

TRANSICIÓN COLUMNAR EQUIAXIADA EN LA SOLIDIFICACIÓN DE ALEACIONES Al-Cu DILUIDAS.

S. I. Betelú*, O. Fornaro* y H. Palacio**

Instituto de Física de Materiales Tandil, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, ¹Pinto 399 (7000), Tandil.

Se realizaron experiencias de solidificación unidireccional en aleaciones Al-Cu diluidas y se midió la velocidad de avance de la interfaz columnar (V) y el gradiente de temperatura delante de ella (G), para correlacionarlos con la aparición de la transición columnar equiaxiada (TCE). Se encontró que ésta ocurre cuando el gradiente alcanza un valor crítico que depende principalmente de la cantidad de sitios nucleantes efectivos por unidad de volumen y la concentración de la aleación.

I. INTRODUCCIÓN

La formación de la zona equiaxiada requiere tanto de la presencia de nucleantes activos delante del frente columnar como condiciones favorables para promover su crecimiento. En base a esto, Hunt¹ desarrolló un modelo de la TCE y dedujo que en condiciones estacionarias la transición ocurre si el gradiente G de temperatura delante de la interfaz es más bajo que un valor crítico:

$$G < 0.617 N_0^{1/3} \Delta T_c \left[1 - (\Delta T_n / \Delta T_c)^3 \right]$$

donde ΔT_c es el sobreenfriamiento del frente columnar, ΔT_n es el sobreenfriamiento crítico de nucleación de los nucleantes efectivos y N_0 es la cantidad de nucleantes efectivos por unidad de volumen. El sobreenfriamiento del frente columnar es aproximadamente:

$$\Delta T_c = \sqrt{\frac{VC_0}{A}}$$

donde A es una constante^{2,3}, que para el sistema Al-Cu es

$$A = 0.03 \frac{\text{cm}}{\text{°C}^2 \text{s}}$$

En los trabajos experimentales realizados por Weimberg² la TCE ocurre cuando el gradiente alcanza un valor crítico que concuerda con el del modelo de Hunt.

El propósito de este trabajo es medir G y V en

la TCE bajo distintas condiciones de solidificación, y analizar la microestructura resultante para correlacionar los resultados con la teoría.

II. TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Se prepararon probetas de Al-Cu de distintas concentraciones (1, 2 y 10% Cu) que luego fueron fundidas dentro de un equipo de solidificación unidireccional vertical, y solidificadas de abajo hacia arriba. Esto se hizo dentro de un tubo de cuarzo con las paredes aisladas y con la cámara del horno a temperatura constante para evitar el flujo lateral de calor. Para detectar la posición de la interfaz se utilizó una termocupla móvil, con la que se midió el gradiente en el líquido delante de la interfaz y la velocidad del frente columnar con un error del orden del 5% para gradientes mayores a 1 °C/cm. Para variar la cantidad de sitios nucleantes efectivos por unidad de volumen, en algunas experiencias se agregó un nucleante de base *TiB*.

Luego de la solidificación las probetas fueron cortadas longitudinalmente y se les hizo una macrografía para observar la TCE . Otras partes de las probetas fueron sometidas a un análisis micrográfico para observar la subestructura de las dendritas columnares y las equiaxiadas.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al 1% Y 2 % Cu CON ADICIÓN DE NUCLEANTES

Todas las TCE observadas en estas experiencias fueron graduales, es decir no presentaron una transición abrupta. En la Fig. 1 se muestra una pro-

*Becario CIC PBA.

**Investigador CIC PBA.

beta de Al 2% Cu con aproximadamente 239 granos/cm³ en la parte equiaxiada. En la zona columnar presenta una estructura irregular con dendritas columnares desordenadas donde aparecen granos equiaxiados atrapados.

En la Fig. 2 se muestra una micrografía (25X) de la misma probeta en donde se puede ver en detalle la estructura de la parte columnar. Las dendritas columnares presentan una dispersión con respecto al eje de la vertical, lo que podría deberse a la interacción con los granos equiaxiados.

Para caracterizar la forma de los granos en la zona columnar, se midieron la cantidad de granos por unidad de longitud en dirección transversal y paralela a la dirección de crecimiento. Se calculó un factor de forma como el cociente entre ambas medidas. En todas las experiencias se encontró que este factor de forma es mayor (granos más columnares) a medida que aumenta el gradiente G y que tiende a 1.0 (granos equiaxiados) cuando G disminuye.

Para comparar los resultados de las mediciones con la teoría de Hunt, se necesita conocer N_0 , la cantidad de sitios nucleantes efectivos por unidad de volumen, y ΔT_n , el sobreenfriamiento crítico para la nucleación. Se midió la cantidad de granos equiaxiados por unidad de volumen en la zona equiaxiada y se supuso que debía ser del orden de N_0 . Se encontró que la teoría predecía gradientes más grandes que los medidos experimentalmente en la TCE (ver Tabla 1), pero del mismo orden de magnitud. Esto podría significar que hay más granos equiaxiados por unidad de volumen que sitios nucleantes efectivos. Por otro lado se supuso que ΔT_n era despreciable frente al sobreenfriamiento de las dendritas columnares ΔT_c , sin embargo estimamos que esta aproximación podría ser mejorada.

TiB(ppm)	N_0 (cm ⁻³) estimado	C_0	V(cm/s) medida	G (°C/cm) medido	G (°C/cm) teórico
14.2	239	2	0.028	1.40	5.23
64.7	2706	2	0.027	3.31	7.00
356	2024	2	0.016	4.03	4.59
87	297	1	0.017	2.63	3.09

Tabla 1. Valores medidos en las TCE de distintas probetas.

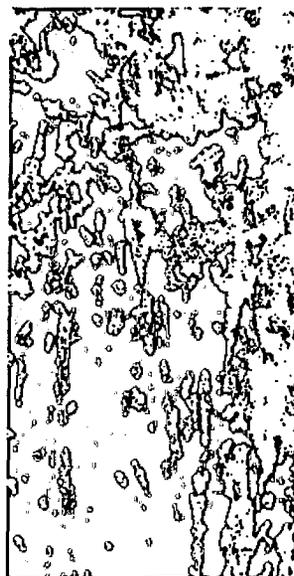


Fig. 1: (Ver texto).



Fig. 2: (Ver texto).

Al 1%, 2% Y 10% Cu SIN ADICIÓN DE NUCLEANTES

En las probetas de Al 1% y 2% Cu sin nucleantes se obtuvieron estructuras totalmente columnares y ordenadas en la dirección del crecimiento, sin TCE. En estos casos los gradientes menores

que pudieron ser detectados fueron del orden de 0.5 C/cm (en el límite de apreciación del sistema de medición utilizado), con velocidades entre 0.017 cm/s y 0.027 cm/s.

En las experiencias con Al 10% Cu se observó la aparición de la TCE. La parte columnar esta formada por dendritas columnares ordenadas en la dirección de crecimiento. La TCE es abrupta y no se observan granos equiaxiados atrapados en la zona columnar. El gradiente medido en la transición fue menor que 1.0 °C/cm. Como en las experiencias anteriores, la teoría predice en este caso gradientes más elevados en la TCE.

N_0 (cm ⁻³) estimado	C_0	V(cm/s) medida	G (°C/cm) medido	G (°C/cm) teórico
8.8	10	0.047	0.47	5.0
15.3	10	0.016	0.71	3.5

Tabla 2. Valores medidos en la TCE de probetas sin nucleante.

IV. CONCLUSIONES

En las experiencias en las que no se agregó nucleante se encontró que la TCE ocurría a partir de una concentración del 10% Cu, mientras que con Al 1% y 2% Cu no se observó la TCE aún con gradientes

del orden de 0.5 °C/cm. Esto posiblemente se deba a que el sobreenfriamiento no fue suficiente para el crecimiento de los granos equiaxiados que el gradiente crítico es más pequeño que el alcanzado en estas experiencias debido a la baja concentración de soluto. Cuando aparece, la TCE es abrupta, con una zona columnar formada por dendritas ordenadas en la dirección de crecimiento.

En probetas con adición de nucleantes la TCE ocurre cuando el gradiente de temperatura alcanza un valor crítico que aumenta con la cantidad de nucleantes agregados. En estos casos la estructura de la zona columnar tiende a ser desordenada y con granos equiaxiados atrapados.

Con la teoría de Hunt sólo se pudo predecir el orden de magnitud correcto del valor crítico para el gradiente medido, debido a la dificultad en estimar N_0 y ΔT_n .

AGRADECIMIENTOS

Al PID BID del CONICET No 0149, a la CIC PBA y a la SeCyT de la UNCPBA.

REFERENCIAS

1. J. D. Hunt, Mat. Sci. Eng. 65, pp. 75 (1984).
2. I. Ziv and F. Weimberg, Metall. Trans., 20B, pp. 731 (1989).
3. M. H. Burden and J. D. Hunt: J. Cryst. Growth, 22, pp. 99 (1974).