

INTRODUCCIÓN

Por medio de éste trabajo de investigación se pretende cubrir uno de los puntos del programa del curso de Metalurgia y Metalografía, el cual es el desarrollo del diagrama Hierro–Carbono.

El diagrama de hierro–carbono experimenta muchas fases como son la austenita, cementita, ferrita, perlita, bainita, martensita, entre otras.

Estas fases pasan por muchos cambios debido a la temperatura y algunos procesos como son el temple y el revenido, los cuales nos ayudaran a aumentar las propiedades mecánicas de los materiales utilizados tales como la tenacidad, dureza, entre otras.

En este trabajo nos enfocamos a analizar las propiedades físicas y químicas que estos presentan, con el fin de aprender a diferenciar cada una de ellas, teniendo en cuenta algunos factores, como los intervalos de temperatura en donde se forman cada uno de estos productos superponiéndolos en un diagrama de fase.

OBJETIVOS

- Conocer las etapas de un material expuesto a diferentes temperaturas.
- Analizar las propiedades de los materiales después de ser sometidos a tratamientos térmicos.
- Identificar las propiedades físicas y químicas que se pueden dar en las diferentes fases del material para así a aprovecharlas en la fabricación de piezas.
- Aplicar los conocimientos físicos y químicos fundamentales sobre la fabricación del acero a fin de lograr una operación eficiente y un producto de calidad.
- Analizar los conceptos relacionados con la solidificación del Acero para aplicarlos en la obtención de un producto semielaborado de alta calidad.

DIAGRAMA DE HIERRO–CARBONO

Cuando el acero con constitución austenita, se enfriá lentamente, la austenita se transforma en distintos productos; así por ejemplo, si el acero es hipoeutectoide la austenita se transforma inicialmente en ferrita hasta la temperatura eutectoide, a la cual la austenita remanente se transforma en perlita. La micro estructura final será perlita y ferrita proeutectoide en una proporción que depende de la composición y la velocidad de enfriamiento.

Si el acero es de composición eutectoide, la austenita se transforma completamente en perlita; si la composición hipereutectoide se obtiene cementita proeutectoide y perlita como producto de la transformación. Cuando la velocidad de enfriamiento aumenta, la morfología de la ferrita y la cementita proeutectoide cambia y la perlita se hace más fina. A una velocidad elevada, los anteriores constituyentes desaparecen súbitamente a una velocidad de enfriamiento critico, y aparece una estructura nueva más dura que es la martensita.

Estos productos, obtenidos por enfriamiento rápido, son meta estables desde un punto de vista termodinámico de gran utilidad para la ingeniería debido a sus propiedades.

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Austenita: Es una solución sólida de carbono o carburo de hierro en hierro gamma. Puede contener desde 0 – 1.7% de carbono y es, por lo tanto, un constituyente de composición variable. Todos los aceros se encuentran formados por cristales de austenita cuando se calienta a temperatura superior a las críticas. Aunque generalmente es un constituyente inestable, se puede obtener esa estructura a la temperatura ambiente por enfriamiento rápido de aceros de alto contenido en carbono de muy alta aleación.

Su resistencia es de 88 – 105 Kg/ml aprox. Su dureza de 300 Brinell y su alargamiento de 30 a 60%. Es poco magnética, blanda, muy dúctil y tenaz. Tiene gran resistencia al desgaste, siendo el constituyente más denso de los aceros. En los aceros austeníticos de alta aleación se presenta formando cristales poliédricos parecidos a los de la ferrita, pero se diferencia de estos por ser sus contornos más rectilíneos y ángulos vivos.

Ferrita: La ferrita es hierro alfa ósea hierro casi puro que puede contener en solución pequeñas cantidades de silicio, fósforo y otras impurezas.

Tiene aproximadamente una resistencia de 28 kg/ml , 35% de alargamiento y una dureza de 90 unidades de brinell. Es él mas blando de todos los constituyentes del acero, muy dúctil y maleable. Magnética y de pequeñas fuerza coercitiva.

En los aceros pueden aparecer bajo fuerzas muy diversas:

1. Como elementos proeutectoide que acompaña a la perlita.
2. También aparece como elemento eutectoide de la perlita, formando láminas paralelas, separadas por otras láminas de cementita.
3. En la estructura globular propia de los aceros al carbono de herramientas de 0.9 a 1.4% recocido a temperatura próxima de 701°.
4. Los aceros hipoeutectoides templados pueden estar mezclados con martensita o con cualquier elemento de transición.

Cristaliza con estructura BCC y disuelve máximo de 1.0218% de carbono a 727°C , es blando y dúctil.

Cementita: Cementita o también llamada carburo de hierro CFe contiene el 6.67% de carbono y el 93.33% de hierro es el constituyente más duro y frágil de los aceros al carbono, su dureza es superior a los 68 rockwell-c.

Por su gran dureza queda en relieve después del pulido pudiendo conocerse perfectamente el contorno de los granos o de las láminas.

Es magnética a la temperatura ordinaria pero pierde esta propiedad a 218°.

Después de examinar microscópicamente podemos deducir:

- Al formar parte de la perlita se llama cementita perlitica o eutectoide tomando forma de láminas paralelas separadas.
- Como cementita globular se presenta en forma de pequeños glóbulos o granos dispersos en una matriz de ferrita.

Cristaliza con estructura ortorrumbica con parámetros 4.5 x 6.7 Å. Es el constituyente más duro y frágil de los aceros al carbono.

Perlite: Esta se clasifica en: perlita gruesa y perlita fina, las propiedades de estas son:

- En la perlita gruesa tiene una separación entre las láminas de unas 400 mm y una dureza de 200 Brinell, que se obtiene por enfriamiento muy lento dentro del horno. Para observar esta estructura es necesario utilizar unos 500 aumentos.
- En la perlita fina, se obtiene cuando se enfriá dentro del horno bastante rápidamente o cuando se deja enfriar el acero al aire, tiene 250 mm y 300 Brinell de dureza.

Bainita: Se diferencian dos tipos de estructuras. La bainita superior de aspecto arborescente, formada a 500° – 550° , que difieren bastante de la bainita inferior, formada a mas baja temperatura 250° – 400° , que tiene un aspecto acicular bastante parecido a la martensita. La Bainita superior esta formada por una matriz ferrítica conteniendo carburos. Las placas discontinuas de los carburos tienden a tener una orientación paralela a la dirección de las agujas de la propia bainita.

La bainita inferior esta constituida por agujas alargadas de ferrita que contienen delgadas placas de carburos. Estas pequeñas placas son paralelas entre si y su dirección forma un ángulo de 60° con el eje de las agujas de ferrita. Su morfología cambia progresivamente con la temperatura de transformación en el sentido de que el tamaño de las partículas y la acicularidad de la estructura aumenta al disminuir la temperatura.

Martensita: Es el constituyente típico de los aceros templados. Se admite que esta formado por una solución sólida sobre saturada de carbono o carbono de hierro en hierro alfa, y que se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde altas temperaturas.

Sus propiedades químicas varían con su composición, aumentando su dureza, resistencia y fragilidad con el contenido en carbono, hasta un máximo de 0,09% aproximadamente.

Tiene una resistencia de 170 a 250 kg./mm, una dureza de 50 a 68 rockwell–c y un alargamiento de 2.5 a 95%. Es magnética.

Su estructura varia de BCC a tetragonal de cuerpo centrado.

Cuando se forma ni si quiera los átomos de carbono se pueden difundir quedando atrapados en los intersticios octaédricos y creando una ferrita supersaturada, con una estructura cristalina tetragonal de un cuerpo centrado, que es la martensita fresca o blanca.

Cuando el temple se hace a la temperatura correcta, en general se obtienen estructuras de martensita muy fina, de aspecto difuso, que suelen exigir 1000 o más aumento para su visualización. A la retícula tetragonal obtenida en le temple se le llama martensita alfa.

DEFINICIÓN DE ACERO

Acero es una aleación de hierro carbono, con un contenido de carbono inferior al 2.11%, que contiene elementos de aleación, los cuales le confieren propiedades mecánicas específicas para su utilización en la industria. Los productos ferreos con más de 2.11% de carbono se denominan Fundiciones de hierro.

- Atendiendo al porcentaje de carbono, los aceros se clasifican en:

Aceros hipointectoides, si su porcentaje de carbono es inferior al punto S(entectoide), o sea al 0,89%.

Aceros hiperentectoides, si su porcentaje de carbono es superior al punto S.

– Desde el punto de vista de su composición, los aceros se pueden clasificar en dos grandes grupos:

Aceros al carbono: formados principalmente por hierro y carbono

Aceros aleados: Contienen, además del carbono otros elementos en cantidades suficientes como para alterar sus propiedades (dureza, puntos críticos, tamaño del grano, templabilidad, resistencia a la corrosión).

– Con respecto a su composición, puede ser:

De baja o alta aleación y los elementos que puede contener el acero pueden ser tanto deseables como indeseables, en forma de impurezas.

– Elementos que influyen en la resistencia a la corrosión.

El cromo favorece la resistencia a la corrosión; integra la estructura del cristal metálico, atrae el oxígeno y hace que el acero no se oxide.

El molibdeno y el volframio también favorecen la resistencia a la oxidación.

– Clasificación según la aplicación de los metales

En la industria, cada fabricante designa los aceros que produce con una denominación arbitraria, lo cual origina una verdadera complicación a la hora de elegir un acero o de establecer las equivalencias entre aceros de distintos fabricantes. Para evitar este inconveniente, el instituto del hierro y el acero adopta una clasificación que se ha incluido en las normas UNE españolas. (también existen las normas AISI de Estados Unidos)

El IHA clasifica los materiales metalúrgicos en 5 grandes grupos:

F– Aleaciones férreas

L– Aleaciones ligeras

C– Aleaciones de cobre

V– Aleaciones varias

S– Productos sintetizados

Estos productos metalúrgicos se clasifican en series, grupos y tipos.

Las series que corresponden a los aceros van desde la F–100 hasta la F–900

La serie F–300 corresponde a los aceros resistentes a la oxidación y a la corrosión, en particular la serie F–310 corresponde a los aceros inoxidables.

Los aceros se suministran en estado bruto de forja o laminación.

TRATAMIENTOS EN LOS ACEROS

Son los procesos a los que se somete los metales y aleaciones ya sea para modificar su estructura, cambiar la forma y tamaño de sus granos o bien por transformación de sus constituyentes.

El objeto de los tratamientos es mejorar las propiedades mecánicas, o adaptarlas, dándole características especiales a las aplicaciones que se le van a dar la las piezas de esta manera se obtiene un aumento de dureza y resistencia mecánica, así como mayor plasticidad o maquinabilidad para facilitar su conformación.

Los tratamientos pueden ser mecánicos, térmicos o consistir en la aportación de algún elemento a la superficie de la pieza.

Tratamientos térmicos:

recocido, temple, revenido, normalizado

Tratamientos termoquímicos:

cementacion, nitruración, cianuración, etc.

Tratamientos mecánicos:

Se somete al metal a propiedades de propiedades frío o caliente para mejorar sus propiedades mecánicas y además darle formas determinadas.

Al deformar propiedades de un metal mediante martillado, laminado, etc., sus granos son deformados alargándose en el sentido de la propiedades. Lo mismo pasa con las impurezas y defectos, se modifican las estructuras y las propiedades del metal.

Tratamientos en frío:

Son los tratamientos realizados por debajo de la temperatura de recristalización, pueden ser profundos o superficiales.

Aumento de la dureza y la resistencia a la tracción.

Disminuye su plasticidad y tenacidad

Cambio en la estructura: deformación de granos y tensiones originadas, se dice entonces que el metal tiene acritud (cuanto más deformación, mas dureza)

Se produce fragilidad en el sentido contrario a la deformación (falta de homogeneidad en la deformación iguales tensiones en las diferentes capas del metal)

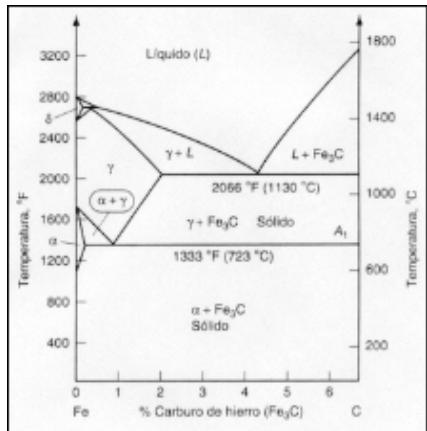
Cuando el metal tiene acritud, solo debe usarse cuando no importe su fragilidad o cuando los esfuerzos solo actúen en la dirección de la deformación

Formación de Martensita en el Acero

El diagrama de fases hierro–carbono de la figura 1 indica las fases de hierro y carburo de hierro (cementita) presentes bajo condiciones de equilibrio. Se asume que el enfriamiento desde una temperatura alta ha sido lo suficientemente lento para permitir que la austenita se descomponga en una mezcla de ferrita y cementita (Fe_3C) a temperatura ambiente.

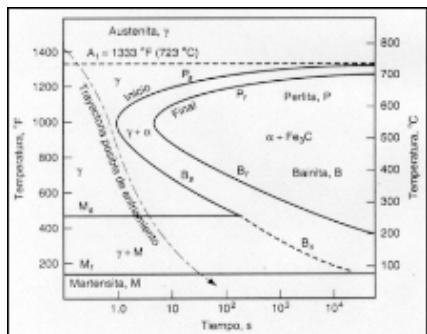
Esta reacción de descomposición requiere de difusión y otros procesos que dependen del tiempo y la temperatura para transformar el metal en su forma final preferida. Sin embargo, bajo condiciones de enfriamiento rápido que eviten el equilibrio de la reacción, la austenita se transforma en una fase de no

equilibrio llamada martensita. La martensita es una fase dura y frágil que da al acero su capacidad única de endurecerse a valores muy altos.



Curva tiempo–temperatura–transformación

La naturaleza de la transformación a martensita puede entenderse mejor usando la curva tiempo – temperatura – transformación (curva TTT) para acero eutectoide ilustrada en la figura. La curva muestra cómo la velocidad de enfriamiento afecta la transformación de austenita en varias fases posibles. Las fases se pueden dividir en 1) formas alternativas de ferrita y cementita y 2) martensita.



Las fases se pueden dividir en 1) formas alternativas de ferrita y cementita y 2) martensita. El tiempo se representa (logarítmicamente por conveniencia) a lo largo del eje horizontal, y la temperatura en el eje vertical. La curva se interpreta partiendo del tiempo cero en la región austenita (en un lugar arriba de la línea de temperatura A₁ para una composición dada) y continúa hacia abajo y a la derecha a lo largo de una trayectoria que muestra cómo se enfriá el metal en función del tiempo. La curva TTT que muestra la figura es para una composición específica de acero (0.80% de C). La forma y posición de la curva es diferente para otras composiciones.

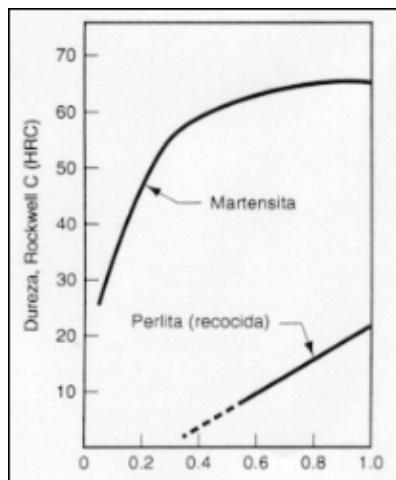
A velocidades lentas de enfriamiento la trayectoria pasa a través de la región, indicando una transformación a perlita o bainita que son formas alternativas de mezclas ferrita–carburo. Como estas transformaciones toman tiempo, el diagrama TTT muestra dos líneas, el inicio y el fin de la transformación conforme transcurre el tiempo, indicando las diferentes regiones de fase por los subíndices s y f , respectivamente. La perlita es una mezcla de fases ferrita y carburo en la forma de placas delgadas paralelas. Se obtiene por enfriamiento lento de la austenita de manera que la trayectoria de enfriamiento pase a través de Ps arriba de la nariz de la curva TTT. La bainita es una mezcla alternativa de las mismas fases, que puede producirse mediante un enfriamiento inicial rápido a una temperatura por encima de Ms, de manera que se evite la nariz de la curva TTT; la siguiente etapa es un enfriamiento mucho más lento para pasar a través de Bs y dentro de la región ferrita–carburo. La bainita tiene una estructura en forma de agujas o plumas que consiste en finas regiones de carburo.

Si el enfriamiento ocurre a una velocidad suficientemente rápida (indicada por la línea punteada en nuestro diagrama), la austenita se transforma en martensita. La martensita es una fase única que consiste en una solución hierro–carbono cuya composición es igual a la de la austenita de la cual deriva. La estructura tetragonal centrada en el cuerpo (BCT) de la martensita, sin que ocurra el proceso de difusión, el cual está en función del tiempo y es necesario para separar la ferrita y el carburo de hierro en las transformaciones precedentes.

Durante el enfriamiento, la transformación de la martensita empieza a cierta temperatura M_s y termina a una temperatura más baja M_f , como se muestra en nuestro diagrama TTT. En los puntos entre estos dos niveles, el acero es una mezcla de austenita y martensita. Si se detiene el enfriamiento a una temperatura entre las líneas M_s y M_f , la austenita se transformará en bainita tan pronto como la trayectoria tiempo–temperatura cruce el umbral de B_s .

El nivel de la línea M_s se deprime por debajo de la temperatura ambiente, haciendo imposible para estos aceros la formación de martensita mediante métodos de tratamiento térmico tradicional.

La dureza extrema de la martensita resulta de la deformación reticular creada por los átomos de carbono atrapados en la estructura BCT, que forman una barrera al deslizamiento. La figura 3 muestra el efecto significativo que tiene la martensita sobre la transformación de la dureza del acero, al aumentar el contenido de carbono.



Procesos de tratamiento térmico

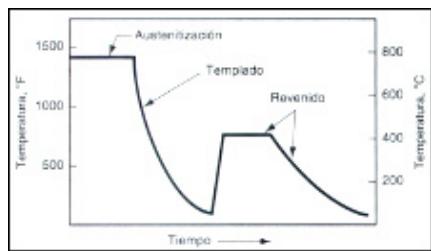
El tratamiento térmico para formar martensita consiste en dos pasos: austenitización y temple. A estos pasos le sigue frecuentemente un revenido para producir martensita revenida. La austenitización implica calentamiento del acero a una temperatura lo suficiente alta para convertirlo entera o parcialmente en austenita. Esta temperatura puede determinarse por medio del diagrama de fase para la composición particular de la aleación. La transformación a austenita implica un cambio de fase que requiere tiempo y calentamiento; en consecuencia, se debe mantener el acero a temperatura elevada por un periodo suficiente de tiempo para permitir que se forme la nueva fase y alcance la homogeneidad de composición requerida.

El templado implica que el enfriamiento de la austenita sea lo suficientemente rápido para evitar el paso a través de la nariz de la curva TTT, como se indica en la trayectoria de enfriamiento de la figura 2. La velocidad de enfriamiento depende del medio de temple y la velocidad de transmisión de calor dentro de la pieza de acero. Se usan varios medios de temple en las operaciones comerciales de tratamiento térmico que incluyen: 1) salmuera (agua salada) generalmente agitada, 2) agua fresca en reposo, 3) aceite en reposo y 4) aire. El temple en salmuera agitada suministra el enfriamiento más rápido de las superficies calentadas de la parte, mientras que el temple al aire es el más lento. El problema es que mientras más efectivo sea el medio de

temple en el enfriamiento, es más probable que cause esfuerzos internos, distorsión y grietas en el producto.

La velocidad de transferencia de calor en el interior de la pieza depende en gran medida de su masa y geometría. Una forma cúbica grande se enfriará mucho más despacio que una lámina delgada pequeña. El coeficiente de conductividad térmica k de la composición particular es también un factor en el flujo de calor dentro del metal. Hay una considerable variación de k para diferentes grados de acero, por ejemplo, el acero al bajo carbono tiene un valor típico de k igual a $2.2 \text{ Btu/hr-pulg}^{-2}\text{F}^{-1}$ ($0.046 \text{ J/seg-mm}^{-2}\text{C}^{-1}$), mientras que un acero de alta aleación debe tener una tercera parte de este valor.

La martensita es dura y frágil. El revenido es un tratamiento térmico que se aplica a los aceros endurecidos para reducir su fragilidad, incrementar su ductibilidad y tenacidad y aliviar los esfuerzos en la estructura de la martensita. El tratamiento implica calentamiento y mantenimiento de ésta a una temperatura por debajo de la eutectoide durante aproximadamente una hora, seguido de un enfriamiento lento. El resultado es la precipitación de partículas muy finas de carburo de la solución martensítica hierro-carbono y la transformación gradual de la estructura cristalina de BCT a BCC. Esta nueva estructura se llama martensita revenida. Una ligera reducción en resistencia y dureza producen una mejora en ductibilidad y tenacidad. La temperatura y el tiempo del tratamiento del revenido controlan el grado de suavización del acero endurecido, ya que el cambio de martensita no revenida a revenida implica difusión.



Los tres pasos del tratamiento térmico del acero para formar martensita revenida pueden ser representados como se muestra en la figura 4. Hay dos ciclos de calentamiento y enfriamiento, el primero para producir martensita y el segundo para revenirla.

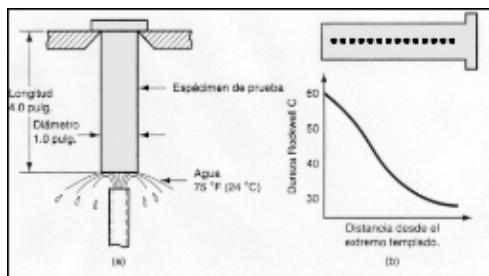
Templabilidad

El término templabilidad se refiere a la capacidad relativa de un acero de ser endurecido por transformación a martensita. Es una propiedad que determina la profundidad por debajo de la superficie templada a la cual el acero se endurece o la severidad del temple requerido para lograr una cierta penetración de la dureza. Los aceros con buena templabilidad pueden endurecerse más profundamente debajo de la superficie y no requieren altas velocidades de enfriamiento. La templabilidad no se refiere a la máxima dureza que se puede lograr en el acero; eso depende del contenido de carbono.

La templabilidad de un acero se incrementa mediante la aleación. Los elementos aleantes que tienen el mayor efecto son el cromo, el manganeso, el molibdeno y el níquel en menor grado. El mecanismo mediante el cual operan estos elementos aleantes es el aumento del tiempo antes de que ocurra la transformación de austenita a perlita en el diagrama TTT. En efecto, la curva TTT se mueve hacia la derecha, permitiendo así velocidades de enfriamiento más lentas durante el apagado. Por tanto la trayectoria del enfriamiento es capaz de seguir más fácilmente una ruta más lenta hacia la línea M_s , evitando el obstáculo impuesto por la nariz de la curva TTT.

El método más común para medir la templabilidad es el ensayo de Jominy del extremo templado. El ensayo involucra el calentamiento de un espécimen normal de diámetro = 1.0 pulg (25.4 mm) y longitud = 4.0 pulg (102 mm) hasta la escala de la austenita y después el templado de uno de sus extremos con agua fría mientras se sostiene verticalmente, como se muestra en la figura 5(a). La velocidad de enfriamiento en el espécimen de

prueba disminuye con el incremento de la distancia desde el extremo que se templa. La templabilidad es indicada por la dureza del espécimen como una función de la distancia desde el extremo templado como se muestra en la figura 5(b).



Aceros resistentes a la oxidación y la corrosión

En los aceros inoxidables, la acción de los elementos aleados es sustancial, además de estructural, y depende del porcentaje del o los elementos de la aleación

El cromo es el elemento aleado que más influye en la resistencia ala oxidación y a la corrosión de los aceros. Un 12% de cromo ya impide la corrosión por el aire ambiente húmedo. Para la oxidación a lataas temperaturas se puede necesitar hasta un 30 %.

El Níquel mejora la resistencia a la corrosión de los aceros al cromo y el Molibdeno mejora la resistencia a la oxidación altas temperaturas.

Aceros inoxidables son resistentes a la corrosión atmosférica, s los ácidos y álcalis y ala oxidación a temperaturas no muy elevadas.

Clasificación según estructura en estado de utilización:

Ferríticos

Martensíticos

Austeníticos

Aceros ferríticos:

Estructura ferrítica a cualquier temperatura (o se convierte en estructura ausenítica en el calentamiento). El grano no se regenera

Composición:

15–18% de cromo y una máxima de 0,12% de carbono

Resistencia a la corrosión superior a la de los martensíticos

20–80% de cromo y una máxima de 0,35% de carbono

Aceros al cromo–aluminio hasta un 4% más resistentes a la oxidación

Son difíciles de soldar y se usan en embuticion profunda por su gran ductilidad.

Son magnéticos.

Aceros martensíticos:

Gran dureza cuando se los enfriá rápidamente una vez austenizados.

12 – 14 % de cromo, 0,20 – 0,50% de carbono

Principalmente en cuchillería.

16–18% de cromo, 0,60–1; 20% de carbono

Por temple adquieren grandes durezas.

Resistentes a la corrosión y al desgaste

Tipo normalizado AISI –311: acero inoxidable extra dulce.

Menos del 0,1% de carbono, 13% de cromo y 0,30 % de níquel.

Resiste a la corrosión atmosférica, la del agua corriente y la de los ácidos y álcalis débiles.

Fácilmente sondable

Usos: utensilios domésticos, grifería, ornamentación, cubertería, etc.

Aceros austeníticos:

Estructura ausenítica a cualquier temperatura

Baja conductividad calorífica

Es el tipo de aceros más utilizados

Tipo normalizado AISI –314 Acero inoxidable ausenítico al cromo níquel conocido como 18/8. Contiene 0,08% de carbono, 18% de cromo y 9% de níquel.

Muy dúctil y resistente a la corrosión atmosférica, al agua de mar, al ataque de productos alimenticios, ciertos ácidos minerales y de la mayoría de los ácidos orgánicos.

Usos: Construcción de equipos para la industria química y de la alimentación, Utensilios de cocina y aparatos domésticos que no requieren soldaduras en las zonas sometidas a fuerte corrosión.

Admite pulidos con acabados a espejo, por lo que también se usa para ornamentación.

DESCRIPCIÓN DEL DIAGRAMA HIERRO-CARBONO

DIAGRAMA HIERRO-CARBURO DE HIERRO

La temperatura a que tienen lugar los cambios alotrópicos en el hierro está influída por elementos de aleación, de los cuales el más importante es el carbono. La figura muestra la porción de interés del sistema de aleación de hierro-carbono. Esta es la parte entre hierro puro y un compuesto intersticial, carburo de hierro, Fe₃C, que

contiene 6.67% de carbono por peso; por tanto, esta porción se llamará diagrama de equilibrio hierro–carburo de hierro.

Antes de estudiar este diagrama, es importante que el lector entienda que éste no es un verdadero diagrama de equilibrio, pues equilibrio implica que no hay cambio de fase con el tiempo; sin embargo, es un hecho que el compuesto carburo de hierro se descompondrá en hierro y carbono (grafito), lo cual tomará un tiempo muy largo a temperatura ambiente, y aun a 1,300°F tarda varios años formar el grafito. El carburo de hierro se llama *fase metaestable*; por tanto, el diagrama hierro–carburo de hierro, aunque técnicamente representa condiciones metaestables, puede considerarse como representante de cambios en equilibrio, bajo condiciones de calentamiento y enfriamiento relativamente lentos.

El diagrama muestra tres líneas horizontales que indican reacciones isotérmicas. En términos generales, la figura A–1 se ha marcado con letras griegas para representar las soluciones sólidas; sin embargo, es práctica común dar nombres especiales a la mayoría de las estructuras que aparecen en el diagrama. La solución sólida se llama *austenita*. La figura A–2 muestra ampliada la porción del diagrama de la esquina superior izquierda. Esta se conoce como *región delta*, debido a la solución sólida . El lector debe reconocer la línea horizontal a 2,270°F, por ser una reacción peritéctica. La ecuación de la reacción peritéctica se puede escribir como:

enfriamiento

Líquido + austenita

calentamiento

TABLA # 1
Propiedades tensiles del hierro forjado sin aleación
y del hierro forjado al níquel

PROPIEDAD	HIERRO FORJADO SIN ALEACIÓN	HIERRO FORJADO AL NIQUEL
Resistencia tensil, lb / pulg	48,000	60,000
Punto de cedencia lb / pulg	30,000	45,000
Elongación, porcentaje en 8 pulg	25	22
Reducción en área, porcentaje	45	40

La solubilidad máxima del carbono en Fe b.c.c. es de 0.10% (punto M), mientras que en el Fe f.c.c. es mucho mayor. La presencia de carbono influye en el cambio alotrópico . Conforme se agrega carbono al hierro, la temperatura del cambio alotrópico aumenta de 2,2554 a 2,720°F al 0.10% de C. Considérese el significado de la línea NMPB. Al enfriar, la porción NM representa el principio del cambio de estructura cristalina de Fe b. c.c. a Fe f.c.c. para aleaciones que contienen menos del 0.10% de C. La porción MP representa el principio del cambio de estructura cristalina por medio de una reacción peritéctica para

aleaciones entre 0.10 y 0.18% de C. Para aleaciones que contienen menos del 0.18% de C al enfriar, el fin del cambio de estructura cristalina está dado por la línea NP. La porción PB representa el principio y el fin del cambio de estructura cristalina por medio de la reacción peritéctica. En otras palabras, para aleaciones entre 0.18 y 0.50% de C, el cambio alotrópico empieza y termina a temperatura constante. Nótese que cualquier aleación que contiene más del 0.50% de C cortará el diagrama a la derecha del punto B y solidificará en austenita directamente. Como ningún tratamiento térmico comercial se hace en la región delta, no habrá razón para referirse nuevamente a esta porción del diagrama.

El diagrama que tiene los nombres comunes insertados, muestra una reacción eutéctica a 2,065°F. El punto eutéctico, E, está a 4.3% de C y a 2,065°F. Como la línea horizontal CED representa la reacción eutéctica, siempre que una aleación cruce esta línea, la reacción deberá ocurrir. Cualquier líquido que esté presente cuando esta línea se alcanza debe ahora solidificar en la muy fina mezcla íntima de las dos fases que están en cualquier extremo de la línea horizontal: austenita y carburo de hierro (llamada *cementita*). Esta mezcla eutéctica se llama *ledeburita*, y la ecuación puede escribirse como:

enfriamiento

Líquido + austenita + cementita

Calentamiento

Mezcla eutéctica–ledeburita

La mezcla eutéctica generalmente no se ve en la microestructura, ya que la austenita no es estable a temperatura ambiente y debe sufrir otra reacción durante el enfriamiento.

Hay una pequeña área de solución sólida a la izquierda de la línea GH. Se sabe que 1,666°F representa el cambio en estructura cristalina de hierro puro f.c.c. a b.c.c. Esa área es una solución sólida en una pequeña cantidad de carbono disuelto en Fe b.c.c. y se llama *ferrita*. El diagrama muestra una tercera línea horizontal HJK, que representa una reacción eutectoide. El punto eutectoide, J, está a 0.80% de C y a 1,333°F. Cualquier austenita presente debe ahora transformarse en la muy fina mezcla eutectoide de ferrita y cementita, llamada *perlita*. La ecuación puede escribirse como

enfriamiento

Líquido ferrita + cementita

Calentamiento

Mezcla eutectoide–perlita

Por debajo de la línea de temperatura eutoide, cada aleación consistirá de una mezcla de ferrita y cementita según lo indicado.

Si se toma como base el contenido de carbono, es práctica común dividir el diagrama hierro–carburo de hierro en dos partes. Aquellas aleaciones que contienen menos del 2% de carbono se conocen como *aceros*, y aquellos que contienen más del 2% de carbono se conocen como *hierros fundidos*. El intervalo de acero se subdivide aún más en base al contenido de carbono eutectoide (0.8% de C). Los aceros que contienen menos del 0.8% de C se llaman *aceros hipoeutectoides*, en tanto que los que contienen de 0.8 a 2.0 por ciento de C se llaman *aceros hipereutectoides*. El intervalo de hierro fundido también puede subdividirse por el contenido de carbono eutéctico (4.3% de C). Los hierros fundidos que contienen menos del 4.3% de C se conocen como *hierros fundidos hipoeutécticos*, en tanto que los que contienen más del 4.3% de C se llaman *hierros fundidos*.

hipereutécticos.

DEFINICIÓN DE ESTRUCTURAS

Ahora se definirán los nombres que, por razones descriptivas o conmemorativas, se han asignado a las estructuras que aparecen en este diagrama.

La *cementita* o carburo de hierro, fórmula química Fe₃C, contiene 6.67% de C por peso. Es un compuesto intersticial típicamente duro y frágil de baja resistencia tensil (aprox. 5000 lb/plg²), pero de alta resistencia compresiva. Es la estructura más dura que aparece en el diagrama. Su estructura cristalina es ortorrómica.

Austenita es el nombre dado a la solución sólida . Es una solución sólida intersticial de carbón disuelto en hierro (f.c.c.). La máxima solubilidad es del 2% de C a 2,065°F (punto C). Las propiedades promedio son: resistencia tensil, 150,000 lb/plg²; elongación, 10 por ciento en 2 plg.; dureza, Rockwell C 40, aproximadamente; y tenacidad, alta. Generalmente no es estable a la temperatura ambiente. Bajo ciertas condiciones, es posible obtener austenita a la temperatura ambiente, y su microestructura se muestra en la figura.

Ledeburita es la mezcla eutéctica de austenita y cementita; contiene 4.3% de C y se forma a 2,065°F.

Ferrita es el nombre dado a la solución sólida . Es una solución sólida inestristacial de una pequeña cantidad de carbón disuelto en hierro (b.c.c.). La máxima solubilidad es 0.025% de C a 1,333°F (punto H), y disuelve sólo 0.008% de C a temperatura ambiente. Es la estructura más suave que aparece en el diagrama. Las propiedades promedio son: resistencia tensil, 40,000 lb/plg²; elongación, 40 por ciento en 2 plg; dureza, menor que la Rockwell C 0 o que la Rockwell B 90.

Perlita (punto J) es la mezcla eutectoide que contiene 0.80 por ciento de C y se forma a 1,333°F a un enfriamiento muy lento. Es una mezcla muy fina, tipo placa o laminar de ferrita y cementita. También se muestra la fina mezcla tipo huella dactilar, llamada perlita. La base o matriz ferrítica blanca que forma la mayoría de la mezcla eutectoide contiene delgadas placas de cementita. La figura muestra la misma estructura, amplificada 17,000 veces con el microscopio de electrones. Las propiedades promedio son: resistencia tensil, 12,000 lb/plg²; elongación, 20% 2n 2 plg; dureza, Rockwell C 20, Rockwell B 95–100 o BHN 250–300.

SOLUBILIDAD DE CARBONO EN HIERRO

La austenita, que es f.c.c. con cuatro átomos por celda unitaria, representa un empaquetamiento de átomos mucho más denso que la ferrita, que es b.c.c. con dos átomos por celda unitaria. Esto se demuestra por la expansión que tiene lugar cuando la austenita cambia a ferrita en enfriamiento lento. Si se supone que los átomos de hierro son esferas, es posible, de las dimensiones reticulares y suponiendo que la distancia de mayor aproximación es igual al diámetro atómico, calcular la cantidad de espacio vacío en ambas estructuras cristalinas. El cálculo muestra que el porcentaje de espacio sin llenar en la red f.c.c. es del 255 y en la red b.c.c. es del 32%. Tanto en la austenita como en la ferrita, los átomos de carbono se disuelven intersticialmente, o sea, en los espacios sin llenar de la estructura reticular. En vista de los cálculos anteriores, podría parecer extraño que la solubilidad de carbono en austenita es de este modo mucho mayor que en la ferrita. Este comportamiento, aparentemente no común. El orificio más grande en ferrita b.c.c. está a la mitad entre el centro de la cara y el espacio entre los dos átomos de las esquinas. La figura muestra dos de las cuatro posibles posiciones para un átomo de carbono en la cara frontal de un cubo centrado en el cuerpo. La mayor esfera intersticial que precisamente ajustaría tiene un radio de 0.36 (10^{-8})cm. El orificio mayor en austenita f.c.c. está en la mitad del camino a lo largo de la orilla entre dos átomos colocados en esquinas. La figura muestra una posible posición para un átomo de carbono en la cara frontal de un cubo centrado en la cara. La mayor esfera intersticial que precisamente ajustaría tiene un radio de 0.52 (10^{-8})cm; por tanto, la austenita

tendrá mayor solubilidad para el carbono que para la ferrita. Como el átomo de carbono tiene un radio de unos 0.70 (10^{-8})cm, los átomos de hierro en austenita son dispersados por la solución de carbono, así que a la máxima solubilidad de 2%, sólo el 10% de los orificios se llenan. La distorsión de la red ferrítica por el átomo de carbono es mucho más grande que en el caso de la austenita; por tanto, la solubilidad de carbono es más restringida.

ENFRIAMIENTO LENTO DEL ACERO

La porción de acero del diagrama hierro–carburo de hierro reviste un interés máximo. Aquí se estudiarán los diversos cambios que tienen lugar durante el enfriamiento muy lento, del intervalo de austenita, de varios aceros.

La aleación 1 es un acero jipoeutectoide que contiene 0.20% de carbono. En el intervalo de austenita, esta aleación consta de una solución sólida intersticial uniforme. Cada grano contiene 0.20% de carbono disuelto en los espacios de la estructura reticular de hierro f.c.c. Al enfriarse lentamente nada sucede hasta que la línea GJ se cruza en el punto X1. Esta línea se conoce como *línea de temperatura crítica superior* del lado hipoeutectoide y se designa como A3. El cambio alotrópico de hierro f.c.c. a hierro b.c.c. tiene lugar a 1,666°F para hierro puro y disminuye en temperatura con el aumento de contenido de carbono, como lo muestra la línea A3, por tanto, en X1, la ferrita debe empezar a formarse en las fronteras de grano de la austenita. Como la ferrita puede disolver muy poco carbono, en aquellas áreas se rearreglan por sí mismos a b.c.c. El carbono que sale de la solución es disuelto en la austenita restante, así que, conforme el enfriamiento avanza y la cantidad de ferrita aumenta, la austenita restante se hace más rica en carbono. Su contenido de carbono se mueve gradualmente hacia abajo y a la derecha a lo largo de la línea A3. Finalmente, la línea HJ se alcanza en el punto X2. Esta línea se conoce como *línea de temperatura crítica inferior* en el lado hipoeutectoide y se designa como A1. La línea A1 es la de temperatura eutectoide y constituye la mínima temperatura a la que el hierro f.c.c. puede existir bajo condiciones de equilibrio. Precisamente arriba de la línea A1, la microestructura consta de aproximadamente 25% de austenita y 75% de ferrita. La austenita restante, como el 25% del material total (regla II) y que contiene 0.8% de carbono, experimenta ahora la reacción eutectoide

enfriamiento

Austenita ferrita + cementita

Calentamiento

Perlite

Nótese que la austenita cambia en la línea A1; por tanto, cuando la reacción está completa, la microestructura mostrará aproximadamente 25% de perlita y 75% de ferrita.

Considérese la reacción eutectoide con más detalle. La austenita cambia a ferrita y es una solución sólida intersticial en la que cada grano restante disuelve 0.8 por ciento de C en Fe f.c.c.; sin embargo, la ferrita es Fe b.c.c. y disuelve muy poco carbono, de modo que el cambio en estructura cristalina no puede ocurrir hasta que los átomos de carbono salgan de la solución. Por tanto, el primer paso es precipitar los átomos de carbono para formar placas de cementita (carburo de hierro). En el área inmediatamente adyacente a la placa de cementita, el hierro se vacía de carbono y los átomos pueden ahora rearreglarse por sí mismos para formar ferrita b.c.c. De cada lado de la placa de cementita se forman delgadas capas de ferrita. El proceso continúa con la formación de capas alternas de cementita y ferrita para dar la fina mezcla tipo huella dactilar conocida como *perlite*. La reacción generalmente empieza en la frontera de grano de austenita, con la perlita creciendo a lo largo de la frontera y dentro del grano.

Como la ferrita y la perlita son estructuras estables, la microestructura permanece en forma sustancial hasta

llegar a la temperatura ambiente y consta de aproximadamente 75% de ferrita proeutectoide (formada entre las líneas A3 y A1) y 25% de perlita (formada de austenita en la línea A1). La figura muestra la microestructura de un acero al 0.2% de C lentamente enfriado. Según lo previsto, consta de 75% de ferrita proeutectoide (áreas claras) y 25% de perlita (áreas oscuras). Las áreas oscuras en esta microestructura no parecen ciertamente una mezcla, por lo que se supone que es perlita; sin embargo, mayor amplificación revela la fina mezcla tipo huella dactilar de perlita.

Los cambios descritos serían los mismos para cualquier acero hipoeutectoide. La única diferencia estaría en la relativa cantidad de ferrita y perlita. A mayor proximidad del contenido de carbono a la composición eutectoide (0.8% de C), más perlita estará presente en la microestructura. La microestructura de un acero al 0.4% de C lentamente enfriado muestra aproximadamente 50% de perlita, en tanto que la composición eutectoide (0.8% de C) muestra el 100% de perlita.

GLOSARIO

Austenita: En un acero de Cr = 17.80% y Ni = 10.10% es una solución sólida de carbono en hierro gamma (y) es blanda, dúctil, tenaz y no magnético.

Calibrado: Es el término empleado para designar un material que ha sido sometido a procesos mecánicos de deformación en frío empleando dados de laminación. La apariencia superficial es brillante, se conoce normalmente como CR y sus tolerancias están regidas por la Norma ISO H11.

Capa decarburada: Es la capa superficial de un acero que está desprovista de carbono por haber sido sometido a procesos elevados de temperatura.

Carburos: Un carburo es una combinación de carbono con un elemento de aleación (Cr, Mo, W, y V). Su formación ocurre durante el tratamiento térmico, y le confieren al Acero propiedades mecánicas tales como Resistencia al desgaste, Conservación del filo etc.

Cementita: Es un carburo de hierro (FeC₃) es el constituyente más duro de los aceros. Es magnética por debajo de los 210°C y no magnético a temperaturas superiores.

Conservación de filo: Es la capacidad que posee un material de no perder el filo de corte cuando está en contacto con un material que está siendo cizallado.

Corte térmico: Es el corte que se produce cuando ocurre una reacción de oxidación por la mezcla de oxígeno y gas combustible.

Curva de Revenido: Es la curva donde se relaciona en el eje X la temperatura de revenido y en el eje Y la dureza en HRC, y es empleada para encontrar la temperatura a la cual debe ser revenido un Acero con el fin de alcanzar una dureza determinada.

Deformación térmica: Es el cambio de medidas que sufre un material cuando está sometido a procesos de temperatura (Cambios detemperatura). Cuando un material se calienta se dilata y cuando se enfriá se contrae.
– Dureza: Es la resistencia que ofrece un acero a dejarse penetrar. Se mide en unidades BRINELL (HB) ó unidades ROCKWEL C (HRC)

Electroerosión: Es un proceso de mecanizado SIN ARRANQUE de viruta y en el cual interviene la corriente eléctrica produciendo un fenómeno de fusión del material. Están presentes elementos tales como el electrodo que debe ser un material altamente conductor de corriente, y el dieléctrico que puede ser Agua, Petróleo o alguno de sus derivados.

Ferrita: En un acero con C= 0.05% y Mn = 0.29% es el hierro alfa o hierro casi puro. Es muy dúctil, maleable y magnético

Flecha: Es la desviación que presenta un eje cuando está comparado con una superficie completamente horizontal.

Laminado en Caliente: Término empleado para designar un material que ha sido sometido a proceso mecánico de deformación en caliente y que quedo con una apariencia superficial negra que se conoce normalmente como HR. sus tolerancias están regidas por la Norma DIN 1013.

Ledeburita: Mezcla eutéctica de Austenita y Cementita.

Martensita: La martensita puede considerarse como una solución sólida de carbono en ferrita sobre saturada y distorsionada.

Maquinabilidad: Es la facilidad que posee un material de permitir el proceso de mecanizado por arranque de viruta.

Medio de Enfriamiento: Es el medio en el cual se apaga el acero en el tratamiento térmico después de haber alcanzado la temperatura de Austenización y de haber sido sostenido a dicha temperatura el tiempo necesario para transformar la estructura. Este medio puede ser agua, aceite, sales, aire, polímeros etc.

Perlita: Mezcla de ferrita y Cementita. Rectificado: Es el término empleado para designar un material que después de calibrado o torneado ha sido sometido a un proceso mecánico de rectificado asegurando medidas muy cercanas a la nominal. Sus tolerancias dimensionales son regidas por la Norma ISO H9.

Resiliencia: Resistencia que oponen los cuerpos a la rotura por choque. Se mide por medio de péndulos de choque que se dejan caer sobre probetas llevadas a distintas temperaturas.

Resistencia al desgaste: Es la resistencia que ofrece un material a dejarse erosionar cuando esta en un contacto de fricción con otro material.

Resistencia a la fatiga: Es la capacidad que posee un material de absorber energía cuando esta sometido a cargas cíclicas repetitivas

Resistencia a la torsión: Es la resistencia que ofrece un material a dejarse cizallar cuando esta sometido a cargas contrarias. Por ejemplo en la transmisión de movimiento de un motor.

Resistencia a la tracción: Es la resistencia que ofrece un material cuando esta sometido a cargas axiales.

Temperatura de Austenización: Es la temperatura a la cual se eleva un acero durante el tratamiento de temple. Cada material tiene una temperatura de Austenización determinada.

Templabilidad: Es la capacidad que posee un material de penetración de dureza durante el tratamiento térmico, medida desde la superficie hasta el núcleo.

Tenacidad: Es la capacidad que tiene un material de absorber energía sin dejarse fisurar. La más común es la resistencia al impacto.

Tratamiento térmico: Son ciclos de calentamiento y enfriamiento a los cuales se somete un material con el fin de variar su dureza para cambiar su resistencia mecánica. Los principales tratamientos térmicos son: Temple, Revenido, Recocido, Normalizado.

Tratamientos termoquímicos: Son tratamientos de recubrimiento superficial en los cuales un elemento químico se deposita por procesos de difusión en la superficie del material. Los principales tratamientos termoquímicos son: Cementación y Nitruración o Tenifer.

Torneado: Es el término empleado para designar un material que ha sido sometido a un proceso mecánico de arranque de viruta eliminando la capa decarburada. Su apariencia superficial es brillante con las huellas del premaquinado. Sus tolerancias dimensionales están regidas por la Norma ISO H11.

CONCLUSIÓN

Después de haber estudiado pautadamente las propiedades fundamentales de los materiales constituyentes de la aleación hierro–carbono podemos concluir que:

Los tratamientos térmicos que se le dan a los aceros, además de aumentar sus propiedades, contribuyen para el estudio de las estructuras que se forman posteriormente de que se deje enfriar lentamente. Tales estructuras como la ferrita y la cementita, presentan muy buenas propiedades magnéticas y además son constituyentes principales de los aceros recocidos al igual que la perlita y con el estudio de sus estructuras vemos que algunos de estos materiales son coloreables y sus estructuras son más compactas.

BIBLIOGRAFIA

PROCESOS DE MANUFACTURA

B.H. Amsterad, Phillip Ostwald

Compañía Editorial Continental

Sexta Edición

1984

TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS

Apraiz, Barreiro José.,

Limusa Noriega Editores

Novena Edición

INTRODUCCIÓN A LA METALURGIA FÍSICA

Sydney, h. Avner.,

Editorial McGrawHill

Tecnología del tratamiento térmico de los metales Valencia, Asdrúbal.

Editorial Universidad de Antioquia

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 01

OBJETIVOS	02
DIAGRAMA DE HIERRO–CARBONO	03
PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS	03
Austenita	
Ferrita	
Cementita	
Perlita	
Bainita	
Martensita	
DEFINICIÓN DE ACERO	06
Aceros hipoentectoides	
Aceros hiperentectoides	
Aceros al carbono	
Aceros aleados	
TRATAMIENTOS DE LOS ACEROS	08
Tratamientos térmicos	
Tratamientos termoquímicos	
Tratamientos mecánicos	
Tratamientos en frío	
Templabilidad	
DESCRIPCIÓN DEL DIAGRAMA HIERRO–CARBONO	18
Diagrama hierro–carburo de hierro	
Definición de estructuras	
Solubilidad de carbono en hierro	
Enfriamiento lento del acero	
GLOSARIO	28

CONCLUSIONES 32

BIBLIOGRAFÍA 33

1