

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA



LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE MATERIALES

LECTURAS DE INGENIERÍA I

ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL DEL ACERO



M. en I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.

CUAUTITLÁN IZCALLI 2007

ÍNDICE

Pág.

INTRODUCCIÓN	1
1. ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL DEL ACERO	2
2. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES	3
2.1. TEMPLE POR LLAMA	3
2.2 ENDURECIMIENTO POR INDUCCIÓN	7
2.3 TEMPLE POR CALENTAMIENTO DEL METAL EN ELECTROLITO ...	11
3. DIFUSIÓN	12
3.1. LEYES DE FICK	13
3.1.1. Primera Ley de Fick (velocidad de difusión)	14
3.1.2. Segunda Ley de Fick (Perfil de Composición)	18
4. TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS	20
4.1. CEMENTACIÓN	20
4.1.1. Cementación con materiales sólidos	23
4.1.2. Cementación en baño líquido	28
4.1.3. Cementación con gases	29
4.2. NITRURACIÓN	32
4.2.1. Nitruración en gases	34
4.2.2. Nitruración en baños de sales (cianurado)	34
4.2.3. Carbo-nitruración gaseosa	37
4.2.4. Nitruración iónica	38
4.5. BORACIÓN O BORURADO	41
4.6. SULFINIZACIÓN	42
4.9. SILICACIÓN	44
4.8. CROMIZADO	44
4.10. ACERO UTILIZADOS PARA TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS	45
4.10.1. Aceros simples para cementar	45
4.10.2. Aceros aleados para cementar	45
4.10.3. Aceros para nitrurar	46
4.11. RECUBRIMIENTOS METALICOS	46
BIBLIOGRAFÍA	48

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la Ciencia y Tecnología actuales implican la generación y aplicación del conocimiento en muchas áreas y consecuentemente el estudiante de Ingeniería debe estar al tanto de los mismos, sin embargo, debido a la actualización poco frecuente de los programas y planes de estudio y por las limitaciones propias de semestres de apenas cuatro meses de actividades académicas, es difícil la actualización del estudiante en dichos conocimientos, además, dejar trabajos de investigación no funciona de la manera deseada, ya que en muchas ocasiones se descargan de Internet y se imprimen sin siquiera leerlos, de ese modo, surge la idea de crear una serie de apuntes de temas básicos para el ingeniero actual como son: el endurecimiento superficial del acero, las fundiciones de hierro, la tribología y el desgaste, la superplasticidad, los avances en la industria siderúrgica, superaleaciones, etc.

En esta primer entrega se estudia precisamente el endurecimiento superficial del acero, ya sea sin modificar su composición química o modificando la misma con diversos elementos como el carbono, nitrógeno, boro, etc, detallándose los procesos necesarios y los tratamientos térmicos finales para obtener propiedades óptimas, esperando que sea de utilidad e interés para los alumnos y personas interesadas en el tema.

Como siempre cualquier comentario o corrección será bienvenido.

ATTE.

Mtro. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.

1. ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL DEL ACERO

Las actuales exigencias tecnológicas ponen de manifiesto la necesidad de disponer de materiales metálicos con elevadas prestaciones bajo condiciones de servicio críticas, así por ejemplo, las matrices metálicas empleadas en los procesos metalúrgicos del trabajado en frío y en caliente de los metales, necesitan de una alta tenacidad y elevada dureza superficial, especialmente a alta temperatura.

Generalmente los tratamientos térmicos superficiales tienen por objeto el endurecimiento de la superficie de los metales y, por consiguiente, el aumento de la resistencia al desgaste, conservando la ductilidad y tenacidad del núcleo.

El endurecimiento superficial del acero se puede conseguir, fundamentalmente, mediante dos procedimientos: modificando la composición química de la superficie mediante la difusión de algún elemento químico (carbono, nitrógeno, azufre, etc.) en cuyo caso se le conoce como tratamiento termoquímico o modificando sólo la microestructura de la superficie por tratamiento térmico, conociéndose entonces como tratamiento superficial.

Los tratamientos termoquímicos aplicados al acero son aquellos en los cuales la composición de la superficie de la pieza se altera por la adición de carbono, nitrógeno u otros elementos. Los tratamientos más comunes son: carburización, nitruración, carbonitruración y boración. Estos procesos se aplican comúnmente a piezas de acero de bajo carbono para lograr una capa exterior dura, resistente al desgaste reteniendo un núcleo tenaz y dúctil. El término *endurecimiento de capa superficial (case hardening)* se usa frecuentemente para este tratamiento.

2. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Una razón principal para endurecer el acero es retardar el desgaste en superficies de soportes, al frotamiento y al límite de fatiga de la pieza que se trata, pero el acero templado es relativamente frágil y poco resistente a la fatiga y al choque

Por lo tanto, para obtener una alta resistencia junto con durabilidad es necesario endurecer las superficies exteriores seleccionadas de muchas partes de máquinas para soportar el desgaste, dejando sus núcleos suaves, dúctiles y tenaces

El temple superficial se realiza calentando la capa superficial del acero hasta una temperatura superior al punto crítico (para austenitización), y con el enfriamiento posterior a una velocidad superior a la crítica para obtención de la martensita.

El objetivo fundamental del temple superficial es: aumentar la dureza superficial, la resistencia al desgaste y el límite de fatiga de la pieza que se trata. El núcleo de la pieza se conserva dúctil y tenaz y soporta las cargas de impacto. Los aceros de medio y alto carbono pueden endurecerse en la superficie por endurecimiento mediante flama, por inducción y en electrolito

2.1. TEMPLE POR LLAMA

Este proceso es también conocido como “shorter process”, “shortering”, “flameado”, se emplea para endurecer superficialmente ciertas piezas de acero, que por su forma o dimensiones, no pueden ser endurecidas por otros métodos, se puede utilizar la llama de oxiacetileno, gas del alumbrado, gas natural y otros gases derivados del petróleo y de la gasolina. El temple por llama oxiacetilénica es el más utilizado.

El procedimiento consiste en templar determinadas zonas de las piezas, calentándolas con una llama oxiacetilénica como se muestra en la figura 1 y enfriándolas luego rápidamente.

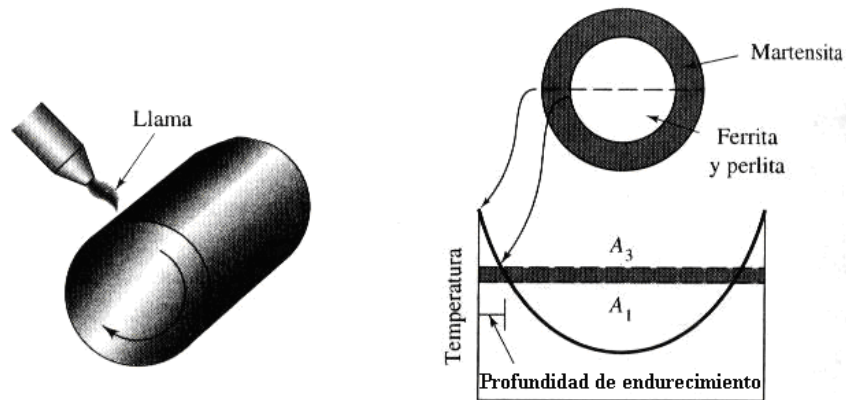


Figura 1. Temple superficial mediante flama

Para conseguir que las capas duras queden bien adheridas el resto del material y para evitar posibles desconchamientos superficiales, debido a una transición demasiado brusca en las zonas duras a las blandas, conviene que el contenido de carbono de los aceros este comprendido entre 0.30 % al 0.60 % de C.

Las instalaciones comprenden de uno a varios sopletes y varios chorros de agua que proviene de depósitos auxiliares. El foco de calor o la pieza se mueven constantemente o alternativamente para calentar y templar sucesivamente todas las zonas. El enfriamiento se hace generalmente como ya se dijo, con chorros de agua, aunque algunas veces también se realiza con corrientes de aire a presión o introduciendo las piezas en depósitos de agua o aceite.

Las diferentes clases de instalaciones que se utilizan para este tratamiento se pueden clasificar en cuatro grupos:

1. Máquinas en las que la pieza permanece quieta y la llama se mueve sobre la superficie que se va a templar, seguida más o menos inmediatamente del aparato de enfriamiento.
2. Máquina en que la llama y el aparato de enfriamiento son estacionarios y la pieza se mueve, figura 2.

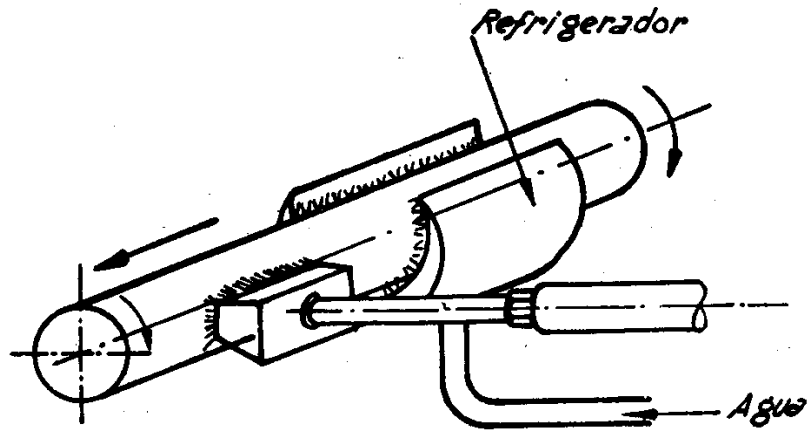


Figura 2. Temple oxiacetilénico en espiral

3. Máquina en que la llama y el aparato de enfriamiento se mueven a una determinada dirección y la pieza a la otra dirección.

4. Máquina en la que se aplica la llama durante el tiempo necesario para que el acero alcance la temperatura de temple y entonces se alcanza el dispositivo de enfriamiento, y así sucesivamente, figura 3.

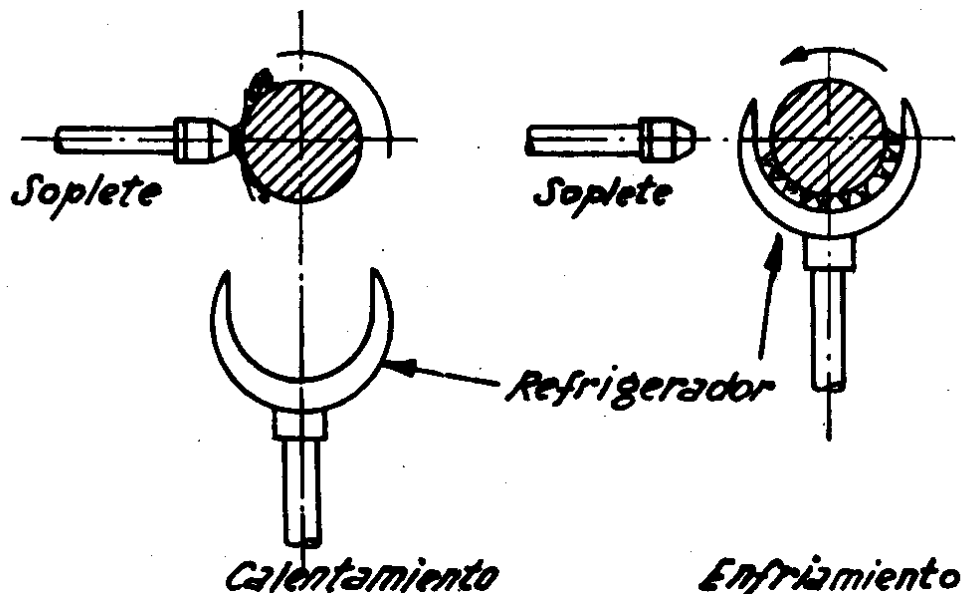


Figura 3. Temple oxiacetilénico general instantáneo

Las intensidades del temple se regulan por las distancias del chorro de agua al quemador en los tres primeros grupos, en el cuarto, la velocidad de calentamiento es regulada por el tamaño de la flama y la intensidad del temple.

El temple oxiacetilénico es muy utilizado en el caso de piezas grandes, que por su volumen no pueden introducirse en los hornos de temple, además, empleando este sistema se puede endurecer, si se desea, solo la parte superficial de las piezas, sin afectar las propiedades del núcleo.

Cuando se utiliza este método para templar piezas de gran tamaño las deformaciones que se producen son muy pequeñas. Este procedimiento es muy útil cuando se desea endurecer sólo determinadas zonas.

Aunque puede emplearse el procedimiento oxiacetilénico para templar todos los aceros de más de 0.30% de carbono, no se suelen utilizar contenidos de carbono superiores a 0.60% por el peligro de que se desconchen las capas duras. Sin embargo, cuando además de la dureza superficial, interesa que el núcleo quede con características relativamente elevadas, deben utilizarse aceros aleados.

En la tabla 1 se proporciona una lista de algunos de los aceros más empleados para el temple por llama oxiacetilénica y las durezas que con ellos se pueden conseguir.

Tabla 1. Aceros más empleados para el temple por llama oxiacetilénica

C	Mn	Si	Rockwell C
0.35	0.80	0.25	53
0.35	1.45	0.30	55
0.46	0.68	0.18	59
0.48	0.69	0.30	60
0.55	0.74	0.22	62
1.00	0.30	0.26	63

Las profundidades de la capa dura que se obtienen industrialmente, suelen variar de 1 a 6 mm y dependen en cada caso de la clase de acero o de la forma de efectuar el tratamiento. La velocidad de avance de la llama suele variar de 50 a 200 mm por minuto y la máxima dureza que se alcanza superficialmente, depende siempre del contenido en carbono del acero.

Cuando se emplean aceros de alta aleación, la profundidad de dureza es mayor que en los aceros al carbono, ya que la penetración del temple aumenta con los elementos aleados y la variación de la dureza de la periferia al centro es menos brusca. El tiempo requerido para el calentamiento depende de la profundidad deseada.

2.2. ENDURECIMIENTO POR INDUCCIÓN

Este procedimiento se utiliza para endurecimiento superficial de pequeñas piezas de acero, por temple de su zona periférica. El calentamiento por corriente de alta frecuencia se efectúa en muy pocos segundos, pudiéndose además si se desea, localizar el tratamiento en zonas muy limitadas.

Las piezas se colocan en el interior de una espira o conjunto de espirales de forma apropiada, a través de la cual se hace pasar una corriente eléctrica de alta frecuencia que calienta las piezas a temperaturas elevadas como se aprecia en la figura 4, luego, se enfría rápidamente con una ducha de agua o introduciéndolas en recipientes de agua o aceite. Las espirales están constituidas por un tubo de cobre refrigerado interiormente por agua. La corriente eléctrica crea en el interior de las espirales un campo magnético alternativo, que a su vez da lugar a corrientes eléctricas alternativas de alta frecuencia en las piezas, que son suficientes para calentar el acero.

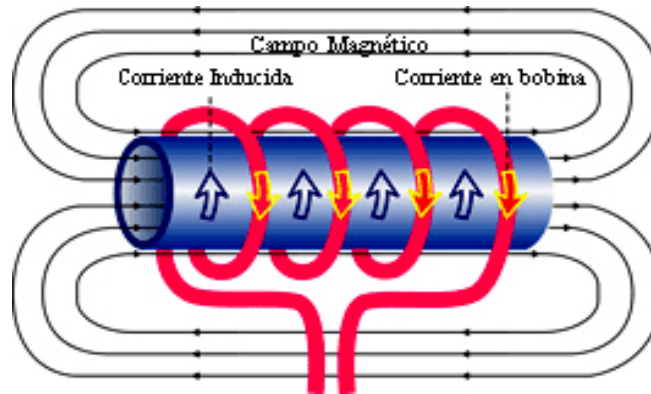


Figura 4. Calentamiento de piezas con corrientes de alta frecuencia.

Los sistemas de calentamiento por inducción se basan en la aplicación de la inducción electromagnética. Los componentes básicos de un sistema como éste incluyen: una fuente de poder de corriente alterna, un inductor (bobina de cobre), y una pieza metálica de trabajo.

La fuente de poder manda una corriente alterna a través del inductor produciendo un campo magnético que induce en la pieza una corriente eléctrica que genera un calentamiento de la misma sin contacto físico.

Debido a que el campo magnético aplicado es alterno, la corriente inducida no circula uniformemente en la sección de la pieza, sino que es más intensa en la superficie y nula en el centro. La profundidad de penetración de esta corriente depende de la frecuencia de la corriente inductora, resultando que el calentamiento es más superficial cuanto más alta es la frecuencia.

El calentamiento de las piezas de acero se efectúa en este proceso como consecuencia de dos fenómenos distintos:

1. **Por Histéresis:** Bajo la acción del campo magnético las pequeñas partículas de hierro tienden a polarizarse en un determinado sentido, creándose en cada una de ellas un polo norte y un polo sur. Al variar el sentido del campo con mucha frecuencia, las pequeñas partículas tienden a seguir esas variaciones, modificándose la situación de sus

polos y creándose una gran fricción molecular interna que desarrolla calor y que al disiparse a través de la pieza eleva su temperatura. En el temple de los aceros por alta frecuencia, el calentamiento por histéresis tiene muy poca importancia.

2. **Por corriente de Foucault:** En la periferia de las piezas sometidas a cambios magnéticos alternativos de alta frecuencia, nacen unas corrientes periféricas circulares llamadas “corriente de Foucault”, que son capaces de calentar rápidamente la zona periférica de las piezas, llegándose a alcanzar en muy pocos segundos temperaturas del orden de los 800 a 1000 °C.

En el temple de los aceros, el efecto de histéresis que es casi despreciable, no ejerce además ningún efecto cuando la temperatura de la pieza sobrepasa la temperatura de Curie (768 °C), porque a partir de esa temperatura el acero es amagnético. Entonces, el calentamiento se efectúa exclusivamente por corriente de Foucault, actuando el acero de la periferia de la pieza como una resistencia, que se calienta al paso de una corriente eléctrica de acuerdo con la ley de Joule. El calor desarrollado será proporcional a la Ley de Ohm.

Cuando la temperatura del acero sobrepasa los 768 °C, cesa el efecto aunque sus efectos se reducen a medida que aumenta la temperatura. Esto es una ventaja, pues automáticamente se evita el sobrecalentamiento excesivo de la periferia de las piezas.

Para generar una corriente de alta frecuencia existen tres tipos de instalaciones:

1. **Motor generador:** Se emplea para frecuencias relativamente bajas de 60 a 25000 ciclos por segundo, con capacidad variable desde 5 kW hasta varios cientos de kilowatts. Se utilizan, en general, para grandes profundidades de calentamiento, variables de 1.5 a 5 mm. Figura 5.

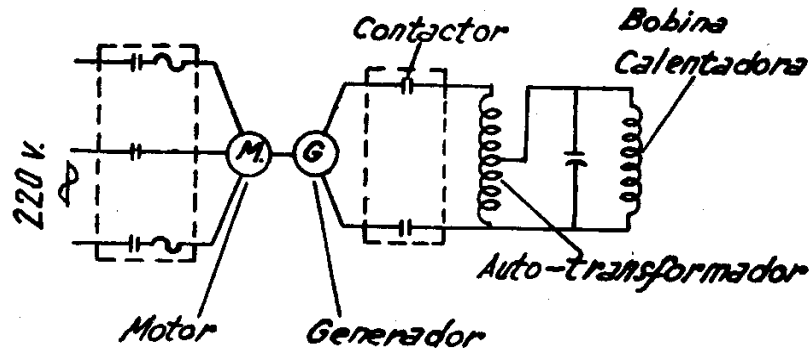


Figura 5. Sistema motor-generador para temple por inducción.

2. Generadores de Válvulas: Se emplean para frecuencias muy elevadas desde 100 000 a 5 000 000 de ciclos por segundo, con capacidades de 5 a 100 kW.

3. Generadores de chispa: Se utiliza para frecuencias muy elevadas de 20 000 a 1 000 000 Hz, con pequeñas cantidades de potencia, en el rango de 5 a 40 kW.

Empleando instalaciones de alta frecuencia se pueden templar muchas piezas de pequeños motores y máquinas en mucho menos tiempo que cualquier otro tipo de calentamiento, figura 6.

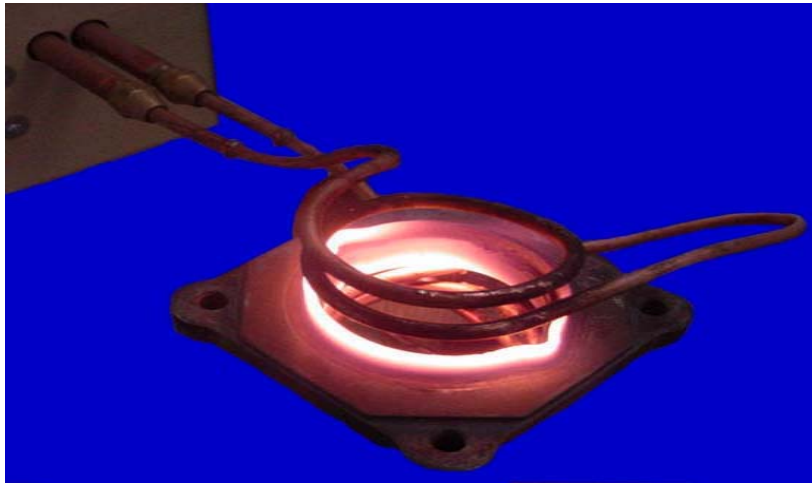


Figura 6. Calentamiento de una tapa de motor con corrientes de alta frecuencia.

Para el temple de resortes se emplea una instalación que consta de unas espirales de cobre que rodean el muelle, apoyado en dos cilindros móviles que le hacen girar alrededor de sus ejes durante el calentamiento. Terminado éste, se separan los cilindros y cae el muelle al depósito de enfriamiento, figura 7.

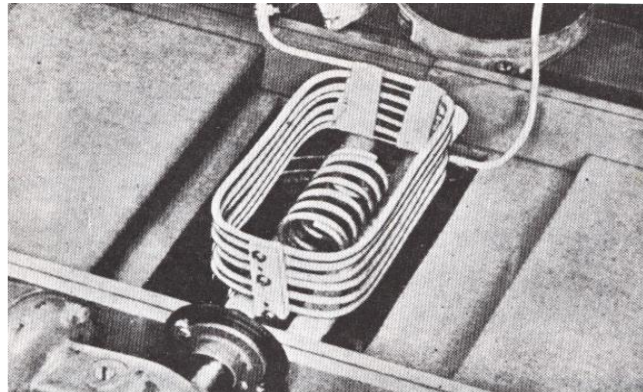


Figura 7. Tratamiento térmico de un resorte automotriz con corrientes de alta frecuencia.

Los inconvenientes más importantes del temple por inducción son:

1. El elevado costo de las instalaciones.
2. La necesidad de preparar en cada caso dispositivos adecuados para cada clase de trabajos.
3. La gran velocidad de calentamiento
4. La gran diferencia de temperatura que ocurre de un momento determinado en zonas muy próximas de las piezas, que luego da lugar a variaciones muy bruscas de dureza.

La profundidad de calentamiento depende principalmente de tres variables: frecuencia, potencia y tiempo. Modificando esas características se pueden utilizar las más variadas combinaciones para conseguir, en cada caso, los mejores resultados.

2.3 TEMPLE POR CALENTAMIENTO DEL METAL EN ELECTROLITO

El proceso consiste en lo siguiente: la pieza que sirve de cátodo se sumerge en el electrolito (solución acuosa de sosa) y de ánodo sirve el mismo baño, figura 8. Al cerrar el circuito de corriente continua, alrededor del cátodo (pieza) se forma una camisa de

hidrogeno alta resistencia eléctrica, lo que contribuye a la creación de una alta temperatura y un calentamiento rápido de la capa superficial del metal. La pieza calentada se enfría (se temple en el mismo electrolito al desconectar la corriente). Para calentar la pieza se aplica un voltaje de 220 a 300 V con una densidad de corriente de 4 a 6 A/cm² de la superficie de calentamiento.

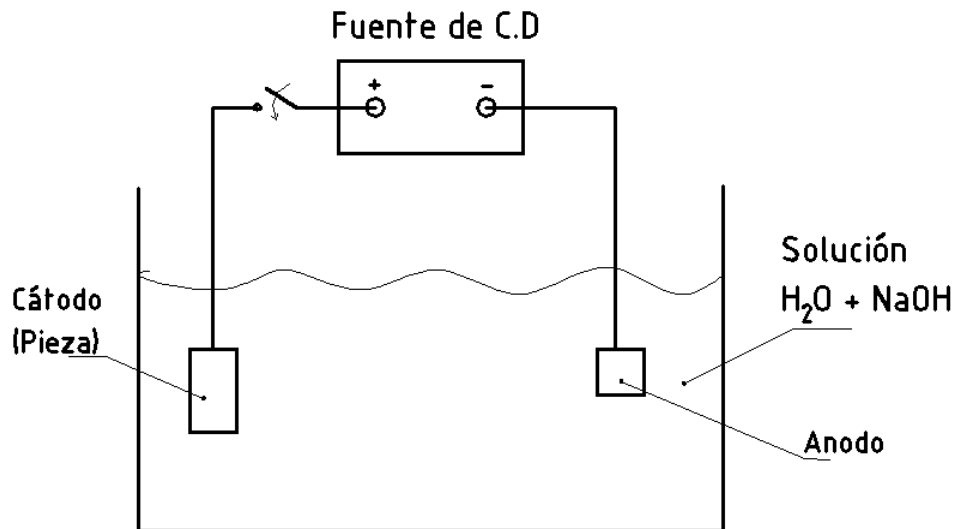


Figura 8. Calentamiento y temple del acero en electrolito

3. DIFUSIÓN

La tendencia natural de átomos y moléculas a moverse desde zonas de alta concentración hacia zonas de baja concentración se llama difusión. Cuando se retira la barrera entre dos sustancias, figura 9, las moléculas se redistribuyen (o difunden) por todo el recipiente. Al final, la mezcla alcanza un estado de equilibrio, en el que las moléculas de ambas sustancias están mezcladas uniformemente. Aunque el número total de moléculas en el recipiente es el mismo que antes de quitar la barrera, la concentración de cada sustancia es menor. La velocidad de difusión depende de la masa de las moléculas: las moléculas con más masa se difunden más lentamente.

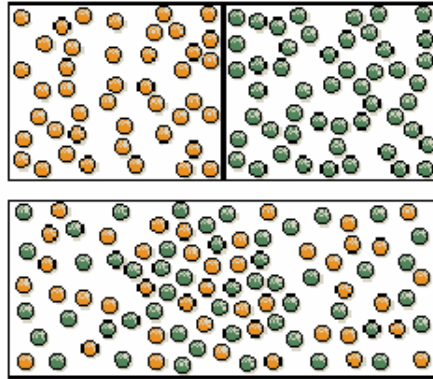


Figura 9. Proceso de difusión.

El movimiento de los átomos de un metal puro o del elemento base o solvente se conoce como “difusión propia”, mientras que la difusión de un metal como elemento de aleación en otro metal (base), se conoce como “difusión sustitucional” (sí la solución que forman ambos elementos es del tipo sustitucional) o “difusión intersticial” (sí la solución formada es del tipo intersticial).

El movimiento de los átomos dentro de un sólido metálico, en el caso de difusión propia y difusión sustitucional, depende de la existencia de “sitios vacantes o vacancias”, las cuales son un tipo de defecto que posee todo metal y el cual es dependiente de la temperatura, su dependencia es de forma exponencial, por lo que a mayor temperatura mayor concentración de sitios vacantes, con el consecuente aumento en la difusión atómica, además de que a mayor temperatura mayor energía poseen los átomos, aumentando por tanto la frecuencia de salto de los mismos de un sitio vacante a otro.

3.1. LEYES DE FICK

Como ya se mencionó, la difusión es el movimiento de los átomos en un material. Los átomos se mueven de una manera predecible, tratando de eliminar diferencias de concentración y de producir una composición homogénea y uniforme. El movimiento de los átomos es necesario para muchos de los tratamientos que se llevan a cabo sobre materiales. Es necesaria la difusión para el tratamiento térmico de los metales, la

manufactura de los cerámicos, la solidificación de los materiales y la conductividad eléctrica de muchos cerámicos.

3.1.1. Primera ley de Fick (Velocidad de difusión)

La velocidad a la cual se difunden los átomos en un material se puede medir mediante el flujo J , que se define como el número de átomos que pasa a través de un plano de superficie unitaria por unidad de tiempo como se aprecia en la figura 10. La primera ley de Fick determina el flujo neto de átomos:

$$J = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

Donde:

$$J = \text{flujo de átomos} \left(\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right)$$

$$D = \text{Difusividad o coeficiente de difusión} \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right)$$

$$\frac{\Delta c}{\Delta x} = \text{Gradiente de concentración} \left[\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}} \right]$$

Note que el signo negativo indica el movimiento de los átomos de la concentración más alta a la más baja.

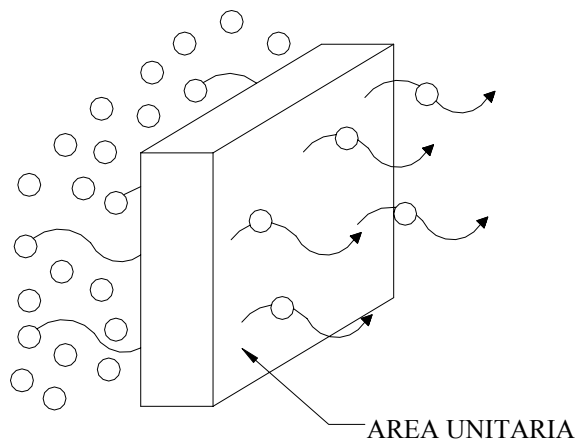


Figura 10. El flujo durante la difusión queda definido como el número de átomos que pasa a través de un plano de área unitaria por unidad de tiempo.

Durante la difusión hay varios factores que afectan el flujo de los átomos:

Gradiente de concentración.

El gradiente de concentración muestra la forma en que la composición del material varía con la distancia; Δc es la diferencia de concentración a lo largo de una distancia Δx , figura 11. El gradiente de concentración puede crearse al poner en contacto dos materiales de composición distinta cuando un gas o un líquido entra en contacto con un material sólido.

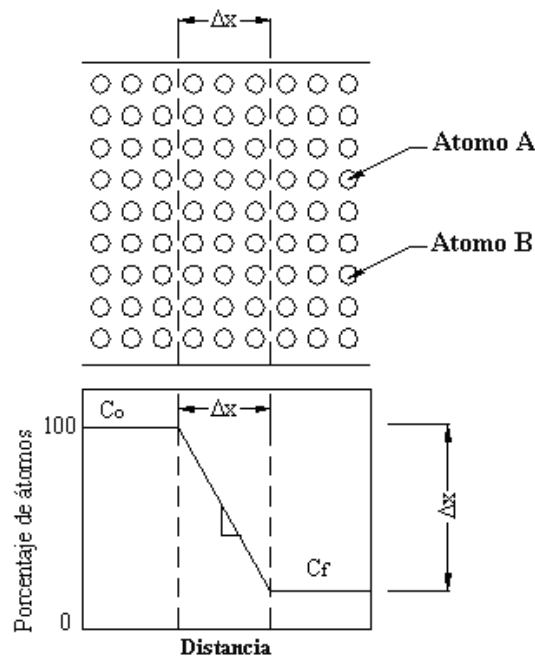


Figura 11. Ilustración del gradiente de concentración

El coeficiente de difusión y la temperatura.

El coeficiente de difusión D está relacionado con la temperatura por la ecuación de Arrhenius:

$$D = D_0 e^{\left(\frac{-Q}{RT}\right)}$$

Donde:

Q = la energía de activación de la difusión, esto es, la energía necesaria para hacer pasar a un átomo de una posición reticular de equilibrio a otra $\left[\frac{\text{cal}}{\text{mol}}\right]$

R = constante de gas ideal = $1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot ^\circ\text{C}}$

T = temperatura absoluta [$^\circ\text{K}$]

D_0 = una constante que depende del parámetro de red y la frecuencia de vibración de los átomos [cm^2/s]

Cuando se incrementa la temperatura de un material, el coeficiente de difusión y la densidad de flujo de átomos también se incrementan. A temperaturas mayores, la energía térmica proporcionada a los átomos que se difunden, les permite superar la barrera de energía de activación y poder desplazarse más fácilmente a otros sitios de la red. Por esta razón, los tratamientos térmicos de los metales y el procesamiento de los cerámicos se realizan a temperaturas elevadas, donde los átomos se mueven rápidamente para concluir las reacciones o alcanzar las condiciones de equilibrio.

La energía de activación y el mecanismo de difusión.

Una energía pequeña de activación Q incrementa el coeficiente de difusión y la densidad de flujo, puesto que se necesita menos energía térmica para superar la barrera de energía de activación, que es menor. La difusión intersticial, con baja energía de activación, ocurre normalmente a un orden de magnitud menor, o más rápidamente que la difusión por vacantes o por átomos sustitucionales.

Las energías de activación son usualmente menores en los átomos que se difunden a través de estructuras cristalinas abiertas, en comparación con las estructuras cristalinas compactas. La energía de activación para la difusión del carbono en el hierro FCC es de 32, 900 cal/mol, pero para su difusión en el hierro BCC, es sólo 20, 900 cal/mol.

En la tabla 2 se proporcionan los valores de la energía de activación Q y de la constante D_0 para algunos sistemas de difusión.

Las energías de activación son también menores para la difusión de los átomos en los materiales con temperaturas bajas de fusión y generalmente menores en los átomos sustitucionales pequeños comparados con átomos más grandes.

Tabla 2. Valores de la energía de activación Q y de la constante D_0 para algunos sistemas de difusión.

PAR DE DIFUSIÓN	Q (cal/mol)	D_0 (cm ² /s)
Carbono en Fe (FCC)	32900	0.23
Carbono en Fe (BCC)	20900	0.011
Nitrógeno en Fe (FCC)	34600	0.0034
Nitrógeno en Fe (BCC)	18300	0.0047
Hidrogeno en Fe (FCC)	10300	0.0063
Hidrogeno en Fe (BCC)	3600	0.0012
Níquel en Cu	57900	2.3
Cobre en Ni	61500	0.65
Zinc en Cu	43900	0.78
Níquel en Fe (FCC)	64000	4.1
Plata en Au	40200	0.072

Tiempos de difusión.

En la difusión volumétrica, los átomos se mueven a través del cristal de un nodo o de la red a otro, o de un intersticio a otro. Debido a los átomos circundantes, la energía de activación es grande y la velocidad de difusión es relativamente baja.

Sin embargo, los átomos se pueden difundir a lo largo de los bordes de grano, interfaces y superficies en el material. Los átomos se difunden mas fácilmente por difusión en borde de grano debido al escaso empaquetamiento atómico en los límites granulares. Debido a que los átomos atraviesan con mayor facilidad el límite o borde de grano que es desordenado, la energía de activación es baja. La difusión superficial es aun más fácil,

ya que hay menos obstáculos. En consecuencia, la energía de activación es menor y el coeficiente de difusión es mayor para las difusiones de límite de grano y superficial.

La difusión requiere de tiempo; recuérdese que las unidades para el flujo son $\left(\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}\right)$

Si deben difundirse un gran número de átomos para producir una estructura uniforme, se requieren tiempos prolongados, incluso a temperaturas elevadas. La duración de los tratamientos térmicos puede reducirse aplicando altas temperaturas o acortando la distancia de difusión (Δx) lo más posible.

Se advierte que algunas estructuras y propiedades excepcionales se obtienen si se impide la difusión. Los aceros se templean rápidamente a altas temperaturas para prevenir la difusión de las estructuras fuera de equilibrio, lo cual proporciona el fundamento de los tratamientos térmicos especiales.

3.1.2. Segunda ley de Fick (Perfil de composición)

La segunda Ley de Fick, que describe la difusión dinámica de los átomos, es la ecuación diferencial:

$$\frac{dc}{dx} = D \frac{d^2c}{dx^2},$$

Cuya solución depende de las condiciones del límite para una situación parcial. Una solución es:

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \text{F er} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

Donde:

c_s = es una constante de concentración de los átomos que se difunden en la superficie del material

c_0 = es la concentración uniforme inicial de los átomos en el material

c_x = es la concentración del átomo que se difunde a la posición x debajo de la superficie después de un tiempo t

fer = es una función de error y puede determinarse a partir de la tabla 3 o de la figura 12.

Tabla 3. Función de error.

$\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$	Fer (z)	$\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$	Fer (z)	$\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$	Fer (z)	$\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$	Fer (z)
0	0	0.40	0.4284	0.85	0.7707	1.6	0.9763
0.023	0.0282	0.45	0.4755	0.90	0.7970	1.7	0.9838
0.05	0.0564	0.50	0.55205	0.95	0.8209	1.8	0.9891
0.10	0.1125	0.55	0.5633	1.0	0.8427	1.9	0.9928
0.15	0.1680	0.60	0.6039	1.1	0.8802	2.0	0.9953
0.20	0.2227	0.65	0.6420	1.2	0.9103	2.2	0.9981
0.25	0.2763	0.70	0.6778	1.3	0.9340	2.4	0.9993
0.30	0.3286	0.75	0.7112	1.4	0.9523	2.6	0.9998
0.35	0.3794	0.80	0.7421	1.5	0.9661	2.8	0.9999

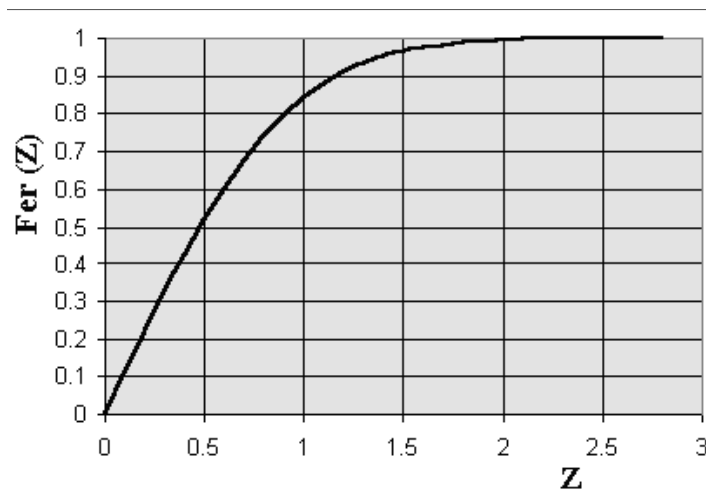


Figura 12. Representación gráfica de la función de error $\text{Fer}(z)$

De esta manera, la solución de la primera Ley de Fick permite calcular la concentración de muestras cercanas a la superficie del material como una función del tiempo y la distancia, siempre y cuando el coeficiente de difusión D permanezca constante y las concentraciones de átomos difundidos en la superficie c_s y dentro del material c_0 permanezcan sin cambios.

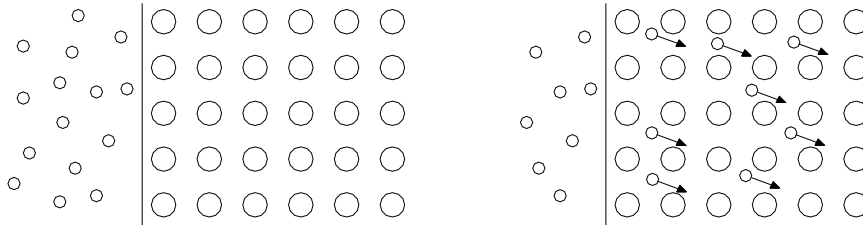


Figura 13. Difusión de átomos en la superficie de un material, ilustrando el uso de la segunda Ley de Fick

Una de las consecuencias de la segunda Ley de Fick es que se puede obtener el mismo perfil de concentración para diferentes condiciones mientras el término Dt sea constante. Esto permite determinar el efecto de la temperatura en el tiempo que requiere un tratamiento térmico en completarse.

4. TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS

Como ya se dijo, estos tratamientos implican una alteración de la composición química de la capa superficial del metal tratado, debido a la difusión de átomos de un medio circundante hacia el interior del metal, y depende de varios factores como son:

Temperatura, tiempo, concentración del medio circundante, concentración inicial de la pieza, etc. como el control de las variables anteriores es relativamente sencillo, los tratamientos termoquímicos se utilizan cuando se requiere asegurar una determinada profundidad y zonificación de la capa endurecida. El carbono, el nitrógeno y el boro son los elementos más utilizados para endurecer un acero por lo que se utilizan ampliamente en este tipo de tratamientos. A diferencia de los tratamientos superficiales, se utilizan aceros de bajo carbono (máximo 0.25 %).

4.1. CEMENTACIÓN

La cementación es un tratamiento termoquímico en el cual, se obtiene una superficie muy dura, resistente al desgaste y a la penetración y a su vez, el núcleo central es muy tenaz, para poder soportar los choques a que están sometidas.

La cementación consiste en aumentar el contenido en carbono en la superficie de las piezas de acero, rodeándolas con un medio carburante, y manteniendo todo el conjunto, durante un cierto tiempo a elevada temperatura. Luego, se temple las piezas y quedan con gran dureza superficial.

Se puede emplear cementantes sólidos, líquidos y gaseosos, oscilando la duración de la cementación de 6 a 10 horas cuando se utilizan cementantes sólidos, de 1 a 6 horas cuando se trata de sales o cementantes líquidos y de 1 hora a varios días utilizando cementación gaseosa.

Se pueden emplear aceros aleados y sin aleación, de bajo contenido en carbono, generalmente de 0.08 a 0.25 % de C y excepcionalmente algunas veces se cementan también aceros hasta de 0.40 % de C.

La operación se realiza generalmente a temperaturas comprendidas entre 850 y 1000 °C, siendo las temperaturas próximas a 900 °C las más utilizadas.

En el proceso de cementación se pueden distinguir dos etapas distintas: la absorción del carbono por el acero y el mejoramiento de sus características por medio de los tratamientos térmicos adecuados.

La cantidad y distribución del carbonó absorbido por la pieza depende de la composición del acero, de la naturaleza de la sustancia cementante y de la temperatura y de la duración de la cementación.

Una pieza después de cementada se puede considerar compuesta por dos zonas principales de composición química diferente; el núcleo y la periferia o capa cementada, existiendo entre ellas otra tercera zona de transición de menor importancia.

La capa exterior queda con alto contenido de carbono y el corazón con la composición inicial, en la cementación la periferia a pesar de su alto contenido de carbono queda relativamente blanda, y el corazón a pesar de tener un bajo contenido de

carbono, queda frágil debido la permanencia del acero durante mucho tiempo a alta temperatura.

Como la periferia y el núcleo central de la pieza cementada son de distinta composición, necesitaran diferentes tratamientos, pero como ambas son inseparables, esos tratamientos deberán ser de tal naturaleza, que actúen favorablemente para ambas partes.

Se da el nombre de capa cementada a la zona que después de la cementación queda con un contenido de carbono superior a la del acero y recibe el nombre de capa dura la zona superficial que después del último tratamiento queda con una dureza superior a 58-60 R_C, y que suele corresponder a la zona cuyo porcentaje de carbono es superior a 0.50 – 0.80 % de C.

A veces en lugar de hacer referencia a la profundidad de la capa cementada se señalan según preferencias la capa con carbono superior a 0.3 a 0.5% de carbono.

Los espesores de las capas cementadas que normalmente se emplean en las piezas de máquinas y motores, se pueden clasificar en tres grupos:

1. Capas delgadas con menos de 0.50 mm de espesor de cementación. Estas profundidades de cementación se utilizan para pequeñas piezas de acero al carbono, endurecidas generalmente con sales de cianuro y templadas directamente desde la temperatura de cementación. Estas piezas deben de utilizarse siempre sin rectificado posterior.
2. Capas medias de 0.50 a 1.50 mm. Estos espesores son los más corrientes para la mayoría de las piezas que se utilizan en la fabricación de máquinas y motores. Se pueden emplear cementantes sólidos, líquidos o gaseosos, con aceros al carbono, débilmente aleados o de alta aleación

3. Capas de gran espesor, superiores a 1.50 mm. se obtienen, generalmente por cementación con materiales sólidos y con cementantes gaseosos y algunas veces, aunque más raramente, con cementantes líquidos.

Cualquiera que sea el proceso que se emplee, conviene que el contenido en carbono de la capa cementada no pase de 1% y debe procurarse que la parte periférica de la pieza después de rectificada, quede aproximadamente con 0.8 a 0.90 % de carbono, con lo que se obtiene en el temple una dureza de 62 a 65 R_C. ya que siempre conviene obtener durezas superiores a 60 R_C.

4.1.1. Cementación con materiales sólidos

Es el procedimiento más antiguo utilizado para enriquecer con carbono la superficie del acero. En este caso, las piezas, después de su elaboración preliminar, se limpian quitándoles la herrumbre, la suciedad y la grasa. Se utilizan diversos materiales para suministrar el carbono que ha de absorber el acero durante la cementación. Las más empleadas suelen ser el carbón vegetal, el negro animal, huesos calcinados, cuero, etc. que se mezclan con carbonatos de bario, calcio y sodio.

El carbón sólo, no se emplea por que con él no se suelen conseguir concentración de carbono en la periferia del acero, superiores a 0.65% de C, mezclándola a cambio con carbonatos alcalinos o alcalino-térreos, se alcanza hasta 1.20% de carbono.

Durante mucho tiempo se creyó que la cementación de los aceros de muy bajo carbono se verificaba, al penetrar el carbono del cementante sólido a través de la superficie del acero y difundirse luego hacia el interior.

Pero se ha comprobado que la transferencia del carbono al acero, se verifica siempre por medio de los gases que se desprenden al calentarse las mezclas cementantes a alta temperatura, siendo en estos procesos el monóxido de carbono el principal agente carburante, figura 14.

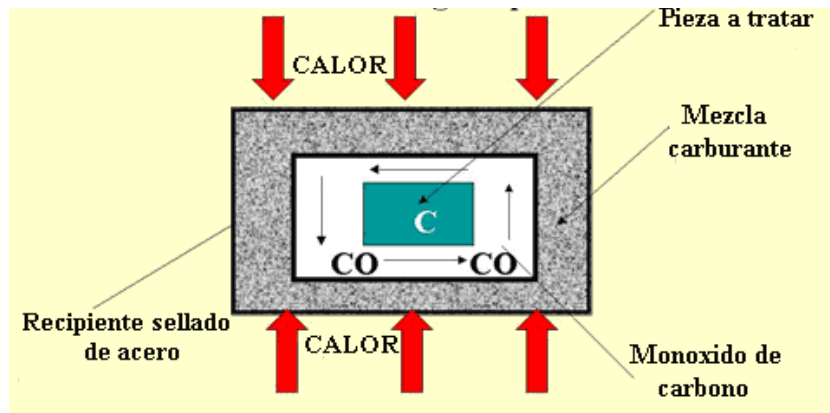
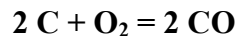
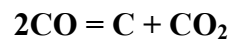


Figura 14. Cementación sólida o en caja.

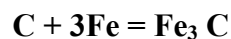
El proceso de cementación por el carbón vegetal, coque, etc., se explica en la siguiente forma: El carbón a elevada temperatura, en contacto con el oxígeno del aire que hay siempre en el interior de las cajas, entre los huecos que deja la materia cementante, da monóxido de carbono (CO) según la siguiente reacción:



Luego, el óxido de carbono formado se descompone a elevada temperatura en carbono naciente y dióxido de carbono.



En algunos procesos también se realiza la cementación por la acción del metano que se descompone en hidrógeno y carbono naciente de acuerdo con la siguiente reacción:



Formándose carburo de hierro o cementita, y luego al difundirse el carbono o el carburo de hierro hacia el interior de las piezas es cuando se puede decirse que se produce la cementación.

En todos los casos, para que se verifique con facilidad la absorción del carbono, es necesario que el acero se encuentre en estado austenítico, esto es, que el

hierro se encuentre en forma de hierro γ , condición que se cumple utilizando las temperaturas normales de cementación. En esas condiciones de 850 a 950 °C el acero puede absorber hasta 1.40% de carbono aproximadamente, pudiéndose llegar hasta 2 % de C a 1145 °C.

Cuando el hierro se encuentra en estado α a temperaturas más bajas, la capacidad de absorción del carbono es, en cambio, muy limitada.

El carbono, después de haber penetrado en el acero, queda disuelto en el hierro γ y de acuerdo con las leyes de difusión, al existir en la periferia una concentración más elevada que en el interior, penetra hacia el corazón. En el proceso de cementación se señalan, por lo tanto, tres etapas diferentes:

- 1 Producción de carbono naciente en las proximidades de la superficie de acero.
- 2 Absorción del carbono en las zonas periférica del acero
- 3 Difusión del carbono hacia la zona central

Los principales inconvenientes de los cementantes sólidos son:

1. La gran duración de la operación, generalmente demasiado larga, ya que es necesario calentar hasta muy altas temperaturas las grandes cajas de cementación.
2. El elevado consumo de combustible, el necesario para calentar el cementante y las cajas
3. El elevado costo de preparación y colocación de las piezas en las cajas.
4. La dificultad de templar directamente las piezas desde la caja y, por tanto, la imposibilidad de emplear dispositivos automáticos para el temple al trabajar con grandes series.
5. La irregularidad de temperatura en el interior de las grandes cajas de cementación.

Penetración y distribución del carbono

La profundidad de la capa cementada aumenta con la temperatura y con la duración del proceso, figura 15, dependiendo, también de la actividad del carburante empleado y de la composición del acero que se va a cementar.

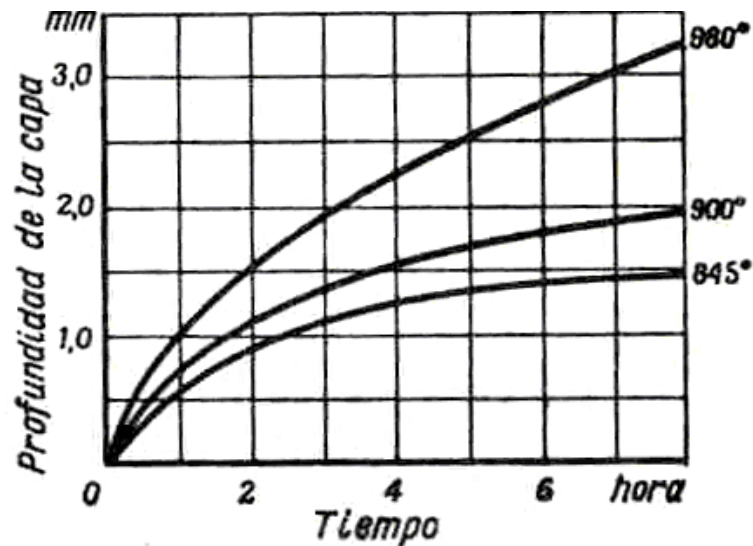


Figura 15. Efecto de la temperatura y del tiempo de permanencia sobre la profundidad de cementación con carburante sólido (carbón + 40 % de BaCO_3)

Aunque la penetración del carbono no se verifique con idéntica velocidad en los diferentes aceros, en la práctica industrial no son muy sensibles las diferencias entre las penetraciones que se consiguen en los aceros al carbono y los aceros al níquel, cromo-níquel, etc.

La absorción del carbono por el hierro γ , es tanto más activa cuanto menor sea el porcentaje en carbono del acero. A medida que la carburación progresa, cuando el porcentaje de carbono aumenta, la velocidad de absorción disminuye, comportándose en ese caso el acero como una solución que se aproxima a su grado de saturación.

Como resultado de la cementación se obtiene una capa carburada con las tres zonas: cerca de la superficie se forma la zona hipereutectoide con el 1.2% de carbono

aproximadamente; luego, va a la zona eutectoide (perlita) con el 0.8 % de carbono, y cerca del núcleo se forma la zona hipoeutectoide (ferrita + perlita), figura 16. Se suele considerar como profundidad de la capa carburada a la suma de las zonas hipereutectoide, eutectoide y la mitad de la zona hipoeutectoide.

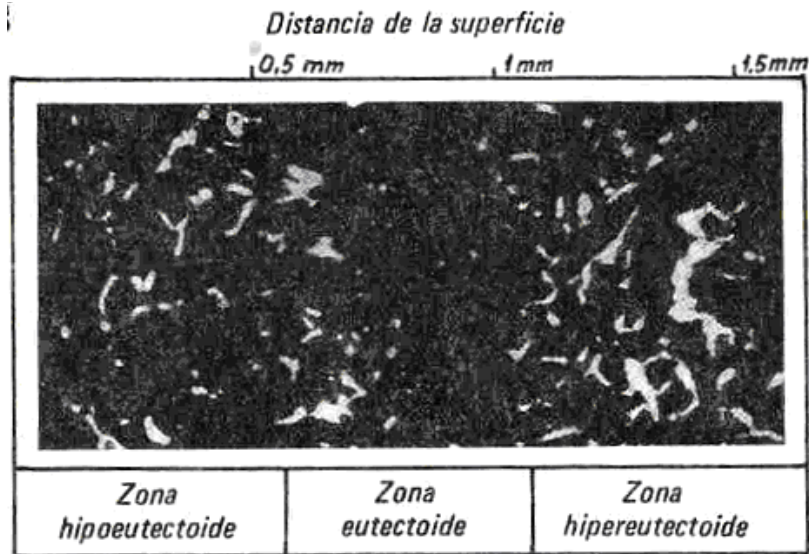


Figura 16. microestructura del acero cementado (100 X)

Para las piezas tratadas con carburantes sólidos se emplean hornos calentados con carbón, gas, fuel-oil y electricidad. En ellos se colocan las cajas de cementar, con las piezas y las mezclas cementantes dentro, cerrando bien las juntas, con barro o arcillas refractarias.

Se suelen utilizar recipientes de fundición, de acero moldeado, de chapa de acero soldado, de acero moldeado inoxidable y de chapa embutida. Aunque el proceso de cementación se verifica de igual forma, cualquiera que sea el material de las cajas, las de acero moldeado inoxidables, son las mejores. En los hornos eléctricos de mufla debe evitarse el contacto de los vapores de cianuro con las resistencias porque las atacan y destruyen rápidamente.

4.1.2. Cementación en baño líquido

Las piezas de acero completamente limpias y exentas de humedad se sumergen en un baño de cianuro de sodio líquido (NaCN). También se puede utilizar cianuro de potasio pero sus vapores son muy peligrosos. Se mantiene la temperatura a 845 °C (1500 °F) durante 15 minutos a 1 hora, según la profundidad que se requiera. A esta temperatura el acero absorberá el carbono y el nitrógeno del cianuro. Después se debe enfriar con rapidez al acero en agua, salmuera o aceite. Con este procedimiento se logran capas con espesores de 0.75 mm.

La acción carburante de estas sales fundidas es muy rápida, pero la capa que se obtiene es relativamente delgada y muy dura, aunque también es posible obtener penetraciones de hasta 3 mm. Este procedimiento presenta la ventaja de poder emplear dispositivos automáticos, tanto para la cementación como para el temple, además de ser más rápido, permite un mejor control sobre la penetración, da piezas más limpias y mayor homogeneidad en la capa cementada.

Para la cementación en baños de sales es muy utilizado un tipo de horno eléctrico que consta de dos o tres electrodos, o un grupo de dos electrodos que queda sumergidos en el baño. Como las sales fundidas son conductoras, pasa a través de ellas la corriente eléctrica y el calor originado por el paso de esa corriente es suficiente para el calentamiento del baño. Se trabaja generalmente con voltajes variables de 8 a 30 V y la potencia de transformador suele variar de 10 a 130 kW. Como las sales sólidas no son conductoras de la corriente eléctrica la puesta en marcha es un poco complicada. Se comienza colocando entre dos electrodos un trozo de coque de tamaño apropiado, que se presione contra ella con una barra de hierro auxiliar, que llega a ponerse al rojo, comenzando primero a fundirse las sales que están a su alrededor, y luego se calienta y funde el resto de la masa.

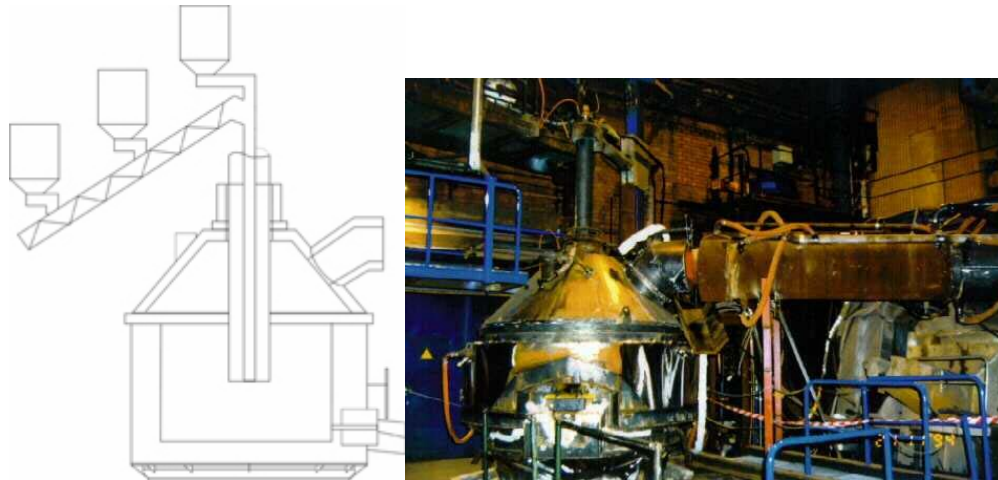


Figura 17. Esquema y equipo para la cementación en baño salino.

La temperatura se regula con gran exactitud modificando el voltaje. Es necesario disponer sobre los crisoles campanas con aspiradores para absorber los vapores que se desprenden.

4.1.3. Cementación con gases

En este procedimiento, se mantiene la pieza de 1 a 8 horas en una atmósfera carburante, a temperatura de 850 a 950 °C, obteniéndose capas cementadas de 0.2 a 1.5 mm de profundidad. Únicamente en casos especiales, como la fabricación de blindajes, se emplean procesos más largos y se obtienen capas cementadas de mayor espesor. Aunque las instalaciones son sencillas y rápidas. Se obtienen resultados muy regulares y se pueden cementar grandes cantidades de piezas en muy poco tiempo. El empleo de este procedimiento, que está sustituyendo en muchos casos a la cementación en cajas, y a la cementación en sales.

La atmósfera carburante esta formada por una mezcla de gas activo y gas portador. El gas activo es generalmente metano, aunque puede utilizarse también propano y butano. El gas portador es una mezcla de oxido de carbono, hidrogeno y nitrógeno, con pequeños porcentajes de vapor de agua, anhídrido carbónico, etc.

El gas portador se prepara quemando incompletamente un gas combustible, como gas de alumbrado, con lo que se forma CO, CO₂, H₂O y cantidades variables de hidrocarburos.

Esta mezcla gaseosa se hace pasar por carbón vegetal a alta temperatura, óxido de bario u otro catalizador, con lo que se transforma el anhídrido carbónico en óxido de carbono y se disocia el vapor de agua.

Después de incorporar el metano desde la botella en que está almacenado a presión el gas portador, se conducen los gases al horno de cementación.

Las misiones del gas portador son las siguientes:

- Desplazar el aire o gases que existan dentro del horno, sobre todo el vapor de agua y el anhídrido carbónico, que son muy perjudiciales para la buena marcha de la cementación.
- Reducir el depósito de hollín que inevitablemente se forma en la cementación gaseosa.
- Economizar metano, ya que se consigue el mismo efecto empleando pequeñas cantidades de este gas que si la totalidad de la atmósfera del horno estuviese formada por él.

Sin embargo la cementación la realiza principalmente el metano, al descomponerse por la siguiente reacción:



Y el carbono naciente es absorbido por el acero a la temperatura de austenitización.

También el monóxido de carbono CO colabora en la cementación, al descomponerse a elevada temperatura en carbono y anhídrido carbónico



Por lo tanto, existirán en la atmósfera de los hornos de cementación gaseosa cantidades crecientes de CO₂ y H₂ formados en el curso de la operación.

El espesor de la capa cementada depende como siempre, en su mayor parte de la duración de la operación, pudiendo obtenerse en ocho horas hasta 1.5 mm de espesor.

El porcentaje de carbono de la capa cementada depende de la temperatura de cementación.

En muchos casos, después de haber carburado a elevada temperatura se mantienen las piezas a unos 800 °C en atmósfera neutra, para mejorar la difusión del carbono en la capa cementada.

Por muchos años la cementación gaseosa se ha hecho casi exclusivamente en hornos rotativos, de eje casi horizontal; posteriormente se comenzaron a usar hornos continuos, en la que las piezas son transportadas a través del horno de un extremo a otro por medio de bandejas o cadenas móviles.

Para este tratamiento también se emplean hornos estacionarios, en los que las piezas se colocan en cestas o colgadas con alambres, según su forma y tamaño, introduciéndolas dentro de un recipiente cerrado como se muestra en la figura 19, a través del cual circula el gas carburante, que es agitado por un ventilador colocado en la parte superior del horno. Terminada la carburación se desplaza la cabeza del horno y se saca la cesta donde se hallan las piezas y se tienen que llevar rápidamente al horno o cámara de difusión que se encuentra a más baja temperatura y luego se pasa la pieza al baño de temple.

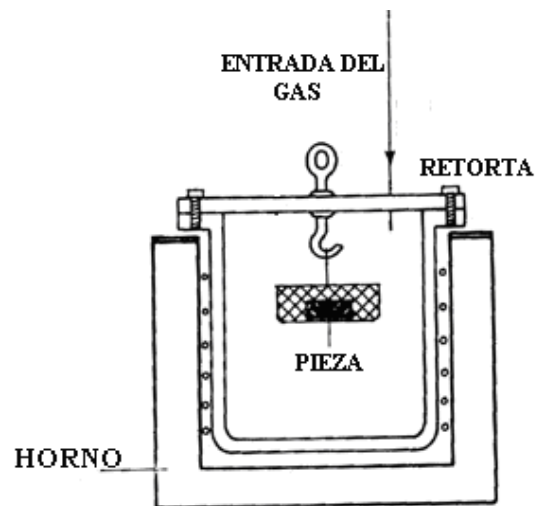


Figura 19. Hornos estacionarios

4.2. NITRURACIÓN

La nitruración es un procedimiento de endurecimiento superficial en la que por la absorción de nitrógeno, se consiguen durezas extremas en la periferia de la pieza.

En la nitruración se incorpora nitrógeno en el acero por difusión, para provocar cambios de propiedades en la superficie de las piezas. Debido a su pequeño radio atómico, el nitrógeno puede penetrar con facilidad en la red del hierro. Para esto es, sin embargo, indispensable que el nitrógeno tenga la forma atómica. La absorción de éste tiene lugar con gran rapidez a altas temperaturas en la solución sólida γ . En la capa estrictamente superficial se obtiene concentraciones de combinaciones de combinaciones nitrogenadas que originan la aparición de una capa superficial muy frágil. Por ello no se debe permitir que el nitrógeno se difunda en el hierro γ (exceptuando en los casos de aceros austeníticos de alta aleación), sino en la red α . Así se obtiene una capa superficial frágil mucho menos gruesa, y detrás una zona conteniendo también nitrógeno con precipitaciones muy finas de nitruros. Esta capa tiene gran dureza, aun mayor que la de la martensita.

El aluminio es el que mejores resultados ha dado como formador de nitruros, además se utiliza titanio, cromo y otros elementos de uso menos frecuente,.

Debido a que solamente por difusión de nitrógeno en la región α se consigue una capa enriquecida con nitrógeno técnicamente útil, es decir, no demasiado frágil y sin embargo muy dura. La temperatura de difusión tiene que ser menor a la temperatura crítica A_1 . Pero al elegir la temperatura debe tenerse en cuenta que el nitrógeno reduce considerablemente la temperatura de transformación A_1 , así, en una aleación de hierro-nitrógeno, la temperatura eutectoide es de 591 °C, figura 20. Por adición de carbono en los aceros de nitruración se produce todavía un ligero descenso del punto eutectoide. Si por encima de la temperatura eutectoide se difunde nitrógeno en el hierro, es decir, en la región donde existe hierro α y γ , el hierro α se transformará debido a su absorción de nitrógeno, cada vez más en hierro γ . Por ello se forman de nuevo capas frágiles, lo mismo que a las temperaturas de difusión por encima de la temperatura A_3 . Por esta razón, no

procede realizar la nitruración en una estructura compuesta parcialmente por solución sólida γ .

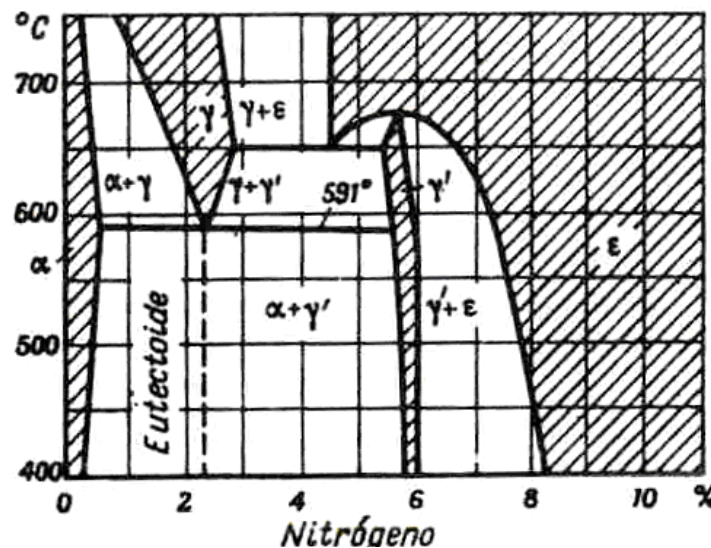


Figura 20. Porción del diagrama de fases Fe-N

Hasta el momento no se ha logrado aumentar de forma verdaderamente sensible la profundidad de penetración con los tiempos aplicados o al revés, alcanzar una disminución del tiempo sin variar la profundidad. En este sentido se han realizado ensayos por descarga de efluvios consiguiéndose desde luego acelerar y aumentar la absorción de nitrógeno en la zona marginal exterior, pero sin lograr apenas acelerar la penetración del nitrógeno.

Los objetos que se desean nitrurar son siempre templados o revenidos antes de la nitruración, para que el núcleo central quede con una resistencia elevada y sea capaz de resistir, durante el trabajo, las grandes presiones que le transmitirá, la capa exterior dura

Por ser la temperatura de nitruración relativamente baja, no hay aumento del tamaño de grano y tampoco es necesario someter a las piezas a un tratamiento posterior.

4.2.1. Nitruración en gases

En este procedimiento suele emplearse como gas nitrogenado al amoníaco (NH_3). Las piezas a tratar se introducen en un horno hermético y bajo una atmósfera rica en amoníaco, como se muestra en la figura 21 se calienta lentamente hasta una temperatura de aproximadamente 500 a 520 °C. Una vez transcurrido el tiempo de tratamiento previsto se vuelven a enfriar las piezas también en forma lenta. No deben contener ninguna capa superficial oxidada, descarbonada, ni tampoco capas de grasa. Los lugares que no deben ser nitrurados pueden protegerse por recubrimiento de estaño, cobre, níquel, etc.

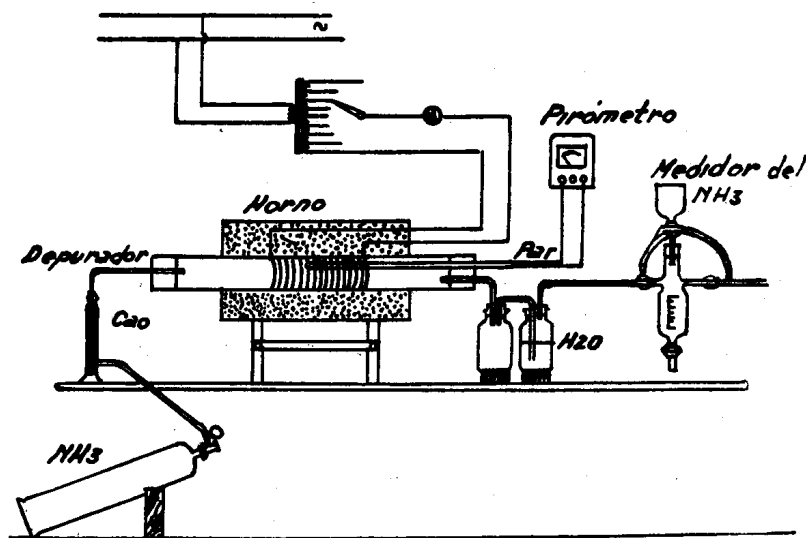


Figura 21. Esquema de una instalación para la nitruración de acero

4.2.2. Nitruración en baños de sales (cianurado)

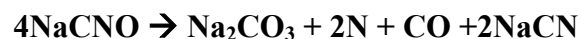
La nitruración en sales ha sido, hasta hace muy pocos años, la forma de nitruración más utilizada. Esto se debe, principalmente, al hecho que se realiza: (1) con una relativa facilidad; (2) es de resultados económicos significativamente baratos; (3) de tratamiento sencillo de reproducir; y (4) de universal aplicación.



Figura 21. Horno utilizado en baños de sales.

La acción nitrurante del baño de sales se debe a la formulación equilibrada de sus componentes que, a una temperatura próxima a los 570 °C, se desdoblán los cianatos proporcionando en su descomposición nitrógeno (N) y carbono (C). La aportación simultánea de nitrógeno y carbono en la superficie de la pieza da lugar a las ya sabidas capas.

Las reacciones involucradas son las siguientes:



El nitrógeno se difunde y el CO reacciona con el hierro:



De una forma rápida, la nitruración en baño de sales responde a una serie de exigencias físico-metalúrgicas, tales como: dureza, resistencia al desgaste y una aceptable tenacidad. Estas son las propiedades que mayormente caracterizan a las capas así obtenidas. Dichas propiedades son difíciles de evaluar; ya que pueden venir condicionadas por una elevada porosidad en la zona de difusión de la capa así nitrurada. Porosidad que se puede, eventualmente, disminuir o minimizar mediante una racional optimización y

funcionalidad de los baños de sales. Por ejemplo: algunas técnicas actuales de nitruración en sales.

La nitruración en baños de sales se realiza a una temperatura comprendida entre 570 y 580 °C, con un tiempo de nitruración máximo de tres horas; con lo que se alcanzan excelentes resultados en la capa nitrurada, bajo un punto de vista físico-metalúrgico; ya que son capas de relativo poco espesor (< igual a 0.1 mm), duras, muy compactas, y aceptablemente tenaces (Figura 22).

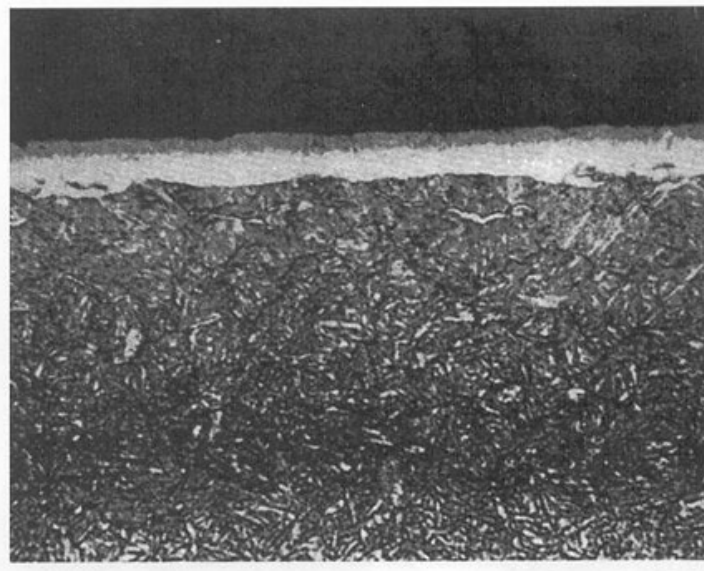


Figura 22. Microestructura de una herramienta nitrurada en sales. (500 X)

La nitruración en baños de sales ha sido, ciertamente, el tratamiento termoquímico que más ha contribuido a potenciar las capas superficiales en todo tipo de piezas y herramientas.

4.2.3. Carbo- nitruración gaseosa

Esto es, una combinación entre la cementación y la nitruración, es decir, que por difusión se aporta simultáneamente grandes cantidades de carbono y nitrógeno. Dado que el nitrógeno no reduce sensiblemente la transformación A_1 , puede hacerse la carburación a temperaturas muy bajas con incorporación simultánea de nitrógeno. Las piezas se calientan a temperaturas próximas a 850° C y luego se enfrían en forma

adecuada para obtener gran dureza en la zona superficial con buena tenacidad en el centro.

Para introducir el carbono en el acero, se pueden emplear un gas carbonoso o un líquido carburante que se vaporiza en el horno. El nitrógeno absorbido por el acero lo obtiene del amoníaco que se incorpora al gas. Este procedimiento ha recibido gran variedad de nombres como: cianuración gaseosa, nicarburing y nitrocarburación.

Una de las ventajas es que el nitrógeno absorbido en el proceso disminuye la velocidad crítica de temple del acero. Esto significa que la capa periférica de un acero carbonitrurado se temple mucha más fácilmente. Figura 23.

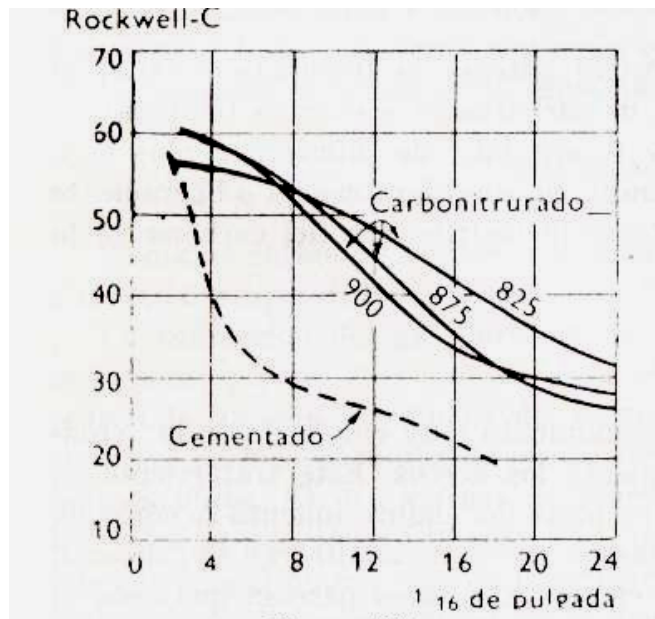


Figura 23. Comparación entre los procesos de cementado y Carbo-nitruración.

La presencia de nitrógeno en la austenita del acero carbonitrurado cuando éste se calienta a alta temperatura, da lugar a la mayor diferencia entre la cementación y la nitruración. Por carbonitruración se suele obtener capas duras de espesor variable de 0.1 a 0.6 mm en tiempos hasta de seis horas.

El equipo necesario para realizar la carbonitruración está compuesto por un horno de cámara, de retorta o de mufla, en donde se introduce el gas a la atmósfera que

suministra carbono y nitrógeno en forma apropiada para su incorporación al acero, figura 24. De hecho, cualquier equipo que sirva para la cementación gaseosa, puede ser utilizado, ya que solo le hace falta agregarle amoniaco a la atmósfera usada para la cementación. Para suministrar el carbono suele usarse gas natural, gas de coque y gas de gasógeno.

En realidad, el proceso es muy parecido a la cementación gaseosa, solo que se agrega amoniaco a la atmósfera del horno.

Se utiliza un gas portador formado generalmente por el 21% de CO, 40% de H₂, 35% de N₂, 1% de CH₄, y pequeñas cantidades de CO₂, O₂, Vapor de agua y un gas activo que es en este caso el amoniaco. La aportación del carbono depende del metano.

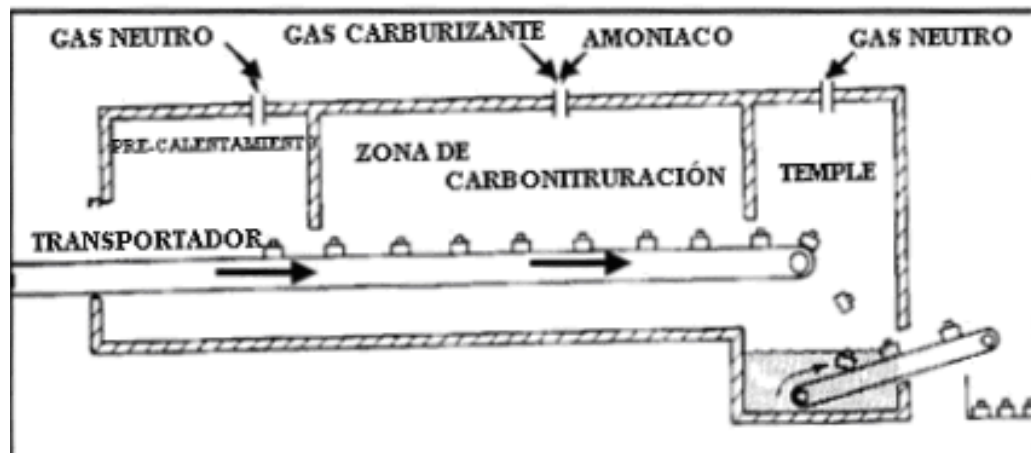


Figura 24. Proceso de carbonitruración

4.2.4. Nitruración iónica

Se denomina también nitruración por plasma, y es una forma de nitruración gaseosa dirigida a aumentar la velocidad de difusión del nitrógeno y a reducir el ciclo de tratamiento. El proceso se realiza dentro de un reactor donde se ha hecho el vacío antes de introducir los gases de nitruración, figura 25.



Figura 25. Diferentes aspectos del proceso de nitruración iónica

Las piezas a tratar están aisladas eléctricamente de la cámara del reactor y conectadas al suministro eléctrico de corriente continua del mismo. Las piezas forman el cátodo (-) se depositan dentro de la cámara, que forma el ánodo (+). Los iones eléctricamente positivos en el gas son acelerados y dirigidos a la carga negativa. El nitrógeno molecular (N_2) se descompone y se ioniza mediante descargas eléctricas luminosas.

Al mismo tiempo que se calientan las piezas en la cámara del reactor. Esto favorece la difusión del nitrógeno activo en la superficie de las piezas y la formación de nitruros en los propios granos del metal; con lo que se obtiene una capa dura y tenaz. Además del nitrógeno se añaden otros gases, que actúan de soporte, tales como: gas carburante, argón, hidrógeno, etc.

La cinética de crecimiento de la capa de nitruros y la de las soluciones sólidas es más rápida en la nitruración iónica que en la nitruración gaseosa. Ventaja que se debe principalmente a: (1) a la pulverización catódica (desprendimiento acelerado de iones metálicos del cátodo); (2) a la activación de la superficie de las piezas y destrucción de las películas de óxidos; y (3) a la implantación de los iones de nitrógeno.

Por medio del tratamiento de nitruración iónica se obtienen estructuras en la superficie de las herramientas; pero siempre cuando éstas se nitruran a temperaturas convenientes

y con la colaboración de una adecuada atmósfera nitrurante. Por ejemplo: con temperaturas próximas a los 550 °C y en presencia de pequeños contenidos de azufre, incorporado en forma de gas sulfhídrico, se obtiene la fase ϵ .

Con temperaturas de nitruración comprendidas entre 450 y 570 °C, y aportando la adecuada dosificación de nitrógeno, se forma solamente la fase γ' (véase figura 20). Nitrurando a temperaturas comprendidas entre 490 y 570 °C, y disminuyendo la concentración de nitrógeno en la atmósfera del horno, se obtiene únicamente la solución sólida α .

La nitruración iónica es uno de los procesos fáciles de controlar para conseguir el tipo de capa más adecuado y en el menor tiempo de tratamiento. Espesores de capa de 0.20 a 0.30 mm, se obtienen con tiempos de nitruración comprendidos entre las 50 y 60 horas y a unas temperaturas normales de tratamiento (de 450 a 520° C).

Esta facilidad operativa y de control se traduce, únicamente, en ventajas de tipo técnico. Por el contrario, tiene inconvenientes muy significativos, tales como: (1) alto costo de las instalaciones y el de su mantenimiento; (2) elevado precio de nitruración; y (3) la gran servidumbre que representa la colocación ordenada de las piezas en el reactor con similitud física de las mismas.

La nitruración iónica de útiles y herramientas tiene todavía, a nuestro juicio, problemas de no fácil solución; particularmente, en presencia de capas inferiores a 0,15 mm. Así sucede en herramientas de difícil geometría y complicado diseño, donde se obstaculiza la libre difusión y la formación de los nitruros en taladros y cavidades de cierta profundidad, debido a la dificultosa geometría de la pieza.

En este tipo de nitruración se usa una corriente eléctrica para ionizar el gas nitrógeno a baja presión en vacío. Los iones son acelerados hacia la pieza nitrurada por un potencial eléctrico, la pieza se calienta por el choque de iones, los que además son fuente de nitrógeno. El proceso es un 30 a 50% más rápido que la nitruración convencional.

4.5. BORACIÓN O BORURADO

Se trata de un proceso poco usado en nuestro país. Es el recubrimiento de una capa superficial del acero con boro, adquiriendo una alta dureza, en el rango de 1800 a 2000 BHN, además, es resistente al desgaste y a la corrosión en distintos medios, además posee buenas propiedades tribológicas ($\mu \cong 0.1-0.12$)

La boración de las piezas de acero se realiza comúnmente por electrolisis de piezas fundidas que contiene boro, la pieza desempeña el papel de cátodo en un baño con borax fundido ($\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$). El proceso puede ser realizado sin electrolisis en baños con cloruros fundidos (fluoruro de sodio o cloruro de bario) a los cuales se les agrega el ferroboro en estado de polvo o carburo de boro.

Se han obtenido excelentes resultados durante la boración gaseosa. En este caso, el recubrimiento con boro se realiza en un medio de diborano (B_2H_6) en mezcla de hidrógeno a una temperatura de 850 a 900 °C.

En la superficie del acero se forma boruro de hierro FeB, más abajo, el boruro Fe_2B y solución sólida α . El carbono y los elementos de aleación disminuyen el espesor de la capa borada.

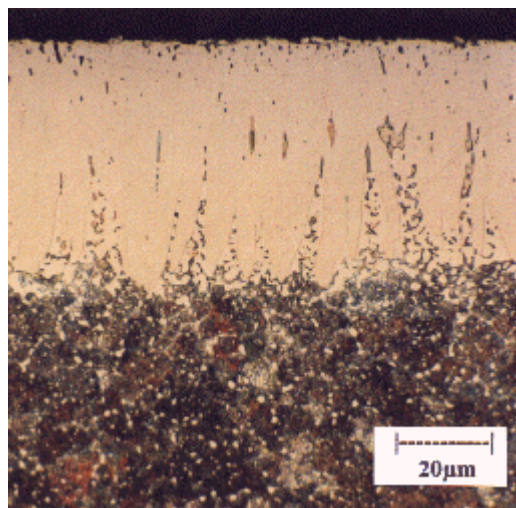


Figura 26. Capa de boruro en un acero aleado con 6 % de Cr (espesor de la capa: 50 μm)

A boración se someten piezas que se emplean en los equipos de la industria petrolera, por ejemplo, se recubren con boro los casquillos de las bombas de lodos de petróleo para aumentar su resistencia al desgaste por abrasión.

Las ventajas de este tratamiento térmico son: requiere de tecnología sencilla, seguridad de la plantilla, el ciclo del tratamiento es corto y se aplica a todos los aceros.

4.6. SULFINIZACIÓN

Se trata de un tratamiento termoquímico que consiste en introducir pequeñas cantidades de azufre, nitrógeno y carbono en aleaciones ferrosas y de cobre.

Mejora considerablemente la resistencia al desgaste, por la acción del azufre que se incorpora a la masa metálica por calentamiento a baja temperatura en un baño de sales

El método de trabajo que se suele seguir es el siguiente:

- 1 Mecanizado completo de la pieza dejando un exceso de 0.02 mm para terminar luego por rectificado.
- 2 Se precalientan las piezas
- 3 Se introducen las piezas en el baño de sales (activos + reductores + de soporte) a una temperatura de 560 a 570 °C con 60 minutos de permanencia se obtiene 0.15 mm de espesor. En los casos en los que no es necesario el rectificarlo con 0.15 mm de profundidad es suficiente.
- 4 Se sacan del horno las piezas y se sumergen en agua para que se desprendan las sales.
- 5 Se rectifican las piezas en el caso que sea necesario.

Como resultado de la operación se advierten dos acciones principales:

- a) Una corrosión superficial, que origina microcavidades o “piel de gallina”.
- b) Polidifusión de C, S y N₂. Es un efecto autopropagante, es decir, a medida que se desgasta va penetrando, por lo que siempre tendrá la misma resistencia al desgaste.

En este tratamiento la resistencia al desgaste es debida más que a un aumento de dureza, a la gran aptitud que tiene la capa sulfinizada de comportarse en cierto modo como los metales antifricción y los constituyentes duros incrustados en la matriz favorecen y mejoran la resistencia al roce de las piezas de acero. Estas características se mantienen hasta los 600 °C.

4.7. LA ALITACIÓN (CALORIZACIÓN)

Es la saturación de la capa superficial de la pieza hecha de acero y otros metales con aluminio, y se hace para elevar su resistencia al calor.

La alitación sólida, así como la cementación en medio sólido, se hace en cajas para cementación. En este caso las piezas se empaican con una mezcla compuesta de 49% de ferroaluminio, 49% de óxido de aluminio (Al_2O_3) y 2% de cloruro de amonio (NH_4Cl). Las cajas empacadas permanecen en el horno a temperaturas en el rango de 950 a 1 000 °C durante un tiempo de 4 a 15 horas, después se enfrían dentro del horno hasta una temperatura 500 a 400 °C y por último, al aire. El proceso se verifica según las siguientes reacciones químicas:

- a) $NH_4Cl \rightarrow NH_3 + HCl$;
- b) $6HCl + 2Al \rightarrow 2AlCl_3 + 3H_2$;
- c) $Fe + AlCl_3 \rightarrow FeCl_3 + Al$;
- d) $Al + Fe \rightarrow Fe(Al) + Fe(Al)$.

Debido a la reacción se obtiene aluminio atómico, que forma, según a reacción d), la solución sólida de aluminio en hierro. El espesor de la capa alitada depende de la temperatura de calentamiento y del tiempo de permanencia a esta temperatura y varía corrientemente de 0.3 a 0.5 mm. Durante el servicio de la pieza a altas temperaturas, en su superficie se forma una capa resistente de óxido Al_2O_3 que protege al metal contra la oxidación posterior.

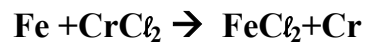
En la práctica se aplica con éxito la *alitación líquida* en un baño de aluminio fundido con adición de cloruro de aluminio y la *alitación gaseosa* en una retorta con cloruro de

aluminio, AlC_3 .

Para eliminar la fragilidad las piezas tratadas se someten al recocido de difusión a una temperatura de 900 a 950 °C.

4.8.- CROMIZADO.

Así como la alitación, este proceso se puede realizar en medios sólido, líquido o gaseoso que contengan cloruro de cromo, $CrCl_2$. Corrientemente, el proceso se efectúa a la temperatura de 900 a 1000 °C y con permanencia a esta temperatura unas 10-12 horas. Como consecuencia de la reacción:



Se forma el cromo catódico que se difunde en el acero. En los aceros de bajo contenido de carbono, se forma en la capa de difusión la solución sólida de cromo en hierro Fe (α); en los aceros de elevado contenido de carbono, además de la saturación de la solución sólida con cromo, se forma también carburo de cromo Cr_7C_{23} . El cromado por difusión eleva la resistencia a la corrosión, resistencia a la formación de herrumbre, aumenta la dureza y resistencia al desgaste de las piezas de acero y fundición.

4.9. SILICACIÓN

Es el proceso de saturación de la capa superficial de la pieza con silicio, se puede efectuar en medios sólido, líquido y gaseoso que contengan cloruro de silicio ($SiCl_4$). La silicación en medio gaseoso a 1050 °C durante 2 horas, da una profundidad de la capa saturada de hasta de 1 mm. Al difundir el silicio en el acero, se forma en la capa saturada la solución sólida de silicio en hierro α .

La silicación eleva la resistencia a la corrosión en distintos medios: agua de mar, ácidos nítrico, sulfúrico y clorhídrico. En este caso aumenta también considerablemente la resistencia al calor y la resistencia al desgaste de las piezas de acero y fundición.

4.10. ACEROS UTILIZADOS PARA TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS

4.10.1. Aceros simples para cementar:

Los aceros al carbono para cementación contienen hasta un 0.25% de carbono, de 0.15 a 0.35% de silicio y de 0.3 a 0.6% de manganeso, aunque a veces se utilizan porcentajes mas elevados de manganeso para mejorar su templabilidad.

Estos aceros en general se templen en agua, consiguiéndose durezas de 60 R_C en la superficie, y en el núcleo una resistencia de 80 kg/mm².

Los aceros al carbono para cementar se emplean para la fabricación de piezas pequeñas y de forma sencilla, utilizándose entonces porcentajes de carbono de 0.08 a 0.12%. Para piezas de mayor tamaño hay que utilizar porcentajes mayores de carbono, hasta de 0.2%, pues de otro modo se endurece muy poco el núcleo central y no puede resistir sin deformarse las presiones que ejerce sobre él la zona exterior cementada al contraerse.

Los aceros al carbono tienen además otro inconveniente y es que al aumentar mucho su tamaño de grano a la temperatura de cementación, por lo tanto quedan frágiles.

Este inconveniente se puede solucionar empleando aceros de grano muy fino, que al crecer queda en tamaños considerados como normales. Pero los aceros de grano fino tienen el inconveniente que su templabilidad es muy baja. Por ello se prefiere utilizar aceros con grano normal, aunque queden más frágiles y sufran mayores deformaciones que los de grano fino.

4.10.2. Aceros aleados para cementar

Los aceros aleados para cementación contienen de un 0.10 a un 0.20% de carbono, 0.3 a 1.0 % de Mn, 0.10 a 0.35% de Si y porcentajes variables de Cr, Ni y Mo.

El manganeso aumenta el tamaño del grano del acero en el proceso de su fabricación; pero esta tendencia puede corregirse con la adición de aluminio.

El manganeso disminuye las temperaturas críticas de temple, lo que reduce el riesgo de deformaciones y descarburizaciones. También mejora la templabilidad, permitiendo en piezas no muy grandes templar en agua.

El níquel baja también las temperaturas críticas, reduciendo, por tanto el peligro de deformaciones y descarburizaciones al poder templar a más baja temperatura. El níquel además mejora la resistencia y tenacidad de los aceros.

El cromo tiende a aumentar el tamaño de grano de los aceros en la fabricación, defecto que se corrige con la adición de aluminio en la colada.

4.10.3. Aceros para nitrurar:

Los aceros para nitrurar son siempre aleados con un contenido de carbono entre 0.25 a 0.50%, según las características mecánicas que se desea obtener en el núcleo.

No se emplean nunca porcentajes inferiores a 0.25 % de Carbono, pues el núcleo no tendría la resistencia necesaria para soportar la presión que ejerce sobre la capa nitrurada. Además se ha comprobado que las capas nitruradas en aceros de porcentajes menores a 0.25% de carbono resultan frágiles. Los elementos de aleación más utilizados son el aluminio, el molibdeno, el vanadio, el cromo y el níquel.

El aluminio es el elemento que más influencia tiene en la dureza de la capa nitrurada.

4.11. RECUBRIMIENTOS METÁLICOS

El uso de los recubrimientos metálicos es una práctica extendida desde la antigüedad ya que constituye, en general, una solución económica que nos permite disfrutar de las propiedades de un metal, muchas veces caro, utilizando como sustrato masivo un material más económico.

Por ejemplo, los herrajes de las puertas pueden lucir bronceados, cromados o dorados y tener las características del bronce, el cromo o el oro, a pesar de que el material base de la pieza sea latón o aluminio. La producción de hebillas y accesorios para el vestido, calzado y marroquinería se ve facilitada porque las piezas se pueden elaborar en aleaciones de cinc, de bajo punto de fusión y bajo costo comparado con los de la plata, el

níquel o el oro que las recubren. La carcasa de una máquina para afeitar es muy liviana si se le fabrica en plástico, y es muy resistente al uso, si se la recubre con cromo. Sin embargo, todas estas ventajas se ven frustradas si el brillo y el color se pierden, o el recubrimiento se cuartea y salta; también si las pulseras o los aros provocan una desagradable reacción alérgica.

Para obtener un buen desempeño, el recubrimiento debe estar correctamente seleccionado, especificado, elaborado y controlado. En particular, el recubrimiento debe estar perfectamente adherido al sustrato, debe tener baja porosidad y un espesor y dureza acorde a la vida útil y prestación del objeto en cuestión.

El espesor es una característica importante en el diseño de la pieza, relacionada a la condición ambiental y al desgaste que deba resistir. Si en la producción de las piezas se establecen las condiciones técnicas que aseguran adherencia y porosidad adecuadas, la durabilidad y el costo de las piezas recubiertas dependerá en gran medida del espesor del recubrimiento.

Consiste en cubrir una pieza metálica con una capa de otro metal (*cinc, estaño, níquel, etc*) *utilizando diversas técnicas* y con ello mejorar sus características frente al desgaste, corrosión, eléctricas, etc. así, como para recuperar piezas ya gastadas o deterioradas.

Los recubrimientos metálicos se puede realizar utilizando varios procedimientos, entre los que se encuentran los electroquímicos, la inmersión en baño y el metalizado a pistola.



Figura 27. Piezas cromadas

BIBLIOGRAFÍA

1. Tratamientos Térmicos de los Aceros.

José Apraiz Barreiro.

Ed. Dossat, S. A. 8ª Edición. 1981.

2. Ciencia e ingeniería de los materiales”

Donald R. Askeland

Ed. Internacional Thomson. México. 3ª edición

4. Aceros. Estructuras y sus tratamientos térmicos.

Felipe Díaz del Castillo R. y Alberto Reyes Solís.

FES-Cuautitlán. 2004.

5. Tecnología de los metales

A. Malishev, G. Nikolaiev y Y. Shuvalov.

Ed. Mir. Moscú. 1988.

6. Ciencia de materiales para Ingeniería.

Carl A. Keyser

Ed. Limusa. México. 1992.

7. Seminario CeControl 1990

Degussa. México.

8. <http://www.bortec.de/boronizing.htm#Borides> - hard on wear

9. http://www.sulphuric-acid.com/TechManual/Materials/materials_alonizing.htm

10. <http://www.inti.gov.ar/hilo/h10/h10-3.php>

