

DIAGRAMAS TT Y LAS CURVAS DE ENFRIAMIENTO

EL PROCESO DE ENDURECIMIENTO

Para endurecer el acero se efectúan dos operaciones. La primera etapa consiste en calentar el acero hasta el rango austenita (austenización), lo cual significa calentarlo hasta una temperatura más alta que la temperatura crítica superior. La segunda etapa consiste en enfriar rápidamente o templecer cerca de la temperatura ambiente.

La **austenización** produce la solución sólida del carbono en la estructura sólida del carbono en la estructura cúbica centrada en las caras. La temperatura usual de austenización es de 50°F (28°C) por encima de las líneas A_3 o $A_{3.1}$ (figura 1). Las aleaciones con 0.8% de carbono o menos se vuelven 100% austenita a esta temperatura, mientras que el acero con más de 0.8% de carbono se convertirá en austenita con algo de cementita libre.

Los aceros con mayor contenido de carbono que contienen elementos formadores de carburo tales como cromo, molibdeno, tungsteno o vanadio requieren más tiempo de permanencia a esta temperatura de austenización debido a que los carburos complejos son relativamente lentos para disolverse. Si la temperatura es demasiado baja, puede haber una solución incompleta de carburos y el acero puede contener aún granos de ferrita sin disolver, los cuales no son benéficos en un acero para herramientas endurecido. Si la temperatura es demasiado alta, pueden formarse granos grandes y esto provocaría el agrietamiento durante el tratamiento térmico, lo cual causaría la falla de la parte. La mayoría de los productores de acero publican hojas de datos que contienen las temperaturas de austenización correctas para diversas aleaciones.

El temple subenfriará la austenita para formar una nueva estructura por debajo de la temperatura M_s . Esta estructura se conoce como **martensita**. La martensita es una estructura extremadamente dura de formas aciculares o en aguja, la cual, para la mayoría de los propósitos, es demasiado frágil para que

tenga alguna utilidad, y para darle tenacidad es necesario un proceso de revenido como una operación adicional.

La martensita puede reconocerse por su estructura de apariencia acicular cuando se ve en el microscopio. Con la excepción de temple isotérmico, el objetivo de los proceso de temple del acero es enfriarlo lo suficientemente rápido como para producir martensita. La martensita tiene un efecto profundo y útil en acero, cuyas propiedades de endurecimiento se conocen.

No se comprenden aún claramente cuáles son las causas de la alta dureza y alta resistencia de la martensita. Indudablemente existen diversas causas. La probable distorsión de la estructura atómica cúbica centrada en el cuerpo por los átomos de carbono, la reducción del tamaño de grano y la presencia de un precipitado fino de carburo en los planos de deslizamiento, todos estos fenómenos probablemente intervienen en la dureza de la martensita.

LOS DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA (TI) O DE TIEMPO-TEMPERATURA-TRANSFORMACIÓN (TTT)

Isotérmica significa la misma o temperatura constante. Los diagramas TI también se conocen como curvas S de Bain o diagramas TTT. Una vez que se descubrió que el tiempo y la temperatura de transformación de la austenita influían notablemente en los productos de transformación, fue necesario un nuevo tipo de gráfica o diagrama. El diagrama hierro-carbono no sería conveniente porque representa condiciones de equilibrio o de enfriamiento lento, mientras que la transformación de la austenita ocurre en condiciones de no equilibrio con varias tasas de enfriamiento. La austenita es inestable a temperaturas por debajo de la línea A_1 del diagrama hierro-carbono y casi inmediatamente se empieza a transformar en productos tales como perlita o bainita. Un diagrama TTT representa muy bien este proceso.

Cuando se grafica un diagrama TTT deben recordarse tres factores.

1. Cuando la austenita se enfría por debajo de la línea A_1 a una temperatura determinada y se mantiene a esa temperatura, se empieza a transformar en

un tiempo determinado y se completa la transformación después de cierto tiempo característico del acero.

2. La martensita se forma únicamente a temperaturas relativamente bajas y de manera casi instantánea.
3. Si la austenita se transforma en algún punto de la curva en una estructura que es estable a temperatura ambiente, en un enfriamiento rápido no cambiará el producto ya transformado, pero la austenita restante se transformará en martensita.

Los datos de los diagramas de transformación isotérmica se obtienen calentando grandes cantidades de muestras pequeñas de acero de un tipo específico a la temperatura de austenización (figura 2). Luego se transfieren rápidamente a hornos o baños de sales fundidas, que están a temperaturas predeterminadas por debajo de la línea crítica A_1 .

Para estudiar la transformación a 1200°F (649°C), se mantiene un juego de muestras a la temperatura constante de 1200°F (649°C). A intervalos regulares se retira una muestra y se enfría rápidamente en salmuera con hielo. Por medio del examen microscópico se verá martensita si la transformación no ha empezado aún, pero si ésta ya se inició, se verá martensita y perlita (en este caso) y sólo se podrá ver perlita si la transformación ya es completa. En la gráfica se coloca una marca indicando el tiempo y la temperatura. Este procedimiento se repite con otras muestras a otras temperaturas hasta que se obtiene la gráfica completa para ese acero (figura 3).

La escala vertical de la izquierda representa la temperatura y la escala horizontal de abajo representa el tiempo. Se grafica en una escala logarítmica que corresponde a un minuto, 1 hora, 1 día y 1 semana. Las letras M_s pueden encontrarse a una temperatura específica para cada tipo de acero. M_s representa la temperatura a la cual la austenita empieza a transformarse en martensita durante el enfriamiento. La temperatura M_f es el punto al cual finaliza o se encuentra cerca del 100% la transformación de la austenita en martensita durante

el enfriamiento. Algunas veces se reemplaza ésta por un porcentaje de transformación.

LOS PRODUCTOS DE TRANSFORMACIÓN

La austenita, cuando se enfría a una temperatura inferior a la de transformación y se mantiene a una temperatura constante, se descompone en varios productos de transformación tales como perlita, ferrita o bainita. La austenita que contiene 0.89% de carbono enfriada rápidamente y mantenida a 1300°F (704°C), por ejemplo, no se empieza a descomponer o a transformar hasta después de tres minutos y no se descompone completamente hasta que se encuentra a esa temperatura durante más de 1 hora (figura 4). A esta temperatura se ha desarrollado una estructura perlítica muy gruesa y el material es muy blando. Si la austenita se enfría rápidamente, y se mantiene a una temperatura inferior a 1200°F (649°C), la descomposición empieza a los 5 segundos y es completa después de unos 30 segundos. La perlita resultante es de grano grueso y ligeramente más dura. A una temperatura de 1000°F (538°C) la austenita se descompone rápidamente. Sólo le toma un segundo antes de que principie la transformación y 5 segundos para terminarla. La perlita resultante es extremadamente fina y su dureza es relativamente alta. A esta región de la curva S, cuando ocurre la descomposición de la austenita, se le conoce como la nariz de la curva de un diagrama de transformación isotérmica.

LAS CURVAS DE ENFRIAMIENTO

Si la austenita se enfría a temperatura por debajo de la nariz de la curva (600°F o 315°C) y se mantiene a estas temperaturas durante el tiempo suficiente, la transformación producirá bainita. Si la austenita se enfría rápidamente a una temperatura inferior a la línea M_s , el producto será martensita. Como se ve, esta transformación a martensita es completa a la temperatura M_f . Estas temperaturas varían considerablemente en los aceros y son una función del contenido de carbono. Las temperaturas M_s y M_f son más bajas para los aceros al alto carbono que para los aceros al bajo carbono (figura 5).

Si se superpone una curva de enfriamiento (figura 6) sobre el diagrama TTT, puede verse que debe pasara a la izquierda de la nariz 1 del diagrama para que ocurra la transformación a martensita. Sin embargo, si la tasa de enfriamiento es demasiado lenta la curva de enfriamiento cortará la nariz del diagrama, mostrándose que ocurre una transformación parcial o completa en ese punto 2) y que la perlita fina más la martensita son las estructuras que se desarrollaron en vez de la martensita deseada. Por lo tanto, la tasa de enfriamiento para un temple dado debe ser tal que la nariz del diagrama quede a la derecha de la curva de enfriamiento. Sin embargo, la formación de martensita depende de la temperatura, no del tiempo.

En algunos aceros existe un problema de austenita retenida aún después de que se utilicen procedimientos de temple correctos. Algunos aceros para herramientas retendrán austenita aun por debajo de la temperatura M_f . Un revenido apropiado o tratamientos de subcero usualmente transformarán en forma completa la austenita a martensita. La austenita retenida puede causar serios problemas en los aceros para herramientas endurecidas, tales como fragilidad y agrietamientos, debido a una transformación a martensita no revenida en cualquier momento, provocados por esfuerzos externos o ciclos térmicos.

LA TASA DE ENFRIAMIENTO CRÍTICA

Aleaciones diferentes pueden afectar la forma de los diagramas TTT. Un incremento en el contenido de carbono mueve la curva S hacia la derecha (incrementa el tiempo antes de que ocurra la transformación). El tamaño de grano también afecta la templabilidad (la propiedad que determina la profundidad y la distribución de la dureza inducida por el temple de una aleación ferrosa). Los aceros al carbono de grano más grande también disponen de más tiempo para la transformación. Esto también mueve la curva S hacia la derecha. La adición de aleación al acero también mueve la curva S hacia la derecha.

Un acero al bajo carbono simple no puede endurecerse para propósitos prácticos debido a que la nariz del diagrama está en o cae cerca de la línea de tiempo cero y sería imposible evitar cortarla con el temple o la curva de

enfriamiento (figura 7). Sin embargo, con aceros de más de 0.30% de carbono es posible enfriar lo bastante rápido como para efectuar una transformación parcial a martensita (figura 8). El acero al carbono simple de 0.83% C debe enfriarse rápidamente en agua para que el temple sea lo suficientemente rápido como para que ocurra en los 1 ó 2 segundos necesarios para evitar el corte de la nariz en el diagrama. Por lo tanto, la tasa de enfriamiento crítica es la tasa de enfriamiento a la cual se evita el corte de la nariz de la curva S.

Los aceros endurecidos en aceite con elementos aleantes tales como el cromo y molibdeno, hacen que la nariz del diagrama se mueva hacia la derecha, incrementando así el tiempo en el cual puede ocurrir el endurecimiento. A menudo también se modifica la forma de la nariz. Estos cambios permiten muchas veces disponer de un largo tiempo para que ocurra el temple. Es fácil ver en el diagrama TTT cómo afecta la rapidez de enfriamiento a los aceros templados en aceite (figura 9) y a los aceros templados en el aire (temple profundo).

La transformación a martensita depende de tres factores:

1. Masa de la parte.
2. Severidad del temple.
3. Templabilidad del material.

El área de superficie de la parte y el espesor tienen un efecto considerable en la rapidez de enfriamiento. Una parte muy delgada, tal como una hoja de rasurar, con una gran área de superficie, tendría una rapidez de enfriamiento que sería muchas veces más grande que para un cubo de acero de 2 ó 3 plg². Por lo tanto, un acero normalmente templado en agua, cuando es extremadamente pequeño o delgado, es mejor templearlo en aceite para lograr la rapidez de enfriamiento apropiada, mientras que el bloque de acero del mismo material no logrará el enfriamiento crítico ni en un temple severo de agua salada fría.

Normalmente, los aceros templados en agua se endurecerán sólo hasta una profundidad de aproximadamente 1/8 de plg mientras que el núcleo queda bastante blando. Estos aceros se denominan aceros de temple superficial. Un acero de 1 ó 2 plg de espesor enfriado al aire puede enfurecerse completamente

hasta el núcleo. Este es un acero de temple profundo. Al incrementarse el tiempo en el cual ocurre el temple, se incrementa la profundidad del endurecimiento.

Cuando se utilizan velocidades drásticas de temple, tales como en salmuera o en agua, los esfuerzos en la parte provocados por la rapidez de enfriamiento diferentes del interior y el exterior de la parte pueden causar arqueo y agrietamiento (figura 10). Los aceros templados en agua son particularmente propensos a este problema. La rapidez menor de enfriamiento del aceite y del aire permite un enfriamiento más uniforme y, por ello, estos aceros se agrietan y arquean menos. Por esta razón, cuando tengan que tratarse térmicamente secciones grandes o pesadas, debe seleccionarse un acero aleado que pueda templarse en aceite o en aire (figura 11).

TEMPLABILIDAD DE LOS ACEROS MARTENSITA REVENIDA

ENSAYOS DE TEMPLABILIDAD Y LA PRUEBA JOMINY DEL EXTREMO TEMPLADO

Este ensayo se utiliza para determinar la profundidad del endurecimiento o templabilidad de diversos tipos de aceros. En la realización de esta prueba se calienta uniformemente una muestra redonda de 1 plg de diámetro y aproximadamente 4 plg de longitud hasta la temperatura de austenización correcta durante el tiempo necesario para que sea completa la austenización correcta durante el tiempo necesario para que sea completa la austenización (difusión del carbono en la austenita). El espécimen se remueve rápidamente y se coloca en una abrazadera de manera tal que un chorro de agua (u otro medio de temple) a temperaturas ambiente golpee la superficie inferior de la muestra caliente sin que se humedezcan los lados (figura 1). Se le deja estar bajo la acción del chorro de agua hasta que se enfríe la muestra completa. Después que se enfríe, se esmerilan las superficies planas longitudinales laterales para eliminar la descarburación y se toman lecturas Rockwell C a intervalos de 1/16 de pulgada

desde el extremo templado. Ya que el efecto del temple se concentra en la superficie del extremo y la velocidad de enfriamiento disminuye con la distancia desde el extremo, la medición de la dureza en cada punto corresponde con cierta velocidad de enfriamiento y penetración de la dureza a esa profundidad del tipo particular de metal que se prueba. Los datos obtenidos se grafican.

A partir de un estudio de las curvas, resulta evidente que la dureza inicial de la superficie es una función fuertemente dependiente del contenido de carbono y que **la templabilidad** (profundidad de endurecimiento) **depende de la cantidad de carbono presente, el contenido de aleantes y el tamaño de grano**. El manganeso, el boro, el cromo y el molibdeno son los elementos principales que facilitan la dureza a profundidad, mientras que el níquel y el silicio ayudan en menor grado. Si bien el cromo y el molibdeno se han utilizado ampliamente en el pasado como aleación para lograr un temple profundo en acero, actualmente están siendo reemplazados por el boro. Este elemento es el agente endurecedor más eficiente que se conoce. En aceros con 0.04% de carbono, una cantidad de boro tan pequeña como 0.002% produce el equivalente de 0.3% de manganeso, 0.354% de molibdeno, 0.5% de cromo o 2% de níquel. Además el boro se obtiene en los Estados Unidos a menor costo que las aleaciones importadas más escasas. Sin embargo, cuando el contenido de carbono es de más de 0.60% o si el acero será usado en bajas temperaturas, no se debe usar ese material.

Las figuras 2 y 3 muestran las diferentes profundidades de endurecimiento del acero al carbono simple eutectoide (0.83% y en el acero SAE 4140). Nótese que en la figura 2, en el diagrama superior, las velocidades de enfriamiento disminuyen conforme se incrementa la distancia desde el extremo templado. Según puede verse, esta gráfica superior se sobrepone directamente sobre un dibujo del espécimen Jominy en su extremo templado. La línea vertical del extremo de la muestra representa la dureza en incrementos de la escala Rockwell C. La línea horizontal representa la distancia real a lo largo del espécimen de prueba. Las pruebas de dureza que se realizan en la superficie plana se grafican en términos de dureza y distancia para formar una curva. El punto A de la curva representa la dureza 65 Rc y a alrededor de 1/16 de pulgada desde el extremo.

Este punto se transporta hacia abajo por la flecha puenteada hacia la curva de enfriamiento (A) del diagrama TTT. Sólo se obscurece la porción de perlita del diagrama que muestra la “rodilla”, pues esa es el área importante para este estudio.

La curva de enfriamiento sobruesta A muestra una tasa de enfriamiento suficientemente rápida para producir 100% de martensita, pero la curva de enfriamiento B con su velocidad de enfriamiento levemente menor produce martensita y perlita modular. Según puede verse en la gráfica superior, la dureza en el punto B es de unos 48 Rc y la prueba se tomó a aproximadamente 1/8 de plg del extremo. En contraste, en la figura 3, la prueba Rockwell en el punto B es a alrededor de 1/2 plg del extremo y de una dureza de 48 Rc. Su curva de enfriamiento sobrepuesta sobre el diagrama TTT produce martensita, ferrita y bainita. La ferrita es un producto posible debido a que éste es un acero al carbono medio que contiene 0.40% de carbono. La bainita es una sustancia relativamente dura pero no tanto como la martensita. El cromo y el molibdeno del acero SAE 4140 hacen que sea de endurecimiento más profundo que el acero al carbono eutectoide. En la figura 4 se muestra el efecto de los diversos tipos de medios de enfriamiento sobre la templabilidad o profundización del endurecimiento.

EL EFECTO DE LA MASA SOBRE EL ACERO TRATADO TÉRMICAMENTE

También es cierto que las propiedades mecánicas del acero templado dependen de la masa de la pieza. Si se templara una serie de cilindros de diámetros diferentes desde la misma temperatura, en el mismo medio de temple y por el mismo procedimiento, las propiedades mecánicas variarían de acuerdo con los diámetros. En la figura 5 se muestran la variación de la dureza desde el diámetro exterior hacia el centro para seis diámetros diferentes en dos aceros, el C1040 y el A4142.

La temperatura a la cual se empieza a formar la martensita se conoce como temperatura Ms. Esta temperatura puede disminuir considerablemente si se incrementa el contenido de carbono. Cuando se temple una acero de 0.83% de

carbono a una temperatura inferior a M_s , o aproximadamente 400°F (204°C), se inicia la formación de martensita. Justo por encima de 300°F (149°C) se ha efectuado 50% de transformación a martensita (figura 6, línea 1); un poco más arriba de la temperatura M_f , o a aproximadamente 200°F (93°C), tiene lugar ya un 100% de transformación. Cuando el acero al carbono austenizado se temple a temperaturas menores a M_f , alcanza su dureza máxima al menos que se encuentre austenita retenida.

TRATAMIENTOS TÉRMICOS ISOTÉRMICOS

Cuando las curvas de enfriamiento son tales que cortan en varios puntos del diagrama TTT a la curva S, se forman ciertas microestructuras. Cuando ocurre un enfriamiento muy lento a aproximadamente 1200°F (649°C), se desarrolla una estructura de perlita gruesa y blanda. Este sería el caso cuando se recoce en el horno una parte (figura 6, línea 2). Cuando una parte se enfría al aire después de calentarla en el horno a 100°F (56°C) por arriba de su temperatura crítica, el proceso se conoce como normalización. La curva de enfriamiento para la normalización sería aproximadamente a través de una sección de perlita media o bainita superior (figura 6, línea 3) de la curva S en los aceros eutectoides, formando granos más pequeños y uniformes que dejan una estructura más fuerte que la producida por recocido total.

Otro método de temple y revenido es una forma de temple isotérmico conocido como austempering (figura 7), en el cual se austeniza una parte y se temple en un baño de plomo o de sal que se mantiene a una temperatura aproximadamente de 600°F (316°C) para producir una microestructura deseada de bainita inferior. Se mantiene a esta temperatura durante horas hasta que ocurre una transformación completa. Con este tipo de endurecimiento se elimina la necesidad del revenido. El austempering da un producto superior que es mucho más tenaz que el que se desarrolla con el método convencional de temple y revenido. Sin embargo, existe una desventaja, la de que se limita a secciones pequeñas o delgadas. Las secciones grandes y pesadas de acero al carbono no pueden tratarse por este proceso. El hierro dúctil austempered es una aplicación

del austempering que se utiliza cada vez más y está comenzando a reemplazar a los aceros revenidos y templados en algunas aplicaciones.

Al temple isotérmico también se le conoce como **martempering** (figura 8), en el cual la parte austenizada se calienta un poco por encima de la temperatura M_s y se mantiene ahí durante unos minutos con el fin de igualar la temperatura interna y externa y evitar así los esfuerzos. Luego el temple se lleva hasta la temperatura M_f , seguido de un revenido convencional. El **recocido isotérmico** se efectúa templando desde encima del rango crítico hasta la temperatura de recocido deseada en la porción superior del diagrama TTT y manteniendo a la temperatura del recocido durante el tiempo suficiente para producir la transformación completa (figura 9). Este método produce una microestructura más uniforme que el recocido convencional en el cual se enfría muy lentamente el acero.