

La estructura cristalina de los metales

Moisés Hinojosa*

INTRODUCCIÓN

Dentro del universo de los materiales para ingeniería, los metales ocupan un lugar preponderante. En nuestra región, la industria metal-mecánica es una de las más vigorosas y de mayor importancia económica. Como parte de su formación, es deseable que el ingeniero de hoy posea entre su arsenal de conocimientos, una comprensión de la estructura de los metales que le permita explicarse sus propiedades y comportamiento en aplicaciones específicas. El propósito de este trabajo es discutir la estructura cristalina de los metales y como ésta determina algunas de sus propiedades más relevantes. Se seleccionó un enfoque sencillo pero bien fundamentado, con el objetivo de que el material presentado pueda ser asimilado por profesores y estudiantes de ingeniería sin apelar a conocimientos especializados de metalurgia. Vayamos al grano.

ARREGLOS ATÓMICOS

Los metales, como todos los elementos químicos, están formados por átomos. Para muchos propósitos es útil y válido considerar los átomos como esferas rígidas. Así podemos hablar del tamaño de los diferentes elementos refiriéndonos a su radio atómico. Los tamaños de los átomos se miden en unidades de Ångstrom, un Ångstrom es igual a 10^{-8} cm, es decir, un centímetro “contiene” 100 millones de Ångstroms.

En la figura 1 se presentan los tamaños relativos de algunos átomos: Fe (1.24 Å), Ni (1.25 Å), O (0.6 Å), C (0.71 Å), N (0.71 Å), H (0.46 Å). En metalurgia es importante tener siempre presente los tamaños relativos de los componentes de una aleación.

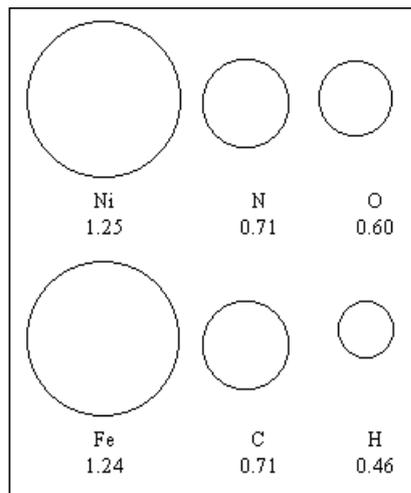


Fig. 1. Radios atómicos, en angstroms, de algunos elementos de interés en la metalurgia ferrosa.

En los materiales en estado líquido, los átomos se encuentran en movimiento aleatorio, no guardan posiciones fijas. Cuando los materiales solidifican al ser enfriados, el movimiento atómico cesa. En estado sólido los átomos pueden adquirir un ordenamiento definido tridimensional, en tal caso se dice que tienen estructura cristalina. Forman cristales. Algunos materiales no presentan ordenamiento al solidificar, su estructura es desordenada, se dice que son amorfos. Todos los metales forman cristales en estado sólido. De los materiales amorfos, el vidrio es el ejemplo clásico. Algunos materiales pueden ser amorfos o cristalinos, según como son enfriados. Es el caso, por ejemplo, del SiO_2 (dióxido de silicio), que cuando es cristalino forma el cuarzo y cuando es amorfo forma el vidrio.

*

U.A.N.L., A.P. 149-F San Nicolás de los Garza, 66451 México. E-Mail: hinojosa@gama.fime.uanl.mx

En un metal sólido, estas esferas o átomos se agrupan en el espacio en arreglos regulares, ordenados, repetitivos, periódicos. Forman estructuras tridimensionales. Grupos de átomos pueden ordenarse para formar planos que poseen distinto arreglo geométrico. En la figura 2 se ilustran dos posibilidades de arreglo atómico para formar planos. Nótese que el plano de la figura 2a provee una ocupación más eficiente del espacio.

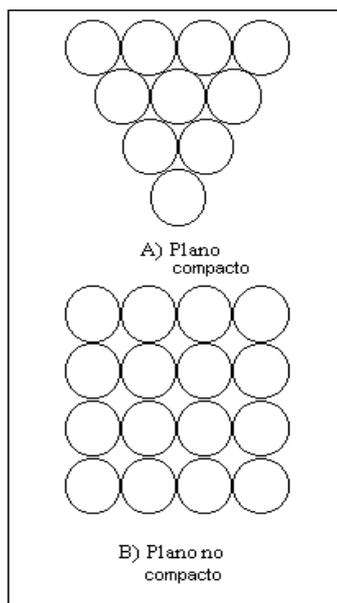


Fig. 2. Arreglos planares de átomos iguales. Se muestran dos posibilidades.

Los sólidos cristalinos pueden adoptar alguna o algunas de las 14 estructuras posibles. En la figura 3 se muestran estas 14 *redes de Bravais* (“bravé”).

Afortunadamente, salvo escasas excepciones, los metales cristalizan en solo tres estructuras: la estructura cúbica centrada en el cuerpo, la estructura cúbica centrada en las caras y la estructura hexagonal compacta. Por brevedad y comodidad, es

común referirse a estas estructuras mediante las siglas *bcc*, *fcc* y *hcp*. Estas siglas provienen de los

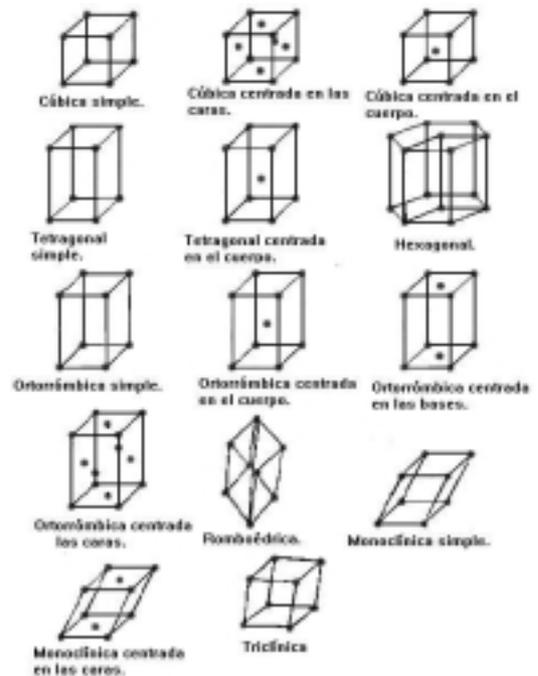


Fig. 3. Las 14 redes de Bravais.

nombres en inglés “body centered cubic” (*bcc*), “face centered cubic” (*fcc*) y “hexagonal close packed” (*hcp*).

Estas estructuras tienen la característica de ser muy compactas, es decir, permiten aprovechar eficientemente el espacio dejando pocos huecos. En las estructuras *fcc* y *hcp*, 74% del espacio está ocupado por átomos y el resto, 26%, es espacio vacío. En la estructura *bcc* esta eficiencia o “factor de empaquetamiento” es de 68%, con 32% de espacio vacío. Las estructuras *fcc* y *hcp* son más densas o compactas que la *bcc*. Naturalmente, todo

lo expresado en este párrafo es válido únicamente para los metales puros.

Es útil tener ejemplos de las estructuras de algunos metales. En general, los metales más dúctiles son de estructura *fcc*, el oro, plata, cobre, aluminio, níquel y otros adoptan esta estructura. El hierro a baja temperatura y el tungsteno (W) poseen estructura *bcc*. El zinc y el titanio son ejemplos de metales con estructura *hcp*.

El hierro puro puede adoptar dos estructuras diferentes, dependiendo de la temperatura a que esté sometido. A temperatura ambiente y hasta una temperatura de 910° C posee estructura *bcc*, arriba de 910° C y hasta 1394° C adopta estructura *fcc*, entre 1394° C y 1538° C vuelve a tomar estructura *bcc*. Por encima de 1538 °C, la temperatura de fusión, el hierro pierde su estructura cristalina al pasar al estado líquido. Se dice que el hierro es “polimórfico” o “alotrópico”, por poder adoptar diferentes estructuras cristalinas. Otros metales y materiales en general presentan esta propiedad. En la figura 4 se ilustra este comportamiento del hierro en una *curva de enfriamiento*.

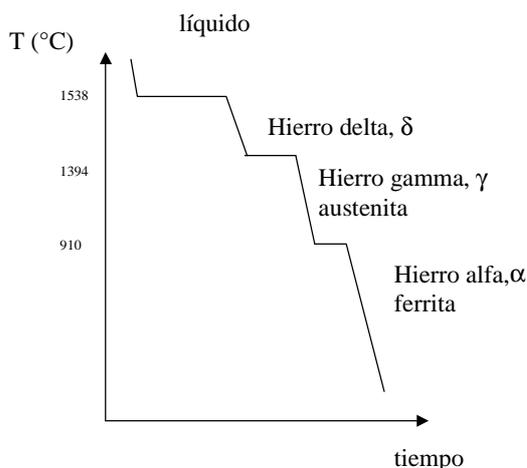


Fig. 4. Curva de enfriamiento para hierro puro.

Al hierro *bcc* de baja temperatura se le llama hierro α (alfa) o “ferrita”, a temperatura ambiente es magnético. Al hierro *fcc* se le llama hierro γ (gamma) o “austenita” y al hierro *bcc* de alta temperatura se le llama hierro δ (delta). Cada una de estas formas es llamada una *fase*.

Durante el calentamiento, el hierro α (*bcc*) experimenta un *cambio de fase* a la temperatura de 910° C para reordenar sus átomos y pasar a la estructura *fcc* o fase γ . Esta *transformación de fase* toma un cierto tiempo y durante dicha transformación la temperatura permanece constante. Durante el enfriamiento ocurre lo contrario, la austenita se transforma a ferrita a temperatura constante. Es importante recordar que esto es válido solo para el hierro puro. En el calentamiento, la transformación ferrita-austenita va acompañada de una contracción, por pasar de una estructura menos densa a una más compacta. En el enfriamiento se experimenta una expansión durante la transformación austenita-ferrita, por ser menos compacta la ferrita que la austenita.

En la figura 5 se ilustran los detalles de las estructuras *bcc* y *fcc*, nótese que en ellas existen huecos que pudieran ser ocupados por átomos de tamaño más pequeño.

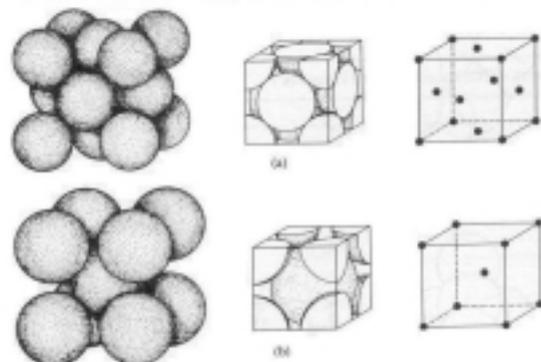


Fig. 5. Arreglo atómico en las estructuras FCC y BCC.

DEFECTOS CRISTALINOS

El arreglo de los materiales cristalinos no es perfecto. Un lugar que debería estar ocupado por un átomo a veces está vacío, este defecto recibe el nombre de *vacancia*. En un metal con elementos aleantes, un lugar que normalmente está ocupado por el metal huésped puede ser ocupado por otro átomo de radio atómico similar, este defecto se llama *átomo de impureza sustitucional*. Cuando los átomos de impureza son considerablemente más pequeños que los átomos del metal huésped, pueden alojarse en los huecos o intersticios de la red cristalina, este defecto se llama *átomo de impureza intersticial*. Estos defectos se ilustran en la figura 6.

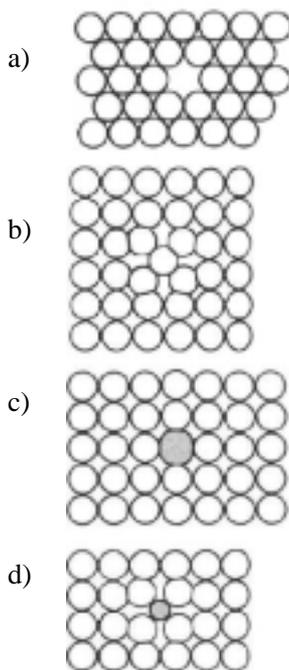


Fig. 6. Defectos en el arreglo atómico.
 a).- Vacancia b).- Autointersticial
 c).- Sustitucional d).- Intersticial

En una aleación los elementos presentes pueden reaccionar dando lugar a compuestos diversos. También sucede lo que se comentó en el párrafo anterior, los elementos aleantes pueden simplemente distribuirse como átomos individuales alojados en la red cristalina del metal huésped. En tal caso se habla de una *solución sólida*, la cual puede ser *sustitucional* o *intersticial*.

En una aleación los elementos aleantes pueden estar en solución sólida como intersticiales o sustitucionales, o bien pueden estar presentes formando parte de compuestos.

De singular importancia en las propiedades de los metales son los defectos llamados *dislocaciones*. Éstas son un defecto en el ordenamiento que se manifiesta como líneas. En la figura 7 se ilustra un esquema de un tipo de dislocación llamada de borde.

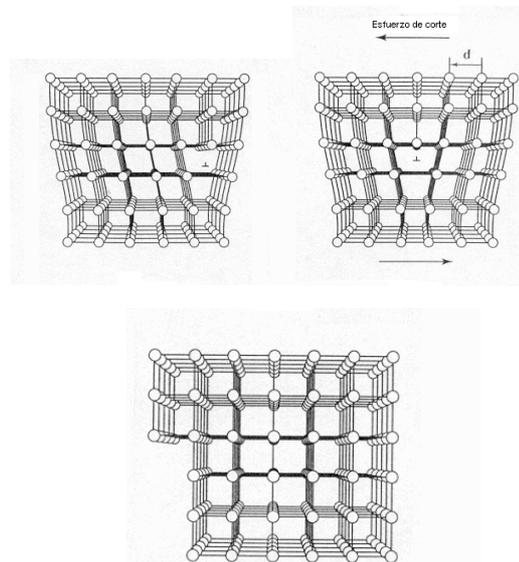


Fig. 7. Dislocación de borde, el deslizamiento de la dislocación bajo un esfuerzo produce la deformación plástica.

En la figura 8 se muestra el aspecto que presentan las dislocaciones al ser observadas mediante un microscopio electrónico de transmisión.

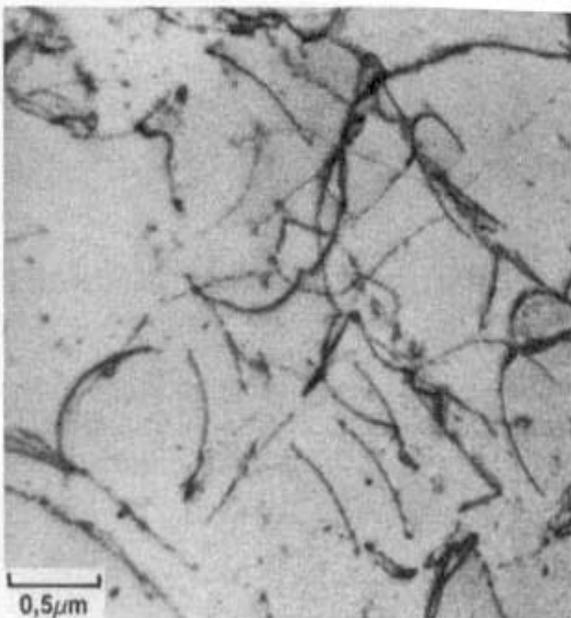


Fig. 8. Dislocaciones en una muestra metálica vistas al microscopio electrónico de transmisión.

Las dislocaciones son responsables de la ductilidad de los metales. La línea de las dislocaciones puede deslizarse sobre planos cristalinos de la estructura cuando se aplica esfuerzo a los metales y esto produce la deformación plástica.

Las dislocaciones existen en gran número en los metales, se generan desde el proceso de solidificación. Una muestra de acero recocido de un cm^3 de volumen contiene típicamente cerca de un millón de dislocaciones. En un acero laminado en frío la cantidad de dislocaciones puede ser millones

de veces más elevada. La deformación produce más dislocaciones.

Es sabido que un metal recocido es suave y de baja resistencia mecánica, esto es debido a la moderada cantidad de dislocaciones que contiene y que son relativamente libres de moverse bajo la acción de esfuerzos bajos. Cuando el metal es deformado en frío su dureza y resistencia aumentan, esto es debido a que las dislocaciones experimentan gran dificultad para deslizarse y solo lo hacen en cantidad limitada bajo esfuerzos muy elevados.

Los metalurgistas teóricos se han planteado el problema de calcular la resistencia de los metales en condición libre de defectos, esto es, es sin dislocaciones. El resultado indica que un metal libre de dislocaciones solo puede deformarse o romperse bajo esfuerzos que son del orden de cien a mil veces superiores a los valores de resistencia reales encontrados en metales procesados convencionalmente. Se ha logrado producir en laboratorio bajo condiciones controladas, muestras de tamaños limitados de metales con un número muy reducido de dislocaciones y que presentan resistencias cercanas a la teórica.

EL ACERO COMO UNA SOLUCIÓN SÓLIDA INTERSTICIAL

El acero es una aleación de hierro y carbono. El carbono puede existir en solución sólida o bien puede estar formando carburo de hierro (Fe_3C). El carbono puede existir en la austenita como elemento intersticial en solución sólida hasta contenidos de 2%, dependiendo de la temperatura. En la austenita el hierro se aloja en los sitios intersticiales de la estructura fcc, que son un poco más pequeños que el propio átomo de carbono, por lo que se tiene una distorsión de la estructura. En la ferrita el carbono también se aloja en los sitios intersticiales, pero

éstos son considerablemente más pequeños que el átomo de carbono y se produce una fuerte distorsión. Este hecho limita grandemente la cantidad de carbono que puede existir en solución sólida intersticial en el hierro alfa.

CONCLUSIÓN

Todos los metales son cristalinos. Las estructuras cristalinas que adoptan, así como las imperfecciones en el arreglo, determinan en buena medida muchas de sus propiedades más relevantes. En particular, los defectos llamados dislocaciones son responsables de la ductilidad de los metales. En una aleación los elementos aleantes pueden existir como átomos aislados alojados en la red cristalina como intersticiales o sustitucionales, también pueden formar compuestos. El conocimiento de la estructura cristalina de los metales permite comprender mejor sus propiedades y su desempeño en aplicaciones prácticas.

LECTURAS RECOMENDADAS

Los siguientes libros permiten ahondar en el tema sin requerir conocimientos especializados:

- 1.- Braun, Eliézer. Arquitectura de Sólidos y Líquidos, Serie La Ciencia para Todos, Fondo de Cultura Económica, 1997, México, D.F.
- 2.- Martínez Gómez, Lorenzo. Acero, Serie La Ciencia para Todos, Fondo de Cultura Económica, 1997, México, D.F.

El lector diligente encontrará información técnica más detallada en los siguientes textos:

- 3.- W. D. Callister, Materials Science and Engineering, an Introduction 4th edition, John Wiley and Sons Inc., New York, 1997.
- 4.- W. F. Smith, Foundations of Materials Science and Engineering 2nd edition, McGraw Hill, New York, 1993.
- 5.- D. R. Askeland, The Science and Engineering of Materials 3rd Edition, PWS Publishing Co. Boston, 1994.
- 6.- J Weertman, Elementary Dislocation Theory, Oxford University Press, 1992.