

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA



DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL

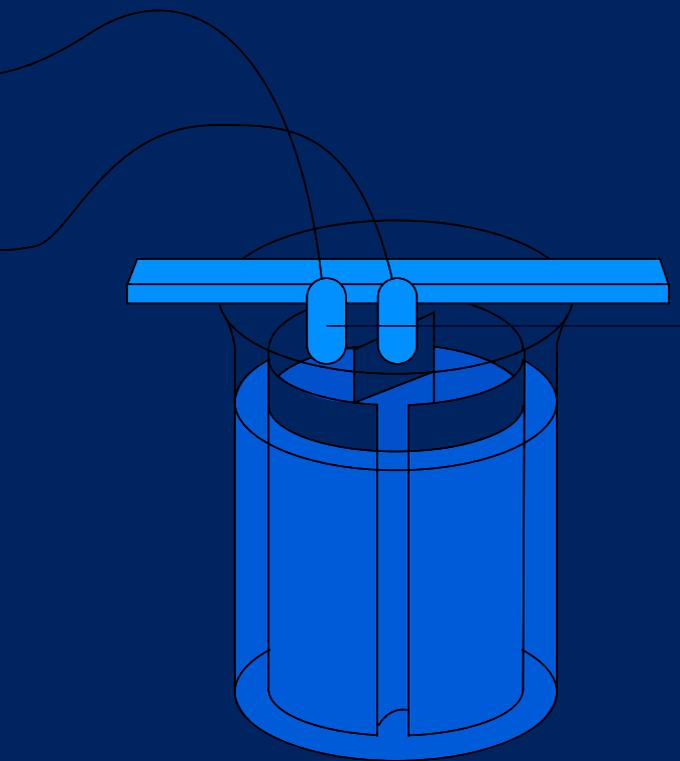


Cuaderno de prácticas de
**INGENIERÍA
DE SUPERFICIES**

Alba Covelo Villar
Arturo Barba Pingarrón
Miguel Ángel Hernández Gallegos

Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA)

Cuaderno de prácticas de
**INGENIERÍA
DE SUPERFICIES**



Alba Covelo Villar
Arturo Barba Pingarrón
Miguel Ángel Hernández Gallegos

Cuaderno de prácticas de Ingeniería de Superficies
Covelo Villar, Alba, Barba Pingarrón, Arturo
Hernández Gallegos, Miguel Ángel
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería, 2022, 118 págs.

Cuaderno de prácticas de Ingeniería de Superficies

Primera edición electrónica de un ejemplar
(5 MB) en formato PDF
Publicado en línea: 11 de agosto de 2022

D.R. © 2022, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida
Universidad 3000, Col. Universidad Nacional Autónoma de México,
Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 04510,
México, CDMX.

FACULTAD DE INGENIERÍA
<http://www.ingenieria.unam.mx/>

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad
Nacional Autónoma de México. Prohibida la reproducción o
transmisión total o parcial por cualquier medio sin la autorización
escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Hecho en México.



Unidad de Apoyo Editorial
Cuidado de la edición: María Cuairán Ruidíaz
Formación editorial : Nismet Díaz Ferro

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este Cuaderno de Prácticas de Ingeniería de Superficies desean manifestar su agradecimiento a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM por el apoyo brindado para la realización de este producto, a través del Proyecto PAPIME 100218 «*Programa para la Actualización y Mejora de la Enseñanza y Aprendizaje de Temas de Materiales, Manufactura e Ingeniería de Superficies*», y los proyectos PAPIIT IT100221 «*Desarrollo de Tecnologías Alternativas de Modificación de Superficies para la Mejora de Materiales de Potencial Industrial*» y PAPIIT IT101318 «*Desarrollo de Tecnologías de Superficie para la Optimización de Componentes y Sistemas*».

ÍNDICE

Prácticas

	Prólogo	..... 6
1	Granallado y rugosidad	..... 9
2	Evaluación del desgaste de materiales	..... 19
3	Inmersión en caliente: Galvanizado de acero de bajo carbono	..... 28
4	Tratamiento termoquímico. Galvanizado por difusión en cobre	..... 38
5	Recubrimientos electrolíticos: Cobrizado del acero	..... 47
6	Niquelado químico	..... 55
7	Tratamientos de conversión química y anodizado	..... 65
8	Efecto de la preparación superficial en la adherencia de recubrimientos obtenidos por proyección térmica por flama	..... 78
9	Caracterización de recubrimientos orgánicos	..... 88
10	Tratamientos térmicos superficiales	..... 98
11	Tratamientos térmicos de aceros: criogenia	.... 109

PRÓLOGO

La superficie es un área especialmente sensible de los materiales en la cual se originan y desarrollan varios de los principales procesos de deterioro de ellos (fatiga, desgaste, dureza o corrosión, por mencionar los más importantes), que provocan sustanciales pérdidas económicas, gastos excesivos de energía, necesidad de sobrediseños, paros de producción, afectaciones en la movilidad personal, etc.

La Ingeniería de Superficies es una rama de la Ingeniería que se ha hecho presente en tiempos recientes (aun cuando, diversas técnicas de recubrimiento se han aplicado desde hace muchos años), que se dirige a modificar la superficie de los materiales, con el fin de alargar la vida útil de piezas y componentes.

En el ámbito de la investigación y la industria, la Ingeniería de Superficies ha cobrado mayor relevancia a nivel internacional desde hace un par de décadas y, en el caso particular de México, esta se ha venido desarrollando de modo incipiente en ambos sectores. En las instituciones educativas de nuestro país son aún pocas las entidades que incluyen alguna asignatura a nivel licenciatura o posgrado ligada a este tema.

A partir de esta problemática y en busca de atenuar los efectos de estos procesos de deterioro, han surgido diversas tecnologías para recubrir, modificar o tratar superficialmente a los materiales con el afán de mejorar sus propiedades, y por ende, mejorar el desempeño frente a condiciones mecánicas, físicas y químicas agresivas.

Con esta situación en mente, asociado a la asignatura Ingeniería de Superficies y con el principal propósito de colaborar a preparar recursos humanos altamente calificados en esta rama, un grupo de profesores han unido sus esfuerzos para elaborar este *Cuaderno de Prácticas de Ingeniería de Superficies* que agrupan una serie de experiencias con un enfoque actualizado, que busca que los estudiantes puedan conocer los principios y los más destacados grupos de tecnologías de superficie, el efecto de diferentes parámetros de operación en las características de las piezas recubiertas y diversas técnicas de caracterización de materiales aplicadas a la Ingeniería de Superficies, con lo que consideramos que los estudiantes obtendrán una panorámica representativa de este campo de la Ingeniería.

El Cuaderno contiene, en una primera parte, la valoración de características tales como la rugosidad y de procesos de preparación de superficies como el granallado y la limpieza previa. Posteriormente se presenta un ejercicio práctico ligado a la evaluación del desgaste de materiales. A continuación, se revisan diferentes tecnologías convencionales para recubrir materiales y tratarlos superficialmente como son los recubrimientos electrolíticos y los de conversión, los procesos por inmersión en caliente y los tratamientos termoquímicos a los que se añaden, en una siguiente parte, procesos aparecidos más recientemente como los recubrimientos químicos de níquel, los revestimientos obtenidos a través de procedimientos de proyección

térmica y los recubrimientos de tipo orgánico, a los que se añade finalmente el tratamiento superficial empleando diversas energías concentradas y el tratamiento térmico utilizando enfriamientos a muy bajas temperaturas, conocido como tratamientos criogénicos.

Es el deseo de este grupo de profesores, el que esta primera versión de este *Cuaderno de Prácticas de Ingeniería de Superficies* pueda contribuir al crecimiento y difusión de esta rama de la ciencia en nuestro país.



Elaborado por:

Grupo del CENISA,
Facultad de Ingeniería, UNAM

Carrera	Plan de estudio	Clave de la asignatura	Nombre de la asignatura
Ing. Mecánica	2006	0999	Ingeniería de Superficies
Ing. Mecatrónica			

Práctica No.	Laboratorio de	Nombre de la práctica	Duración
1	Ingeniería de Superficies	Efecto de los parámetros de operación del granallado en la rugosidad de una superficie	2 Horas



Objetivos

El alumno:

- ❖ Será capaz de valorar experimentalmente la rugosidad de una superficie mediante el empleo de un rugosímetro.
- ❖ Evaluará el efecto del empleo de diversos sustratos en la rugosidad obtenida con piezas granalladas con óxido de aluminio bajo las mismas condiciones de operación.
- ❖ Valorará el efecto de parámetros de operación, como la presión empleada en la rugosidad generada en un sustrato específico granallado.

Introducción

La superficie de un material no es perfecta y contiene una serie de imperfecciones que originan lo que se conoce como rugosidad de un material y que reflejan, precisamente, las desviaciones respecto a una superficie ideal. Es importante poder evaluarla, en razón de que puede tener una participación importante en el comportamiento tribológico de la superficie de un material y por tanto en fenómenos de fricción y en procesos de deterioro, tales como desgaste e incluso corrosión, además de poder incidir en propiedades como la adherencia de un recubrimiento, y jugar un papel importante en muchos procesos de maquinado (mecanizado).

La mayor o menor rugosidad de una superficie depende de su **acabado superficial**. En el Sistema Internacional la unidad de rugosidad es el micrómetro o micra. Esta medida se indica en los planos constructivos de las piezas mediante signos y valores numéricos, de acuerdo a la normas de calidad existentes, que varían entre países.

Para medir la rugosidad de las piezas se utilizan instrumentos electrónicos llamados rugosímetros, que miden la profundidad de la rugosidad media (R_z) y el valor de la rugosidad media (R_a) expresada en micras y que muestran la lectura de la medida en una pantalla o en un documento gráfico.

Una manera común de reportar la rugosidad es a través del parámetro R_a , que define la desviación promedio del perfil de la superficie, respecto de la línea media, aunque no necesariamente siempre refleja con exactitud la situación de la rugosidad superficial. También resulta conveniente tener presente que el área aparente entre dos superficies en contacto no corresponde al área real de contacto, que se define como la suma de todas las uniones átomo-átomo de dos superficies en contacto.

De ahí la importancia de conocer algunas técnicas para modificar la rugosidad de una superficie y poder conocer, asimismo, las relaciones entre la rugosidad y la adherencia de un recubrimiento o la rugosidad y el comportamiento en desgaste de un material.

Una estrategia para incrementar la rugosidad de una superficie es la de granallarla a través de impactar partículas usualmente de materiales

cerámicos de elevada dureza, tales como óxido de aluminio, carburo de silicio, óxido de silicio y otros más, empleando equipos que utilizan diversas presiones, en equipos conocidos como granalladoras, que pueden ser fijos o portátiles.

El principio de operación de un rugosímetro es muy simple: una fina punta, por lo regular de diamante o carburo de tungsteno, realiza un barrido en línea recta sobre la superficie del metal, a través de la cual analiza las variaciones del material que luego son convertidas en señales eléctricas para ser registradas o graficadas. El tiempo de medición de un rugosímetro toma pocos segundos, en realidad es el mismo tiempo que demora la punta en hacer el recorrido sobre la superficie de la pieza.

Existen, en términos generales, dos clases de rugosímetros, según su tipo de palpación: los de contacto y los de no contacto. Los de contacto se caracterizan porque tienen una punta o palpador, cuya función es tomar los datos, previo barrido sobre la pieza; y los de no contacto analizan el material mediante una línea láser.

Rugosímetro con palpador: Estos equipos se componen de un palpador, que se desplaza automáticamente y realiza un recorrido sobre la superficie de la pieza por analizar y un amplificador que muestra o registra el estado superficial, es decir las irregularidades que encuentra durante el muestreo.

Rugosímetro láser con palpador. Es un dispositivo de medición de superficies que no trabaja con sistema de amplificación, como los

rugosímetros convencionales, sino que utiliza la amplificación de luz por emisión estimulante de radiación.

Rugosímetro de palpador láser. Esta herramienta carece de un palpador físico y en su lugar se utiliza la emisión de luz con longitud de onda de 800 nm, lo cual sustituye a la aguja palpadora y amplificadora tradicional. Puede ser de palpador láser capacitivo o de palpador piezoeléctrico.

El arenado, granallado o chorreado abrasivo es la operación de propulsar a alta presión un fluido, que puede ser agua o aire, o una fuerza centrífuga con fuerza abrasiva, contra una superficie para limpiarla o generar una nueva topografía superficial. Se pueden emplear diversos abrasivos. Algunos de los más comunes son el óxido de silicio, el carburo de silicio o el óxido de aluminio.

El granallado se utiliza en prácticamente todas las industrias de metales como: la aeronáutica, la del automotriz, la de la construcción, la de fundición, la naval o la del ferrocarril. En el método más habitual, el abrasivo se acelera de forma neumática mediante aire comprimido y se proyecta a través de boquillas sobre el componente.

El granallado se ha utilizado para realizar procesos tales como:

- ❖ **Desarenado y eliminación** de laminillas de piezas de fundición ferrosas y no ferrosas, piezas forjadas, etc.
- ❖ **Decapado mecánico** de alambres, barras, chapas, placas, etc.

- ❖ **Shot Peening**, proceso que aumenta la resistencia a la fatiga de resortes, elásticos, engranajes, etc.
- ❖ **Limpieza y preparación de superficies** de piezas varias donde serán aplicados revestimientos posteriores (proyección térmica, pintura, hule, etc.).

En forma general, se puede decir que en el granallado se emplean velocidades de las partículas abrasivas, comúnmente del orden de 65 a 110 m/s. El tipo de material, el tamaño y forma de las partes y la condición de la superficie por limpiar, más la especificación que define la terminación superficial, tienen influencia directa sobre la selección del sistema de granallado, del abrasivo, y la definición del procedimiento. Hay casos en que pueden ser necesarios otros métodos de limpieza antes y después del granallado, para lograr mejores resultados en los revestimientos.

En el caso del sistema con aire comprimido, se considera de bajo rendimiento, por lo cual es más adecuado para trabajos pequeños donde no sean necesarios caudales altos de producción o bien en la preparación de superficies de estructuras complejas o de gran porte que reemplazan a las herramientas manuales. También la característica de ser flexible, aunque en términos del rendimiento, se considera de alto costo.

Material:

- ❖ Piezas de diversos materiales metálicos que serán granalladas
- ❖ Insumos de preparación metalográfica (lijas de agua, alúmina, resina)
- ❖ Pinzas metálicas, lentes de protección
- ❖ Vernier
- ❖ Alúmina para realizar el granallado
- ❖ Reactivos químicos para limpieza de materiales metálicos

Equipo:

- ❖ Pistola de granallado, con la adecuada presión de aire asociada
- ❖ Equipo de preparación metalográfica (pulidora, empastilladora)
- ❖ Rugosímetro
- ❖ Microscopio óptico metalográfico
- ❖ Durómetro

Desarrollo

1. Limpiar, mediante los procedimientos adecuados, usando los reactivos químicos apropiados, las probetas a las que se va a determinar posteriormente la rugosidad (en caso de ser necesaria dicha limpieza).
2. Medir la rugosidad de todas y cada una de las piezas por granallar realizando al menos tres mediciones en diferentes zonas y obtener el promedio de las mediciones y reportar el R_a .

3. Determinar la dureza de cada una de las piezas por granallar, obteniendo el valor promedio de al menos tres mediciones.
4. Granallar cada una de las probetas elegidas, de los diferentes materiales, utilizando los mismos parámetros de operación del granallado para todas ellas.
5. Ahora granallar una serie de probetas del material seleccionado (bajo la supervisión del profesor), usando al menos dos condiciones de parámetros de granallado.
6. Evaluar la rugosidad de las piezas granalladas llevando a cabo al menos tres mediciones en diferentes zonas y obtener el promedio de las mediciones y reportar el R_a .

Resultados

1. Elaborar una tabla en la que se reúnan los valores de dureza, rugosidad inicial, rugosidad posterior al granallado, parámetros de granallado de los diferentes materiales.
2. Generar una gráfica de rugosidad de las piezas granalladas, de diferentes materiales, en relación con la dureza de los diversos materiales.
3. Generar otra gráfica (o varias gráficas) donde se relacionen algún o algunos parámetros de granallado con la rugosidad obtenida.
4. Obtener una serie de imágenes de las piezas granalladas mostrando las diferentes morfologías conseguidas a través de las diversas condiciones y parámetros de operación de la operación de granallado utilizadas.

- a) Analizar las gráficas obtenidas y explicar las relaciones entre el proceso de granallado, sus parámetros de operación y la rugosidad obtenida, así como las conexiones entre la dureza del sustrato y las condiciones del proceso de granallado.

Resuelva las siguientes cuestiones:

1. ¿Qué otros parámetros se pueden utilizar para reportar la rugosidad de un material?
2. ¿Con qué otros equipos se puede realizar la evaluación de la rugosidad de la superficie de un material? Poner imágenes de equipos y de piezas granalladas.
3. Investigue qué importancia tiene la rugosidad de una pieza para realizar un proceso de pintado, un proceso de proyección térmica (*thermal spray*) y un proceso de maquinado. Describir al menos dos ejemplos.
4. Coloque al menos dos imágenes de piezas granalladas de diferentes materiales metálicos, obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido y microscopía de fuerza atómica (dos de cada uno de esos tipos de microscopio).
5. Enliste tres técnicas de procesamiento industrial de materiales mediante los cuales sea posible modificar la rugosidad de un material.

El alumno emitirá conclusiones sobre:

- a) La relación entre rugosidad y parámetros de operación del granallado empleados para un mismo sustrato.
- b) La relación entre dureza del sustrato y rugosidad obtenida, cuando se utilizan idénticas condiciones de granallado.
- c) La importancia del proceso de granallado para la realización posterior de diferentes procesos de tratamiento superficial o de manufactura de materiales.

Bibliografía

1. Rugosímetros, Herramientas Sencillas para Grandes Resultados. Luisa Fernanda Castro Patiño. *Revista Metal Actual* (consultado 21 noviembre 2019). www.metalactual.com.
2. Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques. B. Bhushan. Capítulo 2 del texto: *Modern Tribology Handbook*. 2001 by CRC Press LLC.
3. Rugosidad Superficial. Grupo Tecnología Mecánica. Universidad de Buenos Aires (consultado el 21 de noviembre de 2019).
4. Introducción al Proceso de Granallado. <https://cym.com.ar> (consultado 21 noviembre 2019).
5. *Texto Iberoamericano de Ingeniería de Superficies*. Capítulo 2. Introducción al Desgaste. UNAM. Facultad de Ingeniería. 2019.



Elaborado por:

Miembros del Grupo del CENISA,
Facultad de Ingeniería, UNAM

Carrera	Plan de estudio	Clave de la asignatura	Nombre de la asignatura
Ing. Mecánica	2006	0999	Ingeniería de Superficies
Ing. Mecatrónica			

Práctica No.	Laboratorio de	Nombre de la Práctica	Duración
2	Ingeniería de Superficies	Evaluación del desgaste de materiales	2 Horas



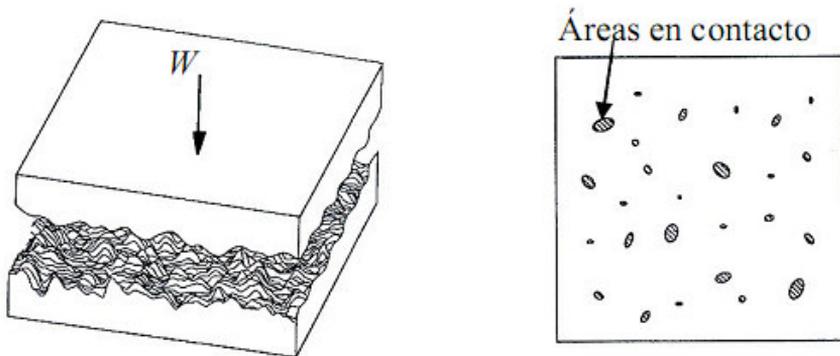
El alumno:

- ❖ Comprenderá la importancia de algunas de las técnicas de caracterización que permiten evaluar el desgaste de diversos materiales metálicos.
- ❖ Caracterizará la morfología superficial de los materiales sometidos a los diferentes tipos de desgaste, antes y después del ensayo, mediante la valoración de la rugosidad y de la morfología de la superficie de los materiales a través de técnicas de microscopía.

Nociones generales de desgaste

Cuando las superficies de dos materiales sólidos entran en contacto, algunas regiones de su superficie estarán más cercanas y otras más lejanas. Asumiendo que algunos átomos van a interactuar con átomos correspondientes a la otra superficie y que estas fuerzas de unión son de muy corto alcance (del orden de magnitud de algunos nanómetros), que es aproximadamente el tamaño promedio de un átomo, es posible imaginar que, en estas regiones, el contacto es prácticamente átomo/átomo. Estas interacciones son llamadas *uniones*, y la suma de las áreas de todas las uniones constituye el *área real de contacto* (A_r).

El área total interfacial está compuesta por el área real de contacto y las demás regiones en donde aparentemente hay contacto (pero en realidad no lo hay), y es conocida como *área aparente de contacto* (A_a). Durante el deslizamiento, a medida que las crestas superficiales se deforman plásticamente, el área real tiende al área aparente de contacto (ver figura).



El **desgaste** puede ser definido como el daño superficial sufrido por los **materiales** después de determinadas condiciones de trabajo a los que son sometidos. Este fenómeno se manifiesta por lo general en las superficies de los **materiales**, llegando a afectar la sub-superficie. Está relacionado con las interacciones entre superficies y más específicamente con la eliminación de material de una superficie como resultado de una acción mecánica.

También se puede definir **desgaste** como el proceso de remoción de material debido al movimiento relativo de una superficie respecto a otra con la que está en contacto. En dicho proceso el material puede ser removido de la superficie y expulsado fuera de la región de contacto. También puede ser transferido a la otra superficie y quedarse

adherido a ella o romperse y generar discontinuidades superficiales que pueden quedar, en parte, atrapadas en el contacto.

El estudio de los procesos de desgaste es parte de la tribología. La naturaleza compleja del desgaste ha complicado su estudio y lo ha llevado hacia la clasificación de mecanismos o procesos específicos de desgaste. Algunos mecanismos (o procesos) específicos de desgaste son:

1. Desgaste adhesivo
2. Desgaste abrasivo
3. Fatiga superficial
4. Desgaste por fricción
5. Desgaste erosivo

Además de los anteriores, existen otros tipos de desgaste comúnmente encontrados en la literatura especializada como desgaste por impacto, por cavitación, difusivo y desgaste corrosivo, por mencionar algunos de los más conocidos.

El análisis de los datos de fricción y desgaste de un tribosistema o de un ensayo de laboratorio, requieren especial atención debido a las numerosas características, parámetros y factores que deben ser tomados en cuenta. Un método comúnmente utilizado es medir la cantidad de material removido (por ejemplo, por pérdida de peso o de volumen).

En particular, en esta práctica se realizará la parte experimental empleando un abrasímetro tipo Taber y un equipo para ensayo de

desgaste abrasivo con rueda, que utiliza un flujo de arena (de granulometría definida por la Norma G-65 de ASTM), que entra en contacto con el material por evaluar y se valora el nivel de desgaste por medio de la pérdida de peso que experimenta el material probado, al cabo de un cierto número de ciclos que son indicados por las normas correspondientes.

En cuanto a los procedimientos de las pruebas de desgaste acelerado realizadas con el abrasímetro TABER se han incluido en muchas especificaciones de ensayos, entre las que destacan ASTM, ISO, TAPPI y DIN, así como también en procedimientos de fabricación de automóviles de todo el mundo. Montadas en una superficie rotativa, las muestras son expuestas a la acción de rozamiento de dos muelas abrasivas. Las muelas producen marcas de abrasión que forman un modelo de arcos cruzados sobre un anillo circular de aproximadamente 30 cm². Esto revela la resistencia a la abrasión y adicionalmente, se lleva un control de la pérdida de peso cada 1000 ciclos y a través de ambos criterios, se puede generar información valiosa sobre el comportamiento bajo condiciones de desgaste de los materiales.

En relación con la prueba de desgaste que se va a realizar mediante el equipo de desgaste abrasivo con rueda, que emplea arena de características específicas que se hace llegar a la probeta a un flujo particular (leer al respecto la Norma ASTM G-65) se evalúa la pérdida de peso de la pieza ensayada y el aspecto final de la probeta a través de su observación usando técnicas de microscopía.

Material:

- ❖ Muestras de dimensiones apegadas a normas de diferentes materiales para cada uno de los ensayos
- ❖ Insumos de preparación metalográfica (lijas de agua, alúmina)
- ❖ Reactivos para limpieza de la superficie de las piezas por evaluar

Equipo:

- ❖ Abrasímetro Taber Modelo 5150
- ❖ Equipo para ensayo de desgaste abrasivo con rueda, según Norma ASTM G65
- ❖ Microscopio óptico
- ❖ Equipo de preparación metalográfica
- ❖ Rugosímetro
- ❖ Balanza analítica de sensibilidad 0.0001 g
- ❖ De ser posible, microscopio electrónico de barrido

Desarrollo

1. Llevar a cabo la preparación y la limpieza de las muestras por evaluar a través de los procesos químicos necesarios, según la condición original de los materiales (los estudiantes, con el asesoramiento del profesor, deberán seleccionar el procedimiento necesario).
2. Determinar, mediante el rugosímetro, la rugosidad de las piezas antes de los ensayos de desgaste y obtener imágenes, mediante técnicas de microscopía de la condición original de la superficie.

3. Colocar las muestras previamente seleccionadas en el abrasímetro Taber, empleando dos diferentes velocidades y registrar los cambios de peso cada 1000 ciclos, mediante el pesaje en la balanza analítica (luego de realizar una limpieza de las muestras ensayadas).
4. Colocar las probetas del o los materiales por evaluar en el sitio apropiado del equipo de desgaste abrasivo con rueda, bajo dos diferentes cargas y obtener los cambios de peso al cabo de tiempos previamente seleccionados indicados por la respectiva Norma ASTM G65 (Los alumnos deben realizar esta determinación asesorados por su profesor).
5. Volver a determinar la rugosidad de las piezas, usando el rugosímetro, luego de la aplicación de los ensayos de desgaste.
6. Obtener imágenes de la morfología de las superficies ensayadas, a través de técnicas microscópicas, y compararlas con la morfología original.

Resultados

- a) Generar una gráfica en la que se reporte el cambio de peso, en función de la velocidad de giro de las ruedas abrasivas del abrasímetro tipo Taber.
- b) Obtener distintas imágenes de la morfología de las piezas posterior a su ensayo tanto en el abrasímetro Taber como con el equipo de desgaste abrasivo con rueda y compararlas con la topografía original de las superficies.

- c) Generar otra gráfica del cambio de peso en función de la carga aplicada en el ensayo de desgaste abrasivo con rueda, empleando arena.
- d) Elaborar una tercera gráfica en la que se relacionen la rugosidad inicial y final con el cambio de peso reportado en cada uno de los ensayos y materiales utilizados.

Análisis de resultados

Analizar en conjunto las distintas gráficas e imágenes obtenidas y, a partir de ello, emitir una serie de conclusiones.

Resuelva las siguientes cuestiones:

1. Mencione qué limitaciones tienen los ensayos de desgaste realizados en un laboratorio respecto a las condiciones reales en que trabaja un material en un equipo industrial.
2. Defina tribología e indique qué importancia, en su opinión, tiene el estudio de los fenómenos asociados a esta ciencia, indicando casos reales donde se aplique.
3. Enliste otra serie de ensayos de desgaste que se puedan llevar a cabo, mostrando esquemas o figuras de los equipos que se emplearían.
4. Mencione (con imágenes) ejemplos de aplicaciones en las cuales ocurran procesos de desgaste abrasivo o adhesivo.

Conclusiones y/o comentarios

El alumno emitirá, de manera razonada, sus conclusiones acerca de las ventajas y limitaciones de los ensayos de desgaste realizados, de la influencia de los diversos parámetros (velocidad, carga, por ejemplo) en los resultados encontrados, así como de los cambios en la morfología que se originan en las muestras evaluadas, luego de llevar a cabo los ensayos.

Bibliografía

1. Ciencia e Ingeniería de la Superficie de los Materiales Metálicos. Alfonso J. Vázquez y Juan J. Damborenea (editores). No 31 de la *Colección Textos Universitarios*. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España. 2001.
2. *Rotating Wheel Abrasive Wear Testing*. M G Gee, A Gant and I M Hutchings. March 2002. ISSN 1368-6550.
3. El desgaste de materiales, enfrentarlo o dejarlo de lado y asumir los riesgos. D. Mesa, A. Sinatora. *Scientia et Technica*. Año IX, No 22. Octubre 2003. UTP. ISSN 0122-1701. p. 87-91.
4. Latest progress on tribological properties of industrial materials. F. Findik. *Materials and Design* 57(2014) 218-244.



Elaborado por:

Grupo del CENISA,
Facultad de Ingeniería, UNAM

Carrera	Plan de estudio	Clave de la asignatura	Nombre de la asignatura
Ing. Mecánica	2006	0999	Ingeniería de Superficies
Ing. Mecatrónica			

Práctica No.	Laboratorio de	Nombre de la Práctica	Duración
3	Ingeniería de Superficies	Inmersión en caliente: Galvanizado en acero de bajo carbono	4 horas (2 sesiones)

3

El alumno:

- ❖ Comprenderá la importancia y la influencia de los parámetros de proceso en la generación de un recubrimiento metálico mediante un proceso por inmersión en caliente.
- ❖ Podrá evaluar y caracterizar las propiedades de dureza, rugosidad y adhesión de los recubrimientos obtenidos por tecnologías de inmersión en caliente, especialmente en lo referente a la relación entre el tiempo de proceso y el espesor obtenido.

Los procesos para obtener recubrimientos mediante tecnologías de inmersión en caliente y en particular el galvanizado del acero, se vienen usando como una estrategia fundamentalmente de protección contra la corrosión ante diferentes ambientes, especialmente urbanos, en los que su comportamiento resulta muy satisfactorio, llegando a proveer hasta décadas de protección dependiendo del grosor obtenido [1].

Procesos por inmersión en caliente

Consisten en sumergir un metal que se va a recubrir, en otro metal de menor punto de fusión, en estado fundido. Las aplicaciones más importantes las constituyen el recubrimiento de objetos, chapas,

barras y alambres de acero con zinc, y el recubrimiento de acero con aluminio y con combinaciones de ambos metales.

Los espesores que se obtienen por este procedimiento son relativamente gruesos comparados con los que se obtienen por otros métodos, y presentan menos porosidad. Sin embargo, tanto el espesor como la uniformidad del recubrimiento son difíciles de regular. Normalmente, el espesor nominal de estos procesos es el orden de varias decenas de micrómetros [2].

Los metales que se emplean para este proceso son aquellos que presentan bajos puntos de fusión, con el objetivo de no ocasionar transformaciones de fase en el metal base debido a las altas temperaturas, las cuales pueden modificar de manera importante las propiedades mecánicas de interés.

Un recubrimiento estándar por inmersión en caliente consta de una capa de aleación interna formada por difusión del metal fundido en el metal base y de una capa externa formada por el metal fundido que actuará como protector.

Las principales características del recubrimiento como la adherencia, el espesor, la uniformidad y continuidad del mismo son gobernadas por la temperatura, composición química del baño fundido, tiempo de inmersión y la velocidad de extracción de las piezas por proteger.

La aplicación de cualquier recubrimiento metálico sobre un metal puede afectar de manera sustancial las propiedades físico-químicas y

mecánicas del material base y cualquiera de estos efectos tiene que ser considerado para establecer el tipo de recubrimiento que se aplicará, así como el método seleccionado para la aplicación de dicho recubrimiento.

En los procesos de inmersión por caliente se corre el riesgo de que la pieza por proteger sufra distorsión. Además, zonas aleadas de dureza variable y compuestos intermetálicos se pueden producir durante el proceso de aplicación, debido a la difusión del metal protector en el metal base de interés.

Al estudiar procesos que tienen un impacto directo sobre la industria es importante considerar como un factor indispensable, el costo que tendría el método de aplicación del recubrimiento sobre las piezas de interés, así como un análisis detallado sobre los costos-beneficios que tendría el proceso de aplicación.

Realizar un análisis de las propiedades físico-químicas y mecánicas que presentaría dicho recubrimiento es primordial: el color del recubrimiento, el brillo, y en general la apariencia que este muestra también presenta gran importancia.

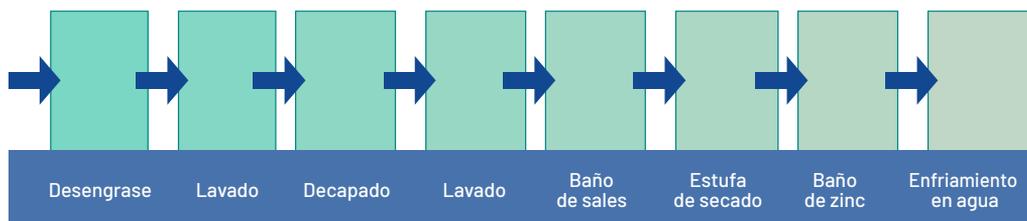
Galvanizado [3]

La **galvanización** es un procedimiento de aplicación de un recubrimiento de base zinc sobre las piezas de acero o fundición, mediante inmersión de las mismas en un baño de zinc fundido.

Para obtener buenos resultados de este tipo de procesos es necesario que se cumplan ciertas condiciones, como son:

1. El diseño de las piezas debe ser adecuado para la galvanización.
2. Las inmersiones de las piezas deben acomodarse al tamaño del crisol de galvanización.
3. El peso de las piezas está condicionado por los dispositivos de elevación y transporte existentes en el taller de galvanización.
4. La utilización de aceros adecuados para galvanización.
5. Control del estado superficial previo de las piezas por galvanizar.

Etapas del proceso (investigar a detalle la función de cada etapa)



Para conocer las normativas internacionales del galvanizado por inmersión en caliente (*hot dip galvanizing*), se recomienda consultar la bibliografía especializada tanto en inglés [4] como en español [5].

Material:

- ❖ Acero o aceros por galvanizar
- ❖ Cronómetro
- ❖ Zinc en barra
- ❖ Solución de ácido clorhídrico adecuada para el decapado
- ❖ Inhibidor para la solución anterior
- ❖ Agua y jabón
- ❖ Solución de fluxado (activación de la superficie)
- ❖ Solución de percloroetileno o equivalente para limpieza previa de las piezas

Equipo:

- ❖ Crisol apropiado para fundir el zinc o aluminio
- ❖ Durómetro
- ❖ Microscopio metalográfico
- ❖ Horno de fundición
- ❖ Equipo para limpieza ultrasónica
- ❖ Rugosímetro (en caso de ser posible)
- ❖ Medidor de espesor ultrasónico

Desarrollo

1. De acuerdo con las dimensiones del crisol por utilizar, cortar 4 probetas de acero AISI 1018 o equivalente (se recomienda 3x3 cm) por

cada condición experimental. Verificar que la probeta quede completamente dentro del crisol.

2. Posteriormente, todas las probetas se someten a un proceso de preparación que incluye una limpieza con percloroetileno con permanencia en el baño de 5 a 10 min o bien mediante una limpieza en acetona o equivalente en un equipo de limpieza ultrasónica. Después las piezas se someten a un decapado con una disolución de ácido clorhídrico al 10 % en peso, usando tiourea como inhibidor (1% en peso), durante 6 min. Finalmente, a las probetas se les realiza el proceso de activación superficial (fluxado), empleando para ello una disolución de cloruro de zinc (1 M) y cloruro de amonio (1 M) en una relación de 1:1, en la que se colocan las piezas durante 5 min. Se retiran del baño y se secan con un flujo de aire caliente.
3. A continuación, las piezas se colocan en el baño de zinc o aluminio fundido (utilizando pinzas y guantes) durante 0.5, 1 y 1.5 y 2 minutos, se extraen lentamente y se enfrían primero en aire y después en agua.

Resultados

- a) Medir el espesor de las piezas recubiertas.
- b) Observar la morfología de los recubrimientos mediante microscopio metalográfico (superficial y transversal).
- c) Medir la dureza superficial de las muestras con escala Rockwell E (o equivalente) en varios puntos de la superficie.

- d) Medir la rugosidad de cada muestra, mediante rugosímetro.
- e) Evaluar la adhesión a 2 muestras siguiendo el ensayo de la norma ASTM B571 [6] apartado 3 del procedimiento de doblado (bend test). Tomar evidencias fotográficas.

Análisis de resultados

El alumno o equipo elaborará una tabla para resumir y comparar los resultados obtenidos provenientes de las distintas condiciones de experimentación. No basta con poner solamente los resultados, sino que el alumno los analizará para encontrar tendencias y/o características de las propiedades en función del tiempo de inmersión. Correlacionar todos los datos obtenidos. Se recomienda consultar la bibliografía propuesta para enriquecer su análisis de resultados.

Resuelva las siguientes cuestiones:

1. Investigue qué otros recubrimientos de obtención por inmersión en caliente se aplican en la industria.
2. Mencione desventajas del proceso de inmersión en caliente.
3. ¿Qué efecto tiene la rugosidad del sustrato metálico en la capa depositada?
4. ¿Por qué se tiene que añadir un inhibidor durante la etapa de limpieza del sustrato?
5. ¿Qué otras técnicas existen para evaluar la adhesión de un recubrimiento?

El estudiante deberá obtener conclusiones puntuales acerca de las características de los recubrimientos obtenidos y de la variación de los espesores en función del tiempo de inmersión.

Bibliografía

1. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4208401> (consultado en agosto de 2019).
2. «Ciencia e Ingeniería de la Superficie de los Materiales Metálicos». Alfonso J. Vázquez y Juan J. Damborenea (editores). No 31 de la Colección *Textos Universitarios*. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España. 2001.
3. «Obtención y caracterización de recubrimientos Zn-Al-Cu por inmersión en caliente sobre aceros de bajo carbono». J. Cervantes, A. Barba, M.A. Hernández, J. Salas, J.L. Espinoza, C. Dénova, G. Torres-Villaseñor, A. Conde, A. Covelo y R. Valdez. *Revista de Metalurgia*. Vol. 49 (5). Septiembre octubre 2013. p.161-169, ISSN: 0034-8570.
4. ASTM A123. Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997.

5. ASTM A123-02 español. Especificaciones de norma para revestimientos de Zinc (Galvanizados por inmersión en caliente) en productos de hierro y acero, 2002.
6. ASTM 571-97, Standard Practice for Qualitative Adhesion Testing of Metallic Coatings, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997.



Elaborado por:

Grupo del CENISA,
Facultad de Ingeniería, UNAM

Carrera	Plan de estudio	Clave de la asignatura	Nombre de la asignatura
Ing. Mecánica	2006	0999	Ingeniería de Superficies
Ing. Mecatrónica			

Práctica No.	Laboratorio de	Nombre de la Práctica	Duración
4	Ingeniería de Superficies	Galvanizado por difusión de aleaciones de cobre: Tratamiento termoquímico	4 horas (2 sesiones)

4

Objetivos

El alumno:

- ❖ Conocerá los principios y los parámetros de proceso del tratamiento termoquímico de galvanizado por difusión.
- ❖ Evaluará el efecto de la cantidad de activador en el tratamiento termoquímico de galvanizado por difusión sobre las propiedades de una aleación de cobre comercial.

Introducción

Los tratamientos termoquímicos designan a un grupo de procesos en los cuales, a través de adecuados parámetros de temperatura y tiempo y mediante mecanismos de difusión, se pueden generar zonas enriquecidas en el elemento o elementos que se han difundido en el sustrato. Con esas tecnologías ha sido posible mejorar la resistencia al desgaste, primordialmente, de varios aceros. A través de diversos desarrollos recientes sus beneficios se han extendido a otros sustratos tales como aleaciones de aluminio, titanio, cobre y fundiciones, por mencionar algunos ejemplos, lo que ha permitido también incidir en la mejora de otras propiedades, como la resistencia a la corrosión o la resistencia a la fatiga [1].

Tradicionalmente, en la industria se han venido aplicando: el enriquecimiento con carbono (carburización) sobre aceros de bajo carbono

(condiciones típicas de 10 a 12 horas y 850-900°C), en opciones de carbono proveniente de medios sólidos, líquidos o gaseosos, el enriquecimiento con nitrógeno (nitruración) sobre aceros de medio carbono con contenidos de Cr, V, Mo o Al, fundamentalmente en forma gaseosa, a través del uso de amoníaco que cerca de los 500°C se disocia y permite la difusión de nitrógeno a este tipo de aceros para formar nitruros, particularmente de ciertos elementos aleantes [2]. Como se puede percibir, una diferencia importante de estos dos procesos es que en el primer caso se suman el enriquecimiento de carbono en la superficie, donde pueden alcanzarse niveles de C de 0.9 o 1.00 e incluso 1.2% a lo que sigue un proceso (en varios diferentes ciclos posibles) de temple y revenido como vías para incrementar la dureza superficial de dichos aceros de bajo carbono, en tanto en el caso de la nitruración gaseosa el posible endurecimiento proviene de la formación de compuestos de alta dureza, en este caso, nitruros y no se requiere el uso de temperaturas tan elevadas, lo cual reduce riesgos de distorsión o agrietamiento en las piezas y confiere, adicionalmente, una mejora en resistencia al desgaste y un incremento en la resistencia a la fatiga. Sin embargo, en ambos casos, los procesos sólo están destinados a ciertos tipos de aceros. Hay, por fortuna, nuevas opciones en estas tecnologías, por ejemplo: el borurado de aceros [3,4], aceros inoxidable, fundiciones, galvanizados de aleación de cobre [5], aleaciones de aluminio y de titanio; el aluminizado y el cromizado, que proporcionan una adecuada resistencia a la oxidación a alta temperatura a diferentes aleaciones y por supuesto, también los tratamientos termoquímicos combinados tales como el boroaluminizado, donde se pueden conseguir mejoras tanto en la resistencia al desgaste como a la corrosión. La correcta selección de

los parámetros del proceso es trascendental para alcanzar el grosor esperado en la capa difundida, y por lo tanto, conseguir la modificación superficial esperada.

Finalmente, se puede mencionar la nitruración por plasma [6] o iónica [7] que abre nuevos horizontes a este tipo de tratamientos por su capacidad de poderse emplear sobre muy diversos sustratos y por su condición de proceso ambientalmente más amigable que los procesos convencionales. Asimismo, estos tratamientos, prácticamente, no modifican las dimensiones de las piezas tratadas, por lo que la deformación mecánica es mínima. Ambos tratamientos modifican tanto las propiedades físicas como las químicas. El primer tratamiento consiste en la aplicación de nitrógeno gas sometido a una diferencia de potencial para ionizar el gas y formar el plasma junto con nitruros de hierro que se diseminarán en la superficie del material. En cambio la implantación iónica, consiste en bombardear iones seleccionados dentro de una cámara de vacío ($<10^{-4}$ mbar) sobre la superficie de un material, con una energía situada entre 50 a 200 KeV. Los iones penetran violentamente la superficie del material, y a continuación se detienen y pierden su energía, lo que origina caóticas colisiones con los átomos para formar nuevos estados de energías de enlace. Este proceso permite la formación de nuevos compuestos distribuidos homogéneamente en la superficie tratada. La penetración iónica está fuertemente determinada por el voltaje de aceleración utilizado, aunque la profundidad nominal es del orden de un micrómetro. Es preciso indicar que este proceso se lleva a cabo a baja temperatura.

Material:

- ❖ Piezas de latón y/o bronce (incluso cobre puro)
- ❖ Polvo de zinc comercialmente puro
- ❖ Cloruro de amonio
- ❖ Contenedor de **acero inoxidable**
- ❖ Cemento refractario
- ❖ Reactivos para preparación de probetas metalográficas

Equipo:

- ❖ Horno de mufla
- ❖ Equipo para preparación de probetas metalográficas
- ❖ Microscopio óptico (y/o electrónico, si fuese posible)
- ❖ Microdurómetro (de ser posible) o durómetro estándar (escala superficial E)

Desarrollo

1. Realización del tratamiento termoquímico (galvanizado por difusión de aleaciones de cobre)

Inicialmente, se colocarán cuatro probetas de latón 70-30 y/o bronce (incluso cobre) de 3×2×1 cm desengrasadas y secas, rodeadas de una mezcla de polvo de zinc comercialmente puro y cloruro de amonio en diferentes cantidades en un **contenedor de acero inoxidable**, a 400°C, para provocar la difusión de zinc en esta(s) aleación(es) de

cobre. Una 5ª muestra se deja como referencia (testigo) para compararla con las demás.

Cada pieza (4) se coloca en su respectivo contenedor en el que previamente se ha elaborado y colocado la mezcla de polvo de zinc comercialmente puro con la adición de 10, 15, 20 y 25%, en peso de cloruro de amonio para cada caso, de modo que cada pieza quede completamente recubierta por la mezcla de polvo.

Los contenedores se sellan (eliminando previamente, en la mayor medida posible, el oxígeno presente en cada caja), mediante cemento refractario que se seca adecuadamente, previo a su colocación en el horno. Las piezas se colocan en el horno a 400°C y se retirarán después de 4, 6 y 8 horas de tratamiento.

2. Caracterización de piezas revestidas

Los estudiantes recibirán en la segunda sesión de dos horas, las probetas previamente tratadas termoquímicamente (el profesor indicará a los estudiantes las condiciones de proceso bajo las cuales fueron tratadas las piezas) con las cuales realizarán, para cada pieza (incluyendo la pieza testigo) lo siguiente:

- a) Medición de la microdureza Vickers o en su defecto, medición de dureza superficial Rockwell.
- b) Observación metalográfica para determinar en cada caso su correspondiente microestructura.
- c) Medición del espesor promedio de las piezas recubiertas.

Resultados

De las piezas galvanizadas por difusión, los estudiantes deberán obtener lo siguiente:

- a) Un perfil de dureza o microdureza en diversos sectores de la superficie de cada muestra (al menos 5 lecturas).
- b) Medidas del espesor del revestimiento, en diferentes regiones de las piezas tratadas, reportando el promedio de estas. Para obtener estas medidas, se tendrá que realizar la preparación metalográfica transversal para medir con el microscopio óptico el espesor de la capa difundida.
- c) Una serie de imágenes a diferentes magnificaciones para caracterizar adecuadamente la morfología de los revestimientos obtenidos.

Análisis de resultados

Con los datos provenientes de los resultados obtenidos, los equipos y el grupo deberán:

- a) Construir una curva de espesor de capa contra tiempo de tratamiento.
- b) Una curva de espesor de capa contra cantidad de activador añadido para cada uno de los tiempos empleados.

- c) Reportar el valor de la(s) dureza(s) promedio de las piezas tratadas y evaluadas y calcular el cambio en dureza que se haya conseguido (en porcentaje), con respecto a la dureza original de las aleaciones de cobre empleadas.
- d) Realizar una descripción de la morfología de la capa observada, valorando factores tales como el *aspecto* y *la homogeneidad de la zona tratada (difundida)*.

Resuelva las siguientes cuestiones:

1. Diga las diferencias entre un tratamiento térmico y un termoquímico.
2. Indique cuáles son las leyes de Fick y su aplicación.
3. Investigue al menos una aplicación industrial en la que se aplique algún tratamiento termoquímico.
4. Describa desventajas de los tratamientos termoquímicos.
5. ¿Cuál es la función de un activador en un tratamiento termoquímico?

Conclusiones y/o comentarios

El estudiante obtendrá conclusiones puntuales acerca del efecto de la cantidad añadida de cloruro de amonio en la difusión y la obtención de las propiedades de la capa rica en zinc en el sustrato metálico.

1. «Ciencia e Ingeniería de la Superficie de los Materiales Metálicos». Alfonso J. Vázquez y Juan J. Damborenea (editores). No 31 de la Colección *Textos Universitarios*. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España. 2001.
2. *ABC de los tratamientos térmicos*. María Elena Sánchez V. e Iván Campos. 2006. Limusa.
3. «Austenitización y borurado simultáneo de un hierro nodular austemperizado». U. Ordoñez Hernández, S. Parada, C. Díaz Cicero, A. Barba Pingarrón, R. Valdéz Navarro, M. A. Hernández Gallegos, A. Covelo Villar. *Memorias del XIX Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica*. p. 625-632. ISBN -978-607-95309-9-0. Septiembre 2013. Pachuca, Hidalgo, México.
4. <http://www.reibci.org/publicados/2016/dic/2000116.pdf> (consultado en agosto de 2019). J. Merced Martínez, M. Vargas, A. Arenas, V. H. Gutiérrez y A. M. Herrera. Energía de activación para la difusión del boro durante la borurización de un acero de bajo carbono. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 2016.
5. *Galvanizado por difusión de aleaciones de cobre*. Tesis de Doctorado en Ingeniería. Carlos Valdés Franco. Facultad de Ingeniería. UNAM. 2010.
6. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6331053> (consultado en agosto de 2019). A.B. Velosa, G.O. Esparragoza, G. Andrés, A. Guerrero. Caracterización de las propiedades mecánicas de un acero AISI-SAE 4140 al aplicarle un proceso de nitruración por plasma. *TECCIENCIA*, 2018.
7. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5555295> (consultado en agosto de 2019). H.J. Dulcé Moreno, V.D. Dougar-Jabon, P. A. Tsygankov. Implantación Iónica. *RESPUESTAS*, 2013.



Elaborado por:

Grupo del CENISA,
Facultad de Ingeniería, UNAM

Carrera	Plan de estudio	Clave de la asignatura	Nombre de la asignatura
Ing. Mecánica	2006	0999	Ingeniería de Superficies
Ing. Mecatrónica			

Práctica No.	Laboratorio de	Nombre de la Práctica	Duración
5	Ingeniería de Superficies	Recubrimientos electrolíticos: Cobrizado del acero	4 horas (2 sesiones)

5

El alumno:

- ❖ Comprenderá los fundamentos de la teoría electroquímica (óxido-reducción) para obtener recubrimientos electrolíticos.
- ❖ Entenderá la importancia de la generación de este tipo de recubrimientos en el sector industrial, así como sus ventajas y desventajas frente a otros tipos de revestimientos (pinturas y galvanizados).

Recubrimientos electrolíticos

El principio básico de los procesos de recubrimiento electrolítico consiste en la oxidación de un ánodo que genera iones metálicos (y la pérdida de electrones) que se distribuyen en la disolución. Estos iones, por el efecto de un gradiente de potencial, se reducen en el cátodo (pieza que será recubierta) lo que origina la formación de una capa metálica en la superficie. Uno de los objetivos de la deposición electrolítica es generar depósitos metálicos que se adhieran correctamente a un sustrato y presenten una serie de propiedades predefinidas (físicas, mecánicas o químicas)[1].

Los componentes básicos de un sistema electrolítico son los siguientes [2]:

- a) Una disolución conductora que actúa como medio iónico ya que contiene una alta cantidad de sales y iones, así como diversos aditivos reguladores de pH, conductividad, inhibidores, etc.
- b) Un cátodo conductor en el cual se llevará a cabo la reacción de reducción y, por consiguiente, se formará el recubrimiento electrolítico.
- c) Un ánodo conductor, también soluble o insoluble, donde se soportará la reacción de oxidación.
- d) Una cuba (recipiente) inerte que contiene a los componentes antes descritos.
- e) Una fuente de corriente continua, generalmente un transformador/rectificador, que aplicará una diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo. Esta fuente de poder será el medio conductor entre ambos electrodos.

El cambio químico que se produce en la celda electrolítica es la suma de los procesos que tienen lugar en los dos electrodos. Según la ley de Faraday, la masa m de metal depositada en un proceso de deposición realizado por electrodeposición, viene dada por:

$$m = \epsilon M q / nF = \epsilon M I A t / nF \dots \dots \dots (1)$$

donde: M es la masa molecular del metal, q la carga transferida, I la densidad de corriente y $\epsilon \geq 1$ la eficiencia del proceso catódico. La velocidad de deposición m/t depende de la masa molecular del metal, del número de electrones intercambiado por mol de «reactivo» (ión metálico) y de la eficiencia. La calidad de un recubrimiento depende de un amplio conjunto de variables relacionadas con el baño electrolítico

y los parámetros eléctricos del proceso, es decir, depende de todas aquellas variables que afectan al proceso electroquímico que tiene lugar en el sistema. La figura 1 muestra la esquematización del proceso electrolítico general.

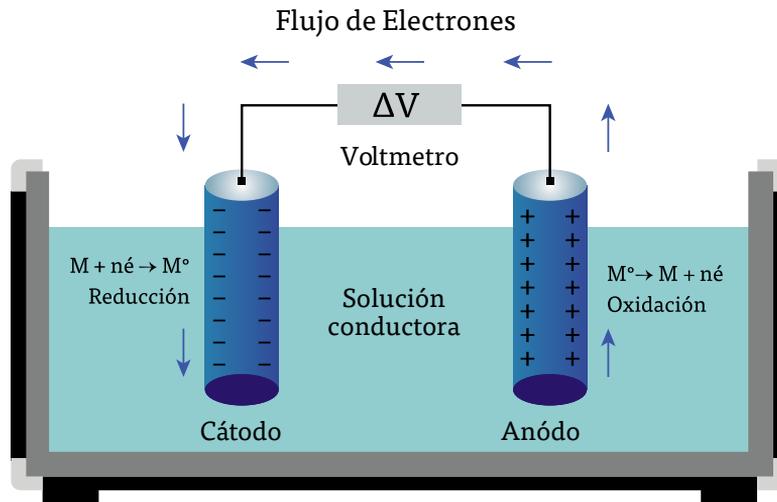


FIGURA 1. Principio de la deposición electrolítica: Fuente: CENISA

La estructura y propiedades de los depósitos vienen determinadas por los parámetros electroquímicos y la composición del baño. Durante la etapa de crecimiento, una variable fundamental es la densidad de corriente cuya variación da lugar a fuertes cambios en la estructura del depósito. Desde el punto de vista industrial, uno de los objetivos importantes que hay que cumplir en el proceso de electrodeposición es resolver la relación velocidad de deposición/densidad de corriente - estructura/propiedades del depósito. Son numerosas las aplicaciones industriales de los procesos de electrodeposición en escalas de tiempo muy variables que van desde menos del minuto a horas. Los recubrimientos electrolíticos proporcionan una amplia variedad de

propiedades a las superficies tratadas: acabados decorativos, protección contra la corrosión, propiedades ópticas, dureza, facilidad de limpieza, resistencia al desgaste, conductividad térmica, capacidad de soldadura, etc.

Material y/o equipo necesario

Material:

- ❖ Disolución ácida (usualmente de HCl o H_2SO_4)
- ❖ Vaso de precipitados 250 ml
- ❖ Vaso de precipitados 600 u 800 ml
- ❖ Solución de sulfato de cobre $CuSO_4$
- ❖ Cátodo de acero al carbono
- ❖ Ánodo de cobre (barra)
- ❖ Pinzas y cables diversos
- ❖ Lijas para preparación metalográfica
- ❖ Agitadores magnéticos y termómetro

Equipo:

- ❖ Balanza de precisión y parrilla eléctrica
- ❖ Fuente de poder
- ❖ Medidor de espesores ultrasónico
- ❖ Microscopio metalográfico

a) Cobrizado electrolítico

1. Desengrasar y secar el electrodo de acero y de cobre, pesarlos al menos tres veces en la balanza analítica y registrar los pesos promedio.
2. Conectar los electrodos a la polaridad correspondiente en la fuente de poder: ánodo (+) y cátodo (-).
3. Preparar una disolución de sulfato de cobre saturada. Introducirla en la celda electrolítica.
4. Realizar la deposición electrolítica utilizando las siguientes condiciones experimentales: A 3 volts, depositar a 10, 20 y 30 minutos. Agitación constante a 60°C.
5. Extraer con cuidado cada una de las piezas recubiertas y colocarlas en el equipo para secar muestras.
6. Colocar las piezas secas y enfriadas en la balanza y pesarlas al menos tres veces.
7. Medir el área cobrizada para cada caso.

b) Preparación y caracterización de las muestras

Con el equipo de medición de espesores, determinar un valor promedio para cada muestra. Realizar al menos 5 mediciones por muestra.

Siguiendo las indicaciones del profesor, preparar con especial esmero, las muestras para su observación metalográfica, cuidando de no afectar los recubrimientos conseguidos. Obtener diferentes micrografías a distinta magnificación.

Resultados

- a) Determinar, con las leyes de Faraday, la masa que debió ganar el cátodo y la que debió perder el ánodo.
- b) Comparar los valores teóricos con los experimentales.
- c) Construir una gráfica en la que relacione el voltaje aplicado con los tiempos de proceso y los espesores conseguidos.

Análisis de resultados

Explique el efecto del tiempo de experimentación con los resultados obtenidos y calculados (tiempo, espesores y microestructura). Analizar la variación de los datos experimentales y teóricos.

Resuelva las siguientes cuestiones:

1. ¿Cuáles son las leyes de Faraday?
2. De acuerdo con los cálculos teóricos, ¿cuál sería la eficiencia de proceso obtenida?
3. Escriba las reacciones de reducción y oxidación del proceso (consultar bibliografía [3,4]).
4. Escriba en qué aplicación industrial puede ser de utilidad un cobrizado.
5. Respecto a otros sistemas de recubrimientos (pinturas y galvanizado), ¿cuáles serían las ventajas y desventajas de un recubrimiento electrolítico? – Se recomienda revisar bibliografía [5].

Conclusiones y/o comentarios

Que el alumno o equipo emita conclusiones puntuales acerca del efecto del tiempo de deposición en el proceso electrolítico, el espesor y de la microestructura obtenida.

Bibliografía

1. «Ciencia e Ingeniería de la Superficie de los Materiales Metálicos». Editado por Alfonso J. Vázquez y Juan Damborenea. No 31 de la Serie *Textos Universitarios*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, 2001.
2. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2426> (consultado en agosto de 2019). J. A. Ruiz Padilla. Recubrimientos electrolíticos aplicados a prácticas del laboratorio de tratamientos superficiales de procesos de producción mecánica. Quito/EPN/2016.
3. R. Chang. *Química*. 7ª ed. McGraw-Hill.
4. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/09/htm/masallla.htm> (consultado en agosto de 2019) J. Genesca, J. Ávila. Más allá de la herrumbre. Fondo de Cultura Económica, 1996.
5. J. Genescá, J. Avila. *Más allá de la herrumbre*. Fondo de Cultura Económica. 1996.



Elaborado por:

Grupo del CENISA,
Facultad de Ingeniería, UNAM

Carrera	Plan de estudio	Clave de la asignatura	Nombre de la asignatura
Ing. Mecánica	2006	0999	Ingeniería de Superficies
Ing. Mecatrónica			

Práctica No.	Laboratorio de	Nombre de la práctica	Duración
6	Ingeniería de Superficies	Niquelado químico	4 Horas (2 sesiones)

6

Objetivos

El alumno:

- ❖ Comprenderá los principios que tienen lugar durante la generación de depósitos químicos de níquel y el efecto de los parámetros en las propiedades de los recubrimientos obtenidos sobre un sustrato metálico.
- ❖ Evaluará el efecto del pH de la disolución de níquelado en las características de los recubrimientos químicos de níquel.
- ❖ Será capaz de llevar a cabo la caracterización básica de un recubrimiento químico de níquel sobre un sustrato metálico, aplicando diversas pruebas.

Introducción

Los procesos de níquelado químico hicieron su aparición hace poco más de 50 años en el ámbito de la Ingeniería de Superficies y han venido ocupando un creciente lugar en las tecnologías disponibles para dotar de mejores propiedades a diversos materiales [1].

El proceso de electrólisis se ha venido realizando desde hace más de 100 años para, con base en ello, revestir materiales. El método tradicional de níquelado electrolítico (semejante al cobrizado, al cromado y a otros procesos electrolíticos) utiliza a la corriente como uno de los factores que permiten efectuar de manera más eficiente el proceso de depositar en el cátodo de una celda electrolítica estos y otros materiales (ver Práctica 5 de este *Cuaderno de prácticas*).

A diferencia de la electrólisis, el proceso de niquelado químico (reacción de reducción) lo realiza directamente una sustancia química (comercialmente la más empleada es el hipofosfito de sodio [2,3], también pueden usarse compuestos de boro, hidracina, etc), con lo cual no se requiere corriente eléctrica y se pueden obtener revestimientos uniformes en espesor, independientemente de la geometría del sustrato. Los depósitos de níquel están constituidos, en la mayoría de los casos, de Ni-P (con diversos contenidos de P, en función de la composición del baño empleado) que pueden presentar estructura cristalina o condición amorfa y que pueden ser modificados a través del uso de tratamientos térmicos posteriores a la obtención del recubrimiento.

Los recubrimientos de niquelado químico pueden obtenerse sobre diversos sustratos metálicos y, con adecuada preparación, se pueden también generar sobre algunos cerámicos y diversos polímeros. También es posible añadir partículas duras a los baños o bien un tercer elemento, (molibdeno u otros), que pueden aportar beneficios importantes en la resistencia a la corrosión, la resistencia al desgaste u otras propiedades superficiales.

Hay varios tipos de procesos de niquelado químico según su porcentaje de fósforo. De acuerdo al baño, se pueden clasificar de la siguiente manera:

1. Bajo contenido en fósforo: con un contenido del 2-4% de fósforo.
2. Medio contenido en fósforo: 6-8%. Para aleaciones no férricas, dureza hasta 1000 HV.
3. Alto contenido en fósforo: 10-14%. Máxima resistencia a la corrosión, dureza de 500-600 HV.

La evaluación morfológica de los depósitos de níquel se realiza de la misma forma en la que se caracteriza cualquier revestimiento depositado sobre un sustrato metálico. Sin embargo, el empleo de la difracción de rayos-X resulta crucial en la determinación de las fases cristalinas que resulten de la estructura del níquelado. Los elementos que modifican el tipo de estructura depositada son los siguientes [4]:

1. **Sulfato de níquel:** Constituye la principal fuente de iones de níquel, además de controlar los límites admisibles de densidad de corriente.
2. **Cloruro de níquel:** Suministra los iones cloruros necesarios para asegurar la corrosión de los ánodos de níquel. También es una fuente secundaria de iones níquel. Las concentraciones altas de iones de cloruro de níquel extienden el rango de operación de la densidad de corriente e incrementan la conductividad del baño.
3. **pH:** La mejor nivelación del depósito de níquel es obteniendo un pH de 4.6 y este puede ajustarse por adición de ácido sulfúrico químicamente puro al 10%, de lo contrario, si el pH es menor de 4.6, este se puede regular, adicionándole hidróxido de potasio a una concentración de 0.4M.

Aunado a los elementos anteriores, los siguientes componentes son parte de la formulación de una disolución para níquelado químico [5].

- a) Una sal que suministre el níquel (comúnmente un sulfato o un cloruro).
- b) Un agente reductor.
- c) Agentes complejantes, para controlar la cantidad de níquel «libre» disponible para la reacción.

- d) Estabilizadores.
- e) Aceleradores.
- f) Una superficie adecuadamente preparada de modo que resulte catalítica.
- g) Una temperatura apropiada.

Material y/o equipo necesario

Material:

- ❖ Piezas de cobre y/o aleaciones
- ❖ Hipofosfito de sodio
- ❖ Cloruro o sulfato de níquel (mejor sulfato)
- ❖ Acetato de sodio
- ❖ Hidróxido de sodio
- ❖ Material de vidrio (matraces y vasos de precipitados)
- ❖ Hilo de nylon
- ❖ Agitadores magnéticos

Equipo:

- ❖ Horno de mufla
- ❖ Equipo para preparación de probetas metalográficas
- ❖ Microscopio óptico (y electrónico si fuese posible)
- ❖ Microdurómetro (de ser posible)
- ❖ Balanza analítica
- ❖ Parrilla calefactora

- ❖ Medidor de pH
- ❖ Un equipo de limpieza ultrasónica

Desarrollo

a) Preparación de las piezas para el niquelado

Se cortarán tres probetas de cobre o de aleaciones de cobre de $3 \times 3 \times 1$ cm que serán lijadas con grado 600 para quitar restos de óxidos y promover una rugosidad adecuada. A cada pieza se le practicará una limpieza mediante una solución alcalina de pH 9* y otra ácida de pH 3*, seguidas cada una de un enjuague, a lo que se sumará un secado final mediante alcohol seguido de aire caliente. Alternativamente, si se cuenta con el equipo apropiado, se realizará una limpieza ultrasónica en una inmersión de alcohol etílico y agua en una proporción de 1:1 durante 5 minutos. A una de estas piezas preparadas se les medirá la microdureza Vickers o dureza superficial Rockwell para después realizar una metalografía inicial y así tener la probeta testigo.

* El profesor propondrá distintas disoluciones para este fin dependiendo de los reactivos disponibles

b) Procedimiento para el niquelado químico

Las dos probetas restantes se colocarán cada una en un diferente baño de niquelado (constituido de las proporciones adecuadas de sulfato

o cloruro de níquel, hipofosfito de sodio y acetato de sodio, en el caso ácido y de las proporciones adecuadas de sulfato de sodio, hipofosfito de sodio, citrato de sodio y ácido láctico en el tipo de baño alcalino), previa medición del pH inicial de la disolución, mediante el pHmetro correspondiente o en su defecto utilizando tiras de papel pH. Cada baño deberá estar a la temperatura de 85 °C con agitación moderada.

c) Tratamiento térmico de piezas niqueladas químicamente

Solo una de las piezas niqueladas químicamente se someterá a un tratamiento térmico de una hora a 400 °C, colocándola en una mufla. Al cabo de ese tiempo se extraerá y se enfriará para llevar a cabo la caracterización correspondiente.

d) Caracterización de piezas revestidas

Los estudiantes anotarán las características superficiales de las probetas niqueladas para después montarlas en baquelita y realizar lo siguiente:

- a) Medición de la microdureza Vickers o dureza superficial Rockwell (E).
- b) Observación metalográfica superficial a diferentes magnificaciones.
- c) Observación transversal del niquelado para medir el espesor generado de la capa.

Resultados

De la experimentación anterior, los alumnos reportarán lo siguiente:

- a) La dureza o microdureza del material original, la de la pieza niquelada químicamente sin tratamiento térmico y de la pieza niquelada tratada térmicamente a 400 °/1 hora.
- b) El espesor del niquelado.
- c) Micrografías de la morfología de cada una de las piezas (original, niquelada S/T y niquelada C/T).

Análisis de resultados

Con los datos provenientes de los resultados obtenidos, los equipos deberán analizar lo siguiente:

- a) La morfología de los tres tipos de piezas que indican defectos superficiales como: porosidad, continuidad superficial, resquicios, tipo de estructura (laminar, globular, dendrítico, etc). Asimismo, se analizará transversalmente la capa niquelada con sus características físicas. Por ello es necesario diferentes magnificaciones para hacer una buena caracterización.
- b) Generar una gráfica donde se incluyan las durezas o microdurezas promedio de todas las piezas. Calcular el cambio en la dureza que se haya conseguido (en porcentaje), luego de aplicar el tratamiento térmico, con respecto a la dureza original.

Resuelva las siguientes cuestiones:

3. ¿De qué manera se mejoraría el depósito de níquel (grosor) y calidad superficial (menos defectos)?
4. ¿Qué otras propiedades del niquelado cambian con el tratamiento térmico a 400 ° durante 1 hora?
5. ¿Qué aplicaciones industriales tiene actualmente el niquelado químico?
6. Investigue de qué forma se tienen que tratar químicamente los residuos del baño del niquelado químico.
7. Indique ventajas y desventajas del proceso de niquelado químico frente a otros sistemas de recubrimientos como pinturas o galvanizado.

Conclusiones y/o comentarios

El estudiante obtendrá conclusiones puntuales acerca del proceso de niquelado químico así como de las propiedades mecánicas y estructurales obtenidas. Asimismo, se concluirá sobre los riesgos medio-ambientales y de salud al emplear el baño de niquelado químico.

1. «Ciencia e Ingeniería de la Superficie de los Materiales Metálicos». Alfonso J. Vázquez y Juan J. Damborenea (editores). No 31 de la Colección *Textos Universitarios*. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España. 2001. Capítulo: «Recubrimientos por reducción química autocatalítica».
2. D. Pacheco, O. León, S. Liscano y L. Gil, «Influencia de la temperatura de tratamiento térmico sobre la velocidad de corrosión de recubrimientos autocatalíticos Ni-P». *Universidad, Ciencia y Tecnología*. Volumen 12, No 47, junio 2008. p. 65 - 72.
3. F. Sánchez, A. Bolarín, L. Hernández, A. Barba, G. Torres. «Obtención y caracterización de recubrimientos compuestos Ni-P-X (SiC, WC) via química». *Superficies y Vacío* 25 (2) 128-133. Junio 2012.
4. <http://repositorio.unan.edu.ni/6658/> (consultado en agosto de 2019). A. F. Hurtado Gutiérrez, J.A. Cabrera Velásquez *Estudio de la niquelación como protección contra la corrosión, resalte del brillo y adherencia en el acero al carbono*, Laboratorio de Química 110 UNAN-Managua, Abril-Diciembre 2014. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua.
5. M. Pilar Parra Gómez. *Obtención y evaluación electroquímica de recubrimientos por niquelado químico sobre aceros proyectados térmicamente con cobre y una aleación cobre-aluminio*. Tesis Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 2016.



Elaborado por:

Dr. Edgar Onofre Bustamante*/M.T.A. Adriana Montiel
García*/ y miembros del grupo del CENISA.

Carrera	Plan de estudio	Clave de la asignatura	Nombre de la asignatura
Ing. Mecánica	2006	0999	Ingeniería de Superficies
Ing. Mecatrónica			

Práctica No.	Laboratorio de	Nombre de la Práctica	Duración
7		Tratamientos de conversión química y anodizado	6 horas (3 sesiones)

* Investigadores del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), Unidad Altamira



Objetivos

El alumno:

- ❖ Conocerá los fundamentos para aplicar un tratamiento de conversión química de pavonado por inmersión en un acero de bajo carbono así como los principios del anodizado de aluminio.
- ❖ Realizará una limpieza y/o sellado de la superficie con agua hirviendo.
- ❖ Identificará las ventajas y desventajas que proporciona cada método.
- ❖ Conocerá los riesgos de seguridad al aplicar estos tratamientos.
- ❖ Caracterizará superficialmente los recubrimientos obtenidos.
- ❖ Evaluará el efecto de la limpieza de la superficie mediante decaído químico en el tratamiento de conversión química (pavonado).

Introducción

Los adelantos en los métodos de preparación de superficie son paralelos al desarrollo de recubrimientos protectores de alto rendimiento. Primero fueron los recubrimientos vinílicos, los cuales, para obtener un comportamiento óptimo, necesitaban una superficie completamente limpia. Después aparecieron los recubrimientos epóxicos y poliuretanos. Sin embargo, en las últimas décadas la preparación de superficies ha cobrado gran importancia, y existen estudios sobre el efecto de la preparación de la superficie sobre los recubrimientos, como el llevado a cabo por J. C. Hudson de la Asociación Británica de Investigación del Hierro y Acero [1].

Es preciso aclarar que una adecuada adherencia es la llave para el buen desempeño de un recubrimiento para proporcionar una larga vida útil. Si la adherencia es deficiente, el recubrimiento seguramente fallará gradualmente ya sea por ampollamiento, corrosión bajo la película, o delaminación. Con una alta adherencia, el recubrimiento puede soportar la mayoría de los requerimientos de resistencia ambientales, que de lo contrario afectarían su integridad. Esto incluye resistencia a la abrasión, impacto, flexión, hidratación, transmisión de vapor, humedad, condiciones salinas, resistencia a los químicos corrosivos, microorganismos, y todas las condiciones ambientales que afectan la vida de un recubrimiento [2].

Por lo tanto, el objetivo de la preparación de superficies es proveer máxima adherencia al recubrimiento. Sin embargo, el mecanismo real de la preparación tiene un doble propósito. El primero es remover algún material extraño de la superficie del sustrato, como costras unidas químicamente, películas de óxido y algunos otros productos similares que cubren sitios activos sobre la superficie del metal. El segundo propósito de la preparación de la superficie es incrementar el área, aumentando la rugosidad y los patrones de anclaje (perfil de anclaje) de la superficie. Este incremento de área real de superficie aumenta los sitios activos de anclaje, por lo que se promueve la adherencia polar y química del recubrimiento con la superficie metálica [3].

Por otro lado, los tratamientos de conversión química surgen como una alternativa que no solo puede ser vista como una preparación de superficie y/o una limpieza, sino también como un recubrimiento

temporal que proporciona un perfil de anclaje para sostener un recubrimiento orgánico posterior. Estos se basan en poner en contacto el sustrato o metal con el agente químico (baño de conversión) para formar una capa delgada de productos de corrosión, difícilmente soluble, sobre la superficie del metal por proteger [4].

En este sentido, uno de los tratamientos de conversión química que actualmente ha sido estudiado debido a las excelentes propiedades de adherencia que provee, es el pavonado. El pavonado es una capa de óxidos porosa y adherente, que forma parte integral del sustrato debido a que los óxidos formados son de la misma naturaleza química que el sustrato. Sin embargo, a pesar de formar una barrera física entre el metal base y el electrolito, estos últimos pueden difundir a través de la red de poros e iniciar el proceso de oxidación, por tal motivo, se recomienda llevar a cabo un sellado de esta película mediante ceras o aceites para brindarle una mayor eficacia frente al proceso de corrosión además de proporcionar un acabado estético [5,6]. Las propiedades protectoras dependen de la capa de pavonado en relación con las condiciones de obtención, como lo son: las sales empleadas para la oxidación de la superficie metálica, tiempos de inmersión y temperaturas del baño; así como el aceite que sellará los poros generados [7].

Por otra parte, el aluminio es actualmente un metal de importancia creciente y con muchas aplicaciones en las que se aprovechan sus ventajosas propiedades de baja densidad, excelente resistencia específica y muy buena conductividad térmica y eléctrica.

Para protegerse de la acción de los agentes atmosféricos, el aluminio se recubre, de forma natural, de una delgada película de Al_2O_3 que tiene un espesor más o menos regular del orden de 0,01 micras sobre el metal recientemente decapado y puede llegar a 0,2 o 0,4 micras sobre metal que haya permanecido en un horno de recocido [8].

Para poder alargar la vida útil del aluminio y sus aleaciones, se pueden obtener películas de óxido artificialmente mucho más gruesas y de características distintas a las de la capa natural, más protectoras, por procedimientos químicos y electrolíticos. El proceso de anodizado permite formar capas en las que el espesor puede, de acuerdo a los requerimientos, ser de algunas micras a 25/30 micras en los tratamientos de protección o decoración, llegando a las 100 micras y más por procesos de anodizado duro [9].

Varios electrolitos se emplean para producir la oxidación del metal. Los más comunes son el ácido sulfúrico, H_2SO_4 y el ácido crómico, HCrO_3 , aunque este último por regulaciones medio-ambientales está cada vez más restringido en el sector industrial. Por lo tanto, el procedimiento de anodizado con ácido sulfúrico es el más utilizado debido a las condiciones económicas de explotación, pero sobre todo por los resultados satisfactorios que se obtienen [10]. La estructura y características de la capa anodizada pueden modificarse en función de diferentes parámetros:

- ❖ Naturaleza del electrolito
- ❖ Composición
- ❖ Temperatura del electrolito

- ❖ Tiempo de tratamiento
- ❖ Voltaje de aplicación

Material y/o equipo necesario

Material:

- ❖ 8 placas de acero al carbono 1018 de $5 \times 5 \times 0.1$ cm
- ❖ Ácido clorhídrico 1:1 + 3.5 g de hexametilentetramina (en un litro)
- ❖ Hidróxido de sodio pentahidratado + Nitrato de potasio (3:1)
- ❖ Cloruro de sodio al 3% en peso
- ❖ Agua destilada
- ❖ Acetona
- ❖ Lijas (400 y 600)
- ❖ Láminas de aluminio u hojas (gruesas) de papel aluminio
- ❖ Ácido sulfúrico
- ❖ Ácido clorhídrico
- ❖ Agua
- ❖ Material de vidrio (matraces y vasos de precipitados)
- ❖ Hilo de nylon
- ❖ Anilina
- ❖ Clips forrados de plástico

Equipo:

- ❖ Fuente de poder
- ❖ Equipo para preparación de probetas metalográficas
- ❖ Microscopio óptico (y electrónico si fuese posible)

- ❖ Microdurómetro o durómetro Rockwell escala E
- ❖ Balanza analítica
- ❖ Parrilla eléctrica
- ❖ Agitador magnético
- ❖ Baño de acero inoxidable y/o vidrio
- ❖ Termómetro
- ❖ Soporte universal
- ❖ Pinzas de 3 dedos
- ❖ Agitador magnético
- ❖ Pinzas de acero inoxidable
- ❖ Vaso de precipitado de 500 ml
- ❖ Medidor de pH
- ❖ Microscopio óptico
- ❖ Un equipo de limpieza ultrasónica

Desarrollo

a) Pavonado

Limpieza (*Decapado químico*). El primer paso es la preparación de la superficie del sustrato para remover los contaminantes tales como aceite, grasa, pintura, óxido y humedad. Para realizar lo anterior se iniciará con una limpieza por medio de un decapado químico, utilizando una disolución de ácido clorhídrico 1:1 + 3.5 g de hexametilentetramina (en un litro), durante 10 min. Posteriormente, se realizará

un lavado con agua destilada y finalmente se enjuagará con acetona. Las muestras se secan con aire caliente para después colocarlas en un desecador antes de iniciar los tratamientos.

Tratamiento. Después de que las muestras se limpiaron, se procederá a realizar el tratamiento de conversión química de pavonado, utilizando como reactivo pavonante sales de NaOH (100 g) + KNO₃ (36 g) en 100 mL de agua destilada, a temperatura de 80 °C. Se coloca el NaOH en el agua destilada hasta completa disolución para, posteriormente, adicionar el KNO₃. Después se colocan las muestras, con agitación constante y controlando la temperatura. Al concluir el tiempo de inmersión correspondiente, las muestras se sacan y se lavan con agua corriente para la eliminación de las sales retenidas del pavonado. Los tiempos de inmersión serán de 5, 10, 30 y 60 minutos.

b) Anodizado

Preparación. El electrolito del anodizado consistirá en una disolución de ácido sulfúrico al 20% en peso en agua. Dejar enfriar y mantener el baño a 20 °C.

1. Corte 2 piezas de lámina o de papel aluminio grueso: una de 10 cm de largo por 3 cm de ancho (que será el ánodo - positivo) y la otra de 30-35 cm de largo × 12 cm de ancho (que será el cátodo - negativo). Asegúrese que la lámina ya doblada quede en forma cilíndrica en el interior del vaso de precipitados de 250 ml, como se muestra en la figura 1.

2. Realizando el proceso con cuidado, desengrase las láminas sumergiéndolas en una disolución alcalina de hidróxido de sodio (sosa cáustica) al 5% en agua, a una temperatura de 50 o 60 ° C. Mantener las piezas durante 2 o 3 minutos, para luego retirar y lavar con abundante agua.
3. Después del tratamiento de lavado, las láminas de aluminio deberán sumergirse en una disolución ácida para neutralizar cualquier vestigio que pudiera haber quedado del baño anterior. Para tal efecto, la disolución ácida se preparará con ácido clorhídrico al 50 % en agua a temperatura ambiente, (puede ser también ácido nítrico). Sumergir las piezas de 2 a 5 segundos para después volver a lavar con abundante agua.

Nota: La manipulación de las láminas de aluminio deberá realizarse utilizando pinzas metálicas. Por ningún motivo tocar las placas con los guantes ni mucho menos con los dedos.

4. Con cuidado coloque la disolución de ácido sulfúrico en el vaso de precipitados, en el que previamente contiene al ánodo y al cátodo. El electrolito debe quedar aproximadamente un centímetro por debajo de la altura del cilindro de aluminio doblado.
5. Conecte el circuito y ajuste la fuente de poder a un voltaje entre 5 y 10 volts. Se puede corroborar que está ocurriendo la electrólisis dado que se observa un burbujeo de hidrógeno en el cátodo. Mantener el experimento al menos durante 20 minutos.
6. Para el coloreado del anodizado, prepare una disolución de agua con anilina casera a una temperatura entre 30 a 40 ° C. La proporción es de 15 al 20% en peso de anilina por cada litro de agua. Sumergir las piezas dentro del tiempo necesario al menos durante 20 minutos.

7. Finalmente se sellará la capa anodizada de aluminio coloreada. Para tal efecto se deberá sumergir la lámina de aluminio en agua destilada hirviendo durante 2 a 3 minutos.

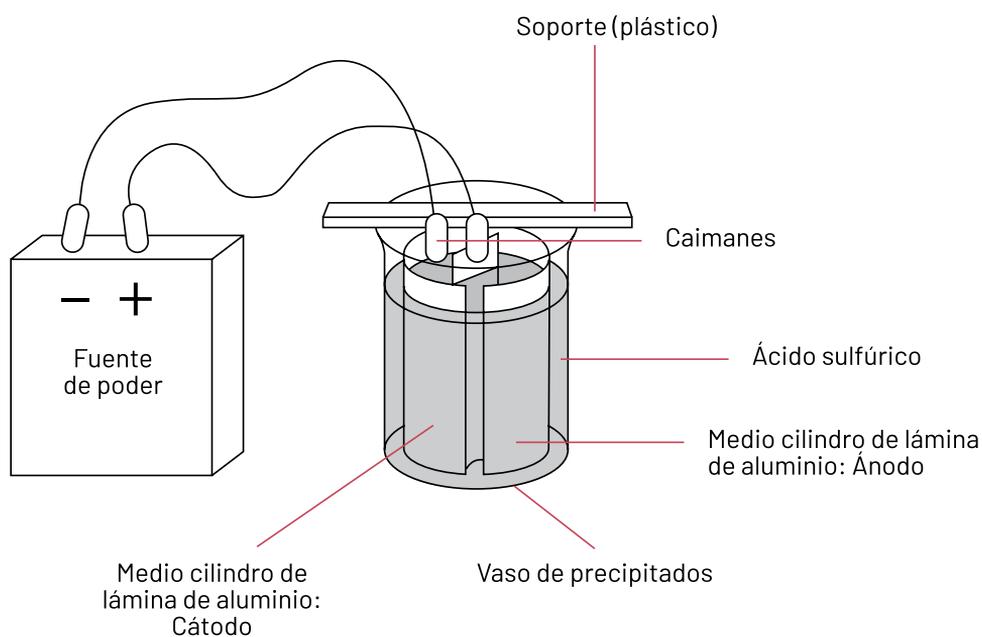


Figura 1.- Esquema del arreglo propuesto para la realización del anodizado de aluminio

Resultados

1. Determinar la dureza de las piezas tratadas ya sea utilizando micro-dureza Vickers o dureza superficial Rockwell escala E.
2. Medir la rugosidad de cada pieza tratada.

3. Caracterizar la superficie pavonada y la anodizada mediante observación microscópica para determinar la homogeneidad del pavonado y anodizado. Posteriormente, preparar las muestras para evaluar el espesor y las características de las capas de ambos tratamientos.
4. Evaluar la adhesión a 2 muestras de cada condición experimental siguiendo el ensayo de la norma ASTM B571 [11] apartado 3 del procedimiento de doblado (Bend Test). Tomar evidencias fotográficas

Análisis de resultados

El estudiante realizará lo siguiente:

- a) Gráfica y análisis de dureza y rugosidad contra el tiempo de tratamiento de las piezas pavonadas y anodizadas.
- b) Análisis de las características superficiales y transversales de las capas obtenidas para ambos tipos de tratamientos.
- c) Gráfica y análisis de espesor contra dureza de las piezas tratadas.
- d) Evidencias y análisis de los resultados del ensayo de adherencia en ambos tipos de muestras.

Se recomienda consultar la bibliografía propuesta para familiarizarse con los términos de análisis para ambos tipos de tratamiento.

Resuelva las siguientes cuestiones:

1. Investigue una aplicación actual del pavonado y otra del anodizado.
2. Mencione tres ventajas y desventajas del pavonado y del anodizado (pueden ser de proceso, de aplicación, etc.).
3. Investigue a qué otros metales, diferentes a los de esta práctica, se les puede realizar el pavonado y el anodizado. Diga por qué.
4. Investigue comercialmente la rentabilidad (costo) del pavonado en el acero y del anodizado en el aluminio.

Conclusiones y/o comentarios

El alumno concluirá puntualmente el efecto del tiempo de pavonado en las propiedades de dureza, espesor de capa obtenida, rugosidad y adherencia. Asimismo, concluirá el resultado final de la comparación entre el tratamiento del pavonado con el de anodizado de las propiedades mencionadas.

Bibliografía

1. Report of the Committee on Corrosion and Protection (presidido por T. P. Hoar). Dept. of Trade and Industry, HMSO, Londres, 1971.
2. Alfonso J. Vázquez Vaamonde, Juan J. De Damborenea González, Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos.

- Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC, Colección de Textos Universitarios, 31(2000)20, 419, 501. Madrid.
3. William F. Smith. Javad Hashemi, *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*, Mc Graw Hill, España 1998, 647-684.
 4. M. Martín A. Caballero y S. Feliu. Propiedades protectoras de la capa de pavonado en relación con las condiciones de su obtención. *Rev. Metal CENIM* Vol. 8. (1972) 179-183.
 5. M. Martín, A. Caballero, M. A. Guillen y S. Feliú, Influencia de las impregnaciones posteriores al pavonado en el comportamiento frente a la corrosión, *Rev. Metal CENIM* 8(1972) 337-342.
 6. M. Martín, A. Caballero, M. A. Guillen y S. Feliú, Propiedades protectoras de la capa de pavonado en relación con las condiciones de su obtención, *Rev. Metal CENIM* 8(1972) 179-183.
 7. E. Onofre-Bustamante, M. A. Domínguez-Crespo, J. Genescá-Longueras, F. J. Rodríguez-Gómez, Characteristics of blueing as an alternative chemical conversion treatment on carbon Steel, *Surface & Coating Technologies*, 201(2007)4666-4676.
 8. Lizarbe, R., «Oxidación anódica, coloración y sellado del aluminio», *Teoría y Práctica de la Lucha Contra la Corrosión*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (C.S.I.C.), 1ª Edición, Grafimad.S.A., Madrid, (1984).
 9. Fedotiev, N. P., «Electropulido y anodización de metales», pp. 286-320, Ed. Gustavo Gilli, S.A., Barcelona, 1989.
 10. Royal Society of Chemistry-Nuffeld Foundation.- «Anodizing Aluminium». *Practical Chemistry*. Sept. 2016.
 11. ASTM 571-97, Standard Practice for Qualitative Adhesion Testing of Metallic Coatings, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997



Elaborado por:

Grupo del CENISA,
Facultad de Ingeniería, UNAM

Carrera	Plan de estudio	Clave de la asignatura	Nombre de la asignatura
Ing. Mecánica	2006	0999	Ingeniería de Superficies
Ing. Mecatrónica			

Práctica No.	Laboratorio de	Nombre de la Práctica	Duración
8	Ingeniería de Superficies	Efecto de la preparación superficial en la adherencia de recubrimientos obtenidos por proyección térmica por flama	4 horas (2 sesiones)



Objetivos

El alumno:

- ❖ Conocerá el procedimiento para aplicar un recubrimiento usando tecnologías de proyección térmica por flama.
- ❖ Identificará las ventajas y desventajas que proporciona este método respecto a otro tipo de recubrimientos como pinturas y galvanizado.
- ❖ Obtendrá un recubrimiento por medio de tecnologías de proyección térmica por flama.
- ❖ Aprenderá las normas de seguridad necesarias para utilizar este tipo de tecnologías.
- ❖ Caracterizará superficial y mecánicamente el recubrimiento obtenido.
- ❖ Evaluará el efecto de la rugosidad generada mediante el granallado previo, en la adherencia de un recubrimiento obtenido por proyección térmica por flama.

Introducción

Una superficie es una intercara entre un objeto sólido y sus alrededores, los cuales interactúan con dicho objeto a través de reacciones físicas o químicas o bien por medio de fuerzas mecánicas [1]. Los recubrimientos han sido pensados como soluciones de ingeniería para mejorar las superficies contra el desgaste, la corrosión, la fatiga y otros fenómenos estructurales. Actualmente, existen varios métodos

de aplicación de recubrimientos, por lo que es importante conocer las ventajas y limitaciones que ofrece un método respecto a otro.

Un proceso aceptable de deposición requiere ser compatible con las restricciones físicas del sustrato, tales como la geometría y la temperatura de operación. Los requerimientos de la unión recubrimiento-sustrato incluyen el coeficiente de expansión térmica de ambos materiales, los distintos puntos de fusión así como la compatibilidad química durante el proceso de deposición y durante la vida en servicio de la pieza recubierta. La proyección térmica puede ser empleada para satisfacer muchos de estos requerimientos [2].

Las principales propiedades de los recubrimientos generados mediante tecnologías de proyección térmica son:

- ❖ Dureza y resistencia al desgaste
- ❖ Resistencia a la corrosión-oxidación
- ❖ Propiedades térmicas, eléctricas y magneto-ópticas
- ❖ Maquinabilidad

Existen diversos procesos de proyección térmica, entre los cuales destacan: *por flama, plasma, arco eléctrico, por detonación, rociado en frío y por alta velocidad.*

Proyección térmica por flama

Este procedimiento fue el primer proceso de proyección térmica desarrollado (aprox 1900) y es aún de uso común. Los procesos por flama emplean energía química de los gases para generar calor. Las flamas

de oxiacetileno son las más comunes, usando acetileno en combinación con oxígeno para generar altas temperaturas de combustión. Las pistolas usadas en este proceso efectúan la combustión exteriormente al extremo frontal de la boquilla de la pistola (ver figura 1).

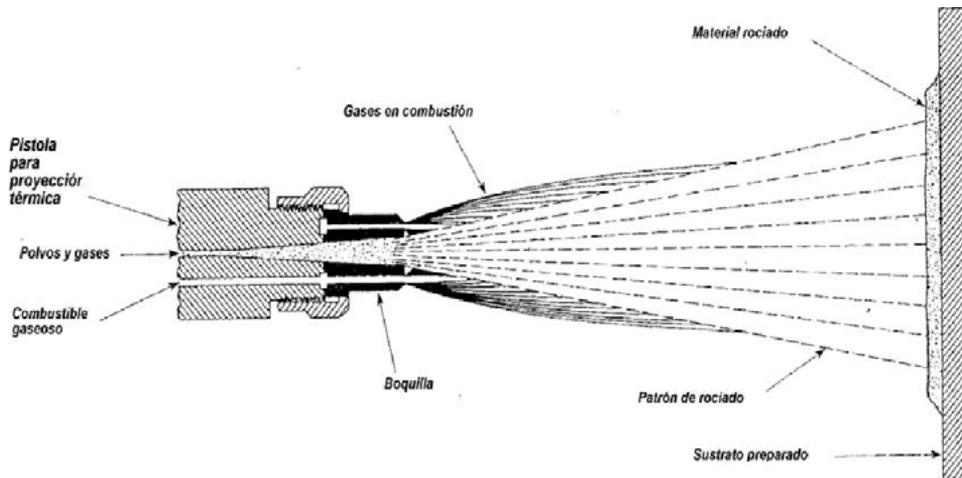


Figura 1. Esquema de los componentes de una pistola y un proceso de proyección térmica por flama: Fuente de [3]

Conocer al detalle los parámetros que modifican la flama es de vital importancia, dado que estos determinan el alcance (grado de penetración) y el tipo de deposición de las partículas sobre el sustrato metálico. Los parámetros por considerar son: *presión, flujo, relación estequiométrica oxígeno-acetileno*. Estos parámetros determinarán el tipo de flama durante el proceso, siendo reductora, neutra u oxidante el tipo de comportamiento térmico generado [4].

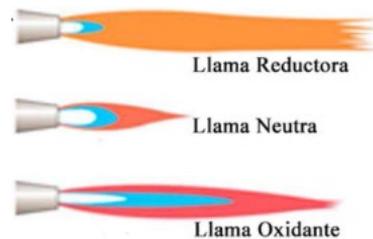


Figura 2. Esquema de la longitud de las diferentes zonas de la flama: Fuente de [4]

La flama oxidante se produce cuando hay un exceso de oxígeno, en cambio la flama es neutra cuando la relación estequiométrica de acetileno y oxígeno es equimolar, es decir, la relación es 1:1. La flama es reductora cuando hay un exceso de acetileno.

Material y/o equipo necesario

Material:

- ❖ Polvo para proyectar (Ni-Cr- Si-B-Fe)
- ❖ Tramo de solera de acero laminado en frío (Cold Rolled - sustrato)
- ❖ Granalla de Al_2O_3 , SiO_2 o semejante
- ❖ Acetona

Equipo:

- ❖ Pistola de proyección térmica (por polvo o por alambre)
- ❖ Pistola de granallado
- ❖ Tanques de acetileno y oxígeno y conexiones junto con compresor de aire
- ❖ Microdurómetro o durómetro Rockwell
- ❖ Rugosímetro Mitutoyo
- ❖ Medidor de adherencia *pull off*
- ❖ Microscopio metalográfico

Preparación de la superficie

Limpieza y rugosidad. El primer paso en la preparación de la superficie del sustrato por recubrir consistirá en la remoción de los contaminantes como aceite, grasa, pintura, óxido y humedad. Para lograr lo anterior se realizará una limpieza en dos partes: la primera por medio de granallado de Al_2O_3 seguida con una limpieza con acetona para remover grasas y/o aceites. De ser posible utilizar una limpieza con ultrasonido, seguida de un secado con aire a presión. De esta forma el proceso proveerá la rugosidad necesaria para el adecuado anclaje del recubrimiento. En esta etapa se emplearán 4 diversos tiempos de granallado para lograr distinto nivel de rugosidad superficial. Se recomienda utilizar 2, 5, 8 y 12 minutos.

Calibración de la pistola. A continuación se realizará la conexión del equipo de proyección térmica, teniendo especial cuidado de que no se presenten fugas en las conexiones de oxígeno y acetileno; se deberá seleccionar la boquilla apropiada, así como regular la velocidad de salida del material por proyectar. El profesor indicará los detalles de conexión así como el tipo de accesorios por utilizar.

Proyección de la superficie. Se recomienda realizar la deposición sobre el sustrato con un precalentamiento del orden de 150 a 200 °C, manteniendo constantes la distancia entre la pistola y el sustrato (50 cm), el ángulo de deposición (90°), la presión (kg/cm²) de O₂-acetileno de 2:1.5 con una presión de aire de 7 Bar. El tiempo de deposición de 20 segundos.

Valoración de la adherencia y dureza. De las diversas piezas revestidas, se realizará una valoración de la adherencia mediante un equipo del tipo pull off test siguiendo la norma ASTM D4541 [5]. Asimismo, se medirá la microdureza Vickers o dureza superficial Rockwell E de todas las superficies para tener el comparativo general.

Medición de rugosidad. Utilizando un rugosímetro se medirán los perfiles de rugosidad de todas las muestras. Se reportará una medida promedio de rugosidad por cada probeta.

Metalografía. Una vez concluida la deposición de cada recubrimiento, se realizará un corte transversal en el sustrato para realizar un análisis metalográfico de la zona del recubrimiento para poder medir el espesor y observar la zona en la intercara.

Resultados

El alumno reportará lo siguiente:

- ❖ Observación de la superficie de las piezas recubiertas
- ❖ Microscopía óptica de la intercara recubrimiento-sustrato
- ❖ Medidas de la rugosidad de las piezas granalladas a diversos tiempos
- ❖ Valores de la adherencia de las piezas revestidas
- ❖ Dureza o microdureza de las piezas recubiertas

El alumno realizará la metalografía y observará con el microscopio óptico la superficie de la pieza recubierta visualizando la morfología del recubrimiento, identificando partículas fundidas, partículas no fundidas, presencia de óxidos, porosidades, adherencia y acabado superficial. Para saber qué términos utilizar así como la forma de reportar este tipo de resultados, se recomienda consultar la bibliografía propuesta [3,6].

El alumno analizará los factores que intervienen en el proceso de proyección térmica tales como: la distancia de la pistola a la superficie del sustrato, velocidad de deposición, temperatura de flama, temperatura de precalentamiento del sustrato, rugosidad del sustrato y ángulo de proyección.

El estudiante construirá:

- a) Una gráfica de rugosidad contra tiempo de proceso de granallado
- b) Otra gráfica de rugosidad contra adherencia

Resuelva las siguientes cuestiones:

1. Investigue al menos una aplicación actual de la proyección térmica.
2. Mencione ventajas y desventajas de la proyección térmica comparada con el galvanizado.
3. Investigue qué materiales se proyectan térmicamente en la actualidad.
4. Investigue comercialmente la rentabilidad (costo) de la proyección térmica frente al galvanizado.

Conclusiones y/o comentarios

El alumno concluirá puntualmente acerca de las ventajas del proceso de proyección térmica respecto a otras técnicas de deposición de material.

El alumno concluirá si existe o no, una relación entre el tiempo de granallado con la rugosidad obtenida así como la referente a la influencia de la rugosidad en la adherencia de los recubrimientos.

Bibliografía

1. «Ciencia e Ingeniería de la Superficie de los Materiales Metálicos». Alfonso J. Vázquez y Juan J. Damborenea (editores). No 31 de la Colección *Textos Universitarios*. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España. 2001.
2. Lech Pawlowski. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. British Library Cataloguing. England, 1995.
3. Eduardo Garduño, Arturo Barba, Javier Cervantes, Israel Garduño, Raúl Valdez. «Caracterización del Recubrimiento Ni-Cr-B-Fe-Si sobre acero de bajo carbono, generado mediante el proceso de proyección térmica automatizado». *Memorias del 14 Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica (SOMIM)*. p. 679-691. ISBN 978-968-9773-03-8. 2008.

4. <http://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/article/view/326490/20783786> (consultado en agosto de 2019).
E.C. Iglesias, C. P. Velásquez, F.V. Galvis. Estudio de llamas oxiacetilénicas usadas en la proyección térmica. *Revista Colombiana de Materiales* 9 (2016) 15-26.
5. ASTM D4541-17, *Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
6. J.C.B. Hernández, V.A.C. Vázquez. *Proyección térmica por flama de hidroxiapatita en acero 316L y aleación Ti-6Al-4V*. Tesis Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2014.



Elaborado por:

Grupo del CENISA,
Facultad de Ingeniería, UNAM

Carrera	Plan de estudio	Clave de la asignatura	Nombre de la asignatura
Ing. Mecánica	2006	0999	Ingeniería de Superficies
Ing. Mecatrónica			

Práctica No.	Laboratorio de	Nombre de la práctica	Duración
9	Ingeniería de Superficies	Caracterización de recubrimientos orgánicos	6 horas (3 sesiones)



El alumno:

- ❖ Conocerá las diversas técnicas de caracterización de adhesión de un recubrimiento orgánico depositado en sustratos metálicos.
- ❖ Evaluará el efecto de la rugosidad en la fuerza de adhesión de dos tipos de recubrimiento orgánico.

Introducción

Los recubrimientos orgánicos han sido extensamente utilizados para la protección de los metales contra la corrosión. Los mecanismos de protección generalmente aceptados son: efecto barrera (físicoquímico), efecto inhibidor, adhesión y efectos electroquímicos. La tabla 1 presenta una clasificación de los distintos recubrimientos empleados en los diversos ámbitos industriales.

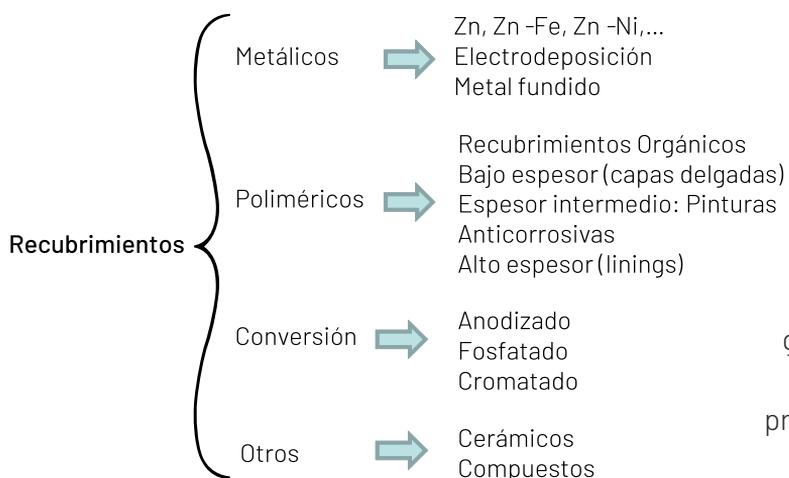


Tabla 1.
Clasificación general de los tipos de recubrimientos protectores. Fuente: CENISA

Los recubrimientos generalmente tienen defectos (poros) que permiten el proceso de corrosión debido al acceso de agentes externos (O_2 , H_2O) en la intercara metal-recubrimiento [1]. Cuando un recubrimiento orgánico empieza a presentar daños internos, se presenta una delaminación y/o ampollamiento por falta de adherencia, por lo que se presenta corrosión por debajo del recubrimiento. Esta puede presentarse de forma localizada (puntual) o extendida de acuerdo al mecanismo de corrosión generado. La figura 1 muestra una esquematización del proceso de ampollamiento de una pintura depositada sobre hierro. Se aprecia que en la zona desprendida se encuentran especies como el ión ferroso (Fe^{2+}) así como hidrógeno iónico (H^+) y radicales hidroxilo (OH^-). Estas especies en conjunto provocan el proceso llamado delaminación o ampollamiento, lo que indica falla del recubrimiento. Por lo anterior, se inicia el proceso de corrosión, que para el caso del hierro o el acero, las reacciones electroquímicas involucradas en este proceso son:

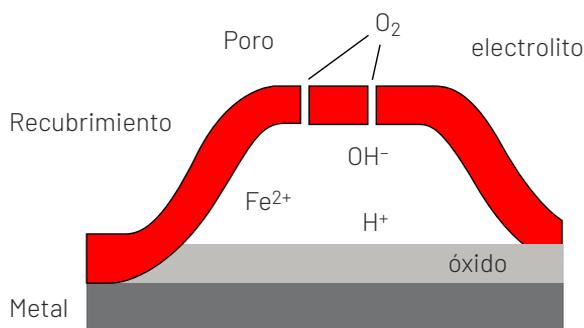


Figura 1. Esquematización del proceso de delaminación o ampollamiento del hierro. Fuente: CENISA

Las aplicaciones que han demandado mayor exigencia en la formulación de tales recubrimientos son: *sistemas de recubrimientos*

automotores, sistemas de protección de ductos, recubrimientos en equipos de construcción, sistema de protección aeronáutica, recubrimientos para aplicaciones marinas, aplicaciones de interiores y exteriores (ornamental), plantas industriales, tanques de almacenamiento, etc. Adicionalmente al tipo de recubrimiento seleccionado (epóxicos, poliuretanos, uretanos poliéster), es de vital importancia determinar el método de deposición más adecuado para garantizar una deposición homogénea con la menor cantidad de defectos superficiales. La habilidad que tienen los recubrimientos para mostrar un alto grado de protección es la propiedad de mojado al sustrato que permite adherirse a los sustratos metálicos. Con lo anterior, se promueve una mayor adhesión, tanto en condiciones húmedas como secas de los recubrimientos sobre el sustrato metálico [2]. Adicionalmente, la homogeneidad en espesor al momento de la aplicación junto con la característica de menos defectos posibles en el recubrimiento, han hecho posible incrementar la protección de los sustratos.

Si bien la formulación específica de cada recubrimiento es imprescindible para un buen desempeño contra la corrosión, cabe mencionar que uno de los factores de mayor importancia es la adecuada limpieza superficial antes de la aplicación de cualquier sistema de pintura. Para ello, diferentes métodos y tratamientos han sido desarrollados que proporcionan durabilidad y un adecuado desempeño en las condiciones requeridas. Para obtener una adecuada limpieza de sistemas metálicos, debe consultarse la norma ASTM G1 [3] que describe el procedimiento para la remoción de grasas o impurezas superficiales así como una selección de reactivos químicos para cada metal.

Material:

- ❖ Lijas comerciales de agua grado 80, 220 y 800
- ❖ Pintura orgánica comercial para metales (epóxica)
- ❖ Navaja o cutter
- ❖ Cloruro de sodio
- ❖ Material de vidrio (matraces y vasos de precipitados)
- ❖ Agua destilada
- ❖ Pincel delgado
- ❖ Placa de acero comercial (AISI 1010, 1018 ó 1045)
- ❖ Jabón comercial
- ❖ Cinta canela

Equipo:

- ❖ Pistola (aerógrafo) de aire para usarse con compresor
- ❖ Microscopio óptico
- ❖ Rugosímetro
- ❖ Dispositivo (maletín) del ensayo de adhesión denominado «*pull-off test*»
- ❖ Parrilla agitadora
- ❖ Cizalla para corte metálico
- ❖ Secador de aire a presión
- ❖ Medidor de espesor
- ❖ Mufla

a) Preparación de las piezas para la deposición del recubrimiento orgánico

Se cortarán seis pedazos de placa metálica de 10x10 cm. Tres placas se utilizarán para recubrirse con el aerógrafo mientras que las otras tres con pincel delgado. De las tres placas una se lijará con grado 80, la segunda placa con lija grado 220, mientras que la tercera placa se lijará con grado 800. Esta secuencia aplica para ambos juegos de placas metálicas.

Una vez lijadas las placas en una sola dirección se procederá a lavarlas con agua y jabón (con esponja suave) con secado a aire a presión. Después se procederá a pintarlas con las técnicas mencionadas procurando hacer dos pasadas o dos manos de pintura para garantizar un recubrimiento homogéneo. Se dejará secar la pintura completamente.

b) Procedimiento para el ensayo de adhesión

Una vez que la pintura orgánica se ha secado por completo, se procederá a medir el espesor de toda la placa; se realizan 20 mediciones para obtener un valor promedio con su respectiva desviación estándar. Posteriormente, se obtendrán 5 tramos pequeños (2.5 x 2.5) de cada placa. (Cortar estos pedazos evitando levantar el recubrimiento). Después, se preparará el dispositivo para montar cada placa entre dos pistones de aluminio previamente lijados y lavados con lija comercial 220 siguiendo la norma ASTM D4541 [4]. Para el pegado

de las placas con los pistones, se utilizará el pegamento designado para tal propósito. Dejar secar los dispositivos al menos 48 horas con un peso mediano encima de los pistones para promover una mejor adhesión. Al cabo del tiempo establecido (una semana), colocar los pistones en el aparato de medición de adherencia y realizar el ensayo siguiendo las instrucciones del profesor. Medir la fuerza de adhesión y evaluar el área desprendida en la placa.

c) Procedimiento para el ensayo de rugosidad y ampollamiento

Al resto de los pedazos de cada placa se les observará bajo el microscopio óptico para evaluar las características de deposición tratando de observar porosidad, fractura o defectos generales sobre la superficie. Después, a esos mismos pedazos se les hará el ensayo de rugosidad. Finalmente, se harán dos pruebas adicionales: a) con una cinta adhesiva (cinta canela) se pegará a la superficie pintada y se desprenderá rápidamente para evaluar si la cinta adhesiva desprende pintura de la superficie metálica siguiendo la norma ASTM D3359 [5]. Repetir esta prueba al menos en tres diferentes pedazos, b) finalmente se marcará con una navaja la forma de equis (X) sobre la superficie pintada asegurándose que la marca llegue hasta el sustrato metálico, de acuerdo a las indicaciones de la norma ASTM D714 [6]. Después la placa se dejará sumergida en un baño salino (0.1 M) durante una semana. Al término de esta inmersión se sacará y se observará visualmente el grado de delaminación a partir de la equis, midiendo la distancia desprendida de la pintura, siguiendo las indicaciones de la norma ASTM D 610 [7].

Resultados

- a) A partir del ensayo de adhesión (pull-off test) se graficará la fuerza de desprendimiento (MPa) obtenida junto con el cálculo de área desprendida en función de la rugosidad. A estos resultados se les indicará los valores de espesor y rugosidad obtenidos. Elaborar una gráfica para cada sistema de pintado.
- b) Se obtendrán imágenes a partir de las observaciones realizadas con el microscopio óptico para cada placa de diferente rugosidad. Seleccionar el aumento que revele las mejores características y usar ese mismo para todas las placas, ya que de lo contrario no se podrá analizar la misma magnificación.
- c) Se obtendrán imágenes del ensayo de desprendimiento usando la cinta adhesiva.
- d) Se obtendrán las imágenes después del ensayo de inmersión junto con la valoración del grado de corrosión para cada placa de distinta rugosidad.

Análisis de resultados

Con los resultados obtenidos se analizará lo siguiente:

- a) Si existe o no una correlación entre el grado de rugosidad y el espesor con la fuerza de adhesión para cada pintura.
- b) De manera visual si la cinta adhesiva desprendió pintura. Este análisis es meramente comparativo. Asimismo, analizar el estado de

deterioro de las placas después de la semana de inmersión en cloruro de sodio. Analizar qué placa presentó la mejor adhesión en función de la distancia de delaminación.

Resuelva las siguientes cuestiones:

1. Investigue qué es el tipo de falla cohesiva y adhesiva en un recubrimiento orgánico.
2. ¿Qué otros métodos existen para evaluar la adhesión en los recubrimientos orgánicos?
3. ¿Qué otros métodos de deposición existen para recubrir sustratos metálicos?
4. ¿Qué es la delaminación catódica?
5. De acuerdo a lo realizado en esta práctica, ¿qué parámetro es más importante para que un recubrimiento no falle, la preparación superficial o el espesor? Diga por qué.

Conclusiones y/o comentarios

El estudiante concluirá de manera puntual correlacionando los resultados obtenidos con los objetivos de la práctica, para evaluar si estos se cumplieron. Concluir qué sistema de pintura presentó mayor adhesión y la más alta resistencia a la corrosión.

1. M. Hernández., J. Uruchurtu, J. Genescá., A. Barba. Correlation between electrochemical impedance and noise measurements of waterborne coatings. *Corrosion Science* 51(2009) 499.
2. A. Covelo, Iván Puente-Lee, J. Uruchurtu, C. Menchaca, José-Guadalupe Bañuelos and M. Hernández. «Effect of the Coating Deposition Technique on the Protective Properties of Hybrid Sol-Gel on AA2024» *Electrochemical Society Transactions (ECST)* 64, 27(2015) 45 - 54.
3. ASTM G1-03, *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
4. ASTM D4541. *Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
5. ASTM D3359 -02, *Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.
6. ASTM D714-02 *Standard Test Method for Evaluating Degree of Blistering of Paints*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.
7. ASTM D 610 - 01 *Standard Test Method for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.



Elaborado por:

Dr. Armando Rojas Morín* y miembros del Grupo del CENISA, Facultad de Ingeniería, UNAM

Carrera	Plan de estudio	Clave de la asignatura	Nombre de la asignatura
Ing. Mecánica	2006	0999	Ingeniería de Superficies
Ing. Mecatrónica			

Práctica No.	Laboratorio de	Nombre de la práctica	Duración
10	Ingeniería de Superficies	Tratamientos térmicos superficiales	4 horas (2 sesiones)

* Adscrito al Depto. Termofluidos, DIMEI, Facultad de Ingeniería, UNAM.

10

El alumno:

- ❖ Comprenderá el efecto y la importancia de los tratamientos térmicos superficiales, generados con diversos tipos de energía, en la modificación de las propiedades de los materiales metálicos.
- ❖ Caracterizará el efecto del tratamiento superficial en las propiedades microestructurales y de microdureza de un revestimiento rico en Zn sobre una lámina de acero al carbono y de un acero templado superficialmente por inducción

Tratamientos térmicos superficiales

En ocasiones, a las piezas de acero y fundiciones se les aplican una serie de tratamientos térmicos destinados a endurecer su superficie y potenciar así su comportamiento frente a fenómenos como fatiga y desgaste. La mayoría de ellos consisten en la realización de un temple de las capas periféricas, mientras que el núcleo de la pieza conserva una alta tenacidad [1]. Según el procedimiento utilizado, se pueden distinguir los siguientes tipos de temple más comunes [2,3]:

- a) Temple superficial a la llama
- b) Temple por inducción

- c) Temple por rayo láser o con haces de electrones
- d) Temple con energía solar concentrada

Temple superficial mediante llama o inducción

En estos casos, que son los comúnmente empleados en la industria, se utiliza o bien una flama producida por una combustión o bien se calienta la pieza a través de aplicar el efecto Joule y así, en ambos casos, llevar a un acero (o fundición), de suficiente templabilidad, al estado austenítico para, posteriormente, enfriarlo en un medio adecuado y generar así la formación de una zona externa con la presencia de la fase martensítica, que dotaría de mejorada dureza y resistencia al desgaste al material tratado. En términos generales hay alguna limitante de tamaño en el caso de las piezas calentadas por inducción y de homogeneidad, cuando se emplea la llama, pero se trata de procedimientos que la industria habitualmente aplica.

Tratamientos superficiales empleando haces láser o de electrones

En lo referente a estas formas de energía concentrada, se consiguen calentamientos sobre una amplia variedad de materiales y es posible ampliar la gama de posibles tratamientos superficiales. En cuanto al temple con haces láser, son características distintivas que el resultado de la interacción entre el haz láser y el material por tratar depende de la potencia del láser y el tiempo de interacción, que no

se requiere enfriamiento posterior al calentamiento con láser, dado que las velocidades de calentamiento y enfriamiento son elevadas y que, para aceros con suficiente templabilidad, es posible obtener martensita en la superficie con solo retirar el haz láser. Una posibilidad adicional de la radiación láser es que puede emplearse o bien un láser continuo o uno pulsante lo que amplía aún más las posibilidades de aplicación de este tipo de radiación. Con el haz láser y también con el haz de electrones es posible generar recubrimientos a través de la fusión de polvos previamente colocados en la superficie (laser *cladding*) o alear el material (usualmente en polvo) con el sustrato para conseguir combinaciones que posibiliten la mejora de propiedades tales como resistencia al desgaste o a la corrosión (laser *alloying*). Ambos procesos también, como se menciona previamente, pueden repetirse utilizando un haz de electrones, con la ventaja adicional (aunque ello representa un costo mayor) de que los varios procesos planteados ocurren en condiciones de vacío, lo que evita fenómenos tales como oxidación de las piezas.

Tratamientos superficiales empleando energía solar concentrada

Existen diversas formas de aprovechar la energía solar. Algunas de ellas son por medio de un proceso de conversión fotovoltaico o de conversión fototérmica. Los sistemas fotovoltaicos son aquellos que transforman directamente la energía solar a energía eléctrica, mientras que los sistemas fototérmicos emplean un fluido térmico para transformar la radiación solar en energía térmica [4].

Sistemas fototérmicos [5]

Los colectores solares de baja temperatura proveen calor útil a temperaturas menores de 60 °C mediante absorbedores metálicos o no metálicos para aplicaciones tales como calentamiento de piscinas, calentamiento doméstico de agua para baño y, en general, para todas aquellas actividades industriales en las que el suministro de calor de proceso requiera temperaturas cercanas a 60 °C. Por ejemplo, en aplicaciones como la pasteurización, el lavado textil, etc.

Si la aplicación industrial requiere mayores temperaturas, los colectores solares de baja temperatura no son útiles, por tanto, se requieren tecnologías solares que suministren el calor a temperaturas mucho más elevadas. Estas tecnologías son las asociadas al empleo de los concentradores solares, los cuales funcionan concentrando la radiación solar directa en un área focal, pudiéndose ubicar esta, alrededor de un punto o a lo largo de una línea. Actualmente, los concentradores se utilizan en diversas aplicaciones entre las que se encuentran las estufas o cocinas solares, sistema de torre central y los hornos solares. Los discos parabólicos acoplados con un motor Stirling, se utilizan en regiones con una alta insolación solar para la generación de energía eléctrica. Asimismo, los concentradores solares se clasifican en:

❖ *Concentradores solares de media temperatura*

Son los dispositivos que concentran la radiación solar para entregar calor útil a mayor temperatura, usualmente entre los 100 y 300 °C. Tienen el inconveniente de trabajar solamente con radiación solar directa por lo que su utilización queda restringida a zonas de alta insolación.

❖ **Concentradores solares de alta temperatura**

Operan a temperaturas mayores a los 500 °C y su uso más común es para generar electricidad y transmitirla a la red eléctrica. En algunos países estos sistemas son operados por productores independientes y se instalan en regiones donde las posibilidades de días nublados son remotas.

Al principio de su desarrollo, las tecnologías de concentración solar se utilizaron primordialmente para la producción de potencia térmica y eléctrica.

Horno solar

Las instalaciones de hornos solares son utilizadas para conocer el comportamiento térmico, químico, mecánico, etc., de materiales (cerámicos o metálicos), los cuales se someten a muy altos flujos radiativos. Un horno solar se compone de los siguientes elementos: *helióstato, concentrador primario, atenuador, y área de ensayos*. Las aplicaciones más relevantes de un horno solar en cuanto a materiales se trata son: *tratamiento térmico, recubrimientos, síntesis, fabricación, etc.*, las cuales al utilizar energía solar concentrada hace que sean muy novedosas. Desde el año 2001 por ejemplo, en el Horno Solar de la Plataforma Solar de Almería, en España, se han realizado diversas pruebas experimentales para aplicaciones de nuevos procesos de tratamiento térmico y superficial de materiales.

De esta forma se han creado novedosas líneas de investigación como son: síntesis de películas delgadas de YSZ a partir de Zr e Y mediante

recocido solar, tratamiento termomecánico de nuevos recubrimientos, obtención de carburos y carbonitruros de silicio mediante síntesis solar, estudio del comportamiento de las herramientas de corte forjadas en caliente mediante tratamientos de choque térmico, sinterizado de cerámicos, nitruración de aceros, soldadura de metales, etc.

Material y/o equipo necesario

Material:

- ❖ Soldadura Pb/Sn de bajo punto de fusión
- ❖ Polvos o alambre de zinc o Zn-Al
- ❖ Insumos de preparación metalográfica (lijas de agua, alúmina)
- ❖ Lámina o barra de acero o fundición para su tratamiento superficial
- ❖ Recipiente con líquido(s) para enfriamiento (temple) de las piezas calentadas (austenitizadas)

Equipo:

- ❖ Colector solar tipo Fresnel y elementos auxiliares
- ❖ Microscopio óptico
- ❖ Equipo de preparación metalográfica
- ❖ Microdurómetro
- ❖ Equipo para calentamiento por inducción
- ❖ De ser posible, antorcha para calentamiento a la llama
- ❖ De ser posible, termopares para monitorear la temperatura de las piezas calentadas

1. Colocar la lámina o barra de acero o fundición de forma que se pueda calentar usando el equipo de calentamiento por inducción y llevarse así hasta la temperatura de austenitización, previamente seleccionada, tomando en cuenta lo que se indica en el diagrama de fases Fe-C.
2. Templar la pieza calentada en el paso anterior colocándola en el o los medios de enfriamiento previamente seleccionados, en función del tipo de acero o fundición empleado.
3. Determinar la microdureza del acero o fundición seleccionado, antes y después del tratamiento superficial llevado a cabo.
4. a) Colocar polvo o alambre de zinc o de Zn-Al repartido en la superficie de dos láminas de acero de bajo carbono y calentar en cada caso hasta fundir el polvo o el alambre y posteriormente dejarlo enfriar al aire hasta temperatura ambiente.



Figura 1(a) Vista del prototipo de lente Fresnel vista superior **(b)** Zona de concentración solar (en el foco) del concentrador por lente de Fresnel para realizar experimentos

- b) Calentar mediante ESC alambre de aleación Pb-Sn hasta conseguir fundirlo y así unir dos piezas mediante dicha soldadura. Después de haber enfriado por completo la soldadura, preparar metalográficamente la muestra tanto superficial como

transversalmente para evaluar en el microscopio óptico no solo las características de deposición sino el efecto en la zona térmicamente afectada en el acero.

- c) Medir el perfil de microdureza obtenida desde la zona del cordón de soldadura hasta la zona térmicamente afectada del acero.

Resultados

- a) Graficar el espesor de capa tratada con el perfil de la microdureza obtenida para las diferentes piezas tratadas con ESC.
- b) Obtener distintas imágenes de la microestructura para correlacionarlas con los valores de microdureza medidos.
- c) Generar gráfica de la microdureza del acero o fundición tratada mediante llama y/o inducción, desde la superficie hasta el sustrato y otra gráfica de la microdureza en función del medio de enfriamiento empleado.
- d) Obtener imágenes de la unión conseguida mediante soldadura empleando ESC y una gráfica de la variación de la microdureza en función de la distancia desde el cordón hacia el exterior.

Análisis de resultados

Analizar en conjunto las evaluaciones de la microdureza, los valores de espesor y el aspecto superficial y transversal de la soldadura y de las zonas tratadas mediante calentamiento por llama y/o inducción.

Análisis de resultados

Resuelva las siguientes cuestiones:

1. ¿Qué otro tipo de tratamientos superficiales se pueden realizar con haces de energía concentrada? Coloque evidencias mediante imágenes al respecto.
2. Mencione ventajas y desventajas al utilizar radiaciones de alta energía comparadas con los tratamientos térmicos convencionales de mufla.
3. ¿Qué es un lente de Fresnel?
4. Coloque un esquema de un horno solar y presente evidencias de resultados de tratamientos de materiales empleando estos equipos.

Conclusiones y/o comentarios

El alumno puntualizará si los haces de energía concentrada pueden ser una alternativa para modificar las propiedades superficiales de los metales amigables con el medio ambiente y por qué.

Bibliografía

1. «Ciencia e Ingeniería de la Superficie de los Materiales Metálicos». Alfonso J. Vázquez y Juan J. Damborenea (editores). No 31 de la *Colección Textos Universitarios*. Centro Nacional de Investigaciones

- Metalúrgicas. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España. 2001.
2. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/tecnologia-hoy/article/view/558> (consultado en agosto de 2019). A. Ojo, J. Aguilar, G. Coronado, N. Quirós, C. Ortega, A. Tejedor de León. Endurecimiento superficial de metales ferrosos vía llama oxiacetilénica. *Tecnología Hoy*. 7(2003)17.
 3. Pere Molera Solá. *Tratamientos térmicos de los metales*. Ed. Marcombo S.A, Productica, 1991.
 4. «Uses of Concentrated Solar Energy in Materials Science». Gemma Herranz and Gloria P. Rodríguez. *Solar Energy*, Book edited by: Radu D. Rugescu, ISBN 978-953-307-052-0, pp. 432, February 2010, INTECH, Croatia.
 5. «Experiencias y Propuestas para la Aplicación de Energía Solar Concentrada en el Procesamiento de Materiales y la Enseñanza». A. Barba P, O. Alvarez B., A. Rojas M., R. Valdez N., A. Vázquez V., G.P. Rodríguez D. *Memorias del Congreso Internacional de Energía*. (2017). p. 1-8. ISSN: 2448-5624.
 6. «Laser modification of the materials surface layer - a review paper». J. Kusinski, S. Kac1, A. Kopia, A. Radziszewska, M. Rozmus-Górnikowska, B. Major, L. Major, J. Marczak, A. Lisiecki. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, Vol. 60, No. 4, 2012 DOI: 10.2478/V10175-012-0083-9.
 7. R. Zenker.- Modern Thermal Electron Beam Processes - Research Results and Industrial Application. La Metallurgia Italiana. Paper presented at the *European Conference «Innovation in heat treatment for industrial competitiveness»*, Verona, 7-9 May, organized by AIM. 2009, p. 1-8.



Elaborado por:

Grupo del CENISA,
Facultad de Ingeniería, UNAM

Carrera	Plan de estudio	Clave de la asignatura	Nombre de la asignatura
Ing. Mecánica	2006	0999	Ingeniería de Superficies
Ing. Mecatrónica			

Práctica No.	Laboratorio de	Nombre de la práctica	Duración
11	Ingeniería de Superficies	Tratamientos térmicos en aceros: criogenia	4 horas (2 sesiones)

11

El alumno:

- ❖ Aprenderá el desarrollo y aplicación del tratamiento de temple criogénico en aceros estructurales.
- ❖ Evaluará el incremento de la dureza y la resistencia a la corrosión con el efecto de tratamiento térmico.
- ❖ Comparará el beneficio del tratamiento de temple criogénico con el clásico de temple-revenido en los mismos aceros.

Tratamientos térmicos criogénicos [1]

Este tipo de tratamientos pueden dividirse en dos categorías:

- Tratamiento subcero. Las piezas alcanzan una temperatura de -80°C al emplear solamente hielo seco.
- Tratamiento criogénico: La temperatura de trabajo es de -196°C que corresponde a la temperatura del nitrógeno líquido.

Este tipo de tratamiento al igual que el tradicional de temple-revenido involucra la transformación de toda la pieza, ya que el efecto térmico actúa en todo el volumen y no solo a nivel local o superficial. De igual forma que en el temple-revenido la velocidad de enfriamiento,

el tiempo de permanencia y la velocidad de calentamiento, deben ser graduales para evitar esfuerzos residuales que induzcan pre-agrietamientos o fracturas totales que inutilicen la pieza de interés. El efecto de llevar el material a temperaturas de -196°C induce no solo la esperada transformación martensítica, sino también la precipitación de carburos de hierro que inducen cambios estructurales en el material a nivel microscópico [1,2]. Estas transformaciones han sido investigadas en distintos trabajos [3,4] en los que no queda del todo claro, si la temperatura criogénica reduce el nivel de tensiones y defectos a nivel cristalino o a nivel microestructural. En todo caso, es un hecho que este tipo de tratamiento refina el grano y libera las tensiones internas. A continuación se enumeran las ventajas obtenidas con tratamiento criogénico.

- a) Al incrementar las propiedades de los materiales, se alarga la vida útil de las piezas.
- b) Resistencia mayoritariamente en la dureza, desgaste (fricción) y resistencia a la corrosión.
- c) Aumento en la vida de fatiga mecánica y térmica.
- d) Mejora la conductividad térmica y eléctrica.
- e) Reducción de vibraciones mecánicas.

Debido a la modificación de las propiedades anteriores, las aplicaciones del tratamiento criogénico son diversas:

- a) Aceros de herramienta: matrices, punzones, sierras, cuchillas, moldes, etc.

- b) Material armamentístico: cañones, rifles, revólveres, etc.
- c) Material deportivo: palos de golf, cuchillas de patines de hielo, etc.
- d) Instrumentos musicales: Trompetas, saxos, cuerdas de guitarra y cuerda de piano. En instrumentos de bronce o latón se utilizan para proporcionar mejor tonalidad y mayor calidad en el sonido.

En términos generales, se puede establecer que el tratamiento criogénico para material ferroso puede describirse mediante tres etapas:

1. Enfriamiento paulatino desde temperatura ambiente hasta la temperatura de criogenización para disminuir al máximo los choques térmicos, máxime si la pieza por tratar tiene una geometría compleja y de gran volumen.
2. Tiempo de permanencia a temperatura criogénica mínimo de 24 horas para inducir el reordenamiento completo de la estructura cristalina.
3. Calentamiento paulatino desde -196°C a aquellas temperaturas superiores en las que se realicen subsecuentes transformaciones de fase, con su respectivo tiempo de permanencia local.

Las aplicaciones de este tipo de tratamiento no solo están dirigidas a materiales ferrosos, sino también a los no ferrosos como el caso del aluminio, aleaciones como bronce y latón. El desarrollo y aplicación de esta técnica va permitiendo entender los alcances en los materiales metálicos. Existe diversa información en la literatura para aprender más sobre este tratamiento [5]

Material:

- ❖ Aceros estructurales como O1, A2, D2 o M2, 4340, H13 (2.5 × 2.5 × 0.5 cm) – 2 piezas por cada acero
- ❖ Insumos de preparación metalográfica (lijas de agua, alúmina)
- ❖ Nitrógeno líquido
- ❖ Cloruro de sodio
- ❖ Pinzas metálicas, lentes de protección
- ❖ Una barra o lámina de grafito
- ❖ Un electrodo de referencia (calomelano o plata/cloruro de plata)

Equipo:

- ❖ Mufla
- ❖ Recipientes metálicos
- ❖ Equipo de preparación metalográfica
- ❖ Durómetro
- ❖ Potenciostato electroquímico
- ❖ Microscopio óptico metalográfico

Desarrollo

Tratamiento térmico

1. Desbastar superficialmente los aceros con lija 600. Enjuagar y secar con un flujo de aire caliente.
2. Dependiendo del tipo de acero por trabajar, llevar a temperatura de austenización ($\approx 1100^{\circ}\text{C}$) durante 4 horas, seguido de un

enfriamiento en aceite hasta temperatura ambiente con moderada agitación (este tratamiento es tanto para las piezas sin y con tratamiento criogénico).

3. Después se expone la pieza en un flujo de nitrógeno gas durante 3 minutos para después sumergir la pieza en el nitrógeno líquido (-196°C) durante 24 horas.
4. La pieza se extrae y se deja calentar hasta temperatura ambiente.

Preparación metalográfica

1. Realizar la preparación metalográfica de cada pieza para observar la microestructura formada. Hacer la observación a diferentes aumentos para revelar las características de la superficie.

Ensayo mecánico

1. Hacer un perfil de dureza Rockwell para obtener un valor promedio representativo de las piezas. En caso de haber utilizado piezas cilíndricas, realizar la medición de dureza radial.

Ensayo electroquímico

1. Volver a lijar la superficie de las piezas con grado 600 para eliminar alguna costra de oxidación formada durante el tratamiento térmico.
2. Preparar una disolución de NaCl de concentración de 1 M.
3. Las piezas o probetas se colocarán en una celda electroquímica en la que solamente una cara de la pieza se expone al electrolito. Si no se cuenta con este tipo de celda, entonces las muestras pueden quedar suspendidas en un vaso de precipitados. Si fuera este caso, entonces se debe lijar toda la pieza y medir el área superficial total, ya que toda estará sumergida.

4. Después se introduce en la celda o vaso, el electrodo de referencia y la barra de grafito para realizar las conexiones correspondientes al potenciostato electroquímico.
5. Realizar la medida de resistencia a la polarización (R_p). Dejar al menos 20 minutos las piezas sumergidas antes de realizar la prueba de R_p .

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (1)$$

donde, B es una constante de 0.026 V y la i_{corr} es la densidad de corriente. Para determinar la velocidad de corrosión en milímetro por año (mm/año), se deberá dividir el valor de i_{corr} (A) por el área de inmersión para después mutiplicar por el valor de 11595, que proviene de las leyes de Faraday [6] aplicado a la corrosión del hierro.

Resultados

1. El alumno obtendrá una pieza tratada solo térmicamente y una pieza con tratamiento criogénico para cada acero. En la primera pieza se harán las observaciones metalográficas junto con las pruebas de dureza.
2. Después de hacer la prueba electroquímica de R_p , se calculará la velocidad de corrosión de acuerdo a la ecuación de Stern-Geary (1). Obtener para cada pieza su respectiva V_{corr} .

Análisis de resultados

- a) Obtener una gráfica comparativa en la que se muestre para cada acero utilizado, el valor de dureza promedio con y sin tratamiento criogénico.
- b) Obtener una gráfica de velocidad de corrosión para cada acero con y sin tratamiento criogénico.
- c) Analizar las características microestructurales para cada acero con y sin tratamiento criogénico. Indicar la diferencia en fases, componentes, límites de grano etc.

Resuelva las siguientes cuestiones:

1. ¿Por qué es necesario austenitizar a los aceros para aplicarles el tratamiento térmico de criogenia?
2. ¿Qué es un esfuerzo residual?
3. ¿Por qué la martensita tiene una elevada dureza?
4. Investigue qué relación guarda el endurecimiento de los aceros con su resistencia a la corrosión.
5. ¿Qué es la templabilidad?, ¿los aceros utilizados fueron templeables? Justifique su respuesta.

Conclusiones y/o comentarios

El alumno puntualizará si tuvo o no un cambio microestructural, mecánico y electroquímico al someter los aceros al tratamiento criogénico.

1. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3210/34099-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (consultado en agosto de 2019). David Marco Rusiñol. *Efecto del Tratamiento Criogénico en las Propiedades Mecánicas de los Aceros de Herramienta de Trabajo en Frío*. Proyecto final de carrera, Universidad de Barcelona, España, 2004.
2. <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/6892/1/LoaizaTapieroDilanEstdt2017.pdf> (consultado en agosto de 2019). Dilan Estdt Loaiza Tapiero, Freddy Alejandro Ruiz Murillo. *Efecto del tratamiento criogénico en la resistencia al impacto y la microestructura de un acero A572*. Proyecto curricular Ingeniería Mecánica, Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Bogotá, 2017.
3. D.N. Korade, K.V. Ramana, K.R Jagtap, N.B. Dhokey. «Effect of deep cryogenic treatment on tribological behaviour of D2 tool steel an experimental investigation». *Materials Today Proceedings* 4 (2017) 7665–7673.
4. J. Huang, Y. Zhu, X. Liao, I. Beyerlin, M. Bourke y T. Mitchell. «Microstructure of cryogenic treated M2 tool Steel». *Materials Science and Design*, A339 (2003) 241-244.
5. P. Baldissera, C. Delprete. Deep Cryogenic Treatment: A Bibliographic Review. *The Open Mechanical Engineering Journal* 2 (2008) 1–11.
6. Genescá J. *Técnicas electroquímicas para el control y estudio de la corrosión*, UNAM, 2001.



Cuaderno de prácticas de Ingeniería de superficies
se publicó la primera edición electrónica de un ejemplar
(5 MB) en formato PDF el 11 de agosto de 2022, en el
repositorio de la Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad
Universitaria, Ciudad de México. C.P. 04510

El diseño estuvo a cargo de la Unidad
de Apoyo Editorial de la Facultad de Ingeniería.
La familia tipográfica utilizada es Barlow con
sus respectivas variantes.