

# Efecto de los tratamientos termomecánicos sobre la fase $\beta$ Cu-Zn-Al(Zr)

A. Furlani<sup>(1)</sup>, M. Stipcich<sup>(2)</sup> y R. Romero<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Centro Universitario, (5500) Mendoza; amfurlani@raiz.uncu.edu.ar

<sup>(2)</sup> Instituto de Física de Materiales Tandil (IFIMAT), Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Pinto 399, (7000) Tandil y Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires.

## Resumen

La evolución microestructural de muestras policristalinas de la fase metaestable  $\beta$  Cu-Zn-Al con adiciones de Zr como afinador de grano, es estudiada bajo diferentes condiciones de tratamiento termomecánico. El Zr se encuentra principalmente en las fases precipitadas. La influencia del laminado posterior a la fabricación de la aleación es analizada con detalle. Se presentan resultados de: evolución de tamaño de grano, fracción de volumen precipitada y morfología de los precipitados; y se analiza el rol de estas partículas en el anclaje de Zener.

## Introducción

Las aleaciones con memoria de forma base Cu han adquirido en los últimos años un particular interés tecnológico debido a su bajo costo y relativa facilidad de procesamiento. Cuando son tratadas térmicamente a temperaturas correspondientes a las de la región de estabilidad de la fase  $\beta$ , el excesivo crecimiento de grano deteriora, en general, las propiedades de las mismas y por consecuencia, sus potenciales aplicaciones comerciales. El control del tamaño de grano en aleaciones de este tipo se realiza con el agregado de elementos afinadores adecuados [1, 2, 3], con la aplicación de tratamientos termomecánicos [4, 5], o con ambos [6, 7]. En particular, algunos investigadores han señalado que el Zr es uno de los elementos más indicados para el efectivo control del crecimiento de grano durante envejecimientos a temperaturas alrededor de 1100 K [1, 2], pero existe poca información acerca del tipo de microestructura generada mediante algún tratamiento termomecánico, y el rol que desempeña la misma tanto durante el proceso de afinado como durante los tratamientos posteriores.

En este trabajo se estudia la evolución microestructural de muestras policristalinas de la fase metaestable  $\beta$  Cu-Zn-Al con aditamento de Zr como afinador de grano bajo diferentes condiciones de tratamiento termomecánico. El Zr se encuentra principalmente en las fases precipitadas. La influencia del laminado posterior a la fabricación de la aleación es analizada con detalle. Se presentan resultados de: evolución de tamaño de grano, fracción de volumen precipitada y morfología de los precipitados; y se analiza el rol de estas partículas en el anclaje de Zener.

## Experimental

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron muestras extraídas de lingotes de composición química según la tabla 1 ( $e/a = 1.48$ ). Los metales utilizados para fabricar las aleaciones fueron de pureza comercial, fundidos en ampollas de cuarzo selladas a las que previamente se les había efectuado vacío con bomba mecánica.

Zn	Al	Ti	B	Zr	imp.	Ms <sub>exp</sub>
15.516	7.450	-	-	1.004	$\leq 0.023$	283 K
15.631	8.030	-	-	-	-	296 K
15.569	7.999	0.300	0.075	-	-	296 K

Tabla 1: composición de las aleaciones utilizadas (% en peso), base Cu. Se indican las temperaturas de transformación espontánea experimental.

De los lingotes se cortaron trozos de los cuales algunos fueron laminados a 1123K hasta un 44% del espesor inicial. De los mismos se cortaron láminas circulares de 2.0 mm de espesor y 25.0 mm de diámetro mediante una cortadora de disco de diamante de baja velocidad, los que finalmente fueron pulidos con lija de grano 000. Se trataron térmicamente en un horno resistivo a 1173 K por tiempos variables, luego de los cuales se templaron en agua a temperatura ambiente.

Para su posterior análisis, las muestras fueron preparadas según se detalla en [8]; la cuantificación y caracterización de la microestructura se realizó con ayuda de un adquisidor de imágenes incorporado a un microscopio óptico.

La determinación de las temperaturas características se realizó sobre muestras de sección rectangular de (3 x 3 x 25) mm mediante medidas resistométricas, de acuerdo al método de las cuatro puntas.

## Resultados

La microestructura observada en este tipo de aleaciones ha sido descrita con detalle anteriormente [8], básicamente consiste en partículas alargadas con bordes muy agudos, distribuidas uniformemente en el material. La fracción de volumen precipitada promedio ( $f_v$ ) determinada para muestras con y sin laminado se presenta en la Figura 1. El proceso de trabajado mecánico no favorece la disolución de los precipitados, como es el caso con el agregado de otros modificadores de grano [9, 10].

Por otra parte, las características morfológicas de los precipitados no presentan cambios sustanciales aparentes luego del trabajado mecánico; sólo en algunos casos ha sido observada una fragmentación parcial de los mismos,

producto del laminado, como puede observarse en las Figuras 2 y 3.

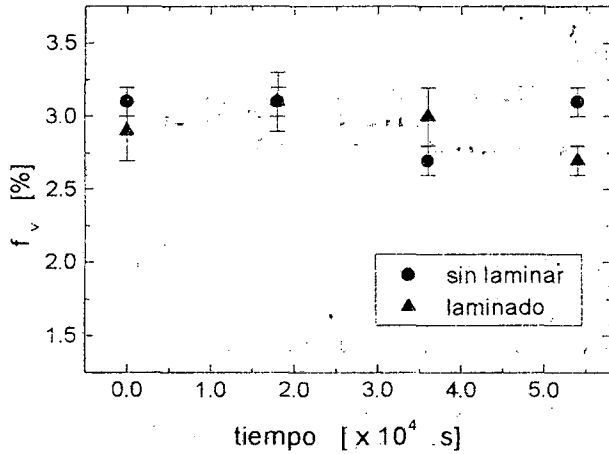


Figura 1: fracción de volumen precipitada en Cu-Zn-Al-Zr en función del tiempo de envejecido a 1173K.

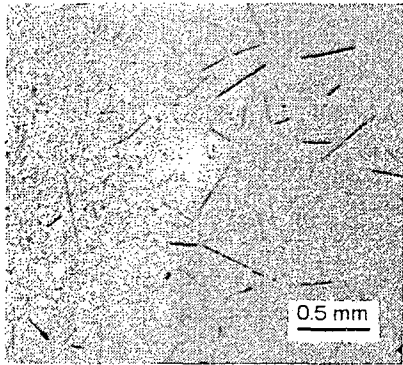


Figura 2: detalle de las partículas precipitadas en las muestras de Cu-Zn-Al-Zr sin trabajado mecánico.

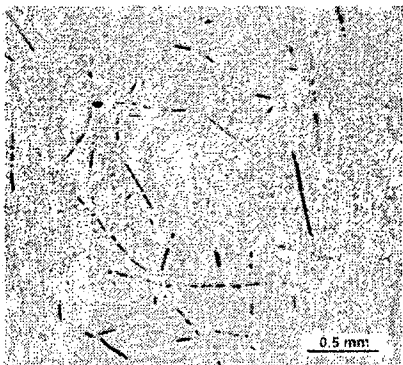


Figura 3: detalle de las partículas precipitadas en las muestras de Cu-Zn-Al-Zr con trabajado mecánico, se aprecia la fragmentación de algunos de los precipitados.

En las Figuras 4 y 5 se presenta la evolución del tamaño de grano promedio con el tiempo de tratamiento térmico para muestras de Cu-Zn-Al-Zr; a fines comparativos, en la misma figura se agregan resultados obtenidos para muestras de Cu-Zn-Al y Cu-Zn-Al-Ti-B en las mismas condiciones de trabajado mecánico y con tratamientos térmicos similares.

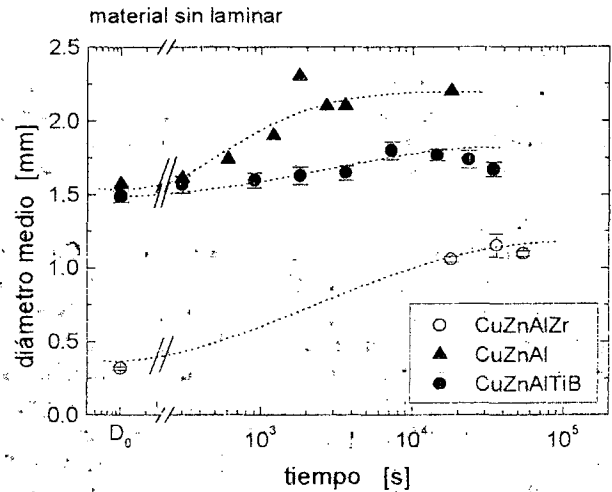


Figura 4: evolución del tamaño de grano promedio en función del tiempo de tratamiento térmico para muestras sin trabajado mecánico. Las líneas punteadas son sólo ayuda visual; los tamaños de grano sin tratamiento térmico son indicados con  $D_0$ .

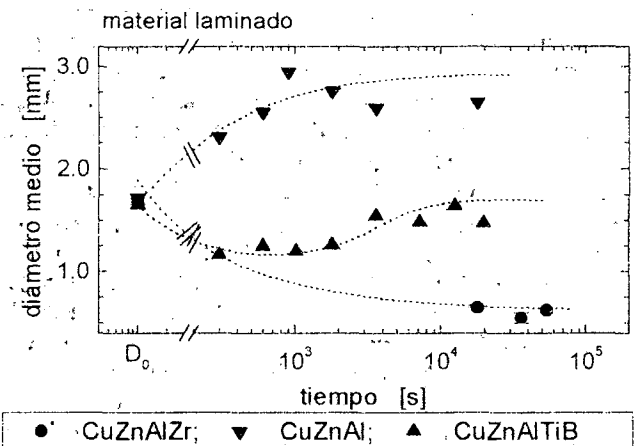


Figura 5: evolución del tamaño de grano promedio en función del tiempo de tratamiento térmico para muestras laminadas. Las líneas punteadas son sólo ayuda visual; los tamaños de grano sin tratamiento térmico son indicados con  $D_0$ .

El aspecto que más se destaca es la notable influencia del agregado de Zr sobre el tamaño de grano final obtenido para cada material, con laminado y sin él, llegando a ser, en el caso del material con trabajado mecánico,  $\approx 6$  veces más pequeño que el correspondiente a Cu-Zn-Al.

El trabajado mecánico no influye sobre la distribución de los precipitados; es interesante destacar que dichos precipitados son los responsables de la inhibición del crecimiento de grano posterior, actuando como efectivas barreras sobre el movimiento de los bordes de grano. En la Figura 6 se puede observar que el avance de la frontera de grano depende del ángulo que forma la misma con la partícula precipitada. El avance de la frontera de grano es posible cuando este ángulo es aproximadamente recto; sin embargo, se produce el anclaje del borde de grano cuando las partículas tienden a ser paralelas al mismo, impidiendo su posterior avance. Este fenómeno, a su vez, caracteriza a la microestructura: en ausencia de afinadores de grano, los bordes son suavemente curvados, mientras que con el agregado de Zr las fronteras de grano son notablemente irregulares (ver Figuras 7 y 8).

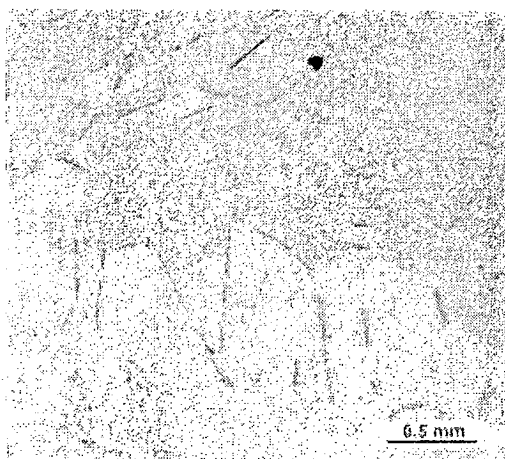


Figura 6: anclaje de los bordes de grano por partículas precipitadas de Zr.

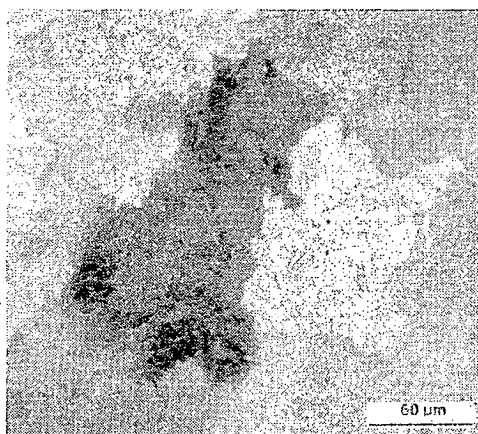


Figura 7: detalle de los bordes de grano con el agregado de Zr.

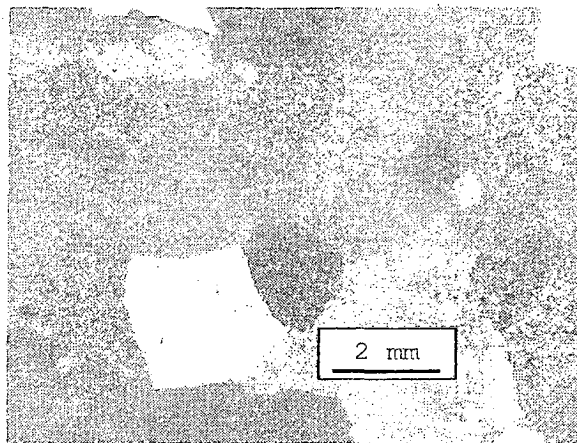


Figura 8: detalle de los bordes de grano en Cu-Zn-Al.

Como es sabido, luego del trabajado mecánico el crecimiento de grano se produce a partir de la recrystalización del material; este proceso, en los casos de muestras con afinador de grano, se manifiesta a través de la disminución de grano inicial (ver la Figura 5). Efecto que ha sido observado con el agregado de Zr en aleaciones similares [11]. En el caso de Cu-Zn-Al sin afinador de grano, la recrystalización es suficientemente rápida y probablemente ocurra directamente durante el enfriamiento posterior al laminado.

Si se considera que la distribución de las partículas precipitadas es aproximadamente homogénea y que la fuerza impulsora del crecimiento está dada por  $2\gamma/\rho$  [12], donde  $\gamma$  es la energía superficial de la frontera de grano y  $\rho$  el radio de curvatura, se puede realizar una primera estimación sobre el tamaño de grano final utilizando la expresión [12, 13]:

$$D = \frac{4}{3} \left( \frac{r}{f_v^{0.87}} \right) \quad (1)$$

En (1)  $D$  es el tamaño de grano final esperado,  $r$  es el radio promedio de las partículas precipitadas y  $f_v$  su fracción de volumen. A partir de los datos extraídos de la Figura 1 y teniendo en cuenta un valor de  $r \approx 40 \mu\text{m}$  [8], se estimó que el tamaño de grano final para las muestras con Zr debería ser  $D \approx 1.1 \text{ mm}$ . En ambos casos, con y sin trabajado mecánico, los resultados experimentales obtenidos son bastante similares a los estimados a partir de la ec. (1); las pequeñas diferencias observadas para el caso del material laminado podrían ser atribuidas a la forma de las partículas precipitadas, lo que debería ser tenido en cuenta en un análisis posterior.

A partir de los resultados obtenidos, es de destacar la eficacia del Zr como afinador de grano en este tipo de muestras. Su influencia es notable tanto en el tamaño de

grano final obtenido luego de fundida la aleación, como así también sobre la posterior evolución de la microestructura, después de realizar los tratamientos termomecánicos correspondientes.

## Referencias

---

- 1 J.S.Lee et al; *Metallography* **19** (1986), pág. 401;
- 2 D.N.Adnyana; *Metallography* **18** (1985), pág. 187;
- 3 R.W.Cahn; '*Physical Metallurgy*', ed. R.W.Cahn and P.Hassen, 3ra ed., p.1595, Holanda, North-Holland Physics Publishing;
- 4 R.Elst, et al; *Z.Metallkde.* **77** (1986), pág. 421;
- 5 G.N.Sure, et al; *Met.Trans.* **15A** (1984), pág. 1613;
- 6 G.N.Sure, et al; *Met.Trans.* **15A** (1984), pág. 1613;
- 7 H.Morawiec, et al; *Z.Metallkde* **81** (1990), pág. 419;
- 8 A.M. Furlani, M.Stipcich y R.Romero, aceptado para su publicación en los Anales SAM-IBEROMET V (1998)
- 9 R.Elst, J.Van Humbeeck and L.Delaey; *Mat. Sci. Tech.* **4** (1988), pág. 644.
- 10 M. Stipcich, and R.Romero, a ser publicado.
- 11 J.W.Kim, D.W.Roh, E.S.Lee and Y.G.Kim; *Met. Trans.* **21A** (1990), p.741.
- 12 C.H.Wörner; *Scripta Met.*, **23** (1989), pág. 1990.
- 13 C.H.Wörner and P.M.Hazzledine; *JOM*, **44** (1992), pág.16.