UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL DEL ACERO POR DIFUSION DEL CARBONO EN HIERRO GAMMA

TESIS

EN OPCION DEL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN METALURGIA

PRESENTA

Ing. José Ernesto Bernal Avalos

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. DICIEMBRE 1994

TM
Z5853
.M2
FIME
1994
B4

1020070668

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL DEL ACERO POR DIFUSION DEL CARBONO EN HIERRO GAMMA

TESIS

EN OPCION DEL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN METALURGIA

QUE PRESENTA

JOSE ERNESTO BERNAL AVALOS

SAN NICOLAS DE LOS GARZA N.L. DICIEMBRE 1994

TM
Z58.3
.M2
FIME
1994
B4

FONDO TESIS

166784

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

Los miembros del comite de tesis recomendamos que la presente tesis realizada por el **Ing. José Ernesto Bernal Avalos** sea aceptada como opción para obtener el grado de maestro en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en metalurgia

El comite de tesis

M. en C. Joel Puente Sánchez
Asesor

M. en C. José Estrada Rodríguez
Coasesor

M. en C. Tomas Salinas Rodríguez
Coasesor

División de Estudios de Post-grado

San Nicolás de los Garza N. L. Diciembre ____ del 1994

PROLOGO

El presente trabajo ha sido realizado con el objeto de construir un soporte para futura investigaciones en Ingeniería de Materiales ferrosos. Incluye información de primer nivel en el proceso de difusión de carbono en hierro gamma en la zona superficial. Así como estudios metalográficos de diversas aleaciones ferrosas con sus respectivas fotomicrografías.

Además un aspecto comparativo entre el proceso de endurecimiento convencional y el proceso de endurecimiento termoquímico incluyendo diagramas de transformación de enfriamiento continuo, tablas y figuras ilustrativas.

También se hace referencia a los valores mecánicos obtenidos en el proceso de difusión como consecuencia de la alteración microestructural sufrida en la zona superficial de las aleaciones.

Por otra parte se incluye información de todos los equipos para baños de cementación y los cementantes utilizados, así como sus concentraciones más adecuadas para cada proceso. Nos indica además los procedimientos más utilizados para la determinación de la profundidad de la capa cementada, así como las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

Se hace referencia al tipo de tratamiento que se efectúa después de cementado, para tener las condiciones mecánicas más adecuadas tanto en la superficie de la pieza como en el núcleo de la misma.

Por último se incluye un capítulo sobre la cementación y tratamiento en el hierro colado donde se habla sobre los tratamientos para endurecimiento superficial en las fundiciones, sus características y condiciones más adecuadas para desarrollarlo.

Síntesis

Capitulo 1

Se analíza las diferentes formas de clasificaciones de los aceros tomando en cuenta varios métodos de clasificación como los son: según su contenido de carbono en aceros hipoeutectoides, eutectoides y aceros hipereutectoides, también se clasifican en aceros de bajo carbono, medio carbono y alto carbono. Según su uso final que se le dará al acero, como acero para máquinas, para resortes, para calderas, estructural o acero para herramientas. Según el método de fabricación o manufactura como son acero bessemer, de hogar abierto, de horno eléctrico, de crisol, acero al oxígeno. Según su composición química indica por un sistema numérico el contenido aproximado de los elementos importantes en el acero.

Capitulo 2

Dentro de la clasificación de los aceros según el contenido de carbono se presenta en las micro estructuras que presentan los aceros hipoeutectoides, eutectoides e hipereutectoides.

En la clasificación de los aceros desde el punto de vista de sus aplicaciones se dividen en 1) Aceros de fácil en formación en frío, 2) Aceros para tratamientos termoquímicos, 3) Aceros estructurales de alta resistencia mecánica 4) Aceros para herramientas y matrices, 5) Aceros inoxidables y 6) Aceros para otras aplicaciones. También se presenta tablas con algunos ejemplos de cada caso

Capitulo 3

Analizamos los diferentes tratamientos denominados termoquímicos que nos modifican la composición química en la superficie de los aceros así como se analiza materiales cementantes sólidos, cementantes líquidos atmósferas cementantes gaseosas y finalmente atmósferas nitrurantes.

Algunas aplicaciones industriales requieran una superficie dura y resistente al desgaste llamada capa o región superficial y una relativamente suave y tenaz en su interior llamada parte interna, se analizan los métodos que cambian la composición química superficial del acero como son la carburización por la adición de carbono, la nitruración, por la adición de nitrógeno y la cianuración por la adición de carbono y de nitrógeno.

Cementación sólida. Se analizan algunos métodos para efectuar la cementación con materias sólidas, se señalan tres fases diferentes: 1) producción de carbono naciente en las proximidades del acero, 2) Absorción del carbono en la zona periférica del acero y 3) difusión del carbono hacia la zona central, también se marcan los principales inconvenientes de los cementantes sólidos.

Cementación líquida. Es un método de endurecimiento superficial en el hierro y el acero por calentamiento en un baño de cianuro líquido donde se genera la difusión del carbono en el hierro gamma, también se analiza tipos de baños como son de casco ligero y casco profundo, se analiza la penetración de carbono en acero ordinario y aceros aleados a

diversas temperaturas mediante gráficas, así como penetración del carbono en aceros para tiempos y temperaturas variables.

Cementación gaseosa. Habiendo estudiado el papel tan importante que desempeña el oxido de carbono (CO) en la cementación con materias sólidas parece que bastaría colocar las piezas en presencia de ese gas a elevada temperatura para conseguir una capa endurecida. Sin embargo la práctica a demostrado que de esta forma no se consiguen buenos resultados y que para obtener capas cementadas de composición y espesor homogéneos es necesaria la presencia de hidrocarburos en la atmósfera carburante además del oxido de carbono. Se presentan principales gases utilizados como superficie carbonosa en gases carburizantes así como principales variables de proceso.

Nitruración gaseosa. Es un procedimiento de endurecimiento superficial en el que por absorción de nitrógeno se consiguen durezas extraordinarias en la periferia de durezas de acero, se analizan las principales ventajas de este proceso así como la teoría de la nitruración. Se estudia el diagrama hierro-nitrogeno como base de este proceso.

Se analiza la información que afecta el endurecimiento convencional del acero como es la composición tamaño de grano, tamaño de las piezas y medio de enfriamiento así como los factores que intervienen en el temple del acero. Las curvas <S> como son afectadas por la variación en su composición principalmente el contenido de carbono, manganeso y cromo, así como la influencia del tamaño de grano que modifica la situación y la forma de la curva <S> , modificándose por tanto como es natural la velocidad crítica de temple, en aceros de la misma composición. las velocidades críticas de temple de los aceros de grano grueso son menores que las velocidades críticas de temple de los aceros de grano fino.

Se analiza también la influencia del medio de enfriamiento junto con el tamaño y forma de las piezas son los factores que deciden la velocidad de enfriamiento de las piezas de acero en los tratamientos térmicos, también se dan tablas de velocidad relativas de enfriamiento en una bola de 4 milímetros templada desde 850° C.

Se estudia características de los procesos de enfriamiento en el temple de los aceros para conocer la influencia que sobre el temple ejercen los diferentes medios de enfriamiento, es interesantes estudiar las etapas que se presentan en estos procesos. La elección del medio de temple para obtener en el temple de los aceros los mejores resultados conviene utilizar el medio de enfriamiento menos enérgico que sea capaz de comunicar al acero una velocidad de enfriamiento superior a la crítica, también se especifica algunos medios de enfriamiento más empleados en el temple de los aceros como son el agua, aceite, plomo, mercurio y sales fundidas.

Capitulo 4

También contemplamos la templabilidad o penetración de temple que se obtiene de los aceros, así como diversos métodos para estudiar el comportamiento de los aceros en el temple como son: examen de fracturas, examen de dureza, de redondos de diferentes diámetros templados, determinación de las curvas de dureza empleando discos de aceros, curvas de resistencia y ataque químico de las secciones templadas.

Revenido. Su objeto no es eliminar los efectos del temple si no modificarlos disminuyendo la dureza y resistencia, aumentando la tenacidad y eliminando tensiones

internas también se analiza la teoría del revenido estudiando sus etapas que suceden durante el proceso.

Capitulo 5

El Fenómeno de difusión. Consiste simplemente en que los átomos de un sólido saltan continuamente de una posición en la estructura a otra vecina. Como resultado de la energía térmica, todos los átomos están constantemente vibrando alrededor de su posición de equilibrio. La energía asociado a estas vibraciones térmicas es suficiente para ser que, en condiciones apropiadas, un átomo salte abandonando la posición que ocupaba en la red. Evidentemente la temperatura es un factor importante que determina la posibilidad que ocurra un salto.

Capitulo 6

Análisis de transformación del acero en estado sólido. Como es bien conocido, los aceros aleados sufren cambios completos de estructuras cuando son enfriados en la condición austenitica. Esto es porque los elementos aleantes (o combinación de ellos) retrasan la transformación, también disminuyen el coeficiente de transformación durante el enfriamiento continuo. Los parámetros que controlan las características de templebilidad son: a) La composición química, b) El tamaño de grano, c) El tipo de refrigerante (velocidad critica de temple) y d) El tamaño de la pieza (efecto de masa).

Capitulo 7

Baños de cementación. Para el tratamiento térmico de los aceros, se emplean cada día más sales de baños de sales fundidas. Están constituidas por cantidades variables de cloruros, carbonatos, nitritos, nitratos y cianuros de sodio, potasio y bario, y se utilizan en temperaturas variables desde 150° C a 1300° C. La utilización es a veces para enfriamiento, y otras veces, en cambio se utilizan para calentar las piezas y también para cementarlas y nitrurarlas. De acuerdo a su utilización se clasifican en seis grupos: 1.- Sales que se emplean en un intervalo de temperatura comprendido entre 150 y 400° C, 2.- Para calentar durante el revenido de herramientas y piezas a temperaturas comprendidas entre 400 y 600° C, 3.- Sales que se emplean para el calentamiento en el temple de herramientas en el intervalo de 700 a 900° C, 4.- Sales para cementar, 5.- Sales para nitrurar herramientas y 6.- Sales para el calentamiento en le temple de acero rápido y de alta aleación del tipo H.

Capitulo 8

Características mecánicas de las piezas cementadas. En la capa cementada las durezas oscilan en los 60 Rockwell-C después del proceso de temple y revenido en los aceros aleados con cromo y molibdeno se adquieren durezas ligeramente superiores debido a la formación de carburos en dicha capa. Las características mecánicas en el núcleo principalmente la resistencia a la tensión son de 45 a 140 kilogramos por milímetro cuadrado. Si los aceros son de grano grueso se aplica un doble templado (a 925 y 780° C) si es de grano fino un temple de 780° C. Para conocer las características que se obtienen en el corazón de las piezas cementadas, se somete a las probetas de acero a una cementación en blanco es decir tratar las piezas a la misma temperatura y tiempo pero sin el cementante de

esta forma los resultados que se obtienen son idénticos a los que corresponde al corazón de las piezas después del tratamiento.

Capitulo 9

Determinación de la profundidad de la capa cementada. Para conocer en los procesos de cementación la penetración del carbono y nitrógeno se emplean los siguientes métodos a) Análisis metalografico. En este método se determina con precisión la dimensión de la capa cementada en una observación de 10 a 100 aumentos, b) Método de fractura. Utilizando varillas de acero de 6 a 12 mm de diámetro cementadas y templadas y posteriormente se rompen pudiendo observar en la fractura una capa periférica dura que presenta un grano más fino que el núcleo, c) Método de dureza. En este ensayo se cementa y templa una varilla de 100 mm de longitud y de 10 a 30 mm de diámetro seguidamente se rectifica ligeramente en forma de cono después se miden durezas a lo largo de toda la generatriz, el espesor de la zona de alta dureza señala la profundidad de la capa cementada. d) Análisis químico. Este método consiste en analizar las virutas obtenidas del mecanizado de una muestra cementada en escalones de 0.10 mm y analizando el contenido de carbono de cada escalón.

Capitulo 10

Tratamientos convencionales después del cementado. Se pueden aplicar varias clases de tratamientos según el tipo de acero y la elección dependerá de la tendencia de este a adquirir una estructura grosera durante la cementación y de las características que se quieran obtener en el corazón y en la superficie, algunos de ellos se describen a continuación: a) Cementación, temple directo desde la temperatura y revenido final, este se da cuando se cementa en baños de sales o en atmósfera carburante, b) Cementación, enfriamiento lento, temple entre Ac_1 Ac_3 y revenido final, se emplean aceros de alta elección que son de grano fino y no necesitan regenerar el corazón, c) Cementación, enfriamiento lento, temple arriba de Ac_3 , se utilizan en aceros de grano fino y de media elección obteniéndose máxima resistencia en el núcleo, d) Cementación, enfriamiento lento, primer temple, arriba de Ac_3, segundo temple arriba de Ac_1 y revenido final. Se utiliza para aceros al carbono en la cementación crece mucho el grano.

Capitulo 11

Cementación del hierro colado. Las propiedades y la microestructura de las fundiciones pueden ser modificadas y mejoradas por medio de ciertos tratamientos térmicos. El recocido, templado y revenido son los más empleados, sin embargo, también se pueden emplear métodos de endurecimiento superficial cuando se desea aumentar la resistencia al desgaste de las fundiciones grises endureciendo únicamente la zona periférica. Los métodos más empleados es el flameado o calentamiento superficial, el calentamiento por inducción de corrientes eléctricas. Las fundiciones templadas en su superficie mediante el colado en coquilla metálica donde se obtiene una capa periférica de fundición blanca y un corazón de hierro gris y finalmente un método termoquímico de nitruración gaseosa o líquida en el que se obtienen durezas superficiales elevadas arriba de 1100 Vickers manejando temperaturas del orden de 500° C y tiempos de 70 a 90 horas.

Endurecimiento superficial del acero por difusión de carbono en hierro gamma

Índice

Introducción

1.1.i Historia 3
1.2.i Hierro como elemento 3
1.3.i Sistema hierro carbono 5

Capitulo 1 Aceros y sus clasificaciones

1.1 Clasificación según el contenido de carbono 9
1.2 Clasificación de los aceros desde el punto de vista de sus aplicaciones. 10

Capitulo 2 Microestructuras de algunos aceros

2.1 Microestructuras de aceros de bajo carbono recocidos y normalizados 22
2.2 Microestructuras de aceros de alto carbono descarburizados 24
2.3 Microestructuras de aceros cementados en ambiente gaseoso. 25
2.4 Microestructuras de aceros cementados. 27
2.5 Microestructuras de aceros cementados y tratados térmicamente. 29
2.6 Microestructuras de fundiciones grises tratadas por nitruración 33

Capitulo 3 Tratamientos termoquímicos

3.1 Introducción 34
3.2 Cementantes sólidos 45
3.3 Cementantes líquidos 51
3.4 Atmósferas cementantes gaseosas 62
3.5 Atmósferas nitrurantes 66

Capitulo 4 *Endurecimiento convencional*

4.1 Teoría de temple. 76
4.2 Revenido. 95

Capitulo 5 Fenómenos de difusión

5.1 Redes. 98
5.2 Mecanismos de difusión. 102
5.3 Leyes de difusión. 105

Capitulo 6 *Análisis de transformación del estado sólido del acero*

6.1 Introducción. 114
6.2 Ensayo Jominy. 117
6.3 Curvas TTT en aceros de bajo carbono. 118
6.4 Curvas TTT en aceros de medio carbono 122
6.5 Curvas TTT en aceros de alto carbono 129

Capitulo 7 Baños de cementación
7.1 Equipos para baños 131
7.2 Determinación de la concentración del baño 136

Capitulo 8 *Características mecánicas de las piezas cementadas*
8.1 Introducción. 138
8.2 Características de la capa cementada 139
8.3 Características del núcleo central 141

Capitulo 9 *Determinación de la profundidad de la capa cementada*

9.1 Introducción 146
9.2 Métodos metalograficos 146
9.3 Métodos por fractura 146
9.4 Métodos por dureza 147
9.5 Método de análisis químico 147

Capitulo 10 *Tratamientos convencionales después del cementado*
10.1 Introducción 148
10.2 Cementación temple directo desde la temperatura de cementación y revenido . . . 148
10.3 Cementación, enfriamiento lento temple a temperatura intermedia entre Ac1 Ac3 y revenido final 148
10.4 Cementación, enfriamiento lento, temple a temperatura ligeramente superior a Ac3 y revenido final 149
10.5 Cementación, enfriamiento lento, temple a temperatura ligeramente superior a Ac3, segundo temple a temperatura ligeramente superior a Ac1 y revenido final . 149
10.6 Austempering y martempering. 149

Capitulo 11 Cementación del hierro colado
11.1 Introducción 151
11.2 Recocido 151
11.3 Temple y revenido. 154
11.4 Endurecimiento superficial de las fundiciones por flameado 157
11.5 Nitruración de las fundiciones. 157
11.6 Fundiciones templadas 158
11.7 Microestructura de la fundición blanca. 161

Conclusiones 163

Bibliografía 166

Introducción

1.1.i. Historia

Evolución de los principales procesos y técnicas empleadas para la fabricación del hierro y del acero y referencia de algunos de los más importantes acontecimientos industriales y científicos ocurridos en la historia de la humanidad.

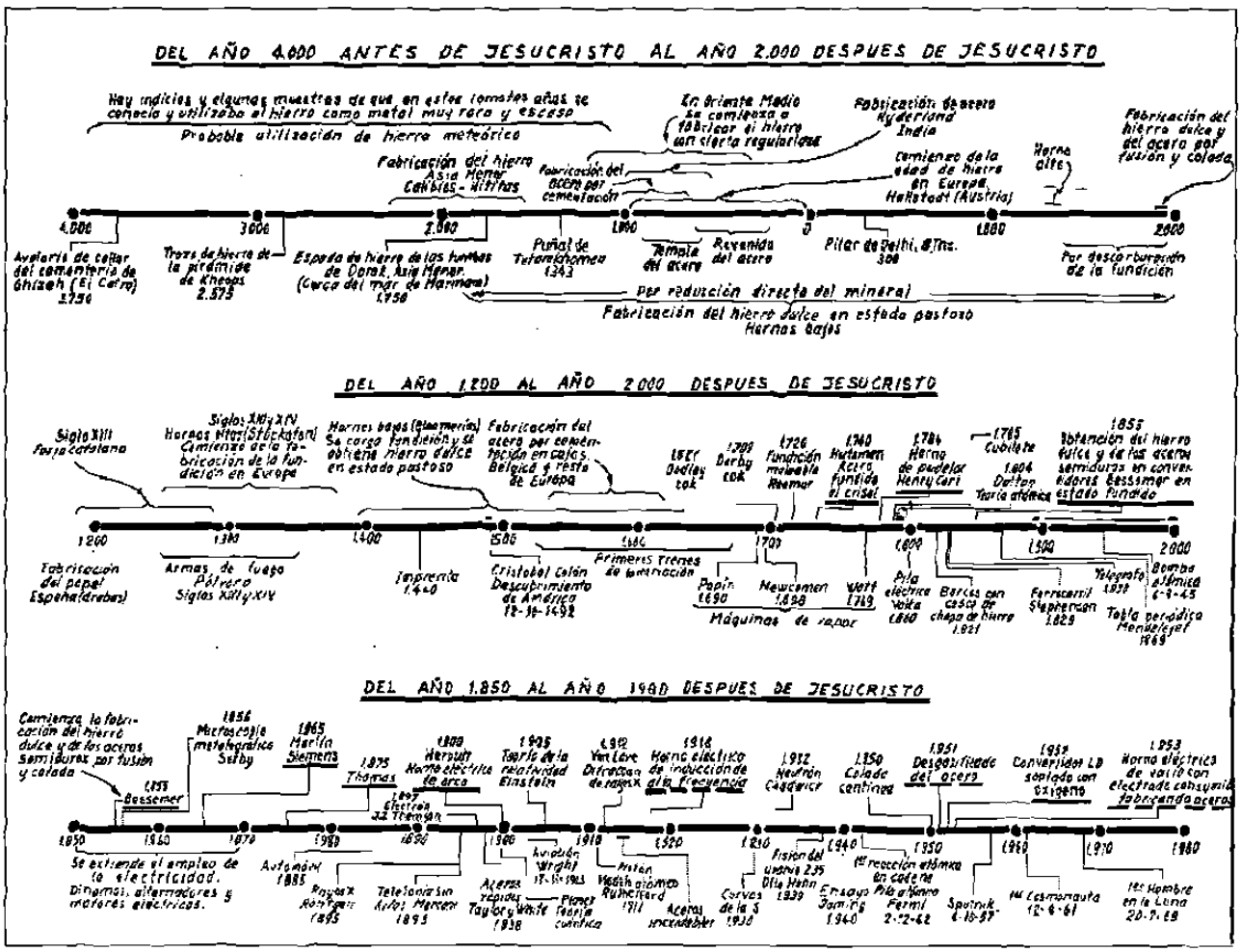


Figura 1 Historia del acero

1.2.i.- Hierro como Elemento

En los sistemas metalúrgicos se encuentran muchas especies y distribuciones de fases sólidas. La causa fundamental de esta variedad es la naturaleza cristalina de dichas fases.

Sin embargo, a continuación vamos a estudiar diversos aspectos adicionales de las estructuras cristalinas que afectan profundamente las microestructuras reales que se encuentran en las aleaciones y metales comerciales.

Alotropía o polimorfismo. Muchos de los elementos metálicos existen en formas cristalinas alternativas, que dependen de las condiciones externas de temperatura y presión.

Este fenómeno se llama *alotropía o polimorfismo.* Bajo las condiciones normales de presión atmosférica, cada estado alotropico de un metal existe en equilibrio durante un intervalo de temperaturas, como se muestra en la figura 2 en el caso del hierro.

A temperaturas por debajo de 910°C, los átomos de hierro se encuentran en los puntos de una red espacial cúbica centrada. Si este trozo de hierro se calienta hasta temperaturas por encima de los 910°C, los átomos formaran una fase sólida diferente, en la que los átomos de hierro se encuentran en los puntos de una red cúbica de caras centradas. Al calentar el hierro hasta una temperatura por encima de los 1400°C se produce un segundo cambio alotropico. La fase cúbica de caras centradas se hace inestable y se transforma en una fase cúbica centrada. Cuando un metal de un estado alotrópico a otro, casi todas sus propiedades varían, pero el cambio de mayor importancia desde el punto de vista comercial es uno aparentemente trivial; esto es, el descenso de solubilidad del carbono en el hierro sólido cuando el hierro cambia de fase gamma a la alfa. Este aspecto es la base del temple del acero y se estudiará detalladamente mas adelante.

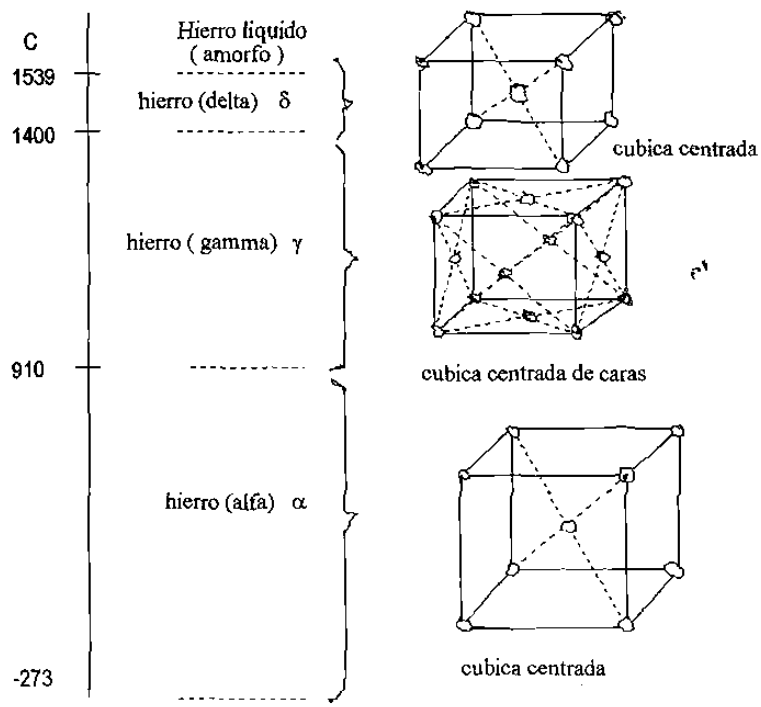


Fig. 2 Intervalos de temperatura en los que las formas alotropicas de hierro existen en condiciones de equilibrio

Aunque las transformaciones alotropicas que se producen en el hierro son de la mayor importancia industrial, existe otros dos ejemplos de Alotropía que merecen atención. Uno de ellos es el cambio de red hexagonal compacta a la estructura cúbica centrada que se produce en el titanio a temperaturas superiores a los 885°C.

Se analizará que dicha demostración afecta en forma vital a la tecnología de las aleaciones de titanio. Otro ejemplo importante de Alotropía tiene lugar en el uranio.

La fase alfa que se encuentra en temperaturas bajas, es ortorrombica y se mantiene hasta los

668°C. Desde 668 a 774°C el uranio presenta una compleja estructura tetragonal beta con 30 átomos por cerda unitaria mientras que por encima de los 774°C la fase estable es una red cúbica centrada. Al forjar o laminar uranio que se encuentra en estado alfa existe una fuerte tendencia a que se produzca una orientación preferida de los ejes cristalinos.

Los cristales de uranio alfa se comportan de forma poco corriente al ser calentados, pues se contraen en una dirección y se dilatan fuertemente en las otras dos direcciones. Los efectos combinados de la orientación preferida y de la dilatación térmica no uniforme pueden producir una gran distorsión en una probeta de uranio que dicha probeta puede aumentar muchas veces su tamaño original Esta dificultad se puede vencer, en gran parte, si la orientación preferida calentando el uranio hasta el intervalo de temperaturas en que se forma la fase beta y después enfriándola rápidamente para que se orienten al azar los granos de fase alfa.

1.3.i.- Sistema hierro carbono

El hierro es un constituyente fundamental de algunas de las mas importantes aleaciones de ingeniería. En una forma casi pura, conocida como *hierro dulce,* se utiliza en las alcantarillas para drenaje, material para techos y conductos, y como base para sobre el esmaltar porcelana en refrigeradores, estufas, lavadoras, etc. Un análisis típico de hierro forjado es:

carbono	0.06%
manganeso	0.045%
fósforo	0.068%
azufre	0.009%
silicio	0.101
escoria en peso	1.97

Si se deja enfriar muy lentamente una muestra de hierro lo más puro posible, desde el estado liquido, se puede observar (figura 3) que se solidifica instantáneamente a 1535°C

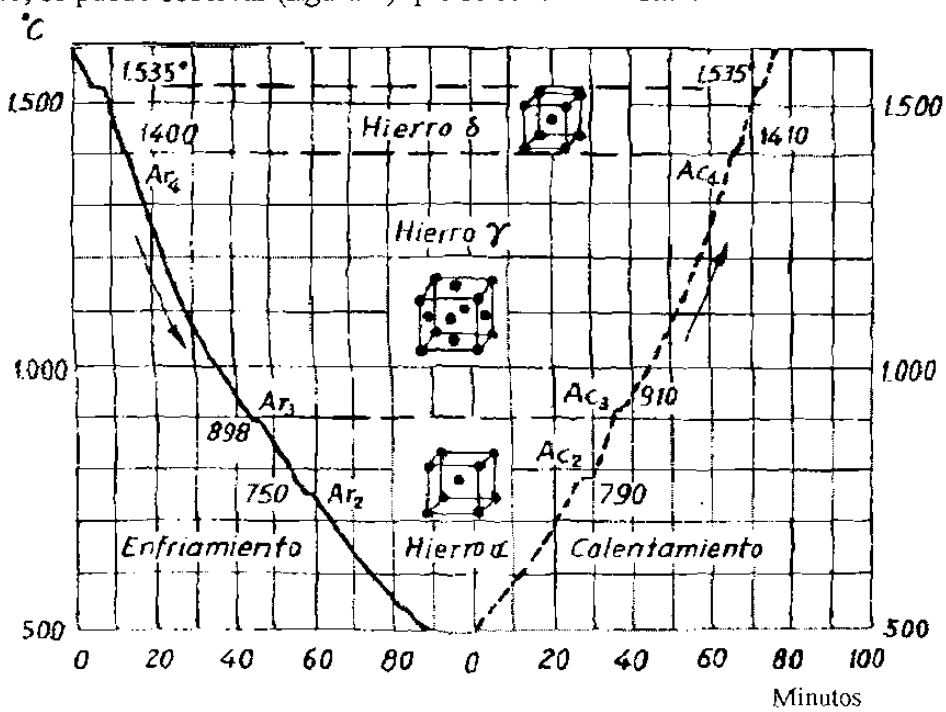


Figura 3 curva de enfriamiento y calentamiento del hierro puro

Al continuar descendiendo la temperatura no se observa nada anormal, en el proceso de enfriamiento, hasta 1,400°C entonces se nota una disminución en la velocidad de enfriamiento debido a un desprendimiento espontaneo de calor. Luego, hacia a los 898°C, se produce otro desprendimiento de calor y se aprecia otra disminución en la velocidad de enfriamiento bastante neta y pronunciada.

Hacia los 850°C vuelve a ocurrir otra parada en el enfriamiento, que es ya la ultima antes de llegar a la temperatura ambiente.

Esas temperaturas en las que ocurre ese fenómeno se llama temperaturas o puntos críticos y se denominan Ar_4, Ar_3, Ar_2, respectivamente.

La parada a 1400°C (Ar_4) corresponde a un cambio alotrópico del hierro que pasa del estado de hierro delta al de hierro gamma. El punto Ar_3 a 898°C, señala la transformación del hierro gamma en hierro alfa no magnético y el punto Ar_2 a 750°C, corresponde a la transformación del hierro alfa no magnético en hierro alfa magnético.

Cuando el proceso es inverso y se calienta el hierro desde la temperatura ambiente hasta la de 1550°C, los fenómenos se presentan de forma muy parecida, pero a temperaturas muy superiores, recibiendo ahora esos puntos críticos los nombres Ac_2, Ac_3, Ac_4.

El Ac_2 se presenta hacia los 790°C, el Ac_3 a los 910° Cy el Ac_4 a 1410°C, aproximadamente. Esta diferencia que existe entre las temperaturas criticas en el enfriamiento y en el calentamiento, revela la resistencia que oponen los sistema cristalinos a transformarse, indicando además que las temperaturas criticas reales se hallan sin duda entre Ac_3 y Ar_3 y Ac_2 y Ar_2.

Si se pudiera realizar esos calentamientos o enfriamientos a una velocidad infinitamente lenta, los puntos críticos se hallarían a la misma temperatura en el calentamiento y en el enfriamiento. A esos puntos críticos se les ha dado el nombre de Ar y Ac, recordando el proceso que han seguido.
(en francés enfriamiento "refroidissement", r y calentamiento, "chauffage"; c.).

Cuando hablamos del diagrama teórico hierro carbono, que se refiere a calentamientos o enfriamientos infinitamente lentos, podemos decir que la transformación perlita-austenita, o a la inversa, austenita-perlita, se verifica a 721°C, y en cambio podemos referirnos a un proceso industrial de calentamiento, diremos por ejemplo, que en el calentamiento la transformación perlita-austenita ha ocurrido a 725° o 740°C, y el enfriamiento a 690° o 700°C. Además hay que tener en cuenta que, así como la temperatura teórica de 721°C es fija, las otras dependen de la velocidad de calentamiento o enfriamiento.

De las diversas transformaciones de los aceros la perlita austenita es una de las mas importantes. Además también la que mejor se señala en los ensayos dilatométricos y en los pirómetros de los aparatos de determinación de puntos críticos y aun en los hornos de tratamiento cuando los aceros llegan a alcanzar esa temperatura.
El hierro puro no sufre en cambio ninguna transformación en la zona de 721°C

Hierro alfa y hierro gamma

El hierro muy puro, de bajísimo contenido de carbono, a temperaturas inferiores a 898°-910°C, se presenta en forma de hierro alfa, que no disuelve al carbono o carburo de hierro, o lo disuelve en cantidades pequeñísimas, variables de 0.024% a 721° a 0.008% a la temperatura ambiente (figura 4).

A temperaturas superiores a 898°-910°C, el hierro se encuentra en forma de hierro gamma, que puede disolver al carbono o carburo de hierro en cantidades hasta de 1.7%.

El hierro alfa no magnético aparece en intervalos 910°-768°C y el hierro alfa magnético a temperaturas inferiores a 768° (figura 5) .

El hierro alfa no magnético y el hierro alfa magnético cristalizan en la misma forma, y su aptitud de disolución del carbono, también es casi idéntica

El hierro gamma se diferencia también del hierro alfa por su distinta disposición atómica.

El hierro en estado sólido a la temperatura ordinaria (hierro alfa) adopta la disposición de cubos centrados, en cambio, a altas temperaturas (hierro gamma) se presenta con disposición atómica de cubos de caras centradas (figura 6)

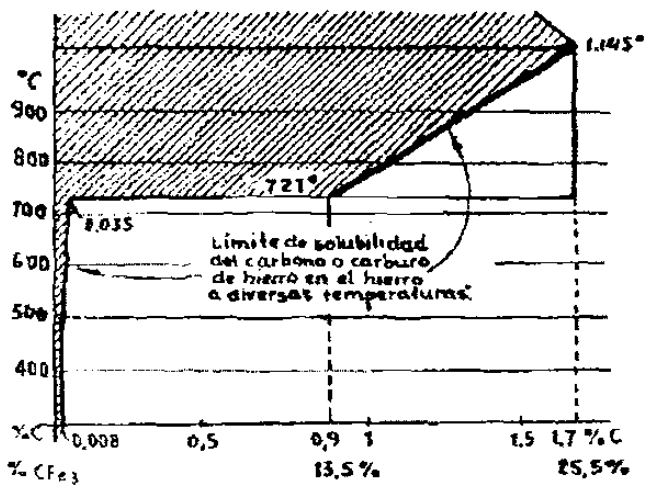


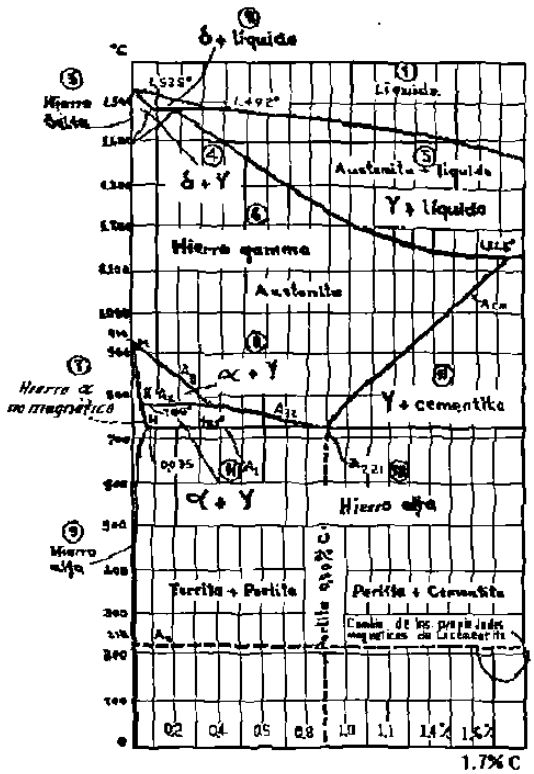
Figura 4 Solubilidad del carbono o carburo de hierro en el hierro en función de la temperatura

Las células cristalinas unitarias de hierro alfa tienen la forma de un cubo con un átomo de hierro en cada uno de los ocho vértices y uno en el centro. Si se eleva la temperatura del hierro puro, esta situación de los átomos se conserva hasta la temperatura de transformación de 910°C, al sobrepasar la cual el hierro alfa se transforma en hierro gamma, y la estructura cristalina se disloca bruscamente apareciendo

La disposición de caras centradas en las que hay un átomo en cada uno de los vértices y un átomo en el centro de la caras.

Hemos pasado pues, del cubo centrado formado por 9 átomos (uno en el centro y 8 en los vértices), al cubo de caras centradas de 14 átomos (6 átomos en las caras y 8 en los vértices).

Estos cubos no están formados en realidad por 9 y 14 átomos, como parece desprenderse de la observación de la figura 6



Zonas de estabilidad de los diferentes estados alotrópicos del hierro en los calentamientos y enfriamientos lentos

Como cada uno de los átomos de los vértices, forma parte de otros 7 cubos vecinos y los de los centros de las caras pertenecen también al cubo adyacente, esos cubos contienen en realidad un numero de átomos menor.

En el hierro alfa (cubo centrado) la materia correspondiente a cada cubo, es en realidad la de dos átomos.

Uno, el átomo central y otro (8 x 1/8 = 1) correspondiente a 1/8 de cada átomo de cada *uno* de los átomos de los vértices

Figura 5

El hierro gamma cada uno de los átomos del centro de las caras pertenece también al cubo adyacente. Resulta, por lo tanto que el cubo elemental tiene solo la materia de 4 átomos. Uno (8 x 1/8 = 1) 1/8 de cada uno de los vértices y tres (6 x ½ = 3) de ½ cada uno de. las seis caras

La longitud de las aristas de esos cubos elementales se denomina constante o parámetro del sistema cristalino, que para el hierro alfa varia de 2.85 a 2.90 Angstrom y para el hierro gamma varia de 3.65 a 3.70 Angstrom

Aunque el cubo elemental del hierro gamma tiene mas átomos que el del hierro alfa, el número total de átomos no ha aumentado al pasar de un estado a otro ha habido una modificación de estructura cristalina, apareciendo ahora cubos de mayor volumen, o sea que después del cambio, la misma masa de hierro esta formada por menos cubos, cada uno de los cuales ocupa mas volumen y tiene mas átomos

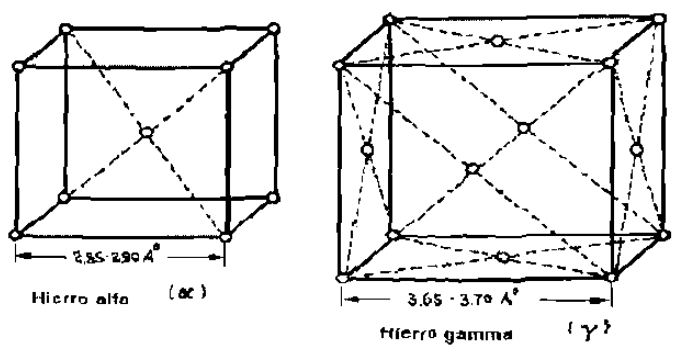


Figura 6