas características mecánicas que se están exigiendo, si bien ya hace años que se están empleando aceros de fase dual galvanizados con límites elásticos superiores a los 450 MPa. Otro de los problemas que tiene el acero galvanizado se deriva de las exigencias de facilidad de soldeo y de pintura.

Los acabados que se pueden conseguir sobre la superficie del recubrimiento son diferentes según que la cristalización del zinc durante la solidificación ocurra de un modo natural o inducido.

En el primer caso se consigue un tamaño de grano bastante grande, que se denomina "floreado" o "estrellado" y que es el que se obtiene cuando no se exige ninguna condición especial. La diferente orientación de los planos de cristalización da lugar a una distinta adherencia de la pintura y el relieve del floreado, aunque mínimo es suficiente para que la superficie de contacto del electrodo, cuando se suelda por puntos sea menor de la prevista, por lo que toda la intensidad tiene que pasar a través de una menor sección, produciendo una cierta irregularidad en la obtención de los puntos de soldadura.

Por estas razones entre otras se han desarrollado diferentes procedimientos que inducen la formación de muchos núcleos de cristalización, con lo cual el tamaño de los cristales es mínimo. El procedimiento más antiguo consiste en aplicar vapor sobrecalentado a través de las propias toberas de escurrido o a través de unas especiales sobre la banda. En los puntos de contacto se produce un sobreenfriamiento que induce la cristalización. Una variante de este procedimiento es el denominado Ultrasmooth en el que la formación de los núcleos de cristalización se logra haciendo pasar a la banda por una cámara en la que existe

vapor condensante. El número de núcleos creados es tan elevado que el acabado está libre de floreado, lo cual no es extraño si tenemos en cuenta que simultáneamente se produce un gran enfriamiento de la banda.

El resultado es una calidad de acabado semejante a la del acero laminado en frío y unas características de soldabilidad y de pintabilidad elevadas.

Otro procedimiento para inducir la cristalización ha sido desarrollado por Heurtey y en el hace incidir transversalmente sobre la banda una suspensión de polvo de zinc que induce en los puntos de contacto la formación de núcleos de cristalización con lo que el acabado también resulta muy liso.

Además de estos acabados, cuya superficie exterior es de zinc, existe otro, denominado galvanorecocido (en inglés, galvanncling) que consiste en darle a la banda galvanizada un recocido mediante el cual se hacen crecer las capas aleadas, cuya formación se había inhibido durante el proceso de galvanización. El contenido más elevado en hierro que tiene el recubrimiento, hace que las condiciones de soldeo sean más próximas a las del acero negro que a las del galvanizado convencional y por ello, este acabado tiene una mejor aptitud al soldeo. Por otra parte se ha comprobado también que la adherencia de los recubrimientos de pintura resulta mayor sobre este acabado galvanorecocido.

Galvanizado diferencial. La introducción del sistema de escurrido mediante toberas permitió mejorar la uniformidad transversal del recubrimiento respecto al escurrido con rodillos y, además, al poder colocarse las toberas independientemente respecto al nivel del zinc fundido, se pudo conseguir que el escurrido fuera diferente sobre una cara, que sobre otra. Este tipo de acabado se denomina acabados diferenciales y admiten también floreados o no floreados y recocido de tal forma que sobre la cara de menor espesor, la capa aleada llegue hasta la superficie, mientras que la de mayor espesor el acabado sigue siendo de zinc. El interés de esta aplicación reside en la mayor aptitud al pintado de la cara

galvanorecocida, que se destina a la exposición exterior que luego va a ser pintada.

Este tipo de recubrimientos se denomina de una cara y media ya que la "media" no es ni el acabado de acero (entonces sería recubrimiento por una sola cara) ni acabado de zinc (entonces sería recubrimiento por ambas caras). De todos modos, resulta una denominación que es desafortunada y puestos a definirla sería llamarla recocido diferencial.

Galvanizado por una sola cara.- Un caso extremo del galvanizado diferencial sería aquél en el que por una cara existe recubrimiento y por la otra no. En tal caso hablamos de recubrimientos galvanizados por una sola cara.

Su obtención puede conseguirse según dos esquemas básicamente diferentes:

1. Impidiendo que durante la galvanización se produzca el recubrimiento en una de las caras.
2. Eliminando el recubrimiento obtenido en una de las dos caras.

Entre los primeros podemos citar varios modos de conseguirlo:

El proceso desarrollado por ARMCO consiste en que el rodillo se aproxima a la superficie del nivel de zinc, aproximadamente unos 6 mm, de tal forma que la banda entre el contacto con el metal fundido mediante el menisco que se forma. Un desarrollo muy importante de este procedimiento consiste en que el escurrido se realiza dentro de una cámara libre de oxígeno empleando nitrógeno de muy alta pureza. La calidad del acabado superficial es muy elevada y está exenta de poseer una buena uniformidad de recubrimiento.

Finalizado el escurrido, la banda, cuando abandona la cámara de recubrimiento, se encuentra todavía a una temperatura relativamente alta, 727 K (454°C), por lo que inmediatamente tiene lugar la formación de un ligero óxido, de color azul, sobre la parte de la banda no protegida. El decapado de este óxido se realiza en

línea mediante un decapado rápido, que no dura más de tres segundos en un baño de ácido sulfúrico al 2%. La banda se mantiene con potencial negativo y el paso de corriente es de 3.200 A/m^2 . De este modo se elimina el óxido de hierro sin alterar prácticamente la superficie de zinc. Este producto, que se conoce con el nombre de Zingrip OS, presenta unas características de pintabilidad y soldabilidad excelentes y unas propiedades mecánicas, que son las típicas de un galvanizado recocido en línea.

En Alemania, Mennesmann desarrolló también un procedimiento de recubrimiento por una sola cara fundado en el sistema de recubrimiento por rodillo. La banda que se va a recubrir pasa entre dos rodillos, estando el inferior parcialmente sumergido en el baño de zinc. El contacto tiene lugar, pues, con el zinc que es arrastrado por este rodillo sumergido. Evidentemente se produce el contacto de una sola cara de la banda tal y como se pretendía. Con objeto de conseguir una mínima formación de floreado, el contenido en plomo del baño de zinc fue extremadamente bajo y para evitar los problemas de oxidación de la cara no recubierta durante el enfriamiento, éste se realiza en atmósfera de nitrógeno. El contenido en oxígeno de la cámara donde ocurre la galvanización es inferior a 50 ppm. Cuando la banda galvanizada por un solo lado abandona la zona de enfriamiento su temperatura es inferior a 393 K (120°C). Las características superficiales de las bandas así obtenidas son excelentes. Una instalación análoga se encuentra citada en la bibliografía como un desarrollo de los Nippon Steel Corporation.

Otro procedimiento de galvanización por una sola cara, denominado IC-RM, ha sido desarrollado en el CRM de Lieja financiado por ILZRO, y consiste en hacer pasar la banda sobre un rodillo parcialmente sumergido en el baño de zinc —menos de la mitad de su diámetro— de tal modo que no puede tener contacto con

el zinc más que la cara exterior. El resto de circunstancias es semejante al de los procesos ya descritos.

También en el Japón, la Nippon Kokan ha desarrollado un proceso mediante el cual se consigue la galvanización por una sola cara y que, básicamente, podríamos describir diciendo que la parte inferior de una banda que se mueve horizontalmente se pone en contacto con el zinc que se bombea hacia arriba a través de una tobera. La forma y dimensiones de la tobera han sido objeto de numerosas modificaciones hasta lograr el diseño más adecuado, que es en forma de V. Todas las demás características de la cámara de galvanización son las habituales: atmósfera de nitrógeno con menos de 50 ppm de oxígeno, limpieza electrolítica del óxido formado sobre la cara no recubierta, etc. También se pueden conseguir diferentes acabados superficiales y características mecánicas muy distintas. Anteriormente, la Nippon Steel Corporation había desarrollado un procedimiento semejante, utilizando una bomba electromagnética para el movimiento del zinc. Los ensayos iniciados en 1978 empiezan a emplearse a escala industrial en 1981.

Dentro de este esquema de producción directa de recubrimientos por una sola cara podemos citar, por último, el desarrollado por los laboratorios Kawasaki, que emplean el mismo sistema de galvanización para dos caras, pero protegiendo una de ellas con una pasta a base de silicato sódico, borato sódico y óxido de magnesio que forma una película vítrea a su paso por el horno de recocido e impide el contacto del zinc durante su paso por el baño de metal fundido, siendo fácilmente exfoliable una vez finalizado el proceso mediante un simple doblado. Una de las características más importantes es la del mínimo espesor que se consigue sobre la cara galvanizada, que puede ser tan pequeña como 20 g/m^2 . Esto se logra por la existencia de un calentador de llama en la cara opuesta a la que se galvaniza, que, al fluidificar el zinc, facilita su escurrido.

Los acabados que se consiguen con este procedimiento pueden ser los convencionales de galvanizado o de galvanorecocado. Las características de soldadura y pintado resultan muy buenas.

La segunda serie de procedimientos de obtención de recubrimientos por una sola cara, según señalábamos más arriba, tienen su fundamento en la galvanización por ambas caras, mediante un recubrimiento diferencial y la eliminación de la cara con menor recubrimiento por distintos procedimientos.

El procedimiento NOMOGAL parte de una galvanización diferencial y aplica en línea, sobre la cara de menor espesor, una grieta que elimina el recubrimiento de zinc dejando únicamente el de aleación hierro-zinc de aproximadamente $1\ \mu\text{m}$ de espesor. Este tratamiento provoca un enfriamiento de la banda que se traduce en un acabado de cristales muy finos y apenas visibles. Evidentemente, este tratamiento apenas produce modificación en la línea, cuya capacidad de producción se mantiene inalterada. Las excelentes características de resistencia a la corrosión y su aptitud a la embutición se han traducido en un aumento de 1.800 t en 1980 a 30.000 en 1981 en la industria del automóvil.

El proceso UNIZINC parte también de la obtención de un recubrimiento diferencial, finalizado el cual se somete a la banda a un proceso de esmerilado que elimina el zinc del lado con menor espesor, dejando una cantidad mínima de aleación hierro-zinc y un acabado superficial excelente, como cabe esperar de un esmerilado que resulta muy apropiado para la superficie externa de la carrocería.

Otro procedimiento es el denominado UNIKOTE que, partiendo también de una banda con recubrimiento diferencial, realiza simultáneamente el decapado electrolítico del zinc de la cara con menor recubrimiento y su redepósito sobre la cara de recubrimiento más grueso. Para ello se hace pasar la banda entre dos electrodos conectados directamente a los rectificadores (40 V, 20.000 A). El electrodo superior se conecta al polo negativo y el inferior, al positivo. El flujo de

electrones va del cátodo a través de la solución y de la banda, al ánodo. De este modo, ocurre una reacción anódica sobre la cara de la banda situada frente al cátodo y una reacción catódica del lado situado frente al ánodo, produciéndose simultáneamente la disolución del zinc de una cara y su redeposición sobre el otro lado. Después del proceso quedan sucias ambas superficies, por lo que es necesario un enjuagado y un posterior cepillado que deja la superficie con un aspecto brillante. La cara desprovista de zinc se cepilla con abrasivo y queda limpia de cualquier residuo de zinc.

Para conseguir que la operación de disolución y depósito de zinc ocurra perfectamente, se realiza un decapado previo que facilita el depósito al eliminar la capa de óxido de zinc. Recientemente, esta operación se hace preceder de un cepillado abrasivo que ayuda a la eliminación electrolítica del zinc, creando una superficie libre de óxido.

Galvanización con diferentes composiciones

Durante muchos años, la composición de los baños de zinc permaneció bastante constante, existiendo, a veces, algunas adiciones de plomo, y, en todos los casos, una pequeña adición de aluminio, del orden de 0.1%, destinada a inhibir la formación de la capa aleada. No obstante, ya hace mucho tiempo, se había considerado la posibilidad de galvanizar materiales con composiciones muy diferentes, entre ellas con 5 y 10% de aluminio. Sin embargo, recientemente han comenzado a estudiarse los resultados de diferentes adiciones al baño en el caso de las bandas galvanizadas en continuo.

Podemos, así, citar la adición de magnesio que significó un ligero aumento en la resistencia a la corrosión; pero las variaciones más importantes que se han producido son las debidas a la galvanización en baños con el 5% de aluminio y menores adiciones de mischmetal, que constituyen la característica del proceso

Galfan, desarrollado por el CRM, y el zincalume, desarrollado inicialmente en Australia y posteriormente en los EE.UU., cuya composición tiene básicamente 55% de aluminio, 1.5% de silicio y el resto, zinc.

Estos dos recubrimientos reivindican una mayor resistencia a la corrosión y a la temperatura elevada que la que ofrece el galvanizado convencional, y se discute si la protección catódica que ofrece el galvalume-zincalume es suficiente para la mayoría de las aplicaciones o es necesario que el contenido en aluminio sea mucho menor, del orden del que se emplea en el Galfan para conseguir que no desaparezca esta característica propiedad de los recubrimientos de zinc.

Recientemente se ha dado a conocer una nueva aleación que emplea como aleante el sodio y cuyas características de resistencia a la corrosión y calidad superficial son elevadas, según sus propietarios.

Tendencias actuales y futuras

La incorporación del zinc como un elemento de protección de los vehículos ha sido una constante en los últimos años y le espera un futuro de creciente implantación.

En cuanto se refiere a los vehículos industriales se aprecia un incremento de los materiales galvanizados. Por citar sólo los más recientes, daremos cuenta aquí que H. Wellmeyer comenzó su implantación en la estructura de los camiones a principios de los 70 y los resultados han sido plenamente satisfactorios sin haber planteado ninguna exigencia de mantenimiento, lo cual contrasta con las necesidades de repintado que tuvieron las otras soluciones de protección.

Más recientemente, a partir de los 80, también Volvo está incluyendo los elementos galvanizados y, así, en la actuación, son más de 50 piezas las que son protegidas por este procedimiento.

En España también los Land-Rover de Santana han incluido numerosas piezas galvanizadas, muchas de ellas vistas, sin que ello perjudique, sino más bien caracterice, el aspecto estético del vehículo.

En todo este tipo de vehículos, a las consideraciones sobre resistencia a la corrosión se suman las de resistencia a un trato rudo que proporciona la protección catódica al acero cuando los roces o los golpes provocan el levantamiento del recubrimiento.

En cuanto se refiere a los vehículos particulares quedan ya atrás los años en los que el Silver Shadow de la Rolls-Royce presentaba como característica de calidad el empleo de materiales galvanizados para la protección contra la corrosión. Era una época que solamente los vehículos de alto nivel incorporaban estos materiales.

Hoy día esta aplicación resulta común en los vehículos más populares de marcas como: Fiat, Peugeot, Opel, Ford, etcétera.

Los primeros vehículos empezaron empleando piezas galvanizadas, que se ensamblaban siguiendo los esquemas habituales. Se trataba, pues, de una sustitución de un material por otro de mejores características. En la Tabla ^{IV.1}_{A.1} recogen los nombres de algunas de las diferentes partes que habitualmente se vienen protegiendo por galvanización en diferentes vehículos.

La experiencia actual de Renault con el Espace ha constituido un cambio evidente, cuya trascendencia es muy elevada, ya que se trata de la galvanización de una estructura fabricada con todos los problemas que pueden plantearse de distorsiones que deben ser resueltas con un buen diseño y una buena galvanización, y con lo que significa la introducción en la línea de producción de la planta de galvanización.

El proceso ocurre en ocho minutos, y el espesor del recubrimiento obtenido, alrededor de 65 μm , significa un aumento de 30 kg de zinc. A cambio se obtiene

un aumento en la rigidez del 60% en la torsión y del 20% en la flexión, que permite optimizar los espesores de chapa, ganar peso y mejorar la insonorización. Dentro de esta misma línea se encontraban vehículos como el Porsche y Alfa Romeo y, más recientemente, el Lotus, que en 1980 fue el primer vehículo en el que tuvo lugar la galvanización del chasis completo. Los resultados fueron tan satisfactorios que la garantía inicial de resistencia a la corrosión fue aumentada por los fabricantes de cinco a ocho años.

En los años inmediatos el predominio de las bandas galvanizadas por una sola cara, empleando productos electrozincados, es indiscutible y tendrá lugar, previsiblemente, a expensas del desplazamiento del zincrometal. Sin embargo, se presume que dentro de diez años puedan hacer presencia los sistemas de galvanización en caliente por una sola cara como un elemento alternativo más a la hora de la elección de los materiales. Mientras tanto, los elementos pequeños y estructurales irán ganando cada vez más en aceptación.

TABLA IX.1
Usos habituales del acero galvanizado en la industria del automóvil

Recubrimiento por dos caras		Recubrimiento por una cara		Recubrimiento por una cara+galvanorrecochado
Zn libre	Fe-Zn	Zn libre	Fe-Zn	Zn/Zn-Fe
Puertas.	Componentes y paneles interiores del suelo.	Parachoques.		Parachoques.
Capó.		Techo.		Puertas.
Maletero (recubrimiento diferencial).	Soporte motor.	Puertas.	Id.	Partes internas de las puertas.
Barra soporte motor.		Suelo.		
Barra suspensión trasera.		Capó.		
Horquilla del radiador.				

CAPITULO X

RECUBRIMIENTOS GIC EN CONTINUO

Consideraciones de mercado

Desde mediados de los años setenta, el mercado de la lámina delgada de acero ha evolucionado mucho: hoy, los usuarios tradicionales de lámina ya no están satisfechos con el acero sin recubrimiento para la fabricación de carrocerías de automóviles y para aparatos domésticos. Durante los últimos 20 años, los siguientes acontecimientos y exigencias puestas a la industria automotriz, han causado una gran demanda de lámina delgada de acero con tratamiento superficial.

Canadian Anti-Corrosion Code

En 1978, el gobierno canadiense impone a los productores de automóviles una garantía de ausencia de perforación durante 5 años como mínimo y de ausencia de corrosión cosmética durante un mínimo de 1.5 años. Esta ley se aplicó también en los EE.UU. y fue el origen del desarrollo del llamado Zincrometal, un acero cromatado al zinc y recubierto de un <<primer>> de alto contenido en Zn.

Al final de los años 80, las exigencias en los EE. UU. pasan a 10 años sin perforación y 5 años sin corrosión cosmética. Se inicia el desarrollo de las capas de aleaciones de Zn, como el <<galvannealed>>.

La evolución hacia el uso de acero recubierto con una capa delgada anticorrosiva de zinc, aleaciones de zinc-aluminio es muy pronunciada. En la tabla 1, se presentan los tipos de acero utilizados en la industria automotriz para la construcción de las carrocerías. En los años 70, un 15% de la lámina producida se recubría; desde 1975 se aplica lámina galvanizada en caliente para partes

externas de la carrocería. Desde entonces, el mercado ha crecido en forma exponencial; en la actualidad, casi ya no hay ninguna marca de automóvil que no garantice una resistencia a la corrosión mínima de la carrocería.

La ocurrencia de herrumbre superficial, de ampollas y de perforaciones en las carrocerías de autos con una edad de 5 a 6 años ha disminuido mucho. En parte se debe esto a mejores diseños, a nuevos tipos de pretratamiento de las láminas y de nuevos tipos de lacas, pero el efecto principal es la introducción de acero con recubrimiento anticorrosivo.

La lámina de acero recubierta tiene varias ventajas en comparación con productos alternativos: bajo costo, gran oferta, eficiencia comprobada, facilidad de reciclaje. Al principio de los años 90, un 40% del acero laminado en frío se vendía con recubrimiento. En la actualidad, nos acercamos al 50% del cual un 20% es por galvanizado en caliente (*hot dip*). En la actualidad, la penetración al mercado de la lámina recubierta reduce el mercado de la lámina no recubierta, pero la primera tiene mayor valor añadido y es un producto de gran interés comercial.

Las propiedades de lámina recubierta son diferentes de las de la lámina sin recubrir. Por ejemplo, para partes externas de la carrocería, la lámina de acero galvanizada en caliente por un lado tiene un excelente resistencia a la corrosión del interior hacia el exterior (lado galvanizado en el interior), mientras que el lado sin recubrimiento asegura una buena apariencia de la laca.

Lámina de acero galvanizada en caliente

La lámina de acero galvanizada en caliente ha sido el primer producto con tratamiento superficial utilizado en la producción de las carrocerías. En los años 60, se utilizaba lámina con espesores elevados en Zn para las partes invisibles de la carrocería muy expuestas a la corrosión. Actualmente, se utiliza este tipo de

lámina sobre todo para muchas partes invisibles de una carrocería. Se produce lámina galvanizada por un solo lado o por ambos lados.

La microestructura de la capa consiste de una capa uniforme de Zn, unida al sustrato por medio de una película delgada de productos intermetálicos. La resistencia a la corrosión de acero galvanizado en caliente aumenta con el espesor de la capa.

La deformidad del recubrimiento es buena debido a la ductilidad del zinc puro. La soldabilidad del producto es inferior a la del acero sin recubrir, debido al bajo punto de fusión del zinc y a la mayor reactividad con los electrodos de soldadura de punto.

Acero Galvannealed

El acero galvannealed es una lámina de acero galvanizado en caliente, la cual se trata térmicamente para que la capa de zinc puro reaccione con el sustrato para formar una aleación Zn-Fe. El recocido *galvannealed* se hace normalmente en la línea continua al salir del baño de zinc líquido.

Este material, originalmente desarrollado para las partes invisibles, se utiliza cada vez más en parte visibles de la carrocería. La superficie de una lámina galvannealed es mate y no aparecen cristales de Zn. La capa se compone de una serie de compuestos intermetálicos Zn-Fe, con una fase frágil Γ en la interfase con el sustrato de acero. Tiene un aspecto rugoso y poroso, lo que promueve mucho la adhesión de las pinturas y lacas.

En cuanto a la resistencia a la corrosión, esta aumenta con el espesor de la capa y es ligeramente mayor que la del zinc puro. Las desventajas del galvannealed son la apariencia superficial de menor calidad después del recubrimiento tipo electrocoating y el powdering durante el proceso de embutición profunda.

Línea de galvanizado en caliente

Fundamentos

La empresa SEGAL tiene en Bélgica una línea de galvanizado en caliente muy moderna. La empresa empezó a producir en julio de 1986, es miembro del grupo ARBED y tiene una capacidad de 260 000 ton/año. La tecnología es parcialmente de la Nippon Steel de Japón.

En el proceso continuo de galvanizado en caliente, se introduce la lámina de acero en baño de zinc líquido. Mientras que en el proceso Cook-Norteman no se precalienta la lámina, en la línea de SEGAL se precaliente el acero hasta la temperatura del baño líquido. Por otro lado, en el proceso Sendzimir, se calienta la lámina, pero el primer horno tiene una atmósfera oxidante para eliminar las impurezas superficiales, mientras que el segundo horno es reductor para eliminar los óxidos formados.

El galvanizado en caliente por un solo lado se hace en SEGAL por un proceso de aplicación, no de inmersión.

Concepto de una línea tipo SEGAL

En líneas de galvanizado electrolítico, el tratamiento se hace sobre un producto metalúrgico terminado (después de laminación, recocido y paso de acabado) mientras que líneas del tipo SEGAL tienen una contribución muy importante en el proceso metalúrgico completo: el producto de entrada es un acero laminado en frío sin recocer (*full-hard*), el cual experimenta las acciones:

- recocido de recristalización
- galvanizado en caliente
- posiblemente galvannealing y decapado
- paso de acabado (*skin passing* o *temper rolling*)
- tratamiento posterior (engrase, cromatado, corte lateral...)

Datos técnicos de una Línea GIC típica

Zona de entrada:

- desarrollar las bobinas de acero laminado en frío (*full-hard*) con peso hasta de 30 ton. Ancho entre 750 y 1850 mm, espesores de 0.45 a 1.6 mm, cada bobina identificada por la computadora.
- cizallas para eliminar extremidades con espesor erróneo.
- máquina de soldar para unir las bobinas en una lámina <<infinita>> (agujero hecho con punzón indica la posición de la soldadura)
- sistema avanzado para desengrasar: limpieza electrolítica y mecánica con cepillos para asegurar la buena adherencia del zinc.
- torre vertical de almacenamiento con capacidad de 280 m para asegurar una velocidad constante de la lámina.

Zona central:

- Horno de recocido continuo con capacidad de 75 ton/hora y ciclo térmico función del tipo de calidad del acero; las secciones son la de precalentamiento, calentamiento profundo (máximo 859°C), enfriamiento lento, enfriamiento rápido, sobre-envejecimiento.
- galvanizado en caliente, con dos crisoles de 250 ton de aleación fundida, para poder cambiar de composición química (Al de 0.1 a 0.25% Al); mayor Al (=0.15% Al) para Zn puro en ambos lados. El contenido en Pb es siempre inferior al 0.015% para minimizar la "flor de zinc". El galvanizado en dos lados es por inmersión, el de un lado por aplicación con un rodillo. Se enfría la lámina inmediatamente después de los crisoles para evitar la aleación con Fe. Sin embargo, hay siempre una reacción Zn-Fe en la interfase.

- horno de galvannealing: inmediatamente después del galvanizado, permitiendo la formación de fases intermetálicas FeZn y una capa aleada con 8 a 13% Fe; láminas galvanizadas con puro Zn tienen un máximo de 4% Fe.
- zona de enfriamiento hasta 150°C.
- tratamiento posterior de decapado en baño de ácido sulfúrico para el lado sin recubrimiento (sólo para este tipo de lámina).
- medidor de espesor en continuo sobre todo el ancho de la lámina por medio de rayos X.

Zona de salida:

- segundo sistema de almacenamiento para asegurar la función continua y la velocidad constante.
- laminadora de acabado (<<skin-pass>>, <<temper rolling>>) para conseguir la rugosidad requerida, mejorar la planeidad de la lámina y eliminar el fenómeno de las bandas de deslizamiento Lüders.
- máquina de aplanar y estirar para obtener la forma plana requerida.
- cizallas laterales.
- instalación para cromatado de acero galvanizado por ambos lados, con el fin de evitar la formación de <<herrumbre blanca>> por variaciones de temperatura en el almacenamiento.
- línea de inspección (velocidad de línea máxima 130 m/min) para ambos lados (espejos).
- máquina marcadora.
- máquina para engrasado electrolítico para aplicar una capa muy delgada de aceite, con el fin de proteger el material durante el almacenamiento y facilitar la embutición profunda.
- cizallas para control de peso de las bobinas y para muestreo de laboratorio.

- enrolladoras del producto terminado.

Programa de producción

A continuación se dan los datos mecánicos de los principales productos fabricados en líneas de galvanizado en caliente, tipo SEGAL.

1. Aceros típicos para galvanizado en caliente

Tabla Λ .1
Euronorma: EN 10142

Euronorma en 10142	Propiedades mecánicas		
	R_o máx [Mpa]	R_m máx [Mpa]	A mín [96]
FeP02 G	--	500	22
FeP03 G	300	420	26
FeP05 G	260	380	30
FeP06 G	220	350	36

Tabla χ .2
Norma DIN 17162

Din 17162	Propiedades mecánicas		
	R_o mín [Mpa]	R_m [Mpa]	A mín [96]
StE250	250	330/470	19
StE280	280	370/510	18
StE320	320	400/540	17

2. Aceros para embutición profunda

Tabla η .3
Norma DIN 1623

DIN 1623	Propiedades mecánicas			
	R_o máx [Mpa]	R_m máx [Mpa]	A mín [96]	HRB máx
St12	280	410	28	65
Ust13	250	370	32	57
RRSt13	240	370	34	55
St14	210	350	38	50

V.4
Tabla A.4
Euronorma EN 10130

Euronorma en 10130		Propiedades mecánicas			
	R _e máx [Mpa]	R _m máx [Mpa]	A mín [96]	r ₉₀ ° mín	n ₉₀ ° mín
FeP01	280	270/410	28	--	--
FeP02	240	270/370	34	1.3	--
FeP04	210	270/350	38	1.6	0.18
FeP05	180	270/330	40	1.9	0.20
FeP06	180	270/350	38	(1.8)	(0.22)

Aceros galvanizados en SEGAL

Repartición en tipos de galvanizado (1991): Zn 1 lado: 12%; Zn 2 lados 70%; galvannealed 2 lados 18%.

Características generales de los productos galvanizados y *galvannealed*

Composición química de la capa de zinc

Esta composición se determina por disolución de la capa y análisis de la solución por medio de AAS (atomic absorption spectrometry) o ICP (induced coupled plasma). En la tabla siguiente se dan composiciones típicas de productos SEGAL.

	%Fe	%Al	%Pb	%Ni
Galvanizado 1	0.26 - 1.54	0.28 - 0.36	<0.006	<0.001
lado 2 lados	0.45 - 1.20	0.15 - 0.20	<0.005	<0.002
Galvannealed	9.4 - 12.9	0.16 - 0.40	<0.01	<0.02

Composición de las fases

Ya que el galvanizado en caliente se lleva a cabo a una temperatura elevada (T>420°C, punto de fusión del zinc), el coeficiente de difusión del hierro en el zinc es tan alto, que es inevitable que se presente difusión de Fe en el Zn del

recubrimiento, sobre todo si hay un recocido adicional después de la inmersión (horno de galvannealing).

Durante el galvannealing, se forman diferentes fases intermetálicas con composiciones del tipo Zn_xFe_y , en diferentes capas, con la más rica en Fe cerca de la interfase con el acero. La coulometría permite determinar la presencia de las diferentes fases y sus espesores relativos, aplicando una disolución anódica con corriente eléctrica constante. La tabla siguiente da las diferentes fases Fe-Zn posibles y sus propiedades físicas.

El diagrama Zn-Fe y algunos de sus detalles, representán esquemáticamente las diferentes capas en el galvannealed. para galvannealed. Por lo general, se considera la presencia de las fases ζ y δ como efecto positivo, debido a la resistencia a la corrosión de las fases ZnFe, mientras que la presencia de la fase Γ se considera negativa, por su finalidad y la reducción consecuente en la adhesión del recubrimiento completo.

Deformabilidad del acero galvanizado

Conceptos fundamentales

La deformidad del acero galvanizado (*galvannealed*) depende del comportamiento tanto del recubrimiento como del material de base. Varios efectos pueden perjudicar el comportamiento del material recubierto: por un lado hay efectos que influyen en el comportamiento del sustrato, como p. ej. la reducción en el coeficiente de fricción (debido a la presencia del Zn) puede llevar a fisuras, estricciones y pliegues en zonas críticas y por otro lado problemas que no afectan directamente el sustrato, consecuencia del comportamiento del recubrimiento.

De acuerdo a diversos estudios, el *powdering* se debe principalmente a esfuerzos normales de comprensión: hicimos ensayos de dureza Knoop sobre secciones metalográficas. Se debe el <<powdering>> principalmente a la presencia de la

fase Γ , el espesor de la capa y el alto contenido en Fe, llevando a la presencia de la fase δ dura y frágil en la superficie. La fase η es blanda y su presencia es favorable, de modo que un recubrimiento óptimo contendría la fase ζ , pero no la fase Γ .

Conceptos metalúrgicos

La deformabilidad del *galvannealed* es más compleja que la del galvanizado: sobre todo la elevada dureza de la fase Γ causa problemas de fragilidad en la zona de adhesión. La adición de 0.2% de Al al baño de Zn líquido sirve para formar una capa intermetálica de Fe-Al-Zn sobre el sustrato de acero.

Según estudios de literatura e investigación en la Universidad de Gante, la adición de Al al Baño de zinc asegura la creación de una <<capa de inhibición>> entre los aceros convencionales y el Zn, evitando así la formación de la fase Γ , dura y frágil. Sin embargo, para aceros IF (libres de intersticiales) el efecto es diferente: los límites de grano (LG) del sustrato son muy limpios y el Zn de la capa de inhibición y del baño líquido tiende a difundir hacia estos límites, causando una <<explosión>>, llamada *outburst* de Zn y la fisuración de la capa Fe-Zn-Al, el espacio entre los límites de grano se llena de zinc y se forman primero la fase Γ y luego la fase δ , lo que es desfavorable para la resistencia al *powdering*.

Un remedio a este problema es la adición de más Al al baño líquido, con el fin de obtener una capa de inhibición de mayor espesor.

El tamaño de grano de zinc es importante: granos gruesos son visibles a través de los recubrimientos de pintura y causan fisuras y flaking (por la estructura hexagonal del zinc y sus sistemas de deslizamiento), mientras que granos finos dan un recubrimiento óptimo. Esto se logra por la reducción del contenido de plomo en el baño de Zn.

Ensayos de deformabilidad

Los ensayos clásicos de deformabilidad de acero recubierto son del tipo flexión, posiblemente alternada. Sin embargo, estos ensayos son uniaxiales, mientras que en la práctica del conformado de láminas se encuentran varias combinaciones de esfuerzos y deformaciones.

A continuación, se da una breve descripción de unos ensayos de deformidad.

Ensayo LDR: Limiting Drawing Ratio

Se produce una copa con cierto diámetro a partir de un disco de lámina con determinado diámetro. En función de la presión sobre el anillo sujetador, pueden aparecer pliegues o fisuras en la pieza, excepto en la zona de trabajo, la cual se reduce cuando aumenta la fracción de embutición. El valor límite de DR es el factor LDR. Obviamente, este ensayo tiene muchos parámetros de influencia, como velocidad de embutición, lubricación, rugosidad de la lámina... En la práctica, es importante definir claramente las condiciones de prueba.

Ensayo del tipo <<Flat Die>> (FD)

En el ensayo FD se jala una muestra plana entre dos mordazas planas. Conociendo las fuerzas sobre las mordazas y para jalar la muestra, se calcula el coeficiente de fricción. Sin embargo, los resultados obtenidos por medio de este tipo de prueba son siempre muy reducibles.

Pruebas de tracción convencionales

Se llevan a cabo pruebas de tracción con alargamientos de 2, 5, 10 y 20% en dirección longitudinal, transversal y oblicua, luego se examina la superficie con el MEB. Las fisuras se encuentran perpendiculares a la dirección de la tracción, pero su anchura es variable.

Prueba de pérdida de adhesión por Draw Bead Simulator

Se trata aquí de un proceso de flexión. Se determinan las dimensiones de las fisuras y las fuerzas aplicadas. La prueba en flexión en U se usa para determinar la pérdida de peso en condiciones similares al ensayo <<cupstest>>.

Tratamientos superficiales

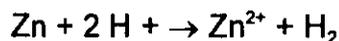
Después del galvanizado y/o galvannealing se aplican tratamientos superficiales adicionales por razones de estética (brillo, color...) y de protección contra la corrosión.

Capas de conversión

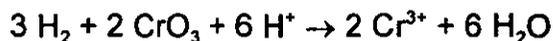
Se trata de recubrimientos que se forman por medio de una reacción química entre un medio y la capa superficial del metal, formándose una capa insoluble en agua, con buena adherencia y sin conductividad eléctrica. Además, las capas favorecen la adherencia de las pinturas y lacas.

Hay dos procesos muy importantes para el acero galvanizado: el cromatado y el fosfatado. A veces se llevan a cabo en la misma línea de galvanizado en continuo. Para el cromatado se utilizan soluciones ácidas con Cr (VI) para provocar las siguientes reacciones:

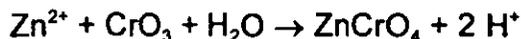
- decapado de la capa de zinc.



- oxidación del hidrógeno y aceleración de la reacción por el ácido crómico:



- formación de la capa de cromatos:



El proceso puede ser por rociado o inmersión (*rinse chromating*) o por medio de rollos (*no rinse chromating*). El recubrimiento puede ser incoloro, amarillo o de color verde aceituna en función de su espesor y de la composición de la solución.

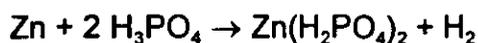
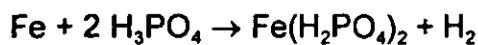
En cuanto al fosfatado, se distinguen la fosfatación y la prefosfatación. La primera es típica en las líneas de tratamiento de carrocerías en la industria automotriz y tarda varios minutos. La segunda es generalmente un tratamiento en la línea de galvanizado y es de unos segundos como tratamiento final o preparatorio antes del coilcoating. También en este caso existen las técnicas del rocío y de la inmersión.

La secuencia de pasos para la fosfatación es: desengrase, enjuague, activado, fosfatado, enjuague, pasivado, enjuague. La fosfatación se aplica en la actualidad casi únicamente sobre recubrimientos de Zn.

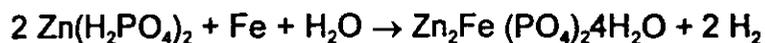
La presencia de fluoruros es muy importante en los baños modernos para fosfatación para eliminar los productos de reacción con el aluminio presente como impureza en la capa galvanizada (segregación de Al_2O_3 en la superficie).

Las principales reacciones del fosfatado son las siguientes:

- inicio:



- propagación-cristalización:



(fosfilita, sobre un sustrato de Fe)

De acuerdo a las fuentes de la literatura, la fosfofilita es muy favorable para la adherencia de la pintura y resistencia a la corrosión, debido a la resistencia a los medios alcalinos. Se determina la fracción de fosfofilita por difracción de rayos X.

Sistemas de pintura

"Primer" electroforético

La tecnología más avanzada es el depósito catódico electroforético de los primers (<<E-coating>>, Kathodisch Electro-Tauch Lackieren>>), con la cual es posible asegurar un espesor homogéneo inclusive en zonas de acceso difícil. Los primers son a base de resinas epóxicas mezclados con un agente endurecedor (diisocianato) para curarse durante el cocido a unos 170°C.

Durante el proceso de electroforesis catódico, pueden formarse pequeños cráteres sobre una superficie rica en zinc, en función de la tensión eléctrica aplicada durante el proceso.

Sistemas *topcoat*

Es usual aplicar varias capas de pinturas: un <<primer>> para la adherencia al substrato, un *sealer* o *filler* como capa intermedia entre primer y *topcoat* y finalmente el *topcoat* o *finish* que determina el aspecto exterior del recubrimiento. Los espesores totales son del orden de 100µm.

OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES.

- 1.- El galvanizado por inmersión en caliente (GIC) es económicamente atractivo, además de producir un recubrimiento de buen aspecto y resistencia a la corrosión en medios no muy agresivos.
- 2.- Resulta determinante en la adherencia del recubrimiento y su calidad el llevar a cabo un proceso de limpieza y preparación de la superficie muy cuidadoso.
- 3.- a) Es de suma importancia analizar la relación de la geometría con la posibilidad de recubrir elementos, en la que es importante saber dimensiones, formas etc, para su posible cálculo, teniendo cierta limitante por el tamaño del crisol principalmente en donde se lleva a cabo el proceso, así como algunas otras variantes.
b) El efecto que se presenta en piezas soldadas que son sometidas al proceso GIC. Debido a que las piezas deben ser soldadas antes de la galvanización, como por ejemplo la soldadura eléctrica por arco con electrodos revestidos deja sobre el cordón de soldadura escorias que son solubles, en los ácidos de decapado por lo que deben ser eliminados antes de entrar en el proceso, Por ello son más recomendables los procedimientos por soldadura que no produzcan escorias tales como MIG, TIG o soldeo bajo CO₂.
- 4.- Prácticamente todos los aceros y fundiciones se pueden galvanizar, aunque la presencia de ciertos elementos aleantes como el Si (silicio) y el tipo de proceso empleado para fabricar el acero (efervesciente o calmado) puede dificultar su realización.
- 5.- Efecto de diversas adiciones al baño, como es el caso del emplomado, estañado o aluminizado de acuerdo a necesidades específicas en cada caso.
- 6.- La etapa de secado es de vital importancia en la galvanización, ya que permite eliminar la existencia de agua que se procesa y que produciría proyecciones de zinc fundido por vaporización súbita del agua. Pudiendo haber peligro en los alrededores ya que puede llegar a hacerlo con violencia explosiva.
- 7.- El empleo de sales y adecuada utilización de ellas permite evitar problemas de oxidación del material a recubrir y colabora por lo tanto a una mejor adherencia del recubrimiento.
- 8.- Es muy amplia la variedad de aplicaciones en lo que desde hace mucho tiempo se ha usado el GIC. Parte importante de la industria automotriz y de la construcción como usuarios más relevantes.
- 9.- Se ha determinado que un mayor espesor de capa permite una mayor duración.
- 10.- Entre las ventajas relevantes del uso del recubrimiento de zinc por inmersión en caliente están:

- a) La proporción relativamente lenta de corrosión del zinc en comparación al hierro.
- b) La protección electrolítica que da al acero base, cuando la capa se daña.
- c) La durabilidad y propiedades ante el desgaste de la capa de zinc, así como la aleación de la capa intermetálica hierro-zinc.
- d) La relativa facilidad y bajo costo de aplicación de pintura sobre el zinc, cuando es necesario prolongar o dar mantenimiento a la estructura o elementos en uso, siendo esta después de 15 o 25 años en industriales, rurales y ligeras.

11.- Otro de los aspectos que se ha podido encontrar a lo largo del presente trabajo es la muy escasa bibliografía en castellano, principalmente en México y ello ha sido el eje motivador de la realización de esta tesis.

12.- Resulta de primordial importancia el desarrollo de mejores procesos de galvanizado en nuestro país, que le incorpore nuevos desarrollos y avances en virtud de que México se encuentra entre los principales productores de zinc en el mundo.

13.- Entre los desarrollos recientes en el campo del GIC conviene destacar la realización de un recocido (galvannecling) que mejora la adherencia del recubrimiento y la realización del proceso de manera continúa, así como la adición de Al (aluminio), como una opción de mayor costo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

SISTIAGA MA JOSE EL ENSAYO DE LOS MATERIALES GALVANIZADOS
ARTICULO PUBLICADO EN LA REVISTA DEL CENTRO NACIONAL DE
INVESTIGACIONES METALURGICAS MADRID ESPAÑA 1985.

VAZQUEZ.J.ALFONSO Dr EN QUIMICA INDUSTRIAL ESTUDIO EN UNA LINEA DE
GALVANIZACION PRIMER CONGRESO NACIONAL DE CORROSION Y PROTECCION
MADRID ESPAÑA 1984.

SISTIAGA Ma JOSE MATERIALES PARA GALVANIZACION EN CALIENTE
PUBLICADO EN EL VOLUMEN 5 No 2 REVISTA METALURGICA MADRID ESPAÑA
MAYO JUNI 1984.

VAZQUEZ.J.ALFONSO EL DESENGRASE DE LAS SUPERFICIES METALICAS EN LA
GALVANIZACION EN CALIENTE PUBLICADO EN EL VOLUMEN 10 No 3 DE LA
REVISTA METALURGICA MADRID ESPAÑA .

SEPARATA DE REVISTA DE METALURGIA CENTRO DE INVESTIGACIONES
METALURGICAS NACIONALES BARCELONA ESPAÑA NOVIEMBRE 1982.

R.SOUSKE, LA GALVANISATION A CHAUD, ED. DUNOD, PARIS 1960.

P.PERROT,J.FOCTY J,Y DAUPHIN, 15th Int CONF. ON DIP GALV EGGA RIOMA 1988.

SEBISTY Y DHPALMER 7th INT CONF ON HOT DIP GALV LONDRES 1967

SANDELIN RW, WIRE Y WIRE PROD 1960.