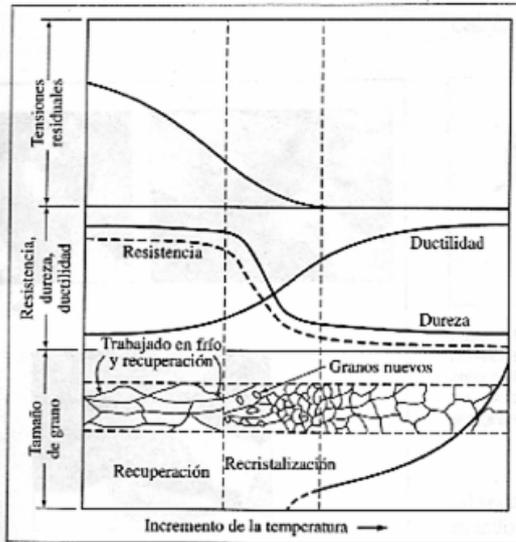


## Propiedades mecánicas de metales II

### 6.1. Recuperación y recristalización de metales deformados plásticamente

Durante el procesado y fabricación de metales y aleaciones, algunas veces es necesario tratar térmicamente el metal trabajado en frío para ablandarlo y aumentar así su ductilidad. Si la temperatura de tratamiento es suficientemente elevada durante un intervalo de tiempo suficiente, la estructura del metal trabajado en frío pasará a través de una serie de cambios denominados: 1) *recuperación*; 2) *recristalización*, y 3) *crecimiento de grano*. La Figura 6.1 muestra esquemáticamente dichos cambios estructurales al aumentar la temperatura del metal además de los correspondientes cambios en las propiedades mecánicas. El tratamiento térmico que ablanda el metal trabajado en frío



(Adaptado de Z. D. Jastrzebski, «The Nature and Properties of Engineering Materials», 2.ª ed., Wiley, 1976, p. 228.)

**FIGURA 6.1.** Efecto del recocido en los cambios sobre la estructura y las propiedades mecánicas de un metal trabajado en frío.

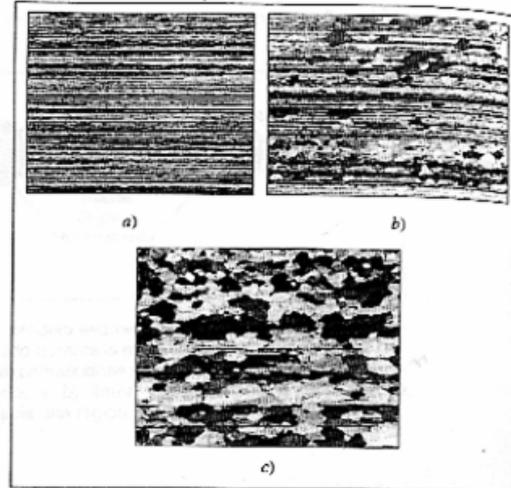
se denomina *recocido* y se utilizan los términos de *recocido parcial* o *recocido total* para referirse a los grados de ablandamiento. Examinemos ahora estos cambios estructurales con más detalle, comenzando con la estructura del metal fuertemente trabajado en frío.

### 6.1.1. Estructura de un metal severamente deformado en frío antes del tratamiento térmico

Cuando un metal es fuertemente trabajado en frío, mucha de la energía de deformación utilizada en la deformación plástica es almacenada en forma de dislocaciones y otras imperfecciones como defectos puntuales. Por ello un metal endurecido por deformación tiene una energía interna mayor que un metal no deformado. La Figura 6.2a muestra la microestructura ( $\times 100$ ) de una lámina de aleación de Al-0,8 por 100 Mg trabajada en frío hasta un 85 por 100 de reducción. Obsérvese que los granos están muy alargados en la dirección de laminación. Una micrografía (Fig. 6.3) obtenida por microscopía electrónica de transmisión ( $\times 20.000$ ) muestra una estructura formada por una red celular con las paredes de celda que presentan alta densidad de dislocaciones. Un metal altamente trabajado en frío tiene aproximadamente  $10^{12}$  líneas de dislocación/cm<sup>2</sup>.

### 6.1.2. Recuperación

Cuando un metal severamente deformado se calienta en el rango de temperatura de recuperación, justo por de-



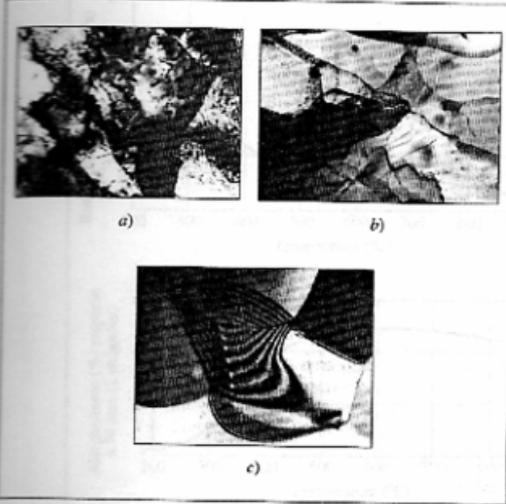
(Según «Metals Handbook», vol. 7, 8.ª ed., American Society for Metals, 1972, p. 243.)

**FIGURA 6.2.** Lámina de aleación de aluminio 5657 (0,8 por 100 Mg) mostrando las microestructuras obtenidas después de la laminación en frío (85 por 100 de reducción) y posterior tratamiento térmico (micrografías obtenidas por microscopía óptica a  $\times 100$  y con luz polarizada). a) Trabajado en frío del 85 por 100, sección longitudinal. Los granos se encuentran fuertemente alargados; b) trabajado en frío del 85 por 100 y tratamiento de relajación de tensiones a 302 °C (575 °F), 1 hora. Se observa el inicio de la recristalización que mejora la conformabilidad de la lámina, y c) trabajado en frío del 85 por 100 y recocido a 316 °C (600 °F), 1 h. Se observa una estructura de granos recristalizados y de bandas de granos no recristalizados.

bajo de la temperatura de recristalización, se relajan las tensiones internas del metal (Fig. 6.1). Durante la recuperación, se suministra suficiente energía térmica como para permitir el reordenamiento de las dislocaciones en configuraciones de menor energía (Fig. 6.4). La recuperación de muchos metales trabajados en frío (por ejemplo, aluminio puro) genera una estructura de subgranos con límites de grano de ángulo pequeño, como se muestra en la Figura 6.3b. El proceso de recuperación se denomina *poligonización*, y frecuentemente es un cambio estructural que precede a la recristalización. La energía interna del metal recuperado es menor que la del estado de trabajado en frío, puesto que se aniquilan más dislocaciones o se transforman en configuraciones de menor energía mediante el proceso de recuperación. Durante este proceso, la resistencia de un metal trabajado en frío se reduce ligeramente, pero aumenta significativamente su ductilidad (Fig. 6.1).

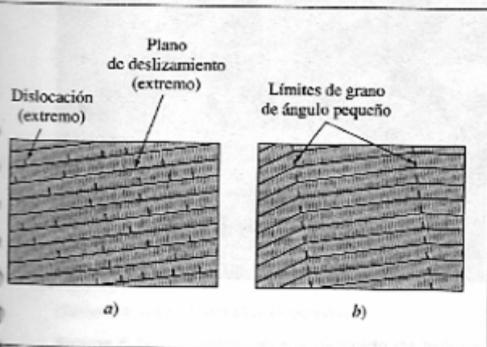
### 6.1.3. Recristalización

Cuando se calienta un metal trabajado en frío a una temperatura suficientemente alta, se nuclean nuevos granos libres de deformación en la estructura del me-



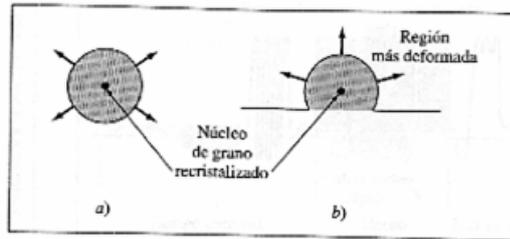
(Según «Metals Handbook», vol. 7, 8.ª ed., American Society for Metals, 1972, p. 243.)

**FIGURA 6.3.** Lámina de aleación de aluminio 5657 (0,8 por 100 Mg) mostrando las microestructuras obtenidas después de la laminación en frío (85 por 100 de reducción) y posterior tratamiento térmico. Las micrografías se obtuvieron por microscopía electrónica de transmisión ( $\times 20.000$ ). a) La micrografía muestra enmarañamientos de dislocaciones y celdas (subgranos) generadas por el severo trabajado en frío; b) después del trabajado en frío, la lámina se trató térmicamente para relajar tensiones a 302 °C (575 °F), 1 h. La micrografía muestra las redes de dislocaciones y otros límites de grano de ángulo pequeño generados por poligonización, y c) después del trabajado en frío, la lámina se recoció a 316 °C (600 °F), 1 h. La micrografía muestra la estructura recristalizada y un cierto crecimiento de subgranos.



(Según L. E. Tanner e I. S. Servi, en «Metals Handbook», vol. 8, 8.ª ed., American Society for Metals, 1973, p. 222.)

**FIGURA 6.4.** Representación esquemática de la poligonización en un metal deformado. a) Cristal de metal deformado mostrando el apilamiento de dislocaciones en los planos de deslizamiento, y b) después del tratamiento térmico de recocido, las dislocaciones se reordenan para formar límites de grano de ángulo pequeño.

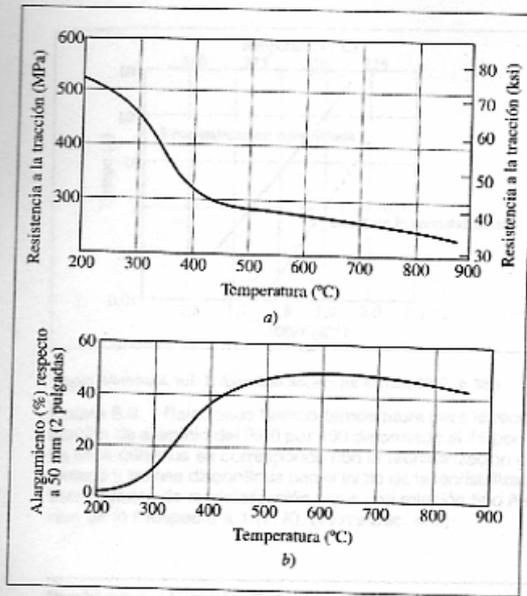


**FIGURA 6.5.** Modelo esquemático de crecimiento de un grano recristalizado durante la recristalización de un metal. a) Núcleo aislado expandiéndose por crecimiento dentro de un grano deformado, y b) límite de grano de ángulo grande emigrando hacia una región del metal más deformada.

tal recuperado, e inician su crecimiento (Fig. 6.2b), formando una estructura de material recristalizado. Después de suficiente tiempo a la temperatura a la que tiene lugar la recristalización, la estructura de trabajado en frío se reemplaza completamente por una estructura de grano recristalizado, como se muestra en la Figura 6.2c.

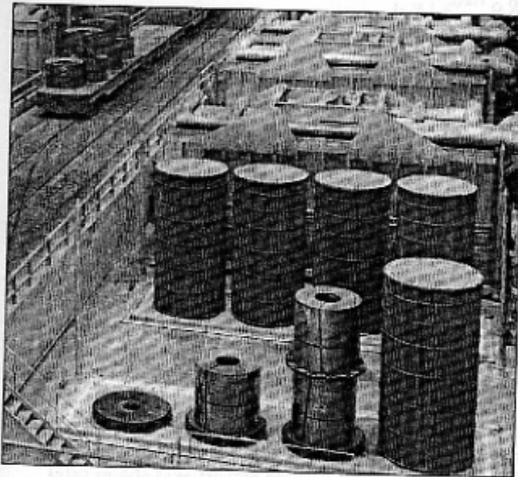
La recristalización tiene lugar a través de dos mecanismos principales: 1) un núcleo aislado puede expandirse con un grano deformado (Fig. 6.5a) o 2) un límite de grano de ángulo grande puede emigrar hacia una región severamente deformada del metal (Fig. 6.5b). En cada caso, la estructura del lado cóncavo del límite que se mueve está libre de deformación y tiene una energía interna relativamente baja, mientras que la estructura del lado convexo de la interfaz que se mueve está altamente deformada con una gran densidad de dislocaciones y una elevada energía interna. El movimiento del límite de grano se produce, por tanto, lejos del centro de curvatura del citado límite. Por consiguiente, el crecimiento de un nuevo grano en expansión durante la recristalización primaria conduce a un descenso global de la energía interna del metal por la sustitución de regiones deformadas por regiones libres de deformación.

La resistencia a la tracción de un metal trabajado en frío disminuye de forma importante y su ductilidad aumenta mediante un tratamiento de recocido que produce una recristalización de la estructura del metal. Por ejemplo, la resistencia a la tracción de una lámina de 0,040 pulgadas (1 mm) de latón (85 por 100 Cu-15 por 100 Zn) que ha sido laminado en frío hasta una reducción del 50 por 100 disminuyó de 520 a 310 MPa (75 a 45 ksi) por recocido de 1 h a 400 °C (Fig. 6.6a). Por otra parte, la ductilidad de la lámina aumentó de un 3 a un 38 por 100 mediante el tratamiento de recocido (Fig. 6.6b). La Figura 6.7a muestra una imagen de unos hornos de recocido para bobina de acero (proceso en discontinuo). La Figura 6.7b muestra un diagrama esquemático del proceso de recocido en continuo de lámina de acero y la Figura 6.7c muestra una imagen de una línea de recocido en continuo.



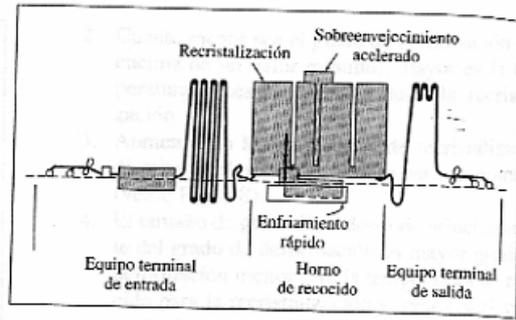
(Según «Metals Handbook», vol. 2, 9.ª ed., American Society for Metals, 1979, p. 320.)

**FIGURA 6.6.** Efecto de la temperatura de recocido en a) la resistencia a la tracción, y b) el alargamiento de una lámina de 1 mm (0,040 pulg) de espesor de latón (85 por 100 Cu-15 por 100 Zn) laminado en frío (el recocido fue de 1 h).



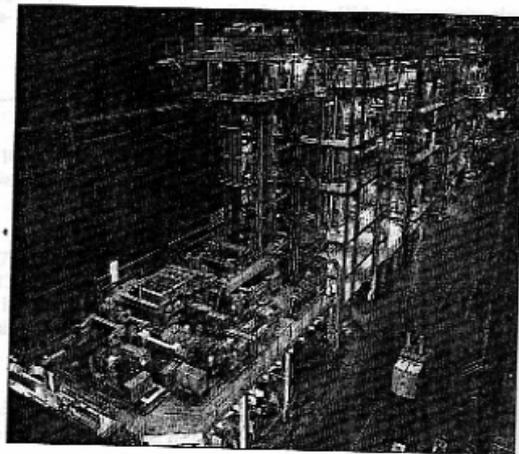
(Cortesía de United States Steel Corporation.)

**FIGURA 6.7a.** Hornos para el recocido de bobinas de láminas de acero. Las bobinas se sitúan bajo cubiertas cilíndricas y se coloca un horno encima de las bobinas. En este proceso de recocido, las bobinas se mantienen a una temperatura de 650 a 700 °C (1.200 a 1.300 °F) un tiempo medio de 26 h. Durante el período de enfriamiento se proporciona una atmósfera controlada para proteger la superficie de las bobinas de acero.



(Según W. L. Roberts, «Flat Processing of Steels», Marcel Dekker, 1988.)

**FIGURA 6.7b.** Diagrama esquemático del recocido en continuo.

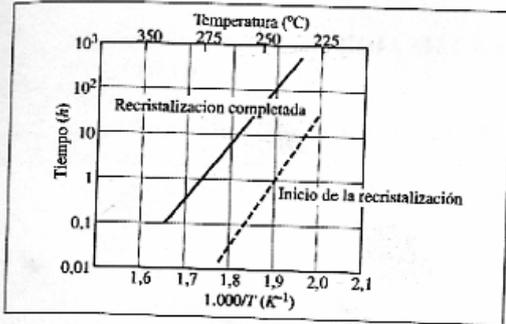


(Cortesía de Bethlehem Steel Co.)

**FIGURA 6.7c.** Imagen de una línea de recocido en continuo para láminas de acero de bajo carbono.

Los factores importantes que afectan el proceso de recristalización en metales y aleaciones son: 1) la cantidad de deformación previa del metal; 2) la temperatura; 3) el tiempo; 4) el tamaño de grano inicial, y 5) la composición del metal o aleación. La recristalización de un metal puede tener lugar en un intervalo de temperaturas y este intervalo depende en cierta forma de las variables citadas. Por ello no puede hablarse de temperatura de recristalización de un metal en el mismo sentido que de temperatura de fusión de un metal puro. Sobre los procesos de recristalización pueden realizarse las siguientes generalizaciones:

1. Se necesita una cantidad mínima de deformación para que sea posible la recristalización.



(Según *Aluminum*, vol. 1, American Society for Metals, 1967, p. 98.)

**FIGURA 6.8.** Relaciones tiempo-temperatura para la recristalización de aluminio del 99,0 por 100 deformado al 75 por 100. La línea continua se corresponde con la recristalización completada y la línea discontinua con el inicio de la recristalización. Este proceso de recristalización sigue una relación tipo Arrhenius de  $\ln t$  respecto a  $1/T$ ,  $K$ . (Véase Sec. 4.6.)

2. Cuanto menor sea el grado de deformación (por encima de un valor mínimo), mayor es la temperatura necesaria para producir la recristalización.
3. Aumentando la temperatura de recristalización disminuye el tiempo necesario para completarla (véase Fig. 6.8).
4. El tamaño de grano final depende principalmente del grado de deformación. A mayor grado de deformación menor será la temperatura de recido para la recristalización y menor será el tamaño de grano recristalizado.
5. A mayor tamaño de grano inicial, mayor será la cantidad de deformación necesaria para producir una cantidad de recristalización equivalente.
6. La temperatura de recristalización disminuye al aumentar la pureza del metal. La adición de elementos en disolución sólida incrementa siempre la temperatura de recristalización.

**Problema ejemplo 6.1**

Si una pieza de cobre a 88 °C tarda en recristalizar  $9,0 \times 10^3$  minutos y a 135 °C, 200 minutos, ¿cuál es la energía de activación del proceso, asumiendo que éste obedece la ecuación de Arrhenius y que el tiempo para recristalizar =  $Ce^{Q/RT}$ , donde  $R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol} \times \text{K})$  y  $T$  está en Kelvin?

**Solución:**

$$\begin{aligned}
 t_1 &= 9,0 \times 10^3 \text{ min}; T_1 = 88 \text{ °C} + 273 = 361 \text{ K} \\
 t_2 &= 200 \text{ min}; T_2 = 135 \text{ °C} + 273 = 408 \text{ K} \\
 t_1 &= Ce^{Q/RT_1} \text{ o } 9,0 \times 10^3 \text{ min} = Ce^{Q/R(361 \text{ K})} \quad (6.1) \\
 t_2 &= Ce^{Q/RT_2} \text{ o } 200 \text{ min} = Ce^{Q/R(408 \text{ K})} \quad (6.2)
 \end{aligned}$$

Dividiendo la Ec. 6.1 por la 6.2 resulta:

$$\begin{aligned}
 45 &= \exp \left[ \frac{Q}{8,314} \left( \frac{1}{361} - \frac{1}{408} \right) \right] \\
 \ln 45 &= \frac{Q}{8,314} (0,00277 - 0,00245) = 3,80 \\
 Q &= \frac{3,80 \times 8,314}{0,000319} = 99,038 \text{ J/mol o } 99,0 \text{ kJ/mol} \blacktriangleleft
 \end{aligned}$$