

MIGRACION DE LIMITES DE GRANO EN HIELO I: ESTUDIO EN BICRISTALES

C. L. Di Prinzio *, O. B. Nasello **, E. A. Ceppi **

Facultad de Matemáticas, Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba,
Laprida 854, 5000 Córdoba

Se estudia la migración de bordes de grano en bicristales de hielo puro (concentración de impurezas disueltas menor que 1 ppm). Se realizan experiencias de reconocido en bicristales con seguimiento discreto de la evolución temporal del borde de grano, con temperaturas de recocido dentro del rango 0 a -20° C y para distintas desorientaciones de los cristales. Se determina la rapidez con que se mueve el extremo libre del límite de grano, obteniéndose así una medida del producto $M\gamma$ donde M y γ son la movilidad del límite de grano y la energía superficial del límite de grano respectivamente. Los resultados obtenidos muestran que el producto $M\gamma$ correspondiente a bicristales obtenidos a partir de rotaciones alrededor del eje c es mucho menor que para los bicristales con ejes de rotación a . Se observa, además, que para algunas desorientaciones el borde de grano se facetada, resultando, en consecuencia, $M\gamma$ del orden del 0.

INTRODUCCION

La migración de un borde de grano ocurre cuando sobre él actúa una fuerza impulsora suficiente para causar el movimiento y reducir la energía libre del sistema. La relación entre la velocidad de migración (V) del borde de grano y la fuerza impulsora (P) es:

$$V = M P \quad (1)$$

donde M es la movilidad intrínseca del material.

Si la fuerza impulsora es una fuerza de capilaridad originada por la curvatura del límite ($1/\rho$), la velocidad de un punto de un borde de grano bidimensional (dr/dt) viene dada por:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{M\gamma}{\rho} \quad (2)$$

donde γ es la energía superficial del borde de grano.

Mullins¹ encontró familias de bordes de grano que representan las formas estacionarias que satisfacen la ecuación (2). Posteriormente Sun-Bauer² aplicó estos resultados al borde de grano de un bicristal, con la forma de "cuasi hipérbola", mostrada en la Fig. 1, obteniendo que la posición (a) del punto del borde de grano situado sobre la base de la hipérbola evoluciona en el tiempo (t) según:

$$a^2 = M\gamma f(\alpha) t \quad (3)$$

donde $f(\alpha)$ es el factor de magnificación.

De esta manera, Sun-Bauer³ encontró un método para determinar el producto $M\gamma$ de un borde de grano el cual controla el proceso de migración. Este producto depende, entre otras cosas, de la desorientación cristalina entre los cristales adyacentes al borde de grano y la temperatura de recocido (T).

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos al estudiar con el método de Sun-Bauer la migración de bordes de grano en hielo.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Se construyeron bicristales de hielo con desorientación cristalina controlada utilizando dos semillas monocristalinas y agua ultrapura (concentración de impurezas 1 ppm). Los bicristales obtenidos pueden dividirse en dos grupos:

Grupo I:

Bicristales con borde de tipo tilt y rotados alrededor del eje a a un ángulo θ ($[10\bar{1}0] / \theta$).

Grupo II:

Bicristales con borde de grano tipo tilt y rotados alrededor del eje c a un ángulo δ ($[0001] / \delta$).

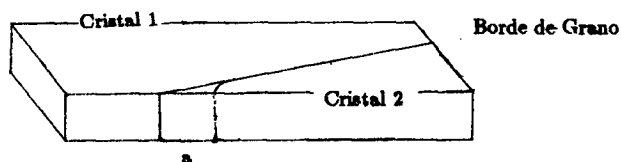


Figura 1: Representación esquemática de la forma de los bicristales.

* Becario del CONICET

** Investigador del CONICET

Tabla 1.

Cristal	Movilidad x energía $M\gamma$ (10^{-8} cm ² / seg.)	Desorientación cristalina	Grupo	Temp. °C
B2	43	$[10\bar{1}0] / 120^\circ$	I	0
B2	33	$[10\bar{1}0] / 45^\circ$		
B4	33	$[0001] / 30^\circ$	II	
B3	1.1	$[10\bar{1}0] / 45^\circ$	I	-2
BN8	1.15	$[10\bar{1}0] / 43^\circ$		
BN7	0.3	$[10\bar{1}0] / 15^\circ$		
BN10	0.55	$[10\bar{1}0] / 35^\circ$		
BN11	1.1	$[10\bar{1}0] / 43^\circ$		
BN8 (1)	1.15	$[10\bar{1}0] / 35^\circ$		
BN11 (3)	1.5	$[10\bar{1}0] / 35^\circ$		
BN3	0.18	$[0001] / 15^\circ$	II	-6
BN1	mov. no apreciable	$[0001] / 20^\circ$		
BN3	mov. no apreciable	$[0001] / 25^\circ$		
BN5	0.06	$[10\bar{1}0] / 15^\circ$	I	-6
BN11 (2)	0.093	$[10\bar{1}0] / 35^\circ$		
BN1	mov. no apreciable	$[0001] / 20^\circ$	II	-10
BN3	mov. no apreciable	$[0001] / 25^\circ$		
BN6	0.02	$[10\bar{1}0] / 15^\circ$	I	-10
BN11 (1)	0.07	$[10\bar{1}0] / 35^\circ$		
B3	0.5	$[10\bar{1}0] / 45^\circ$		
BN1	mov. no apreciable	$[0001] / 20^\circ$	II	-20
BN3	mov. no apreciable	$[0001] / 25^\circ$		
B3	mov. no apreciable	$[10\bar{1}0] / 45^\circ$	I	

Tabla 2

Cristal	Movilidad x energía $M\gamma$ (10^{-8} cm ² / seg.)	Desorientación cristalina	Temp. °C	Q eV
BN11 (3)	1.5	$[10\bar{1}0] / 35^\circ$	-2	2.7
BN11 (2)	0.09		-6	
BN11 (1)	0.07		-10	
BN5 (1)	0.3	$[10\bar{1}0] / 15^\circ$	-2	3.0
BN5	0.06		-6	
BN5	0.02		-10	
B3	3.3	$[10\bar{1}0] / 45^\circ$	0	3.3
	1.1		-2	
	0.5		-10	
	mov. no apreciable		-20	

De los bicristales obtenidos se cortaron muestras de la manera mostrada en la fig. 1 y se encapsularon con aceite de siliconas para reducir el efecto de marcación del borde de grano por evaporación. Las muestras se sometieron a recocido isotérmico con temperaturas en el rango [0, - 20° C]

RESULTADOS EXPERIMENTALES

a. Dependencia de la migración con la desorientación cristalina:

Se sometieron a recocidos muestras bicristalinas de distinta desorientación a igual temperatu-

ra. Los valores de $M\gamma$ obtenidos para todas las muestras estudiadas se encuentran en la Tabla 1. Como puede observarse, todos los cristales del grupo II; a excepción de las muestras BN3 y B4, no mostraron un movimiento apreciable del borde de grano a ninguna temperatura. Por otra parte los bicristales del grupo I mostraron movimiento sólo a temperaturas entre $[0, -10^\circ \text{C}]$.

b. Dependencia de la migración con la temperatura:

Se colocaron muestras del grupo I de igual desorientación a distintas temperaturas, obteniendo en cada caso los valores de $M\gamma$ como función de la temperatura. Los valores obtenidos de $M\gamma$ para cada temperatura de un mismo conjunto de muestras con la misma desorientación es mostrada en la Tabla II.

Suponiendo una relación para $M\gamma$ con T del tipo Arrhenius, encontramos energías de activación Q del proceso de migración, indicadas en la última columna de la tabla II.

CONCLUSIONES

De los datos experimentales obtenidos podemos decir que en general la migración es más alta en el

grupo I que en el grupo II. Estos resultados están en concordancia con los obtenidos en crecimiento de grano en hielo por Roos⁵. Dentro del grupo I no se observa una dependencia de la migración con el ángulo de rotación.

La energía de activación Q encontrada para cada caso es aproximadamente de 3 eV un valor muy alto comparándola con la energía de activación de la difusión de hielo, que es de aproximadamente⁴ 0.6 eV.

REFERENCIAS

1. W. W. Mullins, *Journal of Appl. Phys.*, Vol 27, Num 8, 1956.
2. R. G. Sun and C. L. Bauer, *Acta Met.*, Vol 18, June 1970.
3. R. C. Sun and C. L. Bauer, *Acta Met.*, Vol 18, June 1970.
4. P. Hobbs, *Ice Physics*, Claredon Press, Oxford, 1974.
5. D. v.d. S. Roos, *Journal of Glaciology* vol 6, N° 45 pp 411-420.