

**Esfuerzo de corte crítico resuelto o
esfuerzo cizallante resuelto crítico,
 τ_{rC} .**

En el contexto de la microplasticidad, el esfuerzo de corte crítico resuelto, τ_{rC} , es el esfuerzo de corte necesario para deslizar las dislocaciones en un cristal. Esta es una propiedad del cristal.

El esfuerzo debe entonces ser calculado según un sistema de deslizamiento, esto es, según un plano de deslizamiento y según una dirección de deslizamiento. Este valor se llama crítico, τ_{rC} , cuando es suficientemente elevado como para permitir el deslizamiento de las dislocaciones. (Cuando a nivel microscópico se alcanza el valor τ_{rC} , a nivel macroscópico se alcanza el límite elástico).

El τ_{rC} frecuentemente se mide a través de un ensayo de tracción en un monocristal, además, como dato, se debe conocer la orientación de dicho monocristal respecto del eje de tracción. Esta orientación se obtiene a través de experiencias de difracción de rayos X; normalmente se emplea una técnica que se llama la técnica del monocristal o de Laue.

Para llegar a calcular estos esfuerzos, se emplea como ejes de referencia los ejes de la celda del monocristal respectivo. Tales ejes, por definición, son paralelos a las aristas de la respectiva celda. En términos de tales ejes se identifican los planos y las direcciones cristalinas. También la orientación del eje de tracción se da en relación con los ejes de referencia del cristal.

Lo que nos interesa es conocer el esfuerzo de corte crítico resuelto que produce deslizamiento de dislocaciones y, por ende, la fluencia del material. Cuando, en una estructura homogénea,

las dislocaciones comienzan a deslizar a nivel microscópico, entonces, a nivel macroscópico se tiene la condición de fluencia.

El esfuerzo de corte crítico resuelto τ_{rC} es una propiedad del material.

Lo que se mide usualmente en un ensayo de tracción, ya sea de un monocristal o de un policristal es el esfuerzo de tracción al cual se inicia la fluencia. A tal esfuerzo le llamamos límite elástico en tracción, σ_C .

Supongamos entonces que tenemos un monocristal de orientación conocida, para el cual se ha determinado experimentalmente el valor del σ_C , y que conocemos la orientación del sistema que deslizará. Lo que queremos calcular es el τ_{rC} del material, constante que determinaremos a partir de los datos σ_C y orientación del monocristal. Nótese que σ_C NO es una propiedad del material; en efecto, si variamos la orientación de un monocristal, su σ_C cambia.

Lo que debemos hacer entonces es deducir la Ley de Schmid, ver páginas 137-140 del texto de Schmid (3ª edición). La nomenclatura está definida en la Figura 5.36 de dicho texto. De esta manera, la relación entre el esfuerzo de tracción y el esfuerzo de corte resueltos según el sistema de deslizamiento pertinente, queda dado por:

$$\tau_r = \sigma \cos\lambda \cos\phi$$

donde τ_{rC} es el ángulo entre el eje de tracción y la normal al plano de deslizamiento, en tanto que λ ese el ángulo entre el eje de tracción y la dirección de deslizamiento. Nótese que sólo en casos particulares se cumple $\lambda + \phi = 90^\circ$.

Al producto ($\cos\lambda \cos\phi$) usualmente se le denomina factor de Schmid, S . De esta manera se tiene: $\tau_r = S \sigma$.

Nótese que el valor máximo de S es $\frac{1}{2}$.

Cuando el esfuerzo de tracción, corresponde al límite de fluencia en tracción, el esfuerzo de corte resuelto alcanzará el valor crítico buscado, τ_{rC} .

Supongamos que en el caso anterior corresponde a un monocristal de CCC, material que tiene 12 sistemas de deslizamiento. De los 12 sistemas, ¿cuál será el que deslice primero?. Respuesta, es aquel que, para un σ suficientemente elevado, será el primero en cumplir la condición $\tau_r = \tau_{rC}$; esto es, será aquel sistema que, entre los doce, presente el mayor factor de Schmid, S .

Al someter un monocristal a deformaciones plásticas importantes, el monocristal rota respecto del eje de tracción. De hecho en cualquier proceso de deformación plástica un monocristal o un grano cualquiera de un policristal rotan respecto del eje de deformación. Algunas consecuencias de esto son:

- Los sistemas de deslizamiento podrían cambiar durante la deformación plástica, al cambiar la orientación de los granos y por lo tanto los valores S de los sistemas de deslizamiento posibles.
- Si los granos de un policristal están orientados inicialmente al azar, con la deformación plástica, los granos adquieren una orientación privilegiada, ya no al azar.

Además, el material debe endurecer por deformación plástica, debido a la multiplicación de dislocaciones. En consecuencia, τ_{rC} debe crecer con la deformación plástica. Frecuentemente, el τ_{rC} que se informa de un material

corresponde a un monocristal recocido, condición que debe hacerse explícita.

Isotropía por compensación y textura

Cuando se tiene un policristal con muchos granos (de grano fino), con granos de forma equiaxial y de orientación al azar, el material es isótropo por compensación. Esto es sus propiedades no dependen de la orientación del material porque las contribuciones de los granos se compensan en promedio, aunque cada grano sea anisótropo. Una estructura con las características anteriores, frecuentemente se obtiene por recristalización.

Por otra parte, se dice que un policristal (con muchos granos) tiene **textura**, cuando hay una cierta direccionalidad en la estructura del material, lo que conlleva que el material sea anisótropo

Al deformar plásticamente en frío (supongamos por laminación) un policristal que inicialmente cumpla las tres condiciones anteriores, habrá desarrollo de textura por dos razones:

1. Los granos se alargarán en la dirección de laminación. Así los granos ya no serán de forma equiaxial; al microscopio se verán con una estructura (forma de granos) a veces llamada de fibra.
2. Con la deformación plástica, los granos rotarán y ya no estarán orientados al azar. Esto sólo puede ser sólo analizado por técnicas de difracción, no por microscopía.

Límite elástico en tracción de un policristal versus aquel del respectivo monocristal.

En tecnología lo que interesa usualmente es el LE (límite elástico, medido en tracción) del policristal. Pero desde el punto de vista fundamental, el policristal está formado por granos dentro de los cuales deslizan las dislocaciones, dislocaciones que deslizan por esfuerzos de corte. Entonces el LE del policristal está ligado al τ_{TC} de su monocristal; de hecho la relación es lineal. Cabe señalar una vez más que el LE de un monocristal no tiene sentido físico si es que no se informa la orientación del monocristal.

Se ha verificado la siguiente relación:
 $LE \text{ del policristal} = (S \text{ promedio del policristal}) * \tau_{TC}$. El S promedio es el valor medio de los factores de Smith de los sistemas activados en cada grano. Para cada grano se consideran los dos o tres sistemas con el mayor factor de Smith. Se hace la sumatoria sobre todos los granos. Se supone granos equiaxiales, orientados al azar y numerosos.

Para cristales de Fe alfa, que tienen muchísimos sistemas de deslizamiento, el factor S promedio es próximo al valor máximo, esto es 0,5. Para cristales CCC el S promedio vale 1/3.

Endurecimiento por solución sólida.

El endurecimiento por deformación plástica es un mecanismo de endurecimiento de metales y sus aleaciones. Otra forma, entre otras, de endurecer una matriz metálica es por solución sólida, ya sea de tipo sustitucional o intersticial. Los átomos extraños disueltos dificultan el movimiento de las dislocaciones en la matriz, esto es, aumentan el τ_{TC} y, por ende, el LE del policristal de interés industrial.

Así, el latón 70-30, una aleación formada por un 30%p. de Zn disuelto sustitucionalmente en Cu, es más duro que el Cu, aunque aún con bastante ductilidad. El latón 70-30 tiene una estructura CCC, igual que el Cu puro. Por su aplicación, ese material debe ser equiaxial y de tamaño de grano fino. Por lo tanto, es un material de estructura recrystalizada, donde el recocido aplicado a un material previamente deformado en frío en una magnitud suficiente, debe permitir la recrystalización pero no el ulterior crecimiento de tamaño de grano. Durante el proceso de fabricación de una vainilla de munición, basado en deformación plástica en frío, es necesario realizar recocidos intermedios, entre pasos de deformación, para recuperar la ductilidad del material, cuidando de mantener un tamaño de grano fino y equiaxial.