

01.85.12 ej1

CNEA-AC 13/85

PMTM/A-71

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Dependiente de la Presidencia de la Nación
GERENCIA DE DESARROLLO

TRANSFORMACIONES DE FASE

NOTAS COMPLEMENTARIAS

L.
Alicia SARCE de OVEJERO

Buenos Aires

1985

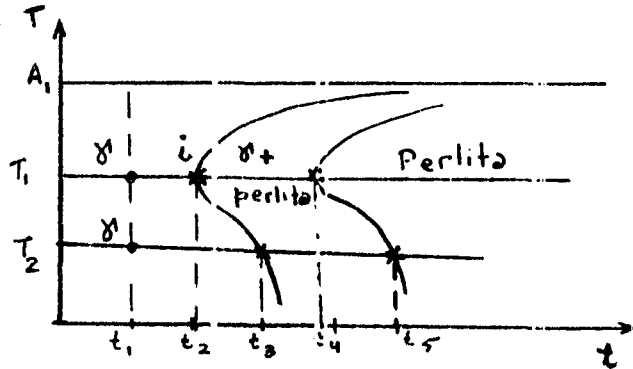
DIAGRAMAS TTT ó IT

Cuando una muestra austenítica de composición eutécticoide es recocida isotérmicamente a una temperatura por debajo de A_1 (723°C) durante un tiempo suficiente, transforma totalmente a perlita.

Sin embargo, para que se inicie esa transformación $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ es necesario que transcurra un cierto tiempo que depende de esa temperatura a la que se realiza la transformación. El tiempo necesario para que la austenita eutécticoide empiece a transformar a distintas temperaturas por debajo de A_1 es generalmente mostrado en un gráfico conocido como diagrama T.T.T. (temperatura, tiempo, transformación) ó I.T. (isothermal transformation).

Los diagramas T.T.T. se construyen de la siguiente manera: un conjunto de muestras (supongamos primero de un acero eutécticoide) es mantenido a una temperatura superior a A_1 durante un tiempo suficientemente grande como para disolver completamente cualquier carburo y homogeneizar la austenita y luego transferido rápidamente a un baño de sales o plomo a una temperatura por debajo de A_1 . Después de un cierto tiempo t_1 una de las muestras es templada a temperatura ambiente; después de otro tiempo t_2 otra muestra es templada, y así sucesivamente. Un estudio metalográfico de las muestras

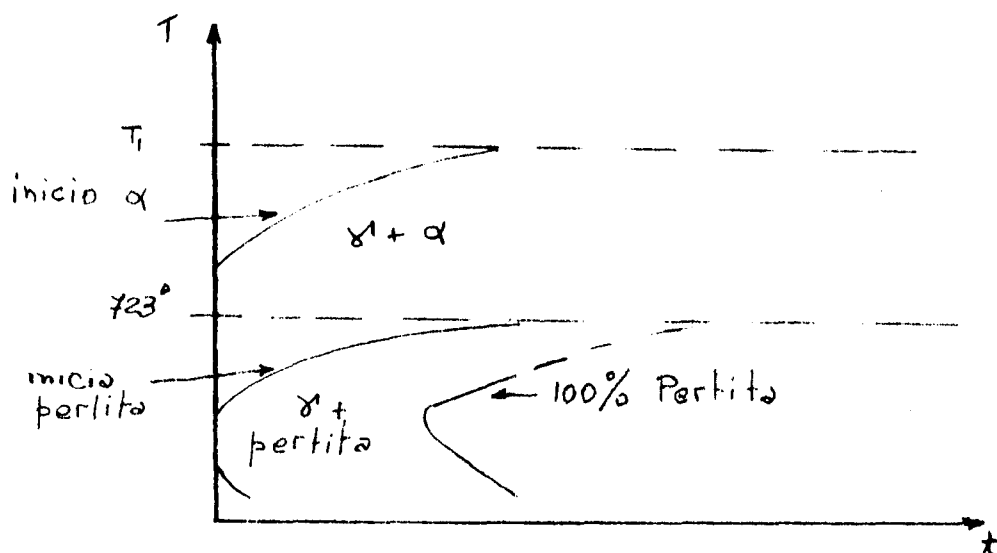
permite determinar el tiempo necesario para que comience la transformación perlítica y el tiempo necesario para que finalice a una dada temperatura. Haciendo el mismo análisis para varias temperaturas, es posible trazar las curvas



que relacionan la temperatura y el tiempo requerido para conseguir un dado % de transformación durante una transformación isotérmica. Estas curvas TTT indican que a bajos sobreenfriamientos, el tiempo necesario para iniciar y finalizar la transformación $\gamma \rightarrow$ perlita es grande. Cuando el sobreenfriamiento ΔT aumenta, la velocidad de nucleación y de crecimiento de la perlita aumentan, y el tiempo para iniciar y finalizar la transformación decrece. Un mínimo tiempo se presenta en la nariz de la curva, que está

que está a aproximadamente 550°C . Estos diagramas T.T.T. son de gran utilidad práctica, ya que, a partir de ellos es posible predecir la estructura a obtener después de un tratamiento isotérmico.

El diagrama T.T.T. correspondiente a un acero fuera de la composición eutéctica presenta una curva adicional que corresponde al inicio de la formación de la ferrita proeutectoide para el caso hipoeutectoide y de la cementita proeutectoide en el hipereutectoide. Un diagrama general para un acero hipoeutectoide es el mostrado en la figura.



Los diagramas T.T.T. son fuertemente dependientes de las características y del estado inicial del material. Por ejemplo, dado que la ferrita y la perlita nuclean en los b. de grano de la austenita, el número de núcleos de estos constituyentes formados por segundo es proporcional a la superficie total de los bordes de grano iniciales. Así, el tiempo para que, a una dada temperatura, un % de austenita transforme a ferrita o perlita es menor para una austenita de grano inicial chico que para austenita de grano inicial grande. Así, un pequeño tamaño de grano inicial da diagramas T.T.T. corridos hacia la izquierda respecto de los correspondientes a un tamaño de grano inicial austenítico grande.

Efecto de elementos aleantes sobre los diagramas T.T.T.

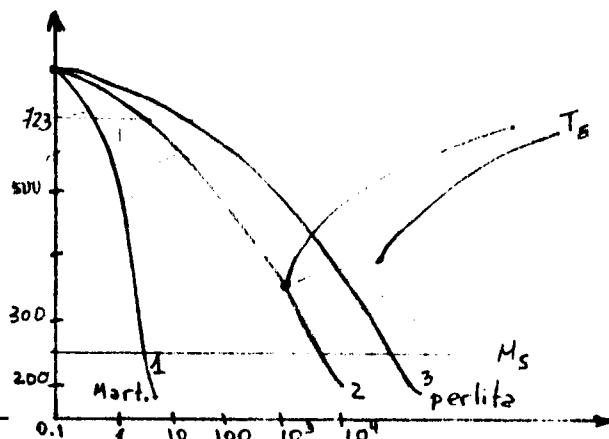
La mayor parte de los elementos aleantes tienen un efecto importante sobre la cinética de las transformaciones, haciendo que, en general, se produzcan más lentamente. En el caso particular de los aceros, el efecto de los elementos aleantes repercute en las correspondientes curvas T.T. y puede correrlas hacia tiempos mayores. Esto es importante porque da posi-

ción. Como en el caso de un enfriamiento continuo un incremento en tiempo está asociado con una caída de temperatura, el punto en el cual al transformación perlítica realmente comienza durante un enfriamiento continuo está corrido hacia menores temperaturas y mayores tiempos respecto de los indicados por el punto a.

Es el punto b. De la misma forma, el punto c del diagrama isotérmico está corrido también hacia las temperaturas menores y mayores tiempos. Es el punto d. A partir de este análisis realizado para los puntos a y c del diagrama isotérmico, puede decirse, en general, que los diagramas T.T.T. de enfriamiento continuo están corridos hacia abajo y hacia la derecha respecto de los correspondientes diagramas T.T.T. isotérmicos.

Cuando una pieza de acero de tamaño apreciable es enfriada, las velocidades de enfriamiento de la superficie y del interior (núcleo) son diferentes. Estas diferencias aumentan con la velocidad de enfriamiento.

Si esquemáticamente el diagrama de enfriamiento continuo del acero es el mostrado en la figura, para un templeado a 0°C la curva de velocidad de enfriamiento de la superficie estaría representada por la curva 1, mientras que la 3 sería la correspondiente del centro. Las estructuras finales de ambas zonas serían diferentes y estarían, naturalmente, acompañadas por comportamiento diferentes frente a distintos ensayos. La curva 2



representa la denominada velocidad de enfriamiento crítico. Toda velocidad de enfriamiento más rápida que ésta produce una estructura martensítica, mientras que cualquier velocidad más lenta produce una estructura que contiene algo de perlita.

TRANSFORMACION BAINITICA

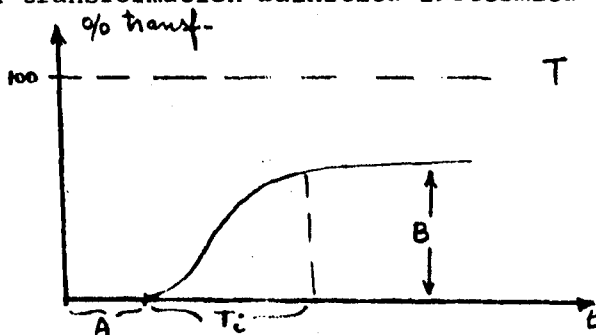
Cuando un acero se somete a un tratamiento isotérmico con un sobreenfriamiento algo mayor de 200 °C, o cuando se lo enfría no muy rápidamente hasta esos sobreenfriamientos, la austenita se descompone en una estructura que se denomina bainita. En aleaciones simples de Fe-C es muy difícil estudiar la transformación bainítica, ya que aproximadamente a 500 °C aparece junto con la perlita. (sobre enfriamiento respecto a 723°C)

Sólo a temperaturas más bajas, la velocidad de crecimiento de la perlita es pequeña y sólo aparece la bainita. Esa separación de las dos transformaciones puede conseguirse en aceros aleados, por lo que en general son éstos los que se estudian y los resultados se extienden a las aleaciones más simples. Actualmente hay todavía discrepancias sobre la transformación bainítica en aceros y en otros sistemas, y el mecanismo de reacción no está totalmente entendido.

A semejanza de la perlita, la bainita no es una única fase, sino una mezcla de dos: placas de ferrita y carburos. Al producirse la transformación bainítica, el C que está uniformemente distribuido en la austenita se concentra formando regiones de alto contenido de C, que dan por resultado la formación de carburos, dejando otras zonas de la matriz libres de carbono que forman la ferrita. Así, la transformación bainítica al producir cambios de composición en las distintas regiones de la muestra requiere la difusión de C.

Principales características de la transformación bainítica

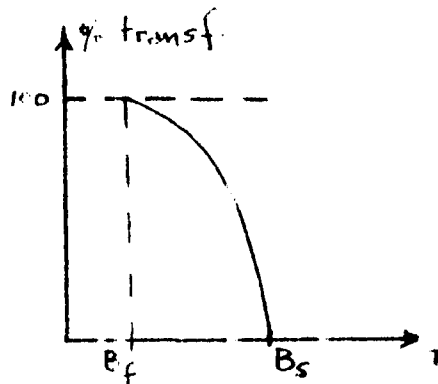
Como ya dijimos, la bainita se produce por descomposición de la austenita a temperatura constante o durante enfriamientos continuos a velocidades adecuadas. El progreso de una transformación bainítica isotérmica a temperatura: T, da una curva en forma de S, similar a la que se obtienen en un proceso típico de nucleación y crecimiento. En esta curva (ver figura), pueden



señalarse dos cosas: a) La transformación empieza después de un período de incubación A , se produce durante un intervalo de tiempo T_i , y luego finaliza.

b) Si bien hay una gran similitud con una curva típica de nucleación y crecimiento, hay también una diferencia fundamental: la descomposición de austenita a bainita no necesariamente es completa; es decir, la distancia B puede no ser 100%.

2.- El porcentaje de austenita transformado a bainita es una función de la temperatura a la que se produce la transformación. La curva de % de austenita transformada a bainita en función de T tiene el aspecto mostrado en la figura.



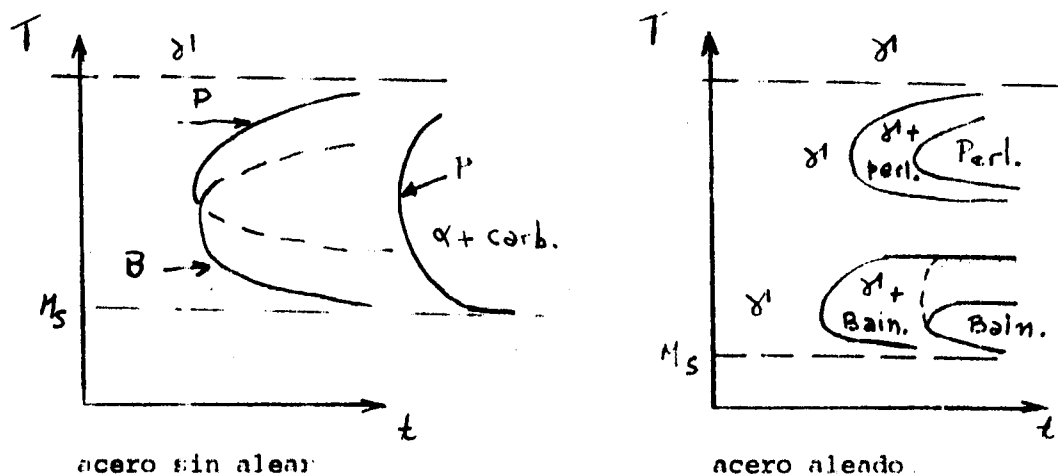
Esta curva tiene forma similar a la correspondiente M-T. para la transformación martensítica. Al igual que para ésta, existe una temperatura B_s , por encima de la cual no se produce la transformación bainítica. Similarmente al M_s , la B_s está determinada por la composición del acero.

La temperatura a la cual la transformación bainítica es total para un dado acero es B_f . No se ha encontrado una relación entre M_s y B_f . B_f puede estar sobre o debajo de M_s , dependiendo de la composición del acero. Para aquellas composiciones en las cuales M_s está sobre B_f , no puede conseguirse una estructura 100% bainítica por ningún tratamiento térmico. En composiciones para las cuales M_s está por debajo de B_f , pueden obtenerse estructuras 100% bainítica.

Un aumento del contenido de C y elementos aleantes baja B_s y no modifica mucho el valor de B_f haciendo decrecer la región de austenita transformada a bainita.

Un mayor contenido de C, por otra parte, aumenta el rango entre M_s y B_f ya que disminuye fuertemente la primera.

3.- Las condiciones de tiempo, temperatura bajo las cuales la austenita transforma a bainita, pueden ser aproximadamente las mismas que las condiciones bajo las cuales la austenita transforma a perlita, o pueden ser distintas, dependiendo del contenido de aleantes del acero. Los dos casos extremos pueden esquematizarse en los siguientes diagramas TTT.



Como se ve, según sea el contenido de aleantes es el grado de superposición de las curvas.

4.- Cuando ninguna otra curva T.T.T. se superpone con la correspondiente a una para la transformación bainítica, la austenita no transformada a bainita se mantiene y permanece no transformada por tiempos muy largos. La región rayada en el diagrama, indica la zona para la cual la transformación $\gamma \rightarrow$ bainita no es completa.

5.- La transformación bainítica es prácticamente insensible a la medida del grano inicial austenítico.

Por el contrario, la temperatura de austenización puede ejercer, en ciertos aceros, un efecto importante sobre la cinética de transformación austenita $\rightarrow$ bainita. Por ejemplo, la transformación puede ser acelerada incrementando la temperatura de austenización respecto de un valor inicial más bajo. Este fenómeno es reversible en el sentido de que la velocidad de la transformación bainítica vuelve a su valor inicial cuando desde la alta temperatura se pasa a la temperatura de austenización menor.

6.- Estructuralmente la bainita es un agregado de ferrita y carburos. Muchos estudios han mostrado que el carburo resultante de la descomposición austenita $\rightarrow$ bainita, producida a temperaturas superiores a 350°C es invariablemente cementita, independientemente del contenido de aleantes del acero.

Este es un carburo ortorómbico de composición $(FeM)_3 C$, donde M representa los varios elementos aleantes. El contenido de aleantes de la cementita en la bainita es el mismo que en la austenita original. Es decir, no hay participación de elementos aleantes asociada con la transformación. Sin embargo, si después de producida la transformación bainítica se deja el acero a alta temperatura, comienza, la redistribución de elementos aleantes entre los carburos y la ferrita para llegar a una condición de equilibrio.

Los carburos formados en la transformación bainítica a temperaturas menores de $350^{\circ}C$ son distintos de la cementita formada a alta temperatura, ya que medidas magnéticas no revelan el punto de Curie correspondiente a la cementita, y las medidas dilatómetricas dan mayores dilataciones que las predichas sobre las bases de una estructura ferrita + cementita.

7.- Desde el punto de vista morfológico pueden reconocerse fundamentalmente dos tipos de bainita: la bainita superior temperatura $350^{\circ}C$ y la bainita inferior temperatura $< 350^{\circ}C$. Estas dos bainitas presentan diferencias microestructurales. En la bainita superior los carburos (cementita) que la constituyen frecuentemente forman partículas alargadas entre las placas, de ferrita bainítica.

En la bainita inferior, los carburos tienden a precipitar dentro de las placas de ferrita formando un ángulo con la dirección de crecimiento máximo o eje longitudinal de las placas de ferrita bainítica.

La formación de la ferrita bainítica, tanto en el caso de la bainita superior como de la inferior, se produce por un mecanismo de corte y crece con una relación de orientación respecto de la austenita en la que se formó. El hecho más saliente de la transformación bainítica, es así, su naturaleza dual. En ciertos aspectos, como en la formación de las agujas de ferrita, presenta características de una transformación martensítica, y, en otros, como en la precipitación de carburos, características de una transformación con difusión.

Bainita superior (Temperaturas por encima de $350^{\circ}C$)

Las primeras etapas de la transformación $\gamma \rightarrow$ bainita superior en ace-

ros de bajo contenido de C consisten en la formación de "listones" de ferrita desde la austenita por un proceso de corte. Las tensiones que acompañan este proceso de corte, parecen producir un fenómeno cooperativo de nucleación por el cual se produce la nucleación "lado" a "lado" de listones que finalmente forman un haz de listones paralelos de ferrita con una pequeña desorientación entre sí. Cuando los listones de ferrita crecen, el carbono que sale de ellos difunde en la austenita y enriquece en C las zonas de austenita próximas a las interfases ferrita bainítica, produciéndose finalmente la precipitación de carburos (cementita) a lo largo de los bordes de ferrita.

Cuando se incrementa el contenido medio de C de la aleación, los carburos empiezan a estar más juntos hasta que finalmente, cuando el contenido de carbono es muy alto, la cementita precipitada entre las placas de ferrita forma un "cordón" continuo.

Tanto la ferrita como la cementita que se forman en la bainita superior tienen una relación de orientación fija con la matriz de austenita, lo que confirma que ambas, ferrita bainítica y cementita bainítica se forman directamente a partir de la austenita.

Cuando el contenido de C de la aleación sigue incrementándose, se acelera la formación de carburos, y en aleaciones próximas a la composición eutectoide no es posible establecer si los carburos o la ferrita es la fase que primero nuclea.

Bainita inferior (Temperaturas menores de 350°C)

La secuencia de pasos durante la transformación a bainita inferior es la misma, independientemente del contenido de C de la aleación.

Inicialmente se forma, al igual que en la bainita superior, una placa de ferrita bainítica, la que, debido a la baja velocidad de difusión del C a las temperaturas a las que se produce la bainita inferior es muy delgada. Esta placa de ferrita está, por la misma razón, sobresaturada en C. El crecimiento de esta placa sobresaturada puede producirse sólo si la sobresaturación es decrecida. Es observado que, para decrecer esa sobresaturación, se produce la rápida precipitación de carburos dentro de la placa ferrítica, la que, entonces puede crecer lateralmente.

El crecimiento de las placas individuales de la bainita inferior con los carburos precipitados en su centro es continuo hasta que las placas que crecen chocan unas con otras. A medida que la temperatura decrece las placas de ferrita se producen más rápidamente, al igual que la precipitación de C, por lo que, en general, las placas finales de ferrita son más finas.

Los carburos que precipitan dentro de la ferrita lo hacen con una relación de orientación fija respecto de c/placa de ferrita, y además lo hacen con una inclinación fija respecto del eje de la placa.

El cambio de la estructura de bainita superior a bainita inferior no se produce a una temperatura fija sino sobre un rango de temperaturas, de modo tal que, a algunas temperaturas se observa una mezcla de ambas estructuras.

En aceros de alto contenido de C, la temperatura de transición de una morfología a otra se produce a aproximadamente 350°C. En aceros de menor contenido de C, este cambio se produce a temperaturas mayores.

Transformaciones del tipo bainítico se han encontrado también en otros sistemas no ferrosos como por ejemplo en aleaciones Cu-Zn en las que puede retenerse por templado la fase β de alta temperatura.

Templada esta fase desde aproximadamente 850°C y recocida isotérmicamente a aproximadamente 210°C, transforma en una estructura del tipo bainítico.