

II Parte

Comportamiento Mecánico de Materiales
Plasticidad : Esfuerzo cizallante crítico resuelto y
deformación plástica en metales policristalinos.

Profesor: Donovan E. Díaz Droguett

Miércoles 24 de octubre de 2007

De la clase anterior...

LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN MUCHOS MATERIALES SE PRODUCE POR DESLIZAMIENTO DE CIERTOS PLANOS CRISTALINOS, SEGÚN CIERTAS DIRECCIONES CRISTALINAS.

HAY OTROS MECANISMOS DE DEFORMACIÓN, PERO ÉSTE ES EL MÁS HABITUAL EN METALES SOMETIDOS A TRABAJO MECÁNICO (FORJA, LAMINACIÓN, EXTRUSIÓN, TREFILACIÓN EN FRÍO Y EN CALIENTE, ETC.).

LAS DIRECCIONES DE DESLIZAMIENTO SON SIEMPRE LAS PRIMERAS MÁS DENSAS DEL CRISTAL.

LOS PLANOS DE DESLIZAMIENTO SON DE LOS MÁS DENSOS. EN ALGUNOS CRISTALES SON SÓLO LOS PRIMEROS MÁS DENSOS, EN TANTO QUE EN OTROS, SON LOS PRIMEROS, SEGUNDOS Y HASTA TERCEROS PLANOS MÁS DENSOS, SIEMPRE QUE CONTENGAN A LA DIRECCIÓN MÁS DENSA.

EN EL CASO DE METALES

-CCC, PLANOS PRIMEROS MÁS DENSOS

-HC, DEPENDE DEL FACTOR DE ESBELTEZ.

C/A MAYOR QUE EL IDEAL, SÓLO LOS PLANOS PRIMEROS MÁS DENSOS. CASO DEL ZN.

C/A MENOR QUE EL IDEAL, NO SÓLO LOS PLANOS PRIMEROS MÁS DENSOS. CASO DEL TI.

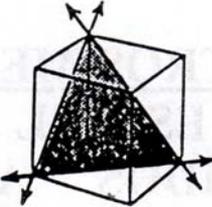
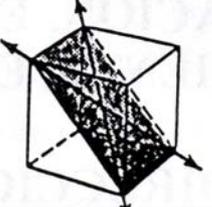
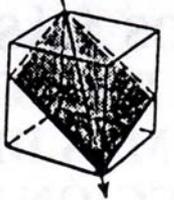
-CC, CASO FE ALFA, LOS TRES PLANOS MÁS DENSOS QUE CONTIENEN A LA DIRECCIÓN MÁS DENSA.

¿POR QUÉ LOS PLANOS DE DESLIZAMIENTO SON LOS MÁS DENSOS?

Los planos más densos, comparados con los menos densos, presentan enlaces muy fuertes dentro del plano (por eso es que los átomos están tan próximos). También presentan las mayores distancias interplanares, lo cual indica enlaces interplanares más débiles. Así, los planos más densos, exhiben una mayor solidez interna y una mayor facilidad para deslizar.

Sistemas de deslizamiento

Tabla 5.1 *Sistemas de deslizamiento observados en cristales*

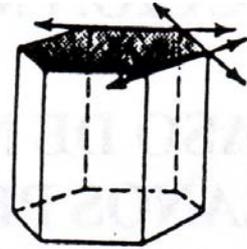
| ESTRUC- TURA | PLANO DE DESLIZA- MIENTO | DIRECCION DE DESLIZA- MIENTO | NUMERO DE SISTEMAS DE DESLIZA- MIENTO | |
|--|--------------------------------|------------------------------------|--|---|
| CCC Cu, Al, Ni, Pb, Au, Ag, γ Fe,... | {111} | $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ | $4 \times 3 = 12$ |  |
| CC α Fe, W, Mo, β Bronce | {110} | $\langle \bar{1}11 \rangle$ | $6 \times 2 = 12$ |  |
| α Fe, Mo, W, Na | {211} | $\langle \bar{1}11 \rangle$ | $12 \times 1 = 12$ |  |
| α Fe, K | {321} | $\langle \bar{1}11 \rangle$ | $24 \times 1 = 24$ |  |

HC
Cd, Zn, Mg,
Ti, Be,...

(0001)

$\langle 11\bar{2}0 \rangle$

$$1 \times 3 = 3$$

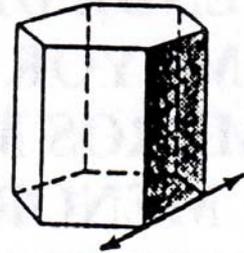


Ti

$\{10\bar{1}0\}$

$\langle 11\bar{2}0 \rangle$

$$3 \times 1 = 3$$

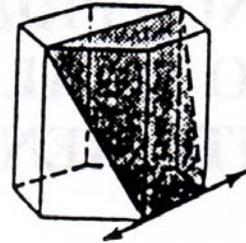


Ti, Mg

$\{10\bar{1}1\}$

$\langle 11\bar{2}0 \rangle$

$$6 \times 1 = 6$$

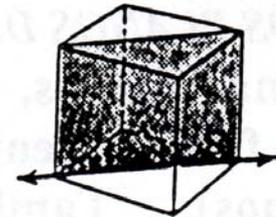


NaCl, AgCl

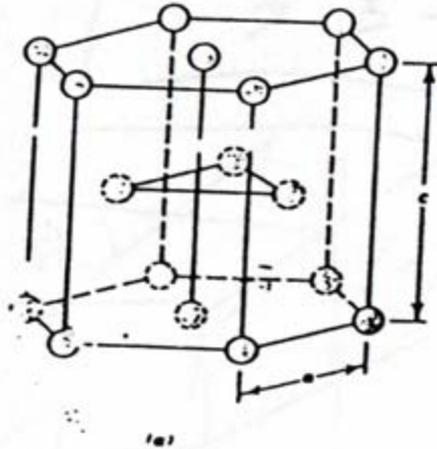
$\{110\}$

$\langle 1\bar{1}0 \rangle$

$$6 \times 1 = 6$$



Crystal Hexagonal Compacto



For the hexagonal close-packed crystal structure, (a) a reduced-sphere unit cell (a and c represent the short and long edge lengths, respectively), and (b) an aggregate of many atoms.

| <i>Cristal</i> | c/a | <i>Cristal</i> | c/a | <i>Cristal</i> | c/a |
|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|
| He | 1,633 | Zn | 1,861 | Zr | 1,594 |
| Be | 1,581 | Cd | 1,886 | Gd | 1,592 |
| Mg | 1,623 | Co | 1,622 | Lu | 1,586 |
| Ti | 1,586 | Y | 1,570 | | |

FACTOR DE ESBELTEZ DE UNA CELDA HC

Considere un cristal Hexagonal Compacto.

La red pertinente está representada por una celda Trigonal P. Esta celda sólo tienen nodos en los vértices. Los parámetros de la celda son a , a y c . Los ángulos entre los ejes valen 90 , 90 y 60 °.

El motivo está formado por dos átomos, cuyas coordenadas son:

$(0\ 0\ 0)$ y $(2/3, 1/3\ 1/2)$.

Se pide calcular el cociente c/a asociado a esta celda, considerado un modelo de esferas duras en contacto. Suponga que la simetría de los átomos es perfectamente esférica (una aproximación).

Definición de factor de esbeltez = c/a

El factor de esbeltez relacionado con la hipótesis de perfecta simetría esférica, que es el que vamos a calcular aquí, se llama factor de esbeltez ideal.

CÁLCULO

Llamemos r al radio atómico y expresemos las magnitudes geométricas necesarias para el cálculo en función de r . (En todo caso, el resultado es independiente del tamaño de las esferas).

Nótese que en la figura adjunta, la pirámide $xyzw$ es un tetraedro regular. En los puntos x , y , z y w , hay centros atómicos; son cuatro átomos en contacto. Las caras de la pirámide son triángulos equiláteros de arista $2r$.

El parámetro a de la celda vale $2r$, en tanto que el parámetro c de la celda es igual al doble de la altura de la referida pirámide. Calculemos primero esa altura y después el cociente c/a ideal.

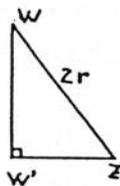
Para empezar $a = 2r$. Además: $XY = YZ = ZX = XW = YW = ZW = 2r$.



$$\Delta UYZ : YZ = 2r, UY = r$$

$$r^2 + (UZ)^2 = (2r)^2 \Rightarrow UZ = \sqrt{3}r$$

$$W'Z = 2/3 UZ \Rightarrow \boxed{W'Z = \frac{2}{\sqrt{3}}r}$$

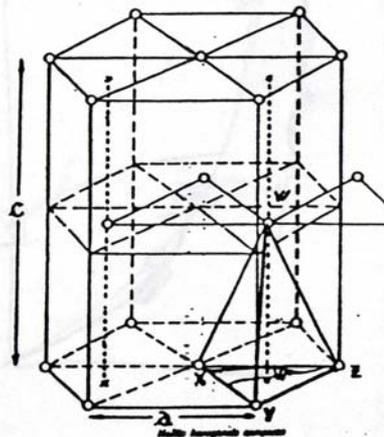


$$\Delta W'ZW : WZ = 2r, WW' = c/2$$

$$(WW')^2 + (W'Z)^2 = (WZ)^2$$

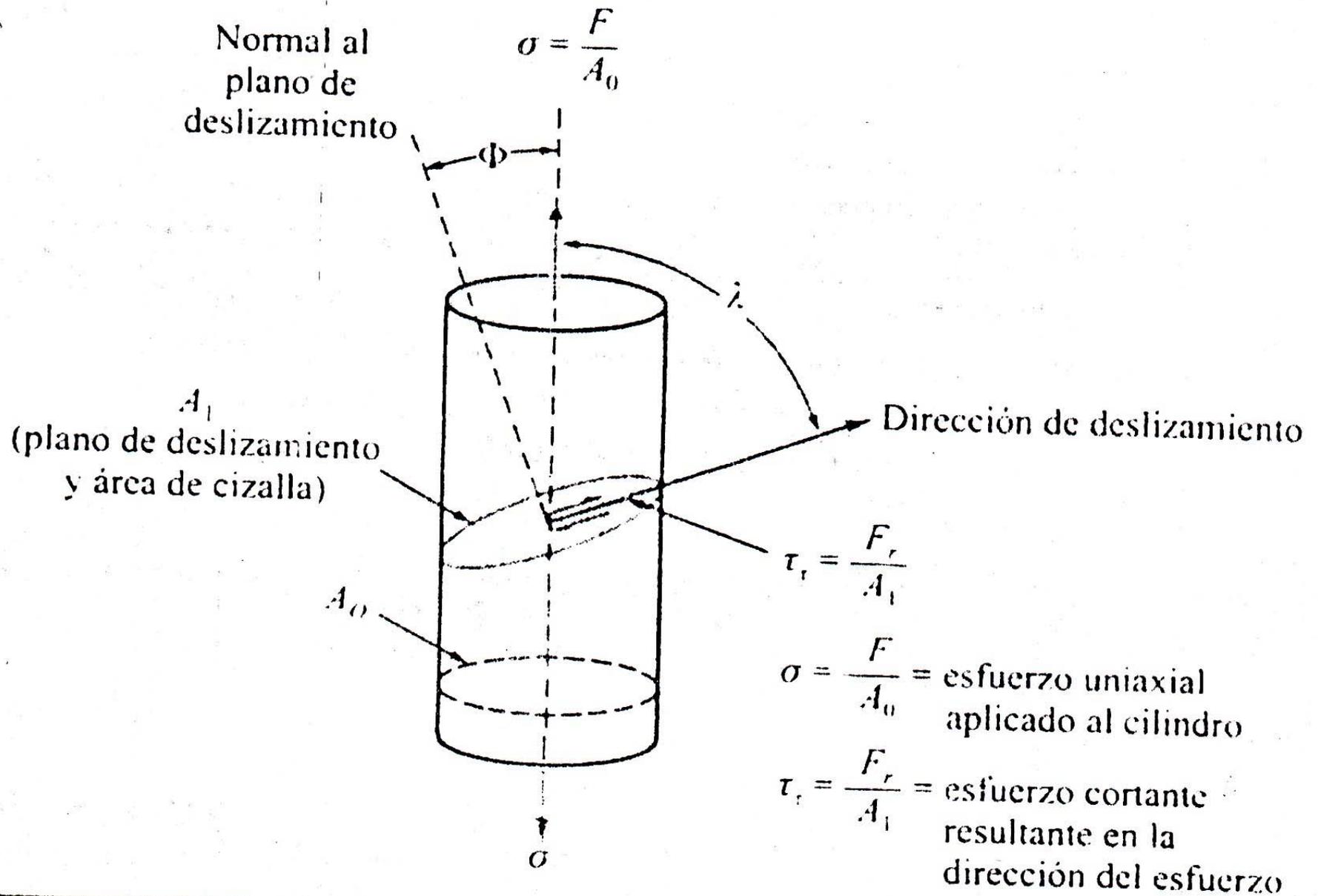
$$(c/2)^2 + (\frac{2}{\sqrt{3}}r)^2 = (2r)^2$$

$$\frac{c}{2r} = \frac{c}{a} \Rightarrow \boxed{c/a = \sqrt{8/3} = 1,633}$$



4.11. Esfuerzo cizallante crítico determinado. Es un hecho bien conocido que las probetas de metal policristalino poseen un límite elástico que debe ser excedido para producir deformación plástica. También es cierto que los cristales metálicos simples necesitan ser sometidos a un esfuerzo sobre un límite elástico similar antes de que la deformación plástica por deslizamiento sea medible macroscópicamente. Como el deslizamiento es causado por esfuerzos cortantes, el límite elástico para cristales se expresa mejor en términos de un esfuerzo cizallante determinado sobre el plano de deslizamiento y en la dirección del deslizamiento. Este esfuerzo se denomina esfuerzo cizallante crítico determinado. Es el esfuerzo que ocasionará el movimiento de un número suficientemente grande de dislocaciones en tal forma que se pueda observar una deformación mensurable. La mayor parte de las probetas cristalinas no se prueban directamente en corte, sino en tensión. Hay buenas razones para esto. La más importante es que es casi imposible probar un cristal en corte directo sin introducir movimientos de flexión donde se sujeta la probeta. El efecto de estos momentos de flexión es producir componentes de esfuerzos cortantes sobre los planos de deslizamiento distintos a los que se deseaba estudiar. Si no es más difícil medir el deslizamiento sobre estos planos que sobre el plano a probar, se obtiene una condición donde el deslizamiento ocurre en varios planos sobre las partes de la probeta cercana a los sujetadores. El efecto de esta deformación puede ocasionar flexión sobre la probeta cerca de los sujetadores y así se tiene una deformación que está muy lejos de ser homogénea. Hay también problemas asociados con el uso de probetas de cristales simples en tensión, pero éstos son menos serios y, con un diseño apropiado de los sujetadores, se les puede eliminar en su mayoría.

Ahora se derivará una ecuación que relaciona el esfuerzo de tensión aplicado con el esfuerzo cizallante crítico determinado sobre el plano de deslizamiento y en la dirección del deslizamiento.



$\tau_r = \frac{\text{fuerza de cizalla}}{\text{área de cizalla (área del plano de deslizamiento)}} = \frac{F_r}{A_1}$

$$\tau_r = \frac{F \cos \lambda}{A_0 / \cos \phi} = \frac{F}{A_0} \cos \lambda \cos \phi = \sigma \cos \lambda \cos \phi$$

$$\tau = \sigma \cos \theta \cos \phi$$

De la ecuación anterior se pueden extraer varias conclusiones importantes. Si el eje tensor es perpendicular al plano de deslizamiento, el ángulo de ϕ es 90° y el esfuerzo cizallante es cero. En forma similar, si el eje del esfuerzo queda en el plano de deslizamiento, el ángulo de θ es 90° y el esfuerzo cizallante es nuevamente cero. Por tanto, no es posible producir deslizamiento sobre un plano dado cuando éste es perpendicular o paralelo al eje del esfuerzo tensor. El máximo esfuerzo cizallante que se puede producir es igual a 0.5σ y ocurre cuando tanto θ como ϕ son iguales a 45° . Para todas las demás combinaciones de estos dos ángulos, el esfuerzo cizallante determinado es menor de la mitad del esfuerzo de tensión.

Por pruebas en algunos metales, se ha verificado experimentalmente que el esfuerzo cizallante resuelto para un plano cristalográfico dado es independiente de la orientación del cristal. Así, si un número de cristales, difiriendo sólo en la orientación del plano de deslizamiento con el eje del esfuerzo tensor, son sometidos a tensión, y se calcula con la ecuación anterior el esfuerzo cizallante al que
ceden, se hallará que la carga de deformación es una constante.

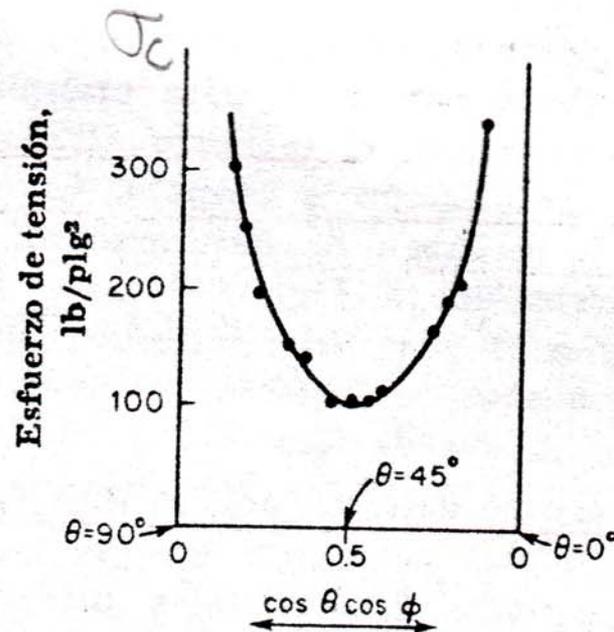
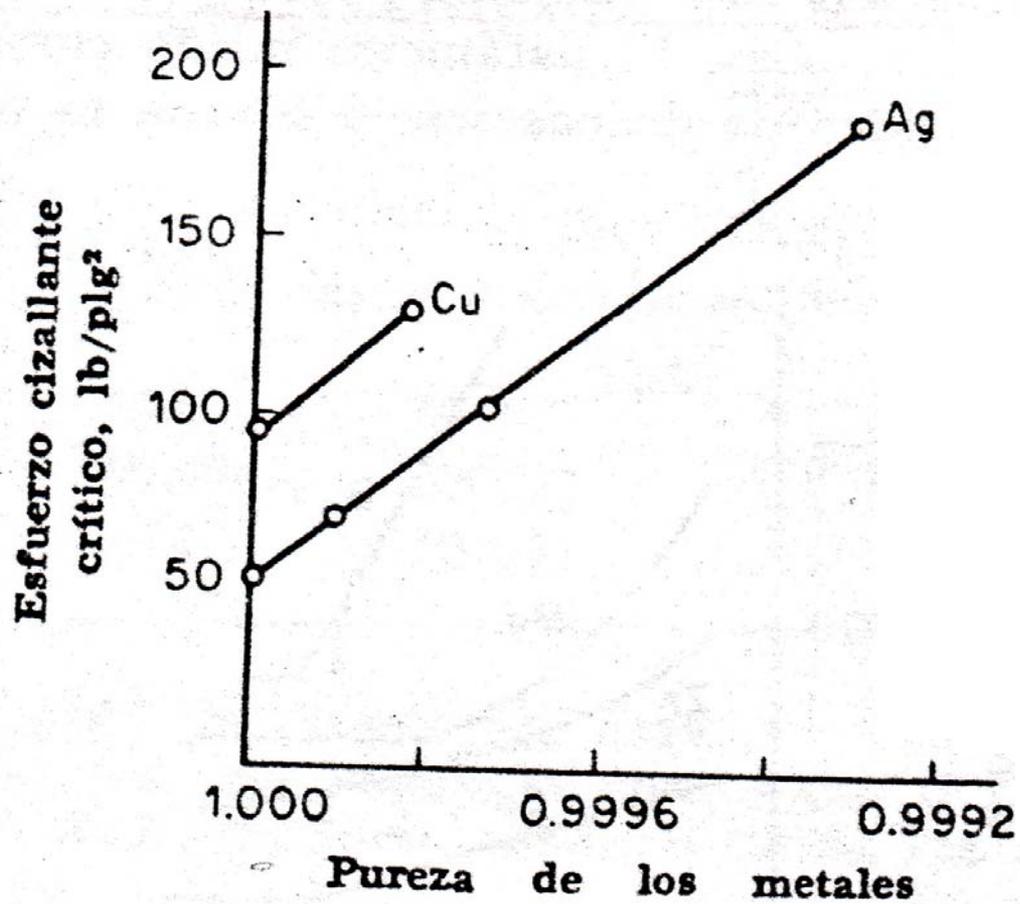


FIG. 4.40. El límite elástico en tensión para cristales simples de magnesio con orientaciones diferentes. Las abscisas son valores de la función $\cos \theta \cos \phi$. La curva suave es para una constante supuesta del esfuerzo cizallante crítico determinado de 63 lb/plg² (4.42 kg/cm²) (Burke, E. C. y Hibbard, W. R., Jr., *Trans. AIME*, 194, 1952, Pág. 295)

Efecto de la pureza sobre el esfuerzo cizallante crítico



Sistemas de deslizamiento a temperatura ambiente y tensión de cizalla crítica resultante para monocristales

| Metal | Estructura cristalina | Pureza, % | Plano de deslizamiento | Dirección de deslizamiento | Tensión de cizalla crítica, MPa |
|-------|-----------------------|-----------|------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Zn | HCP | 99,999 | (0001) | $[11\bar{2}0]$ | 0,18 |
| Mg | HCP | 99,996 | (0001) | $[1120]$ | 0,77 |
| Cd | HCP | 99,996 | (0001) | $[11\bar{2}0]$ | 0,58 |
| Ti | HCP | 99,99 | (1010) | $[11\bar{2}0]$ | 13,7 |
| Ag | FCC | 99,9 | (1010) | $[11\bar{2}0]$ | 90,1 |
| | | 99,99 | (111) | $[1\bar{1}0]$ | 0,48 |
| | | 99,97 | (111) | $[1\bar{1}0]$ | 0,73 |
| Cu | FCC | 99,93 | (111) | $[1\bar{1}0]$ | 1,3 |
| | | 99,999 | (111) | $[1\bar{1}0]$ | 0,65 |
| | | 99,98 | (111) | $[1\bar{1}0]$ | 0,94 |
| Ni | FCC | 99,8 | (111) | $[1\bar{1}0]$ | 5,7 |
| Fe | BCC | 99,96 | (110) | $[\bar{1}11]$ | 27,5 |
| | | | (112) | | |
| | | | (123) | | |
| Mo | BCC | ... | (110) | $[\bar{1}11]$ | 49,0 |

Fuente: Según G. Dieter, «Mechanical Metallurgy», 2.^a ed., McGraw-Hill, 1976, pág. 129.

Efecto de la temperatura sobre el esfuerzo cizallante crítico

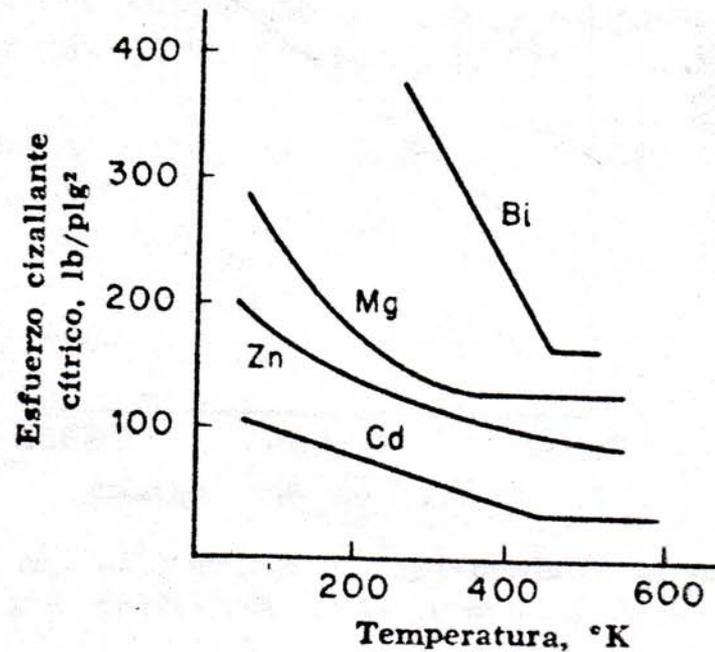
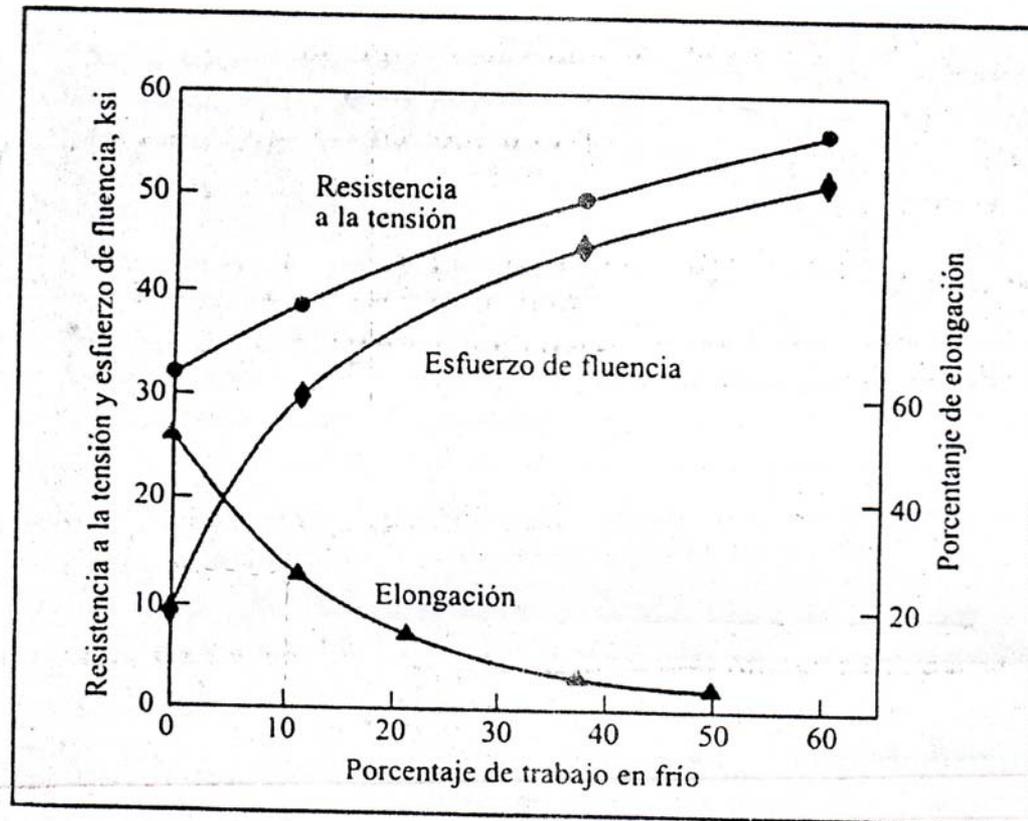


FIG. 4.42. Efecto de la temperatura sobre el esfuerzo cizallante crítico. Nota: Los datos sobre los que están basadas estas curvas son anteriores a los de la Tabla 4.2. Los esfuerzos críticos más elevados en este caso corresponden a cristales de pureza inferior. (Schmid, E., y Boas, W., *Kristallplastizität*, Julius Springer, Berlín, 1935)

Deformación plástica de metales policristalinos

- Efecto de los límites de grano en la resistencia de los metales
- Aumento de la densidad de dislocaciones por deformación en frío

Figura 6.45.
Porcentaje de trabajo en frío respecto a la resistencia a la tensión y elongación del cobre puro libre de oxígeno. El trabajo en frío se expresa como el porcentaje en la reducción en la sección de área del metal después de ser reducido.



CONCEPTOS DE ISOTROPÍA Y DE ANISOTROPÍA, TAMBIÉN DE TEXTURA.

Anisotropía

Un material es anisótropo cuando sus propiedades dependen de la orientación según la cual se hace la medición de ellas.

Tomemos el ejemplo de un cristal CCC y de sus direcciones [100] y [110]. Nótese que el ordenamiento atómico a lo largo de estas direcciones es muy diferente. Por ello, si medimos el módulo elástico E según una dirección [100], se obtiene un valor muy distinto de aquel que se obtiene según una dirección [110]. Y esto ocurre con cualquier propiedad que consideremos, tal como resistividad eléctrica, susceptibilidad magnética, coeficiente de dilatación lineal, etc. Tal diferente comportamiento también se da para los planos cristalinos; por ejemplo, sólo los planos {111} son planos de deslizamiento en un cristal metálico CCC.

Así, los monocristales son esencialmente anisótropos.

Texturas no cristalinas

En materiales como la madera o bien un material compuesto formado por una resina reforzada con fibras de vidrio alineadas, se tendrán propiedades muy diferentes según si se mide a lo largo de las fibras o bien en otra dirección. Ahí hay una forma de anisotropía que se debe a textura por fibras.

Isotropía

Un material es isótropo cuando sus propiedades no dependen de la

dirección según la cual ellas son medidas. Es decir, cuando una propiedad tiene el mismo valor independiente de la dirección según la cual se hace la medida.

Los materiales amorfos (o no cristalinos) son estrictamente isótropos. Ello se debe a que no presentan direcciones que difieran entre sí en su tipo de orden atómico lineal, por no haber orden cristalino.

Isotropía por compensación en policristales

Frecuentemente en ingeniería, particularmente para aplicaciones estructurales, se emplean policristales. En ocasiones, los policristales formados por muchos granos (granos que son monocristales anisótropos), pueden ser considerados, en promedio, como isótropos, según se verá.

Particularmente cuando la estructura de un policristal está recocida, se pueden tener granos con las siguientes tres características de estos:

- *Finos*: el tamaño de grano es suficientemente pequeño como para que, en la sección considerada haya muchos granos.
- *De forma equiaxial*: en el material no hay direcciones preferenciales al mirar los granos, por ejemplo, en un microscopio óptico.
- *Con orientaciones cristalinas al azar*: por ejemplo, en un policristal de cobre, de estructura CCC, los ejes OX-OY-OZ de distintos granos, ejes correspondientes a las aristas de las celdas cristalinas respectivas, están orientados al azar.

Consideremos un policristal para el cual se cumplen las tres condiciones

anteriores. Ahora midamos alguna propiedad según dos direcciones diferentes del policristal, bajo la condición de que tales direcciones consideren muchos granos a lo largo y que ellas no sean cristalográficamente equivalentes. Entonces, las medidas de, por ejemplo, módulo de Young, que corresponderán a un promedio sobre muchos granos en cada caso, darán un valor resultante, un promedio, que será el mismo según las dos direcciones del material. De esta manera se tendrá lo que se denomina isotropía por compensación.

Anisotropía por textura, en policristales

Cuando un monocristal es sometido, por ejemplo, a un esfuerzo de tracción o de compresión que genere deformación plástica por deslizamiento, su estructura cristalina se reorienta respecto del eje del esfuerzo, buscando ciertas orientaciones determinadas, ya no al azar. Nótese que cada grano de un policristal es también un monocristal, de modo que cada grano de un policristal también se reorientará. En consecuencia, cuando un policristal de granos orientados inicialmente al azar es deformado plásticamente, con la deformación plástica los granos tenderán a orientarse de una cierta manera. De modo que la estructura cristalina final no será al azar. Por otra parte, la forma externa de los granos también se verá afectada por la deformación en frío: en particular, un grano inicialmente equiaxial, deformado por deformación plástica, quedará alargado en el sentido de la laminación y más plano en el plano de laminación.

Por lo anterior, un material policristalino que inicialmente cumpla las tres condiciones anteriores, y que, por ende, fuese isótropo por compensación, al deformarlo

plásticamente en frío adquirirá una textura por dos factores:

- las estructuras cristalinas tendrán orientaciones preferenciales, ya no al azar; esto se puede determinar por difracción de rayos X.
- la forma de los granos quedará alargada según el eje de deformación (forma no equiaxial); esto se puede determinar por microscopía óptica.

Por los dos factores anteriores de textura, el material deformado plásticamente en frío será anisótropo.

Hay muchas aplicaciones en que interesa la isotropía. Por ejemplo, para obtener productos adecuados por embutido profundo, proceso empleado para hacer ollas, vainillas, etc, a partir de planchas, se requiere que las planchas presentes similares propiedades mecánicas a lo largo y a lo ancho de la plancha. Una forma de controlar la isotropía en planchas, es realizando ensayos mecánicos, empleando probetas cortadas a 0° , 45° y 90° con el eje de laminación.

Homogeneidad

Otra propiedad relevante de un material es su homogeneidad o heterogeneidad. Un material es homogéneo cuando el valor de una propiedad es el mismo independientemente del lugar donde se hace la medida. Nótese que un material puede ser homogéneo y anisótropo; por ejemplo, es el caso de una buena madera. Lo contrario a homogéneo es heterogéneo.

En cursos de mecánica de sólidos, como uno de Resistencia de Materiales, frecuentemente se supone que los materiales son isótropos (por compensación) y homogéneos.