

ENDURECIMIENTO DE METALES

Los metales tienen muy buenas propiedades plásticas, se deforman fácilmente bajo cargas no muy elevadas; por contra, son blandos, luego tenemos que buscar alguna forma de salvar este problema.

La forma de endurecer un metal es "incordiar" el movimiento de las dislocaciones, pero con prudencia; si nos pasamos lo que obtendremos es un material frágil, un cerámico, que no nos va a servir de nada. Tendremos por tanto que frenar su movimiento, pero sin impedirlo. Existen tres mecanismos fundamentales, que se pueden aplicar simultáneamente o de forma sucesiva: → 3.2 FORMAS DE ENDURECIMIENTO:

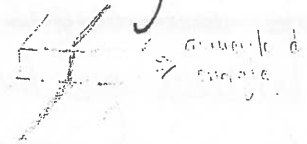
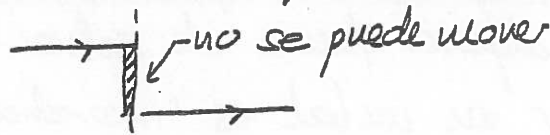
● Endurecimiento por acritud

Al deformar plásticamente un metal (a baja temperatura) se produce un endurecimiento progresivo. Cuando las dislocaciones se mueven, se produce:

- deformación plástica
 - multiplicación de dislocaciones (aumento de número y tamaño)
- cada vez es más difícil moverlas; se forman montañas de dislocaciones cada una con su campo de tensiones, acumulaciones, ... cada vez se precisa mayor tensión, con lo que va aumentando la dureza y disminuyendo la plasticidad.

Las dislocaciones interaccionan entre sí, produciéndose un frenado de las mismas; los mecanismos de interacción son:

- Interacción entre sus campos de tensiones: hay que vencer las fuerzas que aparecen con otras dislocaciones.
- Cruce con otras dislocaciones que atraviesan el plano
- Formación de escalones, quedando esa zona enganchada.



- Anclaje de dislocaciones
- Apilamiento frente a obstáculos

la tensión precisa para deformar plásticamente ^{varía} vola como

$$\tau = \tau_0 + \alpha G b \rho^{1/2}$$

τ_0, α son constantes

ρ = densidad de dislocaciones: longitud total por unidad de volumen.

→ cuanto más densidad de dislocaciones tenga, más tensión necesitaré para moverlas.

Si la deformación plástica es pequeña, las dislocaciones van formando una maraña, una red tridimensional de dislocaciones, homogénea. Si seguimos deformando plásticamente, las dislocaciones ya no se agrupan homogéneamente, sino que lo hacen en determinadas zonas formando una estructura de "celdillas", cuyas paredes son grandes acumulaciones de dislocaciones

celdilla



ENDURECIMIENTO POR ACRIDUD.

M/71

Antes de deformación: granos \pm equiaxiales
de tamaños similares \leftarrow

\rightarrow Alargamiento de los
granos con la deformación
con plástica.

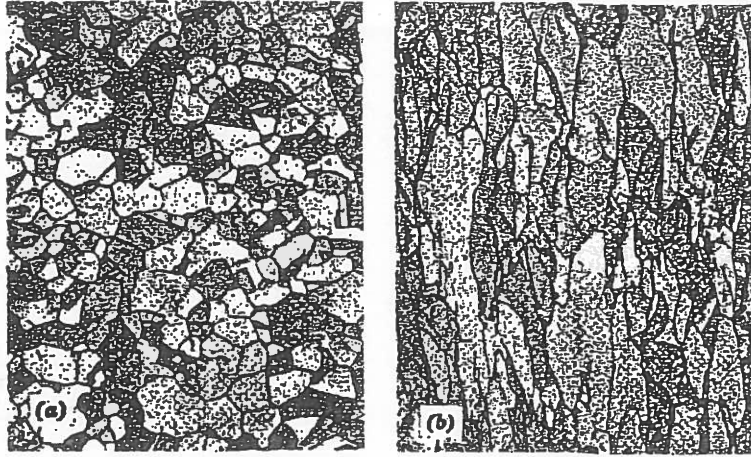


Figura 7.11 Alteración de la estructura del grano de un metal policristalino como resultado de la deformación plástica. (a) Antes de la deformación los granos son equiaxiales. (b) La deformación ha producido granos alargados. $\times 170$. (W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, y J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, Structure, p. 140. Copyright © 1964 John Wiley & Sons, New York. Reproducido con permiso de John Wiley & Sons, Inc.)

Visto en un microscopio óptico.

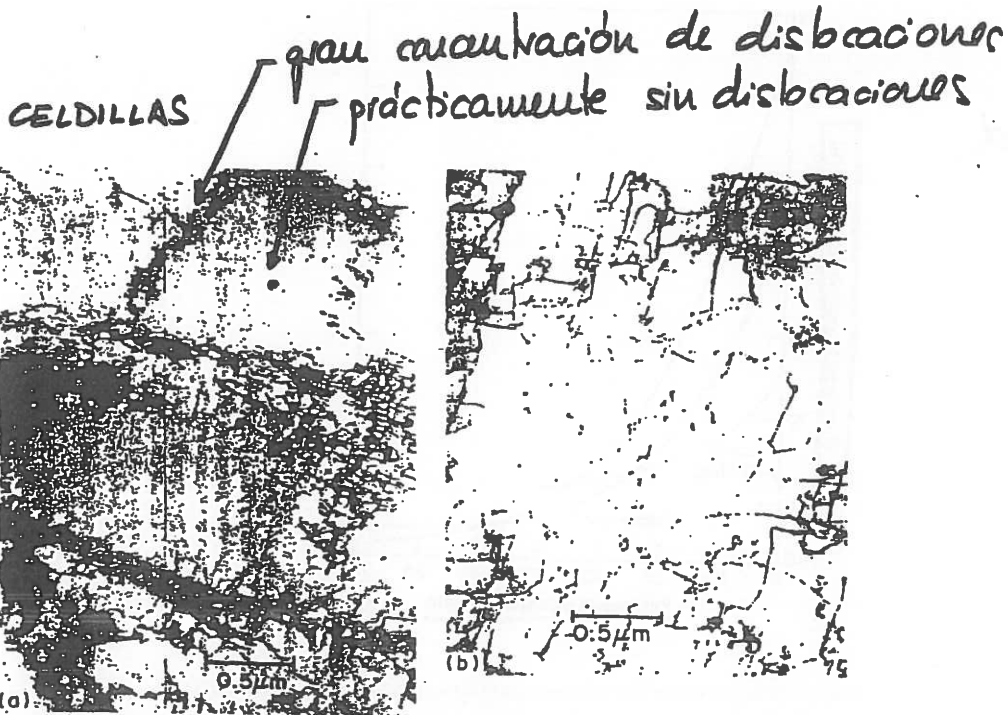
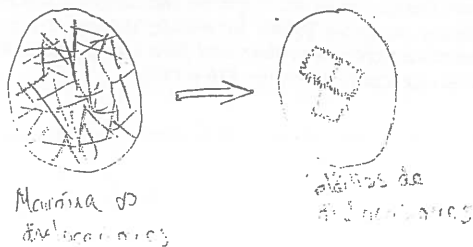
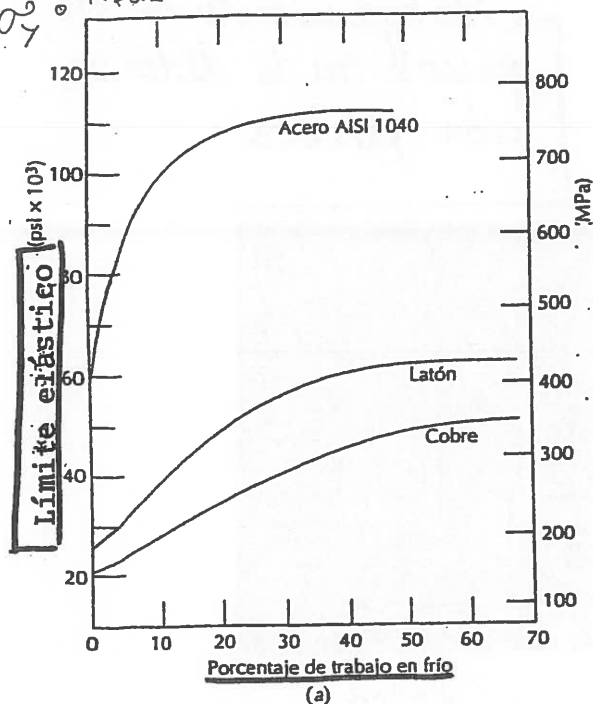


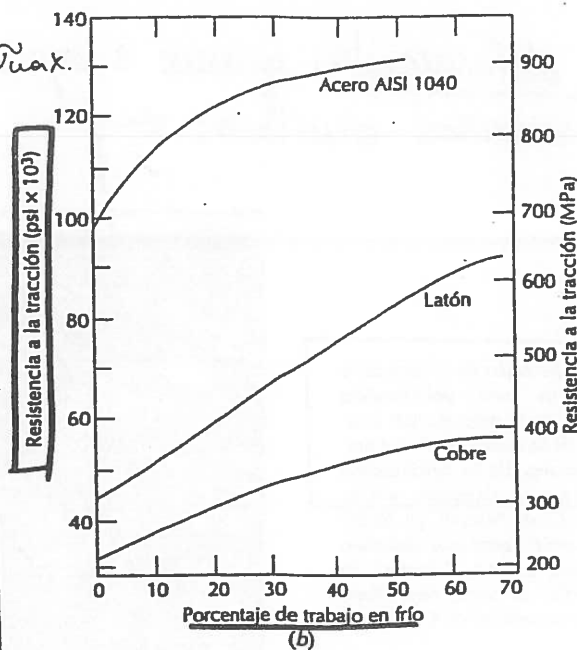
FIG. 9.1. Dislocation arrangements produced by plastic deformation of iron. (a) Dense tangles and dislocation free cells formed after 9 per cent strain at 20°C . (b) Uniform array of straight dislocations formed after 7 per cent strain at -135°C . (From Keh and Weissmann (1963), *Electron Microscopy and Strength of Crystals*, p. 231, Interscience.)



$\sigma_y \approx R_{p0.2}$



R_u o R_{max}



↑ Límite elástico
↑ Resistencia
↓ Plasticidad
↓ ductilidad

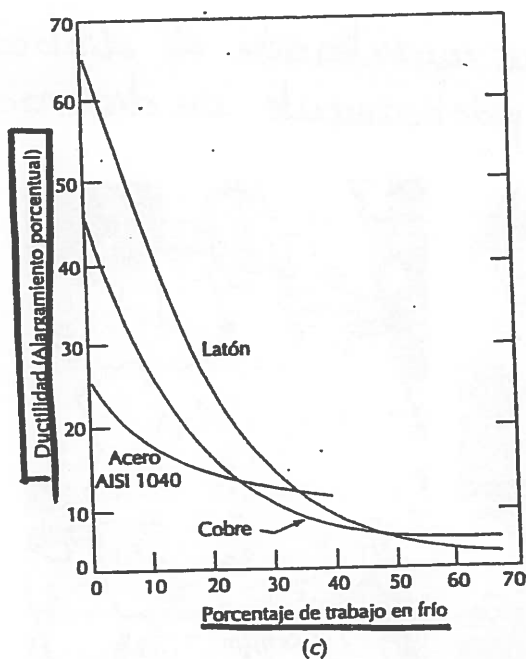


Figura 7.19 Para el acero 1040, el latón y el cobre, (a) el aumento en el límite elástico, (b) el aumento en la resistencia a la tracción, y (c) la disminución en la ductilidad (%EL) con el porcentaje de trabajo en frío. (Adaptado del *Metals Handbook: Properties and Selection, Iron and Steels*, Vol 1, 9th edition, Editor B. Bardes, American Society for Metals, 1978, p. 226, and *Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals*, Vol. 2, 9th edition, Editor H. Baker, American Society for Metals, 1979, pp. 276 y 377)

Si seguimos aumentando la deformación plástica las celdillas se hacen cada vez más pequeñas → endurecimiento.

- la tendencia al desarrollo de celdillas varía
 - Mucho en metales cúbicos centrados en cuerpo y Al (fcc)
 - Menos en Cu, Ni e inoxidables austeníticos.
- Al aumentar la acritud:
 - Aumentan la dureza, el límite elástico y resistencia a tracción
 - Disminuyen la plasticidad y tenacidad
 - Disminuye la conductividad eléctrica y la densidad
- la deformación plástica alarga la estructura granular.

Cantidad de deformación: $\% \text{ reducción de sección} = \frac{\text{Sección inicial} - \text{Sección final}}{\text{Sección inicial}} \times 100$

* Válido este razonamiento a bajas temperaturas. Si la deformación se aplica a alta temperatura, las dislocaciones tienen una enorme movilidad, cambian continuamente de plano y son difíciles de "sujetar". Debido a esta facilidad de movimiento, se produce un continuo reordenamiento y aniquilamiento cuando se encuentran con una contraria (se crean muchas, pero también se destruyen muchas!)

→ no hay endurecimiento significativo.

● Recocido contra acritud

Tras la deformación en frío, tenemos al metal en situación metaestable: se ha elevado la energía libre.

En el momento en que calentamos un material que hemos endurecido por acritud, las dislocaciones van a comenzar a moverse por esa gran cantidad de energía libre acumulada (gran inestabilidad) buscando la estabilidad (a baja temperatura ese movimiento les resultaba prácticamente imposible).

Así, el sistema evoluciona hacia el equilibrio energético, siendo las etapas de este proceso:

- Restauración
- Recristalización
- Crecimiento de grano.

La situación final dependerá de la temperatura y tiempo de tratamiento. Vamos a ir viendo cada una de las etapas.

- La restauración

Durante esta etapa, se mantiene la estructura granular inicial (los granos no cambian, son los mismos en tamaño, forma...), pero hay modificaciones en el número y posición de las dislocaciones, una reordenación interior cuando intentan alcanzar sus posiciones de equilibrio.

↳ La mayor temperatura permite a las dislocaciones moverse y cambiar de plano, lo cual facilita:

Etapas del proceso:

- Restauración
- Recristalización
- Crecimiento de grano

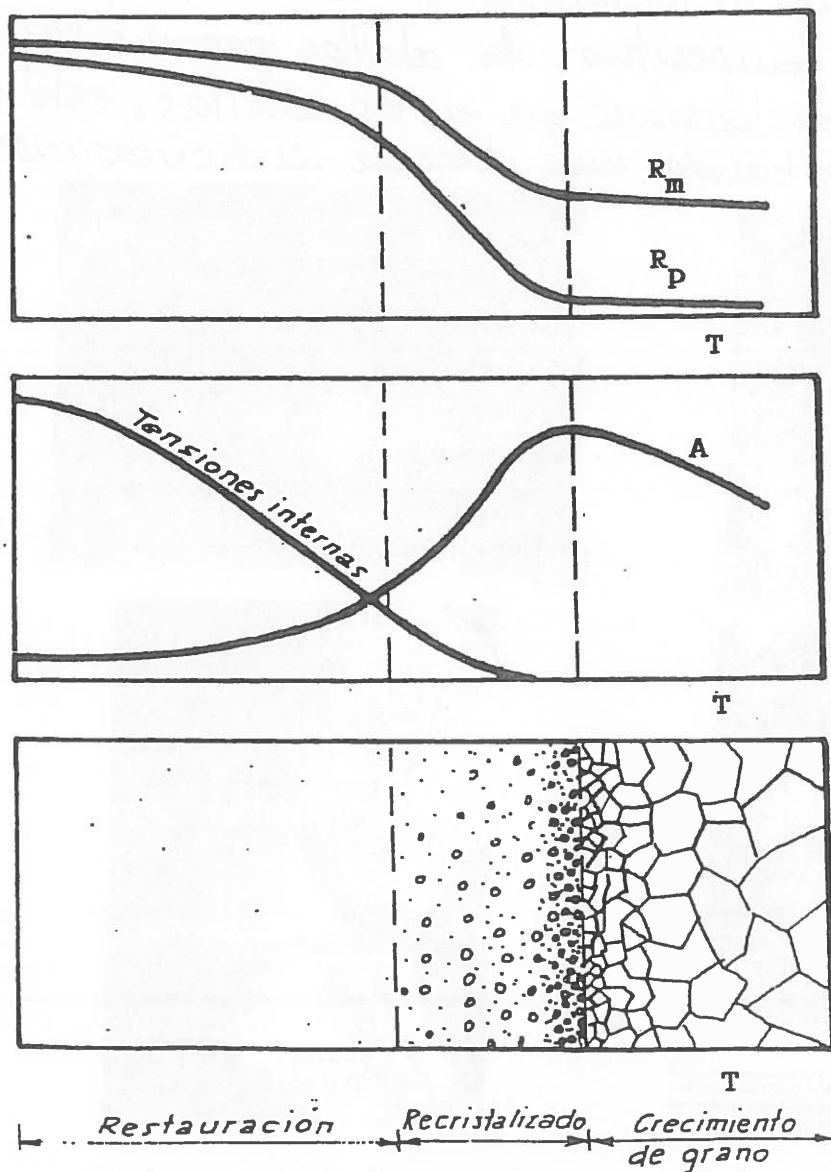
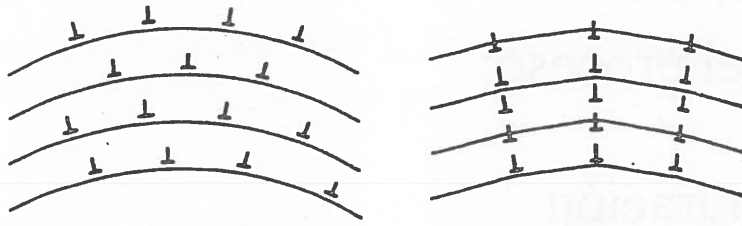


Fig. 19. Representación esquemática del proceso de recocido en un material con acritud

SAURACIÓN



Dislocaciones^(a) libres

Al dejarlas un momento buscan las posiciones de menor energía.

Fig. 3.7 Schematic representation of the polygonization process: (a) Random arrangement of excess (positive) edge dislocations which remain on active slip planes after bend-gliding. (b) Regrouping of edge dislocations to form dislocation walls.¹² (Reprinted by permission of Butterworths, London.)

- (a) celdillas dentro de un metal deformado plásticamente
- (b) Al calentar, las dislocaciones que rodean cada celdilla se van haciendo más delgadas, pues al interactuar se van destruyendo
- (c) manteniendo la temperatura, las celdillas pasan a ser subgranos
- (d) dentro hay menos dislocaciones que en las celdillas, están separados por una banda más delgada de dislocaciones, y →

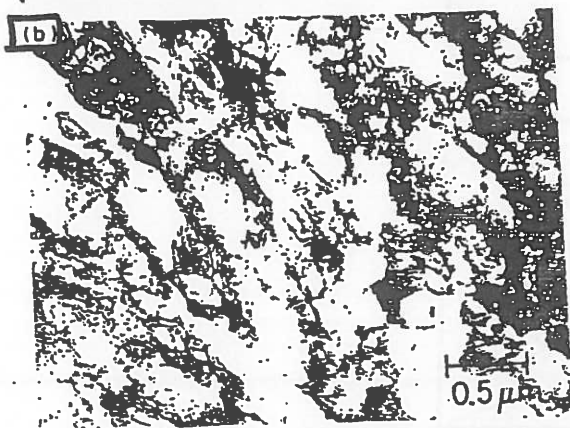
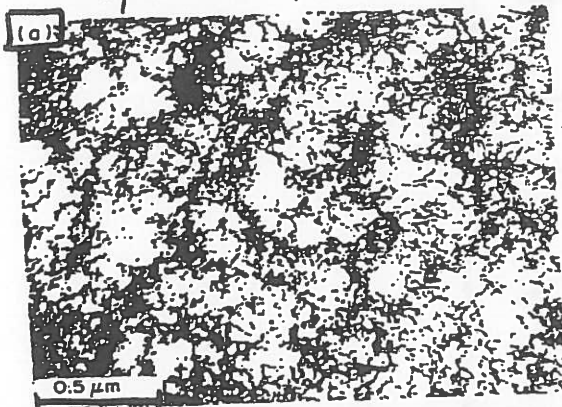


Fig. 92. Transmission electron micrographs illustrating the structure of deformed and annealed 3.25 per cent silicon iron. (a) Approximately uniform distribution of dislocations in a crystal rolled 20 per cent. (b) Formation of small sub-grains in rolled material annealed 15 min at 500°C. (c) As for (b) annealed 15 min at 600°C. (d) As for (b) annealed 30 min at 600°C. (From Hu, Trans Met. Soc. A.I.M.E. 230, 572, 1964.)

→ tienen un tamaño bastante mayor que las celdillas.

- Reordenarse en posiciones de menor energía
- Aniquilarse entre sí y disminuir el número

Evolución de la estructura previa de "celdillas": (ver fig. 9.3)

- Disminuye el espesor de las paredes
- Disminuyen las dislocaciones en el interior
- El tamaño de las celdillas crece

Tendencia final a la formación de subgranos, que entre ellos tienen una pequeña diferencia de orientación: en media la orientación es igual a la del grano inicial, pero en cada subgrano es ligeramente diferente.

La restauración se inicia rápidamente y se ralentiza con el tiempo, dándose una mayor o menor evolución según la temperatura y el tiempo que está aplicada.

Durante la etapa de restauración, entonces:

- Disminuyen las tensiones internas
- Disminuyen la dureza, límite elástico y resistencia
- Aumentan la plasticidad y tenacidad
- Aumentan la conductividad eléctrica y densidad.

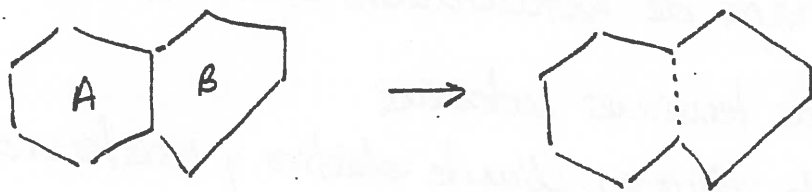
Al finalizar esta etapa, ha disminuido la energía libre, pero aún se tiene una gran cantidad de energía acumulada: situación termodinámicamente desfavorable!

Si se mantiene la temperatura da comienzo una nueva etapa, completamente diferente de esta:

- la recristalización

En esta segunda etapa se produce la sustitución de la estructura granular inicial por otra nueva (se destruyen los granos antiguos y se forman otros nuevos, como veremos a continuación). A diferencia de la etapa anterior, en esta se tienen los procesos de nucleación ("nacen" los nuevos granos) y crecimiento (esos nuevos granos van sustituyendo a la estructura anterior).

Es un proceso muy complejo. Comienza con un subgrano "rebelde", que tiene una orientación un poco diferente de la de los adyacentes; en las zonas donde se tenga localmente una mayor energía; las dislocaciones se reorganizan, y aquellas que formaban el borde entre dos granos, A y B, desaparecen, de forma que A y B son ya el mismo subgrano.



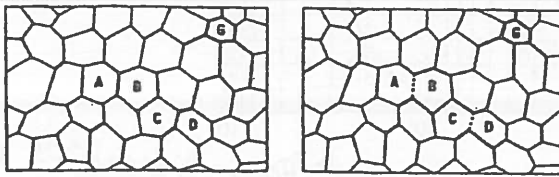
Este subgrano, ahora de mayor tamaño, se va haciendo cada vez mayor, y su red va girando, haciéndose cada vez más diferente de la inicial. Se ha formado un núcleo de recristalización: él en sí mismo es un nuevo grano!

En la fig 310 se ve gráficamente el proceso de nucleación

RECRISTALIZACIÓN

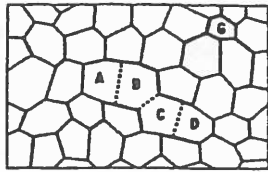
1175

antes nucleación

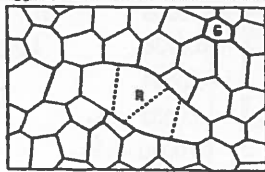


(a)

(b)



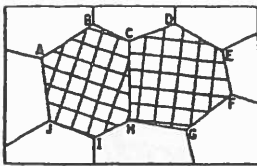
(c)



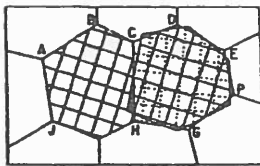
(d)

núcleo de recrystalizar.

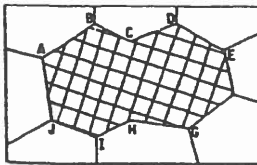
Fig. 3.10 Schematic model that represents the formation of recrystallized grains by the coalescence of subgrains.¹⁹ (a) Subgrain structure before nucleation. (b) Coalescence of subgrains A and B, and C and D. (c) Further coalescence of subgrains B and C. (d) Formation of a nucleus with high-angle boundaries. (Reprinted by permission of The Metallurgical Society, Warrendale, Pennsylvania.)



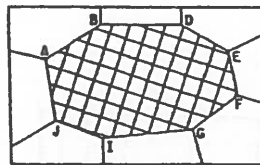
(a)



(b)

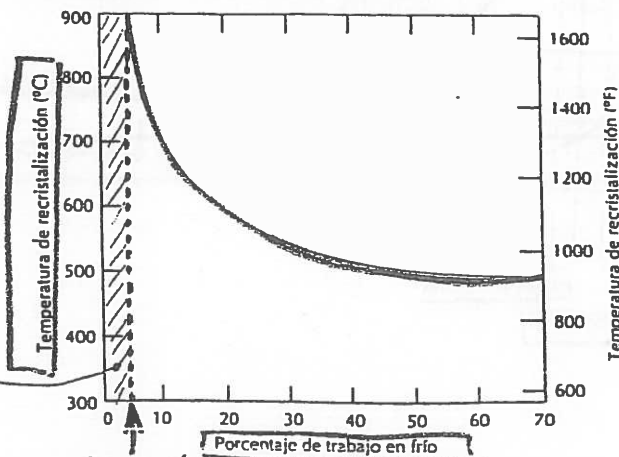


(c)



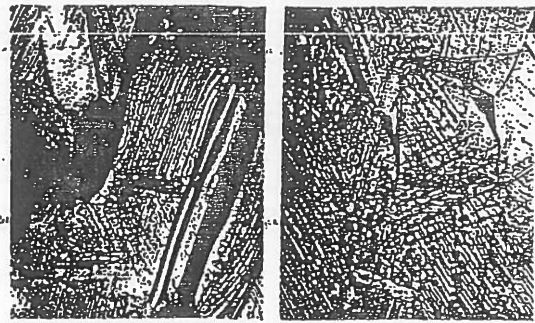
(d)

Fig. 3.11 Schematic representation of atomistic mechanism for subgrain coalescence by subgrain rotation.^{19,20} (a) The original subgrain structure before coalescence. (b) One subgrain is undergoing a rotation. (c) The subgrain structure just after coalescence. (d) The final subgrain structure after some sub-boundary migration. (Reprinted by permission of The Metallurgical Society, Warrendale, Pennsylvania.)



Deformación crítica

reducción
de temperatura
de recrystalización

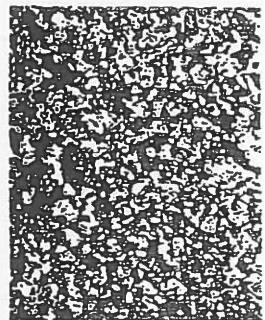


(a)

(b)



(c)



(d)



(a)



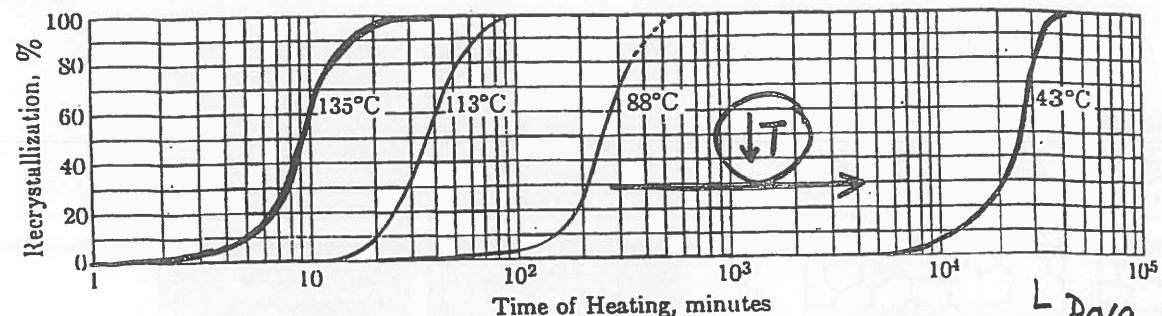
(b)

Figuras 7.21a-7.21d se muestran varias etapas del proceso de recrystalización; en estas microfotografías, los granos pequeños son aquellos que han recrystalizado. Así, la recrystalización de los metales trabajados en frío puede utilizarse para refinar la estructura de los granos.

También, durante la recrystalización, las propiedades mecánicas que fueron modificadas durante el proceso de trabajo en frío son restauradas a sus valores previos a la deformación; es decir, el metal se hace más blando, menos resistente y más dúctil. Algunos tratamientos se diseñan para permitir que la recrystalización ocurra con estas modificaciones en las propiedades mecánicas (Sección 11.2).

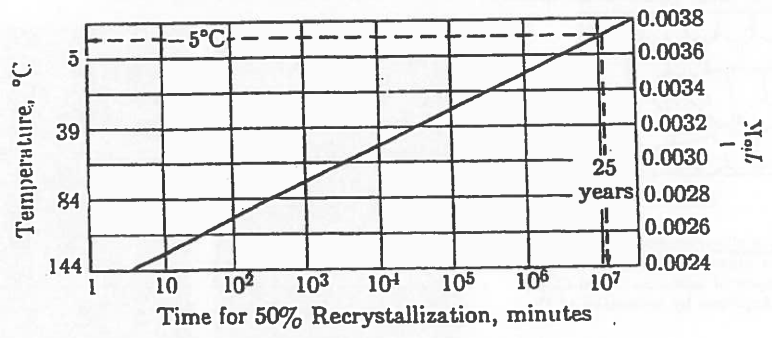
Figura 7.23 Variación de la temperatura de recrystalización con el porcentaje de trabajo en frío en el caso del hierro. Para deformaciones menores que la crítica (alrededor del 5 % de trabajo en frío), la recrystalización no tendrá lugar.

Etapas incubación: evolución de la transformación de forma sigmoidal.



Para tiempos largos puede producirse la recristalización a $T < T_R$.

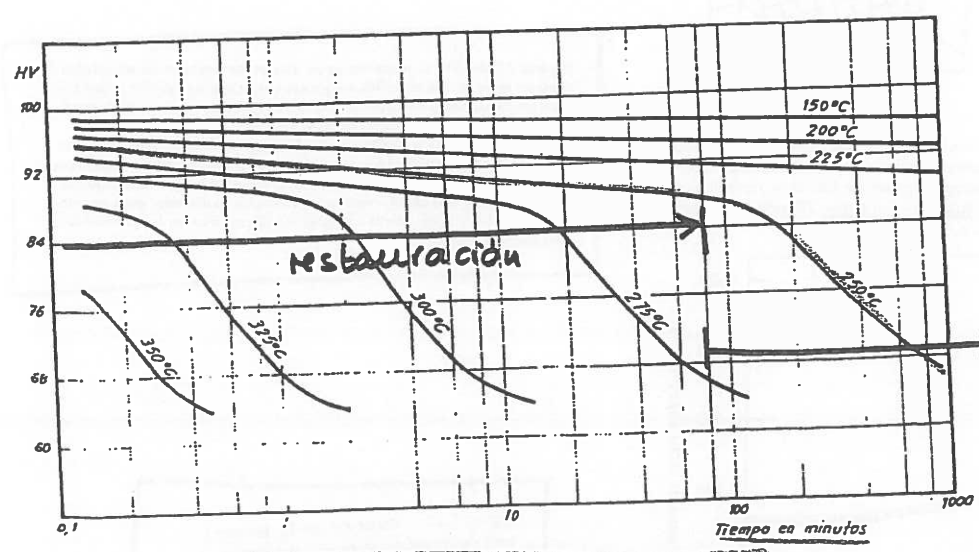
(a) Isothermal recrystallization of pure copper cold-rolled 98%



(b) Plot for extrapolation from the data given by the four curves of (a)

Fig. 9.27 Isothermal recrystallization of 99.999% pure copper. (After Decker and Harker.)

Variancia de las propiedades del metal durante el recocido.



recristalización: caída brusca.

Fig. 21.-Curvas isotérmicas de ablandamiento. Aleación L-539

El proceso de recristalización viene regulado por-

- Velocidad de nucleación, N
- Velocidad de crecimiento, c

→ Cuanto mayor sea la temperatura aplicada, mayores son las velocidades de nucleación y crecimiento, luego más rápida será la recristalización.

Un factor importante en esta etapa es también la situación inicial del metal: a mayor deformación plástica anterior, antes se produce la recristalización, luego vemos que la temperatura a la que se produce no es una constante, depende de varias cosas.

Entra en juego, por tanto, el concepto de deformación crítica: si la deformación plástica inicial es demasiado pequeña, la recristalización costará mucho alcanzarla (temperaturas muy elevadas), o puede que incluso no se produzca [Por debajo de un valor de deformación, la def. crítica, la recristalización no se produce]

- Si la deformación es pequeña, se formarán pocos núcleos, que darán lugar a un tamaño de grano bastante
- Al aumentar la deformación, la velocidad de nucleación crece más rápido que la velocidad de crecimiento, dando lugar a un menor tamaño de grano.

- Según la combinación temperatura-tiempo aplicado se obtendrá una recristalización parcial o total. Aunque se haga a la temperatura correcta, si no damos el tiempo suficiente no se producirá completamente la recristalización total. Definimos la temperatura de recristalización, T_R , como la necesaria para que se produzca la recristalización completa en el tiempo de 1 hora. En los metales puros, esta temperatura es del orden de $0.2-0.3 T_F$.

Factores que influyen en T_R

- Pureza: impurezas y aleantes disueltos elevan T_R (algunos metales en estado muy puro, como el Al pueden recristalizar a temperatura ambiente!) las impurezas frenan las etapas de restauración y recristalización al interactuar en el movimiento de dislocaciones, las frenan.
- Cantidad de deformación plástica inicial: cuanto mayor sea, menos costará comenzar la recristalización, T_R menor.
- Tamaño de grano inicial: cuanto menor sea, se tiene una T_R menor, pues al tener una mayor superficie por unidad de volumen, se tienen condiciones más favorables para comenzar (mayor energía acumulada).
- Temperatura de deformación previa: cuanto menor sea se tiene una T_R más baja.

- Para tiempos largos, puede tenerse recristalización a temperaturas muy inferiores a T_R

- Acción de las impurezas y aleantes:

• Disueltas: entorpecen el movimiento de las dislocaciones y bordes de grano \rightarrow entorpecen la recristalización

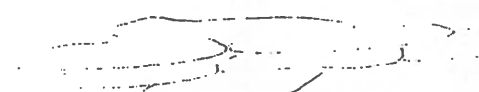
• Partículas grandes y separadas: facilitan la nucleación, pues la zona que la rodea de metal ha de deformarse algo más que la media para compensar el que esa partícula, si es dura no se deforme, dando lugar a una mayor facilidad de aparición de núcleos de recristalización, acelerando el proceso.

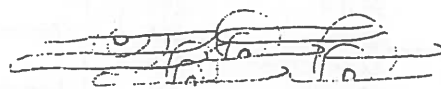
• Partículas pequeñas y próximas: entorpecen la movilidad de las dislocaciones y límites, frenando la recristalización.

\Rightarrow el efecto de este tipo de partículas varía mucho en función de cómo sean y cómo estén distribuidas.


- Durante la recristalización:

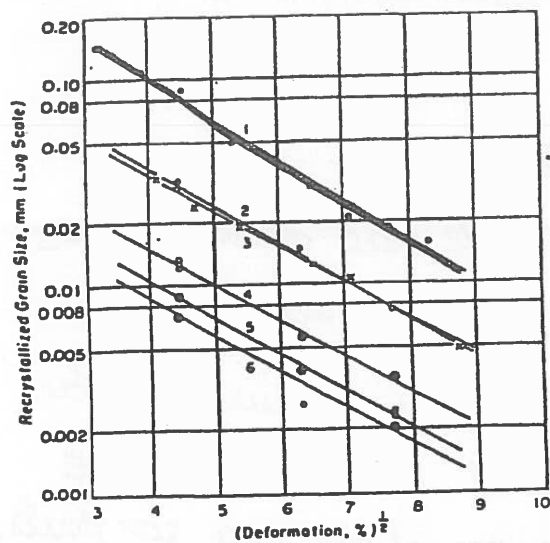
- Disminuyen mucho la dureza, límite elástico y resistencia
- Se elevan mucho la plasticidad y tenacidad
- Aumentan la conductividad eléctrica y la densidad.


situación inicial: granos alargados por la deformación



aparición de núcleos de recristalización que se van "comiendo" a los vecinos

 estructura completamente diferente!



- Variación del tamaño de grano
final con la deformación:

↑ deformación: menor tamaño grano

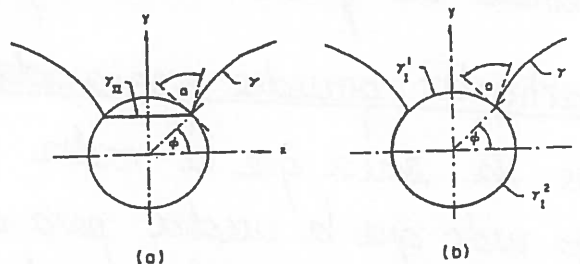
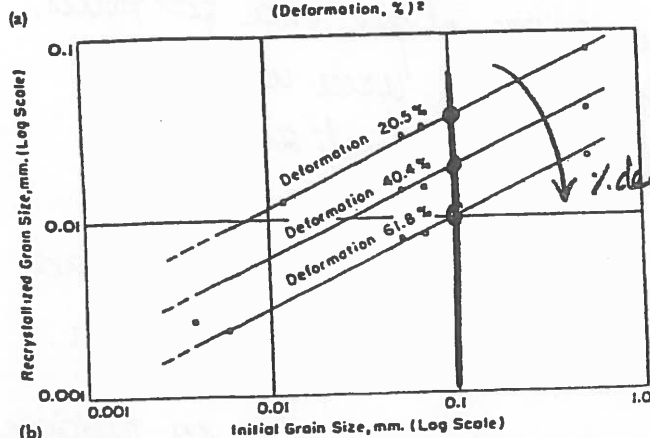


Fig. 3.24 (a) The schematic diagram showing the condition for entry of the grain boundary inside the coherent inclusion. Specific energy of the grain boundary within the coherent inclusion γ_i is lower than that of outside the inclusion, γ . (b) The schematic diagram showing the condition for the grain boundary to surround the incoherent inclusion. Specific energy of the boundary inside the inclusion is higher than that of the outside. (Reprinted by permission of Pergamon Press, Plc.)

→ tamaño grano final en
función del inicial y el % def.

→ Para un mismo tamaño inicial,
cuanto mayor sea la deformación,
mejor es el tamaño final
→ Para una misma def. cuanto
mejor sea el inicial, mejor es el
final

Fig. 3.20 (a) Relation between recrystallized grain size d and percentage deformation q for pure 70-30 brass of initial grain sizes being rolled. The initial grain sizes corresponding to curves 1 through 6 are 0.53, 0.066, 0.053, 0.012, 0.006 and 0.004 (all in mm), respectively. The general equation for this relationship may be written as $\log d = n\sqrt{q} + \log m$, where m is a function of initial grain size.³⁴ (b) Relationship between recrystallized grain size d and initial grain size i in pure 70-30 brass for different values of prior deformation. The empirical relationship is given by $d = b \cdot i^n$, where b is a function of percentage deformation.³⁴ (Reprinted by permission of ASM International, Metals Park, Ohio.)

Table 3.1 Approximate Recrystallization Temperature, T_{recry} , for Several Metals and Alloys^{24,30}

Material		T_{recry} (°C)	Material		T_{recry} (°C)
Copper	Zone refined	80	Iron	Zone refined	300
	OFHC	210		Electrolytic	399
	5% Zn	320		Low-carbon steel	538
	5% Al	288	Tungsten	Zone refined	1000
	2% Be	371		(5 ppm Mo, O ₂)	
Aluminum	Zone refined	-50		Impure	1500
	99.999%	80		(50-60 ppm Mo, 30 ppm O ₂)	
	99.0 +	288	Zirconium	Zone refined	170
	Alloys	316		Commercial	450
Nickel	Zone refined	300	Magnesium	99.99%	66
	99.99%	371		Alloys	232
	Commercial	600	Zinc		10
	Monel alloy	593		Tin	-4
		Lead		-4	

Enorme variación
de TR con la
pureza

Todavía puede aparecer una tercera etapa:

- Crecimiento de grano

Es una etapa negativa en relación a las propiedades, pues supone el aumento del tamaño de grano que sabemos que disminuye resistencia, límite elástico...

No es una etapa exclusiva de materiales que han sufrido deformación y recristalización, sino que ocurre en todos los materiales a altas temperaturas, pues se alcanzan ~~en~~ zonas con mucha energía libre acumulada. La tendencia natural es a disminuir su energía, y lo consiguen aumentando el tamaño de grano: un tamaño de grano pequeño implica mucha superficie de borde de grano por unidad de volumen (mucha energía \rightarrow muy inestable); aumentando el tamaño disminuye la superficie de grano por unidad de volumen disminuyendo la energía libre y aumentando, por tanto, la estabilidad de la estructura.

El tamaño medio de grano, D , crece según

$$\boxed{D^n - D_0^n = k \cdot t} \quad (n \geq 2)$$

El proceso se acelera al subir la temperatura. Generalmente este proceso es suave, pero en ciertas condiciones se produce un crecimiento exagerado dando lugar a una recristalización secundaria \rightarrow de malas propiedades...

[Aspecto exterior: "piel naranja"]

\rightarrow No debería producirse nunca!

