

27
28



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

**OPTIMIZACION DEL GALVANIZADO
POR DIFUSION**

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P r e s e n t a n :

Fernando Castañeda Fernández

Rubén Mauricio Bernardo Retana Ontiveros

Roberto Pérez López

Directores: M.C. ARTURO BARBA PINGARRON

ING. EDUARDO UBALDO MARQUEZ AMADOR

México, D. F.

1985





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

PAGINA

INTRODUCCION

CAPITULO I: DIFUSION

1.1	Introducción	1
1.2	Tipos de cambios de fase	3
1.3	Difusión	5
1.4	Autodifusión	15
1.5	Primera Ley de Fick	18
1.6	Mecanismos elementales de la difusión	21
1.6.1	Difusión en las dislocaciones	27
1.6.2	Difusión en los límites de grano	27
1.6.3	Difusión en las superficies	28
1.6.4	Difusión en las aleaciones	28
1.7	Segunda Ley de Fick	34
1.8	Variables que intervienen en la difusión	37

CAPITULO II: DESGASTE

2.1	Introducción	40
2.2	Fricción y desgaste	42
2.3	Desgaste adhesivo	50
2.4	Desgaste abrasivo	55
2.5	Protección contra el desgaste	59
2.5.1	Electrodeposición	63
2.5.2	Anodizado	64

2.5.3	Difusión	65
2.5.4	Rociado metálico	67
2.5.5	Revestimiento duro	69
2.5.6	Tratamiento térmico selectivo	70
2.5.7	Galvanización	70

CAPITULO III: SHERARDIZADO

3.1	Generalidades sobre las protecciones	74
3.2	El proceso de Sherardizado	75
3.3	Característica y naturaleza de la capa de Sherardizado	76
3.4	Resistencia a la corrosión	77
3.5	Ensayo de corrosión sobre piezas Sherardizadas	77
3.6	Comportamiento del zinc con el contacto de ciertos productos químicos	81
3.7	Ventajas y Limitaciones del Proceso	84

CAPITULO IV : EXPERIMENTACION

4.1	Composición de la mezcla	87
4.2	Preparación para el proceso	91
4.3	Proceso metalográfico	
4.3.1	Montaje y pulido	93
4.3.2	Ataque químico	96
4.4	Mediciones	
4.4.1	Medición de dureza y capa	98
4.4.2	Microanálisis	102

CAPITULO V: RESULTADOS

5.1	Medición de espesores de la capa del recubrimiento	106
5.2	Medición de microdureza de la capa a cierta distancia	107
5.3	Medición de la composición química a partir del extremo hacia el centro	113
5.4	Gráficas	116
5.5	Cálculos	118

CAPITULO VI: CONCLUSIONES

129

INTRODUCCION

La mayoría de los métodos de protección implican la colocación de una capa adicional del material resistente a ciertos factores como corrosión, desgaste, etc., ésta capa está entre el metal base y el medio ambiente. - La acción principal de las pinturas, por ejemplo, es la de evitar el contacto entre la atmósfera y el metal base, pero si ésta capa protectora sufre algún daño, puede presentarse la corrosión en el punto dañado y extenderse, levantando la capa según avanza.

Los recubrimientos metálicos en cambio, aíslan el metal base de la - atmósfera, por medio de una capa verdaderamente impermeable, ofrecen resistencia a la abrasión y el zinc, al igual que otros metales anódicos, protege al metal base aún habiendo pequeñas fallas en el recubrimiento. Por - lo tanto los daños pequeños al recubrimiento, no causan una pérdida de la protección y aunque la corrosión aumenta o afecta al zinc, lo hace a una - velocidad predecible y lenta.

Existen en uso generalmente cinco métodos para aplicar recubrimientos de zinc a ciertos metales. El método seleccionado en cada caso particular depende de varios factores: el tamaño y la forma de la pieza a proteger, - la severidad de las condiciones de corrosión y algunos factores económicos.

Los cinco métodos principales de aplicar un recubrimiento de zinc a - una superficie son:

1. Galvanización en caliente:

El acero limpio se sumerge en zinc fundido, llevándose a cabo una reacción que da lugar a un recubrimiento metalúrgico ligado al metal base.

2. Zincado por proyección:

La superficie una vez limpia por chorreo con granalla, se rocía con pequeñas gotas de zinc semifundido por medio de una pistola especial, alimentada con alambre o polvo de zinc.

3. Zincado electrolítico (electro galvanización):

Consiste en la depositación electrolítica de una capa de zinc sobre una superficie limpia de acero, utilizando para ello soluciones de sales de zinc.

4. Metalización:

Se introducen piezas pequeñas preparadas adecuadamente en polvo de zinc calentado justamente abajo de su punto de fusión.

5. Recubrimientos ricos en zinc:

Las superficies metálicas se recubren utilizando pinturas que contengan suficiente polvo de zinc como para dar lugar a una película capaz de conducir electricidad.

METALIZACION

Esta técnica, descubierta en 1900, se empezó a utilizar hasta 1923 y continúa siendo el menos conocido de los métodos de aplicación de zinc.

Los artículos que se van a recubrir se depositan dentro de un recipiente que contiene polvo de zinc a una temperatura precisamente abajo del punto de fusión: cerca de 300° C.

El zinc se liga al metal por un proceso de difusión y forma una capa dura y uniforme de aleación metal-zinc, la apariencia de un recubrimiento por este método es gris opaco y puede recubrirse de pintura si es necesario. La uniformidad del recubrimiento en artículos de forma complicada junto con su resistencia a la abrasión es útil, sobre todo en piezas tales como sujetadores y eslabones de cadenas, que pueden recubrirse después de su fabricación (tomando en cuenta el espesor) del recubrimiento y utilizarse sin tener que volver a trabajar roscas, cuerdas, etc.

Cada uno de éstos procesos tienen ciertas ventajas únicas y la selección del método a utilizar deberá basarse en la consideración de factores tales como los de la tabla siguiente.

COMPARACION DE LOS DISTINTOS RECUBRIMIENTOS DE ZINC

Galvanización por inmersión en caliente

Adhesión:

El recubrimiento se integra perfectamente al acero ya que el proceso de formación produce capas de aleación hierro-zinc, recubiertas de zinc.

Continuidad y uniformidad:

Buena, no hay discontinuidades debidas a una preparaci3n pobre del acero, como "manchas negras", hay un ligero exceso de zinc en los puntos de recubrimiento.

Espesor:

Normalmente de 3 a 5 milésimas de pulgada (0.007 a 0.127 mm)
Usando técnicas especiales es posible obtener espesores de 1 a 10 milésimas de pulgada (0.025 a 0.25 mm).

Formabilidad y propiedades mecánicas:

Los recubrimientos convencionales aplicados a artículos determinados, no formables: la capa de aleaci3n es resistente a la abrasión, pero se fragiliza al doblarlo. Los recubrimientos especiales sin la capa de aleaci3n se pueden doblar y soldar.

Normas aplicables:

General: BS 729-1971, Lámina: BS 729 y ASG 24-1967, Tubo: AS - 1074-1971, Alambre: ASN1N4-1963, Defensas: ASB 193-1970, Pruebas: ASK 53-1960.

Tratamientos extras:

Se usan recubrimientos de conversi3n a base de cromatos para evitar las manchas por "almacenamiento" húmedo, se usan fosfatos, en particular sobre lámina fresca, como base para pinturas. Los recubrimientos intemperizados se pintan para obtener mayor duraci3n (después de 10 a 30 años).

Otras consideraciones:

Tamaño de la tinta disponible. Es necesario hacer algunas - consideraciones en el diseño, para obtener los mejores resultados.

Atomización:

Adhesión:

Buen enlace mecánico, siempre y cuando se prepare correctamente la superficie.

Continuidad y uniformidad:

Depende de la habilidad del operario.

Los recubrimientos son porosos, pero se llenan pronto de pro - ductos de corrosión de zinc y son impermeables.

Espesor:

Espesores variables, generalmente de 4 a 5 milésimas de pulgada (0.1 a 0.154 mm), pero es posible aplicar recubrimientos de más de 20 milésimas de pulgada (0.5 mm).

Formabilidad y propiedades mecánicas:

Cuando se aplica a artículos determinados, no se requiere de - ningún proceso de formación, pueden soldarse dos partes sin dificultad, pero es más conveniente soldar primero y aplicar el recubrimiento después sobre las partes ya soldadas.

Normas aplicables:

BS2569 Parte 1 (revisión 1964)

Tratamientos extras:

Se acostumbra aplicar un tratamiento sobre estructuras nuevas destinadas a durar mucho tiempo, como base para la pintura.

Otras consideraciones:

No hay limitaciones en cuanto a forma y tamaño, es económica - para trabajar con una relación de peso a superficie alta.

Antieconómico para mallas:

Puede haber dificultades de acceso, por ejemplo en el interior de tubos, es mejor método para aplicar recubrimientos gruesos. El acero se calienta ligeramente.

Electrodeposición

Adhesión:

Buena, comparable con otros recubrimientos obtenidos por electrodeposición.

Continuidad y uniformidad:

Uniforme dentro de ciertos límites del poder de agarre del baño
Los poros no son un problema ya que el acero expuesto queda - protegido por el zinc adyacente.

Espesor:

Espesores variables, generalmente 0.1 a 1 milésimas de pulgada (0.0025 a 0.025 mm), es posible obtener capas más gruesas pero resulta antieconómico.

Formabilidad y propiedades mecánicas:

El acero recubierto por electrodeposición tiene una formabilidad excelente, las piezas pequeñas por lo general se terminan antes de aplicar el recubrimiento.

Normas aplicables:

ASK 144-1963, ASCK-1963, ASK 132-1963, Parte 2

Tratamientos extras:

Se usan recubrimientos de conversión (cromatos), para evitar las manchas por almacenamiento húmedo, con frecuencia también como base para pintura.

Otras consideraciones:

Tamaño de la tinta disponible. Este proceso se usa normalmente para piezas simples, no hay calentamiento.

Metализación

Adhesión:

Buena, el recubrimiento difuso dá un enlace metalúrgico.

Continuidad y uniformidad:

Continua y muy uniforme, aún sobre partes soldadas e irregulares.

Espesor:

En general entre 0.5 y 1.5 milésimas de pulgada (0.013 a 0.38 mm), es posible obtener capas más gruesas.

Formabilidad y propiedades mecánicas:

Como se aplica sobre artículos terminados, no es necesario ningun proceso de formación, excelente resistencia a la abra sión.

Normas aplicables:

BS 729, Parte 2

Tratamientos extras:

Pueden pintarse los objetos si es necesario.

Otras consideraciones:

Generalmente se usa para piezas complicadas; útil cuando es necesario controlar la calidad bajo tolerancias estrictas.

Pinturas ricas en zinc

Adhesión:

Buena, los mejores resultados se obtienen haciendo áspera la superficie a pintar con chorro de granalla.

Continuidad y uniformidad:

Buena, los poros que aparecen se llenan de productos de reacción.

Espesor:

Mayor de 15 milésimas (0.38 mm), con formulaciones especiales pueden lograrse capas más gruesas.

Formabilidad y propiedades mecánicas:

Resistencia a la abrasión mejor que la de las pinturas convencionales, la lámina pintada puede formarse y soldarse sin daños considerables.

Normas aplicables:

Normas australianas en periodo de preparación.

Tratamientos extras:

Puede usarse tratamiento o bien aplicar éste bajo pinturas convencionales.

Otras consideraciones:

Aconsejable para cualquier objeto que pueda pintarse, puede aplicarse con brocha, por atomización o por inmersión.

Su comportamiento varía de acuerdo con el medio de la pintura.

No hay calentamiento, a menos que haya necesidad de hornear el recubrimiento.

CAPITULO I

1.1 Introducción

Uno de los rasgos característicos y útiles de los metales y de las aleaciones es su capacidad de modificar su estructura interna sin cambio apreciable de su apariencia o dimensiones externas. El tratamiento térmico del acero es el ejemplo más conocido de este fenómeno, pero en cualquier metal se pueden producir otras reacciones en el estado sólido. El caso más sencillo es el de calentamiento, que por sí solo, es suficiente para causar variaciones notables en las estructuras metálicas y en las propiedades.

Teniendo en cuenta que en cualquier metal se pueden producir reacciones en el estado sólido, y que en el estudio de estas reacciones es conveniente considerar diversos fenómenos que tienen que ver principalmente con los tratamientos térmicos de los metales, los cuales influyen en forma determinante en los procesos de fabricación, tales procesos de fabricación como son: el recocido, nitruración, cementación, etc., dichos fenómenos tienen como fundamento físico el fenómeno de la difusión, el que trataremos y explicaremos en la parte siguiente.

En los procesos de solidificación y deformación plástica, la finalidad perseguida especialmente es la fabricación de una pieza determinada (metálica).

Estos procesos permiten controlar en cierto grado la estructura y con ella las propiedades. Para la mayoría de las aleaciones útiles por sus características mecánicas se han desarrollado sobre la base de un control posterior de algunos aspectos de la estructura, sin cambio de forma de la pieza, provocando cambios de fase. Normalmente este control se utiliza en varias etapas. La primera es mantener la aleación a una temperatura elevada durante un tiempo suficientemente largo, para aproximarse mucho al equilibrio de fases. Después se hace disminuir la temperatura, con lo que se rompe el equilibrio y se produce un cambio de fase. Las estructuras más convenientes se obtienen casi siempre cuando se interrumpe el nuevo proceso de aproximación al equilibrio en un estado conveniente y antes que éste se haya alcanzado totalmente.

Se puede decir que en muchas aleaciones un cambio de temperatura produce una variación de las energías libres relativas de las fases posibles. En tales casos dicho cambio de temperatura debe ir seguido por el remplazamiento total o parcial de las fases existentes por otras nuevas, para que se mantenga el equilibrio. Esta redistribución de átomos es lo que se denomina cambio o transformación de fase. Estos pueden ser reversibles, pero se caracterizan también por una lenta evolución hacia el equilibrio cuando la temperatura cambia bruscamente. La nueva fase que se forma en estas condiciones no es necesariamente una fase de equilibrio. Su formación debe de disminuir la energía libre del sistema total, pero lo que determina la fase que se formará entre todas las posibles es la velocidad a la que puede formarse por nucleación y crecimiento, y no la magnitud de la disminución de la energía libre del sistema.

Es posible que puedan producirse en competencia diversas transformaciones en cuyo caso es la historia térmica detallada la que determina las proporciones relativas de esas transformaciones.

1.2 Tipos de cambios de fase

Hay varios tipos de cambios de fase, se pueden clasificar atendiendo al número de fases nuevas que se forman y a la manera en que éstas difieren en composición de la fase original. Se distinguen los siguientes tipos:

1.2.1 Una fase se transforma sin cambio de composición en otra nueva.

Estas transformaciones se denominan sin difusión o martensíticas.

1.2.2 Se forma una nueva fase que difiere de la original, en estructura y composición. La original continúa existiendo aunque sufre algunos cambios de composición. Los ejemplos típicos son las reacciones proeutectoides y de precipitación.

1.2.3 Una fase se transforma en dos fases nuevas y ambas tienen distinta composición que la original. Entre éstas están incluidas las transformaciones eutectoides y peritectoides (ambas durante el enfriamiento), en las nuevas fases difieren de la original en composición y estructura, y aquellas mucho menos frecuentes en las que las dos nuevas fases difieren de la original en composición, -

pero no en estructura.

1.2.4 Se forma en fase ordenada por reordenación de los átomos sin que se produzcan más cambios en la estructura global del sistema o cristal.

1.2.5 Reaccionan un sólido y un gas para formar una nueva fase o para modificar la composición de la fase sólida. Se manifiesta cierta tendencia a centrar la atención en las transformaciones que se producen mientras disminuye la temperatura de la aleación. La causa es que la mayoría de las aleaciones que se emplean a temperaturas inferiores a aquellas a que tienen lugar las transformaciones a velocidades significativas, y la estructura con la que se pone en servicio la aleación es la producida mientras la temperatura descendía. Las propiedades dependen de las fases presentes y de su estructura, forma y tamaño, además de la distribución e interacciones relacionadas con las intercaras. Todo esto está relacionado con la cinética de la nucleación y crecimiento de nuevas fases y, por ello, con las transformaciones que tienen lugar cuando la temperatura desciende.

Pero las transformaciones dependen también de la estructura detallada de la fase o fases antecedentes, que se han producido usualmente como resultado de una transformación durante el ascenso de la temperatura, a la que por ésta razón ha de concederse alguna atención.

Ocurre además que hay casos importantes en los que se alcanza - el resultado final por un mantenimiento controlado a una tempe ratura elevada, seguido del descanso a una más baja. La conse cuencia a deducir es que es necesario tomar también en considera ción las transformaciones inversas.

Conviene distinguir entre las transformaciones en las que los - átomos sólo se mueven durante un cambio de fase, con respecto a los vecinos, distancias que son una fracción de la interatómica, y aquellas otras en que los átomos deben desplazarse a lo largo de distancias que son muchas veces más grandes que éstos.

El último tipo de transformación esta condicionado a procesos de difusión en los cuales se desplazan los átomos a través de los - cristales.

1.3 Difusión

Todos los tipos de transformaciones en el estado sólido exigen - el movimiento de los átomos con respecto al cristal, que sirve - como sistema de referencia, a lo largo de distancias que son por lo menos tan grandes como las que existen entre los átomos. - Por ésta razón es necesario ocuparse del proceso de la difusión por el que tiene lugar éstos desplazamientos.

La palabra difusión se emplea para describir cualquier cambio - en las posiciones de los átomos o moléculas en un medio que supo nemos inmóvil.

La difusión no incluye los movimientos atómicos que se producen en el flujo o deformación plástica del medio. La difusión puede tener lugar en los gases y en los líquidos, bajo condiciones adecuadas en los sólidos también se puede dar. La que tiene lugar en los gases carece de interés, por lo que nos limitaremos a la que se produce en los metales sólidos.

La difusión en los sólidos puede dividirse en difusión en los cristales, difusión a lo largo de las dislocaciones, difusión en los límites de los cristales, y difusión sobre las superficies libres.

Los fenómenos de difusión, es decir, de migración de los átomos a través de la red cristalina, regulan la cinética de gran número de procesos metalúrgicos, en especial la de todos los cambios de fase (exceptuando las transformaciones martensíticas). Pero el estudio de éstos fenómenos y la medición de las magnitudes características más significativas de los mismos requieren elegir cuidadosamente las condiciones en que deben realizarse los experimentos. En efecto, en cualquier proceso metalúrgico éstas son generalmente muy complejas. Así pues, en los estudios de difusión se escogerán en lo posible, condiciones tales que la solución matemática de las ecuaciones de la difusión sea sencilla. La interpretación física de las mediciones sea lo más directa posible. Ambas condiciones son muy importantes, especialmente la segunda.

En efecto, una solución matemática complicada no constituye hoy en día una dificultad insalvable, ya que las máquinas de cálculo permiten su resolución sin mayores complicaciones, mientras que la segunda condición es fundamental para la interpretación de los resultados y la comprensión de los mecanismos atómicos de la difusión.

Para simplificar las ecuaciones se limita frecuentemente el estudio a una difusión unidireccional binaria (dos elementos químicos) A y B. El experimento aparentemente más sencillo consiste en juntar dos pastillas de los metales A y B, calentar éste par de difusión para estudiar la interpenetración de los dos metales. fig. 1 Este experimento presenta en realidad grandes complicaciones. En general, a los dos metales A y B del par no son miscibles en todas proporciones. En el par aparecen capas sucesivas que corresponden a diferentes fases estables a temperatura de difusión, de acuerdo con el diagrama de equilibrio. fig. 2

Supongamos, para simplificar, que los metales forman entre ellos una solución sólida continua, o que el par está constituido por el metal puro A y una aleación AB de la misma estructura cristalina. En la curva de difusión al estilo de la representada en la fig. 3, y después de un recocido a alta temperatura.

Notas:

Figura 1: Difusión intermetálica: distribución del elemento en el par A-B después de un recocido de difusión.

Figura 2: Difusión polifásica: diagrama de equilibrio de un sistema A-B y curva de concentración-distancia de un par A/B recocido a la temperatura T_0 .

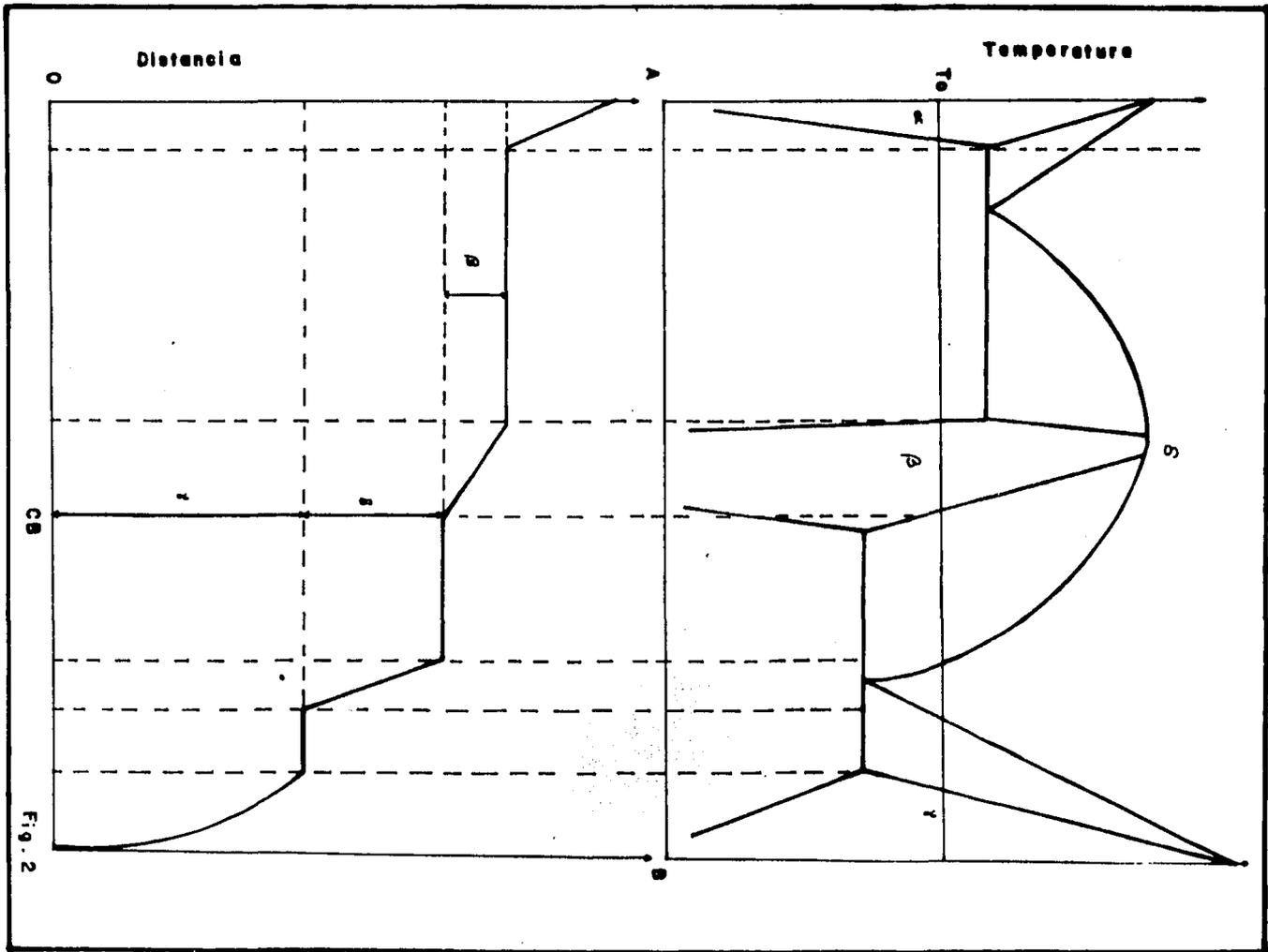


Fig. 2

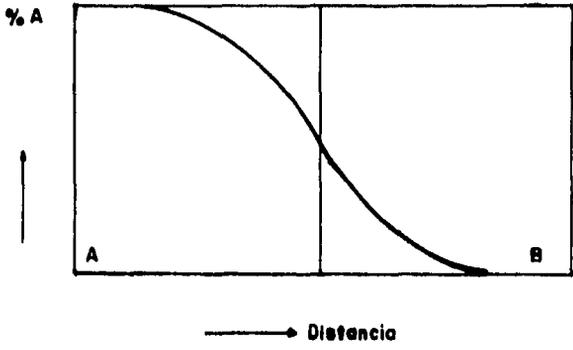


Fig. 1

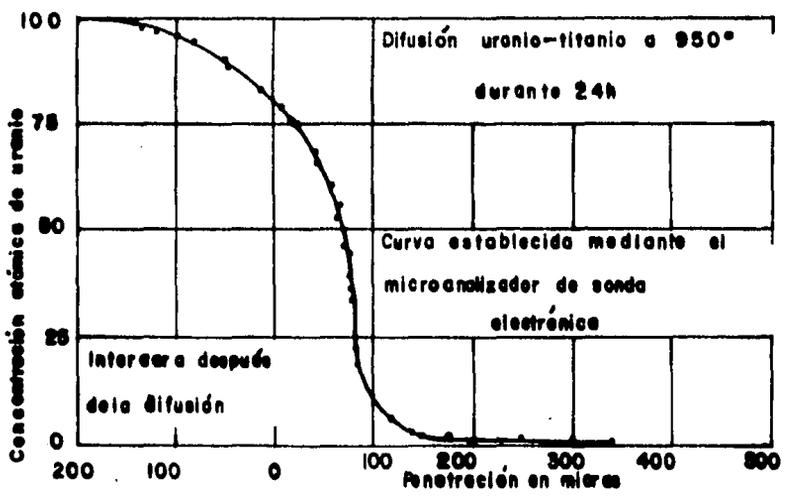


Fig. 3

El metal A se distribuye en cierta forma en la zona central - del par y el metal B se distribuye de forma complementaria. - Pero la interpretación de ésta curva no es sencilla. Imagine mos un átomo que emigra de A hacia B. Al principio se encuen tra rodeado exclusivamente de átomos A, más adelante se encon trará quizás en las cercanías de un átomo B, pronto irá quedan do rodeado de átomos B hasta que llegará un momento en que difi cilmente encontrará un átomo A como vecino, primero: el entorno de este átomo cambia, pues continuamente con variación constan te de las fuerzas interatómicas que actúan sobre él mismo; como consecuencia de ello, la probabilidad de dicho átomo tiende a - efectuar un salto, cambia continuamente tanto en el tiempo, - como en el espacio.

Para encontrarnos en una situación más simple, haría falta que la composición del sistema no se modificara. Esto puede reali zarse de una manera que los átomos B se encuentran practicamen te rodeados únicamente de átomos A.

Esta condición puede obtenerse preparando un par AB/A; fig. 4 en que la aleación AB se encuentra extremadamente diluida en B (10^{-4} en peso), ya efectuando un depósito muy delgado de B - sobre A ($< 0.1 \mu$ ó incluso $< 0.01 \mu$): en el segundo caso, B se diluye muy rápidamente en A. Las mediciones de la difusión, - es decir, de la repartición de B en A requieren entonces méto dos extraordinariamente sensibles.

Nota: Figura 3

Difusión en solución sólida:

Curva concentración-distancia de un par U/Ti a una temperatura de miscibilidad total.

Curva establecida mediante el microanalizador de sonda electrónica.

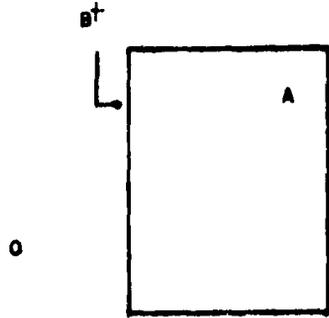
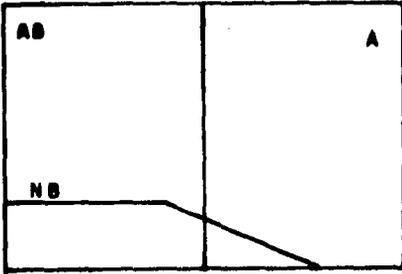
Es por éste motivo que la mayor parte de las veces, B se introduce en forma de un trazador radiactivo. Los métodos de detección de los radiotrazadores por medio de la radiación que los mismos emiten, son muy sensibles y permiten contar con el número de átomos que se han difundido hasta una profundidad determinada. Un experimento como tal recibe en nombre de heterodifusión a dilución infinita, pero aún es posible una mayor simplificación. En lugar de seguir la difusión de el trazador, que designaremos B*, en A, se puede seguir la de un trazador de A, sea A*, en el metal A puro, fig. 5. De ésta manera se miden las características de migración de los átomos A en una red constituida únicamente por átomos A, la difusión de A* en A recibe el nombre de autodifusión de A.

Las condiciones del autodifusión y de la heterodifusión a dilución infinita, permiten definir una constante característica del elemento A, o de los elementos A y B, llamada coeficiente de difusión.

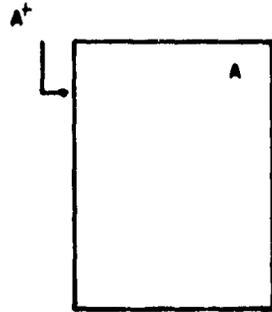
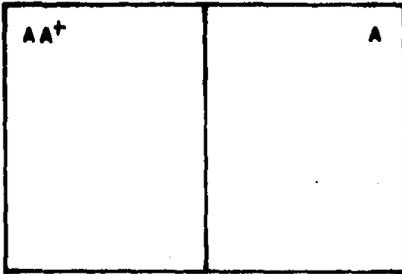
La causa de la difusión se comprende fácilmente. Ella consiste simplemente en que los átomos de un sólido saltan continuamente de una posición en la estructura a otra vecina.

Más adelante se explicará el mecanismo que producen éstos saltos pero será útil considerar primero como están relacionados los saltos atómicos con los fenómenos de difusión en gran escala.

Fig. 4



Heterodifusión a difusión infinita



Autodifusión de un radiotrazador

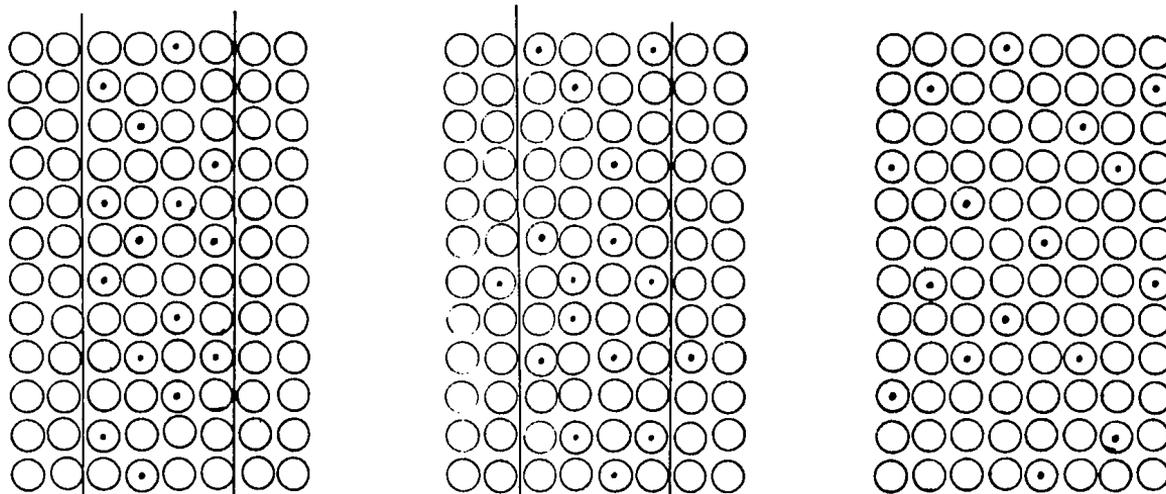
Fig. 5

1.4 Autodifusión

En un metal puro, dado que los átomos son semejantes, es difícil detectar cualquier signo de difusión. Sin embargo se pueden distinguir ciertos átomos, en virtud de que son isótopos radioactivos del metal en cuestión, es posible medir la velocidad de autodifusión que les permite propagarse entre ellos, la siguiente figura es una ilustración esquemática de la autodifusión entre una zona central, que contiene una concentración uniforme de átomos radioactivos y zonas adyacentes, que contenían inicialmente sólo átomos normales. Se sabe que el comportamiento en la difusión de átomos normales y radioactivos es esencialmente el mismo. Por el mecanismo que se discute más adelante, cada átomo tiende a saltar desde su posición, fig. 6 (a) hasta una de las posiciones adyacentes. La distribución atómica que se muestra en (b) podría existir después de un promedio de un salto por átomo. En el caso de los átomos radioactivos, por ejemplo, existían inicialmente cuatro de dichos átomos en cada columna y cada uno de ellos tenía la posibilidad de saltar hacia arriba, hacia abajo, a la izquierda o a la derecha. Es fácil comprobar que un salto al azar habría dejado sin variar el número de átomos radioactivos en las columnas 4 y 5. Sin embargo, un átomo radioactivo habría abandonado la columna 3 para entrar en la 2 y de la misma forma, otra abandonaría la columna 6 para entrar en la 7. La curva de concentración de la figura 6 (b) es un método apropiado para registrar la propagación de los átomos radioactivos a través de la probeta. Con saltos posteriores. Los átomos continúan dispersándose hasta producirse finalmente, una distribución uniforme de átomos (c)

Aunque entonces los átomos continúan saltando como antes, la -
curva de concentración permanece invariablemente y ya no es posible
observar difusión que la haga variar.

Fig. 6



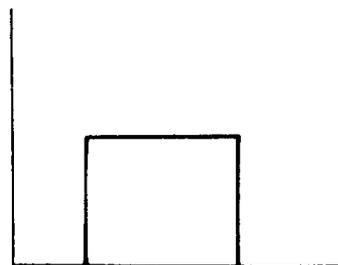
átomo

normal

átomo radioactivo

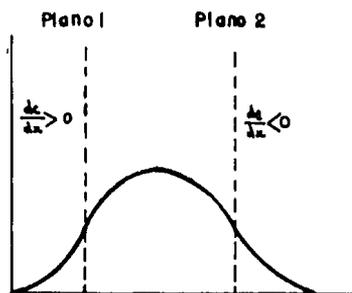


Concentración de átomos radioactivos



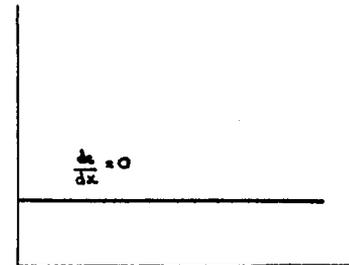
Distancia x

a



Distancia x

b



Distancia x

c

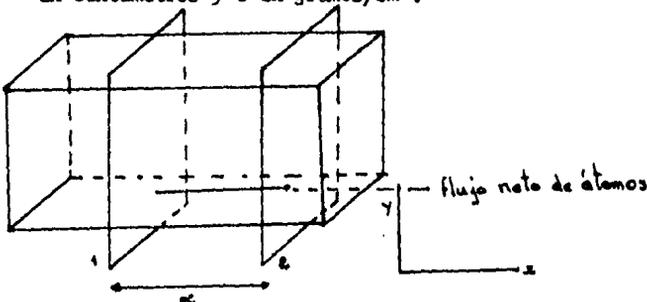
1.5 Primera Ley de Fick

En la figura número 6, se puede ver que el gradiente de concentración dc/dx determina si se produce o no difusión, de éste modo cuando dc/dx es igual a 0, como en la figura número 6-C, no se produce difusión. Sin embargo, en la porción en la figura número 6-B, donde dc/dx es positivo ($dc/dx > 0$), tiene lugar un flujo neto de átomos radioactivos a través del plano 1, en la dirección x negativa, mientras que cuando dc/dx es negativo el flujo neto ocurre en la dirección x positiva. Una relación cuantitativa del gradiente de concentración y de la cantidad de materia transportada por difusión se expresa por la primera Ley de Fick:

$$dm = -D \frac{dc}{dx} A dt$$

$$J = -D \frac{dc}{dx}$$

Donde dm es el número de gramos de metal que cruza un plano perpendicular a la dirección de difusión, D es un coeficiente de difusión cuyo valor depende del metal que se está considerando y de otros factores, A es el área (en cm^2) del plano a través del cual tiene lugar la difusión y dt es el tiempo en segundos durante el que ocurre la difusión: x está expresada en centímetros y c en $\text{gramos}/\text{cm}^3$.



$$J_{1-2} \delta t = N_1 \frac{\Gamma}{3} \delta t$$

$$J_{2-1} \delta t = N_2 \frac{\Gamma}{3} \delta t$$

$$J_{\text{neto}} \delta t = (J_{1-2} - J_{2-1}) \delta t = \frac{\Gamma}{3} (N_1 - N_2) \delta t$$

$$J_{\text{neto}} = \frac{\Gamma}{3} (N_1 - N_2) \quad (1)$$

N = Número de átomos/plano

Γ = Frecuencia de brinco

$1/3$ = Factor geométrico en la estructura C. Ca. C.

J_{1-2} = Flujo de átomos del plano 1 al plano 2

J_{2-1} = Flujo de átomos del plano 2 al plano 1 ($\text{átomos}/\text{cm}^2 \text{ s}$)

α = Distancia entre planos (cm)

c = Concentraciones ($\text{átomos}/\text{cm}^3$)

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{N_1}{\alpha} \left[\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} \right] \\ c_2 &= \frac{N_2}{\alpha} \left[\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

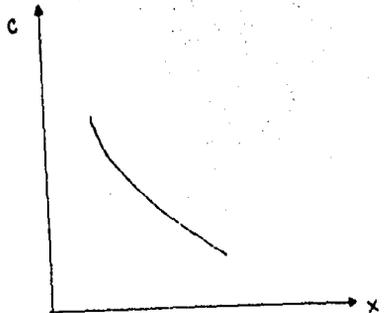
sust. (2) en (1)

$$J_{\text{neto}} = \frac{\Gamma}{3} \alpha (c_1 - c_2) \quad (3)$$

pero:

$$c_2 = c_1 + \alpha \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (4)$$

gradiente de Concentración.



sust.(4) en (3)

$$J_{\text{neto}} = \frac{-\gamma}{3} \alpha \cdot dc \frac{\partial c}{\partial x}$$

$$J_{\text{neto}} = \frac{-\gamma}{3} \alpha^2 \frac{\partial c}{\partial x} \quad \text{también} \quad J_{\text{neto}} = -D \frac{dc}{dx}$$

Por lo tanto:

$$D = \frac{-\gamma}{3} \alpha^2 \quad (7)$$

$$\gamma = \gamma \exp - \left[\left(\frac{E_f \cdot \nu}{RT} \right) + \left(\frac{E_D}{RT} \right) = \gamma \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right) \right]$$

$$\gamma = \gamma \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right) \quad (8)$$

sustituyendo (8) en (7)

$$D = \frac{-\gamma}{3} \alpha^2 \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right) \quad \text{también} \quad D = D_0 \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right)$$

Por lo tanto: $D_0 = \frac{\gamma}{3} \alpha^2$

- D= Coeficiente de difusión
- D₀= Coeficiente de difusión estable
- E_f·ν= Energía de formación de vacancia
- E_D= Energía para difundir
- R= Constante universal
- T= Temperatura absoluta
- Q= Energía de activación por difusión

1.6 Mecanismos elementales de la difusión

Los diferentes mecanismos posibles se han agrupado en la fig. 7. La energía necesaria para vencer la resistencia de la red debe ser proporcionada, en todos los casos por la agitación térmica.

1) Cambio Directo

Constituye el mecanismo más simple en apariencia y es el que fué imaginado por los diferentes experimentadores, de hecho, resulta muy improbable a consecuencia de la fuerte repulsión a corta distancia entre los átomos, la posición intermedia, es decir, la configuración para la cual los dos átomos que participan en el salto se encuentran a medio camino, requerirá una energía de activación considerable.

2) Cambio Cíclico

En el mecanismo de cambio cíclico las fuerzas de repulsión tienen, al contrario, un papel activo; cada átomo empuja a su vecino y para hacer saltos a un átomo dado hay que recurrir a los saltos coordinados de N átomos. Se trata pues de una especie de permutación circular, lo que explica el nombre dado a éste mecanismo.

Energéticamente parece posible y permite explicar, por ejemplo, la difusión de los átomos de un trazador, pero en cambio no sirve para explicar el transporte global de materia en una dirección, tal como se observa en ciertos procesos: difusión química, difusión en un gradiente de -

temperatura o en un campo eléctrico sinterizado, etc.

3) Mecanismo Lagunar (sitios vacantes)

Constituye el mecanismo más simple. Si un puesto de la red no se encuentra ocupado, uno de los átomos más próximos puede pasar a ocuparlo, apareciendo una laguna en el puesto que áquel deja abandonado. Con este mecanismo - se conserva el número de vacantes.

El salto precisa de una cierta entalpía de activación que es igual en primera aproximación, al trabajo isotérmico - que hay que suministrar para separar los átomos vecinos - que constituyen una barrera (por ejemplo, los cuatro átomos situados en un plano (120) perpendicular al vector - salto en la estructura CCC). En el cobre. $\Delta H_m \approx 1 \text{ eV}$.

4) Mecanismo intersticial

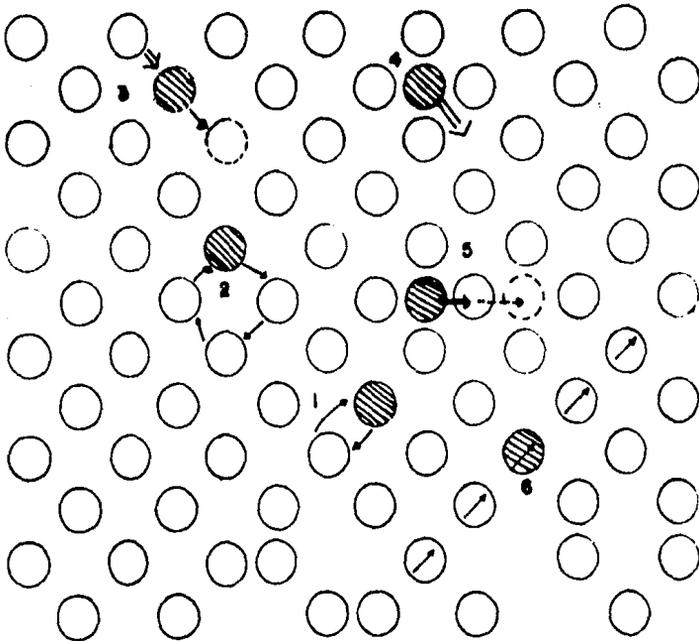
El átomo salta de un sitio intersticial a otro sitio in-tersticial próximo vecino. Es naturalmente el mecanismo de difusión de los átomos forasteros en solución sólida - de inserción: C o N en el hierro, por ejemplo. En el - caso de la autodifusión de un metal A, éste mecanismo requiere la creación de autointersticiales de A. Por éste motivo parece improbable en los metales compactos, dada - la fuerza de entalpía de formación de los intersticiales.

5) Mecanismo intersticial indirecto

Señalamos esta variante que se encuentra, por ejemplo, en ciertos cristales iónicos: Difusión de los cationes Ag^+ - en los halogenuros de plata, y quizá heterodifusión de -

los metales nobles en ciertos metales de la clase II. -
Sea un átomo marcado A^* situado en posición intersticial.
Este átomo puede dar un salto de sustitución, sacando a -
un átomo A de su sitio, convirtiéndose éste último en -
autointersticial. El átomo marcado A^* podrá efectuar un
nuevo salto si en un instante posterior un intersticial A
llega a sus cercanías y lo expulsa, pasando nuevamente a
la situación de intersticial. Así se obtiene la secu
cia de saltos de átomo A^* : $(i) \rightarrow (s) \rightarrow (i) \rightarrow (s) \dots$ -
representando (i) y (s) las posiciones de inserción y de
sustitución.

MECANISMOS ELEMENTALES DE
LA DIFUSION



1. Cambio directo
2. Cambio cíclico
3. Laganor
4. Intersticial directo
5. Intersticial indirecto
6. "Crowdion"

Fig. 7

Una variante posible de éste mecanismo, cuando el autointersticial se encuentra de hecho en posición "disociada". Otra variante la constituye el "crowdion" que puede producirse a lo largo de las filas tensas (6).

La existencia de lugares vacantes en la red es totalmente normal en las redes cristalinas, cualquier temperatura por arriba del cero absoluto. Las imperfecciones de éste tipo facilitan mucho el salto de átomos adyacentes. La vacancia promedio tiene sólo una vida limitada en el metal, ya que las vacancias se están creando y destruyendo continuamente en la superficie, en los límites de grano y en las posiciones interiores adecuadas, tales como las dislocaciones. Aunque se supone que la autodifusión en los metales ocurre casi siempre por el mecanismo de vacancia, en algunos casos es posible que se hayan implicados, parcial o totalmente átomos intersticiales, el mecanismo se complica con la presencia de un átomo en una posición intersticial. Este proceso del salto y la vida de éstos átomos son similares a los de las vacantes. Con el fin de simplificar la discusión se basará solamente en el mecanismo de vacancias, pero los resultados esenciales no son afectados al desprestigiar la posibilidad de difusión intersticial.

Además de la difusión en el interior de la red cristalina, que se conoce con el nombre de difusión de volumen, es posible estudiar la difusión en los límites de grano y la difusión de superficie. Los límites de grano ordinarios son zonas de imperfección pronunciada en la estructura cristalina y, por tanto, no es sorprendente que la difusión pueda ocurrir aquí un millón de

veces más rápidamente que en interior del propio grano. Los átomos de la superficie de un metal están sólo débilmente enlazados a una posición determinada de la red, por lo que la difusión superficial es incluso más rápida que la que tiene lugar en los límites de grano.

Aún cuando las velocidades específicas de la difusión superficial y en los límites de grano son mucho mayores que las de difusión de volumen, su contribución real al proceso de difusión total es normalmente escasa, a causa del pequeño número de átomos existentes en la zona donde se producen.

El tipo mejor conocido de difusión es el de difusión en los cristales: la difusión en los cristales, tiene lugar por el movimiento de los átomos individuales respecto al cristal, cuya posición está definida por los de todos los átomos que no cambian su posición relativa. El proceso unitario, por tanto, es el movimiento de un átomo desde la posición que ocupa inicialmente a otra posición cualquiera. Todos los átomos vibran más continuamente alrededor de sus posiciones medias y el proceso unitario o salto es el suceso en el que cambia la posición media del átomo. Sólo puede producirse si el átomo tiene una energía suficientemente elevada y si existe una posición a la que pueda ir.

1.6.1 Difusión en las dislocaciones

Se ha comprobado que la difusión se produce con menos energía de activación a lo largo de las dislocaciones de cuña. Este proceso puede ser importante a temperaturas bajas cuando el mecanismo de vacantes se hace demasiado lento. Es posible que algunas de las transformaciones que consideraremos se produzcan por difusión en las dislocaciones. El mecanismo para la difusión en una dislocación de cuña puede ser el movimiento de los átomos desde una posición como la A a la posición correspondiente en el plano próximo. La energía de activación puede ser baja porque hay un espacio disponible relativamente grande para el movimiento del átomo que se convierte en semi-intersticial en éstas circunstancias.

1.6.2 Difusión en los límites de grano

Puesto que la ordenación de los átomos en los límites de grano es distinta a la del cristal, es de esperar que también los coeficientes de difusión sean distintos. Para analizar los resultados de los experimentos de difusión en muestras que tienen límite de grano adoptaremos un procedimiento. Supondremos que un límite de grano es una placa de espesor con un coeficiente de difusión D_B . El cristal tiene un coeficiente de difusión D_L . La siguiente figura representa un esquema ideal. La difusión se produce de izquierda a derecha y se supone que los átomos se difunden con el coeficiente D_B mientras están en el límite, y lo hacen con D_L lateralmente desde él.

El resultado de la difusión desoluto desde una superficie AB, en la que se mantiene la concentración de éste, es una distribución de dicho soluto representada por la línea de isoconcentración PQ. La velocidad de difusión que se mide en un experimento es el área comprendida entre PQ y AB, que a su vez depende de DB y de DL. El aumento en la velocidad de difusión atribuible al límites es el área rayada de la siguiente figura (Figura 10).

1.6.3 Difusión en la superficie

La difusión de los átomos metálicos sobre la superficie de un metal es otro proceso que requiere una energía de activación relativamente baja, lo que está de acuerdo con el punto de vista de que los átomos que chocan con una superficie pueden emigrar aleatoriamente sobre ella durante un tiempo finito antes de ser atrapados por el cristal o de evaporarse. Los átomos que se difunden están sometidos al mismo tiempo de emigración y en este caso podrían originarse en la superficie (como tales átomos en difusión) en vez de llegar a ella como vapor condensado.

1.6.4 Difusión en las aleaciones

La utilización de átomos radioactivos permite determinar las velocidades de autodifusión en las aleaciones homogéneas, de la misma forma que se ha descrito en la figura 6, para un metal puro.

Por ejemplo, en una aleación de igual número de átomos de oro que de níquel es posible determinar la velocidad de difusión de los átomos de oro D_{Au} si (figura 6-a) la capa central de la aleación homogénea contiene inicialmente, átomos de oro radioactivos a $900^{\circ} C$ ($1,652^{\circ} F$) se ha comprobado que este valor es D_{Au} , que es igual $7 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{segundo}$. Por otro lado, si en la capa central se encuentran inicialmente, átomos de níquel radioactivo, se puede determinar la velocidad de autodifusión del níquel en la aleación homogénea. Se ha comprobado que esta valor es $D_{Ni} = 5 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{segundo}$.

Experimentos de ésta clase han demostrado que, en todas las composiciones, los átomos de oro se difunden más rápidamente que los de níquel. Conviene observar que los datos de la autodifusión tienen aplicación en aleaciones homogéneas en las que no existen gradientes en la composición química.

Dado que en la práctica industrial la difusión está ligada, normalmente, a un gradiente de concentración, es preciso tener en cuenta este factor adicional. Los coeficientes de difusión determinados en estas condiciones se denominan coeficientes de difusión intrínseco y se pueden representar por D_{Au} y D_{Ni} , para las aleaciones oro-níquel que se están considerando. Al igual que los coeficientes de autodifusión, los intrínsecos tienen diferentes valores para los dos componentes de una aleación. Por tanto, cuando dos metales interdifunden existe un transporte neto de materia a través del plano que inicialmente separaba las dos muestras. Este fenómeno conocido como efecto Kirkendall, se puede poner de manifiesto por el tipo de experimento que se muestra esquemáticamente en la figura 11.

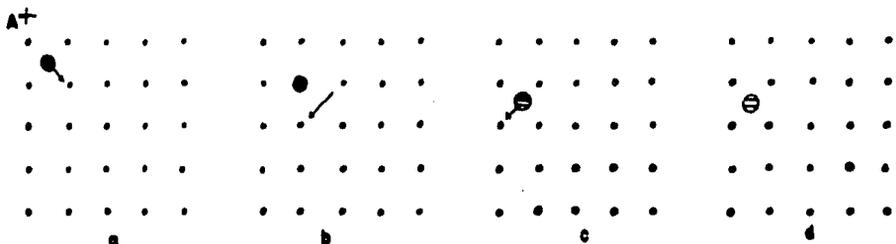


Fig. 8

Diffusión a lo largo de una
disloc. de cuña

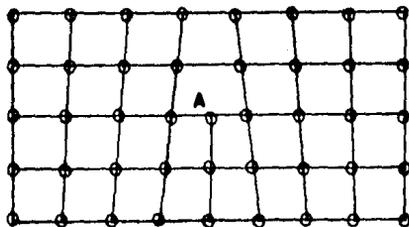


Fig. 9

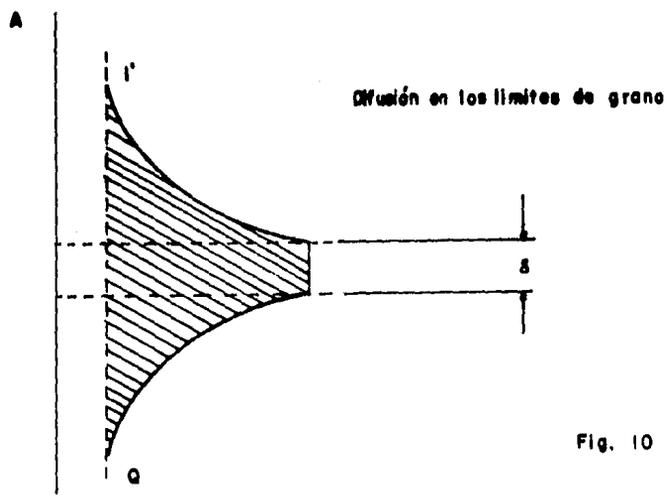


Fig. 10

Se prepara una muestra uniendo una barra de oro con otra de níquel, de tal forma que ocurra la difusión a través de la interfaz marcada. Los marcadores inertes pueden ser trozos de alambre muy fino de volframio, situados en el plano de unión. Durante un recocido de difusión de muchas horas, una temperatura suficientemente elevada, por ejemplo 900°C se producirá la interdifusión del oro y del níquel y la distribución de concentración variará como se muestra en la figura 11. Sin embargo, puesto que D_{Au} es mayor que D_{Ni} , se difundirán más átomos de oro que de níquel a través de los marcadores inertes. Por consiguiente, estos marcadores inertes ya no estarán en su posición inicial, sino que se habrán desplazado hacia el lado de la muestra de oro. Este movimiento se conoce como desplazamiento de Kirkendall.

El plano en la posición de la unión inicial del oro y del níquel se designa interfaz de matano y posee la importante propiedad de ser iguales las dos áreas A_1 y A_2 . A_1 y A_2 representan, respectivamente, las cantidades de níquel y oro que han cruzado dicha interfaz. Por tanto si se emplea la interfaz de matano para describir el comportamiento en la difusión, sólo es necesario utilizar un coeficiente de difusión D . Se puede demostrar que la relación entre D y D_{Au} y D_{Ni} es:

$$D = X_{Ni} D_{Ni} + X_{Au} D_{Au} \quad (10)$$

donde X_{Ni} y X_{Au} son las fracciones atómicas de níquel y oro. Para distinguir D de los otros dos tipos de coeficientes de difusión se le pueden denominar coeficiente de difusión mutua o de interdifusión. Sin embargo, puesto que es el valor corriente empleado en los cálculos de la difusión, con frecuencia, se hace referencia a él simplemente como coeficiente de difusión.

Aún cuando se precisa un mecanismo especial para explicar la difusión en las soluciones sólidas de sustitución, no ocurre así las soluciones sólidas intersticiales. En este caso, los pequeños átomos del soluto pueden deslizarse desde una posición intersticial a la siguiente cuando los átomos del solvente vibran con suficiente intensidad. La primera Ley de Fick, ecuación 0, describe los aspectos cuantitativos, de la difusión tanto en las soluciones sólidas intersticiales, como en las de sustitución.

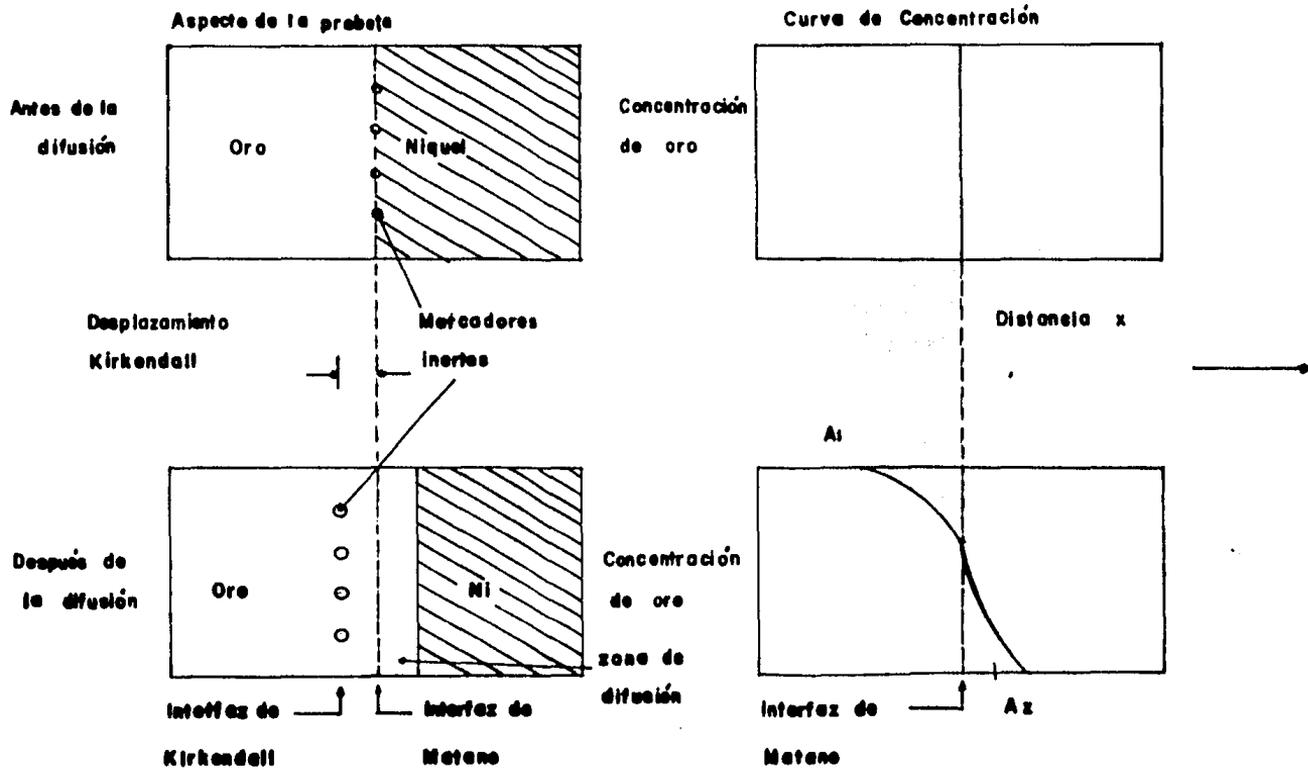
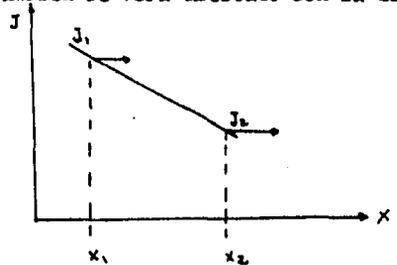
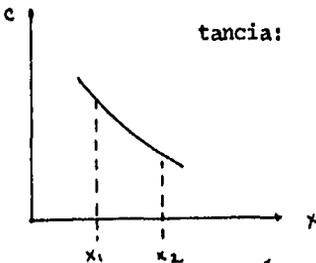


Fig. II Efecto Kirkendall durante la interdifusión del oro y del níquel

1.7 Segunda Ley de Fick

La primera Ley de Fick no tiene una forma apropiada para su aplicación a ciertos problemas, por ejemplo, la difusión del carbono en la superficie del acero. Por medio de una derivación que considere la ganancia neta de átomos en un volumen infinitamente pequeño y tomando en cuenta que la concentración varía con la distancia y por consiguiente el flujo neto de átomos que se difundan también se verá afectado con la distancia:



$$\frac{J_1 - J_2}{\Delta x} = \frac{\partial c}{\partial t} \left[\frac{\text{atm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \quad \frac{\text{atm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

Pero

$$J_2 = J_1 + \left(\frac{\partial J}{\partial x} \right) \Delta x \quad (12)$$

subst (12) en (11)

$$\frac{J_1 - J_1 - \frac{\partial J}{\partial x} \Delta x}{\Delta x} = \frac{\partial c}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial J}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (13)$$

pero

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (14)$$

subst (14) en (13)

$$\frac{-\partial \left(-D \frac{\partial c}{\partial x} \right)}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (15)$$

Esta forma de ecuación tiene en cuenta la variación de D con la concentración. Sin embargo, es muy difícil de aplicar y por tanto, se simplificará suponiendo que D es constante. Entonces la ecuación 15 se transforma en:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

La solución de la ecuación diferencial depende de sus condiciones de frontera, las cuales para nuestro caso de protección de superficies a través de la penetración de un material dado serán:

- Placa semi-infinita (las dimensiones del material son muy grandes comparadas con las distancias de difusión).
- Composición inicial = C_0 para $t > 0$
- Concentración C_s a $X = 0$ es C_s pero $C_s > C_0$

La solución de la ecuación 15 para las condiciones antes mencionadas será:

$$\frac{C(x,t) - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

$$\frac{C_0 - C(x,t)}{C_s - C_0} = \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

en donde:

C_0 = Es la concentración inicial de la pieza a recubrir

$C(x,t)$ = Es la concentración que se pretende a una cierta -
distancia x , en un tiempo t .

C_s = Es la concentración de la gente que proporcionará
a los átomos que pasarán a la pieza a recubrir

1.8 Variables que intervienen en la difusión

El coeficiente de difusión D no es normalmente una constante. Corrientemente D es una función de muchas variables, tales - como la temperatura, la concentración y la estructura cristalina. En un caso determinado, se supone que todas estas variables tienen valores específicos y el coeficiente de difusión, es entonces, un número definido. Sin embargo, al llegar a éste número es preciso, frecuentemente, considerar los efectos individuales de una o más de estas variables.

Temperatura

La regla empírica por la que se sabe que la constante de difusión duplica su valor por cada 20°C de aumento en la temperatura, nos da idea del enorme influencia que esta ejerce sobre la difusión.

Concentración

Dado que en la práctica es corriente suponer por conveniencia matemática, que el coeficiente de difusión es independiente de la concentración, es útil conocer el error que se introduce con ésta hipótesis.

En algunos sistemas D varía en gran medida con la concentración.

Estructura cristalina

Por la importancia de la transformación alotrópica del hierro, de cúbico centrado a cúbico de caras centradas a tempe

raturas elevadas, se ha estudiado el efecto que produce - esta transformación sobre la velocidad a la que los átomos - del soluto difunden en el hierro. A una temperatura dada, estos procesos de difusión y autodifusión de hierro se produ- cen con una rapidez que es, aproximadamente, cien veces - mayor en la ferrita (cúbicas centradas) que en la austenita.

Otro efecto de la estructura cristalina es la variación del coeficiente de difusión con la dirección cristalina de un - monocristal del metal solvente.

Impurezas

La presencia de pequeñas cantidades de metales adicionales - produce un efecto relativamente pequeño sobre la difusión de los átomos del soluto en un metal solvente.

Tamaño de grano

Puesto que la difusión en los límites de grano es mayor que la que se produce dentro de los granos cabe esperar que la - velocidad de difusión total sea mayor en un metal de grano - fino. Sin embargo, en la gama usual de tamaños de grano no es preciso tener en cuenta el tamaño de grano al efectuar - los cálculos de difusión.

BIBLIOGRAFIA

Metalurgia General,
BERNARD PHILIBERT AND
MITCHEL TALBOT,
Editorial Hispano europea,
1973,
Barcelona, España.

Metalurgia Física
BRUCE CHALMERS,
Editorial Aguilar,
2a. Edición,
1962,
España.

Metalurgia Física para Ingenieros,
GUY ALBERT.

CAPITULO II

2.1 Introducción

El desgaste es la mayor causa de las pérdidas a causa del material dañado, aunque en determinados casos el desgaste puede ser un efecto favorable de salvación de los elementos. El desgaste puede existir de diversas formas, dependiendo de la geometría y naturaleza de la interacción de las fases que están en contacto, con el medio ambiente. Las diferentes formas en el que se presenta el desgaste y sus combinaciones, lo hacen un fenómeno complejo.

El desgaste puede definirse como el deterioro de la superficie debido al uso. Ocurre en una amplia variedad de operaciones y en algunas industrias es muy elevado el gasto anual por concepto de reposición de piezas desgastadas. El desgaste es también muy importante en la práctica de la ingeniería; en muchos casos constituye el principal factor que limita la vida y el rendimiento de los componentes de máquinas. Por ejemplo, un camión de 5 toneladas totalmente desgastadas suele pesar entre dos y tres kilogramos más o menos que cuando nuevo. El desgaste puede ser destructivo o normal; pero aún cuando sea normal, puede ser más severo de lo deseable, debido a la frecuencia con que tengan que reponerse esas partes. Ningún elemento de máquina es inmune al desgaste; este fenómeno se manifiesta siempre que existe carga y movimiento.

El rectificado de pistones en los motores de combustión interna, - las picaduras y socavaduras en los engranes de transmisión, el rozamiento en prensas de ajuste forzado y la corrosión en la superficie de un cilindro, son manifestaciones del desgaste.

No hay regla general que sea válida para todas las manifestaciones del desgaste. Este fenómeno está afectado por toda una variedad de condiciones, tales como tipo y modo de carga, velocidad, cantidad y tipo de lubricante, temperatura, dureza, acabado de la superficie, presencia de materiales extraños y naturaleza química del - medio. Así como las condiciones varían en cada aplicación, también lo hacen las correspondientes manifestaciones de desgaste. - Además, en la práctica el desgaste es generalmente una combinación de una forma o más elementales. Por ejemplo, las pequeñas particulas resultantes del raspado puede causar desgaste abrasivo; o - bién, la corrosión puede quedar totalmente velada por el raspado - originado por el rozamiento de una prensa de ajuste forzado. Por lo tanto, no siempre es fácil, en cualquier aplicación dada, deducir que tipo de desgaste ha ocurrido.

La falta de acuerdo general en la nomenclatura y la falta de definición eficaz de las diferentes manifestaciones del desgaste (tales como rectificado, raspado, abrasión y corrosión) complican aún más el estudio. Sin embargo, un método lógico de clasificar el des - gaste sería según la naturaleza de la superficie de contacto:

1. Metal con Metal

2. Metal contra no metal
3. Metal contra fluido

Esta clasificación a su vez puede subdividirse en condiciones lubricadas y no lubricadas, fricción por deslizamiento o rodamiento, etc. Además las condiciones pueden cambiar y lo que inicialmente era metal contra metal podría volverse metal contra no metal, o bien una lubricación que en un principio era adecuada podría fallar posteriormente.

El desgaste que implica un sólo tipo es raro y en la mayoría de los casos ocurre en el desgaste abrasivo y el adhesivo. Cada forma de desgaste esta afectada por una variedad de condiciones, incluyendo ambiente, tipo de carga aplicada, velocidades relativas de las piezas que se acoplan, lubricante, temperatura, dureza, terminado de la superficie, presencia de partículas extrañas, composición y compatibilidad de las piezas de acoplamiento implicadas. Como en la mayoría de las aplicaciones mecánicas el desgaste rara vez puede evitarse por completo, aún en la mejor lubricación, es práctica común utilizar un metal duro y uno relativamente suave en forma conjunta. El material más suave se emplea (como en el cojinete) para la pieza más económica de reemplazar.

2.2 Fricción y Desgaste

Numerosos experimentos sobre la fricción de metales y el mecanismo del desgaste han demostrado que éste fenómeno puede aplicarse por la formación y posterior formación o ruptura de uniones o empalmes metálicos. Puesto que todas las superficies cuidadosamente preparadas contienen irregularidades que resultan grandes en comparación

con las dimensiones moleculares, el área o zona real de contacto será muy pequeña y la presión local corresponderá a la presión de cedencia. Esta intensa presión provocará la formación de uniones soldadas localizadas en los puntos de contacto. La resistencia a la fricción se debe en gran medida a éstas uniones, pero en parte también se debe al desplazamiento del metal que aparta de la trayectoria de la aspereza. Algunos científicos consideraron a este último término insignificante para la mayoría de los materiales usados en aplicaciones de ingeniería y expresaron así el coeficiente de fricción.

$$f = \frac{s}{p}$$

Donde:

s = resistencia al corte del más débil de los dos materiales en contacto

p = resistencia al flujo del más blando de los dos materiales en contacto

Como se supone que existe una ligadura metálica o metalúrgica entre las partes en movimiento, la solubilidad de los dos metales es un factor importante para la resistencia final de una junta. La solubilidad permite una mayor difusión de los metales entre sí, cuyo efecto de la aleación contribuye a aumentar la resistencia del material que forma la unión. La baja solubilidad impide una difusión apreciable, formándose una ligadura relativamente débil; la resistencia relativa de la ligadura determina donde ocurrirá la fractura y por tanto, la fuerza de fricción que se necesita. En una unión de alta resistencia, la fractura ocurrirá a una profundidad abajo de la superficie, porque la resistencia de la aspereza -

es mayor que la de el material base. En la mayoría de los casos, el templeado de el material también aumenta la resistencia, por lo que la fractura ocurre en un punto en que los esfuerzos combinados sean mayores que la resistencia. Con una unión de baja resistencia la fractura se origina precisamente abajo de la superficie, - debido al templeado

La fricción es una doble naturaleza, molecular y mecánica. Por una parte depende de que las fuerzas de interacción molecular logren superar la ligadura o afinidad entre dos superficies. Por otro lado, depende de la deformación volumétrica del material, - debida a la penetración mutua, a la configuración geométrica de los elementos en contacto, a la relación entre las propiedades mecánicas. En la fricción pueden intervenir los siguientes fenómenos:

1. Corte de material penetrado o formación de una fisura con la separación del material
2. Formación de fisuras con desplazamiento plástico del material
3. Deformación elástica del material

En los dos últimos casos el desgaste ocurre por interacción molecular en la superficie, ya sea:

4. Sin destrucción del material
5. Con destrucción de un cierto espesor del material

En el primero y en el último de los casos, cada destrucción de una

afinidad causa desgaste del material. Por lo tanto éstas dos clases no deberán considerarse fricción propiamente dicha, por ser grande el desgaste que entraña. En el tercero y cuarto caso no hay destrucción del material y por consiguiente corresponden a la fricción ideal

En el segundo caso ocurre un desgaste debido a la múltiple destrucción de los puntos en contacto. El grado de destrucción corresponde aproximadamente al número de ciclos. Este es característico de las fallas del material por fatiga en la superficie. Constituye un caso intermedio en severidad, pero es en realidad el más típico de fricción y desgaste de metales, puesto que el pequeño valor de la zona real de contacto conduce a esfuerzos altos, resultando por consiguiente una deformación plástica.

La complejidad del desgaste se acentúa al considerar el número de factores necesarios para describirlos. Los principales factores que intervienen en el desgaste pueden enumerarse en la forma siguiente:

1. Variables relacionadas con la metalurgia.
Dureza, tenacidad, constitución, estructura y composición química.
2. Variables relacionadas con el servicio.
Materiales en contacto, presión, velocidad, temperatura y acabado de la superficie
3. Otros factores que contribuyen.
Lubricación, corrosión

Además el desgaste que ocurre en la práctica es la mayoría de -

los caos una combinación de una o más formas elementales. Pequeñas partículas producidas por raspado pueden presentar o resultar un desgaste abrasivo, o bien la corrosión por rozamiento en una prensa de ajuste forzado puede dar por resultado desgaste y daño posterior.

El concepto de desgaste entraña la presencia de pequeñas partículas entre la superficie de contacto. Es probable que las partículas productoras de abrasión comiencen por penetrar en el metal y después cause deterioro en la superficie, introduciendo esfuerzos que la agrietan y conducen a su desgaste.

A continuación se estudian los factores adhesión y compatibilidad de los metales.

El grado de adhesión de los metales determina la magnitud del esfuerzo cortante producido entre las superficies en contacto. La solubilidad y el carácter de la aleación de un par de metales indican la tendencia a formar una unión en la interface. Por lo tanto, para que el par de metales sea resistente, debe cumplir dos condiciones:

1. Que ambos metales sean mutuamente insolubles (lo cual determina el número de uniones)
2. Que al menos uno de los metales sea del subgrupo B, lo cual determina la resistencia de las ligaduras o afinidades formadas (tipo de unión)

Dureza

Se sabe que por lo general, la tasa de desgaste decrece conforme - aumenta la dureza del material, siempre que los demás factores permanezcan constantes. A fin de aumentar la resistencia al desgaste, debe de incrementarse la dureza mediante aleación o tratamiento térmico. El templeado o endurecimiento por trabajo en frío no aumenta la resistencia de los materiales al desgaste.

Carga

Se ha descubierto que el desgaste se incrementa en forma casi proporcional a la carga, sin embargo esta relación se pierde con el - calor de fricción.

Se puede enunciar como regla general que ante esfuerzos inferiores a $1/3$ BHN (aproximadamente en el punto de cedencia) el desgaste - será independiente de la carga.

Distancia

Se ha determinado que la tasa de desgaste es linealmente proporcional a la distancia recorrida. Los resultados de experimentos realizados por Piggot y Wilman¹, muestran que el desgaste se inicia - linealmente y después describe una pauta exponencial. Fig. 2.1.

Temperatura

La tasa de desgaste se incrementa con la temperatura, debido a un decremento de la dureza, a un incremento de los riesgos de soldadura, a deformaciones plásticas y a corrosión por oxidación.

Velocidad de deslizamiento

El decremento de la fricción y el desgaste al elevarse la velocidad de deslizamiento, se debe a la mayor inclinación del gradiente de temperatura; como el área efectiva de contacto puede reducirse, queda menos tiempo disponible para ceder bajo la carga aplicada.

Freitag² ha descubierto que para ciertas combinaciones de metales, la superficie frotada con otra experimentan flujo y fusión del metal o material. En otros casos se observó una marcada fragmentación de las capas superficiales.

Así pues, cabe concluir que para altas velocidades de deslizamiento, el desgaste está influido por dos factores:

1. Desarrollo de altas temperaturas
2. Propagación de deformación plástica

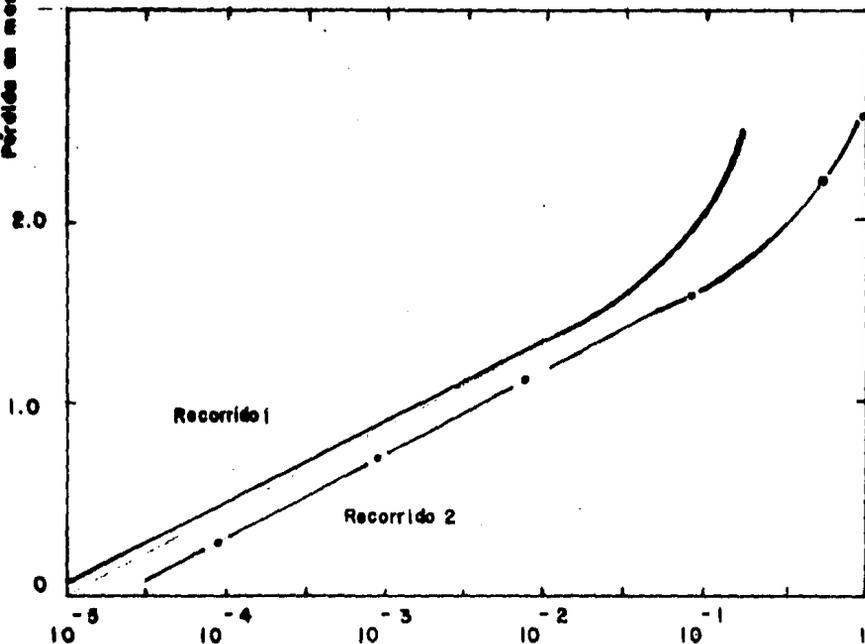
Acabado de la superficie

En términos generales, mientras más áspera sea la superficie, más alta será la tasa de desgaste, sin embargo, la superficie sumamente lisa y uniforme manifiestan altas fuerzas de interacción molecular y pierden la capacidad de acumular contaminantes, debido a la ausencia de los valles de otra manera se localizan entre las asperezas de una superficie rugosa.

Contaminantes

Los contaminantes pueden ser benéficos (lubricantes o películas dentro de la superficie) o perjudiciales (abrasivos). La presencia de películas o lubricantes de baja resistencia al corte para -

Pérdida en meses (mg)



Logaritmo de la distancia recorrida (Km)

Fig. 21

superficies sólidas reduce la fricción y el desgaste de las superficies que se deslizan entre sí.

Efectos ambientales

Los efectos corrosivos de los productos químicos y los efectos erosivos de las sustancias al fluir por una superficie provocan desgaste en una forma que corresponde a las condiciones ambientales existentes.

La experiencia con algunas partes de aviones indica que a mayores altitudes y con el progresivo enrarecimiento de la atmósfera, la tasa de desgaste aumenta en forma apreciable, a la vez que la fricción disminuye notablemente.

Se observaron aumentos de las razones de desgaste en chumaceras de maquinaria eléctrica el flujo magnético y las corrientes directas a través de éstas chumaceras produjeron reblandecimiento de las huellas en la superficie y socavaduras o picaduras en los balines, cuya naturaleza y extensión dependen de la magnitud de la corriente. Se observó que en la atmósfera seca, las tasas de desgaste aumentaban hasta ser 8 veces mayor, que las ocurridas en aire normal. El desgaste en oxígeno seco fué ligeramente menor que en nitrógeno seco, lo cual sugiere que la combustión tiene poca participación en el desgaste.

2.3 Desgaste Adhesivo

Esta teoría supone que la carga W entre dos cuerpos en contacto deslizante esta dividida entre un cierto número de asperezas cuya área total A es igual a W/p , donde p es la presión de cedencia del material más reblandecido.

Si existe buena adhesión entre las dos superficies por medio de sus asperesas, que considera que forman un sólo cuerpo, entonces la fuerza de fricción se determina multiplicando el área adherida por la resistencia al corte de los dos cuerpos, $F = As$. De ellos se obtiene $f = F/W = s/p$, lo cual indica que el coeficiente de fricción es independiente de la carga o de la aparente área de contacto.

Sin embargo, las cantidades s y p no pueden identificarse con la resistencia al corte en volúmen y con la dureza del material. Esto introduce una grave dificultad en la evaluación cuantitativa. Tiene lugar un flujo plástico que, acompañado de calentamientos y altas presiones locales, forma uniones soldadas entre las dos superficies. La resistencia de estas uniones determina la resistencia a la adhesión.

De esta manera, la fuerza necesaria para cortar una determinada unión adherida en presencia de una carga normal, no sería la misma que la que se requiere cuando no hay carga, como en el caso de una prueba convencional de corte. Sin embargo se observó que cuando la adhesión sólida se presenta en las regiones de contacto real entre las superficies metálicas, la fuerza para cortar las uniones se aproxima bastante al producto del área de la sección transversal de las uniones por la resistencia del material en volúmen. Esta fuerza de fricción es aproximadamente el 80% de la fuerza tangencial necesaria para cortar la soldadura,; el 20% restante se requiere para nivelar las asperesas más duras, distribuyéndolas entre las más blandas.

Esta deformación plástica nos induce a hacer otro esfuerzo para explicar el desgaste.

Mecanismo

Las superficies correspondientes de dos partes de máquinas no son lisas cuando se consideran a escala atómica, sino que presentan montes y valles. Estos picos o asperesas hacen que las superficies en contacto estén más estrechamente aproximadas de lo que podría indicar una consideración sobre los niveles superficiales medios.

Cuando dos piezas de metal desnudo entran en contacto, tienden a adherirse entre sí. Esta tendencia natural se origina por la presencia de electrones en exceso, o por la carencia de suficientes electrones en los átomos de las superficies de los metales.

Como las partes de los metales se desplazan entre sí, las uniones formadas tienen que romperse. Si la unión formada es más débil que ambas partes metálicas, la fractura ocurrida en la interface de los metales, con poca transferencia de metal de una parte a otra. Sin embargo ocurrirá una cierta deformación plástica en la unión de las asperesas, cuya extensión depende de la resistencia de la unión. Como las asperesas tenderán a ponerse en contacto repetidamente conforme se repite el ciclo de operación continuamente tendrán lugar pequeñas cantidades de deformación. El resultado de esto será un trabajo de endurecimiento de las asperesas, por el consiguiente decremento en la ductilidad en los metales.

Después de cierto tiempo, que dependerá de la cantidad de deformación en cada ocasión que se efectúe contacto, las asperesas se volverán frágiles y tenderán a romperse. El resultado puede ser la pérdida de un pequeño fragmento de metal entre las partes. La transferencia de metal ocasionará rayado, mientras que la pérdida de una partícula de metal causará desgaste adhesivo.

Si la adhesión entre los metales es más fuerte que uno de los metales, o que ambos, el metal más débil sufrirá fractura. En éste caso, parte del metal más débil se adhiere al otro. La asperesa a la que se adhiere el metal será más grande y probablemente encontrará más asperesas que antes. Además en algunas áreas se desarrollará una condición de metales semejantes en contacto.

Ambos resultados tenderán a promover aún más uniones y más transferencias de metal.

La condición de metales semejantes en contacto causará uniones con fuerzas cohesivas más bien que adhesivas. De ésta manera, la resistencia de las uniones tenderá a hacerse mayor en éstas áreas el daño resultante dependerá de si el corte ocurre en la interface o en el volumen del material. Como rara vez ocurrirá en la interface, el daño será intenso por ésta razón el deslizamiento en metales similares puede causar fuerte desgaste.

La transferencia de metal de una parte a otra ocasionará que una de las partes aparezca más desgastada. Este desgaste se presentará únicamente en las áreas de las asperesas y tenderá a ocurrir

en una pauta lineal. Esta es la condición del rayado. Si se desarrollan suficientes uniones, la fuerza requerida para romper la será superior a la fuerza aplicada en la operación y los metales quedarán imposibilitados para deslizarse entre sí. Esta es la condición del desbastado.

Criterio para la selección del material

Con el objeto de prevenir el rayado y la adhesión de dos metales en contacto deslizante, sujetos a lubricación en los linderos, se han emitido dos criterios. El par deslizante deberá:

1. Estar formado por metales mutuamente insolubles
2. Por lo menos uno de los metales deberá pertenecer al subgrupo B de la tabla periódica

De esta manera parece ser que el par de metales que produciría el menor número de amarres y las uniones más débiles, será el más adecuado para las aplicaciones de deslizamiento.

Con pocos amarres, el número de posibles puntos de rayado sería pequeño con adhesiones débiles la tendencia a la transferencia de metal y el trabajo de endurecimiento de las asperas quedaría reducido al mínimo.

Este razonamiento en el que se basan éstos dos criterios puede remitirse en dos enunciados básicos. La solubilidad mutua de los dos metales determinará el número probable de uniones que se forme. Las características de adhesión de los metales determinará la resistencia de los amarres formados.

2.4 Desgaste Abrasivo

El desgaste abrasivo puede definirse como el desgaste que ocurre a temperaturas normales como resultado del contacto dinámico en tre superficies metálicas desgastadas y partículas o fragmentos - abrasivos. Las más elevadas tasas de desgaste ocurren, por - supuesto que cuando la dureza del abrasivo es considerablemente - mayor que la del material abrasado. Como ejemplos de materiales abrasivos comunes podemos mencionar coque, grava, polvo, incrusta ciones, minerales y arenas.

Como la tenacidad es importante, una definición sería: es la indi cación de la cantidad de deformación plástica que un material pue de soportar antes de su fractura. Por lo tanto, en general, - mientras más diferencia exista entre la resistencia de un mate rial a la tensión y su resistencia en el punto de cedencia, mayor será su tenacidad.

Se supone que el desgaste en miembros de acero deslizante está - causado por la presencia de partículas de perlita dispersas entre la ferrita. Estas partículas duras, inicialmente al nivel de la superficie, pueden incrustarse en la región de la ferrita por una cantidad proporcional a la presión aplicada. El efecto de ésta presión es abatir la superficie de ferrita dejando que las parti culas de perlita se proyecten hacia afuera. De ésta manera, pa rece ser que únicamente las partículas abrasivas de perlitas y la ferrita incorporada muy cercanas a la superficie, podrían ser re movidas durante el principio del desgaste. En subsecuentes eta pas de operación, se forman uniones cuando la área de la superfi cie deslizantes se hacen comparables.

El desgaste por abrasión puede dividirse en tres categorías principales; abrasión penetrante de alto esfuerzo o abrasión pulverizante y abrasión ligera, de bajo esfuerzo por rayado o por erosión. Las tres categorías pueden presentarse simultáneamente en una pieza desgastada, pero por lo general puede reconocerse el tipo predominante.

Abrasión penetrante

Este tipo de desgaste se caracteriza por altos esfuerzos (generalmente causados por impacto) y da como resultado una considerable microdeformación de la superficie. Otra característica importante es que como el abrasivo suele ser obtener buen apoyo, su acción penetrante puede compararse con la de una herramienta de corte.

Las tasas de desgaste abrasivo generalmente se expresan en términos de milésimas por hora, que representa la velocidad normal a la que el metal elimina la superficie del material.

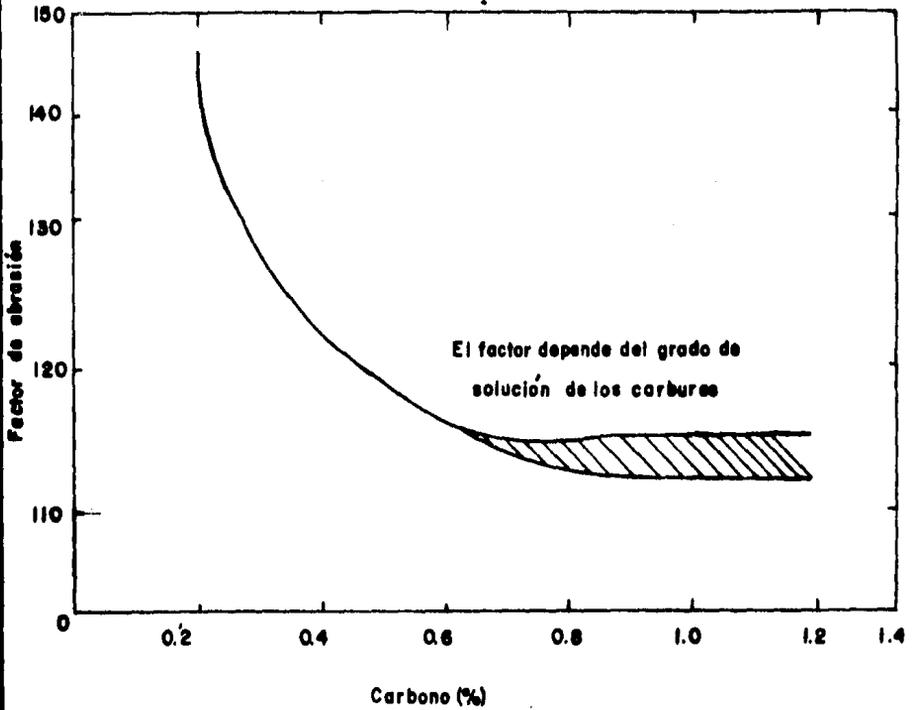
Por lo general, las tasas de este tipo de desgaste tienden a ser más altas que las del desgaste pulverizante o erosivo exento para la erosión a altas velocidades.

Abrasión pulverizante o de alto esfuerzo

Este tipo de abrasión ocurre cuando dos superficies de desgaste se frotan entre sí en un medio arenoso con suficiente fuerza para producir trituración en las partículas de mineral o en otros abrasivos atrapados entre las dos superficies. Generalmente son bajas, sin embargo, como el área real de apoyo (los granos) es -

Rango o escala de composición (%)

manganeso	0.7 - 1.5
Silicio	0.4 - 0.8
Cromo	0.8 - 1.5
Moibdeno	0.2 - 0.5



Tasa de desgaste de aceros martensíticos fundidos

al molar un mineral silíceo

Fig. 2.2

considerablemente inferior al área de aplicación de la carga, los esfuerzos sobre los granos individuales son excesivamente altos. Estos altos esfuerzos son capaces de ocasionar pequeñas grietas o fracturas en los constituyentes frágiles, tales como los carburos toscos que pueden existir en la estructura de algunas de las aleaciones resistentes al desgaste. Como la resistencia a la trituración por compresión incluso de los minerales más duros es relativamente baja, los granos se fracturan fácilmente. Los granos rotos, aparte de ser abrasivos, están afilados y pueden rayar el acero del tipo más duro. El deterioro ocurre entonces por rayado, por flujo plástico local y agrietamiento microscópico. Por lo tanto, aún cuando la abrasión originalmente observada entre las superficies pueda ser más bien suave (y al parecer relativamente inocua), de inmediato se convierte en una abrasión destructiva.

Abrasión por erosión

Los principales factores que ocasionan desgaste por erosión son la velocidad y el bajo impacto cuando el movimiento es paralelo a la superficie. Por lo común éste desgaste depende de la dureza de las partículas y en muchas ocasiones también de los filos que éstas presentan. Las partículas adhesivas pueden estar suspendidas o conducidas por un fluido (agua o aire) o pueden fluir por su propio peso (canal de arena), figura 2.2

Los esfuerzos que intervienen en el desgaste por erosión, sólo en raras ocasiones son lo bastante intensos para romper los granos abrasivos. Esto significa que la uniformidad o angularidad original de la superficie es importante ya que el uso produce pocos cambios

Si el impacto es muy bajo, el mejor criterio para la resistencia - al desgaste es usar el acero más duro posible con un alto grado de contenido de carbono. Este último factor constituye una mayor pro - porción de carburos duros en la estructura.

Control de la abrasión.

Está generalmente aceptado para que un material pueda ser rayado o gastado en forma apreciable, es preciso que el abrasivo sea más duro que el material. Esto parece ser cierto en gran medida, no obstante que algunos casos de desgaste ocurren aún cuando minerales rela - tivamente blandos se frotan contra materiales muy duros, resisten - tes al desgaste. Sin embargo por regla general, existe una muy - marcada reducción de la tasa de desgaste cuando la dureza del mine - ral abrasivo es menor que la del material abrasado. Fig. 2.3 y - Fig. 2.4

En muchos casos la dureza del abrasivo no es la propiedad más importan - te para determinar la abrasión intensa.

Para la abrasión rápida, la dureza en caliente del agregado puede - ser un factor más importante que la dureza a temperatura ambiente. Por lo tanto ésta última puede ser de utilidad limitada para indi - car el comportamiento de los materiales en éste tipo de servicio.

2.5 Protección contra el desgaste

Considerando los innumerables mecanismos de desgaste, virtualmente no se podría prevenir el deterioro de las partes metálicas con el - tiempo. En la mayoría de los casos, así sucede en realidad. Sin embargo aunque la degradación superficial causada por fenómenos -

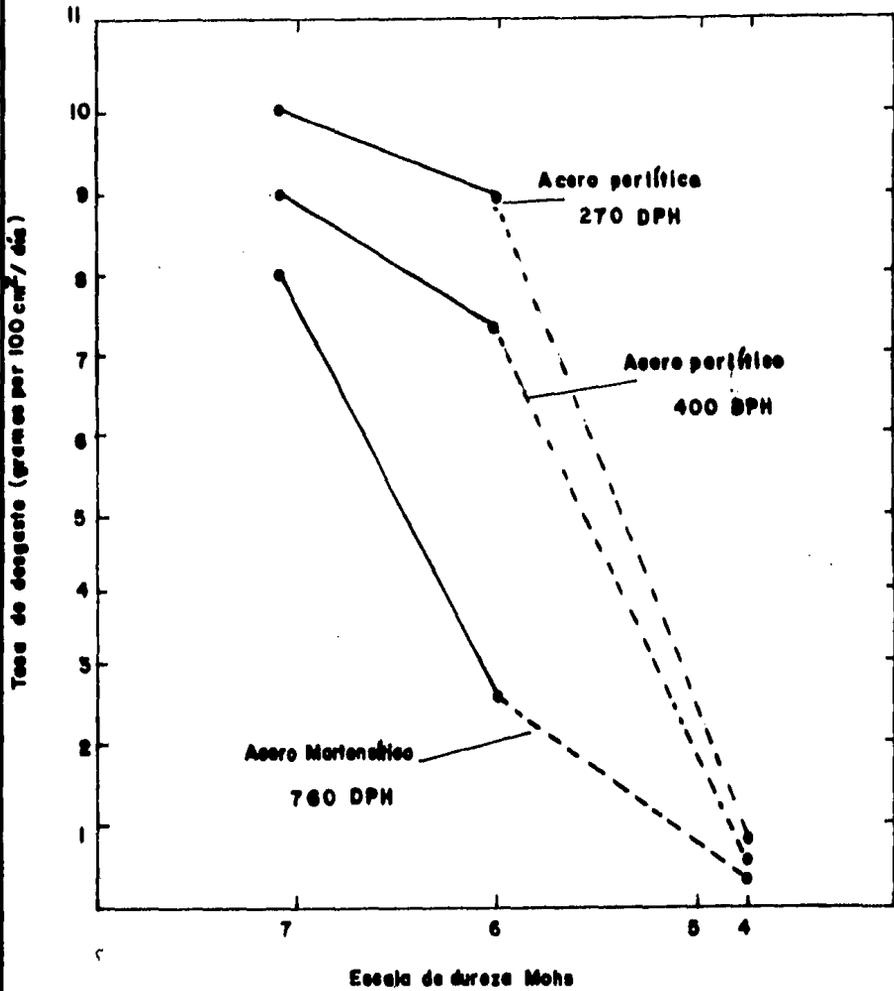


Fig. 2.3 Tasa de desgaste de acero contra minerales abrasivos

Tasa de desgaste relativo, Acero 1020 SAE recocido

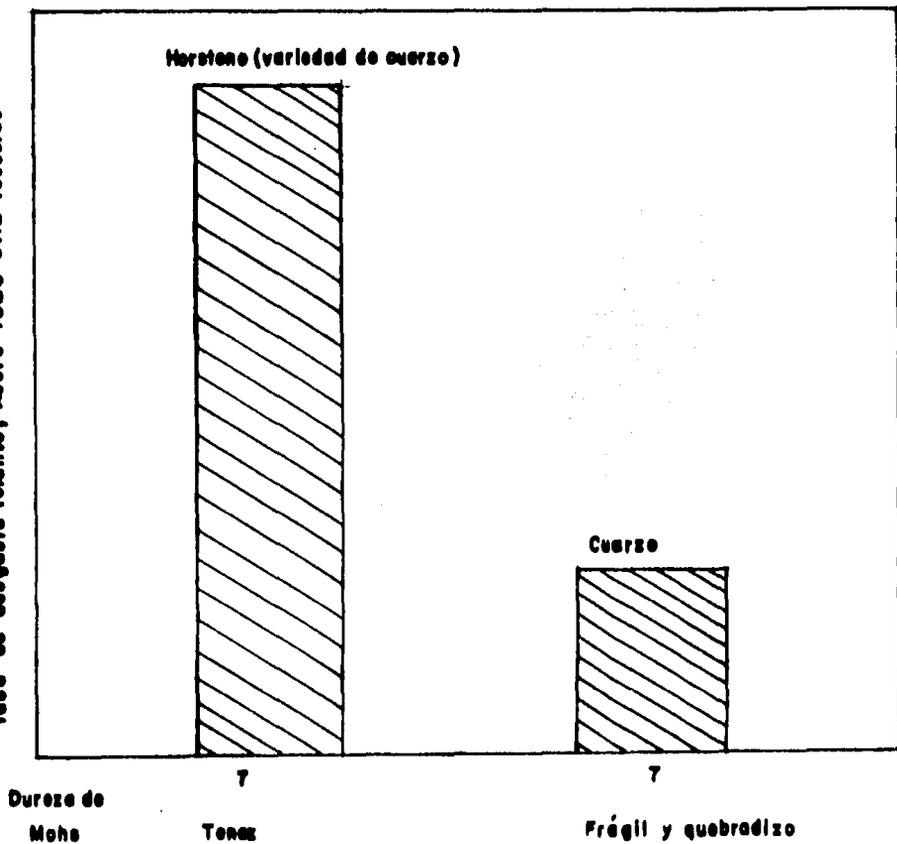


Fig. 2.4 Abrasividad relativa de dos minerales

mecánicos o químicos no puede evitarse, si puede reducirse al mínimo en forma afectiva mediante tratamientos superficiales. Esta es - probablemente la consideración más importante sobre el desgaste en el diseño.

El tratamiento superficial puede ser la única forma de proporcionar a una pieza las propiedades de resistencia al desgaste que garanticen un tiempo razonable de servicio. La deposición de un metal químicamente inactivo sobre una pieza, puede ser necesario para reducir al mínimo los destrozos del ataque corrosivo, o bien - del endurecimiento puede ser la única manera de resolver un problema de desgaste por abrasión.

Hay disponibles muchos materiales y métodos para proteger contra - el desgaste. La selección de un material y proceso específicos - requieren un análisis concienzudo de las condiciones reales de servicio, un conocimiento de la aplicabilidad y limitaciones del material y proceso particulares y datos referentes al costo implicado. La falta de datos de Ingeniería disponibles para comparaciones impone la necesidad de que el ingeniero o técnico que selecciona los materiales para soportar el desgaste tenga un buen juicio.

Varias técnicas para proporcionar protección a la superficie contra el deterioro son:

- Electrodeposición
- Anodizado
- Difusión
- Rociado Metálico (metalizado)
- Revestimiento con una capa de metal dura resistente a la abrasión

- Tratamiento térmico selectivo

2.5.1 Electrodeposición

La resistencia al desgaste de una pieza de metal puede mejorarse - electrodepositando un metal más duro sobre su superficie. Los metales que más a menudo se electrodepositan sobre materiales base - son el cromo, el níquel y el rodio.

Dos tipos de revestimiento de cromo empleados industrialmente se - conocen como cromo duro y cromo poroso. El revestido de cromo duro es el mismo que el utilizado para propósitos decorativos, pero mucho más grueso, generalmente de 0.0001 a 0.010 de pulgada. El revestido de cromo poroso tiene sobre su superficie, cuidadosamente controlados, agujeros o canales para mantener los lubricantes. El término es engañoso, ya que por debajo de la superficie preparada especialmente, no es más porosa que el revestimiento común de - cromo duro. La dureza del revestimiento de cromo es equivalente a 950 hasta 1,050 Vickers. Otro factor que contribuye a reducir el desgaste es el bajo coeficiente de fricción del revestimiento - de cromo. El revestido de cromo se utiliza generalmente en cilíndros y anillos de motores de combustión interna. La alta resistencia a la corrosión del cromo es útil para reducir el desgaste - bajo condiciones corrosivas. La dureza del revestido de níquel - es de 140 a 425 Vickers, dependiendo de la solución química de revestimiento de níquel utilizado. El revestimiento de níquel es - más suave que el de cromo, pero suficientemente duro para el propósito de que se trate y más económico.

La dureza del revestido de rodio es de 540 a 640 Vickers y su -

resistencia al desgaste está entre la del revestido de níquel y la del revestido de cromo. El revestido de rodio tiene alta reflectividad, gran resistencia al calor, junto con buena dureza y resistencia al desgaste. El uso del revestido se uso para reflectores de fuentes de luz de alta intensidad, para contactos eléctricos, - etc.

2.5.2 Anodizado

La formación de una cubierta de óxido por anodizado puede utilizar se para mejorar la resistencia al desgaste de ciertos metales. - El proceso de anodizado se aplica generalmente a aluminio, magnesio, zinc y sus aleaciones. En el anodizado la pieza es el ánodo y capas de óxido se forman en el metal base. Como la capa de - óxido más nueva se forma siempre adyacente al metal base, a fin de que el proceso continúe, las capas de óxido previamente formadas - deben ser suficientemente porosas para permitir que los iones de - oxígeno pasen a través de ellas.

El anodizado del aluminio es simplemente un método para formar una cubierta de óxido mucho más gruesa que la que puede obtenerse por exposición al aire. Las piezas de avión como pistones hidráulicos, rieles guía, engranes, tornillos, levas, uniones o articulaciones giratorias y cerraduras se hacen de aleaciones al aluminio de cubierta dura.

El anodizado del zinc produce una cubierta que tiene mayor resistencia al desgaste que las películas de cromato. Las cubiertas - anódicas de zinc se utilizan en castillos para cartucho, paletas - para hélices de aeroplano, telas de alambre y estantes para refrigerador.

2.5.3 Difusión

Diversos procesos mejoran la resistencia al desgaste por difusión - de algún elemento dentro de las capas de la superficie a saber:

- Carburización
- Cianuración
- Carbonitruración
- Nitruración
- Cromado
- Siliciado

Carburización

Este es el más viejo y uno de los más baratos métodos de endurecimiento superficial. Un acero de bajo carbono, generalmente como - del 0.20% de carbono o menos, se coloca en una atmósfera que contiene grandes cantidades de monóxido de carbono. La temperatura de carburización usual es de 1,700° F. El proceso de carburización puede aplicarse a piezas enteras o a porciones de las mismas, cuando sólo se necesita hacer endurecimiento local. La dureza alcanzable es una función de la composición del metal base y de las variaciones sufridas durante el procedimiento, pudiendo variar entre 55 y 65 puntos Rockwell C.

Cianuración

La difusión de carbono y nitrógeno en la superficie de una aleación ferrosa por medio de un baño líquido se denomina cianuración, cuando es mediante atmósferas gaseosas se le llama carbonitruración. Las temperaturas utilizadas suelen ser inferiores a las empleadas - en carburización, estando entre 1,400 y 1,600° F. La exposición - es por un tiempo más corto, y se producen partes externas más delga

das, hasta de 0.010 pulgadas por cianuración y hasta de 0.30 pulgadas para carbonitruración.

En la cianuración, la proporción de nitrógeno y carbono en la superficie dura externa producida por un baño de cianuro depende de la composición y de la temperatura del baño, siendo ésta última la más importante. Realmente, la carbonitruración es un cambio de carburización, y el término nitrocarburización sería más descriptivo. El término carbonitruración es engañoso porque implica un proceso de nitruración modificado.

Nitruración

El endurecimiento superficial también puede lograrse mediante la reacción del nitrógeno con elementos aleados, para formar un revestimiento superficial de nitruros. Una fuente de nitrógeno comúnmente usada es el amoníaco; la superficie resultante posee buena resistencia a la fatiga y al desgaste, pero débil resistencia a la erosión y al rallado ligero. Es factible lograr endurecimientos superficiales hasta de 63 puntos Rockwell C. Las profundidades comunes del endurecimiento fluctúan entre 5 y 30 milésimas.

Cromado

Consiste en la introducción de cromo dentro de las capas superficiales del metal base. El proceso no está restringido a materiales ferrosos y puede aplicarse a níquel, cobalto, molibdeno y tungsteno para mejorar la resistencia a la corrosión y al calor. El proceso de cromado más ampliamente utilizado se basa en el principio de transferencia de cromo a través de la fase gaseosa a temperaturas elevadas. Las temperaturas utilizadas varían desde

1,650 hasta 2,000° F. El cromado se emplea en troqueles forjados a martinete, herramientas, pistones y ejes para bomba.

Siliciado

Consiste en la impregnación de un material de base hierro con silicio. El proceso se lleva a cabo en el intervalo de temperatura de 1,700 a 1,850° F. La pieza se calienta en contacto con un material que contiene silicio (como carburo de silicio) y se utiliza gas cloro como catalizador. La profundidad de la superficie endurecida varía desde 0.005 hasta 0.1 de pulgada, dependiendo principalmente del contenido de carbono del material base.

2.5.4 Rociado metálico

El rociado metálico o rociado por llama se ha utilizado por muchos años en la recuperación de piezas para reconstruir, dimensiones que están fuera de tamaño y para reparar superficies gastadas. Se ha incrementado su empleo en aplicaciones en donde se requieren recubrimiento resistentes al desgaste.

Las cubiertas rociadas pueden aplicarse por diversos métodos: metalizado, revestimiento metálico por llama, utilizando para depositar carburo de tungsteno y óxido de aluminio.

El metalizado suele hacerse alimentando automáticamente un alambre de metal a una velocidad controlada a través de la herramienta o pistola de metalizado, fig. 2.5 Aire, oxígeno y un gas combustible se suministran a la pistola por medio de mangueras y forman una llama de alta temperatura y gran velocidad alrededor de la punta del alambre.

Alambre e inyector
del gas

Tapón de
aire

Envoltura de
aire



Alambre



Alambre fundible

Aire comprimido

Recío

Atomizado

Oxígeno y gas
combustible

Recubrimiento rociado

Substrato

Fig. 2.5

Esta punta se funde continuamente, y las partículas de metal líquido se dirigen a la pieza por la llama de alta velocidad. Cuando chocan contra la superficie, éstas partículas se aplastan para formar discos de forma irregular. Al mismo tiempo se fuerzan dentro de los poros e irregularidades de la superficie para proporcionar adherencia mecánica con el material previamente depositado. - El enfriamiento es muy rápido y se forma una película delgada de óxido sobre la superficie descubierta de las partículas depositadas.

La resistencia al desgaste de metales rociados suele ser muy bueno pero el metalizado no es adecuado para un servicio que implique cargas aplicadas con gran impacto o abrasión extrema o donde se aplican cargas altamente localizadas. El metalizado es lo más adecuado para aplicaciones que incluyen ligero desgaste abrasivo, para condiciones en que existe la lubricación límite, y para proporcionar una superficie resistente al desgaste o resistente a la corrosión para materiales base poco costosos.

2.5.5 Revestimiento duro

La producción de una capa superficial dura y resistente al desgaste sobre metales, por soldadura, se conoce como revestimiento duro. Este método es relativamente fácil de aplicar, requiriendo sólo las aleaciones de revestimiento duro en la forma de varillas de soldar y una llama de oxiacetileno o arco eléctrico. El material de revestimiento duro se proporciona en forma de un electrodo o varilla para soldar, la cual generalmente se utiliza sin revestir para soldaduras con gas oxiacetileno, produce depósitos más uniformes que pueden colocarse más precisamente, en tanto que las rapididades de calentamiento y enfriamiento son más lentas. El revesti

miento del fundente contiene materiales para la estabilidad del arco, protección a la oxidación de la soldadura fundida, limpieza de impurezas, aislamiento térmico y eléctrico y control de transferencia de metal. Hay más de 150 composiciones diferentes de materiales de revestimiento duro comercialmente disponibles que varían desde aceros con sólo 2% de aleación total hasta aleaciones de bases níquel y base cobalto y carburo de tungsteno.

2.5.6 Tratamiento térmico selectivo

Los métodos empleados para tratamiento térmico selectivo son el endurecimiento por inducción y el endurecimiento por flama, mismos que constituyen, esencialmente, métodos de endurecimiento poco profundo.

2.5.7 Galvanización

Un método usado para mejorar las propiedades superficiales de desgaste y corrosión entraña la aplicación de un revestimiento metálico, por lo general, compuesto de un material diferente al metal base por medio de deposición electrolítica. Aunque la electroplastia tiene muchas aplicaciones decorativas, su función principal es mejorar el acabado superficial reduciendo el coeficiente de fricción y protegiendo al metal base del ambiente corrosivo.

La selección de un material para el revestimiento entraña a considerar la posición relativa que guardan el metal base y el metal del revestimiento en la serie electroquímica de actividad. Una combinación de dos metales en el medio apropiado constituye una celda galvánica, la cual acelerará o impedirá la corrosión del metal base o revestimiento, según la aplicación.

Si se desea un revestimiento anódico, conviene seleccionar un metal que sea menos noble que el metal a ser protegido (sufrirá corrosión el revestimiento, en lugar del metal base). Si se desea un revestimiento catódico, deberá seleccionar un material o metal más noble que el metal base.

La dureza relativa de los diversos metales de revestimiento es una indicación de su resistencia al desgaste.

Entre los variados metales usados en la electroplastia figuran cadmio, zinc, cromo, níquel y estaño. Las propiedades de desgaste y corrosión de cada uno varía considerablemente, por lo que se preci_sa una selección cuidadosa para cada aplicación en particular.

La exposición del recubrimiento del zinc da como resultado la formación de carbonato de zinc sobre la superficie de recubrimiento, protegiéndolo así de la corrosión, tanto del propio zinc como del metal base. Entre las propiedades del zinc destacan su bajo costo, su facilidad de aplicación, especialmente al acero por electrogalvanizado o inmersión en caliente, y su moderada resistencia a la abrasión. El zinc es anódico al hierro, por lo que proporciona protección de sacrificio. Su duración es aproximadamente proporcional - al espesor del recubrimiento.

Aún cuando el zinc manifiesta moderada resistencia a la abrasión, - por lo que deberá usarse exclusivamente en aquellos casos en el que el único requisito importante es la protección contra la corrosión. No deberá usarse en equipo que esté constantemente sumergido en - agua, ni entrar en contacto con alimentos o bebidas.

Algunas aplicaciones típicas del recubrimiento en zinc son: pequeñas piezas de máquinas, equipo de contaminación, afianzadores, aplicaciones marinas y piezas usadas en atmósfera de CO_2 y SO_2 .

REFERENCIAS

1. Piggot, M. R. y H. Wilman,
"Nature of the wear and friction of Mild steel on
Mild steel and the effect of Surface Oxide and -
Sulphide Laves",
No. 18

2. Freitag, E. H.,
"Wear and friction of metals at very High Speeds",
No. 44

3. Desgaste en el diseño mecánico,
Lipson

4. Introducción a la metalurgia física
Avner

CAPITULO III

SHERARDIZADO

Sherardizado es un proceso de cementación en el cual el zinc se hace cambiar con una superficie de hierro o acero por calentamiento, el trabajo con polvo de zinc es a una temperatura inferior al punto de fusión del zinc.

El proceso toma su nombre del británico, Sherar Cowper Coles, quien lo planteó en 1901. Este tal vez es el menos conocido de los métodos de aplicación de una capa de zinc a hierro o acero y la literatura es escasa.

Las empresas que usan éste proceso sacan un gran partido, ya que la protec - ción se afirma cada vez más en el transcurso de los años. Ya sea que éste proceso sea aplicable a todos los tipos de piezas fabricadas o moldeadas, la principal aplicación esta en la fabricación de tornillos de todos los g^én^eros de los cuales la cabeza es pulida después del tratamiento de protección, algunas veces destinado a la decoración. Millones de tornillos salen así - cada año para nacer frente a una gran demanda.

3.1 Generalidades sobre las protecciones

Los procesos de revestimiento metálico más comunes consisten en:

- Mejorar las piezas en un baño de metal fundido (galvanización)
- Proyectar el metal fundido sobre las piezas (metalización)
- Realizar un depósito por conducto electrolítico (cobrizado, nique lado, cromado, estañado, cadmiado, etc.)

Dentro de todos los casos uno de los factores determinantes del poder de protección del recubrimiento es su buena adherencia al me -

tal base. Esta condición esta particularmente bien realizada por el tratamiento de sherardizado, que transforma por cementación al zinc, la superficie de acero para proteger una aleación compleja.

3.2 El Proceso de Sherardizado

Es primeramente esencial remover todas las rebabas, rugosidades e impurezas de la superficie de trabajo. Esto se hace por medio de un ácido desoxidante o por ráfaga de perdigones, si es necesario por solventes o vapor desengrasante. El ciclo desoxidante es similar a aquellos aplicados a artículos a ser galvanizados en inmersión en caliente. Finalmente el trabajo debe ser sacado a fondo; esto es importante de otro modo el hidrógeno que se pueda formar cuando se calienta con zinc en polvo y daría como resultado una explosión. La ráfaga de perdigones es usada en lugar del ácido desoxidante para preparar fundiciones, soldaduras y ensambles bronceados con un consecuente riesgo de sus causas de oxidación local.

El trabajo enonces es situado en tambores de hierro dulce con una cantidad calculada cuidadosamente de polvo de zinc y posteriormente las capas son cerradas. Los tambores están situados en el horno, la temperatura es mantenida en un predeterminado nivel (usualmente cerca de los 380° C por varias horas) dependiendo de la magnitud de la capa. Durante este tiempo los tambores se rotan suavemente en orden para renovar continuamente la capa de polvo de zinc en contacto con la pieza. Prácticamente cerca de una onza de zinc en polvo es permitida por cada pie cuadrado de superficie a tratar, una sustancia inerte como la arena olivo o alumina se utilizan para asistir a la distribución de zinc.

El proceso se continua hasta que la capa calculada de espesor requerido ha sido obtenida. Los tambores son empleados y su contenido extraído, el trabajo de separarlo del polvo de zinc residual y material inerte, se hace por medio de la mano o por un tamiz.

3.3 Características y Naturaleza de la capa de Sherardizado

Aunque el tratamiento de sherardizado se realice en caliente, las piezas no sufren ninguna deformación porque el calentamiento y el enfriamiento son muy lentos y de igual importancia cuando hay puntos donde la pieza presenta concentración de esfuerzos. La temperatura del tratamiento es relativamente fija y no provoca una transformación fisico-química notable. Las características mecánicas permanecen iguales ya que las pruebas de dureza sobre diferentes tipos de acero no variaron al hacerlas anteriormente sin el recubrimiento, pruebas practicadas en particular para los diferentes servicios de aviación y de guerra, donde tiene una gran aplicación el proceso.

La capa de sherardizado tiene una apariencia gris mate y es extremadamente uniforme en espesor. Consiste casi netamente de una solución hierro-zinc, consecuentemente es muy duro. La interacción que hay entre el polvo de zinc y el metal base se hace por difusión en los puntos de contacto. El cristal de zinc se desorganiza a la temperatura de sherardizado la cual es un poco inferior al punto de fusión del zinc.

Un estudio micrográfico de las piezas tratadas muestra que la capa exterior está constituida por una serie de aleaciones de hierro-zinc cada vez más ricas en zinc a medida que se aleja del borde.

3.4 Resistencia a la corrosión

El revestimiento de piezas en acero por sherardización posee una alta resistencia a la corrosión comparada con los otros métodos. La prueba en sulfato de cobre es la más comúnmente empleada. Las probetas se sumergen dentro de una solución saturada de sulfato de cobre, con un revestimiento de zinc de 250 gramos por m^2 , el sherardizado es resistente a 10 inmersiones en un minuto.

La falta de discontinuidad en el revestimiento suprime todos los riesgos de desprendimiento y da por consecuencia una protección muy grande en contra de la corrosión y resistencia a los agentes mecánicos. En el revestimiento por electrólisis algunas veces la corrosión surge bajo el revestimiento, lo que no puede pasar con el sherardizado.

3.5 Ensayo de corrosión sobre piezas sherardizadas

Para controlar la influencia natural del cementante los tiempos de cementación sobre la resistencia a la corrosión de piezas sherardizadas, una serie de ensayos han sido tomados sobre las tuercas y pernos que se utilizan en la industria.

Cada probeta tuvo un tratamiento diferente caracterizado por los siguientes símbolos:

1a, 1b, 1c-2a, 2b, 2c-3a, 3b, 3c.

Las marcas correspondientes a una duración de tratamiento, caracterizado por los símbolos siguientes:

1. Duración del tratamiento de 09 horas
2. Duración del tratamiento de 12 horas
3. Duración del tratamiento de 21 a 22 horas
 - a. Cementante normal para piezas normales
 - b. Cementante para piezas pequeñas tomadas de piezas mecánicas
 - c. Cementante con nueva composición

Los cementantes a y b tienen la mezcla original aunque sus composiciones pueden variar según la capa.

Los ensayos de la corrosión han estado realizados por diferentes métodos a fin de marcar las diferencias posibles entre los tratamientos.

10.

Ensayo de corrosión en una atmósfera seca con la norma francesa - PN X 41-002. Número de horas dentro de la cuba de corrosión en un estado enmohecido.

3a.....504 horas

4a.....535 horas

2a.....535 horas

1b.....557 horas

2b.....557 horas

3b.....604 horas

1c.....627 horas

2c.....627 horas

3c.....635 horas

Una parte de la probeta 3a, ésta pieza ensayada tiene una resisten
cia que va creciendo durante el tratamiento junto con el uso de -
un polvo nuevo más rico en zinc. Una anomalía de la probeta 3a.
puede ser una irregularidad de la capa. Sin embargo la diferen -
cia es poco importante en el resultado de los diferentes tratamiento
s.

2a.

Prueba de corrosión al vapor de agua.

Las piezas han sido colocadas dentro de un recipiente cerrado don
de éstas han estado constantemente sometidas a la acción del vapor
de agua. La clasificación ha sido hecha siguiendo la intensidad
de la corrosión.

2a ... No. 1 (menos corroida)	3a ... No. 7
2b ... No. 2	1b ... No. 8
1a ... No. 3	3c ... No. 9 (más corroido)
1c ... No. 4	
2c ... No. 5	
3b ... No. 6	

3a.

Prueba de corrosión dentro de agua destilada a $65/70^{\circ}$ C dentro de
esta prueba las probetas han estado sumergidas los mismos tiempos
a 1,780 horas, dentro del agua destilada a $65/70^{\circ}$ C, esta tempera
tura provoca la formación de óxido de zinc que no protegen.

La clasificación se efectuó como el método anterior:

2a ... No. 1 (menos corroida)	
1a ... No. 2	
3a ... No. 3	
2b ... No. 4	1c ... No. 7
3b ... No. 5	3c ... No. 8
1b ... No. 6	2c ... No. 9 (más corroida)

Dentro de este ensayo, el cementado natural es el factor dominante los mejores y buenos resultados han sido obtenidos de un polvo nuevo o mezcla nueva.

4o.

Prueba de corrosión por inmersión dentro de una solución de ácido sulfúrico mantenido en PH_5 .

Esta prueba tuvo como fin el acercarse lo más posible a la corrosión. En el medio industrial, la inmersión de las probetas ha sido mantenida 3,150 horas.

La clasificación se efectuó como los dos métodos anteriores:

3a ... No. 1 (menos corrosiva)	2b ... No. 6
3b ... No. 2	1c ... No. 7
1a ... No. 3	2c ... No. 8
2a ... No. 4	3c ... No. 9 (más corrosiva)

Esta prueba, así bién ha permitido marcar más que los otros, las - diferencias entre los diversos tratamientos, no permitiendo apenas sacar una regla después de los resultados, ésto no quiere decir - que la duración de tratamientos semejantes tienen menos importan - cia que la utilización de un cementado usado.

5a.

Prueba de la corrosión atmosférica

Por último, las piezas son expuestas en un lugar de fuerte corro - sión. Durante 9,500 horas de exposición las piezas de ésta cate - goría han comenzado solamente a marcar algunos puntos de corrosión dentro de las partes enroscadas.

Se puede decir que el tratamiento más fuerte y resistente (21 hrs) con un buen cementado normal o mezcla, da buenos resultados.

3.6 Comportamiento del zinc con el contacto de ciertos productos quími - cos

La pregunta que siempre surge es la de saber como se comporta el - zinc en presencia de productos químicos, orgánicos o minerales.

A continuación se dará una lista de las diferentes sustancias en - las que se sumergieron las probetas y se indican los resultados.

Se dan ciertos resultados que han sido obtenidos gracias a los ex - perimentos realizados en el laboratorio. Así también nosotros - recopilamos información de varias instituciones como son: Asocia - ción del Desarrollo del Zinc de Londres, Instituto Americano del -

Zinc en Nueva York.

Es evidente que el comportamiento del zinc en contacto con todos los productos no pueden estar estudiados y que la lista es relativamente limitada. Por otra parte las informaciones dadas no pueden ser consideradas como absolutas, pues hay un gran número de - parámetros en la calidad del zinc empleado, la influencia del - agua y la presencia del azufre intervienen dentro del comportamiento del zinc en el contacto con productos químicos.

1.- Productos agresores del zinc:

- Acetatos:
Atacantes del zinc
- Acido Acético:
Reacciona muy fácilmente con el zinc sus concentra - ciones son igualmente débiles
- Acido Oxálico:
El ataque es más débil
- Acido Esteárico:
Ataca con la formación de estereate
- Bicarbonatos:
Ataca con apreciable intensidad y crece la concentra ción de la solución
- Carbonatos:
Ataca fuertemente
- Diclorobenceno:
El ataque es variable y se manifiesta en general

- Perborato:
Se utiliza como agente de ataque, corroe por consecuencia al zinc.
- Vapor de agua:
Ataca al zinc

2.- Productos no atacantes al zinc, pero dentro de ciertos casos

- Alcohol Etilico:
No hay oxidación
- Alcohol Metilico:
No reacciona en ausencia de humedad
- Aldehído:
El ataque varía, así el zinc es fácilmente atacado por el benzaldehído, pero no es corroído por el formaldehído.
- Anhídrido Carbónico:
El zinc es fácilmente atacado en una solución acuosa, pero no en estado seco.
- Benzol:
Probablemente su ataque es ligero en presencia de humedad y seguido de un grado de pureza
- Cloruros:
El ataque es variable. Así con el cloruro de amonio es severo, con el cloruro de calcio es lento y con el cloruro férrico es ligero.
- Cianuros:
El ataque varía, por ejemplo: el zinc es altamente resistente al líquido HCN porque el cianuro de potasio da un ataque lento.

- **Freón:**
No ataca al zinc porque éste no es ecéptico al agua.
- **Glicerina:**
Tampoco ataca, siguiendo un grado de pureza
- **Aceites:**
Ataque variable, pero esta determinado solamente por un aceite en particular, por ejemplo el aceite mine
ral
- **Hipoclorito:**
El zinc es más resistente que el hipoclorito de cal
cio; por el contrario el hipoclorito de sodio y de -
potasio atacan más o menos siguiendo su pureza.
- **Sulfatos:**
El ataque es variable siguiendo el tipo de sulfato;
el sulfato de calcio en solución ataca al zinc.

3.- Productos compatibles con el zinc:

- **Gas-Oil:**
No ataca sobre todo en seco
- **Cuerpos grasos:**
El zinc es inerte a éstos productos
- **Hidrocarburos:**
Petróleo pesado, solvente en nafta

3.7 Ventajas y Limitaciones del Proceso.

La uniformidad de la capa del sherardizado hace un excelente proce so para tratar partes las cuales esten sujetas a poca tolerancia y que además contengan profundos huecos.

Proporcionando la apropiada tolerancia, esta hecho para incremento dimensional cuando las partes son diseñadas, los tornillos pueden ser cubiertos con una capa por medio de sherardizado. El interior de los tubos y otros artículos berrenados o con hoyos reciben una considerable capa de calidad.

En conclusión es necesario saber poner el zinc en contacto con otro producto. Un ligero enrarecimiento o contaminación de esto es aceptable. Así, por ejemplo, el ácido esteárico vaciado dentro de un recipiente galvanizado podrá contener huellas de estearato de zinc sin que por esto el recipiente se corroa sensiblemente, pues el ácido estearico contiene una cantidad importante de ese metal.

BIBLIOGRAFIA

METAL SCIENCE AND HEAT TREATMEN

SHERARDIZING,

Volúmen 2,

Enero-Febrero, 1982

Pág. 47-58

METAL SCIENCE AND HEAT TREATMEN

CEMENTATION AU ZINC,

LA CEMENTATION PAR LA POUSSIERE DE ZINC,

por M. Berger,

Director de la Societe Thermonite

Volúmen 1,

Diciembre 1983-Enero 1984,

Pág. 64-71

CAPITULO IV

EXPERIMENTACION

4.1 Composición de la mezcla

Para la realización del recubrimiento metálico llamado galvanizado por difusión, se requiere de una cierta mezcla, la cual esta com puesta por zinc en polvo, un activador y un polvo inerte. El ex perimento podrá tener varios factores que pueden cambiar. Estos factores son:

1. El medio proveedor del zinc empleado que puede variar en - su contenido de zinc (pureza) lo cual se vería reflejado en un estudio más detallado del costo del proceso, ya que con un zinc más puro, el cual se tendría un costo inicial más - alto, pero que tomaría menos tiempo dentro del horno para - lograr el recubrimiento del espesor deseado. En cambio un zinc de menor calidad sería más barato, pero el tiempo - requerido de horno sería mayor para ese mismo espesor.

El zinc también puede variar en el tamaño de partículas, en donde se mostrará si se logra un recubrimiento con uno u - otro tamaño de partícula, es importante esto, debido a una diferencia bastante considerable en precio de un zinc en - forma de lingote y un zinc en polvo, de malla muy pequeña.

Cabría la posibilidad de hacer polvo de ese lingote en -
 diversos tamaños por muchos métodos mecánicos y químicos, -
 con el fin de producir polvos para aplicaciones específicas
 los métodos más importantes son la atomización, la reduc -
 ción de óxidos y la depositación electrolítica.

La atomización es el método utilizado más frecuentemente -
 para metales que tienen bajos puntos de fusión como el esta -
 ño, plomo, zinc y aluminio. En este proceso el metal lí -
 quido es forzado a pasar a través de un orificio, una co -
 rriente de aire comprimido hace que el metal se desintegre
 y solidifique en partículas finamente divididas. Un an -
 plio intervalo de distribuciones del tamaño de la partícula
 puede obtenerse variando la temperatura del metal, la pre -
 sión y temperatura del gas de atomización, la rapidez de -
 flujo del metal a través del orificio y el diseño del orifi -
 cio y el inyector. La principal ventaja del proceso de -
 atomización es su flexibilidad; producirá polvos de diferen -
 tes grados de finura y en la producción de una figura dada,
 la uniformidad de la distribución del tamaño de la particu -
 la puede mantenerse estrechamente.

2. El tiempo es un factor también importante, ya que se pre -
 vee que entre más tiempo permanezca la mezcla en contacto -
 con las piezas a recubrir, el espesor del recubrimiento -
 será mayor. Habrá un óptimo en tiempo, ya que habrá un mo -
 mento en que en el lado de la probeta se haya concentrado -
 una mayor cantidad de zinc, que la de la mezcla de la cual
 se ha obtenido el zinc.

Esto se ejemplifica de una manera muy práctica con la transferencia de calor entre dos cuerpos en contacto, uno más caliente que otro, en donde en un óptimo de tiempo las temperaturas de ambos cuerpos se igualan y por lo tanto habrá dejado de haber transferencia de calor.

3. La temperatura a la cual se debe llevar a cabo el experimento, es por debajo de la temperatura de fusión del zinc, lo cual hay una amplia gama de temperaturas a la cual se puede hacer la di fusión.

El horno en el cual se realizó el proceso tenía un rango de va riación de 15° C, ya que al llegar a cierta temperatura registrada por un termopar, el horno se apaga y de igual manera se pre ndía al bajar la temperatura en 15° C., de manera que éste factor se mantendrá de cierta forma constante, debido a la difi cultad en controlarla.

En la preparación de los tres elementos de la mezcla, el zinc se adquirió en polvo y en barra (lingote). En el caso del polvo, venía en un grado de malla bastante pequeño, por lo que así se utilizó. Uno fué un zinc purificado tipo industrial, que se adquirió con un proveedor de tiendas para laboratorio y otro fué un concentrado de zinc obtenido a partir de un mineral de zinc extraído de la mina de El Bote, en Zacatecas, Zacatecas y procesado en la Planta concentradora de zinc y plomo ubicada también en Zacatecas, Zacatecas. En cuanto al zinc en lingote se preparó de dos maneras: una con un grado de partícula de ma lla 400 obtenida con un proceso de corte de materiales

(limado) otra fué una viruta gruesa obtenida por fresado - a la cual después de su obtención se le tuvo que quitar re si du os de aceite, los cuales podían interferir en el proce so de difusión.

Se pueden usar diversos activadores, uno de los más comu nes son las sales de amonio.

En la elaboración del tercer elemento o componente, el pol vo inerte intervienen varios factores dentro del proceso - de obtención, uno contribuye a que el zinc en grado reacti vo o puro no reaccione con la humedad del aire, otra fun ción es la de relleno y constitución o cuerpo de la mezcla lo cual ayuda a que el proceso baje de costo, el último - elemento es el cual ayuda a la mezcla a que el zinc no - llegue a un punto de fusión.

Para la obtención de este elemento, se pensó en un material o producto barato y de fácil procesamiento.

El primer paso para la obtención de éste producto es la mo lienda que a nivel industrial se podría hacer mediante un molino de bolas, como los usados en la industria cementera En nuestro caso se utilizó un proceso de golpeo, para lle var al componente a un tamaño de malla más pequeña, una - vez terminado éste paso mediante la inspección visual, - se procedió al proceso de tamizado, el cual consiste en - hacer pasar el componente por diversos tamices o mallas - que van desde la malla más gruesa hasta la malla que se -

requiera (fina), teniendo en cuenta y cuidado en no forzar el grano a pasar de una manera tosca por la malla, la cual al llegar al último paso se convierte en una malla muy fina.

Así, yendo de la malla 70 hasta la 400, obteniendo un grano muy fino, parecido al talco, obtenemos el polvo.

En éste proceso la finura del grano es muy importante, ya que tenemos que mezclarlo con el zinc en polvo, el cual es bastante fino y de ésta manera poder ocasionar que se haga una mezcla más homogénea dentro de sus componentes; de otra manera el zinc podría causar una perturbación expuesto a la humedad del aire, lo que provocaría una explosión del zinc.

4.2 Preparación para el proceso

Como primer paso en la experimentación, se realizó la limpieza de las piezas o probetas en éste caso; el cual consiste en el desengrase con algún medio desengrasante como el alcohol industrial, ya que es de bajo costo comparado con solventes y gasolinas, en algunos casos en la industria y en términos en que normalmente se utiliza el proceso de Sherardizado en aceros, se usan además de medios desengrasantes, medios desoxidantes, aunque no en soluciones, por la posible presencia de óxidos como consecuencia de la corrosión; el método que se usa es un chorro de arena, el cual consiste en proyectar arena a presión en contra de la pieza a limpiar, procedimiento que también se usa para limpiar las piezas que salen de fundición.

Una vez libre de grasa (como puede ser el contacto con la mano) - tenemos que pensar en la manera de colocación de las probetas dentro de la caja. La resolución que se tuvo fué la de tomar como separación entre ellas, el radio de la probeta, tomando en consideración que es dentro de las probabilidades lo que más podría penetrar el zinc. Además de la separación, debemos de considerar que las piezas no deben de tocar la caja, ya que en algún caso no habría mezcla y esa parte no se recubriría, de igual manera se tomó al menos el radio de las probetas.

Una referencia importante es la de tomar la decisión de considerar de qué material es la caja, otra resolución que se tomó es la de hacer la caja de una manera en la que haya la menor difusión de zinc en ella y el material que debido a su no afinidad química sería el cromo y el níquel combinado con un material que a la temperatura de 400° C no tuviera mucha dilatación en su estructura, éste material sería el acero inoxidable de una designación comercial equivalente a 2XX Cromo-Níquel-Manganeso, no endurecible, austenítico y no magnético; Estos aceros se clasifican como resistentes a la corrosión y al calor.

Dentro del proceso el horno se llevó a una temperatura de 390° C. a 400° C (antes de la temperatura de fusión del zinc):

En el proceso se utilizaron 8 probetas de las cuales se sacaban 2 cada dos horas y se enriquecía la mezcla (reponía el volumen dejado por las dos probetas).

Debido a que en el proceso de galvanizado por difusión existen vapores que se desprenden de la reacción, debemos tener en cuenta - ésto, pues ocasionan una reducción en la mezcla con el paso del tiempo en el horno y da como resultado una disminución en la capa por lo que una vez depositadas la mezcla y las probetas, se deberá prever que la caja este bien cerrada, por ello se procedió a sellarla con una arcilla especial que se utiliza para la fundición, ésta arcilla viene con un aglomerante que le permite adherirse perfectamente a las orillas de la caja, la cual tiene una ceja en su periferia que es la que soporta el peso de la arcilla y ayuda a que esta se mantenga en su sitio.

4.3. Proceso Metalográfico

4.3.1 Montaje y pulido

Las muestras pequeñas deben montarse de alguna manera - para facilitar el pulido intermedio y final, alambres, varillas pequeñas, muestras de hojas metálicas, secciones - delgadas, deben de montarse en un material adecuado o - sujetarse rígidamente en un sujetador mecánico.

Para nuestro experimento se hizo de ésta manera, no por que la muestra fuera pequeña, sino por los problemas que ocasionarían la medición de la capa, ésto significa que - al hacer el esmerilado, pulido, etc., la muestra corre el riesgo de quedar redondeada de los bordes que son los que más nos interesan, en cambio una vez montada, aseguramos de una forma tal que los bordes no quedaran redondeados.

Los materiales plásticos sintéticos que se acoplan a la muestra en una prensa para montar o sujetar especialmente proporcionan las bases para un tamaño uniforme (generalmente de 2.5, 3 ó 4 centímetros), para manipular las muestras en posteriores operaciones de pulido. Estas bases cuando se han hecho en forma adecuada son muy resistentes a la reacción de los reactivos de ataque que se emplean comunmente. La resina termofijadora que más se emplea para montar muestras es la baquelita. Los polvos para moldear baquelita o hacer el montaje se fabrican en colores varios generalmente verde, lo cual simplifica la identificación de las piezas montadas.

La muestra y la cantidad correcta de polvo de baquelita se colocan en el cilindro de la prensa de sujeción. Por medio de una resistencia eléctrica la temperatura aumenta gradualmente hasta 140° C y simultáneamente se aplica una presión de moldeo de unas 4,000 lbs/pulgada, una vez que la baquelita esta adherida y curada cuando se alcanza ésta temperatura, la base, con la muestra puede extraerse del dado de moldeo mientras esta caliente, las muestras pequeñas pueden montarse en forma conveniente para prepararlas metalográficamente en un dispositivo de sujeción hecho en el laboratorio. Las muestras laminares delgadas, cuando se montan en tal dispositivo de sujeción, suelen alternarse con hojas metálicas rellenas de metal que tienen aproximadamente la misma dureza que las muestras. Si se usan hojas rellenas se conservará la superficie libre de las irregularidades de la muestra y se

evitará de alguna manera que los bordes de la muestra se -
redondeen durante el pulido.

Después de montada, la muestra se pule sobre una serie de
hojas de esmeril o lija con abrasivos más finos sucesiva -
mente. El primer papel es generalmente No. 180, 240, 360
400 y finalmente 600.

En todas las operaciones de esmerilado y pulido la muestra
debe de moverse en sentido perpendicular a las rayaduras -
existentes.

Por lo general las operaciones de pulido intermedio se -
hacen en seco; sin embargo en ciertos casos, como el de -
preparación de materiales suaves, se puede usar un abrasi -
vo de carburo de silicio, como es el caso y que comparado
con el papel de esmeril, el carburo de silicio tiene más -
rápidez de remoción y cuando su acabado es a base de resi -
nas, se puede utilizar como un lubricante, el cual impide
el sobrecalentamiento de la mezcla, minimiza el daño cuan -
do los materiales son blandos y también proporciona una -
acción de enjuague para limpiar los productos renovados de
la superficie de la muestra, de modo que el papel no se -
ensucie.

El tiempo utilizado y el éxito del pulido fino dependen en
mucho del cuidado puesto durante los pasos de pulido pre -
vio. La última aproximación a una superficie plana libre
de rayaduras se obtiene mediante una prueba giratoria -

húmeda cubierta con un paño especial cargado con partículas abrasivas cuidadosamente seleccionadas en su tamaño. Existe gran disponibilidad de abrasivos para efectuar el último pulido. En tanto que muchos harán un trabajo satisfactorio, parece haber preferencia por la forma gamma del óxido de aluminio para pulir materiales ferrosos y los basados en cobre.

La selección de un paño para pulir depende del material que vaya a pulirse y el propósito del estudio metalográfico. Se pueden encontrar paños de lanilla o pelillo variable, desde aquellos que no tienen pelillo (como la ceda) hasta aquellos de pelillo intermedio (como paño ancho, paño de billar y lonilla), además de aquellos de pelillo profundo (como el terciopelo). También se pueden encontrar paños sintéticos para pulir en general, los cuales el gamal y el micropaño son los que se utilizan más ampliamente.

Una muestra pulida en forma adecuada mostrará únicamente las inclusiones no metálicas, además estará libre de rayaduras.

4.3.2 Ataque Químico

El propósito del ataque químico es hacer visibles las características estructurales del metal o aleación. El proceso debe ser tal que queden claramente diferenciadas las partes de la microestructura. Esto se logra mediante un reactivo apropiado que somete a la superficie pulida a una acción

química. En las aleaciones compuestas de dos o más -
fases, los componentes se revelan durante la acción química
al atacar preferencialmente el reactivo, a una o más de -
éstos constituyentes debido a la diferencia de composición
de las fases. En las aleaciones uniformes de una sola -
fase o metales puros, se obtiene contraste en las fronteras
de grano se hacen visibles debido a las diferencias en la -
rapidez a que los diversos granos son atacados por el reac-
tivo. Esta diferencia en la rapidez de ataque esta asocia-
da principalmente con el ángulo que guardan las diferentes
secciones de grano con el plano de la superficie pulida.

Debido al ataque químico por el reactivo de ataque, las -
fronteras de grano aparecerán como valles en la superficie
pulida.

Al chocar con la orilla de éstos valles, la luz del micros-
cópico se reflejará fuera del microscópio, haciendo que las
fronteras de grano aparezcan como líneas oscuras. La -
selección del reactivo de ataque esta determinada por el me-
tal o aleación y la estructura específica que se desea ver.

Dentro de éste contexto nuestro ataque químico no necesita
ba ser tan severo, ya que el objetivo primordial es el de -
analizar la capa de zinc con el simple hecho de delinear -
nuestra capa, es más que suficiente como ataque químico, -
aunque en su selección teníamos que escoger un ataque que -
no hiciera efecto en el zinc, pero sí en el cobre.

Así tenemos el hidróxido de amonio diluido en agua que se - uso durante un tiempo de 3 minutos, luego se puso en agua, luego alcohol, luego agua otra vez.

4.4 Mediciones

4.4.1 Medición de dureza y capa

Es difícil definir la propiedad de dureza, excepto en relación con la prueba empleada en particular para determinar - su valor.

La dureza no es una propiedad fundamental de un material, - sino que está relacionada con las propiedades elásticas y - plásticas.

El valor de dureza obtenido en una prueba determinada sirve sólo como comparación entre materiales o tratamientos. El procedimiento de prueba y la preparación de la muestra sue len ser sencillos y los resultados pueden utilizarse para - estimar otras propiedades mecánicas. La prueba de dureza se utiliza ampliamente para inspección y control. El tra tamiento térmico o el trabajo efectuado en una pieza metáli ca resulta generalmente en un cambio de dureza. Cuando se establece el valor resultante de la dureza de un tratamien to térmico a un material dado por un proceso determinado - esa estimación proporcionará un método rápido y sencillo - (de inspección y control) para el material y el proceso en particular.

Las diversas pruebas de dureza se pueden dividir en tres -
categorías:

- Dureza elástica
- Resistencia al corte o abrasión
- Resistencia a la indentación

Dureza elástica

Se mide mediante un escleroscopio que es un dispositivo -
para medir la altura de rebote de un pequeño martillo con
emboquillado de diamante, después de que cae por su propio
peso desde una altura definida sobre la superficie de la -
pieza a prueba.

Resistencia al corte o abrasión

Prueba de rayadura: Ideada por Friedrich Mohs

Consta de diez minerales estándar arreglados siguiendo un
orden de incremento de dureza.

Resistencia a la indentación

Esta prueba es generalmente realizada imprimiendo en la -
muestra, la cual está en reposo sobre una plataforma rígida,
un marcador o indentador de geometría determinada, bajo
una carga estática conocida que se aplica directamente o -
por medio de un sistema de palanca. Dependiendo del sis-
tema de prueba, la dureza se expresa por un número inversa-
mente proporcional a la profundidad de la indentación para
una carga y marcador especificados o proporcional a una -
carga media.

Los métodos comunes son: Prueba o ensayo de dureza -
 Brinell, Prueba o ensayo de dureza Rockwell, Prueba o ensa-
 yo de dureza Vickers.

Prueba o ensayo de dureza Vickers

En esta prueba el instrumento utiliza un marcador piramidal de diamante de base cuadrada con un ángulo incluido de 136° entre las caras opuestas. El intervalo de carga esta gene-
 ralmente entre 1 y 120 kilogramos.

El probador de dureza Vickers funciona bajo el mismo princi-
 pio que el de dureza Brinell y los números se expresan en -
 términos de carga y área de la impresión. Como resultado
 de la forma del marcador, la impresión sobre la superficie
 de la muestra será un cuadrado. La longitud de la diago-
 nal del cuadrado es medida por medio de un microscopio -
 equipado con un micrómetro ocular que contiene fillos móvi-
 les. La distancia entre los fillos se indica en un conta-
 dor calibrado en milésimas de milímetros. Por lo general
 hay tablas para convertir la diagonal medida al número de
 dureza piramidal Vickers o por medio de la fórmula:

$$HV = \frac{1.054 L}{d^2}$$

L: Carga aplicada en kilogramos

D: Longitud de la diagonal del cuadrado de la impresión,
 en mm.

Prueba o ensayo de microdureza

Desafortunadamente éste término puede ser engañoso ya que - podría referirse a la prueba de pequeños valores de dureza cuando en realidad significa el uso de impresiones pequeñas. Las cargas de prueba están entre 1 y 1,000 gramos. Hay - dos tipos de marcadores empleados para la prueba de microdureza: la pirámide de diamante Vickers de base cuadrada de - 136° y el marcador Knoop de diamante alargado.

El marcador Knoop tiene la forma piramidal que produce una impresión en forma de diamante y tiene diagonales largas y cortas a una razón aproximada de 7:1. La forma piramidal empleada tiene incluidos ángulos longitudinales $172^\circ 30'$ y ángulos transversales de 130° . La profundidad de impresión es de $1/30$ de su longitud. Como en la dureza Vickers la diagonal más larga de la impresión es medida ópticamente en el ocular de un micrómetro de rosca.

El número de dureza Knoop es el resultado de dividir la carga entre el área de la impresión. Por lo general se utilizan tablas para convertir la longitud de la diagonal medida al número de dureza Knoop o mediante la fórmula siguiente:

$$HK = \frac{14.229L}{d^2}$$

L: Carga aplicada en Kg.

d: Longitud de la diagonal mayor, en mm.

4.4.2 Microanálisis

El microanálisis de las piezas recubiertas con zinc por difusión, consiste en saber la composición química de la probeta a partir del extremo de ella hacia el interior, cada cierta distancia. Esta medición se realiza en un aparato determinado llamado microsonda, la cual se encontró en el Instituto de Investigaciones Eléctricas, en la Ciudad de Cuernavaca, Morelos.

Esta microsonda consta de tres secciones de análisis comandadas por una computadora.

Microscopía electrónica

Con capacidad de observación de hasta 180,000 aumentos de cualquier sólido.

Dispersivo de energía

Proporciona un análisis cualitativo instantáneo con capacidad de hasta 26 elementos, indicando resultados en una pantalla de t.v., a colores.

Dispersivo de onda:

Proporciona un análisis cuantitativo con capacidad de analizar desde el boro hasta el uranio por medio de rayos "x", indicando resultados en un graficador o en una impresora.

Las piezas a medir debían cumplir ciertos requisitos para poder ser introducidas al microscopio electrónico, posteriormente son observadas.

En los requisitos, como primer paso debían tener cierto diámetro no mayor a una pulgada para poder ser montados en el dispositivo sujetador. Como segundo paso deberían tener un proceso metalográfico desde el lijado hasta el ataque, como tercer término debían de tener una capa de metal que fuese un buen conductor eléctrico, de esa manera se le puso una capa muy delgada de una pintura de plata por medio de un evaporador. Cubiertos éstos requisitos de las piezas, el procedimiento general que se siguió fué el siguiente:

La pieza se sujetaba en un dispositivo apropiado para ello, y mediante una varilla éste dispositivo se introducía al microscopio para después hacer un vacío en el interior de éste. De esta manera la probeta queda lista para su observación por medio de un monitor de televisión. Después de ésta se escogió la mejor zona apreciable en el televisor, teniendo la zona adecuada se la hacía un análisis cualitativo desde el exterior de la probeta hasta finalizar la interfase apreciable, de esta manera se veía una distribución del zinc presente en una manera rápida y se establecía la distancia del recuadro en donde se hacía el análisis cuantitativo, registrando los resultados del análisis en una impresora conectada a la computadora.

Esta computadora trabaja en proyectos asociados al área de combustión y corrosión en Plantas Termoeléctricas, junto con sus demás partes.

CAPITULO V

"Resultados"

TABLA DE ENTRADA

Probeta	Zinc empleado	Tiempo hrs.	Temperatura	T i p o
1	Zinc purificado <u>indus</u> <u>trial</u>	2	410	Mezcla 1.
3	Zinc purificado <u>indus</u> <u>trial</u>	4	410	Mezcla 1.
5	Zinc purificado <u>indus</u> <u>trial</u>	6	410	Mezcla 1.
7	Zinc purificado <u>indus</u> <u>trial</u>	8	410	Mezcla 1.
9	Zinc (lingote) <u>limadu</u> <u>ra de zinc</u>	2	410	Mezcla 1.
11	Zinc (lingote) <u>limadu</u> <u>ra de zinc</u>	4	410	Mezcla 1.
13	Zinc (lingote) <u>limadu</u> <u>ra de zinc</u>	6	410	Mezcla 1.
D	Zinc (lingote) rebaba de zinc	2	410	Mezcla 1.
H	Zinc (lingote) rebaba de zinc	4	410	Mezcla 1.
B	Zinc (lingote) rebaba de zinc	6	410	Mezcla 1.
G	Zinc (lingote) rebaba de zinc	8	410	Mezcla 1.
Bo	Zinc (lingote) rebaba de zinc	6	390	Mezcla 2.

Probeta	zinc empleado	tiempo hrs.	temperatura	t i p o
L	Zinc (lingote) rebaba de zinc	6	390	Mezcla 2
B ₁	Zinc purificado indus trial	10	390	Mezcla 3
B ₃	Zinc purificado indus trial	10	390	Mezcla 1
M	Zinc purificado indus trial usado	10	390	Mezcla 1
B ₉	Zinc purificado indus trial usado	10	390	Mezcla 1
0	Concentrado de Zinc - de Zacatecas	10	390	Mezcla 3
B ₇	Concentrado de Zinc - de Zacatecas	10	390	Mezcla 3

NOTA: MEZCLA 1

Aproximadamente mitad de polvo de zinc, menos del 50% de polvo inerte y el resto activador

MEZCLA 2

Un porcentaje mayor a la mitad de polvo de zinc, de polvo inerte - alrededor de 20% y de activador alrededor de 5%

MEZCLA 3

Aproximadamente 50% de polvo de zinc, alrededor de 40% de polvo inerte y 5% de activador

5.1 Medición de espesores de la capa del recubrimiento

Acotaciones en micras

Probeta	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{x}
1	20.0	20.0	19.5	19.5	18.0	22.0	18.0	20.0	19.2
1	18.9	17.7	20.5	18.4	20.0	17.2	16.4	21.0	18.4
3	25.5	25.6	23.0	33.5	24.5	28.0	27.8	25.0	26.6
3	32.3	31.8	31.5	26.0	25.0	25.0	28.5	29.9	28.7
5	35.6	35.0	40.0	40.0	45.0	40.0	37.0	40.0	39.0
5	41.2	42.0	41.2	38.5	41.9	40.0	38.0	40.0	40.3
7	52.7	49.6	46.2	49.5	51.5	54.0	49.4	49.1	50.2
7	52.0	53.5	49.0	52.5	50.0	58.0	56.0	49.0	52.5
9	12.5	09.0	14.0	9.0	16.0	15.0	11.0	11.0	12.1
9	06.2	06.3	05.6	06.0	06.0	05.0	06.2	03.2	05.5
11	08.5	13.0	03.5	08.0	12.2	06.5	06.0	09.0	08.3
11	16.0	17.5	15.8	14.0	13.4	06.0	12.8	17.8	14.1
13	13.9	10.9	17.0	08.3	08.4	14.2	13.6	11.7	12.1
D	No se obtuvo capa								
H	No se obtuvo capa								
B	No se obtuvo capa								
G	No se obtuvo capa								
Bo	No se obtuvo capa								
L	No se obtuvo capa								
B ₁	32.0	40.0	28.0	40.0	30.0	25.0	20.0	40.0	31.8
B ₃	34.0	29.0	31.5	36.0	30.0	33.0	34.0	26.0	21.6
B ₉	32.0	41.0	36.5	40.5	45.5	50.0	55.5	48.0	43.6
M	23.0	28.0	20.0	13.0	27.0	30.0	30.0	26.0	24.6
O	No se obtuvo capa								
B ₇	No se obtuvo capa								

5.2 Medición de microdureza de la capa a cierta distancia

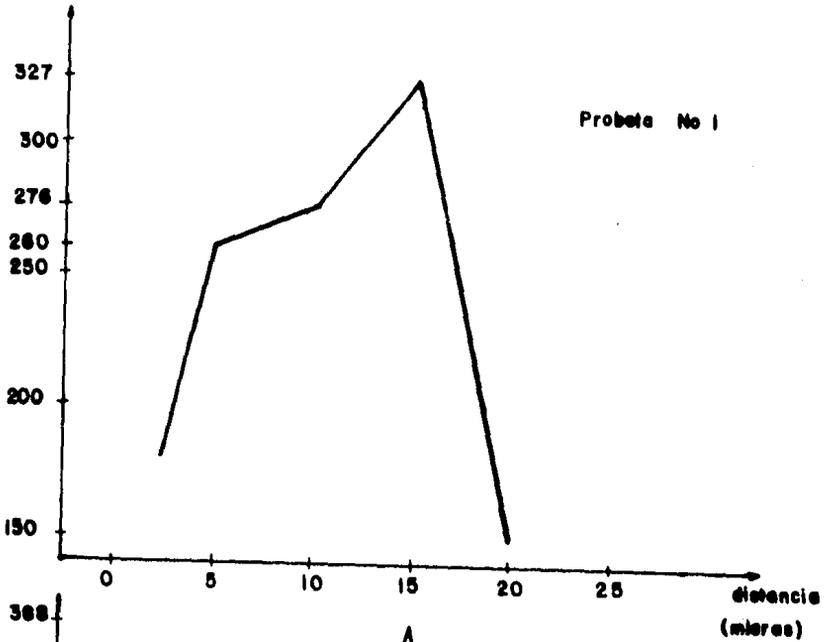
Probeta	Distancia micras	Dureza Vickers				\bar{X}
		1	2	3	4	
1	5	322	132	278	308	260
	10	290	278	193	344	276.2
	15	435	290	308	278	327.7
	20	124	124	178	178	151
3	5	302	407	349	321	344.7
	10	232	286	321	286	281.2
	15	441	466	286	362	388.7
	20	286	118	232	210	211.5
	25	232	232	148	148	190
5	5	232	362	232	271	274.2
	10	386	362	473	441	415.5
	15	412	549	441	423	456.2
	20	473	321	321	362	369.2
	25	232	321	473	271	324.2
	30	321	232	286	232	267.7
	35	127	148	127	137	137.2
	40	257	161	232	232	320.5
7	5	325	321	362	232	310
	10	210	175	192	175	188
	15	412	549	549	549	514.7
	20	766	644	644	644	674.5
	25	766	644	644	766	705
	30	644	644	644	549	620.2
	35	549	549	644	473	553.7

	40	473	412	509	509	473.7
	45	146	169	180	157	163
	50	148	161	161	137	151.7
	55	127	148	161	127	140.7
9	5	142	230	165	165	175.5
11	5	549	473	473	549	511
13	5	766	473	412	412	515.7
B ₁	5	362	321	286	286	313.7
	10	412	321	362	362	364.2
	15	412	386	362	473	408.2
	20	362	286	286	412	336.5
B ₃	5	169	329	396	232	281.5
	10	277	435	396	246	338.5
	15	501	371	566	401	456.7
	20	423	549	435	232	409.7
M	5	192	210	232	210	211
	10	232	232	232	210	226.5
	15	192	192	232	232	212
	20	140	161	148	139	147
	25	201	292	183	232	212
H	25	93.4	87.2	88.3	105	93.4
	30	114	110	118	118	115
D	20	157	110	133	110	127.5
	25	140	124	85.1	110	114.7
	30	97.7	118	166	157	134.6
G	20	102	100	117	96.5	103.8
	25	132	137	103	90.5	115.6

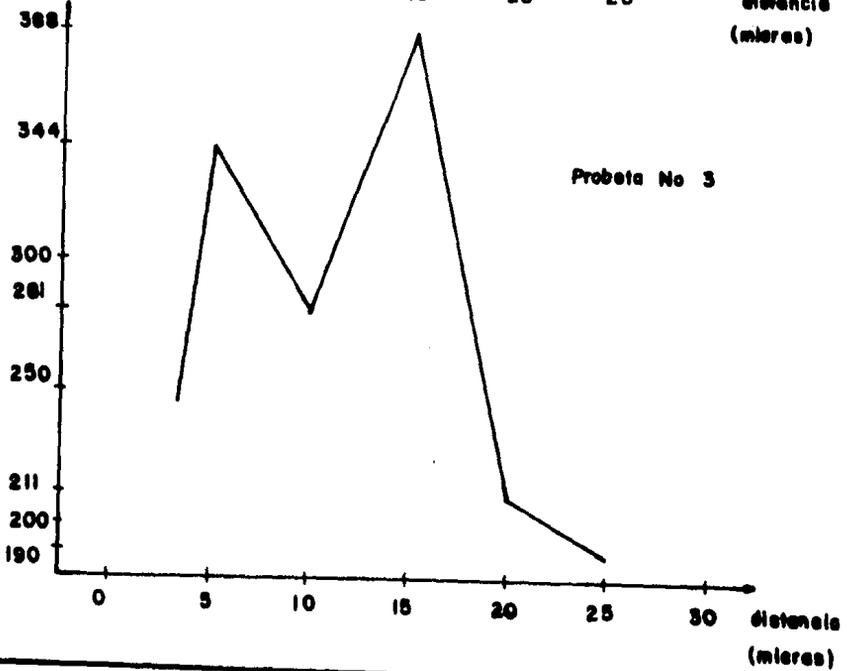
B	20	90.5	96.5	103	107	99.5
	25	127	90.5	75.7	110	100.8
B₉	5	412	362	321	362	364.2
	10	362	412	192	286	313
	15	232	286	321	286	281.2
	20	331	340	321	321	325.7
	25	412	473	473	412	442.5
	30	412	316	473	412	403.2
	35	257	286	286	321	287.5

5.4 Gráficas

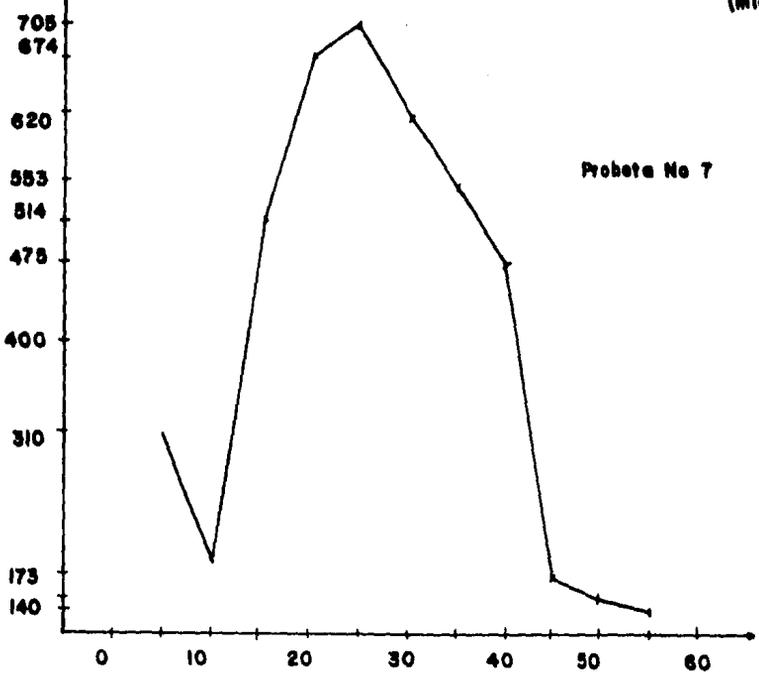
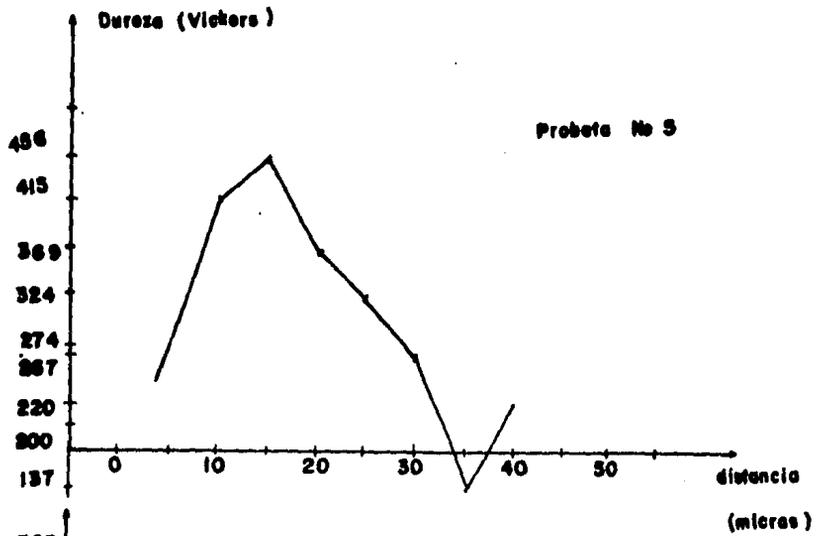
Dureza (Vickers)

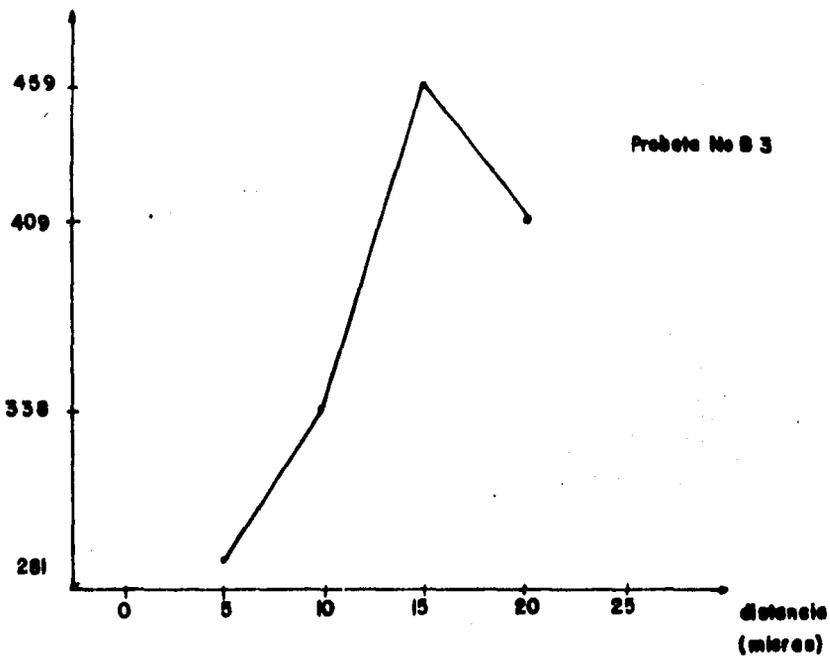
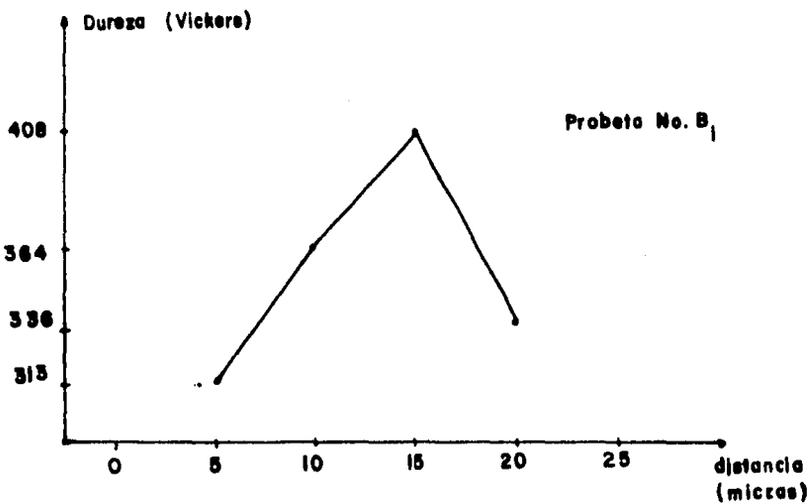


Probeta No 1



Probeta No 3





5.3 Medición de la composición química a partir del extremo hacia el -
centro

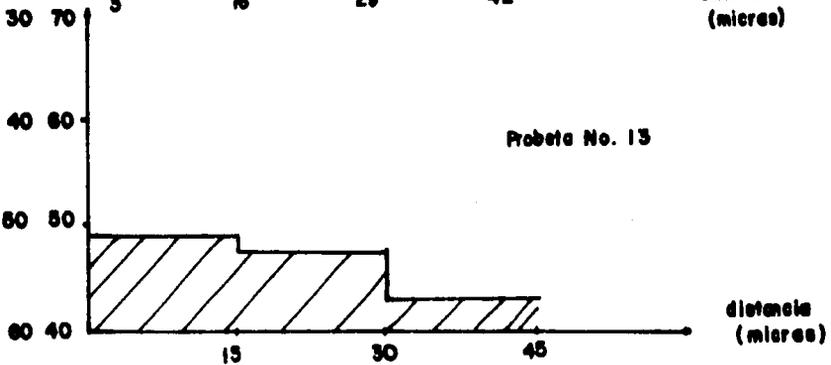
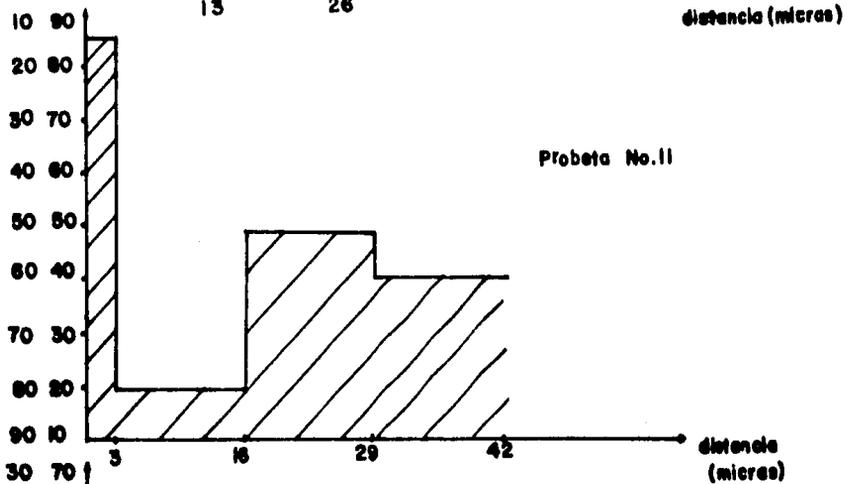
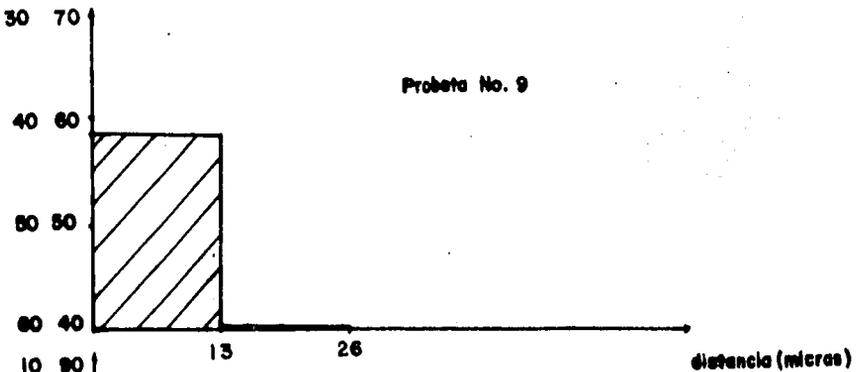
Probeta	Elemento	Micras		
		Distancia (micras)	Porcentaje en peso	porcentaje atómico
1	Cu	15	44.31	45.01
	Zn		55.69	54.99
(15)	Cu	30	59.48	60.17
	Zn		40.52	39.83
3	Cu	10	37.30	37.97
	Zn		62.70	62.03
	Cu	20	42.06	42.76
	Zn		57.94	57.24
	Cu	30	38.94	39.62
	Zn		61.06	60.38
(10)	Cu	40	57.57	58.26
	Zn		42.43	41.74
5	Cu	13	53.89	54.59
	Zn		46.11	45.41
	Cu	26	50.28	50.99
	Zn		49.72	49.01
	Cu	39	40.61	41.30
	Zn		59.39	58.70
(13)	Cu	52	59.67	59.36
	Zn		41.33	40.64
7	Cu	10	32.54	33.17
	Zn		67.46	66.83
	Cu	20	40.66	41.34

	Zn		59.34	58.66
	Cu	30	39.24	39.92
	Zn		60.76	60.08
	Cu	40	37.71	38.38
	Zn		62.29	61.62
	Cu	50	40.96	41.65
	Zn		59.04	58.35
(10)	Cu	60	55.18	55.88
	Zn		44.82	44.12
9	Cu	13	41.36	42.05
	Zn		58.64	57.95
(13)	Cu	26	59.61	60.29
	Zn		40.39	39.71
11	Cu	03	14.43	14.79
	Zn		85.57	85.21
	Cu	16	80.46	80.90
	Zn		19.54	19.10
	Cu	29	50.96	51.67
	Zn		49.04	48.33
(13)	Cu	42	59.58	60.26
	Zn		40.42	39.74
13	Cu	15	51.06	51.77
	Zn		48.94	48.23
	Cu	30	52.49	53.20
	Zn		47.51	46.80
(15)	Cu	45	59.65	60.33
	Zn		40.35	39.67
B ₁	Cu	10	40.91	41.60

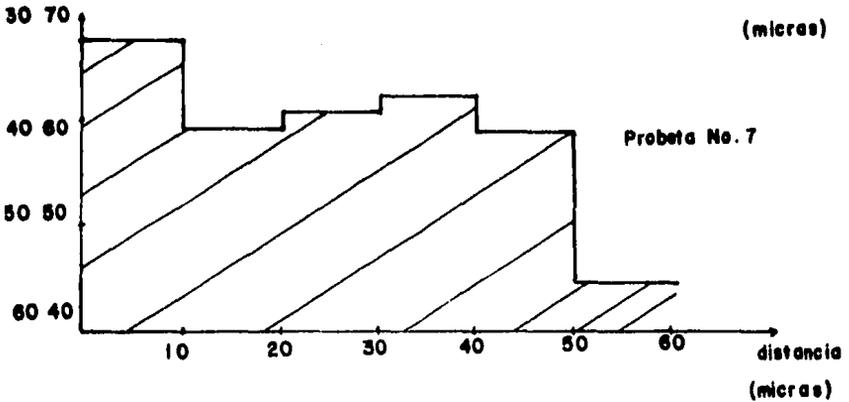
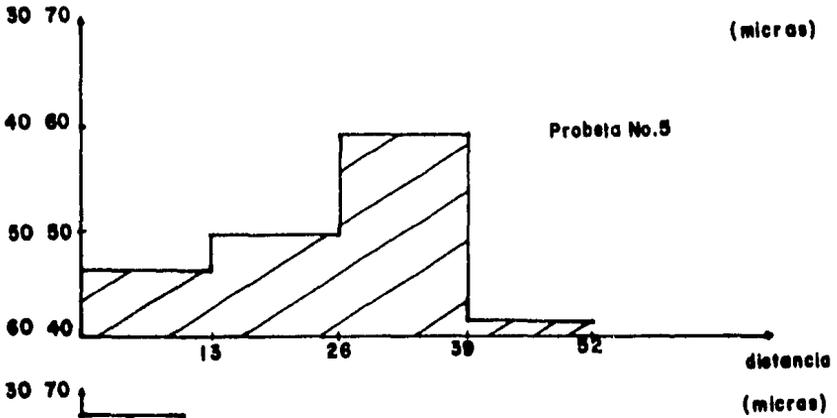
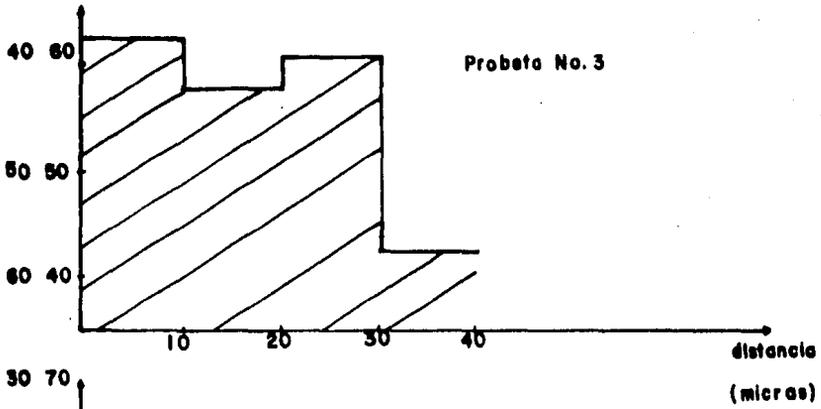
	Zn		59.09	58.40
	Cu	20	51.35	50.64
	Cu	30	43.83	44.53
	Zn		56.17	55.43
	Cu	40	47.01	48.17
	Zn		50.88	50.67
	Sn		2.12	1.16
(10)	Cu	40	85.69	86.70
	Zn		12.54	12.34
	Sn		1.77	0.96
B ₃	Cu	10	40.33	41.02
	Zn		59.67	58.98
	Cu	20	41.01	41.70
	Zn		58.99	58.30
	Cu	30	65.83	66.46
	Zn		34.17	33.54
(10)	Cu	40	86.97	87.21
	Zn		13.03	12.72

5.4 Gráficas

Cu Zn%



Cu Zn %



5.5 Calculos

Para calcular los valores constantes, que posteriormente sirven para controlar el proceso y que son D_0 y Q (coeficiente de difusión estable y energía de activación por difusión respectivamente) de las ecuaciones de las leyes de Pick se tiene:

$$\frac{C_s - C(x,t)}{C_s - C_0} = \text{F error} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (1) \qquad D = D_0 \exp \left(\frac{-Q}{RT} \right) \quad (2)$$

Tomando los valores de la probeta número 7, en la que se uso el zinc tipo - purificado con la que se logro un mayor espesor. Se tienen los siguientes datos

$$\begin{aligned} C_s &= 100 \% \\ C_0 &= 35 \% \\ t &= 8 \text{ hrs} = 28,800 \text{ seg} \\ x &= 10 = 10 \times 10^{-3} \text{ cm} \\ C(x,t) &= 67.46 \% \end{aligned}$$

Sustituyendo en la ecuación número 1, se tiene:

$$\text{F error} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) = .5006154$$

teniendo este valor, se puede entrar a las tablas de la función error, e interpretando obtener el dato de:

$$\frac{x}{2\sqrt{Dt}} = .4776$$

y sustituyendo los valores restantes se tiene que:

$$D_1 = 3.8050194 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{seg} - a$$

Tomando los valores de x diferentes y con diferente temperatura, se tiene - que siguiendo el mismo procedimiento con los datos siguientes se obtiene:

$$C_s = 100 \%$$

$$C_o = 35 \%$$

$$t = 8 \text{ hrs} = 28800 \text{ seg}$$

$$x = 20 = 20 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

$$C(x,t) = 59.34 \%$$

$$D_2 = 8.7962364 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{seg} - b$$

teniendo estos dos valores de D se tienen dos ecuaciones con dos incógnitas de la forma de la ecuación No. 2

$$D_1 = D_o \exp\left(\frac{-Q}{RT_1}\right)$$

y

$$D_2 = D_o \exp\left(\frac{-Q}{RT_2}\right)$$

con

$$R = 8.314 \text{ KJ/Kgmol K}$$

$$T_1 = 390^\circ \text{ C} = 663 \text{ K}$$

$$T_2 = 410^\circ \text{ C} = 683 \text{ K}$$

se obtuvo que:

$$D_o = 1.7425 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{seg}$$

$$Q = 21079.677 \text{ KJ/Kgmol}$$

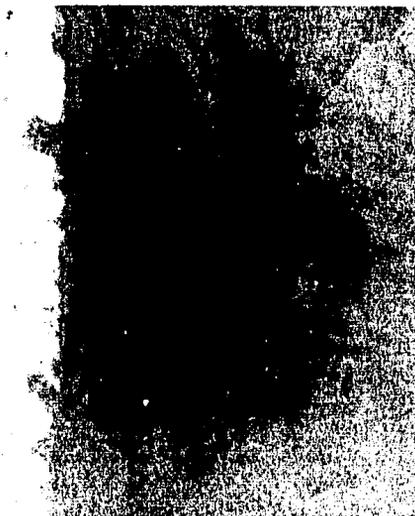
Teniendo estos valores válidos únicamente para el polvo de zinc purificado y sobre un recubrimiento de latón, solamente se podrá controlar el proceso, esto es, se podrá determinar tiempo y temperatura para obtener un $C(x,t)$ buscado, en el cual se tienen las propiedades adecuadas que se requieran, ya sea resistencia al desgaste, protección contra corrosión, etc.



Probeta L₁ 2 horas 16X/0.30



Probeta L₃ 4 horas 32X/0.50



Probeta L5 6 horas 80X/0.75



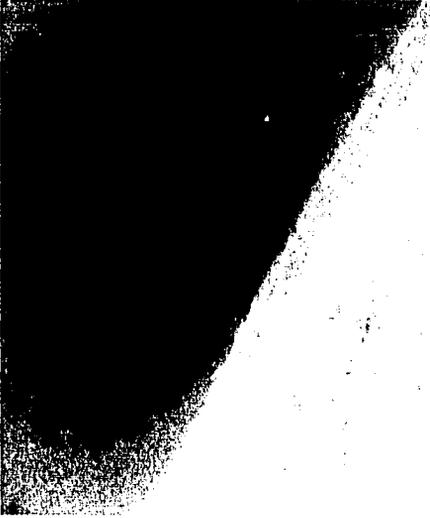
Probeta L7 8 horas 80X/0.75



Probeta L₉ Limadura de Zinc a 2 horas 80X/0.75



Probeta L₁₁ Limadura de zinc a 4 horas 80X/0.75



Probeta L₁₃ Limadura de Zinc a 6 horas 80X/0.75



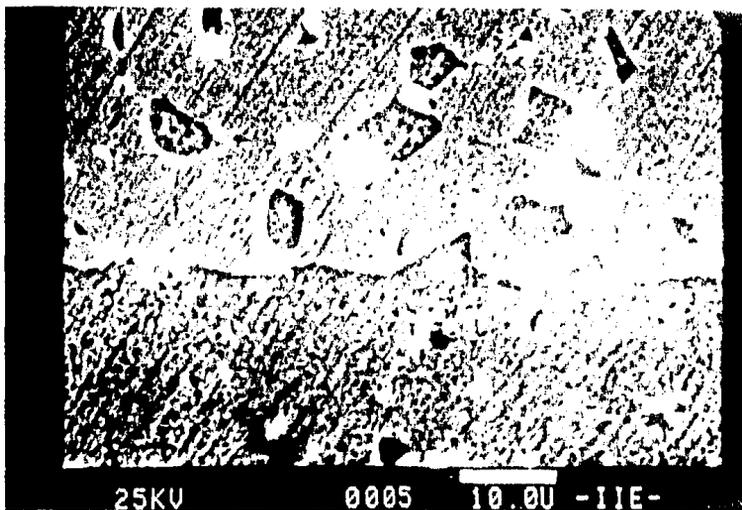
Probeta B₁ Zinc purificado industrial 10 hrs 80X/0.75



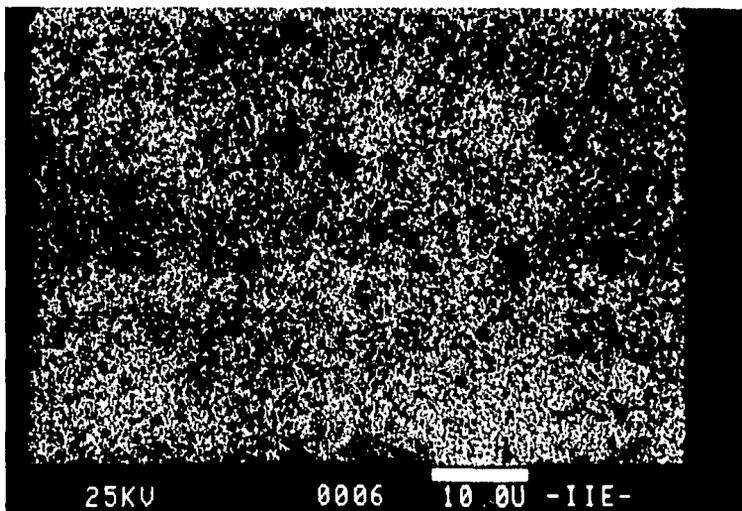
Probeta O Concentrado de Zinc (Zacatecas) a 10 hrs. 80X/0.75



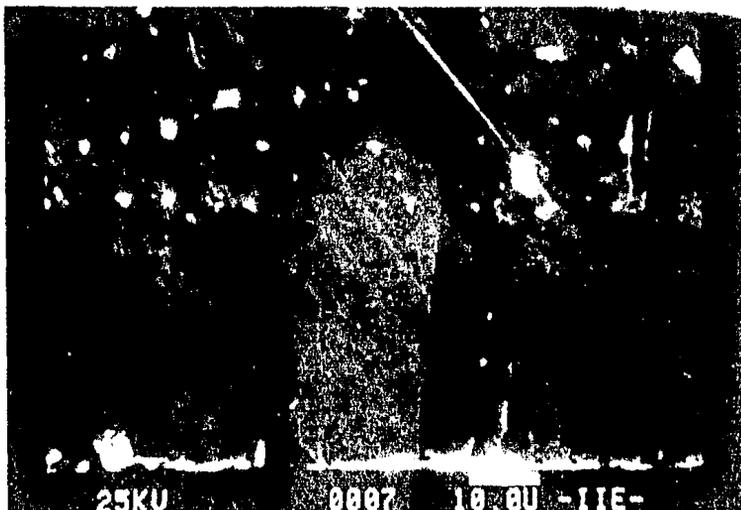
Probeta M Zinc purificado industrial Reusado a 10 hrs. 80X/0.75



Probeta 13



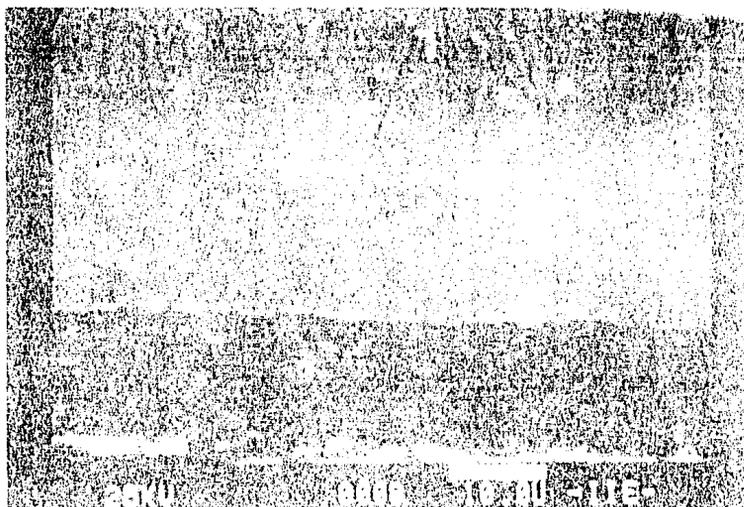
Mapeo de la Probeta 13



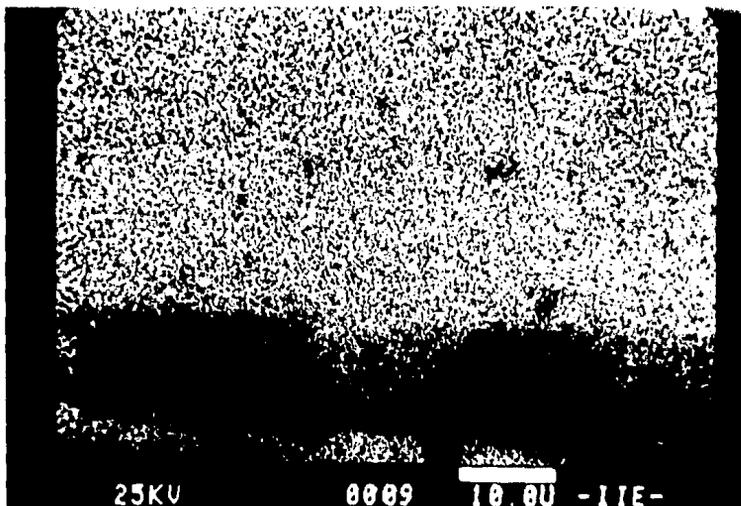
Probeta 5



Probeta 3



Probeta 11



Mapeo de la Probeta 11

BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION A LA METALURGIA FISICA,

Sydney H. Avner,

Editorial Mc. Grav Hill,

2a. Edición,

1983

TRANSFERENCIA CALOR

J. P. Holman

Editorial CECSA,

5a. Impresión,

Junio de 1982

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

1. En las mediciones realizadas de espesor y dureza, las piezas que se sometieron a mayor tiempo de tratamiento obtuvieron un espesor de ca pa mayor, teniendo una mayor uniformidad en las probetas de latón, - ya que las probetas de bronce tenían un acabado superficial un tanto rugoso.
2. En general las probetas de latón resultaron con un mayor espesor - que las probetas de bronce. Sin embargo en alguna zonas de las pro betas de bronce, la capa fué mayor aunque muy discontinua (el espe sor de capa medida, oscila entre 15 micras a 60 micras). Esta va - riación superficial se supone, asociada a la preparación superficial
3. En las mediciones de dureza, se obtuvo un valor máximo en forma gene ral, en la mitad de la capa de recubrimiento, y, relacionando ésto - con los resultados de la microsonda, en la cuál en las probetas de 4 y 8 horas el mayor contenido de zinc estuvo en el extremo y en la de 6 horas se obtuvo en el centro. Esto es debido a que la zona exter na pertenece a la fase γ y principalmente, que es una solución sóli da de menor dureza. La zona interna parece pertenecer a la fase β solución sólida cuya estructura cristalina es cúbica a cuerpo centra do que se caracteriza por ser dura y frágil.

4. En lo referente a las sustancias aportadoras del zinc en donde se usaron básicamente 4 tipos de polvos (zinc purificado, zinc de barra en forma de rebaba, zinc en barra y de forma de limadura y concentrado de zinc), se vió que es condición importante el tamaño de partículas del polvo para que haya capa, por lo tanto, sólo se obtuvieron capas en los polvos de zinc purificado y zinc en barra de forma de limadura, los cuales pasaban por un tamiz de 200 micras.

5. En lo referente a la economía del proceso una condición importante fué el costo de éstas sustancias, ya que la diferencia entre los 2 polvos, el purificado y la limadura, con sus costos por kilogramo era de: \$ 6,000.00, el purificado y \$ 300.00 el lingote. En cuanto al polvo sacado del lingote se tendría que cargar el costo del proceso de hacer al lingote una forma de limadura, lo cual elevaría su costo total por kilogramo. En cuanto al zinc purificado se usaría tal como se compro. Este costo de \$ 6,000.00 podría bajarse al mejorarse en una forma industrial, así el precio de \$ 500.00 por kilogramo obtenido, como información de proveedores de Casas de Laboratorio, se tendría que considerar.

6. Una de las formas de como mejorar el proceso, sería meter las piezas en unos depósitos giratorios para que la mezcla se mantuviera homogénea. En nuestro caso por ser estático, la caja se abría y se agitaba manualmente para volver a cerrar e introducir de nuevo al horno.

7. Para mejorar el proceso es necesario que se selle la caja para no dejar escapar los gases que se forman, y que con los cuales se podría escapar la concentración inicial de polvo de zinc.

8. La mayor dureza fué de 705 puntos Vickers, aproximadamente en el centro del espesor de la capa, lo que nos hace pensar que el proceso - sirve para protección a piezas sometidas al desgaste. Probeta de - latón a 8 horas.
9. Un factor muy importante también, es la protección, en nuestro proceso las precauciones que se deben de tener son:
- No exponer el zinc en polvo en grado puro industrial al aire - húmedo, por lo que el proceso en climas húmedos puede ser peligiroso.
 - Tener cuidado al abrir el envase, donde se este llevando a cabo la difusión, ya que el proceso produce gases que pueden ser - nocivos a la salud. Protegerse con mascarillas.
10. Cumpliendo con uno de los objetivos de la tésis: abocar el proceso - a producir una capa protectora contra el desgaste, basándonos en los resultados, la dureza aumento aunque no es una propiedad que necesariamente nos indique si un material resiste al desgaste, pero si - nos ayuda a tener una panorámica, de que puede resistir al desgaste, ya que en ciertos casos está en función de la dureza.
11. Por lo tanto los siguientes pasos a seguir en éste trabajo son:
- Determinar de que manera la dureza en la capa, que se obtuvo al centro, se pueda obtener en la periferia de ésta, ya sea, disminuyendo el activador o bajando más la temperatura.
 - Haciendo ensayos adicionales con un concentrado de zinc, donde la mezcla lleve otro tipo de componentes, ya sea poco activador menos polvo inerte, etc.
 - Hacer pruebas de desgaste para asegurar que las piezas lo soporte.

La manera en que se sugiere hacerlo (ya que no existe una forma estándar), es la de producir una máquina en la cual se tengan controladas las variables que intervienen en el desgaste. - Además los materiales se deben de probar con lubricante y sin lubricante, plásticos, etc.

Una vez obtenidas estas pruebas, y con las que se dan en este trabajo, se puede proceder a libros como el Metals Hand Book, para comparar las propiedades obtenidas en el recubrimiento, y así poder sustituir materiales caros, o a veces de importación por materiales baratos con un recubrimiento. Posteriormente se puede hacer un análisis de mercado y costos para ver la factibilidad del proceso.

12. Como conclusión final, y teniendo en cuenta todos los resultados, podemos decir que el proceso sirve, principalmente para piezas con poca tolerancia dimensional y de formas complicadas, además de que el proceso ya implantándolo en la industria es barato, tomando en cuenta que en México hay mucho zinc.