

# 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  $\gamma$  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  $\gamma$  es la energía superficial del borde de grano.

Mullins<sup>1</sup> encontró familias de bordes de grano que representan las formas estacionarias que satisfacen la ecuación (2). Posteriormente Sun-Bauer<sup>2</sup> 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-Bauer<sup>3</sup> 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  $\theta$  ( $[10\bar{1}0] / \theta$ ).

Grupo II:

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

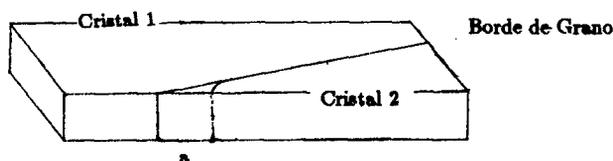


Figura 1: Representación esquemática de la forma de los bicristales.

\* Becario del CONICET

\*\* Investigador del CONICET

**Tabla 1.**

Cristal	Movilidad x energía $M\gamma$ ( $10^{-8}$ cm <sup>2</sup> / 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 <sup>2</sup> / 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 Roos<sup>5</sup>. 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 aproximadamente<sup>4</sup> 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.