DESARROLLO DE INESTABILIDADES LATERALES DURANTE EL CRECIMIENTO CELULAR

O. Fornaro, H. Palacio y H. Biloni(*).
IFIMAT: UNCentro-CICPBA – (*) LEMIT-CICPBA
Pinto 399 (7000) Tandil - TEL/FAX: (0293) 4-2821
eMail: hpalacio@tandil.edu.ar

Resumen

Se ha estudiado la aparición de inestabilidades en las zonas más profundas de la interfaz durante el crecimiento unidireccional celular de Al-Cu diluído. Es sabido que las celdas pueden avanzar como prolongaciones con dimensiones varios órdenes de magnitiud mayores que su sección transversal. Esto implica que la solidificación se completa con el crecimiento lateral de las celdas, hecho que se produce hacia una zona mucho más rica que la del frente de solidificación y con gradientes térmicos mucho menores, factores ambos que facilitan la aparición de inestabilidades locales. En este trabajo se identifican estas inestabilidades, caracterizándolas a través de su espaciado y relacionándolas con las condiciones de solidificación impuestas, así como con la formación de microestructuras irregulares.

Introducción

Es bien conocido que la microestructura resultante en el crecimiento unidireccional es resultante de la velocidad de crecimiento V y del gradiente térmico G_L en el líquido por delante de la interfaz sólido-líquido, así .como de la composición nominal de la aleación utilizada [1].

Bajo condiciones de solidificación unidireccional, es decir con gradiente térmico positivo, la interfaz estable será de morfología plana. Superado un cierto umbral, el frente plano se perturba, formando una subestructura celular. Según la velocidad se incrementa, las celdas se desarrollan en dendritas, al mismo tiempo que existe una variación continua del espaciado. Finalmente, para altas velocidades de avance de la interfaz se produce una transición dendrítica-celular-plana en lo que se denomina límite de estabilidad absoluta [2].

En trabajos experimentales previos con el sistema Al-0.5%Cu, se han hallado estas diferentes microestructuras en la zona de menor velocidad, caracterizándose el espaciado y el radio de curvatura de la punta [3]. Posteriormente se evaluó el comportamiento de las perturbaciones asociadas al crecimiento durante la transición plano-celular, que fue caracterizada como subcrítica [4]. Según se aumenta la velocidad, la transición se produce según es sabido con depresiones nodales, bandas y luego celdas ordenadas. Sin embargo, superada esta etapa se hallaron

perturbaciones laterales en el crecimiento [5] que sólo pueden ser relacionadas con la formación de 'gotas' en los crecimientos de muestras delgadas o con las perturbaciones oscilatorias en las cercanías de la estabilidad morfológica [6].

En este trabajo se han identificado tales inestabilidades y se ha analizado si el rango de existencia corresponde a lo predicho por el análisis de perturbaciones, para relacionarlo con la transición celular-dendrítica.

Experimental

Las muestras fueron crecidas en un equipo tipo *Bridgman* de horno móvil. Los prelingotes eran obtenidos mediante colada por depresión en el interior de un tubo de cuarzo de 7 mm de diámetro por 250 mm de longitud, pintado internamente con pintura base grafito [3,4]. Las temperaturas en los especímenes fueron leídas con dos termocuplas tipo K incluídas previamente. Una vez obtenido el crecimiento era templado con un jet coaxial de agua. Entonces, los crecimientos eran seccionados longitudinal y transversalmente en diferentes zonas, con el fin de identificar la microesructura por medio de diferentes técnicas metalográficas [3-5].

Resultados y Discusión

Muestras crecidas bajo diferentes condiciones de solidificación fueron obtenidas en el transcurso de este trabajo. Algunos de los resultados fueron utilizados para determinar la morfología del frente de solidificación [3] y el comportamiento de las inestabilidades en las cercanías de la transición plano celular, incluyendo la determinación del tipo de transición [4]. En la *Figura 1* podemos observar dos cortes correspondientes a la zona celular inestable de crecimiento *a)* longitudinal *y b)* normal a la dirección de crecimiento, en la zona de la interfaz templada. Uno de los resultados más significativos consiste en la aparición de perturbaciones laterales al superar la etapa de celdas regulares. Este fenómeno está condicionado por el campo de microsegregación en el frente y en el líquido intercelular. No obstante, la aparición de las inestabilidades laterales en las paredes celulares como la de la *Figura 1 c)* queda mejor explicada por las condiciones locales de solidificación [5].

Es de notar que este tipo de etapas intermedias como las celdas inestables e irregulares no pueden ser explicadas en una geometría de crecimiento bidimensional. En este aspecto existen dos consideraciones que realizar: i) La estabilidad del estado celular tiene un rango de existencia limitado [7], tras el que aparecen celdas irregulares y ii) en las observaciones con muestras delgadas se bloquea uno de los modos laterales debido a los efectos de pared, restringiendo la dimensionalidad del problema [8], por lo que estas celdas irregulares no pueden ser observadas.

En la *Figura 2* se puede apreciar las longitudes de onda de las perturbaciones

a) b)

c)

Figura 1: Micrografías de celdas inestables. *a)* Vista longitudinal; b) celda irregular; c) inestabilidad lateral periódica en la pared celular de una celda inestable.

presentes en cada caso. Al perturbarse el frente plano y establecerse una morfología celular de crecimiento, aparecen dos tipos de inestabilidades, las de frecuencia menor parecen ser las formadoras del espaciado primario, aunque existe un factor de 2 á 6 respecto al valor predicho por el análisis lineal de perturbaciones. Entre las longitudes de onda del frente y las que se encuentran en las zonas celulares profundas existen hasta dos órdenes de magnitud de diferencia. Estas sólamente pueden ser explicadas por el bajo gradiente que pueden apreciar localmente las celdas durante su crecimento lateral.

Por último, cuando las celdas son suficientemente inestables para justificar la aparición de un espaciado secundario, aparecen longitudes de onda largas en las zonas laterales, en las cercanías del frente de solidificación y pueden tener más que ver con las condiciones del frente que con las condiciones locales. De hecho las inestabilidades laterales de ondas cortas siguen coexistiendo con éstas. La línea punteada sugiere que el mecanismo es el mismo, aunque la zona de aplicación sea diferente.

Conclusiones

En este trabajo se han estudiado las inestabilidades características del

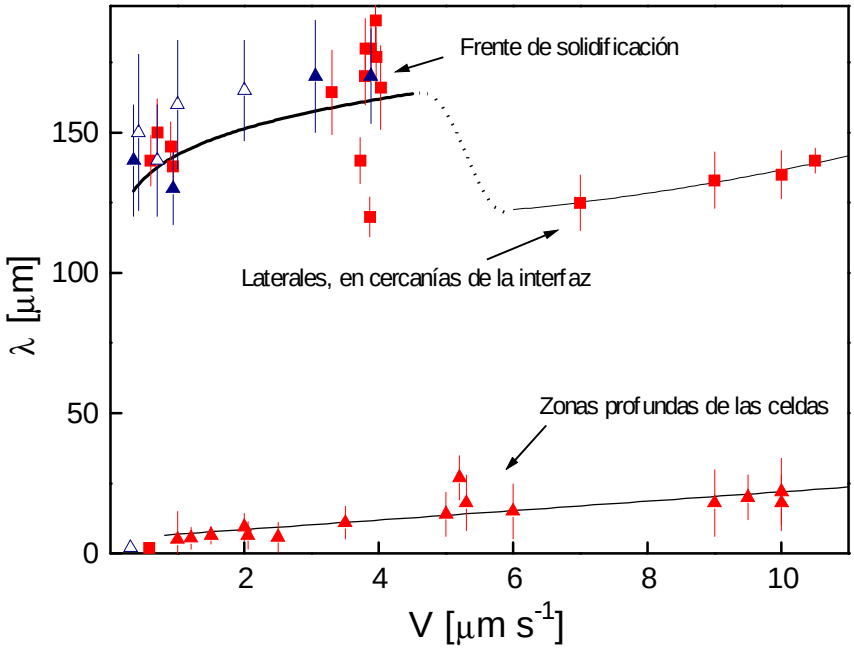

Figura 2: Longitud de onda de las perturbaciones detectadas durante el crecimiento celular de Al-0.5%Cu.

crecimiento celular. De este modo es posible identificar dos mecanismos coexistentes dependiendo de la velocidad de avance de la interfaz.

Fundamentalmente, al establecerse el crecimiento celular regular, aparecen sólamente perturbaciones en el frente de solidificación. Al pasar a ser celdas irregulares se pueden encontrar inestabilidades laterales de longitud de onda corta que continúan según se incrementa la velocidad. Por otro lado, aparecen perturbaciones laterales en la dirección longitudinal de crecimiento, que podrían ser asociadas a la formación de un espaciado secundario. La longitud de onda de tales perturbaciones sugiere que estaría gobernada por la inestabilidad del frente de solidificación.

Referencias

[1] H. Biloni and W. Boettinger: *Physical Metallurgy, Fourth ed.,* Ch. 8: *Solidification*, R. W. Cahn and P. Haasen eds. (1996).

[2] A. Ludwig, W. W. Kurz: *Acta Matter* **44** (1996) 3643.

[3] O. Fornaro and H. Palacio: *Scripta Matter* **31** (1994) 1265.

[4] O. Fornaro and H. Palacio: *Scripta Matter*. **36** (1997) 439.

[5] O. Fornaro, H. Palacio y H. Biloni: "Evolución espontánea de la microestructura durante la solidificación unidireccional de Al-0.5 wt.%Cu", *Anales IV Congreso Internacional IBEROMET, Santiago de Chile, Chile* (1996) 1405.

[6] S. R. Coriell and R. F. Sekerka: *J. Crystal Growth* **61** (1983) 499.

[7] B. Caroli, C. Caroli and B. Roulet: *J. Crystal Growth* **68** (1984) 677.

[8] H. Son and S. N. Tewari: *Matter. Trans.* **27A** (1996) 1111.