**ASIGNATURA: CIENCIA DE LOS MATERIALES**

**AÑO: 3ero CURSO DIURNO INGENIERÍA MECÁNICA.**

**PLAN DE ESTUDIO: E**

**CONTENIDOS BÁSICOS**

**\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**TEMA I: Estructura Cristalina de los metales. Propiedades mecánicas y mecanismos de endurecimiento de los metales y sus aleaciones.**

**\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**TEMÁTICA 1. 3. Deformación plástica. Mecanismo de deformación plástica. Textura, acritud. Propiedades del material deformado. Aplicación práctica de la deformación en los procesos tecnológicos en la ingeniería. La deformación como método de fortalecimiento. Recristalización. Factores que influyen en la recristalización. Tamaño de grano. Propiedades del material recristalizado.**

**OBJETIVOS:**

**2**

1. Explicar la relación que existe entre la estructura real de los metales y aleaciones en las propiedades de deformación plástica y la resistencia mecánica.
2. Explicar el proceso de recristalización de los metales deformados en frío y el concepto de trabajo en frío y en caliente.

**DESARROLLO**

* **Deformaciones elásticas y plásticas.**

Las tensiones aplicadas a un material provocan su deformación.

La deformación puede ser elástica, que desaparece una vez que se retira la carga, y plástica que se conserva después de eliminar aquella.

Por muy pequeña que sea la tensión aplicada produce una deformación: las deformaciones iniciales son siempre elásticas y su magnitud es directamente proporcional a la tensión.

En la curva que se muestra a continuación, la deformación elástica está caracterizada por la línea OA y su prolongación.

**B**

**b**

## A

**0**

****

**B**

****

Por encima del punto A se altera la proporcionalidad entre la tensión y la deformación. La tensión produce ya no solo una deformación elástica, sino también una deformación remanente plástica. Entre las deformaciones elásticas y plásticas existe una profunda diferencia física.

En la deformación elástica, por la acción de las fuerzas externas varía la distancia que hay entre los átomos en la red cristalina. Cuando se quita la carga se elimina la causa que promovió la variación de la distancia interatómica, los átomos vuelven a ocupar los puestos que antes tenían y la deformación desaparece.

La deformación plástica es un proceso mucho más complejo.

En la deformación plástica una parte del cristal se traslada con respecto a la otra. Si se quita la carga, la parte desplazada del metal no retorna a la posición inicial, la deformación se conserva. Estos desplazamientos se descubren en el análisis microestructural.

Además, la deformación plástica va acompañada de una división de los bloques de mosaico dentro de los granos, y si los grados de formación son grandes, se observa también un cambio notable en la forma de los granos y su distribución en el espacio, produciéndose grietas entre los granos (y a veces dentro de ellos).

En el gráfico anterior la inclinación de la recta OA indica la rigidez del metal o indica como la carga aplicada desde fuera hacen que varía en también las distancias interatómicas, que en primera aproximación caracterizan las fuerzas de atracción entre los átomos. La tangente del ángulo de inclinación de la recta OA es proporcional al módulo de elasticidad (E), el cual es numéricamente igual al cociente de dividir la tensión por la deformación elástica relativa (E = ).

| El módulo del material caracteriza la rigidez del metal. Hay dos tipos de módulo de elasticidad: el módulo normal de elasticidad (o módulo de Young) y el módulo tangencial de elasticidad (o módulo de Hooke). En el primer caso las fuerzas tienden a separar los átomos unos de los otros, en el segundo a desplazarlos.

El módulo de Young (E) es 2,5 – 3 veces mayor que el módulo de Hooke.

Para el hierro E = 2 x 104 Kgf/mm2 y G = 0,8 x 104 Kgf/mm2

El valor de los módulos de elasticidad está determinado por las fuerzas de la interacción entre los átomos y es una constante del material. Esta característica mecánica es insensible a la estructura, es decir al tratamiento térmico u otros procedimientos de variación de la estructura. Pero la elevación de la temperatura, que aumenta las distancias interatómicas, hace que disminuya el módulo de elasticidad.

Ya se ha dicho antes que la deformación plástica de un proceso de desplazamiento de una parte del cristal con respecto a la otra.

⇒ ¿Cuál es el mecanismo del desplazamiento plástico?

* **Mecanismos de deformación plásticas.**

Es lógico suponer que este proceso ocurre como se muestra en la fig 43 del libro de texto.

**P**

Es decir que los átomos de la parte del cristal que se encuentra sobre el plano de deslizamiento AA se desplazan al mismo tiempo por la acción de la fuerza P y pasan sucesivamente a las posiciones b y c.

El esfuerzo (desp) que hay que efectuar para realizar este desplazamiento puede calcularse como lo hizo Frenkel.



Donde:

**G:** Módulo de desplazamiento de Hooke.

**a:** Distancia interatómica.

**b:** Distancia entre los planos.

Para las redes metálicas densas la fracción a/b ≈ 1. De aquí se deduce que el esfuerzo teórico, para efectuar el desplazamiento (deformación plástica) es aproximadamente 6 veces menor que el módulo de desplazamiento. Para el hierro el límite teórico de fluencia debe ser igual a 1300 Kgf/mm2 ≈ 13000 Mpa mientras que en realidad para el hierro blando es igual aproximadamente a 15 Kgf/mm2, es decir casi 100 veces menor.

Esta diferencia es tan considerable que al principio de la ecuación de Frenkel lo mismo que la idea acerca de la resistencia teórica se considera errónea.

⇒ ¿Cómo se explica entonces el mecanismo de deformación plástica?

Para explicar esta discrepancia fue elaborada por Taylor y al mismo tiempo por Orovan y Polani, la teoría de las dislocaciones.

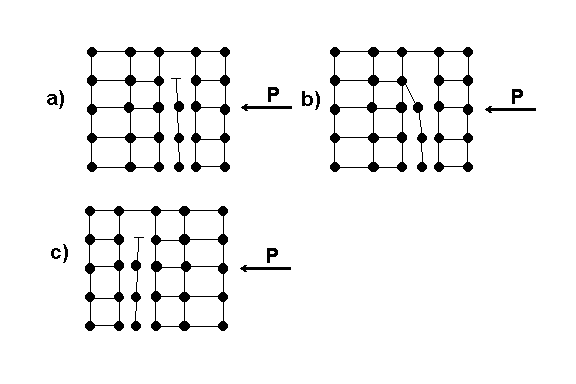
Así pues las dislocaciones fueron ideadas al principio de los años 20 para explicar la diferencia entre la resistencia teórica de los metales y la resistencia efectiva.

En los años 50, gracias a la aparición del microscopio electrónico, fueron descubiertos procedimientos metalográficos, (como se muestra en la fig 44del texto) se obtuvo la primera fotografía electrónica donde se ve claramente el plano adicional cuyo borde es la dislocación.

De esta forma la metalografía electrónica confirmó la existencia de las dislocaciones.

Pero la teoría de las dislocaciones, que explicó la causa de la poca resistencia de los metales reales, consiguió su reconocimiento total cuando se logró obtener cristales sin dislocaciones, llamados cristales filiformes (whisters). La resistencia de esos cristales sin dislocaciones se aproxima a la teórica.

El mecanismo de deformación plástica basado en las dislocaciones se desarrolla según el gráfico siguiente.



La dislocación bajo la acción de la fuerza P se traslada hacia la izquierda como consecuencia únicamente de que cambia la vecindad de los átomos por ambos lados del plano adicional. En definitiva la dislocación sale a la superficie del cristal (límite del grano o del bloque de mosaico) y desaparece.

El proceso descrito se desarrolla con mucha más facilidad que el de desplazamiento simultáneo de los átomos. Este esquema de la deformación plástica permite llegar a la conclusión de que el proceso de deslizamiento se desarrollará en el cristal con una facilidad mayor, cuantas más dislocaciones haya en el metal.

Existe otro mecanismo de deformación plástica, que aunque ocurre con menos frecuencia es típico de algunas redes cristalinas. A veces el deslizamiento y el maclado, se consideran como mecanismos de la deformación plástica, aunque tanto con el deslizamiento y con el maclado lo que queda de la deformación es el desplazamiento de las dislocaciones. Y sin embargo, las deformaciones micro y macroplásticas por deslizamiento y maclado se distinguen muy esencialmente y se analizan por separado.

**Deformación de los metales por maclado.**

La deformación por maclaje se produce en aquellos casos, en que el deslizamiento se ve dificultado por uno u otro motivo. Esto puede ocurrir a bajas temperaturas y a altas velocidades de deformación, sobre todo en los metales de red hexagonal compacta y cúbica centrada en el cuerpo.

La figura muestra el esquema de macroalargamiento de una muestra por tracción como resultado de la formación de maclas.

### P

## **P**

### MACLAS

### P

### P

Se puede apreciar que en el maclaje se produce un desplazamiento de una parte del cristal con respecto a la otra, a lo largo de determinado plano y dirección del maclaje.

El plano de maclaje es, en general, un plano cristalográfico en pequeños índices, que constituye un plano de simetría de una formación de maclaje respecto a otro cristal de origen.

Durante las investigaciones metalográficas con microscopios electrónicos y ópticos, cada macla de la deformación se presenta en forma de dos franjas paralelas (huellas de la intersección con la superficie de rotura, pulido o lámina).

Exteriormente son parecidas a las maclas formadas por destemple que se observan en los metales con estructura recristalizada.

En los policristales, las maclas nunca pasan de un grano a otro. Comúnmente se extinguen en su interior y si llegan al límite, entonces las tensiones aparecidas en la unión, pueden originar otra macla en el grano siguiente, donde tendrá otra orientación.

La figura que se muestra contiene el esquema final de traslación de los átomos dentro de la macla. Debido a que la velocidad del proceso de formación de las maclas es por lo general muy alta, es imposible hacer un análisis de este. Se considera que la macla nace por el desplazamiento de las dislocaciones de maclaje especiales. El cuadro de la deformación plástica por maclaje es estudiado solo a mononiveles observando las maclas ya “preparadas” cuyo número aumenta a medida que crece el grado de deformación

Las tensiones necesarias para el crecimiento de las maclas, son frecuentemente mayores a las requeridas para el deslizamiento. Por esto la deformación por maclaje, se encuentra raramente. Generalmente ella comienza por un deslizamiento y después cuando se alcanza un determinado nivel de tensiones (si la continuación del deslizamiento se ve dificultada, como le sucede a los metales de red hexagonal compacta).

El maclaje no conduce generalmente a una deformación residual considerable. Por eso los metales, que se deforman solo por maclaje son poco plásticos (por ejemplo, bismuto, antimonio).

* **Acritud.**

Desde hace mucho tiempo se conocen procedimientos para endurecer los metales, que conducen al aumento de la densidad útil de las dislocaciones; entre ellos están el endurecimiento por deformación en frío (acritud), la disminución del grano y de los bloques del mosaico, el tratamiento térmico, etc.

Además de conocer los métodos de aleación (es decir de introducir átomos extraños en la red), que crean imperfecciones y deformaciones de todo tipo en la red y que son métodos para crear obstáculos al libre movimiento de las dislocaciones.

No obstante con todos estos procedimientos el endurecimiento no alcanza el valor técnico. Por consiguiente en mayor o menor grado la existencia de dislocaciones en un cristal metálico real es causa de que su resistencia sea menor que la teórica y al mismo tiempo, le comunica la propiedad de deformarse plásticamente.

### Resistencia Teórica

**Resistencia de los Whispers.**

Resistencia real de los metales.

**Densidad de dislocaciones y otras deformaciones**

****

Si se recuerda la dependencia entre la deformación y la tensión. Si la carga no sobrepasa el punto del límite convencional de fluencia, después de eliminarla no ocurrirán variaciones en el metal, pero si la carga espera al límite de fluencia y las tensiones fueran por ejemplo, iguales a , después de eliminar la carga persistirá una deformación igual a **a.**

#### Si luego se vuelve a someter al metal a la acción de la carga, su aptitud para la deformación plástica habrá disminuido y el límite de fluencia se elevará hasta el valor **,** para provocar la deformación plástica habrá que aplicar una tensión mayor. Esto significa que el metal se ha hecho más resistente.

##### El aumento de la dureza y de la resistencia a la tracción producido por la deformación plástica se llama **acritud**.

Por lo dicho con anterioridad se sabe que la deformación plástica se efectúa por desplazamiento de las dislocaciones.

Un par de dislocaciones en movimiento genera centenares y centenares de nuevas y, como resultado de esto, la densidad de las dislocaciones aumenta, lo que ocasiona un endurecimiento (aumento de la tensión de rotura).

La estructura cristalina de un metal deformado plásticamente no solo se caracteriza por la deformación de la red cristalina, sino también por una determinada orientación de los granos que recibe el nombre de textura.

Los cristales orientados irregularmente, al ser sometidos a la acción que produce la deformación, vuelven sus ejes de mayor resistencia poniéndolos en la dirección que sigue la deformación.

* **Recristalización.**

Una vez efectuado el proceso de deformación plástica el metal queda en un estado estructural inestable ya que se ha elevado su energía interna. En estas condiciones se producen en el metal espontáneamente fenómenos que hacen que el metal retorne a un estado más estable desde el punto de vista estructural. Entre los procesos espontáneos que hacen que el metal deformado plásticamente pase a un estado más estable están:

1. Eliminación de las deformaciones de la red cristalina.
2. Procesos intergranulares.
3. Crecimiento de los granos.

**Influencia del calentamiento.**

Los procesos espontáneos que hacen que un metal deformado pase a un estado más estable se facilitarán mediante un calentamiento. El incremento de la temperatura contribuye a la aceleración de los procesos que hacen retornar el metal a su estabilidad. En tal caso la temperatura sirve como energía de activación y juega un papel primordial.

⇒ ¿Cómo se desarrolla el proceso de recristalización?

En el proceso de recristalización interviene tres etapas fundamentales.

* Restauración.

1. Elimina la deformación de la red.
2. Disminuye la densidad de dislocaciones.
3. Fusión de los bloques.
4. Disminución de tensiones internas.
5. Disminuye HB y t en un 20 – 30%.
6. Aumento de la plasticidad.

* Poligonización: Unida a la restauración puede efectuarse este proceso, ocurre un agrupamiento de las dislocaciones en un grano, creándose una estructura reticular que puede ser estable.
* Recristalización primaria: Los granos alargados a consecuencia de la deformación plástica se transforman en granos pequeños de forma redondeada, orientados irregularmente.
* Recristalización secundaria: Consiste en el crecimiento de los granos y transcurre a temperaturas más elevadas.

**Recristalización Primaria.**

Al aumentar la temperatura de restauración se hacen más perceptibles en la microestructura nuevos cristales diminutos. Estos tienen la misma composición y presentan la misma estructura cristalina que los granos originales y su forma no es alargada, sino que son aproximadamente uniformes (equiaxiales). Por lo general se suelen desarrollar en las zonas del grano más intensamente deformadas como son los contornos de grano y los planos de deslizamiento. Las agrupaciones de átomos que dan origen a estos nuevos granos se denominan **núcleos.**

La manera exacta de cómo se realiza este fenómeno no se conoce realmente, sin embargo puede obtenerse una idea de la realización de este proceso, estudiándolo en función de la energía de la red. Al hablar de la deformación plástica se dijo que los planos de deslizamiento y los contornos de grano eran los puntos internos de energía interna más elevada, debido a la acumulación de dislocaciones en ellos. Ahora bien, la misma naturaleza de la acritud impide a los átomos o dislocaciones de la red distorsionada moverse para formar una red libre de distorsiones.

Supóngase que algunos átomos situados inicialmente en los contornos del grano o en los planos de deslizamiento son empujados y alcanzan una energía interna E1, con relación a la energía interna de los átomos de la red no deformada, siendo E2 la energía necesaria para vencer la rigidez de la red distorsionada. Los átomos no pueden volver a recuperar la energía correspondiente a su posición inicial en el cristal libre de distorsión, recorriendo en el sentido inverso el camino seguido en su deformación, sino que tienen que tendrían que alcanzar la energía E2 para desde esa energía alcanzar el nivel energético inicial. La energía que le falta para alcanzar E2 (E2 – E1) se le puede comunicar mediante calor.

**E2**

**E1**

**E2 – E1**

**E**

Cuando estas zonas localizadas alcanzan la temperatura suficiente para que la energía sea E2 ceden parte de esta energía bajo forma de calor de recristalización y se desarrollan núcleos de nuevos granos libres de distorsión. Parte de este calor absorbido por los átomos vecinos los cuales cuentan gracias a esto con la energía necesaria para vencer la rigidez de la red distorsionada y poder pasar a formar parte de la estructura cristalina de los granos libres de distorsión.

**Recristalización secundaria o colectiva.**

En la fig 72 del Guliaev se muestra el proceso típico de crecimiento de los granos. En la figura 72 a se ve la estructura de una aleación (solución sólida de cromo y níquel) después de terminar la recristalización primaria. En ella se observan granos pequeños equiaxiales. La elevación de la temperatura hace que aumenten algunos granos a expensas de otros pequeños, se obtiene una estructura constituida por algunos granos grandes rodeados de otros pequeños (figura 72b del Guliaev). Si la temperatura sigue elevándose, aumenta el número de granos grandes y toda la estructura queda constituida por este tipo de grano.

### Tamaño de grano.

### Temperatura

###### **Variación del tamaño de grano con acritud en dependencia de la temperatura de calentamiento.**

Admitiendo que la unidad de superficie encierra una energía superficial de magnitud determinada, el aumento del grano es decir, la obtención partiendo de varios granos pequeños de un número menor de granos grandes, ocasionará una disminución de la superficie total de los granos (superficie interna) y por consiguiente, una disminución de la reserva de energía interna del sistema.

Es importante conocer el mecanismo de crecimiento del grano, puesto que del tamaño de este dependen muchas propiedades y conociendo dicho mecanismo se pueden regular las dimensiones del grano por medio del tratamiento térmico.

**Mecanismos posibles de crecimiento del grano.**

**Embrionario:** Consiste en que después de la recristalización primaria aparecen otra vez centros embrionarios de cristales nuevos y su crecimiento hace que se formen nuevos granos pero su número es menor que el de los granos en estado inicial y por esto cuando termina el proceso, aquellos son por lo general más grandes.

**Migratorio:** Consiste en la traslación de los límites del grano y el aumento de sus dimensiones, los granos grandes crecen a costa de los pequeños.

**De Fusión:** En el mismo los límites de los granos, en el cual los límites de los granos van desapareciendo, poco a poco y muchos granos pequeños se unen formando uno grande.

De lo expuesto se deduce que el proceso de fusión ejerce una influencia perniciosa para la estructura y, por tanto, en las propiedades, ya que puede conducir a la granulación gruesa (si el proceso llega a su fin o a la heterogeneidad granular (si el proceso no concluye), en cuyo caso hay que tomar medidas para evitar esto.

**Variación de las propiedades mecánicas durante la recristalización.**

## HB

**t**

****

**Propiedades**

**Temperatura de recristalización.**

**Temperatura de recristalización.**

Este término no se refiere a una temperatura definida por debajo de la cual no se presenta este fenómeno sino una temperatura aproximada a la cual un material con cierto grado de acritud recristaliza en una hora. Es la temperatura mínima a la cual se produce la formación de muchos granos en el metal deformado plásticamente. Puede calcularse por la fórmula: **Trec = a Tf.**

Donde:

**Trec:** Temperatura de recristalización.

**Tf.:** Temperatura de fusión.

**a:** coeficiente que depende de la pureza del metal y del grado de deformación.

Para restablecer la estructura y propiedades de un metal endurecido por deformación en frío hay que calentarlo por encima de la temperatura de recristalización. Este tratamiento recibe el nombre de **Recocido de Recristalización.**

La deformación plástica a temperaturas superiores a la de recristalización produce también acritud, pero esta es eliminada inmediatamente después de terminar esta por el proceso de recristalización que transcurre a estas temperaturas.

**Factores que afectan el valor de Trecristalización.**

⇒ Mientras más puro y mayor sea el grado de deformación del metal tanto menor será el valor del coeficiente **a.** **Trec ↓**

* Metales de alta pureza **a = 0,1 – 0,2**
* Metales de pureza técnica **a = 0,3 – 0,4**
* Aleaciones **a = 0,7 – 0,8**

El tiempo de calentamiento disminuye la temperatura de recristalización.

⇒ ¿Todo metal deformado podrá recristalizar?

No, para que se produzca la recristalización es necesario un valor mínimo de deformación el cual está entre 3 – 8% y se denomina: **deformación crítica.**

**Grado de deformación crítico.**

El grado de deformación que condiciona el desarrollo del proceso de crecimiento de del grano por el mecanismo de fusión y que conduce después del calentamiento a un crecimiento excesivo de los granos se llama grado de deformación crítico.

**2**

**4**

**6**

**8**

**12**

****

## **Tamaño**

**de grano**

**10**

Cuando la deformación es supercrítica la densidad de los defectos será tal que el mecanismo de fusión encuentra dificultades para llevarse a cabo o es irrealizable.

**Trabajo en caliente.**

Los trabajos que se realizan a temperatura superior a la de recristalización del metal. Se denominan normalmente trabajos en caliente, si bien esta definición no considera la velocidad a la que se deforma el metal.

El efecto de la temperatura de trabajo sobre la dureza para distintas velocidades se muestra esquemáticamente en la siguiente figura.

**En frío**

**En caliente**

### En frío

### En caliente

**Velocidad de deformación elevada.**

**Velocidad de deformación pequeña.**

### HB

Los términos caliente y frío, aplicados al trabajo, no tienen el mismo significado que en el lenguaje ordinario. Por ejemplo el plomo y el estaño, cuya temperatura de recristalización es inferior a la temperatura ambiente, si se trabajaran a esta última temperatura están siendo trabajados en caliente, por el contrario, el acero, cuya temperatura de recristalización es elevada a una temperatura de 540°c trabaja en frío.

**Comparación entre el trabajo en caliente y el trabajo en frío.**

En la fabricación de la mayoría de los productos metálicos, como chapa, varilla y alambre a partir del lingote, y el procedimiento más barato de obtención es mediante el trabajo en caliente. Sin embargo en el caso del acero, este reacciona con el oxígeno al enfriarse hasta la temperatura ambiente, formándose sobre él una capa oscura de óxido característica llamada cascarilla. Algunas veces la cascarilla puede dar lugar a dificultades en las operaciones de mecanizado o conformado.

En el trabajo en caliente el material no puede quedar en sus dimensiones definitivas.

La temperatura final en el trabajo en caliente determina el tamaño de grano que tendrá el material en el posterior trabajo en frío. Inicialmente se utilizan temperaturas más elevadas con el objeto de conferir homogeneidad al material y facilitar la reducción de las primeras fases del trabajo. A medida que continúa el trabajo el material se enfría y el tamaño de grano va disminuyendo hasta que el metal adquiere un grano muy fino a una temperatura superior a la de recristalización.

El tamaño medio del grano después de la recristalización depende de la temperatura a que se efectúa y el grado de deformación. La dependencia del tamaño del grano del metal recristalizado con respecto a estos 2 factores se caracteriza por los llamados **Diagramas completos de recristalización.**

**CONCLUSIONES.**

1. Si las vacancias influyen en los procesos difusivos y los defectos superficiales en la termorresistencia, las dislocaciones influyen en las propiedades mecánicas disminuyendo o aumentando la resistencia en dependencia de su número o densidad.
2. En la deformación de los metales, y sobre la cual desempeñan un papel fundamental las dislocaciones, puede ocurrir que el metal se deforme elástica o plásticamente. Las plásticas influye en las propiedades mecánicas, aumentando la resistencia, pudo disminuyendo la plasticidad y la viscosidad de impacto.
3. El proceso de recristalización es un proceso espontáneo en los metales por ser el paso a un sistema de menor energía libre; pero la temperatura acelera este proceso.
4. La recristalización se divide en tres etapas: Restauración, Recristalización Primaria, y Recristalización Secundaria.
5. La temperatura de recristalización se define como: Trec = a • Tfus y hay varios aspectos que influyen en el valor de a.

**Bibliografía.**

CALLISTER, WILLIAM D. Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth

Edition. Departament of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley &

Sons, Inc., 1999. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7

CALLISTER, WILLIAM D. Ciencia e Ingeniería de Materiales. Una Introducción. Quinta Edición. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Universidad de Utah. John Wiley & Son, Inc, 1999. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7

GULIAEV, A P. Metalografía. Tomos I y II. Editorial Mir. Moscú. 1983. p 186 188.

KOZLOV, Y. Ciencia de los Materiales – 1 ed -. Editorial MIR. Moscú. 1986. p 76 –

78.

LAJTIN, Y. Metalografía y tratamiento térmico de los metales – 1 ed -. Editorial MIR.

Moscú. 1973. p 359 – 360.