

**CORRELACION ENTRE LA LOCALIZACION DE LA DEFORMACION Y LA  
MICROESTRUCTURA EN COBRE POLICRISTALINO SOMETIDO A  
FATIGA: INFLUENCIA EN EL MODO DE FRACTURA.**

L. Llanes y C. Laird\*

Depto. de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, E.T.S.I.I.B.,  
Universidad Politécnica de Cataluña, 08028 Barcelona.

\*Dept. of Materials Science and Engineering, University of Pennsylvania,  
Philadelphia, PA 19104.

**Resumen.** En este trabajo se analizan resultados experimentales previamente reportados sobre la influencia del tamaño de grano en el modo de fractura de cobre de alta pureza sometido a fatiga. La discusión es llevada a cabo en términos de deformación localizada e incluye un parámetro microestructural tradicionalmente no tomado en cuenta en trabajos previos: la textura. Se propone que, a bajas amplitudes de deformación, la existencia de diferentes grados de localización de deformación asociados a volúmenes de material con distintas orientaciones, con respecto al eje tensil, es la clave para interpretar la transición en el modo de fractura, de transgranular a intergranular, observado en el cobre al incrementar el tamaño de grano y el grado de la textura  $\langle 111 \rangle$ - $\langle 100 \rangle$  correspondiente, implícita en el tratamiento térmico. La localización de la deformación es descrita en términos de la existencia o no de las bandas de deslizamiento persistentes (BDPs), los agentes de localización de la deformación en cobre. La correlación entre la nucleación y multiplicación de las BDPs y la microestructura (tamaño de grano-textura) es obtenida de resultados experimentales encontrados recientemente por los autores y sus colaboradores.

**Abstract.** Experimental results previously reported on the effect of grain size on the failure mode of cycled high-purity copper are here analyzed. Discussion is carried out in terms of localized deformation and includes a microstructural parameter often overlooked: texture. It is proposed that, at low strain amplitudes, the existence of different levels of strain localization associated with differently oriented grains is the key for explaining the transition in the failure mode, from transgranular to intergranular, observed in copper with increasing grain size and the corresponding multi-slip annealing texture. Localization of deformation is described in terms of whether or not Persistent Slip Bands (PSBs) are present. The correlation between nucleation and multiplication of PSBs and microstructure (expressed as a complex factor grain size/texture) is given from recent experimental findings by the authors and coworkers.

## I. INTRODUCCION

Debido a que los sitios de iniciación de las grietas son importantes en el entendimiento de los mecanismos de fractura en fatiga, varios artículos de revisión han sido publicados en esta línea de investigación (por ejemplo, refs. [1,2]). De estos trabajos puede ser concluido que las grietas durante el proceso de fatiga generalmente nuclean en puntos de discontinuidad o singularidad en la superficie de los materiales metálicos. Estas singularidades pueden ser de carácter estructural (tales

como inclusiones o partículas de segunda fase), geométrico (tales como irregularidades por un mal acabado superficial durante el mecanizado del componente) o fenomenológico (tales como las intrusiones y extrusiones ocasionadas por las Bandas de Deslizamiento Persistente, BDPs, durante el proceso de ciclado).

Nucleación de las grietas en inclusiones o partículas de segunda fase es típico en aleaciones comerciales donde la cantidad de elementos aleantes e impurezas

son significativos. En el caso de metales puros la nucleación de la grieta es relacionada con sitios donde existen concentraciones de esfuerzos. Estas concentraciones de esfuerzos traen implícita una localización de la deformación y por tanto favorecen la nucleación de las grietas. En el marco microestructural tres regiones presentan estas características: las BDPs, los bordes de grano y los bordes de macla.

En el caso de materiales metálicos caracterizados por deslizamiento no-planar (energía de defecto de apilamiento alta), del cual cobre puro es un caso modelo, la nucleación de las grietas a altas amplitudes de deformación plástica es frecuentemente encontrada en los bordes de grano, por lo que la fractura se dice tener un carácter intergranular [1,3]. En el otro extremo, a bajas amplitudes de deformación plástica, la nucleación de las grietas ha sido generalmente reportada como transgranular, en otras palabras, iniciada en las BDPs [1]. Sin embargo, investigaciones llevadas a cabo en los últimos años en el modo de fractura de cobre policristalino fatigado a bajas amplitudes de deformación muestran que tamaños de grano mayores favorecen la nucleación de grietas de carácter intergranular [4,5]. Observaciones similares han sido reportadas en otros trabajos donde el estudio del efecto de la microestructura en el modo de fractura no era el objetivo primario [6,7]. En los trabajos de Liang y Laird [4] y Llanes [5] el mecanismo de nucleación de las grietas ha sido asociado a la localización de la deformación en las BDPs en las muestras de tamaño de grano pequeño y a la homogenización de la deformación en las de tamaño grande, pero la relación intrínseca tamaño de grano-localización de la deformación no ha sido descrita satisfactoriamente. Es el foco de este trabajo clarificar esta correlación, tomando como base fundamental resultados experimentales recientes en el efecto de la microestructura en el comportamiento cíclico de cobre [8,9].

## 2. LOS AGENTES DE LA LOCALIZACION DE LA DEFORMACION

Las Bandas de Deslizamiento Persistentes mencionadas en la sección anterior son los agentes activos de la localización de la deformación por fatiga en cobre. Entonces, cualquier análisis en que se desea describir la localización de la deformación por fatiga, debe ser

dado en términos del fenómeno de nucleación y propagación de estas BDPs.

Estudios de las estructuras de dislocaciones asociadas a ensayos cíclicos de cobre mono- y policristalino muestran, en general, una evolución subestructural gradual. Inicialmente, a muy bajas amplitudes de deformación, se forma la llamada "estructura matriz", la cual puede ser descrita como enmarañamientos densos de dislocaciones de borde primarias en configuración multipolar. Cuando la amplitud es aumentada, la "estructura matriz" degenera en arreglos energéticamente más eficientes: las BDPs, también llamadas "estructuras de escalera". Estos arreglos son igualmente asociados a deslizamiento exclusivamente primario, pero muy localizado. Cuando deslizamiento secundario se hace necesario y prominente, por un incremento de la deformación (o de la carga) que se le impone al material, las estructuras de laberinto (deslizamiento doble) y de celda (deslizamiento múltiple) se promueven y la deformación vuelve a homogeneizarse. Es importante señalar, dentro del contexto de ideas que se pretende exponer en este trabajo, que en regiones donde condiciones de deslizamiento múltiple son intrínsecas, existe evidencia experimental que la evolución descrita no es tan gradual y la nucleación de BDPs parece ser suprimida. Ejemplos de estas regiones son los volúmenes de material orientados para favorecer condiciones de deslizamiento múltiple o regiones adyacentes a los bordes de grano. Entonces, parece válido afirmar que la existencia de condiciones de deslizamiento simple es una condición necesaria y restrictiva para la formación y promoción de BDPs, en otras palabras, para la existencia de deformación localizada.

## 3. EFECTO TEORICO DEL TAMAÑO DE GRANO EN LA LOCALIZACION DE LA DEFORMACION

En todo material policristalino se generan esfuerzos internos para satisfacer las condiciones de compatibilidad entre granos vecinos. En general estos esfuerzos son un factor de influencia significativa en la evolución de los arreglos de las dislocaciones cuando el material es sometido a deformación, tanto bajo condiciones monotónicas como cíclicas. Para observar esta influencia con claridad, en el caso que aquí interesa, se puede utilizar un modelo basado en la descripción de cada grano como compuesto de dos

regiones: el interior del grano y la región adyacente a los bordes de grano (Figura 1). Para mayor simplicidad se consideraran granos orientados de tal manera con respecto al eje tensil para que se favorezca condiciones de deslizamiento simple. En un policristal ideal, en otras palabras, en un material cuyos granos esten orientados al azar, la proporción de granos orientados bajo estas condiciones representan una fracción volumétrica próxima a la unidad. Las regiones adyacentes al borde de grano conllevan de por sí deslizamiento múltiple para satisfacer las condiciones de compatibilidad entre los granos vecinos, y por tanto favorecen la formación de estructuras de deslizamiento doble (por ejemplo, Figura 2) y múltiple, a amplitudes de deformación plástica donde BDPs y estructura matriz "primaria" son observadas en el interior de los granos [8,10]. Entonces, dado que un tamaño de grano pequeño implica una fracción mayor de borde de grano por unidad de volumen que un tamaño de grano grande, se esperaría que el primero tuviera un efecto homogeneizador sobre la deformación, en términos de las estructuras de dislocaciones que se promueven bajo condiciones de deslizamiento múltiple. Esto no es observado experimentalmente [4,9].

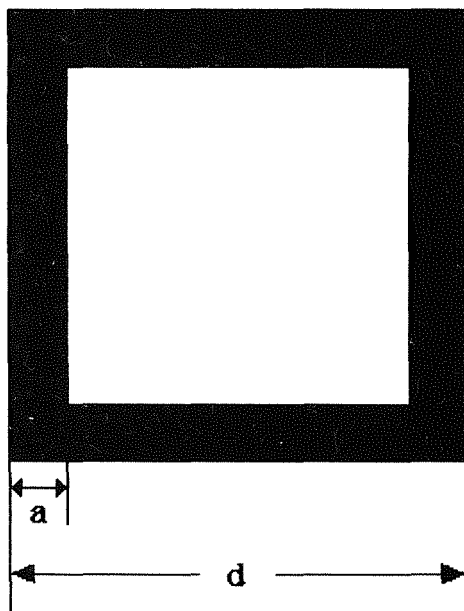


Fig. 1. Modelo de grano cristalino, de tamaño de grano  $d$ , como compuesto de dos regiones: una adyacente al borde de grano (de profundidad  $a$ ) y otra correspondiente al interior del grano.

#### 4. LA TEXTURA COMO PARAMETRO MICROESTRUCTURAL Y SU INFLUENCIA EN EL COMPORTAMIENTO CICLICO DEL COBRE

La mayoría de las investigaciones acerca de los efectos de la microestructura en el comportamiento mecánico de materiales metálicos han sido llevadas a cabo en términos del tamaño de grano. En estos estudios los tamaños de grano grandes son obtenidos a través del aumento de la temperatura de recocido, y por ello la textura del material recocido se hace más marcada cuanto mayor es el tamaño de grano que se desea obtener [9,11,12]. Esta relación intrínseca entre textura y tamaño de grano hace difícil distinguir los efectos de cada uno de ellos sobre la propiedad en estudio. Basados en esto Llanes *et al.* [9] han estudiado el efecto de la microestructura, en términos de un factor complejo donde las variables tamaño de grano y textura son combinadas, en el comportamiento cíclico y la evolución subestructural de cobre de alta pureza. Los resultados experimentales obtenidos en ese trabajo se comentan a continuación y se utilizan en la próxima sección para explicar la correlación de la microestructura con el modo de fractura en la fatiga del cobre a bajas amplitudes de deformación.

Cobre puro de tres tamaños de grano diferentes: grande ( $300 \mu\text{m}$ ), mediano ( $171 \mu\text{m}$ ) y pequeño ( $64 \mu\text{m}$ ), siguiendo la nomenclatura usada en [9], fueron ensayados bajo condiciones de deformación total controlada. La respuesta cíclica de los materiales estudiados mostró diferencias significativas a amplitudes de deformación intermedias (Figura 3), rango de amplitudes donde se esperaría que las BDPs estuvieran presentes. En general, el comportamiento cíclico del cobre de tamaño de grano grande mostró un endurecimiento cíclico más prominente y valores de esfuerzo mayores que el de tamaño de grano pequeño. Estudios de la textura de los materiales mostraron que los procesos convencionales de recristalización y crecimiento de grano, utilizados en cobre trabajado en frío para obtener las distintas microestructuras, dio como resultado una textura implícita  $\langle 111 \rangle - \langle 100 \rangle$ . La textura fue bastante suave en el material de tamaño de grano pequeño (tratado térmicamente a  $650 \text{ }^\circ\text{C}$  por 3,5 horas), y muy pronunciada en el de tamaño grande (tratado térmicamente a  $950 \text{ }^\circ\text{C}$  por 4,5 horas). Entonces, el comportamiento observado se asoció a la existencia en el cobre de tamaño de grano grande de esta textura

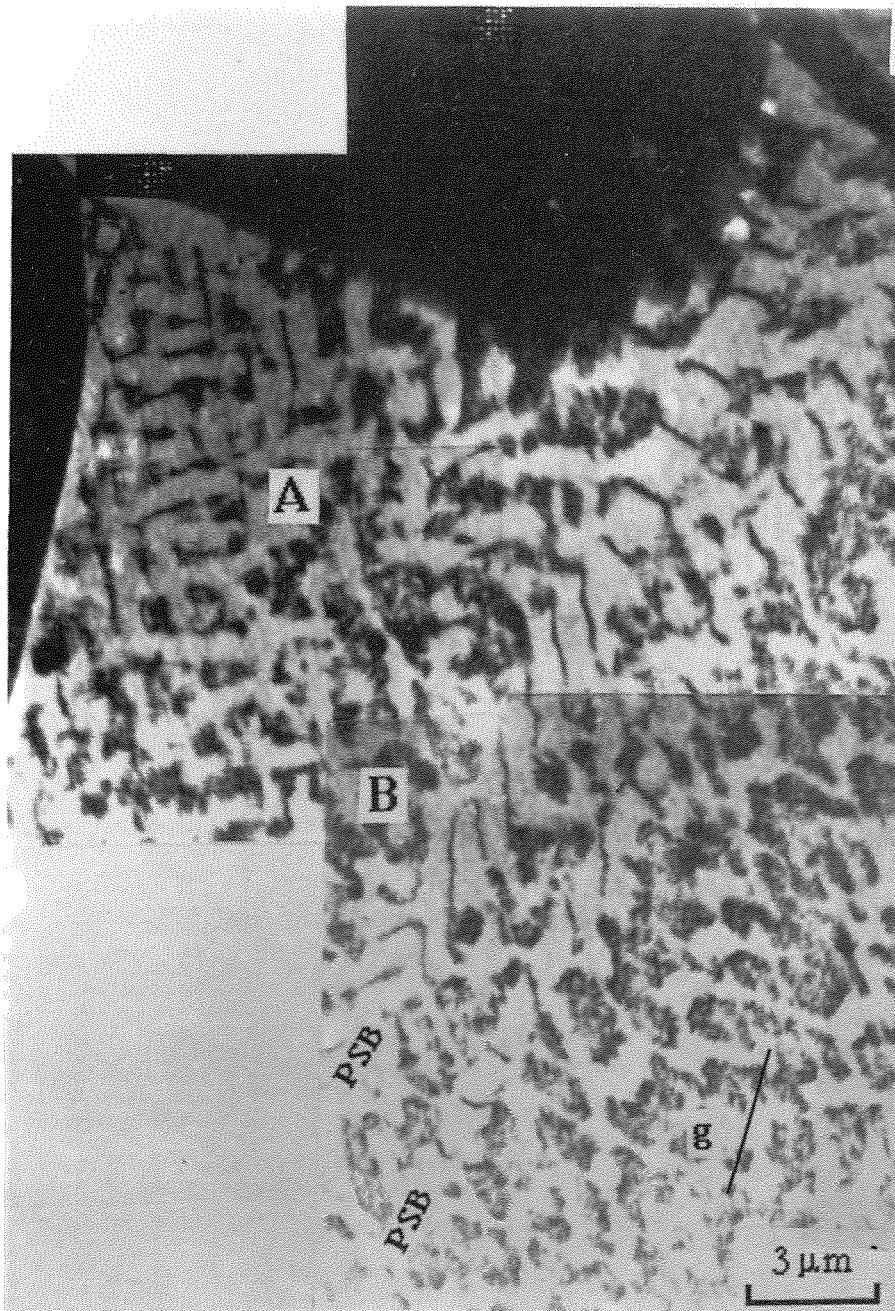


Fig. 2. Bandas de Deslizamiento Persistente (PSBs, región B) y estructura matriz laberintica (deslizamiento doble, región A adyacente al borde de grano) en cobre de grano pequeño, sometido a una deformación plástica de  $2,7 \times 10^{-4}$ ,  $g = [002]$ , de Ref. [8].

muy bien definida correspondiente a orientaciones  $\langle 111 \rangle$ - $\langle 100 \rangle$ , bien conocidas por favorecer condiciones de deslizamiento múltiple. Evidencia experimental de esta conclusión son las observaciones llevadas a cabo por microscopía electrónica de transmisión de los arreglos de dislocaciones observados. Estas observaciones mostraron que en granos orientados para favorecer condiciones de deslizamiento múltiple, los cuales representaban una fracción volumétrica muy significativa en el cobre de tamaño de grano grande estudiado, se promueven estructuras de dislocaciones asociadas a deslizamiento doble y múltiple (Figura 4). Estos arreglos actúan para homogeneizar la deformación, ya a bajas amplitudes de deformación. Finalmente, este deslizamiento múltiple homogéneo inicial fue considerado por los autores como el responsable de la observación de una evolución relativamente rápida de la estructura matriz a estructura de celda, la cual se refleja en los bajos niveles de deformación localizada observada en la Curva Esfuerzo-Deformación Cíclica del cobre de tamaño de grano grande y textura pronunciada (Figura 3).

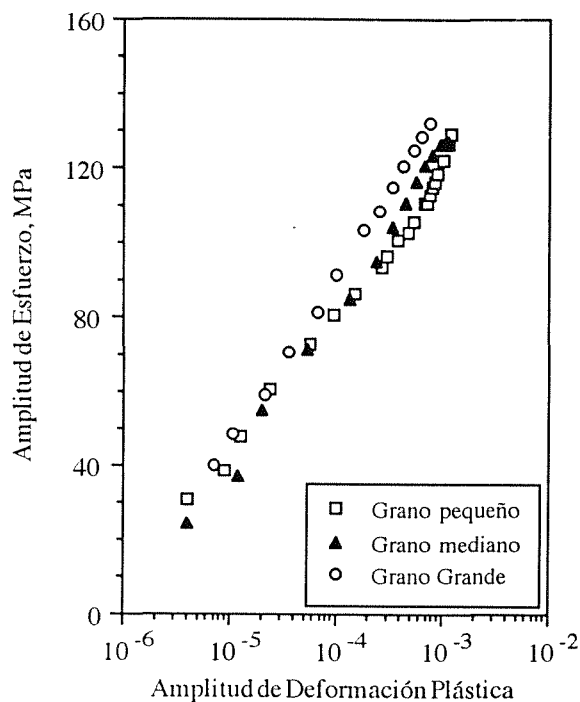


Fig. 3. Curva Esfuerzo-Deformación Cíclica de cobre puro de tamaños de grano diferentes, de la Ref. [9].

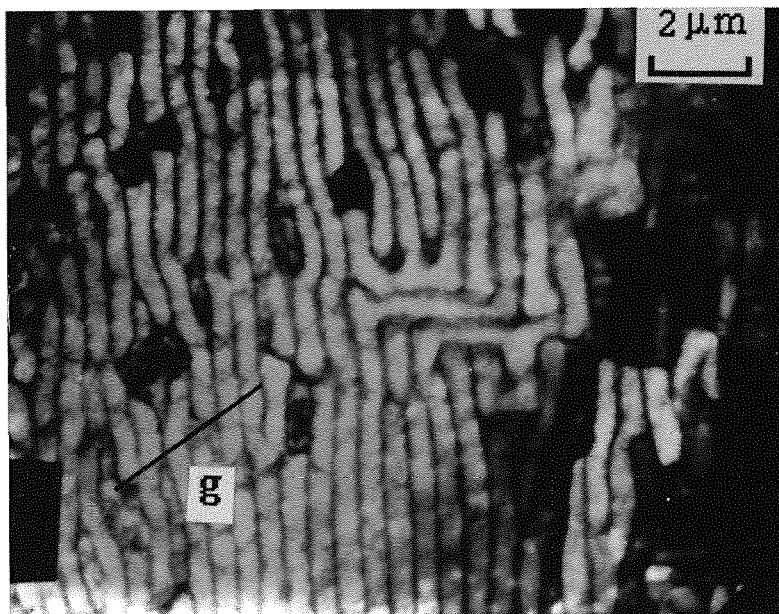


Fig. 4. Paredes dipolares definidas y estructura laberintica en estado de desarrollo en cobre de grano grande, sometido a una deformación plástica relativamente pequeña ( $1,2 \times 10^{-4}$ ),  $g = [11\bar{1}]$ . La imagen corresponde a un grano orientado tal que condiciones de deslizamiento múltiple son favorecidas (eje tensil paralelo a la dirección  $\langle 011 \rangle$ ), de Ref. [9].

## 5. DISCUSION FINAL Y CONCLUSIONES

Tomando en cuenta lo dicho en la sección anterior los resultados experimentales obtenidos por Liang y Laird [4] y Llanes [5] pueden ser reinterpretados en términos de tamaño de grano, textura y la localización de la deformación en cobre policristalino sometido a fatiga. Para darle mayor validez al punto de vista que se expone a continuación cabe destacar que los cobres usados en las investigaciones referidas en [4], [5], y [9] fueron obtenidos del mismo proveedor y los tratamientos térmicos a los materiales fueron llevados a cabo en el mismo laboratorio (Sección de Procesamiento de Materiales, University of Pennsylvania), con el mismo equipo experimental.

Los resultados de Llanes *et al.* [9] muestran que la existencia de fracciones volumétricas significativas de granos orientados para favorecer condiciones de deslizamiento múltiple es la clave para explicar diferencias en el comportamiento cíclico del cobre. Si se modifica el modelo de grano presentado anteriormente, tal que un grano orientado para favorecer deslizamiento múltiple sea descrito como una región única de deslizamiento múltiple, la comparación cualitativa entre el volumen de material orientado para favorecer condiciones de deslizamiento múltiple de los materiales de grano pequeño y grande no se limitaría a la fracción volumétrica de regiones adyacentes a los bordes de grano (por unidad de volumen), sino también a la fracción volumétrica de granos orientados para favorecer éstas.

Entonces, considerando que:

1.- El cobre policristalino estudiado en las referencias [4] y [5] no satisface las condiciones de un policristal ideal, ya que los materiales utilizados presentan una textura de recocido  $\langle 111 \rangle$ - $\langle 100 \rangle$ ;

2.- Esta textura es mucho más definida en el material de tamaño de grano grande que en el de tamaño de grano pequeño, y por tanto implica una fracción volumétrica elevada y muy significativa de granos orientados para favorecer condiciones de deslizamiento múltiple en el primero; y

3.- Condiciones de deslizamiento múltiple promueven homogeneización de la deformación;

Se puede concluir lo siguiente:

1.- La fractura transgranular frecuentemente encontrada en cobre de tamaño de grano pequeño fatigado a bajas amplitudes de deformación debe estar

intimamente asociada con la existencia prominente de bandas de deslizamiento persistentes (agentes de localización de la deformación en cobre) en la elevada fracción volumétrica de granos orientados para favorecer condiciones de deslizamiento simple; y

2.- En el otro extremo, el alto porcentaje volumétrico de material orientado para favorecer condiciones de deslizamiento múltiple en el cobre de tamaño de grano grande debe promover la homogeneización de la deformación y por lo tanto se propone como la causa del modo intergranular de fractura generalmente observado en este material.

Finalmente, y en términos del modelo descrito, a mayores amplitudes de deformación, el volumen de material donde condiciones de deslizamiento simple es prominente, sería cada vez menor y la transición en el modo de fractura de cobre de tamaño de grano pequeño de transgranular a intergranular sería esperado. Resultados experimentales demuestran que dicha transición existe [5], y la observación de estructuras de celda, como los arreglos de dislocaciones prominentes en este rango de amplitudes [8,9], independientemente del tamaño de grano, confirma la correlación entre homogeneización de la deformación y el modo intergranular de fractura descrita.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Departamento de Energía de los Estados Unidos de América la financiación del presente trabajo mediante el proyecto DE-FG02-85ER45188. Igualmente agradecen al Laboratory for Research on the Structure of Matter (LRSM) por su colaboración en el uso de sus Servicios de Ensayos Mecánicos y Microscopía Electrónica.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Laird, C. y Duquette, J., "Mechanisms of Fatigue Crack Nucleation", en "Corrosion Fatigue: Chemistry, Mechanics and Microstructure" (Ed. Devereaux, O.J., McEvily, A.J. y Staehle, R.W.), pp. 88-117 (1972).
- [2] Klesnil, M. y Lukás, P., "Fatigue of Metallic Materials", Mater. Sci. Monographs 7, pp. 9-80 (1980).

- [3] Laird, C. y Feltner, C.E., "The Coffin-Manson Law in Relation to Slip Character", *Trans. Metall. Soc. AIME* **239**, pp. 1074-1083 (1967).
- [4] Liang, F.L. y Laird, C., "Control of Intergranular Fatigue Cracking by Slip Homogeneity in Copper. I: Effect of Grain Size", *Mater. Sci. Eng.* **A117**, pp 95-102 (1989).
- [5] Llanes, L., "Influencia del Tratamiento Mecánico Previo y el Tamaño de Grano en el Comportamiento Cíclico del Cobre", Tesis de Maestría, Universidad Simón Bolívar (1990).
- [6] Mughrabi, H. y Wang, R., "Cyclic Strain Localization and Fatigue Crack Initiation in Persistent Slip Bands in Face-Centred Cubic Metals and Single-Phase Alloys", en "Proc. 1st. Int. Symp. on Defects and Fracture" (Ed. Sih, G.C. y Zorski, H.), pp. 15-28 (1982).
- [7] Figueroa, J.C. and Laird, C., "Crack Initiation Mechanisms in Copper Polycrystals Cycled under Constant Strain Amplitude and in Step Tests", *Mater. Sci. Eng.* **60**, pp. 45-58 (1983).
- [8] Llanes, L. y Laird, C., "Substructure Evolution of Copper Polycrystals under Different Testing Conditions: Conventional Strain Control and Ramp-Loading", enviado a *Mater. Sci. Eng.* (1992).
- [9] Llanes, L., Rollett, A.D., Bassani, J.L. y Laird, C., "Effect of Grain Size and Annealing Texture on the Cyclic Response and the Substructure Evolution of Polycrystalline Copper", enviado a *Acta Metall. Mater.* (1993).
- [10] Figueroa, J.C., Bhat, P., De La Veaux, R., Murzenski, S. y Laird, C., "The Cyclic Stress-Strain Response of Copper at Low Strains. I: Constant Amplitude Testing", *Acta Metall.* **29**, pp. 1667-1678 (1981).
- [11] Mughrabi, H. y Wang, R., "Cyclic Stress-Strain Response and High-Cycle Fatigue Behaviour of Copper Polycrystals", en "Basic Mechanisms in Fatigue of Metals" (Ed. Lukás, P. y Polák, J.), pp. 1-13 (1988).
- [12] Jensen, D.J., Thompson, A.W. y Hansen, N., "The Role of Grain Size and Strain in Work Hardening and Texture Development", *Metall. Trans. A* **20A**, pp. 2803-2810 (1989).