



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LOS
TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y LAMINACIÓN EN
RECUBRIMIENTOS DE ALUMINIO SOBRE
ACERO SAE 1018**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A N:

**JESÚS MARTÍN ESCOBAR LINARES
ADDIEL ELESBAN ROMERO GARCIA**



DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ JAVIER CERVANTES CABELLO

CD. UNIVERSITARIA

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



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

Gracias a DIOS por darme la oportunidad de vivir y por bendecirme siempre para terminar una licenciatura.

Gracias a mis padres Isaúl y Gloria, a quienes desde el inicio de mi vida me llevaron por un buen camino, y aunque es una forma mínima de agradecer por todo su esfuerzo y dedicación, sólo quiero que sepan que todos mis logros son sus logros.

A mis hermanos también les agradezco por el apoyo que me brindaron durante todos mis estudios y aún en los momentos difíciles, ellos supieron como motivarme para seguir adelante.

Agradezco también a los que me apoyaron y confiaron en mí para lograr este objetivo, gracias a todos mis familiares, amigos y a la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la Facultad de Ingeniería por la oportunidad, de estudiar la carrera de ingeniería mecánica.

JESÚS MARTÍN ESCOBAR LINARES

Agradecimientos

Gracias a Dios

Por permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi vida y lograr otra meta más en mi vida.

Gracias a mis padres Catalina y Pablo

Por su cariño, comprensión y apoyo sin condiciones ni medida. Gracias por guiarme sobre el camino de la educación. Gracias por haberme enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.

Gracias a mis Hermanos

Por siempre estar a mi lado y brindarme todo su apoyo en los momentos más difíciles de mi vida.

Gracias a mis profesores a quienes les debo gran parte de mis conocimientos, gracias a su paciencia y enseñanza en especial a mi director de tesis Dr. Javier Cervantes Cabello por su gran apoyo y dirección, y finalmente un eterno agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por brindarme la oportunidad, de estudiar la carrera de ingeniería mecánica.

ADDIEL ELESBAN ROMERO GARCÍA

AGRADECIMIENTO

Damos un especial y sincero agradecimiento al Ingeniero Miguel Ángel Hernández Alcántara, por su generosidad al brindarnos la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia profesional en un marco de confianza, afecto y amistad, fundamentales para la concreción de este trabajo.

Gracias por todo su esfuerzo, dedicación, paciencia, motivación y por sus acertados aportes durante el desarrollo de esta investigación.

ADDIEL Y JESÚS

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	II
I. Técnicas de recubrimientos superficiales.....	1
<i>I.1 Definición de recubrimiento metálico.....</i>	<i>1</i>
<i>I.2 Recubrimientos por electrodeposición</i>	<i>2</i>
<i>I.3 Recubrimientos por conversión.....</i>	<i>6</i>
<i>I.4 Recubrimiento por deposición química a partir de la fase vapor (CVD).....</i>	<i>13</i>
<i>I.5 Recubrimiento por deposición física a partir de la fase vapor (PVD).....</i>	<i>17</i>
<i>I.6 Recubrimientos por proyección térmica.....</i>	<i>21</i>
II. Recubrimientos por inmersión en caliente.....	27
<i>II.1 Recubrimientos de aluminio por inmersión en caliente.....</i>	<i>27</i>
<i>II.2 Técnica de inmersión en caliente para aluminizado.....</i>	<i>31</i>
III. Desarrollo experimental y obtención de resultados.....	39
<i>III.1 Obtención de recubrimientos.....</i>	<i>39</i>
<i>III.2 Pruebas de tratamiento térmico.....</i>	<i>48</i>
<i>III.3 Pruebas de laminación.....</i>	<i>50</i>
IV. Análisis de resultados.....	52
V. Conclusiones y Recomendaciones	70
<i>V.1 Recomendaciones.....</i>	<i>72</i>
BIBLIOGRAFIA.....	73

INTRODUCCIÓN

Los metales ferrosos son muy susceptibles a la corrosión en cualquier tipo de atmósfera en el que se encuentren, razón por la cual, es necesario desarrollar alternativas que aumenten la resistencia a la corrosión de estos metales.

Los recubrimientos metálicos, constituyen una de estas alternativas, siendo el proceso de recubrimiento por inmersión en caliente uno de los más empleados por su facilidad de aplicación, su costo relativamente bajo y por las excelentes características que presenta. Cabe destacar que este método de aplicación solo es empleado en metales de bajo punto de fusión, como el zinc, estaño, plomo y aluminio, debido a que estos no provocan cambios térmicos en el metal base.

En el capítulo I, se enuncian los principios que rigen los recubrimientos metálicos, los métodos de aplicación más comunes y los parámetros a seguir para obtener recubrimientos de buena calidad.

En el capítulo II se describe el proceso de inmersión en caliente empleando aluminio como metal de recubrimiento, las variables que tienen influencia sobre sus características, aplicaciones, ventajas y desventajas frente a otro tipo de recubrimientos aplicado por inmersión en caliente, así como tratamientos posteriores que podrían desarrollarse.

El capítulo III se describe el proceso desarrollado para la generación de los recubrimientos, así como los procesos a las que fueron sometidas las probetas obtenidas, para establecer los cambios que se presentan en sus distintas capas (sustrato, intermetálico y recubrimiento).

El capítulo IV, consiste en el análisis de los resultados obtenidos en el capítulo anterior; aquí se exponen mediante imágenes metalográficas los cambios que se obtuvieron después de someter las probetas recubiertas a los procesos de tratamiento térmico y de laminación.

Finalmente se concluye sobre los beneficios que se han obtenido con base a los resultados alcanzados y a las observaciones realizadas durante el ejercicio de esta experimentación; se presentan recomendaciones que ayudaran a mejorar y facilitar la práctica del proceso de aluminizado por inmersión en caliente.

CAPÍTULO I

TÉCNICAS DE RECUBRIMIENTOS METÁLICOS

I.1 DEFINICIÓN DE RECUBRIMIENTO METÁLICO

Un recubrimiento metálico puede ser definido como "una región superficial de un material con propiedades diferentes a las del material base", lo cual se ejemplifica en la figura 1.1.

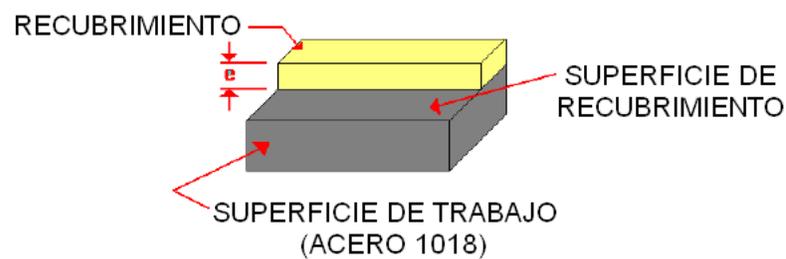


Figura. 1.1 Vista del corte de un recubrimiento de espesor "e" en una superficie de sustrato.

Básicamente los objetivos del empleo de los recubrimientos son reemplazar, modificar o lubricar superficies del sustrato metálico. Por lo general las propiedades del material recubierto vendrán determinadas por las del material base (sustrato), mientras que el recubrimiento sólo tendrá influencia sobre las propiedades de la superficie, algunas de estas propiedades son:

- Mejorar el aspecto estético del metal base.
- Proporcionar protección contra la corrosión al metal base.

- Optimizar la superficie para mayor resistencia al desgaste y a la fricción.
- Reconstruir las superficies gastadas o erosionadas.
- Mejorar la conductividad eléctrica.
- Aumentar la resistencia térmica.

Los recubrimientos metálicos no ferrosos tienen especial aplicación en la protección de otros metales, especialmente en acero. La combinación de un metal base resistente mecánicamente y un recubrimiento resistente a la corrosión forma un material de gran importancia en la industria. A continuación se mencionan los procedimientos más importantes para recubrir el acero.

I.2 RECUBRIMIENTOS POR ELECTRODEPOSICIÓN

La deposición electrolítica provee el material metálico no ferroso que se adhiere perfectamente sobre un sustrato presentando una serie de propiedades mecánicas y químicas. El depósito se lleva a cabo mediante la reducción de los correspondientes iones metálicos realizados mediante la aportación de energía eléctrica.

Los componentes básicos de este proceso son:

- a) **Un baño electrolítico;** que actúa como conductor iónico y contiene una sal conductora, compuesta por el metal a depositar en forma soluble y otros aditivos con funciones específicas.

- b) **El cátodo a recubrir;** que constituye el metal base.
- c) **El ánodo;** conductor electrolytico que puede ser inerte o no.
- d) **Una fuente de corriente directa;** controlable en voltaje e intensidad.

En la figura 1.2 esquematiza de forma general de una instalación de deposición electrolytica.

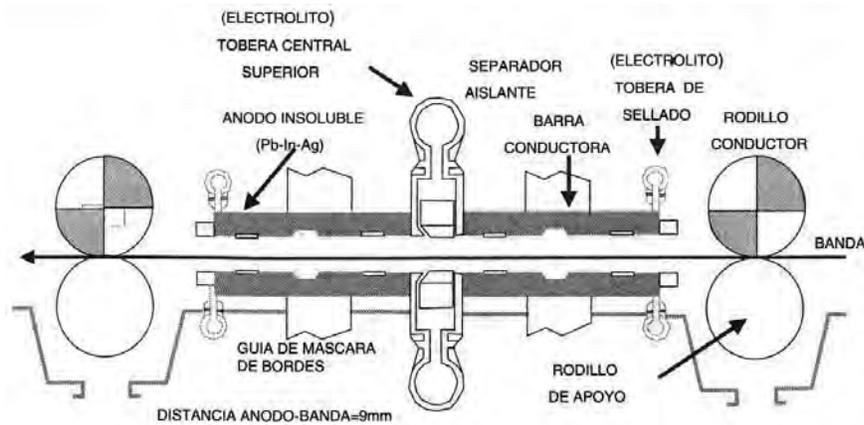


Figura. 1.2 Esquema de una instalación de deposición electrolytica [1]

El comportamiento de los ánodos es fundamental para el buen funcionamiento de un proceso de electrodeposición. En lo posible, suelen utilizarse ánodos inertes que, por oxidación, dan lugar a los cationes del metal a depositar manteniendo su concentración constante. Para obtener una buena respuesta, el proceso de disolución del metal debe localizarse en el intervalo de potenciales de la zona activa de la correspondiente curva de polarización, debiendo distinguir el desplazamiento hacia la zona de pasivación.

Los ánodos deben diseñarse para producir un mínimo de productos de oxidación indeseables. En ciertos casos, ya sea por imposibilidad de uso del proceso de oxidación del metal o,

simplemente, por presentar mejores prestaciones, se utilizan ánodos inertes, como el titanio y acero inoxidable, en los que se producen las reacciones anódicas.

El baño electrolítico, está compuesto por un conjunto de componentes químicos que se mencionan a continuación:

- a) **Electrólito:** Está compuesto de elevadas concentraciones de iones para asegurar la conductividad del baño y regular el pH, imprescindible en aquellos procesos en los que se produce oxígeno y/o hidrógeno en los electrodos.
- b) **Los iones metálicos:** El metal a depositar está presente en la disolución como catión simple, o en forma complejada, en concentraciones suficientemente elevadas para asegurar un adecuado paso de corriente.
- c) **Agentes complejantes:** El uso de complejantes favorece al desplazamiento catódico de los potenciales de deposición y ayuda a prevenir posibles reacciones entre el catión metálico y el metal del sustrato.
- d) **Aditivos orgánicos:** Se introducen una amplia gama de compuestos orgánicos en bajas concentraciones para modificar la estructura, morfología y las propiedades del depósito.

La figura 1.3 muestra el esquema de disposición experimental para la electrodeposición.

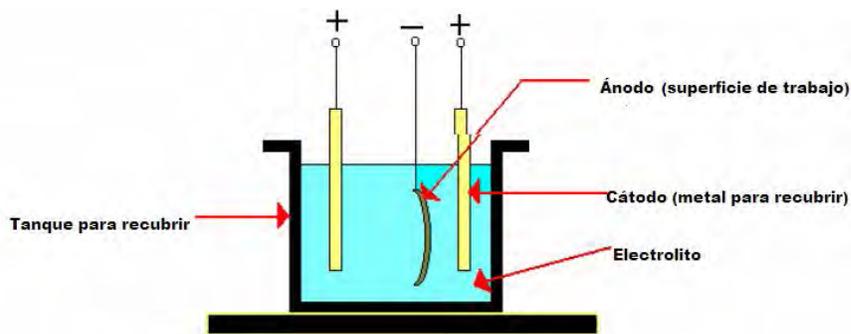


FIGURA 1.3 Esquema experimental para la electrodeposición.

El cambio químico que se produce en la cuba electrolítica es la suma de procesos que tienen lugar en los electrodos: oxidación en el ánodo (-) y reducción en el cátodo (+). Así se forman óxidos, fosfatos, cromátos, etc., que protegen posteriormente a los metales de la corrosión.

Los procesos de electrodeposición determinan la formación de una nueva fase sobre la superficie del sustrato hasta alcanzar el espesor requerido.

La capa de recubrimiento obtenida, a menudo presenta un aspecto irregular. En algunos casos esta irregularidad se aprovecha para facilitar el anclaje superficial de lubricantes, colorantes y de otros sistemas de protección como recubrimientos.

La calidad de un recubrimiento electrolítico depende del conjunto de variables relacionadas con el baño electrolítico, los parámetros eléctricos del proceso, la naturaleza del metal, el tipo de electrolito y de las condiciones de trabajo tales como concentración, pH y temperatura del electrolito, voltaje, densidad de corriente, etc.

Los parámetros más importantes se describen a continuación:

- **La diferencia de potencial:** La diferencia de potencial entre los electrodos debe producir las reacciones de óxido-reducción en los aniones metálicos, haciendo circular la densidad de corriente desde el ánodo hacia el cátodo.
- **La intensidad de corriente:** La intensidad de corriente registrada indica que los procesos de reducción y deposición, se están produciendo con una velocidad de deposición de masa por unidad de superficie.
- **Concentración del electrolito:** La concentración del electrolito más conveniente es la que presenta menos resistencia óhmica al paso de corriente eléctrica.
- **Temperatura del baño:** El aumento de la temperatura del baño implica un aumento de la conductividad iónica. La densidad de corriente permanece constante en la cuba sólo cuando en el baño existe una agitación mínima del electrolito y un aumento del brillo del recubrimiento, pero también se produce un aumento de la disolución anódica, generándose porosidad muy acusada en el recubrimiento, además de disminución de la resistencia por abrasión.
- **Tiempo de duración del proceso:** El espesor en los recubrimientos depende del tiempo de duración del tratamiento, utilizando densidades de corriente convencionales.

I.3 RECUBRIMIENTOS POR CONVERSIÓN

Los recubrimientos obtenidos por conversión, consisten en que los elementos de una superficie al reaccionar con la disolución que circunda a dicha superficie, formarán óxidos que

pasivan la superficie metálica, es decir, se generan reacciones químicas en la superficie por la interacción de ésta y el ambiente circundante formándose compuestos que inhiben en cierto grado la reacción del material con el ambiente. Dicha pasivación se da naturalmente en metales como el aluminio y el cromo, ya que éstos al estar en contacto con el aire del ambiente y por ende con el oxígeno, reaccionan, dicha reacción se da entre los átomos del sustrato metálico y el oxígeno que formarán óxidos de aluminio y de cromo, los cuales son resistentes al ataque ambiental en mayor grado que el elemento sin reaccionar.

ANODIZADO

El anodizado es un recubrimiento metálico por conversión, que consiste en la formación de una capa de óxido, que recubre una superficie metálica después de haber conectado el metal al ánodo de una cuba electrolítica, dentro de una solución iónica adecuada.

El anodizado del aluminio es un método electrolítico para convertir el aluminio de la superficie en óxido de aluminio, Al_2O_3 . El proceso electrolítico es similar al proceso de electrodeposición con la variante de que en éste el aluminio actúa de ánodo en la celda de electrolisis. Se produce, por tanto, la reacción de oxidación sobre el aluminio y provoca la formación de capas de óxido de aluminio más gruesas sobre la superficie del metal. Esta capa de óxido, llamada capa anódica o anodizada, se forma a expensas del mismo metal.

Varios electrolitos son usados para producir la oxidación del metal. Los más comunes son el ácido sulfúrico H_2SO_4 , y ácido crómico, HCrO_3 , aunque con diversas concentraciones que determinan procesos diferenciados.

La estructura y características de la capa anódica pueden modificarse en función de diferentes parámetros:

- Naturaleza del electrolito
- Composición.
- Temperatura del electrolito.
- Tiempo de tratamiento.
- Potencial de aplicación

El mecanismo de la oxidación anódica es complejo. Por estudios de microscopía electrónica se ha observado que la película de anodizado está formada por 2 capas. Una capa interna fina, densa y dieléctricamente compacta, llamada capa barrera o capa dieléctrica, que corresponde entre 0.1-2% del espesor total del film anódico. Su espesor depende de la composición del electrolito y de las condiciones de trabajo: voltaje, tiempo, temperatura, etc. La figura 1.4 muestra la constitución de la capa de anodizado que describimos.

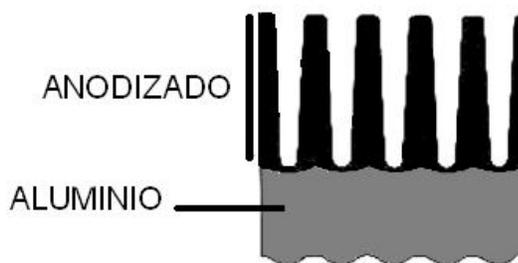


Figura 1.4. Sección esquemática de la capa barrera. [1]

Esta capa barrera se forma en los primeros minutos del proceso de anodizado a una elevada tensión. Su espesor varía directamente con el potencial de trabajo e inversamente con la velocidad de disolución de óxido en el electrolito. Esta capa barrera no es porosa y conduce la

corriente a causa de su delgadez y los fallos de su microestructura, sobre la capa barrera va formándose una capa porosa o capa externa, observándose que el punto de crecimiento tiene lugar en la parte inferior de los poros, siendo el ion aluminio el que emigra a través de la capa barrera. Los poros que se van formando son en forma de celdillas paralelas y normales a la superficie del metal.

La porosidad de la capa exterior, así como su espesor, varían con la velocidad de disolución por parte del electrolito y con la velocidad de crecimiento en el proceso de oxidación, dependiendo ambos factores del tipo de electrolito y condiciones de trabajo.

El número de poros y su volumen dependen en gran medida del voltaje de formación y el tipo de electrolito, como los poros son siempre un camino más fácil para los procesos corrosivos, la completa protección anódica requiere la eliminación de los poros. En el caso del aluminio se logra en la operación del sellado, que consiste básicamente en la hidratación de la alúmina por inmersión en agua caliente.

Caracterización de la capa anódica

a) Apariencia externa: Debe ser continua en color y grano. Discontinuidades como rayas o manchas representan defectos a efectos decorativos.

b) Resistencia a la corrosión: Se ensaya con la cámara de niebla salina, habitualmente 336 horas y se observan las picaduras de corrosión.

c) Resistencia al desgaste: Se ensaya con un ciclo abrasivo midiendo la pérdida de peso bajo condiciones de abrasión.

d) **Espesor de la capa de óxido:** Se determina bien por métodos de observación al microscopio por una sección de perfil de capa, o también por ensayos no destructivos basados en corriente de Eddy.

Proceso de anodizado global

El proceso completo de anodizado requiere, etapas de limpieza del metal para la ejecución del proceso de oxidación. Así, se aplican tratamientos químicos de desengrase con disolventes y productos cáusticos, después el tratamiento de anodizado intrínseco constituye el núcleo central y el proceso de sellado es alternativo en el proceso, así como el de coloración previo al sellado con objetivos decorativos. La figura 1.5 representa el esquema de los diversos caminos posibles.

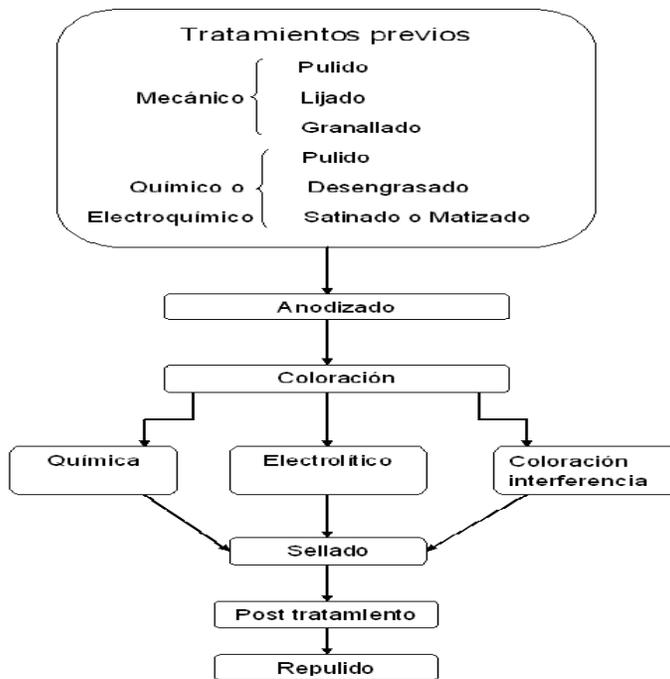


Figura 1.5 Esquema del proceso [1]

SELLADO DEL ANODIZADO

Existen dos métodos para el sellado del anodizado: por hidratación y por vapor.

a) **El sellado por hidratación o agua caliente:** consiste en introducir el aluminio anodizado, previamente enjuagado, en baños de agua desionizada caliente, entre 95-98 °C, durante un periodo de tiempo que oscila entre 2-3 minutos por micra de capa anódica. Durante el proceso de sellado se produce la hidratación de la alúmina, formándose la Bohemita ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$). Esta transformación a la forma hidratada va acompañada de un aumento de volumen el cual cierra la estructura porosa.

Es muy importante para asegurar un perfecto sellado de los poros efectuar un control riguroso de la temperatura y pH del agua, así como evitar contaminaciones de iones, como fosfatos, fluoruros, cloruros u otros, los que pueden perjudicar la capa anódica y por tanto la calidad del acabado frente a ambientes agresivos.

b) **El sellado con vapor:** es una variedad del proceso de sellado por hidratación, ya que el mecanismo es el mismo y presenta las siguientes ventajas frente al agua hirviendo:

- La hidratación es más rápida
- Se necesita menos control, al no haber problemas de arrastres que puedan bajar el pH o contaminar el agua.

Sobre ambos tipos de sellado existe el fenómeno conocido como polvo de sellado que consiste en formación de un polvo fino sobre la superficie de la capa anódica como consecuencia de la reacción en la formación de cristales de bohemita.

COLORACIÓN DEL ANODIZADO.

La coloración consiste en convertir la película transparente de óxido de aluminio en una película coloreada, la cual se consigue por los siguientes procedimientos:

- Inmersión en disolución que contiene colorante
- Deposición catódica a partir de iones metálicos
- Anodización autocolorante.

De las 3 anteriores la más comúnmente utilizada es la coloración por inmersión, esta se realiza introduciendo la pieza anodizada en disoluciones de sales minerales que precipitan dentro del poro, estas sales son compuestos inorgánicos insolubles, como óxidos e hidróxidos coloreados. Los colorantes orgánicos quedan absorbidos, principalmente dentro de los poros. Hay distintos métodos de coloración de las capas de anodizado: coloración por sales y coloración por tintes siendo la de sales la opción más habitual y la que más calidad garantiza tanto en acabado como en durabilidad.

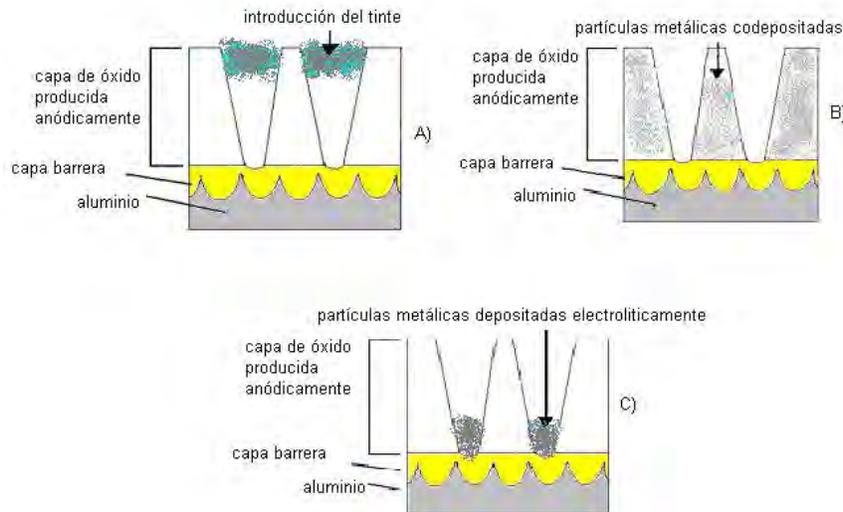


Figura 1.6 Tres tipos de coloración del aluminio por inmersión en disolución A) por absorción B) integral C) electrolítica [1]

I.4 RECUBRIMIENTO POR DEPOSICIÓN QUÍMICA A PARTIR DE LA FASE VAPOR (CVD)

El procedimiento de la deposición química de vapor (CVD) implica la interacción entre una mezcla de gases y la superficie de un sustrato calentado, provocando la descomposición química de algunas de las partes del gas y la formación de una película sólida en el sustrato. Todo esto ocurre en una cámara de reacción sellada. El producto de la reacción forma un núcleo y crece en la superficie del sustrato para formar el recubrimiento. Por lo general todas las reacciones de la deposición química de vapor requieren calor; sin embargo esto dependerá de los productos químicos implicados. Las reacciones pueden ser provocadas por otras fuentes de energía, como la luz ultravioleta o un plasma. Este proceso incluye un amplio rango de presiones y temperaturas y se aplica a una gran variedad de materiales de recubrimiento y de sustrato.

Ventajas que se obtienen mediante la deposición química de vapor son:

- Deposición de materiales refractarios a temperaturas debajo de sus puntos de fusión o sinterizado.
- Control del tamaño de grano.
- El proceso se realiza a condiciones normales de presión.
- Existe una buena unión del recubrimiento sobre la superficie del sustrato.

Desventajas

- En el proceso existe una naturaleza corrosiva y tóxica de los productos químicos, por lo general, se requiere de una cámara cerrada al igual que equipo de bombeo y disposición especial.
- Se utiliza poco material.

Los metales recomendables a utilizar para este tipo de recubrimiento son el tungsteno, el molibdeno, el titanio, el vanadio y el tantalio. Este proceso es muy recomendable para el caso de compuestos como el óxido de aluminio (Al_2O_3), el dióxido de silicio (SiO_2).

En la figura 1.7 se observa un esquema del proceso. Después de la deposición los productos de la reacción son extraídos de la cámara.

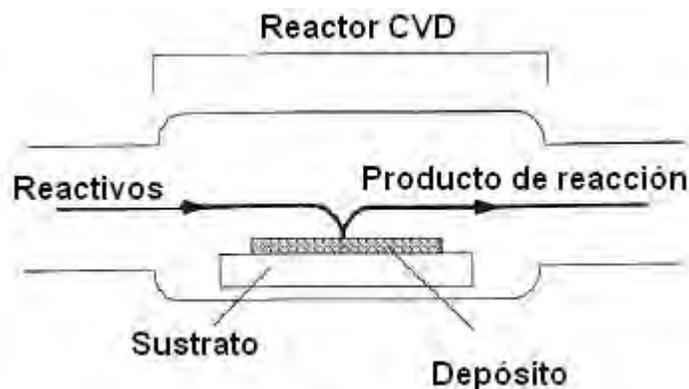


Figura 1.7 Esquema de un sistema de deposición de vapor por vía química [1]

Procesos activados por calor.

Las reacciones químicas tienen lugar cuando las temperaturas alcanzan un cierto nivel (200°C – 500 °C). El calor es producido por el calentamiento del sustrato por resistencia. Este principio determina el reactor denominado de paredes calientes como se observa en la figura 1.8 a.

Es idóneo para reacciones químicas exotérmicas pues la alta temperatura de las paredes impide la deposición sobre las mismas y lo permite sobre el sustrato, que permanece a las temperaturas adecuadas para que suceda la reacción.

Otra alternativa es el calentamiento del sustrato por inducción o radiación de lámparas, figura 1.8 b. Este principio justifica el reactor de paredes frías, que mantiene el sustrato caliente por fuente de calor. Es idóneo para reacciones endotérmicas pues solo sucederán altas temperaturas en el sustrato, y no sobre las paredes frías del reactor.

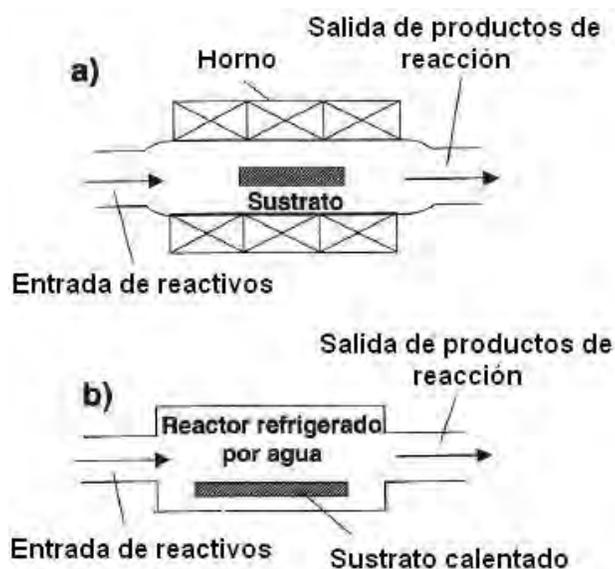


Figura 1.8 Esquema de un sistema de deposición de vapor vía química [1]

Procesos activados por plasma:

Este proceso se define como en el que los constituyentes en fase vapor reaccionan para formar una película sólida cuando son activados por una descarga de plasma, por lo que los gases moleculares son disociados por el impacto de los electrones para generar reactivos, radicales y especies iónicas.

Estos reactivos alcanzan la superficie y reaccionan con los otros gases disociados, iones o radicales libres para alimentar los procesos de formación de películas sobre el sustrato. La figura 1.9 indica el esquema de una instalación activada por plasma.

En la técnica de deposición química activada por plasma normalmente se trabaja a presiones entre 1.3 [Pa] y 132.32 [Pa], por lo que puede considerarse que ofrece las ventajas de la técnica activada por calor, aunque generalmente la temperatura de operación suele ser más baja.



Figura 1.9 Esquema de instalación de deposición química en fase de vapor activada por plasma [1]

Una de las mayores ventajas de esta técnica es la operación a temperaturas bajas, lo que permite su utilización en aquellos procesos en los que no es posible aplicar temperaturas elevadas, como ocurre por ejemplo en alguna de las etapas de fabricación de circuitos integrados.

Debido a la gran variedad de especies excitadas en el plasma, uno de los mayores inconvenientes de esta técnica es la presencia en el material depositado de impurezas proveniente de los productos de descomposición de los gases reactantes, que contribuyen de manera decisiva a unas características más inestables.

I.5 RECUBRIMIENTO POR DEPOSICIÓN FÍSICA A PARTIR DE LA FASE VAPOR (PVD)

La deposición física de vapor, (PVD), se refiere a los procesos en los cuales se convierte un material a su fase de vapor en una cámara de vacío y se condensa sobre una superficie de sustrato como una película delgada.

Los fundamentos físicos más usuales en estos procesos de deposición son los de pulverización y los de evaporación. Con ellos se alcanzan espesores de capa que oscila entre 25 μm a 100 μm , y se aplican a especies inorgánicas, metales, aleaciones, mezclas, y también a algunas especies orgánicas.

Este proceso representa una tecnología de recubrimiento muy versátil aplicable a una combinación casi ilimitada de sustancias de recubrimiento y materiales de sustratos.

Los procesos para la deposición física de vapor consisten en los siguientes pasos:

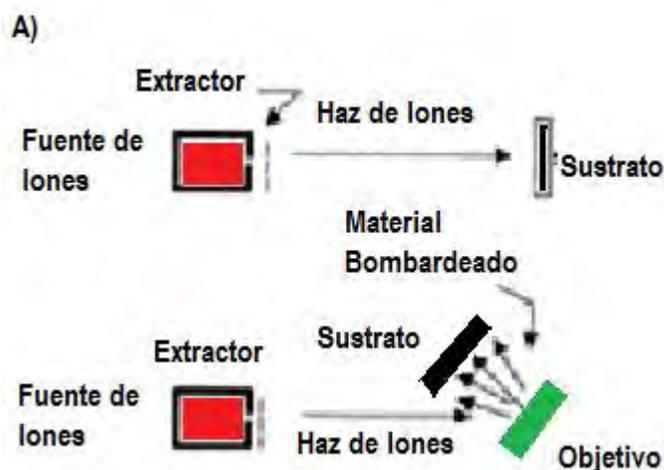
- Síntesis del vapor de recubrimiento

- Transporte del vapor al sustrato
- Condensación de los vapores sobre la superficie del sustrato

Procesos de deposición por pulverización:

Esta técnica está fundamentada en el lanzamiento de partículas, aceleradas por un campo eléctrico o plasma, contra la superficie de un cátodo, el cual libera átomos que se proyectan para depositarse en el sustrato. En la figura 1.10a se esquematiza el principio del proceso por corriente iónica y el procedente del plasma.

Una fuente de iones de alta energía produce iones del material de recubrimiento que se dirigen a la pieza sustrato de la especie a depositar. El choque de los iones produce la atracción de los átomos que se proyectan sobre el sustrato ubicado paralelamente al cátodo.



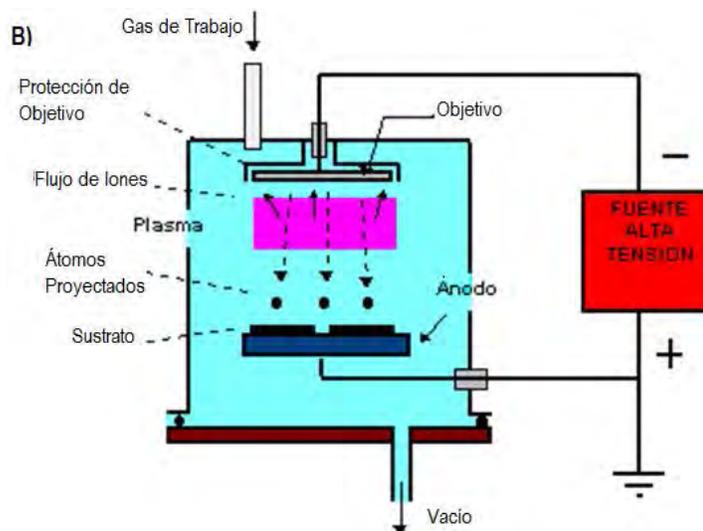


Figura 1.10. a) Principio del aparato de pulverización iónica. b) esquema de máquina de deposición por pulverización en fase vapor. [1]

Todo el conjunto se ubica en una cámara que se ha llenado de gas inerte o reactivo, como se muestra en la figura 1.10b

Puede observarse como el plasma está aislado del sustrato, lo que permite bajos calentamientos del mismo, alta pureza del depósito y, consecuente, óptima adherencia.

La adherencia del depósito es función de la específica de éste con el sustrato, mejorándose con la energía de los iones del plasma y el control de la temperatura en unos niveles óptimos, lo que obliga al control de la temperatura del sustrato.

Procesos de deposición por evaporación:

En este proceso el vapor se produce a partir del material seleccionado para el depósito ubicado en una fuente que se calienta por diversos métodos: resistencia, inducción arco eléctrico,

proyección de electrones o láser. Se requiere realizar el vacío de la cámara al nivel de 10^{-3} a 10^{-8} Pa.

En este proceso se depositan ciertos materiales (principalmente puros) sobre un sustrato, transformándolos primero de estado sólido a vapor en una cámara de vacío y después permitiendo que se condensen en la superficie del sustrato.

La evaporación se lleva a cabo en sistemas de vacío, dentro de los cuales se calienta el material a evaporar, llamado fuente, hasta temperaturas cercanas a su punto de fusión o de sublimación. Dado que el calentamiento se obtiene en un vacío, la temperatura requerida para la evaporación es significativamente menor que la temperatura requerida a presión atmosférica normal. Así mismo, la ausencia de aire, en la cámara evita la oxidación del material fuente a las temperaturas de calentamiento. En la figura 1.11 se observa un esquema de la máquina destinada a este proceso.

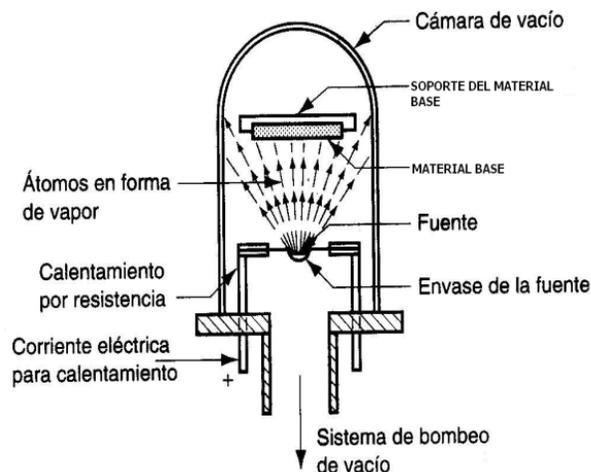


Figura 1.11 Aparato de deposición por evaporación mediante resistencia [1]

I.6 RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA

El proceso de proyección térmica tiene sus antecedentes en el soplete oxiacetilénico, con el objetivo de incorporar a las superficies seleccionadas un recubrimiento, cerámico o metálico, adherido por mecanismos similares a los procesos de soldadura.

El fundamento de este proceso para la obtención de recubrimientos consiste en fundir en gotas el material de aporte, polvo o hilo mediante una fuente calorífica, con potencia suficiente para lanzar las gotas de material que impactan con la superficie, con la protección suficiente contra la contaminación ambiental, para evitar el deterioro de las características del recubrimiento. La figura 1.12, muestra una instalación de proyección térmica.

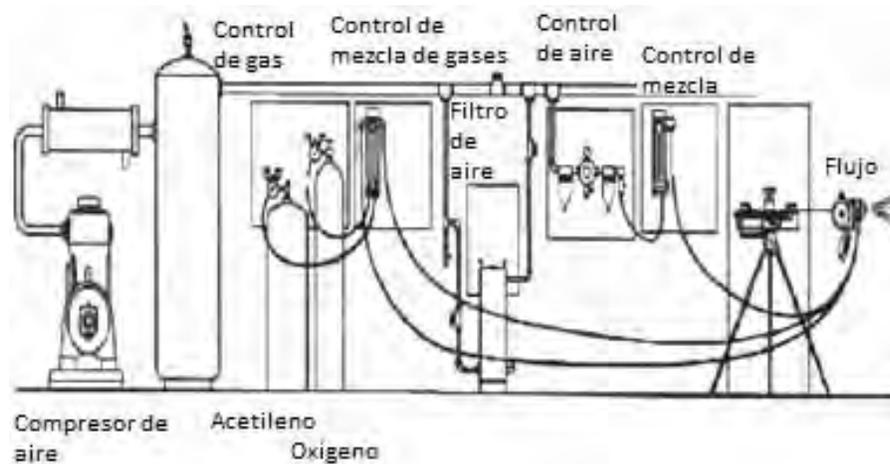


Figura 1.12 Instalación de proyección térmica [1]

Recubrimiento de hilo por combustión:

La fuente calorífica encargada de fundir el hilo está constituida por la combustión del acetileno, propano, gas natural, etc., y del oxígeno. El acetileno proporciona las más altas temperaturas.

La pulverización de líquido metálico y la proyección sobre la superficie es realizada por aire comprimido, inyectando coaxialmente a la llama.

La aplicación más importante es para proyección de zinc y aleaciones zinc-aluminio.

En la figura 1.13 se observa el esquema del proceso antes descrito.

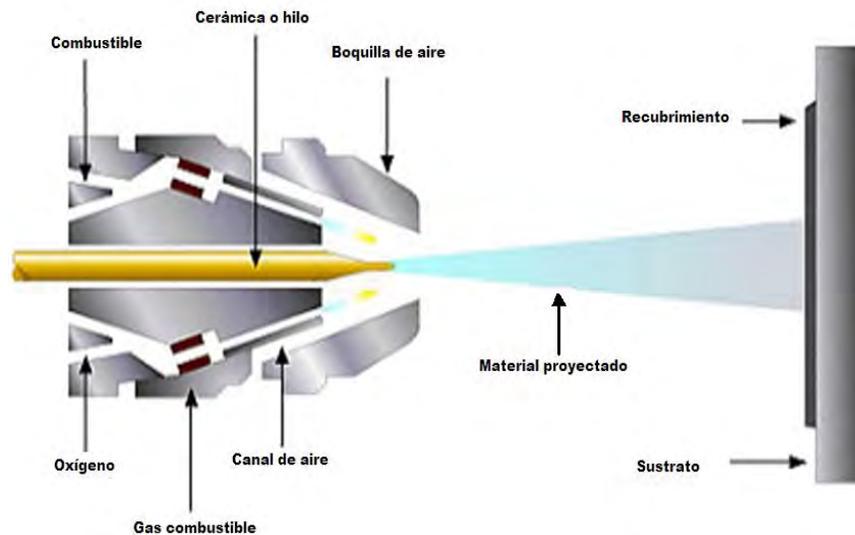


Figura 1.13 Pistola de proyección de hilo por combustión

Recubrimientos de polvos por combustión:

El proceso es similar al anterior pero permite proyectar también polvos cerámicos o metálicos de alto punto de fusión. El polvo es almacenado en un depósito situado sobre la parte superior de la pistola y se usa una pequeña cantidad de oxígeno para proceder a la aspiración del polvo y ubicarlo en la zona de fusión. También puede ser utilizado un vibrador local para favorecer la realización de este objetivo.

La temperatura de proyección puede obtenerse solo con los gases de combustión o ayudado por el aire comprimido que se utiliza también para la propagación de la llama.

Recubrimientos de hilo por arco eléctrico:

Es una variación del recubrimiento de hilo por combustión, en el que se sustituye esa fuente calorífica por el arco eléctrico, similar al de la soldadura por arco eléctrico. Los electrodos están constituidos por dos hilos aislados que avanzan hacia la zona de fusión. El arco eléctrico salta entre los dos electrodos produciendo su fusión. La función de pulverización y proyección es realizada por un gas, aire comprimido, en el caso de cerámicas, o gas noble, en metálicos. La figura 1.14 se observa el montaje en la pistola específica.

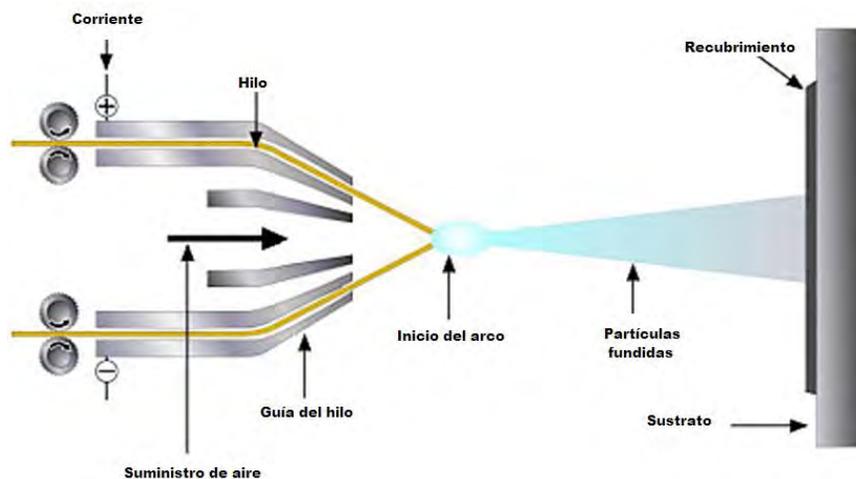


Figura 1.14 Pistola de proyección de hilo por arco eléctrico.

Recubrimiento de polvo por plasma:

La fuente calorífica está constituida por el plasma generado en la corriente de gas inerte cuando se establece un arco eléctrico entre los electrodos internos de la pistola por la diferencia de potencial establecida. El plasma generado funde el metal y el plasma libre que atraviesa el cañón de la pistola lo proyecta a gran velocidad en forma de gotas fundidas hacia el sustrato.

El proceso de proyección térmica basa su eficiencia en la proyección de las partículas de polvo en estado fundido, total o parcialmente, sobre un sustrato en el que se enfrían, solidifican y forman las sucesivas capas de recubrimiento. La figura 1.15, indica la organización en una pistola de proyección de plasma. El proceso en el suministro de material es similar al de polvo por combustión, pudiendo ser aportado bien por la instalación general o bien en forma local por la tolva anexa superior.

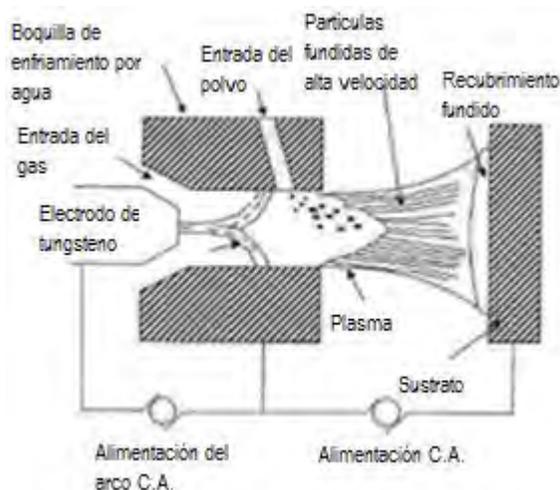


Figura 1.15 Pistola de proyección de polvo por plasma [1]

Las técnicas mencionadas son las de aplicación más común, sin embargo, existen técnicas que aún siendo de menor aplicación tienen importancia en campos específicos. No existe un acuerdo general sobre el sistema óptimo para un propósito en particular. El metal elegido para el recubrimiento, junto con la forma y dimensión del artículo a tratar, la temperatura máxima que puede soportar el artículo durante el tratamiento, las cualidades físicas exigidas al recubrimiento y las limitaciones impuestas por el costo, determinan el procedimiento que se debe usar para su aplicación.

La aplicación de cualquier tipo de recubrimiento puede afectar las propiedades físicas, mecánicas, económicas y estéticas del material base y cualquiera de tales efectos.

- a) **Factores económicos:** Obviamente son de importancia cuando elegimos el metal de recubrimiento y su método de aplicación.

b) *Propiedades del recubrimiento:* Un análisis de las propiedades físicas y mecánicas del recubrimiento se realiza cuando procedemos a elegir un metal y un método de aplicación sobre un artículo en particular.

La apariencia, color y brillo son importantes en aplicaciones decorativas. El estaño y el aluminio normalmente recubren como depósitos opacos aunque pueden ser abrillantados después del proceso.

Los colores del recubrimiento varían desde blanco azulado del cromo, al amarillo para el oro o latón, o el rojo de los bronce.

La reflectividad después del pulido varía también con el metal de recubrimiento siendo muy alto para la plata y el rodio y progresivamente decreciente para el aluminio, paladio, estaño zinc, oro y plata.

La dureza, resistencia mecánica y resistencia al desgaste, son propiedades mecánicas primarias no necesariamente interrelacionadas. Se podrían citar a los recubrimientos de acuerdo a su dureza; tienen alta dureza el cromo, níquel y rodio; dureza intermedia el cobre, zinc, cadmio, plata; y suaves, el estaño, plomo, oro e indio.

La resistencia a la temperatura, que es una combinación del punto de fusión y de la resistencia a la oxidación, puede ser muy importante; el orden preferido de los metales de recubrimiento para aplicaciones a elevadas temperaturas es: plata, aluminio, níquel, cromo, paladio, platino y rodio.

Existen otras propiedades de los recubrimientos como son la adherencia, ductilidad, uniformidad y continuidad o porosidad, las cuales dependen del método de aplicación.

CAPÍTULO II

INMERSIÓN EN CALIENTE

II.1.1 RECUBRIMIENTOS POR INMERSIÓN EN CALIENTE

La inmersión en caliente consiste como tal, en sumergir un objeto en un líquido, además de que es uno de los métodos más antiguos para lograr recubrir un metal con otro. Todavía se utiliza ampliamente puesto que es uno de los procesos de recubrimiento en los que se consigue una mayor adherencia y su aplicación resulta económica. El recubrimiento se forma en la superficie del metal base, cuando este se sumerge en el metal protector fundido.

El recubrimiento obtenido por inmersión en caliente consiste en una zona interna de aleación y otra zona de metal puro. La formación de una zona aleada da lugar a que la adherencia recubrimiento-sustrato sea, en general, muy elevada. La zona de aleación se forma por difusión en el metal fundido dentro del metal base. La capa exterior del metal puro se forma a partir del metal líquido que se adhiere a la superficie de la pieza cuando esta se extrae del baño. En general, el espesor del recubrimiento se puede variar mediante el control del tiempo de inmersión y de extracción y de la velocidad de enfriamiento.

Los espesores de recubrimiento que se obtienen por el proceso de inmersión en caliente son espesores entre 0.01 y 0.1 mm. Los metales usados han de tener bajos puntos de fusión, para evitar cambios térmicos en el metal base.

El proceso de inmersión en caliente se puede dividir en dos subgéneros “continuo” y “discontinuo”.

En el proceso continuo los objetos a recubrir pueden someterse a operaciones de corte, doblado, perforación, soldadura, embutición o cualquier otra forma de conformación.

En la inmersión en caliente en discontinuo denominada también inmersión en caliente general, se protegen las piezas de acero ya fabricadas y con su forma definitiva. Una vez recubiertas, no deben someterse a ninguna operación de fabricación o conformación.

No solo hay diferencias en la secuencia de los procesos que corresponden a estos dos métodos de inmersión en caliente, sino también en las características de los recubrimientos que se obtienen mediante ambos procedimientos. Así, por ejemplo, el recubrimiento obtenido por inmersión en caliente en continuo es sensiblemente más delgado que el que se consigue sobre los artículos que se han recubierto después de su fabricación en discontinuo. Esto se debe a que en el procedimiento de recubrimiento del objeto en continuo, el tiempo de contacto de ésta con el metal fundido es muy reducido y, además a que el objeto es escurrido enérgicamente a su salida del baño del metal fundido mediante unas cuchillas de aire a presión o vapor.

II.1.2 INMERSIÓN EN CALIENTE EN CONTINUO

La inmersión en caliente del alambre en carretes y de la banda y fleje en bobinas, se efectúa en líneas de galvanización que trabajan en continuo y en las que la preparación superficial previa a la inmersión en el baño del metal líquido puede realizarse por vía química o por vía termoquímica en hornos de atmósfera de reducción de gases apropiada, sistema más ampliamente empleado para el fleje y la banda, como se muestra en la figura 2.1

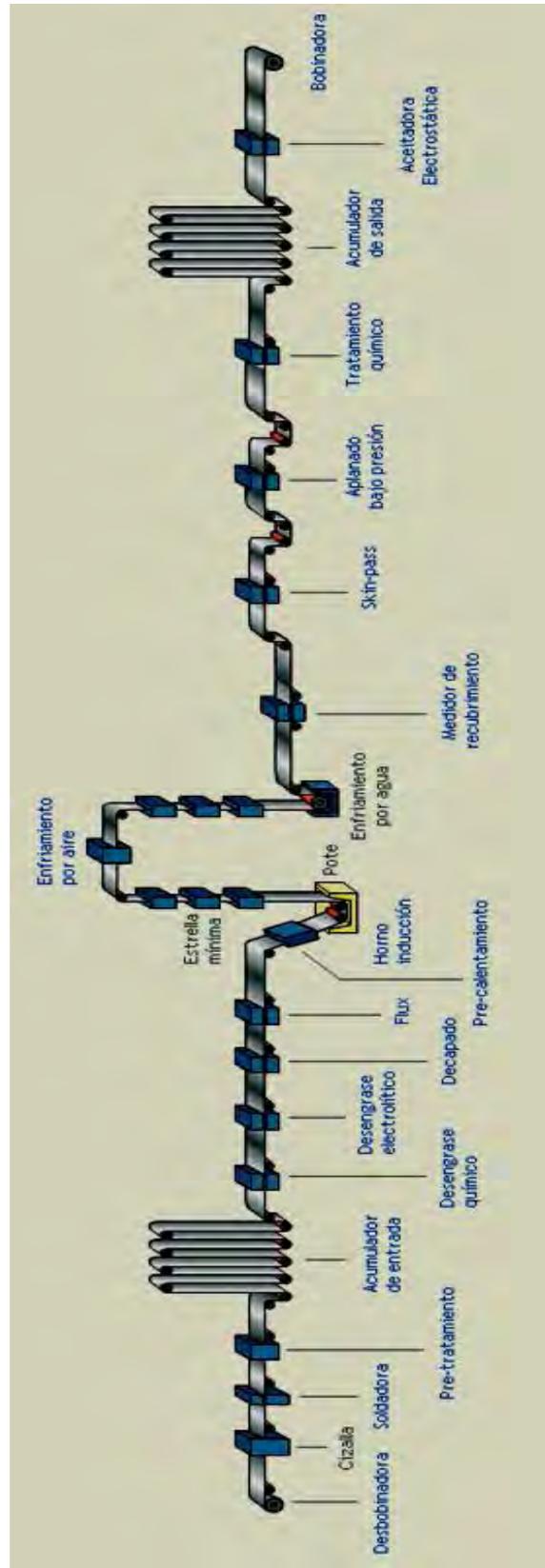


Figura 2.1 Esquema del proceso de la inmersión en caliente continuo.

II.1.3 INMERSIÓN EN CALIENTE DISCONTINUO

Son aquellas en las que se recubren piezas y productos de peso y tamaños muy diversos desde tornillería hasta elementos estructurales de gran tamaño, por lo que no es fácil la automatización del proceso. En este tipo de instalaciones la preparación superficial se realiza por vía química. En la figura 2.2 se ilustra las principales etapas del proceso de inmersión en caliente discontinuo:

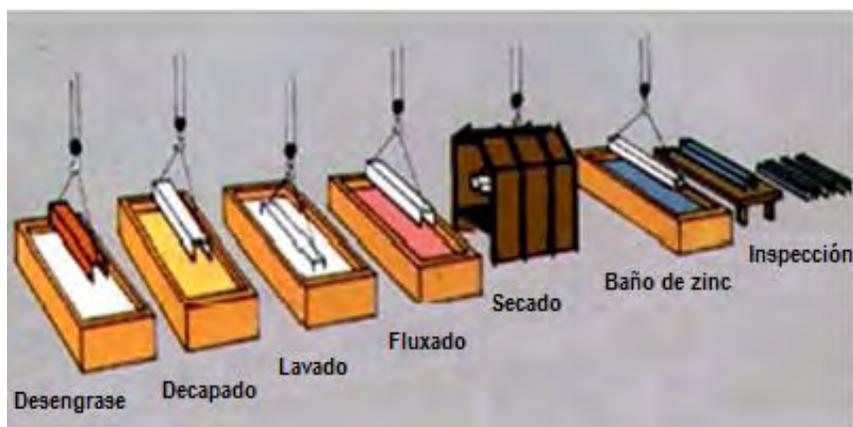


Figura 2.2 Esquema del proceso de inmersión en caliente discontinuo

En el proceso de inmersión en caliente la difusión del recubrimiento sobre el sustrato juega un papel importante para alcanzar una satisfactoria unión metálica. Estos son algunas de las condiciones que deben cumplirse:

- El metal sustrato y el metal protector deben presentar solubilidad a temperatura ambiente en estado sólido y a altas temperaturas en estado líquido.
- Los diámetros atómicos del metal recubrimiento y del metal sustrato no deben diferir en más de un 16%.

- Se deben mantener un contacto íntimo entre el recubrimiento metálico y el sustrato.

II.2.1 TÉCNICA DE INMERSIÓN EN CALIENTE PARA ALUMINIZADO.

Preparación superficial.

Una buena preparación de la superficie es fundamental a la hora de obtener un buen recubrimiento, la existencia de materiales extraños diseminados sobre la superficie ocasiona defectos en el recubrimiento, no solo en la adherencia, resistencia a la corrosión o continuidad del recubrimiento, sino también en los aspectos de acabado superficial y estéticos.

El proceso general para la adecuación de la superficie, consta de tres etapas fundamentales: el desengrasado, el decapado y el fluxado.

Desengrasado:

Mediante el desengrasado se eliminan las impurezas de tipo orgánico como aceites y grasas solubles y los lubricantes que se usan en el proceso de laminación y embutición profunda y también unas clases de pintura. El desengrasado se puede efectuar mediante:

- Soluciones alcalinas en caliente; se usan generalmente entre 80 °C y 90 °C durante unos 20 minutos, siendo la más empleada la disolución de sosa caustica al 50%.
- Soluciones alcalinas en frio; son utilizadas cuando las piezas están ligeramente engrasadas. Son disoluciones preparadas a base de fosfatos.

- Desengrase a vapor; utiliza vapor tricloro-etileno, muy eficaz para aceites y grasas, aunque es necesaria una instalación muy costosa.
- Desengrase por inmersión en el baño de aluminio se utiliza cuando las piezas tienen pintura y grandes cantidades de grasa.
- Chorro de granalla. Se suele utilizar cuando las piezas llevan pinturas, cascarillas de recocido, escoria de soldadura, arena, etc. Y también para preparar piezas de fundición gris y de fundición maleable.

Decapado:

Las impurezas de tipo inorgánico tales como la cascarilla de fabricación y el óxido del recocido, son retiradas del sustrato metálico mediante el decapado. Normalmente, para este fin se utiliza ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, ácido fluorhídrico y también mezclas de ácidos.

El decapado tiene por objeto eliminar la cascarilla y el óxido, pero no atacar el acero subyacente, puesto que el decapado excesivo origina una superficie áspera y es causa de un recubrimiento poco satisfactorio. Por este motivo se usan inhibidores, los cuales impiden prácticamente el ataque del acero sin afectar la velocidad de eliminación del ácido.

Con el uso de inhibidores del decapado, la superficie de acero queda más lisa y produce un acabado mejor del recubrimiento.

- Decapado con ácido clorhídrico. El ácido clorhídrico se utiliza diluido al 50 % en volumen y a temperatura ambiente. Es importante que la temperatura del ácido clorhídrico no sea inferior a 15°C, puesto que la reactividad es menor y el ataque del ácido al metal es más lento.
- Decapado con ácido sulfúrico. Se utiliza con un contenido de ácido entre 10 y 14%, y a una temperatura de 60 a 80°C. El ácido sulfúrico es más económico que el clorhídrico, pero tiene el inconveniente de que se ha de calentar para lograr mayor rapidez del decapado y es peligroso para el operador.
- Decapado con ácido fluorhídrico. Puede utilizarse en sustitución del chorro de granalla en la limpieza de piezas de fundición, siendo la concentración empleada del 19%. Este ácido es muy peligroso al causar quemaduras si entra en contacto con la piel.
- Decapado con mezcla de ácidos. Se puede utilizar para decapar piezas de fundición. La mezcla puede ser de ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico y agua en proporciones de 6:4:40.

Fluxado:

La preparación superficial se completa con el fluxado. Consiste en la inmersión del acero en un baño de sales. En general, el fluxante se emplea como agente de activación de la superficie del acero pero en realidad es un reductor químicamente activo que neutraliza la oxidación del

acero cuando se introduce en el baño de aluminio fundido. Existen tres formas de llevar a cabo la operación de fluxado:

1. **Disolución acuosa.** Los métodos basados en el uso de disolución acuosa de fluxado son más simples y económicos. Una disolución acuosa se puede preparar, controlar y mantener fácilmente, se desprende rápidamente de las piezas y no forma productos indeseables. Para la preparación de los fluxados acuosos se utilizan cloruros y fluoruros alcalinos en distintas proporciones y también sales de titanio y circonio tales como el fluorocirconio de potasio y el fluorotitanato de potasio anhidro.
2. **Sales fundidas.** Las sales fundidas se pueden utilizar de dos formas, como un baño de flujo independiente del baño de metal fundido. Se utiliza el mismo tipo de sales fundidas que en la disolución acuosa a una temperatura entre 700-800 °C, la ventaja de las sales fundidas es que se calientan las piezas a la misma temperatura que el metal fundido. El inconveniente de los baños de sales fundidos es su poca duración dada su gran volatilidad y su inestabilidad.
3. **Atmósferas reductoras o inertes.** Las atmósferas reductoras o inertes se utilizan sobre todo en los procesos en continuo ya que implica una simplificación del procedimiento y un aumento en su eficacia. Las atmósferas más utilizadas son las de hidrógeno, argón y mezclas de hidrógeno y nitrógeno.

Un aspecto importante es que después de bañarlo con un químico hay que inhibir las reacciones de este químico y para eso se hace un enjuague después del desengrasado y del decapado.

Después de sacar el acero del baño de fluxado, se introduce en el baño de aluminio fundido. Durante el periodo de inmersión el acero se sube y baja algunas veces, para eliminar el aire que haya podido quedar atrapado y para asegurarse que el aluminio fundido entre en contacto con la totalidad de la superficie del acero. Durante el tiempo en que la pieza es sumergida en el aluminio fundido estos reaccionan metalúrgicamente. Los átomos del acero, los cuales están en estado sólido interactúan con los átomos del aluminio fundido. A esta interacción se llama difusión. Los átomos del aluminio fundido se mueven en dirección del acero y los átomos de hierro migran hacia el aluminio fundido. El resultado es la formación de una capa sólida “aleada” entre el hierro y el aluminio fundido. Esta capa contiene átomos del metal fundido y la pieza en proporciones específicas, y es denominado un compuesto intermetálico. La unión de los átomos de diferentes metales es conocida como aleación y la zona de difusión que se forma durante la inmersión en caliente es una aleación intermetálica. Es esta zona de aleación, la cual cuando se forma apropiadamente, provee un excelente enlace entre la pieza y el recubrimiento metálico.

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

Debido a la gran reactividad del hierro y el aluminio a temperaturas superiores a 700 °C, el crisol del baño no puede ser de acero o fundición, y se han de emplear crisoles de refractario o grafito. Un problema mas es la disolución del hierro del material que se ha de recubrir dentro del baño de aluminio. Este hierro se combina con el aluminio y forman las características matas o aluminio duro que corresponde en su mayor parte al intermetálico $AlFe_3$ tienden a adherirse a la superficie de las piezas en forma de granos o nódulos con lo cual estropean el recubrimiento de aluminio, por lo cual se han de retirar periódicamente, dichas matas, del baño de aluminio.



Figura 2.3. Proceso de galvanizado

II.2.2 PROCESOS POST-RECUBRIMIENTOS

A pesar de que el aluminio utilizado en el recubrimiento es dúctil, la capa intermetálica formada durante el aluminizado por inmersión en caliente es dura y quebradiza, por lo cual cuando se les ha de dar a las piezas un conformado posterior al aluminizado, es necesario reducir los tiempos de inmersión, así como la temperatura del baño, y se deben utilizar elementos de aleación en el baño de aluminio, esto reducirá el espesor y la dureza de capa intermetálica, produciendo un recubrimiento más flexible. Aplicados correctamente, los recubrimientos de aluminio, resistirán una moderada deformación, maquinado y estirado, sin escamados o peladuras. El material recubierto se puede doblar hasta 180° sobre un diámetro igual a dos veces su espesor, sin perder su adherencia.

Acabados

En la aplicación en las que intervengan la exposición ambiental, el aluminio obtiene resultados satisfactorios sin ninguna protección adicional. Sin embargo, la resistencia a la corrosión, la apariencia y la duración pueden ser mejoradas mediante el empleo de tratamientos de acabados.

Acabados químicos

Un buen sistema de acabado relativamente económico para los aluminizados con inmersión en caliente, lo constituye la aplicación de cromatos amorfos y películas de fosfatos por técnicas de inmersión o metalización. Ofrece una mayor resistencia a la corrosión, a la vez de una superficie más decorativa pero no son particularmente resistentes al trabajo mecánico. Los recubrimientos cromatados son característicamente de color dorado y dan una mayor

resistencia a la corrosión en ambientes marinos, mientras que los fosfatados son típicamente de color verde oscuros.

Recubrimientos anódicos. Coloreado y sellado.

El anodizado es un proceso electrolítico que sirve para engrosar y estabilizar las películas superficiales de óxido sobre el metal base. La película anódica es un buen soporte para la pintura y el coloreado, o para tratamientos posteriores.

El anodizado se emplea con frecuencia para el aluminio, pues el 5% del aluminio consumido se anodiza, además de otros metales.

Tratamientos mecánicos

Mediante los tratamientos mecánicos se pueden mejorar la apariencia del aluminio del acero recubiertas por inmersión en caliente, eliminando las rebabas, los restos de sales de fluxado y los granos de matas que hayan podido quedarse adheridas a la superficie.

Por lo general el espesor del recubrimiento no es superior a las 250 μ m, por lo cual se habrán de dar tratamientos de acabado poco agresivos como:

Chorreados abrasivos con partículas de vidrio; las cuales producen una atractiva apariencia mate con la mínima eliminación de material.

Maquinados ligeros; en donde se ha de tener especial cuidado con las esquinas y los bordes de las piezas, puesto que es donde se arranca mayor cantidad de material.

Ruedas de nylon; de baja densidad impregnadas con un abrasivo, que proporciona acabados direccionales.

Chorreados; con arena y granallados con polvo de acero.

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS

III.1 OBTENCIÓN DE RECUBRIMIENTOS.

Se eligió como metal base un acero SAE 1018 empleado para la fabricación de partes de maquinaria, automotriz, línea blanca, tornillos, etc. Cuya composición química es la siguiente:

- C --- 0.14 - 0.20 %
- Fe --- 98.81- 99.26 %
- Mn --- 0.6 – 0.9 %
- P --- ≤ 0.04 %
- S --- ≤ 0.05 %

Las características y propiedades mecánicas del acero SAE 1018 se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.1 Propiedades mecánicas del acero SAE 1018

Propiedades mecánicas del acero SAE 1018	
Dureza Brinell promedio	126
Rockwell B	71
Vickers	131
Esfuerzo de fluencia	370 MPa (53700 PSI)
Esfuerzo máximo	440 MPa (63800 PSI)
Elongación máxima	15% (en 50 mm)
Reducción de área	40%
Modulo de elasticidad	205 GPa (29700 KSI)
Maquinabilidad	76% (AISI 1212 = 100%)

El metal empleado para recubrir el acero es un aluminio comercialmente puro tipo 1100 norma AA (Alluminium Association Standardized System), resistente a la corrosión, no tóxico, ni magnético y de gran maquinabilidad.

Composición química :

- Al -- ≥ 99 %
- Be -- ≤ 0.0008 %
- Cu -- 0.05-0.2 %
- Mn -- ≤ 0.05 %
- Si + Fe -- ≤ 0.95 %
- Zn -- ≤ 0.1 %

Las características y propiedades mecánicas del aluminio AA 1100 se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.2 Propiedades mecánicas del Aluminio AA 1100

Propiedades mecánicas del aluminio AA 1100	
Dureza Brinell	28
Esfuerzo máximo	110 MPa (16000 PSI)
Esfuerzo de fluencia	103 MPa (15000 PSI)
Elongación máxima	12% (en 1.59 mm)
Modulo de elasticidad	68.9 GPa (10000 KSI)

III.1.1 EQUIPO UTILIZADO.

Los equipos utilizados se mencionan a continuación:

- a) Sierra cinta sin fin, empleado para el corte de probetas y corte de lingote de aluminio.
- b) Esmeril circular, empleado para la preparación de bordes y para una limpieza mecánica superficial inicial.
- c) Balanza digital, para pesar el metal y los químicos para preparación de superficie.
- d) Horno CAISA de 6 KW de potencia, utilizado para realizar la fundición del aluminio.
- e) Crisol de grafito, utilizado para fundir el metal de recubrimiento.
- f) Horno marca LINDBERG modelo 151333 de 14 KW de potencia.
- g) Laminadora dúo HILLE
- h) Montadora en caliente, empleada para montar las probetas en baquelita.
- i) Banco de lijas, utilizadas en la preparación de las probetas para la observación metalográfica.
- j) Microscopio metalográfico, para obtener fotos metalográficas del recubrimiento.

III.1.2 REACTIVOS QUÍMICOS.

Los reactivos utilizados en el proceso de limpieza y preparación del material base son:

- Percloroetileno.
- Ácido clorhídrico al 10%.
- Tiourea.

- Cloruro de Zinc.
- Cloruro de Amonio.
- Agua destilada.
- 25 gramos de desgasificante (DEGASAL)
- 25 gramos de refinador de grano (ALUFIN)

III.1.3 PRODUCCION DEL MATERIAL.

Previo a la preparación superficial, se determina el número de probetas a prepararse según las variables que intervienen en el proceso.

Para estudiar las variaciones en el proceso se obtienen 5 valores que serán tomados como referencia; para el tratamiento térmico se tomaron 2 tiempos diferentes por cada 10 probetas, para la laminación se tomaron 2 pasos por cada 10 probetas. Por lo tanto el número de probetas a prepararse es :

$$5 + (2 * 10) + (2 * 10) = 45 \text{ probetas}$$

Las probetas son de forma rectangular y sus dimensiones son las siguientes:

Largo : 40 mm.

Ancho : 22 mm.

Espesor: 3 mm

Una vez determinado el número de probetas y sus dimensiones, procedemos a realizar el proceso de preparación superficial.

1. **Limpieza mecánica:** Después de cortada la probeta y suavizado los cortes con el esmeril, se procede a eliminar las suciedades adheridas a la superficie teniendo cuidado mantener una superficie rugosa para la adherencia del recubrimiento.
2. **Desengrasado:** Se realiza empleando percloroetileno al 100% de concentración. Las probetas son sumergidas en esta sustancia por un periodo de 10 minutos, posteriormente las probetas son enjuagadas en agua destilada y secado con aire caliente para retirar los residuos e inhibir los efectos de la sustancia desengrasante.
3. **Decapado:** Esta etapa consiste en preparar ácido clorhídrico diluido en agua destilada al 10% añadiendo Tiourea al 10%, que funciona como inhibidor, en este proceso, las probetas son sumergidas en esta sustancia por un periodo de 4 minutos. Posteriormente, se procede a retirar las probetas y enjuagar en agua destilada y secarlas con aire caliente para inhibir el efecto del decapado.
4. **Fluxado:** La activación de la superficie consiste en hacer una preparación en un recipiente de cloruro de zinc al 15% en agua destilada y en otro recipiente cloruro de amonio al 15% en agua destilada. Después de esto se mezclan en una proporción de 10% de cada solución previa en agua destilada, y se sumergen las piezas en esta solución

durante tres minutos para lograr que la superficie esté lista para el proceso de difusión, se sacan las probetas y se secan con una pistola de aire caliente para que no se oxiden.

Concluido el fluxado las probetas están listas para ser sumergidas en el baño del metal de recubrimiento.

III.1.4 INMERSION DE LAS PROBETAS AL BAÑO DE ALUMINIO.

Para fundir el metal de recubrimiento se utiliza el horno CAISA y el crisol de grafito una vez fundido el metal y a la temperatura de trabajo correcta se procede a adicionar al metal fundido 25 gr. de DEGASAL que es un desgasificante y nos sirve para eliminar los gases que se presenten durante la inmersión en caliente, también se le agrega 25 gr. de ALUFIN que es un refinador de grano que se agrega para mejorar la adherencia y acabado superficial. Se procede a realizar la inmersión de las probetas, una por una, por medio de unas pinzas de acero inoxidable. Al hacer la inmersión se agita la probeta dentro del metal fundido esto para evitar las burbujas de aire atrapadas entre el metal de recubrimiento y el metal base y a así evitar una mala adherencia.

La temperatura en la que se hace la inmersión de la probeta en el metal de recubrimiento es de 730 °C.

El tiempo de inmersión elegido es el de 5 minutos ya que teóricamente es el mejor tiempo para realizar el recubrimiento. [5]

III.1.4 VELOCIDAD DE EXTRACCIÓN

La capa exterior se forma a partir del metal de recubrimiento que se adhiere a la superficie de la probeta cuando esta es extraída del baño. Una rápida extracción aumenta la velocidad de enfriamiento. Provocando una capa exterior muy gruesa y un elevado consumo de aluminio para evitar este problema se procede a utilizar una lamina de acero inoxidable y así poder rasurar la probeta y quitar el exceso de aluminio.

La velocidad de extracción no debe ser mayor a la velocidad de escurrimiento del aluminio y generalmente se saca a una velocidad de $2.5 \frac{cm}{seg}$. [5]

III.1.5 ADHERENCIA DEL RECUBRIMIENTO

La adherencia se comprueba por medio de el método del corte cuadrículado el cual se establece en la norma *NMX-H-004-SCFI-2008* el cual establece los métodos de ensayo para determinar la adherencia que presentan los recubrimientos metálicos aplicados sobre base también metálica. Esta norma se aplica a cualquier tipo de método de recubrimiento, inmersión en caliente, electrolíticamente, mecánicamente, etc.

El ensayo consiste en preparar un corte en la probeta, perpendicularmente a la superficie de recubierta; colocar la probeta así cortada en una mordaza y limar la parte expuesta.

La acción de limado debe ejecutarse de tal modo que la dirección de ataque de la lima sea del metal base al recubrimiento, intentando desprender éste por descascaramiento. El ángulo aproximado es de 45°. Al finalizar el limado, se debe comprobar si existe desprendimiento del recubrimiento o si se han producido descamaciones.

Se procedió a realizar este ensayo tomando una probeta, en la cual ejecutamos un corte para obtener una muestra de las siguientes dimensiones:

Largo:	22 mm
Ancho:	12 mm
Espesor:	5 mm

Luego se sujeta la muestra en un tornillo dejando expuesta la superficie del corte, y se procede a limar. Al terminar el limado se realiza la observación de la muestra y se obtiene como resultado que no hay descascaramiento ni descamaciones, llegando así, a la conclusión de que las probetas recubiertas obtenidas durante el proceso de inmersión cumplen con una adherencia de calidad, para luego ser sometidas a los procesos siguientes que se contemplan en esta investigación.

III.1.6 ESPESOR

Este ensayo se determina por medio de la norma *NMX-H-004-SCFI-2008* recubrimientos metálicos por inmersión en caliente. Determinación del espesor del recubrimiento por el método del microscopio.

Esta norma establece el método para determinar el espesor del recubrimiento metálico por inmersión en caliente.

En una muestra metalográfica con superficie de corte perpendicular a la superficie significativa se mide el espesor de recubrimiento microscópicamente en uno o varios puntos determinados.

Se procede a realizar el ensayo de espesor, tomando una probeta a la vez, se sujeta en el tornillo y se realiza un corte perpendicular a la probeta obteniendo una muestra de dimensiones:

Largo: 22 mm

Ancho: 13 mm

Espesor: 5 mm

Se montaron las probetas utilizando la montadora en caliente. Al finalizar el montado se procede a la desbastadora automática para quitar el exceso de baquelita y así descubrir la superficie a analizar.

Obteniendo el resultado deseado en la desbastadora automática se procede a hacer el pulido en el banco de lijas, empezando con la lijas de 180 – 240 -320 - 400 – 600 – 1000 -1200 alternado la dirección del pulido en ángulos de 90° cada vez que se pasa de una lija a otra.

Concluido el pulido en el banco de lijas se pasa a la pulidora automática para alúmina gris y alúmina blanca para obtener mejor acabados y apreciar mejor la imagen metalográfica en el microscopio.

Luego de obtener un acabado espejo por medio del pulido las muestras están listas para la observación metalográfica.

III.2 PRUEBAS DE TRATAMIENTO TÉRMICO

Este prueba tiene por objetivo observar los cambios que se presentan en las capas de recubrimiento, intermetálico y sustrato de nuestras probetas recubiertas con aluminio.

3.2.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS PARA EL TRATAMIENTO TERMICO.

Para esta prueba se utilizó un horno marca LINDBERG modelo 151333 que utiliza 240 volts, realiza el calentamiento a base de resistencias eléctricas y cuenta con un control de temperatura alcanzando 1500 °C como temperatura máxima.

Fue necesario preparar 20 probetas recubiertas, identificando cada una de ellas con un número del 6 al 25 para luego agruparlas en conjuntos de 10 para ser introducidas al horno de tratamientos térmicos como se indica en las tablas 3.1 y 3.2 que se presentan a continuación:

TABLA 3.2 PROBETAS SOMETIDAS A TRATAMIENTO TÉRMICO (RECOCIDO) DE 1 HORA

No. De Probeta	Temperatura de inmersión °C	Temperatura del horno °C	Tiempo dentro del horno (Horas)
6	730	400	1
7	730	400	1
8	730	400	1
9	730	400	1
10	730	400	1
11	730	400	1
12	730	400	1
13	730	400	1
14	730	400	1
15	730	400	1

TABLA 3.3 PROBETAS SOMETIDAS A TRATAMIENTO TÉRMICO (RECOCIDO) DE 2 HORAS

No. De Probeta	Temperatura de inmersión °C	Temperatura del horno °C	Tiempo dentro del horno (Horas)
16	730	400	2
17	730	400	2
18	730	400	2
19	730	400	2
20	730	400	2
21	730	400	2
22	730	400	2
23	730	400	2
24	730	400	2
25	730	400	2

Concluido el proceso de tratamiento térmico se procedió a cortar las probetas y montarlas en baquelita para realizar la metalografía correspondiente y observar los cambios que se presentaron en las tres distintas capas que se formaron durante la etapa de recubrimiento.

III.3 PRUEBAS DE LAMINACIÓN

Este prueba tiene por objetivo observar los cambios que se presentan en las capas de recubrimiento, intermetálico y sustrato de nuestras probetas recubiertas con aluminio.

Esta prueba se realizó utilizando la laminadora dúo HILLE con capacidad de carga de 30 toneladas, en el cual se puede controlar la velocidad de laminación y el porcentaje de deformación.

Para la realización de esta prueba se tomaron las probetas identificadas con los números del 26 al 45 y antes de proceder a la laminación, las probetas se precalentaron por un tiempo de 25 minutos a 350 °C , los datos se presentan en las tablas 3.3 y 3.4.

TABLA 3.4 PROBETAS SOMETIDAS A UN PASO DE LAMINACIÓN

No. De Probeta	Velocidad de laminación (ft/min)	Deformación (milésimas de pulgada)	Número de pasos
26	10	20	1
27	10	20	1
28	10	20	1
29	10	20	1
30	10	20	1
31	10	20	1
32	10	20	1
33	10	20	1
34	10	20	1
35	10	20	1

TABLA 3.5 PROBETAS SOMETIDAS A DOS PASOS DE LAMINACIÓN

No. De Probeta	Velocidad de laminación (ft/min)	Deformación (milésimas de pulgada)	Número de pasos
36	10	20	2
37	10	20	2
38	10	20	2
39	10	20	2
40	10	20	2
41	10	20	2
42	10	20	2
43	10	20	2
44	10	20	2
45	10	20	2

Concluido este proceso de laminación se procedió a cortar las probetas y montarlas en baquelita para realizar la metalografía correspondiente y observar los cambios que se presentaron en las tres distintas capas que se formaron durante la etapa de recubrimiento.

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo el punto de interés es el estudio de los resultados obtenidos en los diferentes procesos, a las que fueron sometidas las probetas empleadas durante el desarrollo de esta investigación.

1.- Primero se procedió a realizar la metalografía y la toma de fotografías de las probetas numeradas del 1 al 5, las cuales fueron sometidas solo al baño de aluminio y son las que consideramos como probetas de referencia.

Los resultados obtenidos durante el ensayo de medición de espesor y las metalografías a 200X de los recubrimientos que se presentan en las imágenes 4.1 a la 4.5, muestran que existe un recubrimiento y una zona intermetálica, la cual es formada por el proceso de difusión. De acuerdo con la literatura se deberían formar principalmente tres fases intermetálicas: FeAl_2 (x), Fe_2Al_5 (h) y FeAl_3 (q). Este proceso permite la formación de dos regiones de aluminio, una región externa y una interna. Siendo que la región interna queda formada por el intermetálico FeAl_3 y con granos columnares direccionados.^[20]

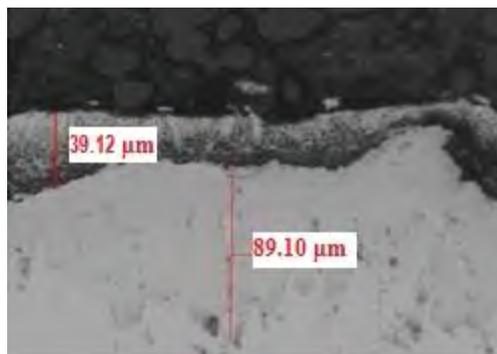


IMAGEN 4.1

La imagen 4.1 fue tomada a 200X, y muestra que en la probeta existen tres regiones, una es la que corresponde al sustrato (acero 1018), y las otras dos a las zonas correspondientes a la generación del recubrimiento, que son: zona intermetálica (acero-aluminio) de 89.10 μm de espesor, y la capa de recubrimiento de aluminio de 39.12 μm de espesor.

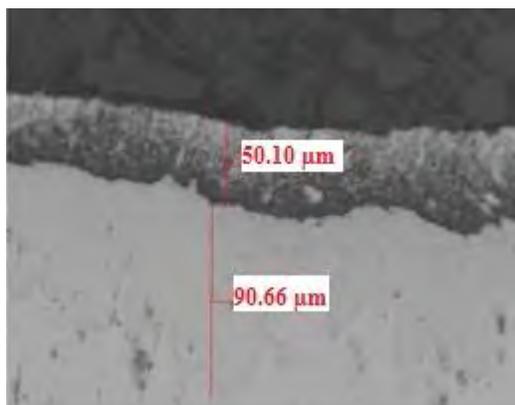


IMAGEN 4.2

La imagen 4.2 fue tomada a 200X y muestra un recubrimiento y una zona intermetálica con un crecimiento no uniforme, las cuales tienen un espesor de 50.1 μm y 90.66 μm respectivamente.

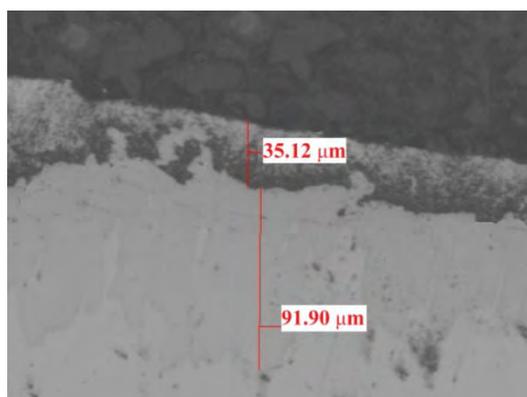


IMAGEN 4.3

La imagen 4.3 muestra una zona intermetálica de espesor 91.90 μm y un recubrimiento irregular de espesor 35.12 μm .

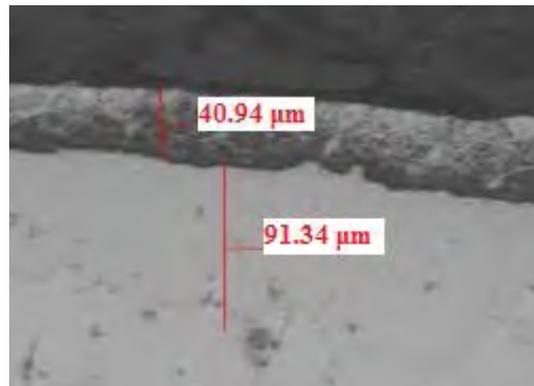


IMAGEN 4.4

La imagen 4.4 tomada a 200X muestra un recubrimiento uniforme de espesor $40.94 \mu\text{m}$ y una zona intermetálica de $91.34 \mu\text{m}$ con un crecimiento no uniforme.

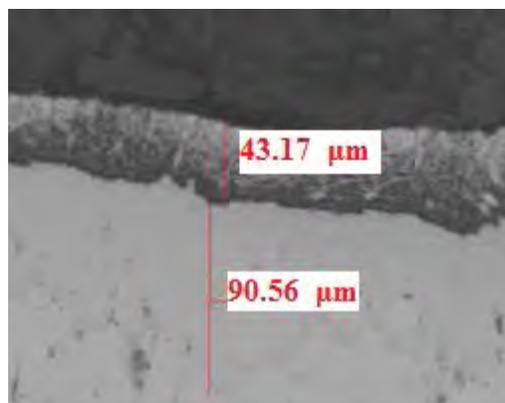


IMAGEN 4.5

La imagen 4.5 fue tomada a 200X y muestran un recubrimiento y una zona intermetálica con un crecimiento no uniforme, con espesor de $50.1 \mu\text{m}$ y $90.66 \mu\text{m}$ respectivamente

TABLA 4.1
ESPESOR DE LAS CAPAS DE RECUBRIMIENTO E INTERMETÁLICA

Imagen	Espesor de capa de aluminio (μm)	Espesor de capa intermetálica (μm)
4.1	39.12	89.10
4.2	50.10	90.66
4.3	35.12	91.90
4.4	40.94	91.34
4.5	43.17	90.56
PROMEDIO	41.69	90.71

Los datos obtenidos en la tabla anterior, se tomarán como referencia para poder establecer los cambios que se presentan después del tratamiento térmico y el proceso de laminación a las que son sometidas las probetas restantes.

2. Los resultados obtenidos durante la medición de espesor y las metalografías de los recubrimientos que se presentan en las imágenes 4.6 a la 4.15, después del tratamiento térmico, muestran que tanto el recubrimiento de aluminio y la zona intermetálica se vieron afectadas, y el crecimiento de la zona intermetálica cambia de columnar a homogénea.

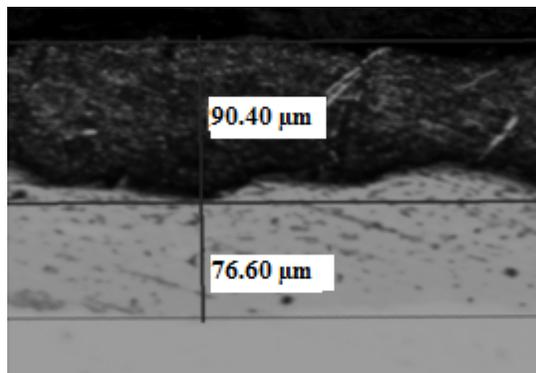


IMAGEN 4.6

La imagen 4.6 fue tomada a 100X, y muestra que después del tratamiento térmico de una hora, la zona intermetálica no presentó un cambio significativo en su espesor de acuerdo a los datos obtenidos de las imágenes anteriores que se utilizan como referencia.

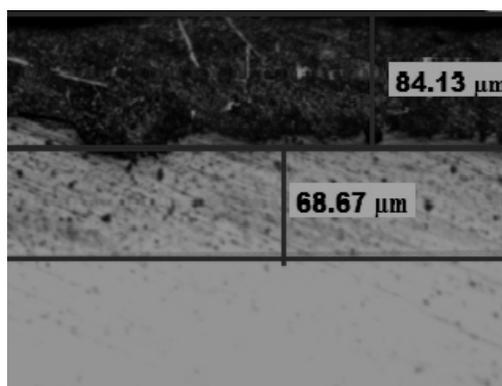


IMAGEN 4.7

La imagen 4.7 tomada a 200X, de acuerdo a las probetas de referencia muestra que el crecimiento en la zona intermetálica cambia de columnar a uniforme.

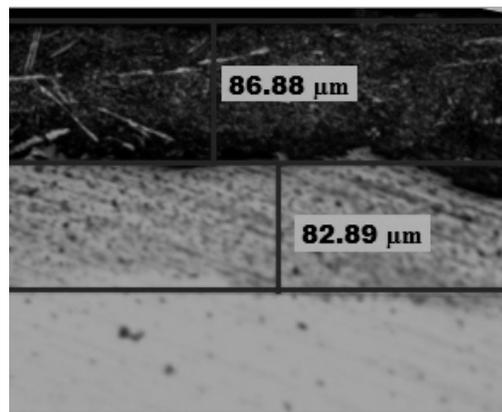


IMAGEN 4.8

En la imagen 4.8 tomada a 200X, se puede observar que la zona intermetálica tiene un crecimiento uniforme después de concluido el recocido de una hora con respecto a las probetas de referencia, y el recubrimiento de aluminio no sufrió cambios importantes.

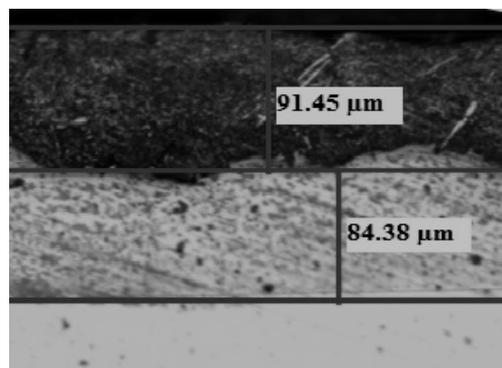


IMAGEN 4.9

La imagen 4.9 tomada a 200X, muestra un recubrimiento irregular, y una zona intermetálica que no presenta variación alguna, tiene un espesor de 84.38 μm, se encuentra dentro de los rangos de las probetas de referencia.

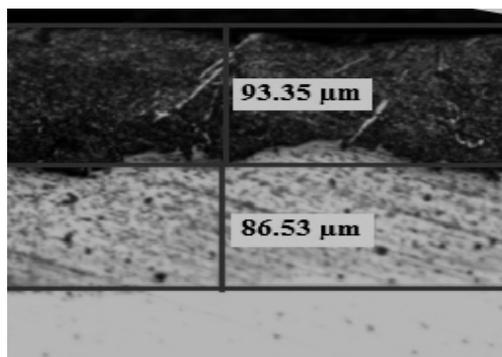


IMAGEN 4.10

La imagen 4.10 tomada a 200X no muestra un cambio importante en la zona intermetálica y un recubrimiento después del tratamiento térmico.

TABLA 4.2

ESPEORES DE LAS CAPAS DE RECUBRIMIENTO E INTERMETÁLICA, OBTENIDOS DESPUÉS DE APLICAR EL TRATAMIENTO TÉRMICO DE 1 HORA.

Imagen	Espesor de capa de aluminio (μm)	Espesor de capa intermetálica (μm)	Temperatura de tratamiento ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de tratamiento (Horas)
4.6	90.40	76.60	400	1
4.7	84.13	68.67	400	1
4.8	86.88	82.89	400	1
4.9	91.48	84.38	400	1
4.10	93.35	86.53	400	1
Promedio	89.24	79.81	400	1

En las siguientes imágenes se puede observar que entre mayor es el tiempo de exposición al tratamiento térmico mayor es el espesor del intermetálico esto se ve reflejado en las siguientes imágenes que al igual que el experimento anterior se tiene un crecimiento homogéneo.

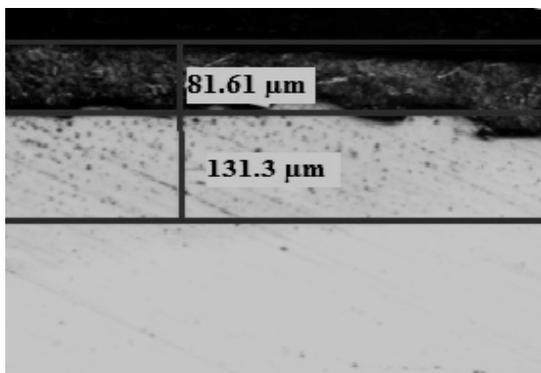


IMAGEN 4.11

La imagen 4.11 fue tomada a 100X, y nos permite observar que después del tratamiento térmico, el recubrimiento de aluminio se uniformiza y la zona intermetálica presenta una considerable variación en su espesor de acuerdo a nuestras probetas de referencia.

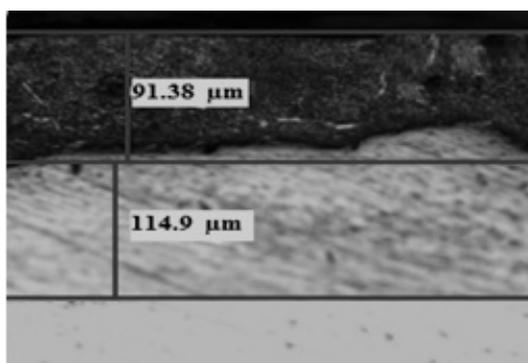


IMAGEN 4.12

La imagen 4.12 tomada a 200X muestra que el recubrimiento de aluminio es uniforme de espesor 91.38 μm y la zona intermetálica después del tratamiento térmico tuvo un cambio considerable en su espesor llegando a medir 114.9 μm.

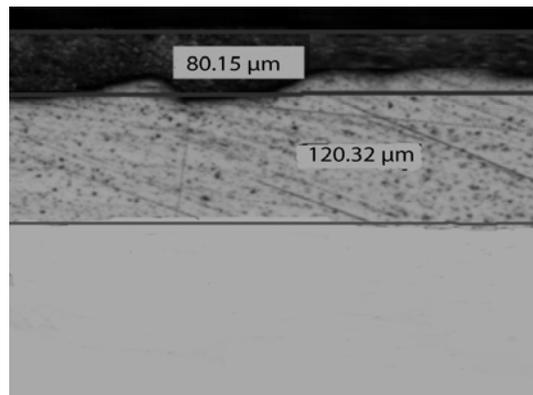


IMAGEN 4.13

La imagen 4.13 tomada a 100X muestra que las capas de recubrimiento e intermetálica no son uniformes, pero sus respectivos espesores de 80.15 μm y 120.32 μm, demuestran que hubo un importante cambio después de recibir el tratamiento térmico.

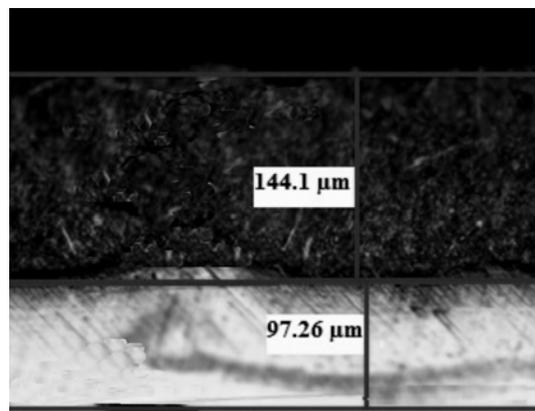


IMAGEN 4.14

La imagen tomada a 200X muestra los crecimientos uniformes de la zona intermetálica y el recubrimiento, las cuales no presentan variaciones considerables en su espesor después de recibir el tratamiento térmico.

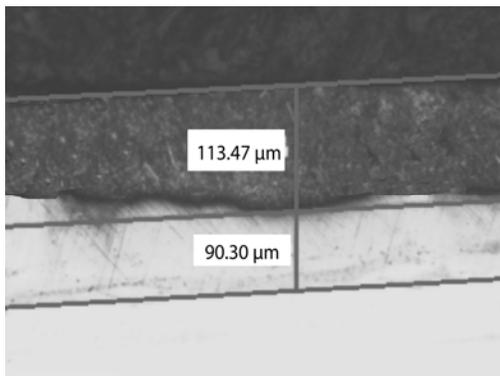


IMAGEN 4.15

La imagen 4.15 tomada a 100X muestran un recubrimiento y una zona intermetálica no uniformes, la que resultó con afectación después del tratamiento térmico fue la capa intermetálica que tiene un espesor final de 90.30 μm.

TABLA 4.3

ESPEORES DE LAS CAPAS DE RECUBRIMIENTO E INTERMETÁLICA, OBTENIDOS DESPUÉS DE APLICAR EL TRATAMIENTO TÉRMICO DE 2 HORAS.

Imagen	Espesor de capa de aluminio (μm)	Espesor de capa intermetálica (μm)	Temperatura de tratamiento (°C)	Tiempo de tratamiento (Horas)
4.11	81.61	131.3	400	2
4.12	91.38	114.9	400	2
4.13	80.15	120.32	400	2
4.14	144.1	97.26	400	2
4.15	113.47	90.30	400	2
Promedio	102.14	110.81	400	2

3.- En las siguientes imágenes se observan los cambios que presentaron al someter las probetas al proceso de laminación, y como podemos observar tanto la zona intermetálica como el recubrimiento tienen una mayor uniformidad, además de que la zona intermetálica tiene un crecimiento columnar.

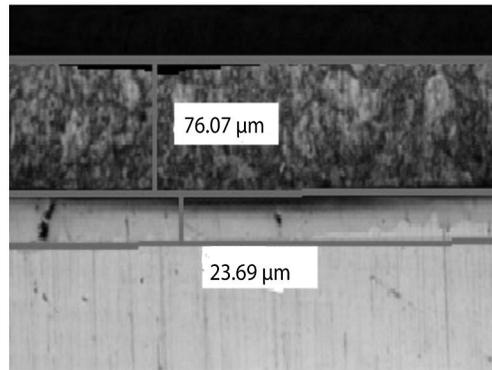


IMAGEN 4.16

La imagen 4.16 tomada a 100X muestra un recubrimiento uniforme con un espesor de 76.07 μm , así mismo la zona intermetálica se vio afectada después de aplicarle el proceso de laminación ya que el espesor se redujo a 23.69 μm lográndose una muy buena uniformidad.

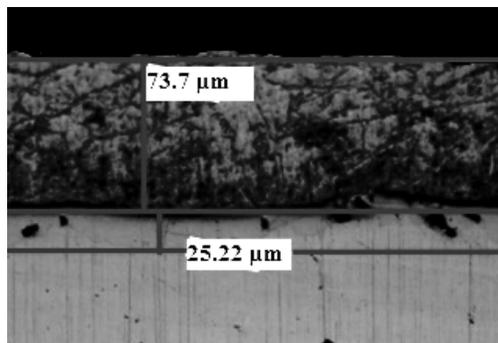


IMAGEN 4.17

La imagen 4.17 a 100X muestra un recubrimiento uniforme con un espesor de 73.7 μm , y una zona intermetálica de espesor menor a las probetas de referencia pero con mayor uniformidad.

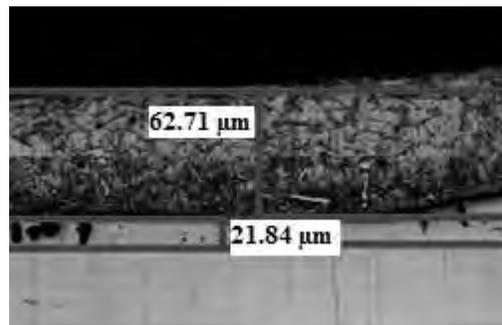


IMAGEN 4.18

En la imagen 4.18 tomada a 100X, se puede observar la uniformidad del recubrimiento e intermetálico con unos espesores que se vieron reducidos después de aplicarles el proceso de laminación.

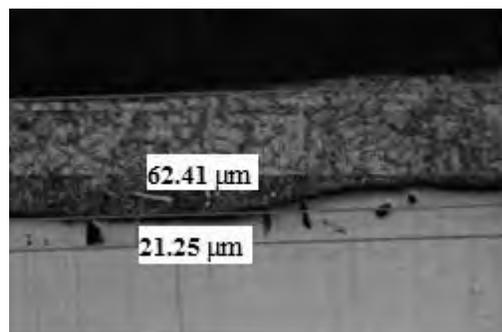


IMAGEN 4.19

La imagen 4.19 fue tomada a 100X y permite observar que el espesor de la zona intermetálica disminuyó de manera considerable, además de que se logró una mayor uniformidad en el recubrimiento e intermetálico comparada con los valores de referencia.

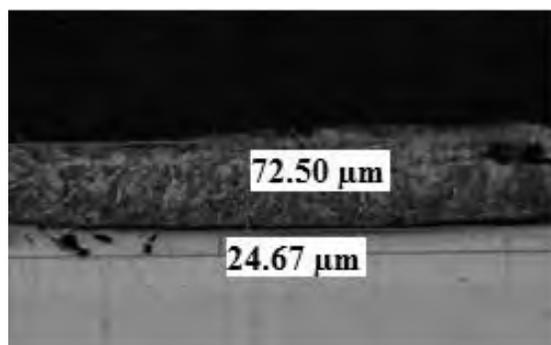


IMAGEN 4.20

La imagen 4.20 tomada a 100X muestra que después del proceso de laminación se logró uniformizar las capas de recubrimiento e intermetálica, y que el espesor del intermetálico está muy por abajo del promedio de referencia.

TABLA 4.4

ESPEORES DEL RECUBRIMIENTO E INTERMETÁLICO, OBTENIDOS DESPUÉS DE APLICAR EL PROCESO DE LAMINACIÓN.

Imagen	Espesor de capa de aluminio (μm)	Espesor de capa intermetálica (μm)	Deformación por paso (milésimas)	Número de pasos
4.16	76.07	23.69	20	1
4.17	73.70	25.22	20	1
4.18	62.71	21.84	20	1
4.19	62.41	21.25	20	1
4.20	72.50	24.67	20	1
Promedio	69.47	23.33	20	1

En las siguientes imágenes se observa las probetas después de aplicar dos pasos del proceso de laminación.

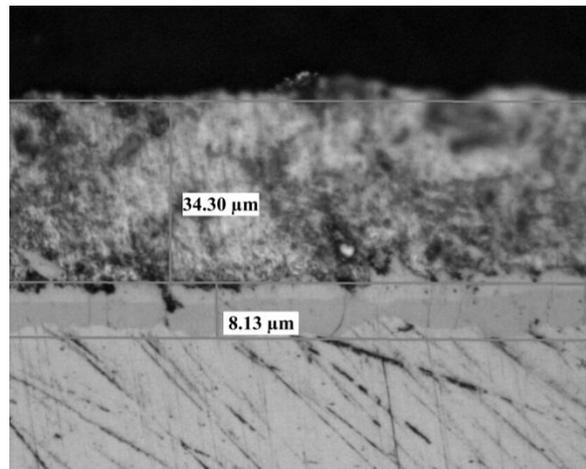


IMAGEN 4.21

La imagen 4.21 tomada a 1000X muestra una capa de recubrimiento uniforme con un espesor de 34.30 μm, así mismo la capa intermetálica se vio afectada después de la laminación ya que el espesor se redujo a 8.13 μm obteniéndose uniformidad en ambas capas.

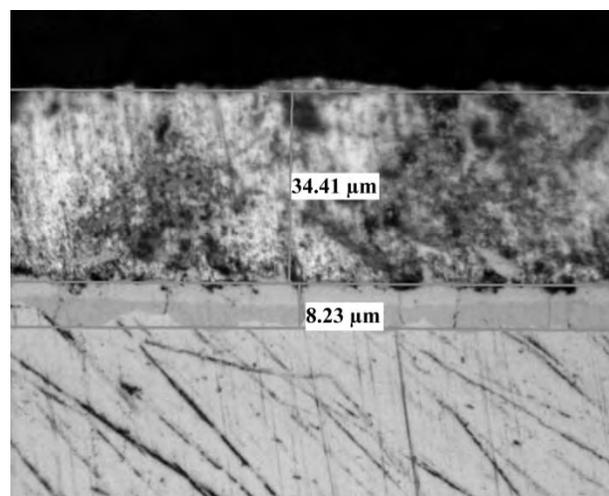


IMAGEN 4.22

La imagen 4.22 a 1000X muestra una capa uniforme de recubrimiento y una capa intermetálica de espesor menor a las probetas de referencia pero con mayor uniformidad.

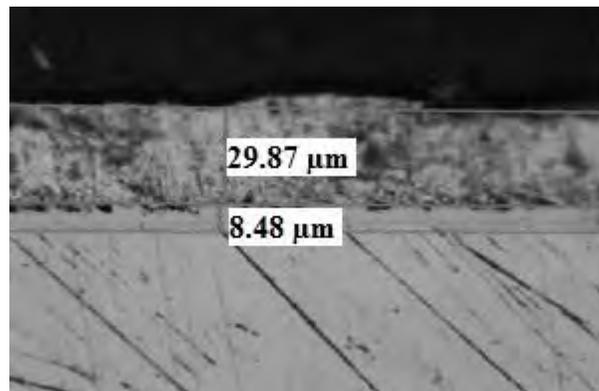


IMAGEN 4.23

En la imagen 4.23 tomada a 1000X, se puede observar la uniformidad de las capas de recubrimiento e intermetálica con unos espesores que se vieron afectados considerablemente después aplicar el procesos de laminación.

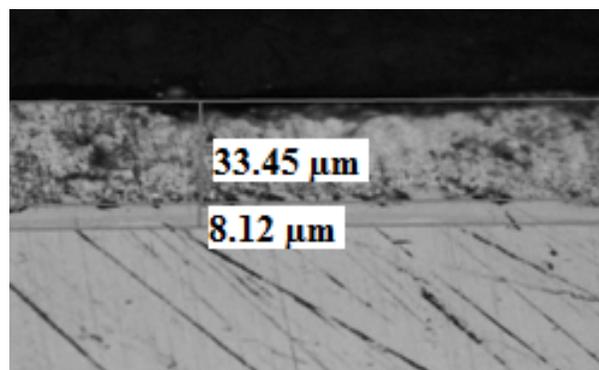


IMAGEN 4.24

La imagen 4.24 fue tomada a 1000X y permite observar la uniformidad en las zonas de recubrimiento e intermetálica comparada con los valores de referencia.

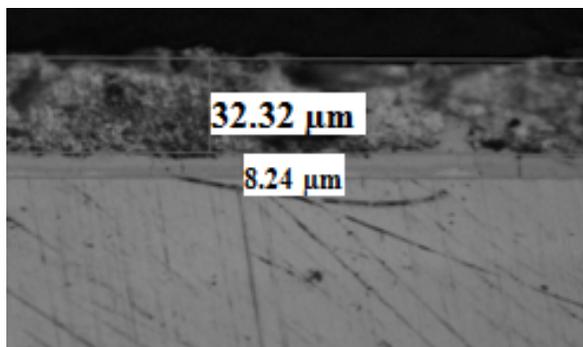


IMAGEN 4.25

La imagen 4.25 tomada a 1000X muestra que después del proceso de laminación se logró uniformizar las capas de recubrimiento e intermetálica, y el espesor del recubrimiento y el de la capa intermetálica se redujo considerablemente después de la laminación.

TABLA 4.5

ESPEORES DE LAS CAPAS DE RECUBRIMIENTO E INTERMETÁLICA, OBTENIDOS DESPUÉS DE RECIBIR EL PROCESO DE LAMINACIÓN.

Imagen	Espesor de capa de aluminio (μm)	Espesor de capa intermetálica (μm)	Deformación por paso (milésimas)	Número de pasos
4.21	34.30	8.13	20	2
4.22	34.41	8.23	20	2
4.23	29.87	8.48	20	2
4.24	33.45	8.12	20	2
4.25	32.32	8.24	20	2
Promedio	32.87	8.240	20	2

ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a las imágenes 4.1 a la 4.5 se observa que existen tres zonas; la del sustrato (Acero 1018), el del recubrimiento de aluminio y la zona intermetálica en la cual se observa un crecimiento columnar.

Después de que las probetas fueron sometidas a tratamiento térmico a 400 °C durante una hora y dos horas, se observa que la zona intermetálica aumenta su espesor a mayor tiempo de tratamiento térmico, y adquiere mayor homogeneidad, de acuerdo con la literatura el calentamiento ulterior o el mantenimiento a la temperatura dada, provoca el crecimiento de los granos que difunden dentro de la matriz. Este es un proceso que aumenta su cinética a medida que se registra un incremento en la temperatura del proceso.^[21]

En el proceso de laminación se observa que las probetas adquirieron una mayor uniformidad en las zonas de recubrimiento e intermetálico. La zona intermetálica sufrió una reducción, observándose que a mayor número de pasos la capa intermetálica sufre mayor reducción en su espesor, esto se debe al acomodo y alargamiento de granos en dirección longitudinal a la laminación que es perpendicular al corte realizado para observar las metalografías y de acuerdo a la literatura la microestructura austenítica con tamaño de grano fino se transforma al final de la laminación en una estructura ferrítica de grano pequeño, ya que se destruye mecánicamente la estabilidad de la fase austenítica a mayor cantidad de pasos de laminación mayor será el fraccionamiento y compactación de la microestructura.^[22]

Con los resultados obtenidos podemos establecer que la forma de generar un recubrimiento de mejores características, es aplicando un tratamiento térmico para lograr

difusión que promueve una profunda penetración del recubrimiento en el metal base. Así mismo, se establece que para el objetivo de esta investigación los mejores resultados se obtuvieron con un tratamiento térmico de 2 horas a una temperatura de 400 °C, ya que en ese tiempo se logra, como ya se comentó, una mayor interpenetración del recubrimiento. Después de haber obtenido la difusión se recomienda dar un proceso de laminado, esto es para poder dar homogeneidad al recubrimiento y así obtener un mejor acabado superficial ya que durante los pasos de laminación se promueve el reacondicionamiento y eliminación de defectos superficiales formados durante el proceso de inmersión en caliente. Dicho proceso de laminación, de acuerdo a estos resultados, es conveniente llevarlo a cabo con un paso de laminación de 20 milésimas de pulgada, pues al observar experimentalmente que si se le aplica un mayor número de pasos o la deformación es más grande que 20 milésimas el recubrimiento de aluminio tiende a reducir su espesor y puede ocurrir que se fracture y se desprenda del acero. Tal y como se observó en las pruebas de laboratorio obtenidas. La fig.5.1 muestra el efecto perjudicial de una excesiva carga de laminación.

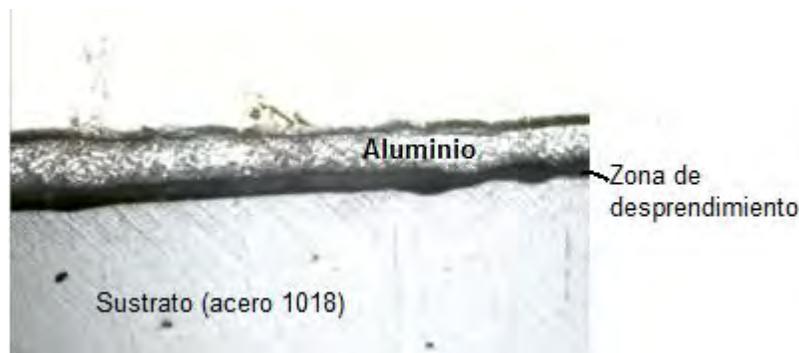


IMAGEN 5.1

La imagen 5.1 muestra el desprendimiento del recubrimiento de aluminio después de someterse la probeta a un proceso de laminado de 3 pasos de 20 milímetros de pulgada lo cual es perjudicial para el recubrimiento.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. A continuación se resumen los parámetros utilizados de tiempo y temperatura de inmersión para poder realizar el recubrimiento por el método de inmersión en caliente.

Parámetros de inmersión		Reactivos Químicos
Tiempo de desengrasado	10 minutos	Percloroetileno al 100%
Tiempo de decapado	4 minutos	Acido clorhídrico al 10% , Tiourea al 10% y agua destilada
Tiempo de fluxado	3 minutos	Cloruro de zinc al 15%, cloruro de amonio al 15% y agua destilada
Tiempo de inmersión	5 minutos	DEGASAL, ALUFIN y aluminio
Temperatura de inmersión	730 °C	Baño fundido de Al

2. Se obtuvieron un gran número de probetas recubiertas satisfactoriamente para poderlas someterlas a procesos de tratamiento térmico y de laminación, basándose en la norma de adherencia *NMX-H-004-SCFI-2008 como criterio de calidad para aceptar o rechazar las muestras.*

3. De acuerdo a los datos obtenidos se establece que para fines de esta investigación el mejor tiempo de tratamiento térmico para obtener una capa intermetálica de mejores características es el de dos horas, ya que la capa que se obtiene es uniforme.
4. Se determina que existe un mejor acabado superficial y mayor uniformidad a las capas obtenidas después de la inmersión, si se realiza un proceso de laminación de un paso con una deformación de 20 milésimas de pulgada.

RECOMENDACIONES PARA LA OBTENCIÓN DE RECUBRIMIENTOS POR INMERSIÓN.

1. Se recomienda seguir cuidadosamente el cumplimiento de todos y cada uno de los pasos a seguir durante el proceso de preparación superficial; pues éste resulta crítico para la obtención de un recubrimiento de óptimas características.
2. Para evitar obtener recubrimientos con mala adherencia es necesario realizar varias inmersiones de la pieza en el baño de recubrimiento.
3. Para trabajos futuros se recomienda caracterizar la capa intermetálica, en cuanto a dureza, desgaste, análisis químico, resistencia a la corrosión, mismos que no se realizaron en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ferrer Giménez Carlos, Vicente Amigó Borrás
Tecnología de Materiales
Primera edición
Alfaomega, 2005
2. Mangonon L. Pat.
Ciencia de Materiales Selección y Diseño
Primera edición
Pearson Education, 2001
3. Donald R. Askeland
Ciencia e ingeniería de los materiales
Thomson, 2005
4. Shackelford F. James
Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros
Pearson Educación, 2006
5. Loaiza Muñoz Rubén Darío
Tesis de Licenciatura: “Aluminizado por inmersión en caliente sobre metales ferrosos”
Escuela Superior Politécnica del Litoral
Facultad de Ingeniería en Mecánica
6. Norma *NMX-H-004-SCFI-2008*
7. C.W. Su, J.W. Lee, C.S. Wang, C.G. Chao, T.F. Liu
The effect of hot-dipped aluminum coatings on Fe-8Al-30Mn-0.8C alloy Surface and Coatings Technology, Volume 202, Issue 9
1 February 2008, Pages 1847-1852
8. Gul Hameed Awan, Faiz ul Hasan
The morphology of coating/substrate interface in hot-dip-aluminized steels Materials Science and Engineering: A, Volume 472, Issues 1-2
15 January 2008, Pages 157-165
9. Chaur-Jeng Wang, Shih-Ming Chen
Microstructure and cyclic oxidation behavior of hot dip aluminized coating on Ni-base superalloy Inconel 718 Surface and Coatings Technology, Volume 201, Issue 7
20 December 2006, Pages 3862-3866

10. T.L. Hu, H.L. Huang, D. Gan, T.Y. Lee
The microstructure of aluminized type 310 stainless steel Surface and Coatings Technology, Volume 201
December 2006, Pages 3502-3509
11. Chaur-Jeng Wang, Shih-Ming Chen
The high-temperature oxidation behavior of hot-dipping Al-Si coating on low carbon steel Surface and Coatings Technology, Volume 200, Issues 22-23
20 June 2006,
12. R. Rajendran, S. Venkataswamy, U. Jaikrishna, N. Gowrishankar, A. Rajadurai
Effect of process parameters in hot dip aluminizing of medium carbon steel
13. Kee-Hyun, Kim, Van-Daele, Benny, Van-Tendeloo, Gustaaf, and Jong-Kyu, Yoon
Observations of Intermetallic Compound Formation of Hot Dip Aluminized Steel.
14. Kee-Hyun, Kim, Van-Daele, Benny, Van-Tendeloo, Gustaaf, and Jong-Kyu, Yoon
Analysis of the Intermetallic Compound Formed in Hot Dip Aluminized Steel.
15. Li Yajiang, Wang Juan, Zhang Yonglan and X Holly
Fine structures in Fe3Al alloy layer of a new hot dip aluminized steel
16. Z.D. Xiang, P.K. Datta
Pack aluminisation of low alloy steels at temperatures below 700 °C
October 2003
17. S. Feliu Jr., V. Barranco
XPS study of the surface chemistry of conventional hot-dip galvanised pure Zn, galvaneal and Zn-Al alloy coatings on steel.
Julio 2003.
18. Kwang-Lung Lin, Ching-Hwei Chue, Buo Ching Kou
Deformation and corrosion of hot dip galvanized coatings
Enero 1997.
19. Camurri P. Carlos, Raúl Benavente G., Isidoro Roa S., Claudia Carrasco C.
Deformation and fatigue behavior of hot dip galvanized coatings
Mayo 2005

20. Paredes R. C, et al
“Revestimientos Protectores contra corrosión pelo ácido naftênico”;
In: XVI. Congreso Brasileño de Ingeniería Mecánica,
2001, Uberlândia. COBEM 2001.
21. Dr. C.T. Ing. Torres Alpizar Eduardo.
“Apuntes acerca de tratamiento térmico y la clasificación general de los aceros”.
Universidad de Matanzas
Noviembre del 2004.
22. Ramos Gema T., Bueno Tokunaga Arturo, Rendón Garfía Nallely
“Estudio de la recristalización secundaria en aceros de bajo carbono laminado”
Revista Latinoamericana de Metalurgia y materiales 2007; 27 (1): 59-67