

MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

QUINTA EDICIÓN



S. Kalpakjian • S. R. Schmid

Manufactura, ingeniería y tecnología

QUINTA
EDICIÓN

Serope Kalpakjian

Illinois Institute of Technology

Steven R. Schmid

The University of Notre Dame

TRADUCCIÓN

Jaime Espinosa Limón

Ingeniero mecánico

REVISIÓN TÉCNICA

Francisco Javier Sandoval Palafox

Ulises Figueroa López

Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Estado de México

Roberto Hernández Cárdenas

Departamentos de Ingeniería Mecatrónica e Ingeniería Industrial

Tecnológico de Estudios Superiores de Jilotepec



México • Argentina • Brasil • Colombia • Costa Rica • Chile • Ecuador
España • Guatemala • Panamá • Perú • Puerto Rico • Uruguay • Venezuela

Datos de catalogación bibliográfica

KALPAKJIAN, SEROPE

Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición

PEARSON EDUCACIÓN, México, 2008

ISBN: 978-970-26-1026-7

Área: Ingeniería

Formato: 21 27 cm

Páginas: 1328

Authorized translation from the English language edition, entitled *Manufacturing engineering and technology, 5th edition* by *Serope Kalpakjian and Steven Schmid*, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2006. All rights reserved.

ISBN 0-13-148965-8

Traducción autorizada de la edición en idioma inglés, *Manufacturing engineering and technology, 5a edición* por *Serope Kalpakjian y Steven Schmid*, publicada por Pearson Education, Inc., publicada como Prentice Hall, Copyright © 2006. Todos los derechos reservados.

Esta edición en español es la única autorizada.

Edición en español

Editor: Luis Miguel Cruz Castillo

e-mail: luis.cruz@pearsoned.com

Editora de desarrollo: Claudia Celia Martínez Amigón

Supervisor de producción: José D. Hernández Garduño

Edición en inglés

Vice President and Editorial Director, ECS: *Marcia J. Horton*

Executive Editor: *Eric Svendsen*

Associate Editor: *Dee Bernhard*

Executive Managing Editor: *Vince O'Brien*

Managing Editor: *David A. George*

Production Editor: *Rose Kernan*

Director of Creative Services: *Paul Belfanti*

Creative Director: *Heather Scott*

Cover Designer: *John Christiana*

Art Editor: *Xiaohong Zhu*

Manufacturing Manager: *Alexis Heydt-Long*

Manufacturing Buyer: *Lisa McDowell*

Senior Marketing Manager: *Holly Stark*

QUINTA EDICIÓN 2008

D.R. © 2008 por Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Atacomulco 500, 5° piso

Col. Industrial Atoto

53519 Naucalpan de Juárez, Edo. de México

E-mail: editorial.universidades@pearsoned.com

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana. Reg. Núm. 1031.

Prentice Hall es una marca registrada de Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito del editor.

El préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión de uso de este ejemplar requerirá también la autorización del editor o de sus representantes.



ISBN 10: 970-26-1026-5

ISBN 13: 978-970-26-1026-7

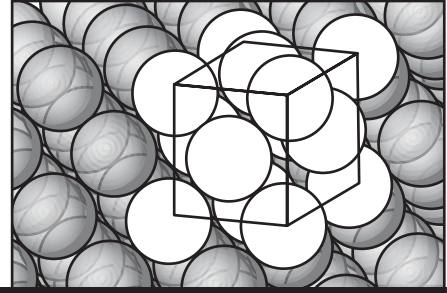
Impreso en México. *Printed in Mexico.*

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 - 11 10 09 08

CAPÍTULO

1

La estructura de los metales



- 1.1 Introducción 46
- 1.2 Estructura cristalina de los metales 47
- 1.3 Deformación y resistencia de los monocristales 50
- 1.4 Granos y límites de granos 54
- 1.5 Deformación plástica de los metales policristalinos 57
- 1.6 Recuperación, recristalización y crecimiento de grano 58
- 1.7 Trabajado en frío, a temperatura media y en caliente 60

EJEMPLO:

- 1.1 Número de granos en la bola de un bolígrafo 56

En este capítulo se presenta el tema de la estructura cristalina de los metales y se explica por qué es importante su estudio:

- Cómo se arreglan los átomos en una estructura metálica.
- Tipos de imperfecciones existentes en las estructuras cristalinas y sus efectos.
- Cómo se desarrollan los granos y los límites de los granos.
- Mecanismos de endurecimiento por deformación y anisotropía.
- Qué efectos tienen estos arreglos atómicos, imperfecciones, límites de granos y temperatura en las propiedades de los metales importantes para la manufactura.

1.1 | Introducción

¿Por qué algunos metales son duros y otros suaves? ¿Por qué algunos son frágiles, mientras que otros son dúctiles y se les puede dar forma fácilmente sin fracturarse? ¿Por qué algunos pueden soportar altas temperaturas y otros no? Éstas y otras numerosas preguntas se pueden contestar estudiando la **estructura atómica** de los metales (esto es, el arreglo de los átomos en su interior), ya que influye grandemente en sus propiedades y comportamiento. Este conocimiento hace posible controlar y predecir el comportamiento y desempeño de los metales en diversos procesos de manufactura. Entender su estructura también nos permite predecir y evaluar sus **propiedades**; esto nos ayuda a hacer las selecciones apropiadas para aplicaciones específicas en condiciones particulares externas, físicas y ambientales. Además de la estructura atómica, diversos factores influyen en las propiedades y el comportamiento de los metales, como su composición, las impurezas y las vacantes en la estructura atómica, el tamaño y los límites de grano, el ambiente, el tamaño y la condición superficial del metal, así como los métodos por medio de los cuales, metales y aleaciones se convierten en productos útiles.

Los temas cubiertos en este capítulo, y su secuencia, se describen en la figura 1.1. La estructura y las propiedades generales de materiales distintos a los metales se describen en los capítulos 7 (polímeros), 8 (cerámicos y vidrios) y 9 (materiales compósitos).

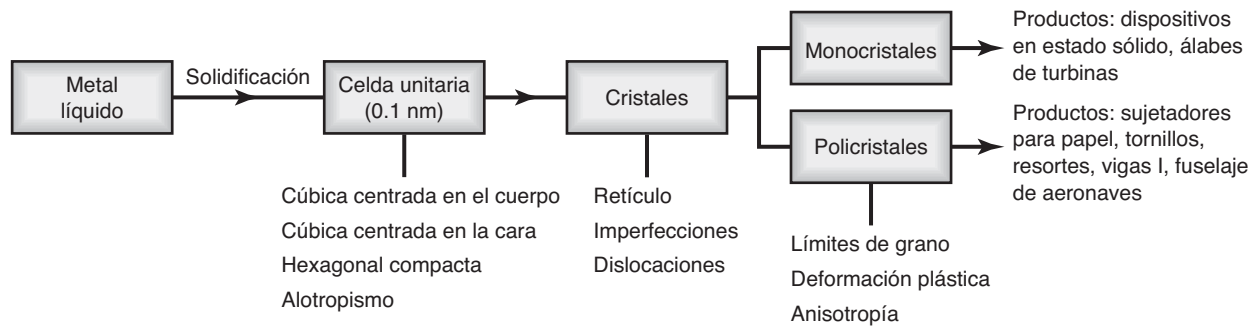


FIGURA 1.1 Diagrama de los temas descritos en el capítulo 1.

La estructura de las aleaciones metálicas, el control de su estructura y los procesos de tratamiento térmico se describen en el capítulo 4.

1.2 Estructura cristalina de los metales

Cuando los metales se solidifican a partir de un estado fundido, los átomos se arreglan por sí mismos en diversas configuraciones ordenadas, denominadas **cristales**, y a este arreglo se le llama estructura cristalina. Al grupo más pequeño de átomos que muestran la **estructura de red** característica de un metal en particular se le conoce como **celda unitaria**. Es el bloque primario de un cristal, y un monocristal puede tener varias celdas unitarias.

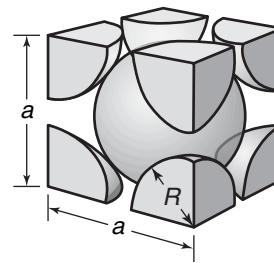
Los tres arreglos atómicos básicos en los metales son:

1. **Estructura cúbica centrada en el cuerpo (bcc)**: hierro alfa, cromo, molibdeno, tantalio, tungsteno y vanadio.
2. **Estructura cúbica centrada en las caras (fcc)**: hierro gama, aluminio, cobre, níquel, plomo, plata, oro y platino.
3. **Estructura hexagonal compacta (hcp)**: berilio, cadmio, cobalto, magnesio, titanio alfa, zinc y zirconio.

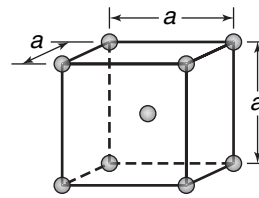
En las ilustraciones de las figuras 1.2 a 1.4, donde se representan estas estructuras, cada esfera representa un átomo. El orden de magnitud de la distancia entre los átomos en estas estructuras cristalinas es de 0.1 nm (10^{-8} pulgadas). A estos modelos se les conoce como modelos de bolas o de esferas; se asemejan a pelotas de tenis arregladas en diferentes configuraciones dentro de una caja.

Como se muestra en la figura 1.2, cada átomo en la estructura bcc tiene ocho átomos circundantes. De las tres estructuras ilustradas, los cristales fcc y hcp tienen las configuraciones compactadas con mayor densidad. En la estructura hcp, a los planos superior e inferior se les llama **planos basales**. La manera en que estos átomos se arreglan determina las propiedades de un metal particular. Tales arreglos se pueden modificar agregando átomos de algún otro metal o metales, conocidos como **aleantes**, lo cual se realiza con frecuencia para mejorar diversas propiedades del metal.

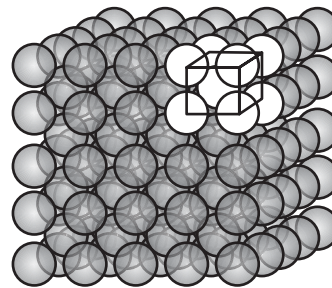
Los metales forman diferentes estructuras cristalinas para *minimizar* la energía requerida para agruparse en un patrón regular. Por ejemplo, el tungsteno forma una estructura bcc porque ésta requiere menos energía que las otras; de manera similar, el



(a)



(b)



(c)

FIGURA 1.2 Estructura cúbica centrada en el cuerpo (bcc): (a) modelo de bolas; (b) celda unitaria, y (c) monocristal con muchas celdas unitarias.

aluminio forma una estructura fcc. Sin embargo, a diferentes temperaturas, el mismo metal puede formar diferentes estructuras debido a un requerimiento menor o mayor de energía. Por ejemplo, el hierro forma una estructura bcc (hierro alfa) debajo de 912 °C (1674 °F) y arriba de 1394 °C (2541 °F), pero forma una estructura fcc (hierro gama) entre 912 °C y 1394 °C.

A la aparición de más de un tipo de estructura cristalina se le conoce como **alotropismo** o **polimorfismo** (que significa “muchas formas”). Debido a que las propiedades y el comportamiento de un metal dependen en gran medida de su estructura cristalina, el alotropismo es un factor importante en el tratamiento térmico de los metales, así como en el trabajo de los mismos y en las operaciones de soldadura (partes III y V). Actualmente se producen monocristales de metales en lingotes de 1 m (40 pulgadas) de largo y hasta de 300 mm (12 pulgadas) de diámetro, con aplicaciones como álabes para turbinas y semiconductores (ver secciones 11.4 y 28.3). Sin embargo, como se señala en la sección 1.4, la mayoría de los cristales utilizados en la manufactura son policristalinos.

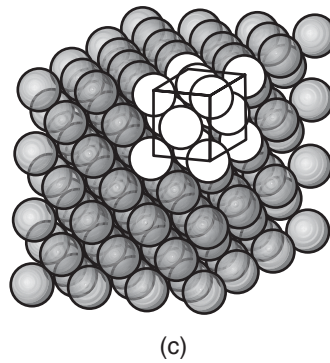
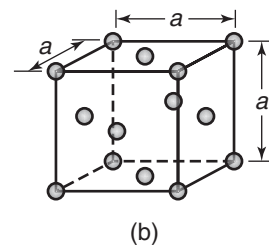
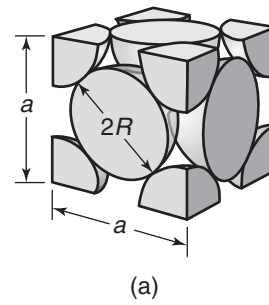


FIGURA 1.3 Estructura cristalina cúbica centrada en las caras (fcc): (a) modelo de bolas; (b) celda unitaria, y (c) monocristal con varias celdas unitarias.

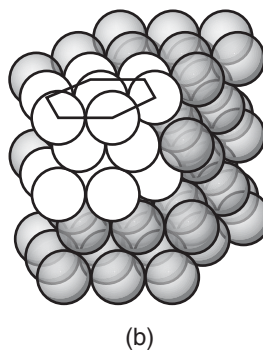
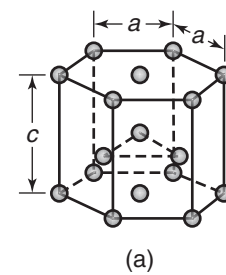


FIGURA 1.4 Estructura cristalina hexagonal compacta (hcp): (a) modelo de bolas; (b) celda unitaria, y monocristal con varias celdas unitarias.

1.3 Deformación y resistencia de los monocristales

Cuando un monocristal se somete a una fuerza externa, primero sufre una **deformación elástica**, esto es, regresa a su forma original al retirar la fuerza. Una analogía de este tipo de comportamiento es un resorte helicoidal que se estira cuando se le agrega carga y que vuelve a su forma original al retirarse aquella. Sin embargo, si la fuerza sobre la estructura cristalina se aumenta lo suficiente, el cristal sufre una **deformación plástica** o **deformación permanente**, esto es, ya no regresa a su forma original cuando se retira la fuerza.

Existen dos mecanismos básicos por los que la deformación plástica ocurre en las estructuras cristalinas. Uno es el deslizamiento de un plano de átomos sobre un plano adyacente (llamado **plano de deslizamiento**, figura 1.5a) por un **esfuerzo cortante** (figura 1.5b). El esfuerzo cortante se define como la razón de la fuerza cortante aplicada al área de la sección transversal que se cizalla. La deformación de un espécimen monocristalino por deslizamiento se muestra de manera esquemática en la figura 1.6a. Nótese que este comportamiento es muy parecido al deslizamiento de los naipes uno sobre otro.

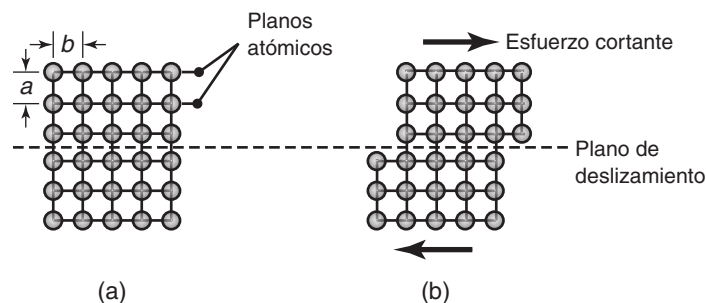


FIGURA 1.5 Deformación permanente (también llamada deformación plástica) de un monocristal sometido a un esfuerzo cortante: (a) estructura antes de la deformación, y (b) deformación permanente mediante deslizamiento. La relación b/a influye en la magnitud del esfuerzo cortante requerido para provocar el deslizamiento.

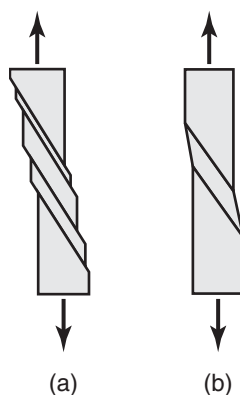


FIGURA 1.6 (a) Deformación permanente de un monocristal por una carga de tensión. Nótese que los planos de deslizamiento tienden a alinearse por sí mismos en la dirección de la fuerza que jala. Este comportamiento se puede simular mediante un paquete de naipes con una banda de hule alrededor de ellos. (b) El maclaje en un monocristal en tensión.

Al igual que se requiere cierta cantidad de fuerza para deslizar los naipes entre sí, un cristal exige cierta cantidad de esfuerzo cortante (**esfuerzo crítico cortante**) para sufrir una deformación permanente. Por ello, debe existir un esfuerzo cortante de magnitud suficiente dentro de un cristal para que ocurra una deformación plástica; en caso contrario, la deformación sólo es elástica.

El esfuerzo cortante requerido para provocar el deslizamiento en los monocristales es directamente proporcional a la relación b/a en la figura 1.5a, donde a es el espaciamiento de los planos atómicos y b es inversamente proporcional a la densidad atómica en el plano atómico. Al disminuir b/a , disminuye el esfuerzo cortante requerido para provocar el deslizamiento. Por lo tanto, se puede establecer que el deslizamiento en un monocristal ocurre a lo largo de los planos de *máxima densidad atómica* o, en otras palabras, ese deslizamiento ocurre en los planos más compactos y en las direcciones más compactas.

Debido a que la relación b/a varía para diferentes direcciones dentro del cristal, un monocristal tiene distintas propiedades cuando se somete a prueba en diferentes direcciones; a este comportamiento se le conoce como **anisotrópico**. Un sencillo ejemplo de anisotropía es el comportamiento de la tela tejida, que se estira de manera distinta cuando se jala en diferentes direcciones; otro ejemplo común es la madera laminada, que es mucho más fuerte en la dirección planar que a lo largo de la dirección del espesor (nótese, por ejemplo, cómo se divide fácilmente el laminado de madera).

El segundo, y menos común, de los mecanismos de deformación plástica en los cristales es el **maclaje**, en la que una parte del cristal forma una imagen a espejo de sí misma del otro lado del *plano de maclaje* (figura 1.6b). Las maclas se forman abruptamente y son la causa del sonido de agrietamiento (“chillido de metal”), que se presenta cuando una varilla de estaño o de zinc se dobla a temperatura ambiente. El maclaje ocurre por lo común en los metales hcp.

Sistemas de deslizamiento. A la combinación de un plano de deslizamiento y su dirección de deslizamiento se le conoce como *sistema de deslizamiento*. En general, los metales con cinco o más de estos sistemas son dúctiles, en tanto que los que tienen menos no lo son.

1. En los cristales **cúbicos centrados en el cuerpo** existen 48 sistemas de deslizamiento posibles. Por lo tanto, es alta la probabilidad de que un esfuerzo cortante externo aplicado actúe sobre uno de estos sistemas y provoque deslizamiento. Sin embargo, debido a que la relación b/a es relativamente alta, el esfuerzo cortante requerido es alto. En general, los metales con estructuras bcc tienen buena resistencia y ductilidad moderada.
2. En los cristales **cúbicos centrados en las caras** existen 12 sistemas de deslizamiento. La probabilidad de deslizamiento es moderada y el esfuerzo al corte requerido es bajo, debido a la relación b/a relativamente baja. En general, estos metales tienen una resistencia moderada y buena ductilidad.
3. El cristal **hexagonal compacto** tiene tres sistemas de deslizamiento y por lo tanto su probabilidad de deslizamiento es baja; sin embargo, a temperaturas elevadas se activan más sistemas. Los metales con estructura hcp son generalmente frágiles a temperatura ambiente.

Nótese en la figura 1.6a que las partes de un monocristal que se han deslizado, han girado desde su posición angular original en la dirección de la fuerza de tensión; obsérvese también que el deslizamiento ha ocurrido a lo largo de ciertos planos. Con el uso de un microscopio electrónico se puede mostrar que lo que parece un solo plano de deslizamiento es, en realidad, una **banda de deslizamiento** que consta de varios planos de deslizamiento (figura 1.7).

1.3.1 Imperfecciones en la estructura cristalina de los metales

La resistencia real de los metales es aproximadamente uno a dos órdenes de magnitud menor que los niveles de resistencia obtenida a partir de cálculos teóricos; esta discre-

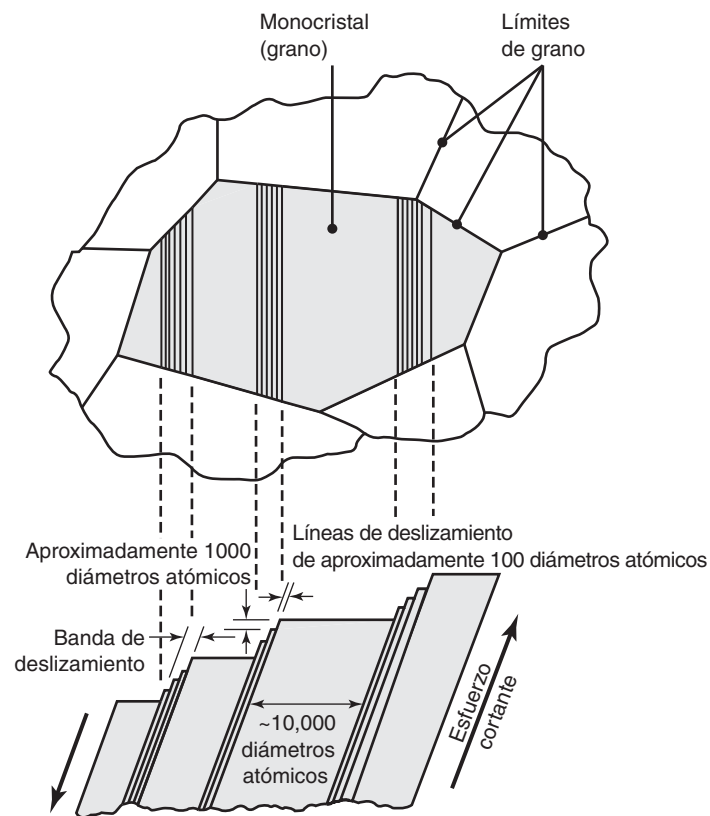


FIGURA 1.7 Esquema de las líneas y bandas de deslizamiento en un monocristal (grano) sometido a un esfuerzo al corte. Una banda de deslizamiento consta de varios planos de deslizamiento. El cristal en el centro de la ilustración superior es un grano individual rodeado de varios otros

pancia se ha explicado en términos de **defectos e imperfecciones** en la estructura cristalina. A diferencia de los modelos ideales ya descritos, los cristales metálicos reales contienen un gran número de defectos e imperfecciones que se clasifican como sigue:

1. *Defectos puntuales*, como una **vacante** (átomo faltante), un **átomo intersticial** (átomo adicional en el retículo) o una **impureza** (átomo extraño que ha reemplazado el átomo de metal puro), (fig. 1.8).

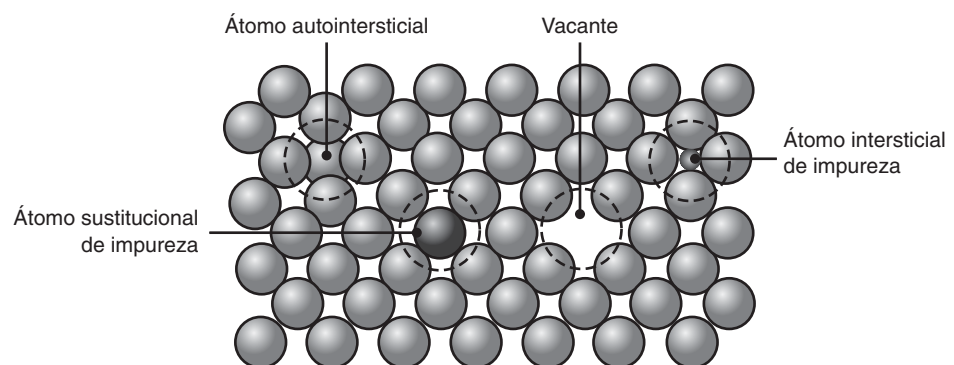


FIGURA 1.8 Esquema de tipos de defectos en un retículo monocristalino: autointersticial, vacante, intersticial y sustitucional.

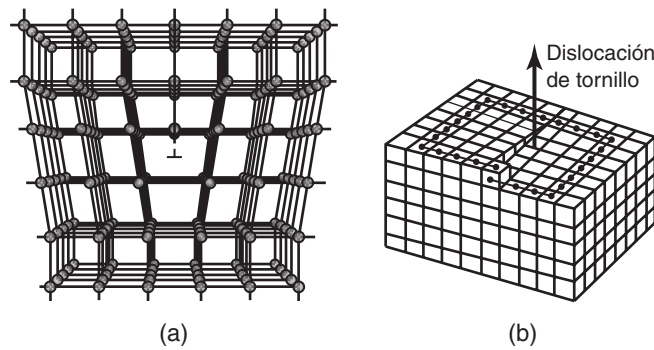


FIGURA 1.9 Tipos de dislocaciones en un monocristal: (a) dislocación de borde, y (b) dislocación de tornillo.

2. *Defectos lineales* o *unidimensionales*, denominados dislocaciones (figura 1.9).
3. *Imperfecciones planares* o *bidimensionales*, como los **límites de grano** y **límites de fase** (ver sección 1.4).
4. *Imperfecciones volumétricas* o *de masa*, como **huecos**, **inclusiones** (elementos no metálicos como óxidos, sulfuros y silicatos), **otras fases** o **grietas**.

Estos defectos afectan de manera adversa las propiedades mecánicas y eléctricas de los metales, como el esfuerzo de fluencia, la resistencia a la fractura y la conductividad eléctrica; a éstas se les conoce como propiedades **sensibles a la estructura**. Por otro lado, las propiedades físicas y químicas, como el punto de fusión, el calor específico, el coeficiente de dilatación térmica y las constantes elásticas (por ejemplo, los módulos de elasticidad y de rigidez) no son sensibles a estos defectos; se les conoce como propiedades **insensibles a la estructura**.

Dislocaciones. Observadas por primera vez en la década de 1930, las *dislocaciones* son defectos del arreglo ordenado de la estructura atómica de un metal. Un plano de deslizamiento que contiene una dislocación (figura 1.10) requiere, para permitir el deslizamiento, un esfuerzo cortante menor que un plano en una red perfecta. Las dislocaciones son los defectos más significativos y ayudan a explicar la discrepancia entre las resistencias reales y las teóricas en los metales.

Existen dos tipos de dislocaciones: **de borde** y **de tornillo** (figura 1.9). Una analogía utilizada para describir el movimiento de una dislocación de borde es la del gusano de tierra, que se mueve hacia delante por medio de una ondulación que inicia en la cola y se mueve hacia la cabeza. Otra analogía de dicha dislocación ocurriría al mover una alfombra grande formando una ondulación en un extremo y moviéndola hacia el otro extremo. La fuerza requerida para mover una alfombra de esta manera es mucho menor

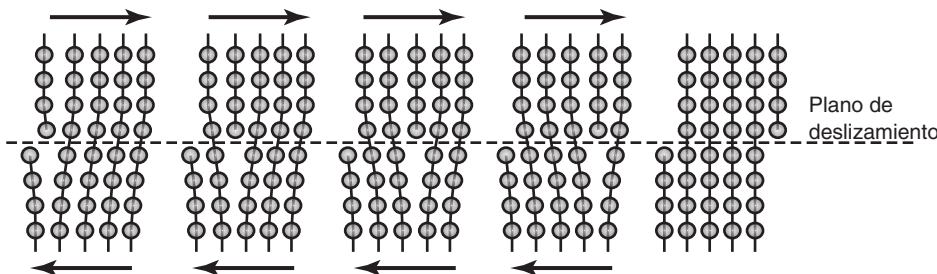


FIGURA 1.10 Movimiento de una dislocación de borde a través del retículo cristalino por un esfuerzo cortante. Las dislocaciones ayudan a explicar por qué la resistencia real de los metales es mucho menor que la predicha por la teoría.

que la exigida para deslizarla toda sobre el piso. A las dislocaciones de tornillo se les llama así porque los planos atómicos forman una rampa espiral.

1.3.2 Endurecimiento por trabajo (endurecimiento por deformación)

Aunque la presencia de una dislocación reduce el esfuerzo cortante requerido para provocar el deslizamiento, las dislocaciones pueden:

1. Trabarse y obstruir una a otra; y
2. verse impedidas por barreras, como límites de grano e impurezas, e inclusiones en el material.

Las obstrucciones e impedimentos aumentan el esfuerzo cortante requerido para el deslizamiento. Un ejemplo de obstrucción sería mover dos ondulaciones a diferentes ángulos a través de una alfombra: en donde se cruzan, interfieren sus movimientos y su efecto combinado hace más difícil el movimiento de la alfombra.

Al aumento en el esfuerzo cortante, que incrementa la resistencia total y la dureza del metal, se le conoce como **endurecimiento por trabajado** o **endurecimiento por deformación**. Cuanto mayor sea la deformación, mayor será el número de obstrucciones, y de ahí un aumento en la resistencia del metal. El endurecimiento por trabajado se utiliza ampliamente para aumentar la resistencia de los metales en los procesos de trabajo de los mismos a temperatura ambiente. Ejemplos característicos son la producción de hojas metálicas para carrocerías automotrices y fuselajes de aviones mediante el laminado en frío, la fabricación de las cabezas de los tornillos mediante forjado, y el endurecimiento de cables mediante la reducción de su sección estirándolos a través de un dado.

1.4 Granos y límites de granos

Los metales que se utilizan comúnmente en la manufactura de diversos productos constan de muchos cristales individuales orientados al azar (**granos**); por lo tanto, las estructuras metálicas no son monocristalinas sino **policristalinas** ("muchos cristales"). Cuando una masa de metal fundido comienza a solidificarse, los cristales empiezan a formarse independientemente unos de otros en varios lugares dentro de la masa líquida; tienen orientaciones al azar y sin relación unas con otras (figura 1.11). Después, cada uno de ellos crece en una estructura cristalina o grano.

El número y los tamaños de los granos desarrollados en una unidad de volumen del metal dependen de la *velocidad* a la que tiene lugar la **nucleación** (etapa inicial de formación de cristales). El número de lugares diferentes en los que se comienzan a formar los cristales individuales (siete en la figura 1.11a) y la velocidad a la que éstos crecen, influyen

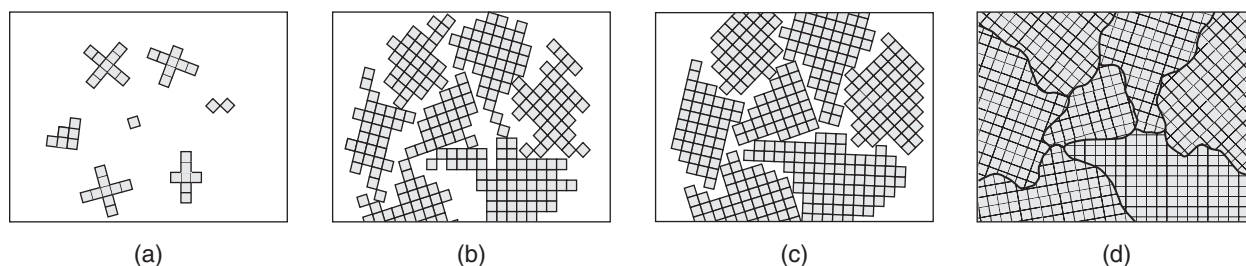


FIGURA 1.11 Esquema de las etapas durante la solidificación del metal fundido; cada cuadrado pequeño representa una celda unitaria. (a) Nucleación de cristales en sitios al azar en el metal fundido; obsérvese que la orientación cristalográfica de cada sitio es diferente. (b) y (c) Crecimiento de los cristales conforme continúa la solidificación. (d) Metal solidificado, mostrando granos individuales y límites de granos; nótese los diferentes ángulos en los que se encuentran los granos circundantes unos respecto de otros.

en el tamaño medio de los granos desarrollados. Si la velocidad de nucleación es alta, el número de granos en una unidad de volumen del metal será grande y, por lo tanto, el tamaño de grano será pequeño. Por el contrario, si la velocidad de crecimiento de los cristales es elevada (en comparación con su velocidad de nucleación), habrá menos granos por unidad de volumen y su tamaño será mayor. Generalmente, el enfriamiento rápido produce granos más pequeños, mientras que el lento produce granos más grandes.

Obsérvese, en la figura 1.11d, cómo el crecimiento de los granos al final obliga a que incidan unos en otros; las superficies que separan estos granos individuales se llaman **límites de grano**. Cada grano consta de un monocristal (en el caso de los metales puros) o un agregado policristalino (en el caso de las aleaciones). Nótese también que la orientación cristalográfica cambia abruptamente de un grano al siguiente a través de los límites de los granos. (En la sección 1.3 se vio que el comportamiento de un solo cristal o de un solo grano es anisotrópico). Entonces, ya que sus granos tienen orientaciones cristalográficas al azar, el comportamiento ideal de una pieza de metal policristalino es **isotrópico**: sus propiedades no varían con la dirección de prueba.

1.4.1 Tamaño de grano

El **tamaño de grano** influye de modo significativo en las propiedades mecánicas de los metales. A la temperatura ambiente, por ejemplo, el tamaño grande del grano se asocia en general con resistencia, dureza y ductilidad bajas. Los granos grandes, particularmente en las hojas metálicas, también provocan una superficie de apariencia rugosa después de estirar el material (ver el efecto **piel de naranja**, sección 1.6). Los granos pueden ser tan grandes que es posible verlos a simple vista, como los de zinc en la superficie galvanizada de las hojas de acero.

Usualmente, el tamaño de grano se mide contando el número de granos en un área dada o el número de granos que cruzan la longitud de una línea dibujada al azar sobre una fotografía agrandada de los granos (tomada en un microscopio a un espécimen pulido y atacado). El tamaño de grano también se puede determinar comparándolo con un estándar. El número del tamaño de grano de ASTM (American Society for Testing and Materials), n , se relaciona con el número de granos (N) por pulgada cuadrada a una ampliación de $100\times$ (igual a 0.0645 mm^2 del área real) mediante la fórmula

$$N = 2^{n-1} \quad (1.1)$$

Debido a que los granos suelen ser extremadamente pequeños, muchos pueden ocupar una pieza metálica (tabla 1.1). Por lo común, los tamaños de grano entre 5 y 8 se conside-

TABLA 1.1

Tamaños de grano		
No. ASTM	Granos/mm ²	Granos/mm ³
-3	1	0.7
-2	2	2
-1	4	5.6
0	8	16
1	16	45
2	32	128
3	64	360
4	128	1,020
5	256	2,900
6	512	8,200
7	1,024	23,000
8	2,048	65,000
9	4,096	185,000
10	8,200	520,000
11	16,400	1,500,000
12	32,800	4,200,000

ran granos finos. Un tamaño de grano 7 es generalmente aceptable para las hojas metálicas con que se fabrican carrocerías automotrices, electrodomésticos y utensilios de cocina.

1.4.2 Influencia de los límites de los granos

Los límites de los granos tienen una influencia importante sobre la resistencia y ductilidad de los metales, y como interfieren con el movimiento de las dislocaciones, también influyen en el endurecimiento por deformación. Estos efectos dependen de la temperatura, velocidad de deformación, tipo y cantidad de impurezas presentes *a lo largo* de los límites de los granos.

Los límites de granos son más reactivos que los propios granos, ya que los átomos, a lo largo de dichos límites, están empaquetados de manera menos eficaz y se encuentran más desordenados; el resultado es que tienen menor energía que los átomos en el retículo ordenado dentro de los granos y se pueden retirar con mayor facilidad, o unirse químicamente a otro átomo. En consecuencia, la superficie se vuelve más rugosa cuando se ataca o se somete a ambientes corrosivos u hostiles.

A temperaturas elevadas y en materiales cuyas propiedades dependen de la velocidad a la que se deforman (se trabajan), la deformación plástica ocurre por medio del **deslizamiento de los límites de los granos**. El mecanismo de **termofluencia** (esto es, la elongación por esfuerzo durante cierto periodo, usualmente a temperaturas elevadas) es el resultado del deslizamiento de los límites de los granos (sección 2.8).

Fragilización de los límites de grano. Al ponerse en contacto atómico estrecho con algunos metales de bajo punto de fusión, un metal normalmente dúctil y fuerte puede agrietarse cuando se somete a esfuerzos externos muy bajos. Ejemplos de estos comportamientos son (a) el aluminio humedecido con una amalgama de mercurio-zinc o con galio líquido, y (b) el cobre (a temperatura elevada) humedecido con plomo o bismuto. Estos elementos fragilizadores debilitan los límites de los granos del metal mediante *fragilización*. El concepto **fragilización de metal líquido** se utiliza para describir dichos fenómenos, ya que el elemento fragilizador se encuentra en un estado líquido. Sin embargo, la fragilización puede ocurrir a temperaturas muy por debajo del punto de fusión del elemento citado, fenómeno al que se conoce como **fragilización de metal sólido**.

La **fragilización en caliente** es el resultado de la fusión local de un constituyente o de una impureza en el límite del grano a una temperatura por debajo del punto de fusión del propio metal. Cuando se somete a deformación plástica a temperaturas elevadas (*trabajo en caliente*), la pieza metálica se desmorona y se desintegra a lo largo de los límites de sus granos; ejemplos de ello son el antimonio en cobre, aceros emplomados y bronce emplomado. Usualmente, para evitar la fragilización en caliente, el metal se trabaja a baja temperatura para evitar la suavización y la fusión a lo largo de los límites de los granos. Otra forma de fragilización es la **fragilización por revenido** en los aceros aleados, provocada por la segregación (movimiento) de impurezas a los límites de los granos.

EJEMPLO 1.1 Número de granos en la bola de un bolígrafo

Supóngase que la bola de un bolígrafo tiene 1 mm de diámetro y un tamaño de grano ASTM de 10. Calcúlese el número de granos en la bola.

Solución Un metal con un tamaño de grano ASTM de 10 tiene 520,000 granos por milímetro cúbico (ver tabla 1.1). El volumen de la bola de 1 mm de diámetro está dado por

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} = \frac{4\pi(0.5 \text{ mm})^3}{3} = 0.5236 \text{ mm}^3$$

Para obtener el número total de granos, el volumen se multiplica por los granos por milímetro cúbico, o

$$\text{Núm. de granos} = (0.5236 \text{ mm}^3)(520,000 \text{ granos/mm}^3) = 272,300 \text{ granos}$$

1.5 Deformación plástica de los metales policristalinos

Si un metal policristalino con *granos equiaxiales* uniformes (que tienen dimensiones iguales en todas direcciones, como se muestra en el modelo en la figura 1.12a) se somete a deformación plástica a temperatura ambiente (trabajo en frío), los granos se deforman y se alargan. El proceso de deformación se puede efectuar comprimiendo el metal, como se realiza en la forja para elaborar un disco para turbina, o sometándolo a tensión, como se hace al estirar una hoja metálica para fabricar una carrocería automotriz. La deformación dentro de cada grano tiene lugar conforme a los mecanismos descritos en la sección 1.3 para un monocristal.

Durante la deformación plástica, los límites de los granos permanecen intactos y la continuidad de la masa se mantiene. El metal deformado muestra una resistencia mayor debido a la obstrucción de las dislocaciones con los límites de los granos. El aumento de resistencia depende del grado de deformación (*esfuerzo*) al que se somete el metal; cuanto mayor sea la deformación, más fuerte será el metal. El aumento de resistencia es mayor para metales con granos más pequeños porque tienen un área superficial de límites de grano mayor por unidad de volumen de metal y, de ahí, mayor obstrucción de las dislocaciones.

Anisotropía (textura). Obsérvese en la figura 1.12b que, como resultado de la deformación plástica, los granos se han alargado en una dirección y contraído en la otra. En consecuencia, esta pieza de metal se ha vuelto anisotrópica, y por lo tanto, sus propiedades en la dirección vertical son diferentes de aquéllas en la dirección horizontal. Muchos productos desarrollan anisotropía de propiedades mecánicas después de haberse procesado mediante técnicas de trabajo de los metales (fig. 1.13). El grado de anisotropía depende de cuán uniformemente se deforma el metal; obsérvese en la dirección de la grieta en la figura 1.13a, por ejemplo, que la ductilidad de la hoja laminada en frío en la dirección transversal (vertical) es menor que aquélla en su dirección de laminado (longitudinal).

La anisotropía influye tanto en las propiedades mecánicas como en las físicas. Por ejemplo, las hojas de acero para transformadores eléctricos se laminan de tal manera que la deformación resultante imparta propiedades magnéticas anisotrópicas a la hoja. Este arreglo reduce las pérdidas magnéticas por histéresis y mejora la eficiencia de los transformadores. (Ver también *aleaciones amorfas*, sección 6.14). Existen dos tipos generales de anisotropía en los metales: la *orientación preferida* y la *fibración mecánica*.

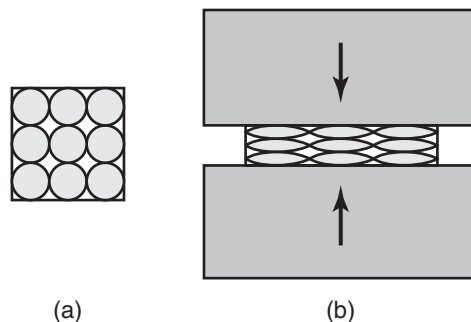


FIGURA 1.12 Deformación plástica de granos ideales (equiaxiales) en un espécimen sometido a compresión (como la que ocurre en el forjado o laminado de los metales): (a) antes de la deformación, y (b) después de la deformación. Obsérvese la alineación de los límites de los granos a lo largo de la dirección horizontal; a este efecto se le conoce como orientación preferencial.

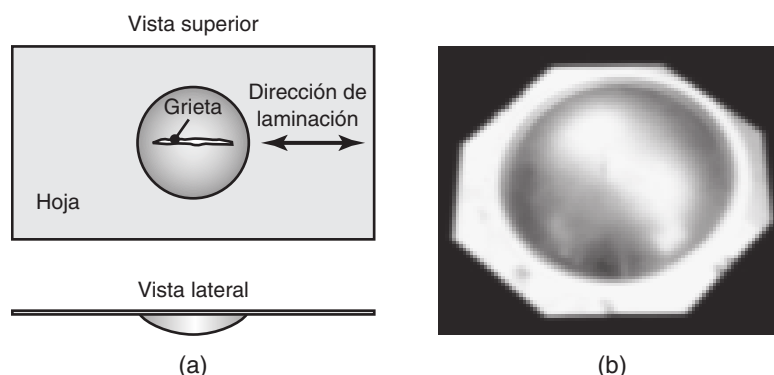


FIGURA 1.13 (a) Esquema de una grieta que se ha sometido a abombado (provocado, por ejemplo, por empujar una bola de acero contra la hoja). Obsérvese la orientación de la grieta con respecto a la dirección de laminación de la hoja; esta hoja es anisotrópica. (b) Hoja de aluminio con una grieta (línea vertical oscura en el centro) desarrollada en una prueba de abombado; la dirección de laminación de la hoja era vertical. *Fuente:* Cortesía de J. S. Kallend, Illinois Institute of Technology.

Orientación preferencial. También llamada **anisotropía cristalográfica**, la *orientación preferencial* se describe mejor en la figura 1.6a. Cuando se somete a tensión un cristal metálico, los bloques deslizantes giran hacia la dirección de la fuerza de tensión; el resultado es que los planos y las bandas de deslizamiento tienden a alinearse por sí mismas con la dirección de deformación. De manera similar, para un agregado policristalino con granos en orientaciones al azar, todas las direcciones de deslizamiento tienden a alinearse a sí mismas con la dirección de la fuerza de tensión. Por el contrario, los planos de deslizamiento bajo compresión tienden a alinearse por sí mismos en una dirección perpendicular a la dirección de la fuerza de compresión.

Fibración mecánica. Este tipo de anisotropía es el resultado de la alineación de las inclusiones (**rigidizadores**), impurezas y huecos en el metal durante la deformación. Obsérvese que si los granos esféricos en la figura 1.12a estuvieran recubiertos con impurezas, éstas se alinearían generalmente por sí mismas en una dirección horizontal después de la deformación. Debido a que las impurezas debilitan los límites de los granos, esta pieza de metal sería débil y menos dúctil si se probara en la dirección vertical. Una analogía de esto es la madera laminada, que es fuerte a la tensión a lo largo de su dirección planar, pero que se descascara con facilidad (se divide) cuando se somete a tensión en la dirección de su espesor.

1.6 Recuperación, recristalización y crecimiento de grano

Se dijo que la deformación plástica a temperatura ambiente provoca la deformación de los granos y de sus límites, un incremento general de la resistencia y un decremento de la ductilidad; también causa un comportamiento anisotrópico. Estos efectos se pueden revertir (y las propiedades del metal pueden regresar a sus niveles originales) calentando el metal a un rango de temperatura específica por cierto periodo; a este proceso se le llama **recocido** (sección 4.11). El rango de temperatura y la cantidad requerida de tiempo de-

penden del material y de otros factores. Durante el proceso de calentamiento, tres eventos tienen lugar consecutivamente:

1. **Recuperación.** Durante la *recuperación*, que ocurre a cierto rango de temperatura debajo de la temperatura de recrystalización del metal, se relevan los esfuerzos en las regiones altamente deformadas. Se comienzan a formar límites de subgranos (a este proceso se le llama **poligonización**) sin un cambio significativo en las propiedades mecánicas, como la dureza y la resistencia (figura 1.14).

2. **Recrystalización.** Al proceso en el cual (dentro de un cierto rango de temperatura) se forman granos equiaxiales y libres de esfuerzos (que reemplazan a los granos anteriores) se le llama *recrystalización*. La temperatura para recrystalización varía aproximadamente entre 0.3 y 0.5 T_m , donde T_m es el punto de fusión del metal en la escala absoluta.

En general, la temperatura de recrystalización se define como la temperatura a la que ocurre la recrystalización total dentro de aproximadamente una hora. La recrystalización disminuye la densidad de las dislocaciones, reduce la resistencia y eleva la ductilidad del metal (figura 1.14). Plomo, estaño, cadmio y zinc recrystalizan casi a la temperatura ambiente; el resultado es que no se endurecen por trabajo cuando se trabajan en frío.

La recrystalización depende del grado de trabajado en frío previo (endurecimiento por trabajado): cuanto más trabajo en frío haya, menor será la temperatura requerida para que ocurra la recrystalización. La razón es que al aumentar la cantidad de trabajo en frío, el número de dislocaciones y la cantidad de energía almacenada en las mismas (**energía almacenada**) también aumenta. Esta energía proporciona algo del trabajo requerido para la recrystalización. Ésta también es una función del tiempo, porque com-

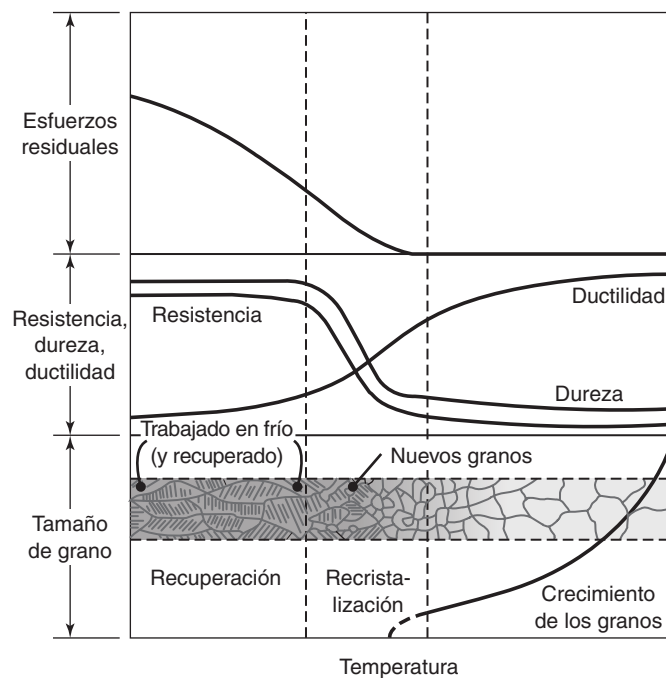


FIGURA 1.14 Esquema de los efectos de la recuperación, recrystalización y crecimiento de los granos en las propiedades mecánicas y en la forma y el tamaño de los granos. Obsérvese la formación de nuevos granos pequeños durante la recrystalización. *Fuente:* G. Sachs.

prende la difusión: el movimiento e intercambio de átomos a través de los límites de los granos.

Los efectos de la temperatura, el tiempo y la deformación plástica por el trabajo en frío sobre la recrystalización son los siguientes:

- Para una cantidad constante de deformación por trabajado en frío, disminuye el tiempo requerido para que la recrystalización ocurra con temperatura creciente.
- Cuanto mayor sea el trabajado previo en frío, menor será la temperatura requerida para recrystalización.
- Cuanto mayor sea el grado de deformación, más pequeño se volverá el tamaño del grano durante la recrystalización. Este efecto es un método común para convertir una estructura de grano grueso en una que tenga un grano más fino, y en consecuencia, propiedades mejoradas.
- Por lo general, la anisotropía debida a la orientación preferencial persiste después de la recrystalización. Para restaurar la isotropía, puede ser necesaria una temperatura más elevada que la requerida para la recrystalización.

3. **Crecimiento del grano.** Si continuamos elevando la temperatura del metal, los granos comienzan a crecer y finalmente su tamaño podría exceder el tamaño original de los granos; a este fenómeno se le llama crecimiento del grano y afecta las propiedades mecánicas (figura 1.14). Los granos grandes producen una apariencia superficial rugosa en las hojas metálicas llamada **piel de naranja** cuando se estiran para formar una parte, o cuando una pieza metálica se somete a compresión (como en el forjado).

1.7 Trabajo en frío, a temperatura media y en caliente

El **trabajo en frío** se refiere a la deformación plástica que (en general, pero no necesariamente) se lleva a cabo a temperatura ambiente. Cuando la deformación se realiza arriba de la temperatura de recrystalización, se le llama **trabajo en caliente**. “En frío” y “en caliente” son términos relativos, como se puede ver en el hecho de que deformar plomo a la temperatura ambiente es un proceso de trabajo en caliente, ya que la temperatura de recrystalización del plomo es aproximadamente la temperatura ambiente. Como su nombre implica, el **trabajo a temperatura media** se efectúa a temperaturas intermedias, por lo que el trabajo a temperatura media es una convención entre el trabajado en frío y el trabajado en caliente.

Los rangos de temperatura para estas tres categorías de deformación plástica se dan en la tabla 1.2 en términos de una relación T/T_m , donde T es la temperatura de trabajo y T_m es la temperatura de fusión del metal, ambos en escala absoluta. Aunque se trata de una cantidad adimensional, a esta relación se le conoce como **temperatura homóloga**. En la parte III se describen las importantes diferencias tecnológicas en los productos que se procesan mediante trabajo en frío, a temperatura media y en caliente.

TABLA 1.2

Rangos de temperatura homóloga para diferentes procesos	
Proceso	T/T_m
Trabajado en frío	<0.3
Trabajado a temperatura media	$0.3 \text{ a } 0.5$
Trabajado en caliente	>0.6

RESUMEN

- Existen tres estructuras cristalinas básicas en los metales: cúbica centrada en el cuerpo (bcc), cúbica centrada en las caras (fcc) y hexagonal compacta (hcp). Los granos formados de estos cristales no son perfectos, porque contienen diferentes defectos e imperfecciones, como dislocaciones, vacantes, impurezas, inclusiones y límites de grano. Los metales policristalinos están compuestos de muchos cristales o granos en orientaciones al azar.
- La deformación plástica en los metales ocurre mediante un mecanismo de desplazamiento. Aunque el esfuerzo teórico cortante requerido para provocar el deslizamiento es muy alto, los esfuerzos reales son mucho menores debido a la presencia de dislocaciones (del tipo de extremo o tornillo). Éstas se obstruyen una a otra o se ven impedidas por barreras como los límites de granos, impurezas e inclusiones. El resultado es que aumenta el esfuerzo al corte requerido para provocar un mayor deslizamiento. En consecuencia, la resistencia total y la dureza del metal también aumentan (endurecimiento por trabajo o endurecimiento por deformación).
- El tamaño del grano tiene un efecto significativo en la resistencia de los metales: cuanto menor sea el tamaño, más fuerte será el metal.
- Los límites de los granos tienen una influencia importante en el comportamiento del metal. Pueden sufrir fragilización, que reduce severamente la ductilidad a temperaturas elevadas (fragilización en caliente); también son responsables del deslizamiento progresivo, que se debe a los límites de los granos.
- Los metales se pueden deformar plásticamente (trabajar) a temperatura ambiente, media o elevada. Su comportamiento y la capacidad para trabajarlos depende en gran medida de si la deformación ocurre abajo o arriba de la temperatura de recristalización. La deformación a temperatura ambiente (trabajado en frío) produce mayor resistencia, pero ductilidad reducida en el metal; en general también causa anisotropía (orientación preferida o fibración mecánica), un estado en el que las propiedades son diferentes en distintas direcciones.
- Los efectos del trabajado en frío se pueden revertir recociendo el metal: calentándolo a cierto rango de temperatura por un periodo y permitiendo después que ocurran procesos sucesivos de recuperación, recristalización y crecimiento de grano.

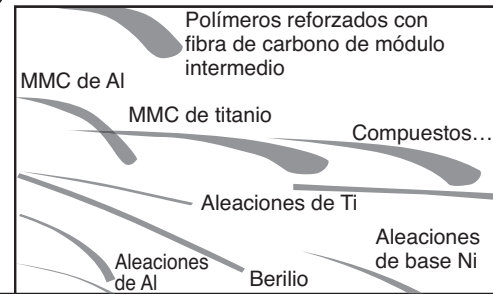
TÉRMINOS CLAVE

Alotropismo	Estructura de red	Poligonización
Anisotropía	Fibración mecánica	Polimorfismo
Banda de deslizamiento	Fragilización	Recristalización
Celda unitaria	Fragilización en caliente	Recuperación
Crecimiento del grano	Granos	Sensible a la estructura
Cristales	Hexagonal compacta	Sistema de deslizamiento
Cúbica centrada en el cuerpo	Insensible a la estructura	Tamaño de grano
Cúbica centrada en las caras	Límites de grano	Temperatura homóloga
Deformación elástica	Maclaje	Termofluencia
Deformación plástica	Orientación preferencial	Trabajado en caliente
Dislocaciones	Piel de naranja	Trabajado en frío
Endurecimiento por deformación	Plano basal	Trabajo a temperatura media
Endurecimiento por trabajado	Plano de deslizamiento	Vacante
Esfuerzo cortante	Policristalinas	

CAPÍTULO

3

Propiedades físicas de los materiales



3.1	Introducción	102
3.2	Densidad	103
3.3	Punto de fusión	106
3.4	Calor específico	106
3.5	Conductividad térmica	107
3.6	Dilatación térmica	107
3.7	Propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas	108
3.8	Resistencia a la corrosión	109

Las propiedades físicas pueden tener una amplia variedad de funciones en el procesamiento, así como también en el uso de los materiales. En este capítulo describimos específicamente:

- Las propiedades térmicas, eléctricas, magnéticas y ópticas, con ejemplos de sus funciones.
- La corrosión y su importancia en la vida útil de los componentes.
- La razón por la que, con frecuencia, la combinación de las propiedades físicas es importante en el procesamiento y uso de los materiales.

EJEMPLO:

3.1	Selección de materiales para monedas	110
-----	--------------------------------------	-----

3.1 | Introducción

¿Por qué los cables eléctricos generalmente son de cobre? ¿Por qué el aluminio, el acero inoxidable y el cobre se utilizan tanto en los artículos de cocina? ¿Por qué sus mangos suelen fabricarse con madera o plástico, mientras que otros mangos están hechos de metal? ¿Qué tipo de material debe elegirse para los elementos calefactores de los tostadores? ¿Por qué en algunas máquinas se están reemplazando componentes metálicos por cerámicos? ¿Por qué los cuerpos metálicos de los aeroplanos están hechos en general de aluminio, y por qué algunos componentes de aviones se reemplazan de modo gradual por los fabricados con materiales compósitos, incluyendo plásticos reforzados?

Resulta evidente en estas preguntas la importancia de las **propiedades físicas** en la selección de materiales (esto es, densidad, punto de fusión, calor específico, conductividad térmica, expansión térmica, propiedades eléctricas y magnéticas, y resistencia a la oxidación y a la corrosión). Combinadas con las propiedades mecánicas, son igualmente importantes las relaciones resistencia a peso y rigidez a peso de los materiales, en particular para las estructuras de aeronaves y aeroespaciales. Equipos como la maquinaria textil y de impresión, además de las máquinas de formado y corte para operaciones de alta velocidad, requieren asimismo componentes ligeros para reducir las fuerzas inerciales y, por lo tanto, evitar la vibración excesiva. En este capítulo se analizan muchos otros ejemplos de la importancia de las propiedades físicas, presentando cada una desde el punto de vista de la selección de materiales y de la manufactura, y su importancia en relación con la vida útil del componente.

3.2 Densidad

La **densidad** de un material es su masa por unidad de volumen. Un término relacionado es la **gravedad específica**, que expresa la densidad de un material en relación con la del agua, y por lo tanto, no tiene unidades. En las tablas 3.1 y 3.2 se muestra el rango de densidades de diversos materiales a temperatura ambiente, junto con otras propiedades.

El ahorro de peso es particularmente importante en las estructuras de aeronaves y aeroespaciales, carrocerías y componentes de automóviles, así como en otros productos donde el consumo de energía y las limitaciones de potencia son factores relevantes. La

TABLA 3.1

Propiedades físicas de diversos materiales a temperatura ambiente					
Material	Densidad (kg/m ³)	Punto de fusión (°C)	Calor específico (J/kg K)	Conductividad térmica (W/m K)	Coefficiente de expansión térmica (μm/m°C)
Metálicos					
Aluminio	2700	660	900	222	23.6
Aleaciones de aluminio	2630–2820	476–654	880–920	121–239	23.0–23.6
Berilio	1854	1278	1884	146	8.5
Columbio (niobio)	8580	2468	272	52	7.1
Cobre	8970	1082	385	393	16.5
Aleaciones de cobre	7470–8940	885–1260	337–435	29–234	16.5–20
Oro	19300	1063	129	317	19.3
Hierro	7860	1537	460	74	11.5
Aceros	6920–9130	1371–1532	448–502	15–52	11.7–17.3
Plomo	11350	327	130	35	29.4
Aleaciones de plomo	8850–11350	182–326	126–188	24–46	27.1–31.1
Magnesio	1745	650	1025	154	26.0
Aleaciones de magnesio	1770–1780	610–621	1046	75–138	26.0
Aleaciones de Molibdeno	10210	2610	276	142	5.1
Níquel	8910	1453	440	92	13.3
Aleaciones de níquel	7750–8850	1110–1454	381–544	12–63	12.7–18.4
Silicio	2330	1423	712	148	7.63
Plata	10500	961	235	429	19.3
Aleaciones de tantalio	16600	2996	142	54	6.5
Titanio	4510	1668	519	17	8.35
Aleaciones de titanio	4430–4700	1549–1649	502–544	8–12	8.1–9.5
Tungsten	19290	3410	138	166	4.5
No metálicos					
Cerámicos	2300–5500	—	750–950	10–17	5.5–13.5
Vidrios	2400–2700	580–1540	500–850	0.6–1.7	4.6–70
Grafito	1900–2200	—	840	5–10	7.86
Plásticos	900–2000	110–330	1000–2000	0.1–0.4	72–200
Madera	400–700	—	2400–2800	0.1–0.4	2–60

TABLA 3.2

Propiedades físicas de materiales, en orden descendente					
Densidad	Punto de fusión	Calor específico	Conductividad térmica	Expansión térmica	Conductividad eléctrica
Platino	Tungsteno	Madera	Plata	Plásticos	Plata
Oro	Tantalio	Berilio	Cobre	Plomo	Cobre
Tungsteno	Molibdeno	Porcelana	Oro	Estaño	Oro
Tantalio	Culombio	Aluminio	Aluminio	Magnesio	Aluminio
Plomo	Titanio	Grafito	Magnesio	Aluminio	Magnesio
Plata	Hierro	Vidrio	Grafito	Cobre	Tungsteno
Molibdeno	Berilio	Titanio	Tungsteno	Acero	Berilio
Cobre	Cobre	Hierro	Berilio	Oro	Acero
Acero	Oro	Cobre	Zinc	Cerámicos	Estaño
Titanio	Plata	Molibdeno	Acero	Vidrio	Grafito
Aluminio	Aluminio	Tungsteno	Tantalio	Tungsteno	Cerámicos
Berilio	Magnesio	Plomo	Cerámicos		Vidrio
Vidrio	Plomo		Titanio		Plásticos
Magnesio	Estaño		Vidrio		Cuarzo
Plásticos	Plásticos		Plásticos		

sustitución de materiales en aras del ahorro de peso y la economía es un factor principal en el diseño de equipo y maquinaria avanzada además de productos de consumo como los automóviles.

La densidad desempeña un papel importante en la **relación resistencia a peso (resistencia específica)** y en la **relación rigidez a peso (rigidez específica)** de materiales y estructuras. En la tabla 3.3 se muestra la relación de esfuerzo máximo a la fluencia (cadencia) con respecto a la densidad de varias aleaciones metálicas. Obsérvese que el titanio y el aluminio están en la parte superior de la lista; en consecuencia, y como se describe en el capítulo 6, se encuentran entre los metales más utilizados para aplicaciones en aeronaves y aeroespaciales.

TABLA 3.3

Relación de esfuerzo máximo a la fluencia con respecto a la densidad de algunos metales	
Aleación	Esfuerzo máximo a la fluencia/ densidad ($\text{pulg} \times 10^3$)
Titanio	1250
Aluminio	800
Aceros	750
Magnesio	675
Níquel	550
Cobre	500
Tantalio	375
Molibdeno	215
Plomo	5

En la figura 3.1 se muestra el rango de resistencia y de rigidez específicas a la temperatura ambiente para varios materiales metálicos y no metálicos. Obsérvense las posiciones de los materiales compósitos, comparadas con las de los metales, en relación con estas propiedades; tales ventajas han hecho que los compósitos se conviertan en uno de los materiales más importantes (ver capítulo 9). La resistencia y la rigidez específicas son factores igualmente importantes a temperaturas elevadas, ya que así funcionan ciertos componentes y sistemas, como los motores de automóvil y de propulsión a chorro y las turbinas de gas. En la figura 3.2 se dan rangos típicos para varios materiales.

La densidad es un factor que debe tomarse en cuenta al seleccionar materiales para equipos de alta velocidad; es el caso del magnesio en la maquinaria para impresión y textil, la cual tiene muchos componentes que suelen operar a velocidades muy altas. Para obtener tiempos de exposición de $1/4000$ s sin sacrificar precisión, los obturadores de algunas cámaras fotográficas de 35 mm de alta calidad se fabrican con titanio. La baja masa de los componentes en estas operaciones de alta velocidad reduce las fuerzas inerciales que de otra manera podrían provocar vibraciones, imprecisiones, e incluso (después de algún tiempo) la falla de las partes. Debido a su baja densidad, los cerámicos (capítulo 8) se utilizan para componentes en máquinas automatizadas de alta velocidad y en las máquinas herramienta. En cambio, existen aplicaciones donde el peso es deseable. Ejemplos de ello son los contrapesos en diversos mecanismos (donde se usa plomo o acero), volantes y componentes de relojes pulsera automáticos que utilizan los efectos de la inercia de una masa cuando se mueve la muñeca (utilizando materiales de alta densidad, como el tungsteno).

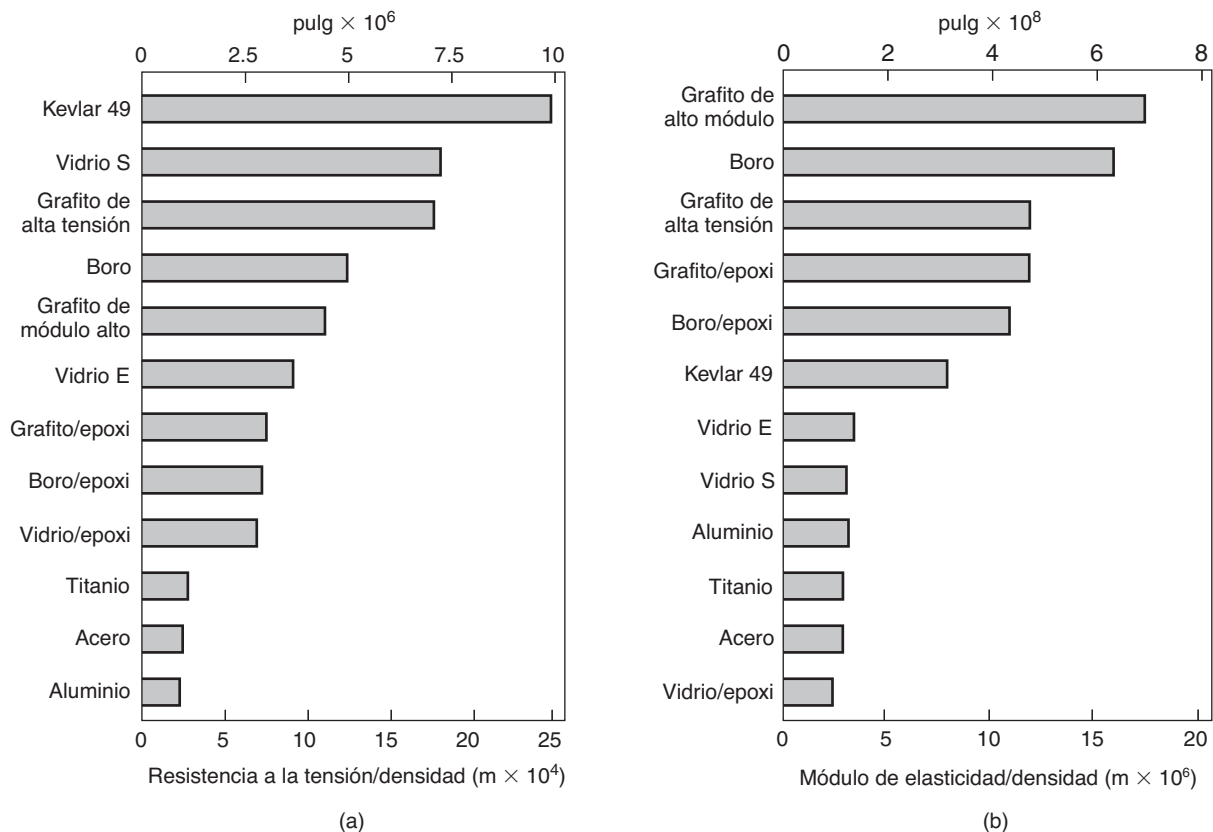


FIGURA 3.1 Resistencia específica (resistencia a la tensión/densidad) y rigidez específica (módulo elástico/densidad) para diversos materiales a temperatura ambiente.

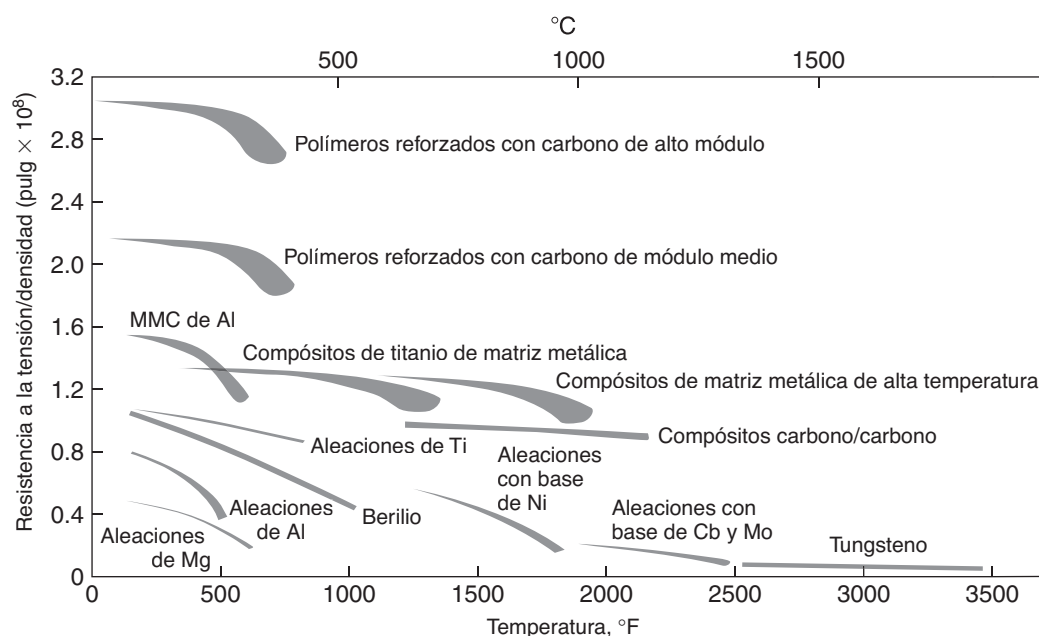


FIGURA 3.2 Resistencia específica (resistencia a la tensión/densidad) para varios materiales en función de la temperatura. Obsérvese el rango de temperatura útil para estos materiales y los altos valores de los materiales compósitos.

3.3 Punto de fusión

El **punto de fusión** de un metal depende de la energía requerida para separar sus átomos. Como se muestra en la tabla 3.1, la temperatura de fusión de una aleación metálica puede tener un amplio rango (según su composición) y es diferente de la del metal puro, que tiene un punto definido de fusión. El rango de temperatura dentro del cual un componente o una estructura se diseña para funcionar es un factor que debe considerarse en la selección de materiales. Por ejemplo, los plásticos tienen el rango útil de temperatura más bajo, mientras que el grafito y las aleaciones de metales refractarios poseen el rango útil más elevado.

El punto de fusión de un metal tiene varios efectos indirectos en las operaciones de manufactura. Debido a que la temperatura de recristalización de un metal se relaciona con su punto de fusión (sección 1.6), operaciones como el recocido, el tratamiento térmico y el trabajo en caliente (parte III) requieren el conocimiento de los puntos de fusión de los materiales involucrados. Estos factores también son importantes en la selección de materiales para herramientas y matrices. Otra influencia básica del punto de fusión se da al elegir el equipo y la práctica de fusión empleados en las operaciones de fundición (parte II). Cuanto mayor sea el punto de fusión del material, más difícil resultará la operación. En el proceso de maquinado por descarga eléctrica (sección 27.5), los puntos de fusión de los metales se relacionan con la velocidad de remoción de material y con el desgaste del electrodo.

3.4 Calor específico

El **calor específico** de un material es la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de la unidad de masa. Los elementos de aleación tienen un efecto relativamente

menor en el calor específico de los metales. La elevación de la temperatura en una pieza de trabajo, resultante de las operaciones de formado o de maquinado (partes III y IV, respectivamente), es una función del trabajo realizado y del calor específico del material de dicha pieza (sección 2.12). Si la elevación es excesiva, puede disminuir la calidad del producto, afectando adversamente su acabado superficial y su precisión dimensional; provocar desgaste excesivo de las herramientas y matrices, así como cambios metalúrgicos indeseables en el material.

3.5 Conductividad térmica

La **conductividad térmica** indica la velocidad a la que fluye el calor dentro y a través de un material. Los materiales unidos por enlaces metálicos (metales) poseen en general alta conductividad térmica, mientras que los materiales unidos por enlaces iónicos o covalentes (cerámicos y plásticos) tienen una conductividad pobre (tabla 3.2). Debido a la gran diferencia de sus conductividades térmicas internas, es posible que los elementos de aleación tengan un efecto significativo en la conductividad térmica de las aleaciones, como se puede ver al comparar los metales con sus aleaciones en la tabla 3.1.

Cuando el calor se genera por deformación plástica o fricción, debe retirársele a una velocidad lo suficientemente alta para evitar una severa elevación de la temperatura. Por ejemplo, la principal dificultad que se experimenta al maquinar titanio se debe a su muy baja conductividad térmica. Esto último también puede provocar altos gradientes térmicos y, de esta manera, causar deformación no homogénea de las piezas en los procesos de trabajo de los metales.

3.6 Dilatación térmica

La **dilatación térmica** de los materiales puede tener varios efectos significativos, particularmente la expansión o contracción relativa de diferentes materiales en ensambles como los componentes electrónicos y de computadoras, sellos vidrio-metal, soportes en motores de propulsión y partes móviles en maquinaria que exige ciertos espacios para funcionar apropiadamente. Por ejemplo, el uso de componentes cerámicos en motores de hierro fundido también requiere tomar en cuenta sus dilataciones térmicas relativas. Los coeficientes típicos de dilatación térmica son del orden de 10×10^{-6} por $^{\circ}\text{C}$ para los aceros, 24×10^{-6} por $^{\circ}\text{C}$ para el aluminio, y más de 200×10^{-6} por $^{\circ}\text{C}$ para los termoplásticos. (Ver también *Invar* posteriormente en esta sección). En general, el coeficiente de dilatación térmica es inversamente proporcional al punto de fusión del material. Los elementos de aleación tienen un efecto menor en la dilatación térmica de los metales.

Los *ajustes por contracción* utilizan la dilatación térmica y la contracción. Por ejemplo, en una flecha se va a instalar una parte, como una brida o un brazo de palanca con un orificio dentro. Primero se calienta y luego se desliza sobre una flecha o husillo que se encuentra a la temperatura ambiente. Cuando se le deja enfriar, la parte se contrae y el ensamble se convierte efectivamente en un componente integral. La dilatación térmica, junto con la conductividad térmica, desempeña el papel más importante en la generación de **esfuerzos térmicos** (debido a los *gradientes de temperatura*) en los componentes manufacturados, en herramientas y matrices, y en los moldes para operaciones de fundición. Esto es importante, por ejemplo, en una operación de forja, durante la cual las piezas de trabajado en caliente se colocan de manera repetida sobre una matriz relativamente fría, cuyas superficies las someten así a ciclos térmicos. Para reducir los esfuerzos térmicos, es deseable una combinación de alta conductividad térmica y baja dilatación térmica. Dichos esfuerzos también pueden ser provocados por la **anisotropía de la dilatación térmica** (esto es, el material se expande de manera diferente en distintas direcciones), que se observa generalmente en los metales hexagonales compactos, los cerámicos y los materiales compósitos.

La dilatación térmica y la contracción pueden llevar al agrietamiento, alabeo o aflojamiento de los componentes en la estructura durante su vida útil, y ocasionar el agrietamiento de partes cerámicas, herramientas y matrices fabricadas con materiales relativamente frágiles. La **fatiga térmica** es el resultado de los ciclos térmicos y causa varias grietas superficiales, sobre todo en herramientas y matrices para fundición y en operaciones de trabajo de los metales (*agrietamiento por calor*). El **choque térmico** es el término usado en general para describir el desarrollo de grietas después de un solo ciclo térmico.

Para remediar algunos de los problemas causados por la dilatación térmica, se ha desarrollado una familia de aleaciones hierro-níquel con muy bajos coeficientes de dilatación denominadas **aleaciones de baja dilatación**. Con frecuencia, a esa característica se le conoce como **efecto Invar** (debido al metal *Invar*). El coeficiente térmico de dilatación en general se encuentra entre 2×10^{-6} y 9×10^{-6} por °C. Las composiciones típicas son 64% de Fe-36% de Ni para el Invar y 54% de Fe-28% de Ni-18% de Co para el *Kovar*. Estas aleaciones también tienen buena resistencia a la fatiga térmica y buena ductilidad. El resultado es que se les pueden dar diferentes formas con facilidad. Las aplicaciones incluyen (a) tiras bimetálicas, que constan de una aleación de baja dilatación unida metalúrgicamente a una aleación de alta dilatación (la tira se dobla cuando se somete a cambios de temperatura), y (b) sellos vidrio-metal de alta calidad, donde se hacen coincidir las dilataciones térmicas.

3.7 | Propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas

La **conductividad eléctrica** y las propiedades *dieléctricas* de los materiales son importantes no sólo en el equipo y la maquinaria eléctrica, sino también en procesos de manufactura como el formado de láminas metálicas por pulso magnético (sección 16.11), el maquinado por descarga eléctrica y la rectificación electroquímica de materiales duros y frágiles (capítulo 27). Las unidades de conductividad eléctrica son mho/m o mho/ft, donde *mho* es el inverso de *ohm*, la unidad de resistencia eléctrica. La influencia del tipo de unión atómica en la conductividad eléctrica de los materiales es la misma que para la conductividad térmica. Los elementos de aleación tienen un efecto importante en la conductividad eléctrica de los metales. Cuanto mayor sea la conductividad del elemento de aleación, mayor será la conductividad eléctrica de la aleación.

Resistencia dieléctrica. La *resistencia dieléctrica* de un material es su resistividad a la corriente eléctrica directa. Esta propiedad se define como el voltaje requerido por unidad de distancia para que ocurra una descarga eléctrica, y tiene las unidades V/m o V/ft.

Conductores. Los materiales con alta conductividad eléctrica, como los metales, generalmente se conocen como *conductores*. La **resistividad eléctrica** es el inverso de la conductividad eléctrica. A los materiales con alta resistividad eléctrica se les conoce como *dieléctricos* o *aislantes*.

Superconductores. La *superconductividad* es el fenómeno de resistividad eléctrica cercana a cero que ocurre en algunos metales y aleaciones debajo de una temperatura crítica. Con frecuencia, las temperaturas involucradas se encuentran cerca del cero absoluto (0 K, -273 °C o -460 °F). La temperatura más alta a la que se ha exhibido la superconductividad es de 150 K (-123 °C, -190 °F), pero continúan lográndose avances en la superconductividad a alta temperatura. Estos desarrollos indican que la eficiencia de tales componentes eléctricos, como grandes magnetos de alta potencia, líneas de potencia de alto voltaje, y componentes electrónicos y para computadoras, se puede mejorar notoriamente.

Semiconductores. Las propiedades eléctricas de los *semiconductores* (como el silicio monocristalino, germanio y arseniuro de galio) son muy sensibles a la temperatura y a la presencia y el tipo de impurezas minúsculas. Por lo tanto, si se controlan la concentración y el tipo de impurezas (**dopantes**), como el fósforo y el boro en el silicio, se puede controlar la conductividad eléctrica. Esta propiedad se emplea en los dispositivos semiconductores (de estado sólido) utilizados ampliamente en los circuitos electrónicos miniaturizados (capítulo 28). Son muy compactos, muy eficientes y relativamente económicos; además, consumen poca potencia y no requieren tiempo de calentamiento para funcionar.

Ferromagnetismo y ferrimagnetismo. El *ferromagnetismo* es un fenómeno caracterizado por la alta permeabilidad y magnetización permanente debidas a la alineación de los átomos de hierro, níquel y cobalto en dominios. Es importante en aplicaciones como motores, generadores y transformadores eléctricos y en dispositivos de microondas. El *ferrimagnetismo* es una gran magnetización permanente que exhiben algunos materiales cerámicos, como las ferritas cúbicas.

Efecto piezoeléctrico. El *efecto piezoeléctrico* (del griego *piezo*, que significa “oprimir”) aparece en algunos materiales, como los cristales de cuarzo y algunos cerámicos, donde existe una interacción reversible entre una deformación elástica y un campo eléctrico. Esta propiedad se utiliza para fabricar transductores, dispositivos que convierten la deformación de una fuerza externa en energía eléctrica. Las aplicaciones típicas son transductores de fuerza o de presión, calibradores de deformación, sensores (detectores), detectores de sonar y micrófonos.

Magnetostricción. Al fenómeno de expansión o contracción de un material cuando se somete a un campo magnético se le llama *magnetostricción*. Materiales como el níquel puro y algunas aleaciones hierro-níquel muestran este comportamiento. La magnetostricción es el principio en que se basa el equipo de maquinado ultrasónico (sección 26.6).

Propiedades ópticas. Entre otras propiedades, el color y la opacidad son importantes, particularmente en los polímeros y vidrios. Ambas se describen en las secciones 7.2.2 y 8.4.3, respectivamente.

3.8 Resistencia a la corrosión

Todos los metales, cerámicos y plásticos están sujetos a formas de corrosión. La propia palabra **corrosión** se refiere usualmente al deterioro de los metales y los cerámicos, en tanto que fenómenos similares en los plásticos suelen denominarse **degradación**. La corrosión no sólo lleva al deterioro de la superficie de los componentes y estructuras (puentes y embarcaciones), sino que también reduce su resistencia e integridad estructural. El costo directo de la corrosión sólo en Estados Unidos se ha estimado en 275 mil millones de dólares anuales, que son aproximadamente 3% del producto interno bruto. Los costos indirectos de la corrosión se estiman en el doble de esta cantidad.

La *resistencia a la corrosión* es un aspecto importante en la selección de materiales para las industrias química, alimentaria y del petróleo, así como en las operaciones de manufactura. Además de las posibles reacciones químicas de los elementos y compuestos presentes, causan inquietud la oxidación del medio ambiente y la corrosión de los componentes de las estructuras, sobre todo a temperaturas elevadas, y en automóviles y otros vehículos de transporte.

La resistencia a la corrosión depende de la composición del material y del medio ambiente en particular. Los medios corrosivos pueden ser productos químicos (ácidos, álcalis y sales), el entorno (oxígeno, humedad, contaminación y lluvia ácida) y el agua (dulce o salada). En general, los metales no ferrosos, los aceros inoxidable y los materiales no metálicos tienen una alta resistencia a la corrosión, en tanto que los aceros y los

hierros fundidos suelen tener una resistencia pobre y deben protegerse mediante diversos recubrimientos y tratamientos superficiales.

La corrosión puede ocurrir en toda una superficie o ser *localizada*: lo que se llama **picadura**. (La picadura es un término que también se aplica al desgaste por fatiga o a la falla de los engranes o en el forjado; ver sección 31.5). La corrosión también puede ocurrir a lo largo de los límites de grano de los metales, como la **corrosión intergranular**, y en la interfaz de uniones atornilladas o remachadas como la **corrosión por grietas o fisuras**.

Dos metales diferentes pueden formar una **celda galvánica** (llamada así en honor de L. Galvani, 1737-1798) —esto es, dos electrodos en un electrolito, dentro de un ambiente corrosivo, incluyendo humedad—, y provocar **corrosión galvánica**. Las aleaciones de dos fases (capítulo 4) son más susceptibles a la corrosión galvánica (debido a la separación física de los dos metales involucrados) que las aleaciones de una sola fase o los metales puros; el resultado es que el tratamiento térmico puede tener una influencia significativa en la resistencia a la corrosión.

El **agrietamiento por esfuerzo-corrosión** (sección 2.10.2) es un ejemplo del efecto de un ambiente corrosivo en la integridad de un producto que, al ser manufacturado, tiene esfuerzos residuales en él. Igualmente, los metales trabajados en frío son propensos a tener dichos esfuerzos, de ahí que sean más susceptibles a la corrosión que los metales trabajados en caliente o recocidos.

Los materiales para herramientas y matrices también pueden ser susceptibles al ataque químico de lubricantes y refrigerantes; la reacción química altera su acabado superficial e influye adversamente en la operación del metal. Ejemplos de ello son las herramientas de carburo y las matrices que tienen cobalto como aglutinante (sección 22.4), en las que el cobalto es atacado por los elementos en los fluidos de trabajo de los metales (**lixiviación selectiva**). Así, la compatibilidad de los materiales de la herramienta, la matriz y la pieza con el fluido de trabajo del metal en las condiciones reales de operación constituye un factor que debe considerarse al seleccionar materiales.

No sólo las reacciones químicas deben considerarse productoras de efectos adversos. Los procesos de maquinado avanzado, como el maquinado químico y electroquímico, se basan de hecho en reacciones controladas. Estos procesos pueden retirar material mediante la acción química, de manera semejante al ataque químico de muestras metalúrgicas. La utilidad de cierto nivel de **oxidación** se muestra en la resistencia a la corrosión del aluminio, el titanio y el acero inoxidable. El aluminio desarrolla una película de óxido duro de aluminio (Al_2O_3) delgada (a veces de unas cuantas capas atómicas), fuerte y adherente, que protege mejor la superficie de la corrosión ambiental. El titanio desarrolla una película de óxido de titanio (TiO_2). Un fenómeno similar ocurre en los aceros inoxidables, los cuales (debido al cromo presente en la aleación) desarrollan una película protectora sobre su superficie. A estos procesos se les conoce como **pasivación**. Cuando se raya la película protectora y se expone la superficie que se encuentra debajo, comienza a formarse una nueva película de óxido.

EJEMPLO 3.1 Selección de materiales para monedas

Existen cinco criterios generales en la selección de materiales para monedas.

1. Los *factores subjetivos* incluyen la *apariciencia* de la moneda: su color, peso y tintineo (el sonido que hacen cuando se golpean). En este criterio también se incluye la *sensación* de la moneda. Es difícil describir este término porque combina muchos factores humanos. Tiene un efecto similar a la sensación que provoca una pieza fina de madera, la piedra pulida o el cuero fino.
2. *Vida esperada de la moneda*; su duración refleja la resistencia a la corrosión y al desgaste mientras se encuentra en circulación. Estos dos factores determinan básicamente la posibilidad de que la superficie impresa de la moneda permanezca identificable y su capacidad para retener el lustre original.

3. La *manufactura de la moneda* incluye factores como la capacidad de formado de los materiales considerados, la vida de las matrices (o dados) utilizadas en la acuñación (sección 14.4) y la capacidad de los materiales y procesos para evitar la falsificación.
4. *Idoneidad de la moneda para ser utilizada* en dispositivos como las máquinas expendedoras, torniquetes y teléfonos públicos. Estas máquinas están equipadas generalmente con dispositivos de detección que prueban las monedas: primero, el diámetro apropiado, espesor y condiciones superficiales; y segundo, su conductividad eléctrica y densidad. Si la moneda falla en estas pruebas, se rechaza.
5. Las consideraciones finales son el *costo* de las materias primas, su procesamiento y si existe un *suministro* suficiente de los materiales para las monedas.

RESUMEN

- Las propiedades físicas y químicas influyen de manera importante en la selección de materiales, en la manufactura y en la vida útil de los componentes. Estas propiedades y otras características materiales también deben ser consideradas debido a sus efectos en el diseño del producto, requisitos de servicio y compatibilidad con otros materiales, incluyendo herramientas, matrices y piezas de trabajo.
- La conductividad y la expansión térmicas son factores importantes en el desarrollo de los esfuerzos térmicos y de la fatiga y en choques térmicos, efectos esenciales en la vida de las herramientas y matrices durante las operaciones de manufactura. Las aleaciones de baja expansión (como el Invar y el Kovar) tienen aplicaciones únicas.
- Las propiedades eléctricas y químicas son importantes en muchos procesos de maquinado avanzado, como el maquinado por descarga eléctrica, químico y electroquímico.
- Las reacciones químicas, incluyendo la oxidación y la corrosión, deben considerarse al seleccionar materiales, diseño y manufactura, así como la vida útil de los componentes. La pasivación y el agrietamiento por esfuerzo de corrosión son dos fenómenos significativos.
- Algunas propiedades físicas se utilizan en los procesos de manufactura y en su control, como el efecto de la magnetostricción (para el maquinado ultrasónico de metales y materiales no metálicos) y el efecto piezoeléctrico (para transductores de fuerza y otros diversos detectores).

TÉRMINOS CLAVE

Agrietamiento por calor
 Agrietamiento por esfuerzo de corrosión
 Calor específico
 Conductividad eléctrica
 Conductividad térmica
 Corrosión
 Corrosión galvánica
 Degradación
 Densidad

Dieléctricos
 Dilatación térmica
 Efecto Invar
 Efecto piezoeléctrico
 Esfuerzos térmicos
 Ferromagnetismo
 Lixiviación selectiva
 Magnetostricción
 Oxidación
 Pasivación

Punto de fusión
 Resistencia específica
 Resistividad eléctrica
 Rigidez específica
 Semiconductores
 Superconductividad