

Aleaciones no ferrosas

¿Alguna vez se preguntó...

- ...en la historia de la humanidad, ¿qué fue primero, el cobre o el acero?
- ...por qué la Estatua de la Libertad tiene una pátina verde?
- ...qué materiales se utilizan para manufacturar implantes biomédicos para las prótesis de cadera?
- ...sería posible la fabricación de automóviles de aluminio?
- ...qué combustible sólido alimenta a los auxiliares de propulsión a reacción del transbordador espacial a una velocidad cercana a los 5000 km por hora?
- ...qué materiales se utilizan como "catalizadores" en el convertidor catalítico de los automóviles? ¿Qué es lo que "convierten" estos catalizadores?

Las aleaciones no ferrosas (es decir, aleaciones de elementos distintos al hierro) incluyen, pero no están limitados a, aleaciones base aluminio, cobre, níquel, cobalto, zinc, metales preciosos (como Pt, Au, Ag, Pd) y otros metales (por ejemplo, Nb, Ta, W). En este capítulo exploraremos someramente las propiedades y aplicaciones de las aleaciones de Cu, Al y Ti en aplicaciones

sujetas a cargas dinámicas. No se analizarán las aplicaciones de índole electrónica, magnética y otras aplicaciones de las aleaciones no ferrosas.

En muchas aplicaciones, el peso es un factor crítico. Con el objeto de relacionar la resistencia de un material con su peso, es decir su **resistencia específica**, se define una relación resistencia a peso:

$$\text{Resistencia específica} = \frac{\text{Resistencia}}{\text{Densidad}} \quad (13-1)$$

La tabla 13-1 compara la resistencia específica del acero, de algunas aleaciones no ferrosas de alta resistencia y de materiales compuestos de matriz polimérica. Otro factor que debe tomarse en cuenta en el diseño de metales no ferrosos es su costo, el cual varía de manera considerable. La tabla 13-1 incluye el precio aproximado de diferentes materiales; sin embargo, es necesario tomar en cuenta que el precio del material es sólo una pequeña porción del costo del componente. A menudo la fabricación y el acabado, y ni hablar

de la mercadotecnia y de la distribución, contribuyen mucho más al costo general de una pieza. Los materiales compuestos basados en carbono y otras fibras tienen también ventajas significativas en relación con su resistencia específica. Sin embargo, sus propiedades podrían ser anisotrópicas y la temperatura a la cual pueden ser utilizados es limitada. En la práctica, con el objeto de superar la anisotropía, los materiales compuestos se suelen fabricar con muchas capas. En las diferentes capas se alterna la dirección de las fibras a fin de minimizar la anisotropía en sus propiedades.

TABLA 13-1 ■ Resistencia específica y costo de aleaciones no ferrosas, aceros y materiales compuestos de matriz polimérica

Metal	Densidad		Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia específica (in)	Costo por lb (\$) ^c
	g/cm ³	(lb/in ³)			
Aluminio	2.70	(0.097)	83 000	8.6×10^5	0.60
Berilio	1.85	(0.067)	55 000	8.2×10^5	350.00
Cobre	8.93	(0.322)	150 000	4.7×10^5	0.71
Plomo	11.36	(0.410)	10 000	0.2×10^6	0.45
Magnesio	1.74	(0.063)	65 000	8.7×10^5	1.50
Níquel	8.90	(0.321)	180 000	5.6×10^5	4.10
Titanio	4.51	(0.163)	160 000	9.8×10^5	4.00
Tungsteno	19.25	(0.695)	150 000	2.2×10^5	4.00
Zinc	7.13	(0.257)	75 000	2.9×10^5	0.40
Aceros	7.87	(0.284)	200 000	7.0×10^5	0.10
Aramida/epóxico	1.4	(0.05)	200 000	4.0×10^6	—
(Kevlar, fracción volumétrica de las fibras 0.6, tensión longitudinal)					
Aramida/epóxico	1.4	(0.05)	4 300	0.86×10^4	—
(Kevlar, fracción volumétrica de las fibras 0.6, tensión transversal) ^a					
Vidrio/epóxico	2.1	(0.075)	150 000	2.0×10^6	—
(Fracción volumétrica de las fibras de vidrio-E 0.6, tensión longitudinal) ^b					
Vidrio/epóxico	2.1	(0.075)	7 000	9.3×10^4	—
(Fracción volumétrica de las fibras de vidrio-E 0.6, tensión transversal)					

^a Datos de los materiales compuestos de Harper, C. A., Handbook of Materials Product Design, 3a. ed. 2001: McGraw-Hill. Los materiales compuestos usados como materia prima son relativamente económicos; los materiales compuestos de alto rendimiento son costosos.

^b Las propiedades de los materiales compuestos son muy anisotrópicas. Esto se supera, sin embargo, durante su fabricación.

^c Costo basado en precios promedio para los años 1998 a 2002.

13-1 Aleaciones de aluminio

El aluminio es el tercer elemento más abundante sobre la Tierra (después del oxígeno y del silicio), pero, hasta finales del siglo XIX, era costoso y difícil de producir. El casquete de seis libras instalado en 1884 en la parte superior del monumento a Washington fue uno de los

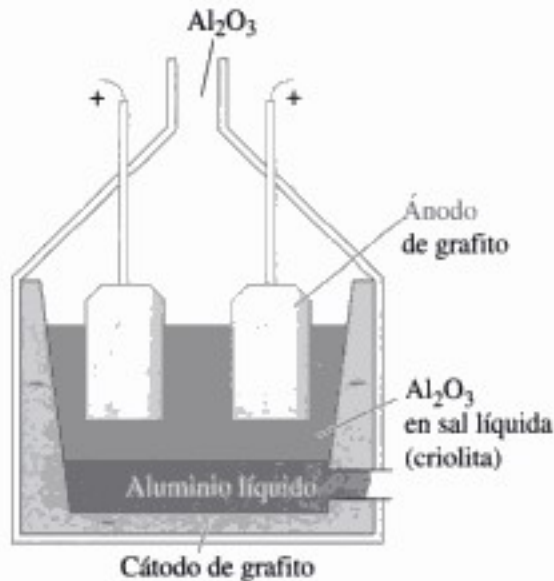
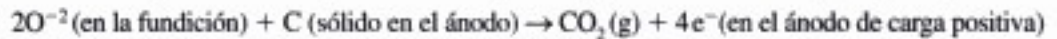


Figura 13-1 Producción del aluminio en una celda electrolítica

componentes de aluminio más grandes fabricados en esas fechas.[2] El desarrollo de la energía eléctrica y el **proceso Hall-Heroult** [3] para la reducción electrolítica de la alúmina (Al_2O_3) a un metal de Al líquido (Fig. 13-1) permitió que el aluminio se convirtiera en uno de los materiales de ingeniería más económicos y extensamente utilizados. En este proceso la alúmina se convierte en un material conocido como criolita fundida (Na_3AlF_6). Entonces en una celda electrolítica ocurren las siguientes reacciones:



En el cátodo se forma aluminio fundido. El ánodo hecho de grafito se consume durante la reacción.

Propiedades generales y usos del aluminio El aluminio tiene una densidad de 2.70 g/cm^3 , es decir, la tercera parte de la densidad del acero, y un módulo de elasticidad de $10 \times 10^6 \text{ psi}$. A pesar de que las aleaciones de aluminio tienen propiedades a la tensión inferiores a las del acero, su resistencia específica (es decir, su relación resistencia a peso) es excelente. Por esta razón, los hermanos Wright utilizaron una aleación Al-Cu en su motor (capítulo 11).[4] El aluminio se puede conformar con facilidad, tiene una elevada conductividad eléctrica y térmica, y a bajas temperaturas no presenta una transición de dúctil a frágil.[5] No es tóxico y se puede reciclar mediante sólo el 5% de la energía que fue necesaria para su fabricación a partir de la alúmina. Ésta es la razón por la cual tiene tanto éxito el reciclaje del aluminio. Las propiedades físicas benéficas del aluminio incluyen un comportamiento no magnético y su resistencia a la oxidación y a la corrosión. Sin embargo, el aluminio no exhibe un límite de resistencia a la fatiga verdadero (capítulo 6), por lo que en algún momento, incluso a esfuerzos reducidos, puede ocurrir la falla debido a la fatiga. Debido a su bajo punto de fusión, el aluminio no funciona bien a temperaturas altas. Además, las aleaciones de aluminio tienen dureza baja y, en consecuencia, su resistencia al desgaste es pobre. El aluminio muestra una buena respuesta a los mecanismos de endurecimiento. La tabla 13-2 compara la resistencia de aluminio puro recocido con la de aleaciones endurecidas mediante varias técnicas. Las aleaciones pueden llegar a ser hasta 30 veces más resistentes que el aluminio puro.

Aproximadamente el 25% del aluminio que se produce hoy día se utiliza en la industria del transporte, otro 25% en la manufactura de latas para bebidas y otros empaques, 15% en la construcción, 15% en aplicaciones eléctricas y 20% en otras aplicaciones.[6] Aproximadamente

TABLA 13-2 ■ Efecto de los mecanismos de endurecimiento en el aluminio y sus aleaciones

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia de cedencia (psi)	% de elongación	Relación de la resistencia de cedencia de la aleación del metal puro
Aluminio puro	6,500	2,500	60	1
Aluminio puro comercial (por lo menos 99% puro)	13,000	5,000	45	2.0
Aleación de aluminio endurecida por solución sólida	16,000	6,000	35	2.4
Aluminio trabajado en frío	24,000	22,000	15	8.8
Aleación de aluminio endurecida por dispersión	42,000	22,000	35	8.8
Aleación de aluminio endurecida por envejecimiento	83,000	73,000	11	29.2

200 lb de aluminio fueron utilizadas en el automóvil promedio fabricado en Estados Unidos en 1996.[1] El aluminio reacciona con el oxígeno, incluso a la temperatura ambiente, para producir una capa de óxido de aluminio extremadamente delgada que protege el metal subyacente contra muchos entornos corrosivos. Sin embargo, es necesario tener cuidado de no generalizar este comportamiento. Por ejemplo, el polvo de aluminio (en razón a su elevada área superficial), cuando está en presencia de un oxidante, como el perclorato de amonio y el óxido de hierro como catalizadores, sirve como combustible sólido para los propulsores auxiliares a reacción (SRB, *solid rocket boosters*). Estos propulsores auxiliares utilizan ~200 000 lb de polvo de aluminio

TABLA 13-3 ■ Designaciones de las aleaciones de aluminio

Aleaciones para forja:		
1xxx ^a	Aluminio comercialmente puro (>99% Al)	No endurecible por envejecimiento
2xxx	Al-Cu y Al-Cu-Li	Endurecible por envejecimiento
3xxx	Al-Mn	No endurecible por envejecimiento
4xxx	Al-Si y Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento si está presente el magnesio
5xxx	Al-Mg	No endurecible por envejecimiento
6xxx	Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento
7xxx	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xxx	Al-Li, Sn, Zr, o B	Endurecible por envejecimiento
9xxx	No utilizado actualmente	
Aleaciones para fundición:		
1xx.x. ^b	Aluminio comercialmente puro	No endurecible por envejecimiento
2xx.x.	Al-Cu	Endurecible por envejecimiento
3xx.x.	Al-Si-Cu o Al-Mg-Si	Algunos son endurecibles por envejecimiento
4xx.x.	Al-Si	No endurecibles por envejecimiento
5xx.x.	Al-Mg	No endurecibles por envejecimiento
7xx.x.	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xx.x.	Al-Sn	Endurecible por envejecimiento
9xx.x.	No utilizado actualmente	

^a El primer dígito muestra el primer elemento de aleación, el segundo se refiere a la modificación y los últimos dos dígitos indican el porcentaje decimal de la concentración de Al (por ejemplo, 1060 será una aleación con 99.6 de Al).

^b El último dígito indica la forma de producto, 1 o 2 es en lingote (dependiendo de la pureza) y cero es para fundición.

atomizado para que el trasbordador espacial alcance una velocidad de cerca de ~3000 millas por hora (aproximadamente 5000 km por hora). Algunos desarrollos nuevos relacionados con el aluminio incluyen el desarrollo de aleaciones de aluminio con concentraciones mayores de Mg para usarlas en la fabricación de automóviles. También hay interés en el desarrollo de procesos que transformen el Al fundido en láminas y otros productos sólidos.

Designación Las aleaciones de aluminio pueden dividirse en dos grupos principales: aleaciones para forja y aleaciones para fundición, dependiendo de su método de fabricación. Las **aleaciones para forja**, a las cuales se les da forma mediante deformación plástica, tienen composiciones y microestructuras significativamente distintas a las aleaciones para fundición, lo que refleja los diferentes requerimientos del proceso de manufactura. Dentro de cada grupo podemos dividir las aleaciones en dos subgrupos: las tratables térmicamente y las no tratables térmicamente.

Las aleaciones de aluminio se designan siguiendo el sistema que aparece en la tabla 13-3. El primer número define los principales elementos de la aleación; los números restantes se refieren a la composición específica de la aleación.

El grado de endurecimiento queda definido mediante la **designación de temple** T o H, dependiendo de que la aleación sea tratada térmicamente o endurecida por deformación (tabla 13-4). Otras designaciones indican si la aleación está recocida (O), tratada por solución (W) o utilizada tal y como fue fabricada (F). Los números que siguen a la T o a la H indican la cantidad de endurecimiento por deformación, el tipo exacto de tratamiento térmico u otros aspectos del procesamiento de la aleación. En la tabla 13-5 aparecen incluidas aleaciones comunes y sus propiedades.

Aleaciones para forja Las aleaciones para forja 1xxx, 3xxx, 5xxx y la mayoría de las 4xxx no son endurecibles por envejecimiento. Las aleaciones 1xxx y 3xxx son monofásicas, a excepción de la presencia de pequeñas cantidades de inclusiones o de compuestos intermetálicos (Fig. 13-2). Sus propiedades son controladas por endurecimiento por deformación,

TABLA 13-4 ■ Designaciones de temple para aleaciones de aluminio

F	Tal y como fue fabricada (trabajo en caliente, forjada, fundida, etc.)
O	Recocida (en el estado más blando posible)
H	Trabajada en frío
	H1x-Sólo trabajada en frío (la x se refiere a la cantidad de trabajo en frío y de endurecimiento).
	H12-Trabajo en frío que da una resistencia a la tensión intermedia entre los temples O y H14.
	H14-Trabajo en frío que da una resistencia a la tensión intermedia entre los temples O y H18.
	H16-Trabajo en frío que da una resistencia a la tensión intermedia entre los temples H14 y H18.
	H18-Trabajo en frío que da una reducción de aproximadamente 75%.
	H19-Trabajo en frío que da una resistencia a la tensión mayor de 2000 psi respecto a la obtenida con el temple H18.
	H2x-Trabajado en frío y parcialmente recocido.
	H3x-Trabajado en frío y estabilizado a una temperatura baja para evitar endurecimiento por envejecimiento de la estructura.
W	Tratada por solución
T	Endurecida por envejecimiento
	T1-Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida naturalmente.
	T2-Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida naturalmente.
	T3-Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida naturalmente.
	T4-Tratada por solución y envejecida naturalmente.
	T5-Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida artificialmente.
	T6-Tratada por solución y envejecida artificialmente.
	T7-Tratada por solución y estabilizada por sobre-envejecimiento.
	T8-Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida artificialmente.
	T9-Tratada por solución, envejecida artificialmente y trabajada en frío.
	T10-Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida artificialmente.

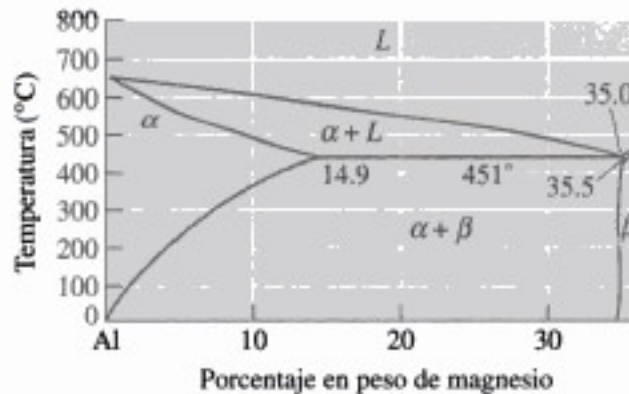


Figura 13-3
Porción del diagrama de fases
aluminio-magnesio.

endurecimiento por solución sólida y control del tamaño del grano. Sin embargo, debido a que a la temperatura ambiente la solubilidad de los elementos de aleación en el aluminio es pequeña, el grado de endurecimiento por solución sólida resulta limitada. Las aleaciones 5xxx contienen dos fases a la temperatura ambiente, α , que es una solución sólida de magnesio en el aluminio y Mg_2Al_3 , un compuesto intermetálico duro y frágil (Fig. 13-3). Las aleaciones aluminio-magnesio se endurecen mediante una dispersión fina del Mg_2Al_3 , así como por endurecimiento por deformación, por solución sólida y por control del tamaño del grano.[5] Sin embargo, debido a que el Mg_2Al_3 no es coherente, no son aplicables los tratamientos térmicos de endurecimiento por envejecimiento. Las aleaciones de la serie 4xxx también contienen dos fases, α y silicio prácticamente puro, β (capítulo 10). Las aleaciones que contienen silicio y magnesio se pueden endurecer por envejecimiento si se permite la precipitación del Mg_2Si . Las aleaciones de las series 2xxx, 6xxx y 7xxx son aleaciones endurecibles por envejecimiento. Aunque para estas aleaciones se obtienen resistencias específicas excelentes, la cantidad de precipitados que se puede formar es limitada. Además, en su condición envejecida no es posible utilizarlas a temperaturas superiores a aproximadamente 175°C. La aleación 2024 es la de más amplio uso en aeronaves.[1] También existe interés en el desarrollo de las aleaciones Al-Li endurecidas por precipitación en razón de su elevado módulo de Young y su baja densidad. Sin embargo, los costos elevados de procesamiento, sus propiedades anisotrópicas y una baja tenacidad a la fractura han resultado factores limitantes. Las aleaciones Al-Li se utilizan para la fabricación de los depósitos de combustible de los transbordadores espaciales.

Aleaciones para fundición Muchas de las aleaciones de aluminio comunes para fundición que aparecen en la tabla 13-5 contienen suficiente silicio para provocar una reacción eutéctica, lo que da bajos puntos de fusión, buena fluidez y una buena colabilidad para fundiciones. La **fluidez** es la capacidad del metal líquido para fluir a través de un molde sin solidificarse de manera prematura, y la **colabilidad** se refiere a la facilidad con la cual se puede lograr una fundición buena a partir de la aleación.

Las propiedades de las aleaciones aluminio-silicio se controlan mediante endurecimiento por solución sólida de la matriz de aluminio α , con endurecimiento por dispersión de la fase β y con la solidificación, lo que controla el tamaño y la forma del grano primario, así como la naturaleza del microconstituyente eutéctico. El enfriamiento rápido que se obtiene en la fundición a presión o en molde permanente (capítulo 8) incrementa la resistencia al refinar el tamaño del grano y del microconstituyente eutéctico (Fig. 13-4). El refinamiento del grano utilizando adiciones de boro y titanio, la modificación mediante el uso de sodio o estroncio para cambiar la estructura eutéctica y el endurecimiento con fósforo para refinar el silicio primario son métodos que, todos ellos, se aplican en ciertas aleaciones para mejorar la microestructura y de esa manera mejorar el grado de endurecimiento por dispersión. Muchas aleaciones contienen también cobre, magnesio o zinc, lo que permite el endurecimiento por envejecimiento. Los siguientes ejemplos ilustran la aplicación de las aleaciones de aluminio.

EJEMPLO 13-4 *Diseño de un proceso de fundición para ruedas*

Diseñe un proceso de fundición para producir ruedas de automóvil que sean de bajo peso y de propiedades consistentes y uniformes.

SOLUCIÓN

Muchas ruedas automotrices se fabrican mediante fundición en molde permanente de la aleación de aluminio 356. En este proceso, el aluminio líquido se introduce en un molde de hierro fundido caliente y se solidifica. A fin de asegurarse de que no se presenten rechupes por contracción se instalan mazarotas. Esto puede requerir que la rueda se diseñe para asegurar buenas características, y no para reducir su peso. La fundición debe además, enfriarse a velocidades muy dispares, lo que produce diferencias en la microestructura, como en los espaciamientos de los brazos dendríticos secundarios y en las propiedades a través de la rueda.

Un proceso alternativo podría ser el **tixovaciado**, en el cual el material se agita durante la solidificación, lo que produce una estructura parcialmente líquida y parcialmente sólida que se comporta como un sólido cuando no se le aplica ninguna fuerza externa y, a pesar de lo anterior, fluye como un líquido bajo presión. Seleccionaríamos una aleación con un rango de solidificación amplio, de manera que una porción importante de este proceso ocurriera por crecimiento de dendritas. Una aleación aluminio-silicio hipoeutéctica puede resultar apropiada. En el proceso de tixovaciado, las dendritas se disgregan por agitación durante la solidificación. Posteriormente, el lingote se vuelve a calentar para causar sólo la fundición de la porción eutéctica de la aleación, y a continuación se introduce a presión en su estado semisólido a una temperatura por debajo de la temperatura liquidus. Cuando la aleación se solidifique de nuevo, la fase primaria de aluminio será uniforme, es decir, con granos redondos (en vez de dendritas) rodeados por una matriz continua de eutéctico. Dado que en el momento de la inyección aproximadamente la mitad de la aleación está ya en estado sólido, la contracción total es pequeña, lo que reduce la posibilidad de defectos internos. Este resultado también disminuye la necesidad de mazarotas, lo que a su vez da mayor libertad para el diseño de la rueda en relación con su función y no en relación con su facilidad de fabricación.

13-2 Aleaciones de magnesio y de berilio

El magnesio, que a menudo se extrae electrolíticamente del cloruro de magnesio concentrado en el agua de mar, es más ligero que el aluminio con una densidad de 1.74 g/cm^3 y se funde a una temperatura ligeramente inferior que el aluminio.[3] En muchos entornos, la resistencia a la corrosión del magnesio se aproxima a la del aluminio; sin embargo, la exposición a ambientes salinos, como los próximos al mar, causa un rápido deterioro. Aunque las aleaciones de magnesio no son tan resistentes como las de aluminio, sus resistencias específicas son comparables. En consecuencia, las aleaciones de magnesio se utilizan en aplicaciones aeroespaciales, en maquinaria de alta velocidad y en equipo de manejo y de transporte de materiales.

Sin embargo, el magnesio tiene un bajo módulo de elasticidad ($6.5 \times 10^6 \text{ psi}$) y una inadecuada resistencia a la fatiga, a la termofluencia y al desgaste. El magnesio también representa un riesgo durante la fundición y el maquinado, ya que se combina con facilidad con el oxígeno y se quema. Finalmente, la respuesta del magnesio a los diferentes mecanismos de endurecimiento es relativamente mala.

TABLA 13-7 ■ *Propiedades de aleaciones de cobre comunes obtenidas mediante diferentes mecanismos de endurecimiento*

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la cedencia (psi)	% de alargamiento	Mecanismo de endurecimiento
Cu puro, recocido	30 300	4 800	60	Ninguno
Cu comercialmente puro, recocido a un tamaño de grano grueso	32 000	10 000	55	Solución sólida
Cu comercialmente puro, recocido a un tamaño de grano fino	34 000	11 000	55	Tamaño de grano
Cu comercialmente puro, trabajado en frío 70%	57 000	53 000	4	Endurecimiento por deformación
Cu-35% Zn recocido	47 000	15 000	62	Solución sólida
Cu-10% Sn recocido	66 000	28 000	68	Solución sólida
Cu-35% Zn trabajado en frío	98 000	63 000	3	Solución sólida + endurecimiento por deformación
Cu-2% Be envejecido	190 000	175 000	4	Endurecimiento por envejecimiento
Cu-Al templado y revenido	110 000	60 000	5	Reacción martensítica
Bronce al manganeso fundido	71 000	28 000	30	Reacción eutectoide

Los cobres con menos de 1% de impurezas se utilizan para aplicaciones eléctricas y microeléctricas. Pequeñas cantidades de cadmio, plata y Al_2O_3 mejoran su dureza sin perjudicar de manera significativa su conductividad. Las aleaciones de cobre monofásicas se endurecen por trabajo en frío. En la tabla 13-7 se muestran ejemplos de este efecto. El cobre FCC tiene una ductilidad excelente y un coeficiente de endurecimiento por deformación alto.

Aleaciones endurecidas por solución sólida Varias aleaciones base cobre contienen grandes cantidades de elementos de aleación y, a pesar de ello, siguen siendo monofásicas. En la figura 13-6 se muestran diagramas de fases binarios de importancia. Las aleaciones de cobre-zinc, base de los **latones**, con menos de 40% Zn forman soluciones sólidas monofásicas de zinc en cobre. Las propiedades mecánicas, incluso el alargamiento, aumentan al incrementarse el contenido de zinc. Estas aleaciones se pueden trabajar en frío para obtener componentes bastante complicados y al mismo tiempo resistentes a la corrosión. Los **bronces** se consideran generalmente como aleaciones de cobre que contienen estaño y que pueden también contener otros elementos. El bronce al manganeso es una aleación de resistencia particularmente alta que contiene manganeso así como zinc para su endurecimiento por solución sólida.

Los bronce al estaño, a menudo conocidos como bronce fosforados, pueden contener hasta un 10% Sn y son monofásicos. El diagrama de fases predice que la aleación contendrá el compuesto Cu_3Sn (ϵ). Sin embargo, la cinética de la reacción es tan lenta que podría no formarse el precipitado.

Las aleaciones que contienen menos de aproximadamente 9% Al o menos de 3% Si también son monofásicas. Estos bronce al aluminio y al silicio tienen buenas características de formado y a menudo se les escoge por su buena resistencia y excelente tenacidad.

Aleaciones endurecibles por envejecimiento Varias aleaciones base cobre exhiben respuesta al endurecimiento por envejecimiento, incluyendo el cobre-zirconio, el cobre-cromo y el cobre-berilio. Las aleaciones de cobre-berilio se utilizan debido a su alta resistencia, elevada rigidez (lo que las hace útiles como resortes y alambres delgados), y sus características de no producir chispas (lo que permite su uso para herramientas que se utilizarán cerca de gases y líquidos inflamables).

13-4 Aleaciones de níquel y de cobalto

Las aleaciones de níquel y cobalto se utilizan tanto para la protección contra la corrosión como para obtener resistencia a alta temperatura, al aprovechar sus elevados puntos de fusión y sus altas resistencias. El níquel es FCC y tiene buena formabilidad; el cobalto es un metal alotrópico, con una estructura FCC por encima de 417°C y una estructura HC a temperaturas inferiores. Para obtener una resistencia excepcional al desgaste y gracias a su resistencia a los fluidos corporales humanos, se utilizan aleaciones especiales de cobalto para la fabricación de prótesis. La tabla 13-8 muestra una lista de aleaciones comunes y sus aplicaciones.

TABLA 13-8 ■ Composiciones, propiedades y aplicaciones de aleaciones de níquel y de cobalto seleccionadas

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la cedencia (psi)	% de alargamiento	Mecanismo de endurecimiento	Aplicaciones
Ni puro (99.9% Ni)	50 000 96 000	16 000 90 000	45 4	Recocido Trabajado en frío	Resistencia a la corrosión Resistencia a la corrosión
Aleaciones Ni-Cu:					
Monel 400 (Ni-31.5% Cu)	78 000	39 000	37	Recocido	Válvulas, bombas, intercambiadores de calor
Monel K-500 (Ni-29.5% Cu-2.7% Al-0.6% Ti)	150 000	110 000	30	Envejecido	Flechas, resortes, impulsores
Superalaciones Ni:					
Inconel 600 (Ni-15.5% Cr-8% Fe)	90 000	29 000	49	Carburos	Equipos de tratamiento térmico
Hastelloy B-2 (Ni-28% Mo)	130 000	60 000	61	Carburos	Resistencia a la corrosión
DS-Ni (Ni-2% ThO ₂)	71 000	48 000	14	Dispersión	Turbinas de gas
Superalaciones Fe-Ni:					
Incoloy 800 (Ni-46% Fe-21% Cr)	89 000	41 000	37	Carburos	Intercambiadores de calor
Superalaciones Co:					
Estelita 6B (60% Co-30% Cr-4.5% W)	177 000	103 000	4	Carburos	Resistencia al desgaste abrasivo

En el capítulo 8, vimos la velocidad con que se pueden formar los polvos solidificados de superaleaciones basadas en níquel y cobalto, usando atomización por rociado seguido por una compresión isostática caliente. Estos materiales se utilizan para fabricar los núcleos que sujetan los álabes de las turbinas, así como los álabes de turbina utilizadas por los motores de las aeronaves.[9] En el capítulo 9 vimos aplicaciones de aleaciones con memoria de forma basadas en Ni-Ti.[10] El hierro, el níquel y el cobalto son magnéticos. Ciertas aleaciones basadas en Fe-Ni y Fe-Co forman materiales magnéticos de muy buena calidad (capítulo 9).[11,12] Una aleación de Ni-36% Fe (Invar) presenta una dilatación prácticamente nula durante su calentamiento; este efecto se aprovecha en la producción de materiales compuestos bimetálicos. El cobalto es utilizado en herramientas de corte WC-Co.

Níquel y moneles El níquel y sus aleaciones tienen una excelente resistencia a la corrosión y buenas características de formado. Cuando se le agrega cobre al níquel, se obtiene la resistencia máxima cerca de 60% Ni. Varias aleaciones, conocidas como moneles, que tienen aproximadamente esta composición se utilizan en agua salada y a temperaturas elevadas por su fuerza y su resistencia a la corrosión. Algunos de los moneles contienen pequeñas cantidades de aluminio y titanio. Estas aleaciones son susceptibles al endurecimiento por envejecimiento gracias a la precipitación de γ' , un precipitado coherente de Ni₃Al o Ni₃Ti que prácticamente

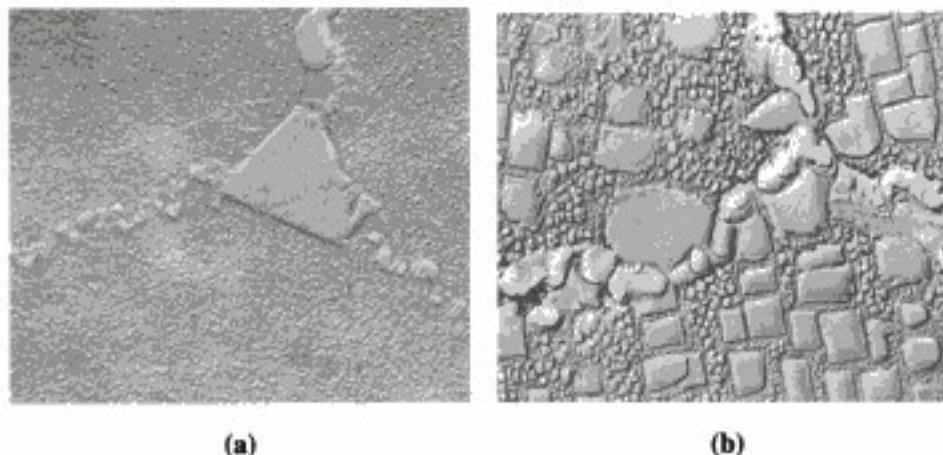


Figura 13-8 (a) Microestructura de una superaleación, con carburos en los límites de grano y precipitados γ' en la matriz (15 000 $\times$). (b) Microestructura de una superaleación envejecida a dos temperaturas que produce a la vez precipitados γ' cúbicos grandes y pequeños (10 000 $\times$). (ASM Handbook, vol. 9, *Metallography y Microstructure* (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073).

superficial y minimiza el sobre-envejecimiento de las aleaciones, dando una buena resistencia mecánica a la termofluencia incluso a altas temperaturas.

Al variar la temperatura de envejecimiento se pueden producir precipitados de varios tamaños. Los precipitados pequeños, que se forman a temperaturas de envejecimiento bajas, pueden crecer entre los precipitados más grandes producidos a temperaturas más altas, incrementando así el porcentaje volumétrico de γ' y, por lo mismo, incrementando la resistencia [Fig. 13-8(b)].

El uso a alta temperatura de las superaleaciones puede mejorarse si se utiliza un recubrimiento o un material cerámico. Un método para ello es recubrir primero la superaleación con una capa de adhesión metálica compuesta de una aleación compleja NiCoCrAlY, y después aplicar un recubrimiento exterior, que actúe como barrera térmica, hecho de un material cerámico ZrO_2 estabilizado (Fig. 5-5). Este recubrimiento ayuda a reducir la oxidación de la superaleación y permite que los motores a reacción operen a temperaturas más altas con mayor eficiencia. El siguiente ejemplo muestra la aplicación de una superaleación base níquel.

EJEMPLO 13-7

Diseño y selección de materiales para los álabes de la turbina de un motor de propulsión a chorro de alto rendimiento

Diseñe una superaleación base níquel a fin de producir los álabes de una turbina de gas para un motor de avión que tengan un tiempo de ruptura por termofluencia particularmente largo a temperaturas cercanas a 1100 °C.

SOLUCIÓN

En primer término es necesario tener una microestructura muy estable. La adición de aluminio o titanio permite la precipitación de hasta un 60% en volumen de la fase γ' durante el tratamiento térmico y podría permitir que la aleación opere a temperaturas que se acercan a 0.85 veces la temperatura de fusión absoluta. La adición de carbono y elementos de aleación, tales como el Ta y el Hf, permite la precipitación de carburos aleados que impiden que los límites de grano se deslicen a altas temperaturas. Otros elementos de aleación, incluyendo el molibdeno y el tungsteno, permiten el endurecimiento por solución sólida.

A continuación se dará un tratamiento térmico a la fundición para asegurar que los carburos y γ' se precipiten con el tamaño y la distribución correctas. Se podrían utilizar temperaturas de envejecimiento múltiples, a fin de lograr la formación del mayor volumen porcentual de γ' posible.

Finalmente, el álabe podría contener varios pequeños canales de enfriamiento a todo su largo. El aire de la combustión del motor puede pasar por estos canales, proporcionando un enfriamiento activo al aspa, antes de reaccionar con el combustible en la cámara de combustión. La figura 13-9 muestra la mejoría que se puede obtener en el rendimiento utilizando estos métodos de diseño.

13-5

Aleaciones de titanio

El titanio se produce partiendo del TiO_2 utilizando el proceso Kroll. El TiO_2 se convierte en TiCl_4 (tetracloruro de titanio, también conocido de manera informal como "ticle"), que después es reducido a titanio por medio de sodio o magnesio. A continuación, el titanio esponja resultante se consolida, se alea según se necesite y se procesa utilizando fundición de arco eléctrico al vacío. Recientemente, se ha informado de un nuevo proceso para la producción de titanio esponja directamente a partir del TiO_2 . [13] El titanio ofrece una excelente resistencia a la corrosión, una elevada resistencia específica y buenas propiedades a altas temperaturas. Resistencias de hasta 200 000 psi, junto con una densidad de 4.505 g/cm³, aportan excelentes propiedades mecánicas. Una película protectora adherente de TiO_2 proporciona una importante resistencia a la corrosión y a la contaminación por debajo de 535 °C. Por encima de esta temperatura, la película de óxido se desintegra y pequeños átomos como los del carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno fragilizan el titanio.

La excelente resistencia a la corrosión del titanio permite aplicaciones en equipo de procesamiento químico, componentes marinos e implantes biomédicos tales como las prótesis de cadera. El titanio es un material aeroespacial importante que encuentra aplicación en fuselajes y componentes del motor a reacción. Cuando se le combina con niobio, se forma un compuesto intermetálico superconductor; cuando se le combina con aluminio, se produce una nueva clase de aleaciones intermetálicas, como se vio en el capítulo 10. Las aleaciones de titanio se utilizan en equipo deportivo, como en las masas de los palos de golf.

El titanio es alotrópico con una estructura cristalina HC (α) a bajas temperaturas y con una estructura BCC (β) por encima de 882 °C. Los elementos de aleación le aportan endurecimiento por solución sólida y modifican su temperatura de transformación alotrópica. Los elementos de aleación se pueden dividir en cuatro grupos (Fig. 13-10). Adiciones tales como estaño y zirconio proporcionan endurecimiento por solución sólida sin afectar la temperatura de transformación. El aluminio, oxígeno, hidrógeno y otros elementos estabilizadores de la fase alfa incrementa la temperatura a la cual α se transforma en β . Estabilizadores de la fase beta, como, por ejemplo, el vanadio, el tantalio, el molibdeno y el niobio disminuyen la temperatura de transformación, haciendo incluso que β sea estable a temperatura ambiente. Finalmente, el manganeso, el cromo y el hierro producen una reacción eutécticoide, reduciendo la temperatura a la cual ocurre la transformación α - β y produciendo a la temperatura ambiente una estructura de dos fases. La tabla 13-9 presenta una lista de varias clases de titanio y de sus aleaciones.

Titanio comercialmente puro El titanio sin alear se utiliza para aprovechar su resistencia a la corrosión superior. Las impurezas como el oxígeno aumentan la resistencia del titanio (Fig. 13-11), pero reduce su resistencia a la corrosión. Las aplicaciones incluyen intercambiadores de calor, tuberías, reactores, bombas y válvulas para las industrias química y petroquímica.

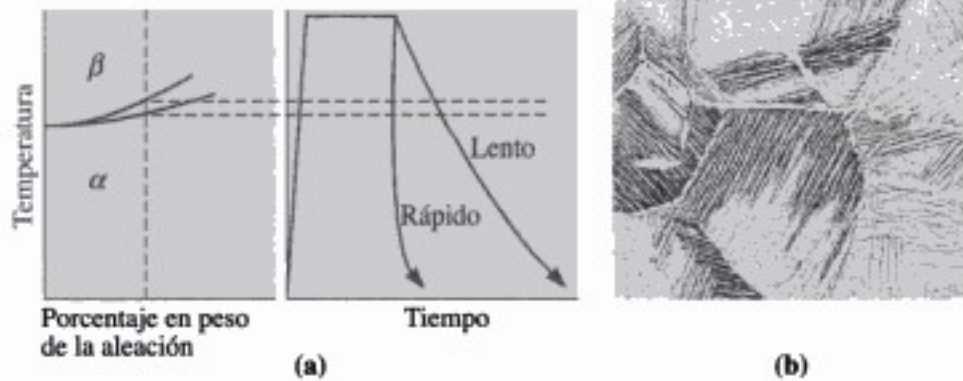


Figura 13-12 (a) Recocido y (b) microestructura de titanio alfa enfriado rápidamente (100 $\times$). Tanto el precipitado de los límites de grano como las placas Widmanstätten son alfa. (De ASM Handbook, vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

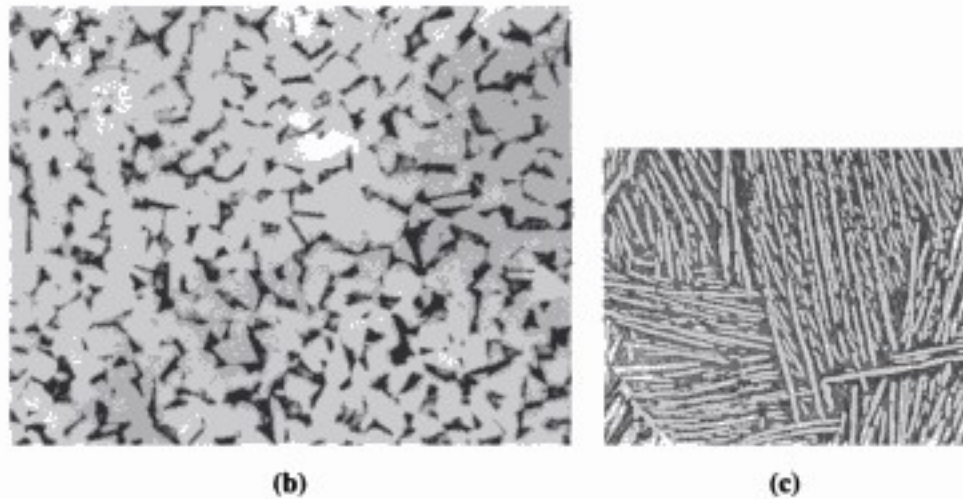
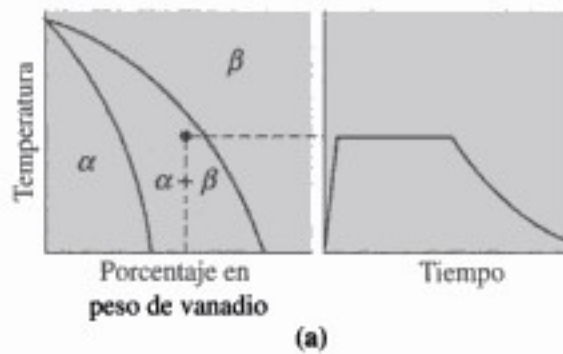


Figura 13-13 Recocido de una aleación de titanio alfa-beta. (a) El recocido se efectúa justo por debajo de la temperatura de transformación α - β , (b) un enfriamiento lento logra granos α equiaxiales (250 $\times$) y (c) un enfriamiento rápido forma granos α aciculares (2500 $\times$). (De ASM Handbook, vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

El recocido logra una combinación de ductilidad alta, propiedades uniformes y una buena resistencia mecánica. La aleación se calienta justo por debajo de la temperatura de transición β , lo que permite que quede una pequeña cantidad de α lo que previene crecimiento de grano (Fig. 13-13). Un enfriamiento lento causa la formación de granos α equiaxiales; esta estructura equiaxial proporciona una buena ductilidad, formabilidad y, al mismo tiempo, dificulta la nucleación de grietas por fatiga. Un enfriamiento más rápido, particularmente partiendo de una temperatura de transición por arriba de α - β , produce una fase α acicular o en "tejido de canasta" (Fig. 13-13). Aunque en esta estructura pueden nuclearse más fácilmente grietas por fatiga, éstas deben seguir una trayectoria tortuosa a lo largo de las fronteras entre α y β . Esta situación da como resultado una lenta velocidad de crecimiento de grietas por fatiga, una buena tenacidad a la fractura y una buena resistencia a la termofluencia.

Cuando la fase β se temple desde una temperatura alta, se pueden producir dos tipos de microestructuras posibles. El diagrama de fases de la figura 13-14 incluye una línea punteada que representa el inicio de la martensita, misma que sirve de base de un tratamiento de templeado y de revenido. La fase β se transforma a martensita de titanio (α') en alguna aleación que cruce en enfriamiento la línea M_s . La martensita de titanio es una fase sobresaturada relativamente blanda. Cuando se recalienta α' , ocurre un revenido por precipitación de β a partir de α' sobresaturada:

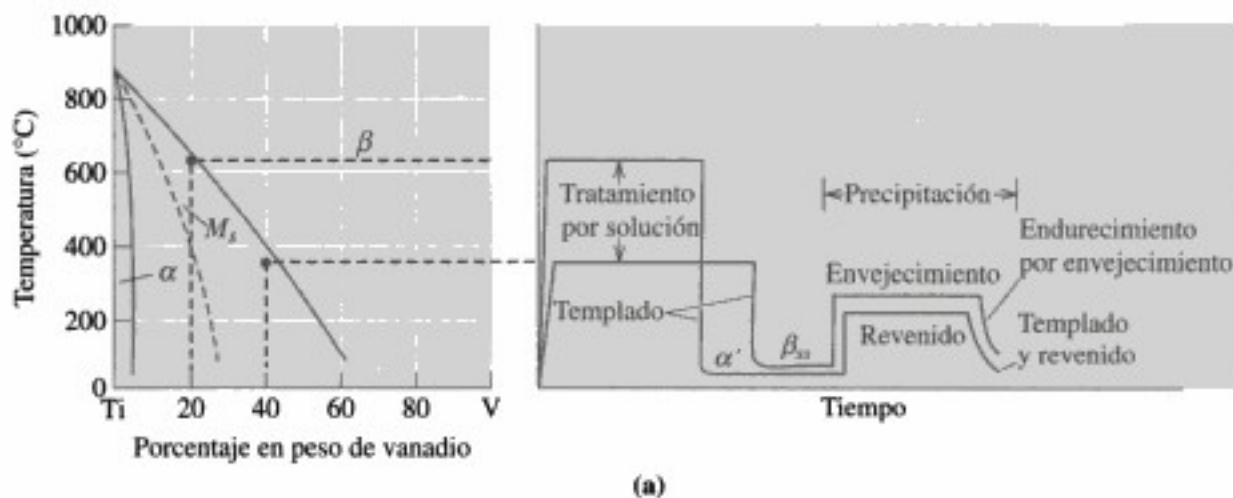


Figura 13-14 (a) Tratamiento térmico y (b) microestructura de las aleaciones de titanio alfa-beta. La estructura contiene α primaria (granos blancos grandes) en una matriz de β oscura con agujas de α' formadas durante el envejecimiento (250 $\times$). (De *ASM Handbook*, vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)



Inicialmente, los precipitados β finos incrementan la resistencia mecánica en comparación con α' , lo opuesto a lo que se logra al revenir una martensita de acero. Sin embargo, ocurre un reblandecimiento cuando el revenido se lleva a cabo a una temperatura demasiado alta.

Las composiciones α - β más aleadas se endurecen por envejecimiento. Cuando en estas aleaciones se temple β , produciendo β_{ss} , fase sobresaturada en titanio. Cuando β_{ss} se envejece, α se precipita en una estructura Widmanstätten, figura 13-14:



La formación de esta estructura conduce a una resistencia mecánica y tenacidad a la fractura mejoradas. Los componentes para fuselajes, cohetes, motores a reacción y equipo de aterrizaje son aplicaciones comunes para las aleaciones alfa-beta tratadas térmicamente. Algunas aleaciones, incluyendo la aleación Ti-6% Al-4% V son superplásticas y es posible deformarlas hasta en más de 1000%. Esta aleación también se utiliza para manufacturar prótesis para el cuerpo humano (véase la fotografía al principio de este capítulo). Las aleaciones de titanio se consideran **biocompatibles** (es decir, no son rechazadas por el cuerpo humano). Mediante el desarrollo de recubrimientos porosos de composiciones cerámicas similares a los huesos, conocidos como hidroxiapatita, es posible hacer que las prótesis de titanio sean **bioactivas** (es decir, el hueso natural puede crecer sobre el recubrimiento hidroxiapatita). Los siguientes tres ejemplos ilustran aplicaciones de aleaciones de titanio.

EJEMPLO 13-8 Diseño de un intercambiador de calor

Diseñe un intercambiador de calor de 5 pies de diámetro y 30 pies de largo para la industria petroquímica (Fig. 13-15).

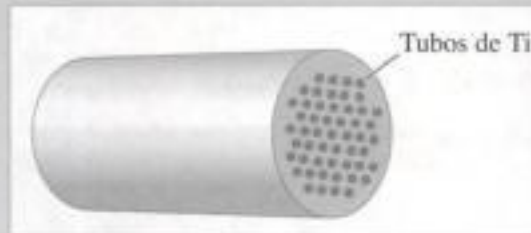


Figura 13-15
Esquema de un intercambiador de calor con tubos de titanio (para el ejemplo 13-8).

SOLUCIÓN

El intercambiador de calor debe cumplir con varios criterios de diseño. Debe tener una buena resistencia a la corrosión para manejar productos agresivos de la refinación química; debe operar a temperaturas relativamente altas; debe conformarse fácilmente en láminas y los tubos a partir de los cuales se fabricará el intercambiador y debe tener una buena soldabilidad para unir los tubos con el cuerpo del intercambiador.

Siempre y cuando la temperatura máxima de operación se mantenga por debajo de 535 °C para que se mantenga la película de óxido estable, el titanio puede ser una buena elección para proporcionar resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas. Un titanio comercialmente puro cumple con la mejor resistencia a la corrosión.

El titanio puro también proporciona características superiores para el formado plástico y soldadura y sería, por tanto, nuestra selección más lógica. Si el titanio puro no tiene la resistencia suficiente, una alternativa sería una aleación alfa de titanio, que seguirá dando una buena resistencia a la corrosión, buenas características de formado y de soldabilidad y, además una resistencia ligeramente mejorada.

EJEMPLO 13-9 *Diseño de una biela*

Diseñe una biela de alto rendimiento para el motor de un automóvil de carreras (Fig. 13-16).



Figura 13-16
Esquema de biela (para el ejemplo 13-9).

SOLUCIÓN

Un motor de alto rendimiento para carreras requiere materiales que puedan operar a temperaturas y esfuerzos elevados minimizando al mismo tiempo el peso del motor. En los automóviles normales, a menudo las bielas se fabrican de acero forjado o de un hierro fundido maleable. Podríamos ahorrar un peso considerable al reemplazar estas piezas por titanio. Para lograr resistencias elevadas, podríamos considerar una aleación de titanio alfa-beta. Debido a su disponibilidad, una buena elección sería la aleación Ti-6% Al-4% V. Esta aleación se calienta a aproximadamente 1065 °C, que es la porción totalmente β del diagrama de fases. Al templearla se forma martensita de titanio; el revenido subsiguiente produce una microestructura con precipitados beta dentro de una matriz alfa.

Cuando el tratamiento térmico se efectúa dentro de la región de β , la martensita revenida tiene una estructura acicular, lo que reduce la velocidad de crecimiento de cualquier grieta por fatiga que pudiera llegar a aparecer.

EJEMPLO 13-10 *Materiales para una prótesis de cadera*

¿Qué tipo de material seleccionaría usted para una prótesis que se utilizará en un reemplazo total de cadera?

SOLUCIÓN

Una prótesis de cadera debe reemplazar una parte del hueso del fémur que está desgastado o dañado. La prótesis tiene una cabeza metálica y se ajusta en la cavidad del fémur. Es necesario tomar en consideración los factores siguientes: biocompatibilidad, resistencia a la corrosión, tenacidad a la fractura elevada, una excelente vida a la fatiga (con la finalidad de que la prótesis dure muchos años, ya que es difícil llevar a cabo la cirugía conforme los pacientes envejecen), así como resistencia al desgaste. También es necesario considerar la rigidez. Si la aleación es demasiado rígida en comparación con el hueso, la mayor parte del esfuerzo será soportado por la prótesis. Esto lleva a un debilitamiento del hueso restante y a su vez puede aflojar la prótesis. Por tanto, necesitamos un material con una elevada resistencia a la tensión, con resistencia a la corrosión, con biocompatibilidad y tenacidad a la fractura. Estos requisitos sugieren el acero inoxidable 316 o Ti-6% Al-4% V. Ninguno de estos materiales es ferromagnético y ambos son opacos para los rayos X. Esto es deseable para imágenes por resonancia magnética y por rayos X. Las aleaciones de titanio no son muy duras y se pueden desgastar. Los aceros inoxidables son más duros, pero son mucho más rígidos que el hueso. El titanio es biocompatible y resultaría una mejor elección. Quizás una

respuesta podría ser un material compuesto en el cual el vástago estuviera fabricado de una aleación Ti-6% Al-4% V y con una cabeza fabricada de un material cerámico resistente al desgaste, resistente a la corrosión y tenaz a la fractura, como podría ser la alúmina. El interior del receptáculo podría ser fabricado de un polietileno de densidad ultraalta (peso molecular ultraalto), que tiene un coeficiente de fricción muy bajo. La superficie de la prótesis se puede hacer porosa, a fin de estimular el crecimiento del hueso. Otra opción sería recubrir la prótesis con un material como la hidroxiapatita porosa para alentar el crecimiento del hueso. En la fotografía del principio de este capítulo, se muestra una prótesis de titanio.

13-6 Metales refractarios y preciosos

Los metales refractarios, es decir el tungsteno, molibdeno, tantalio y niobio (o colombio), tienen temperaturas de fusión **excepcionalmente altas** (por arriba de 1925 °C) y, en consecuencia, tienen la capacidad potencial para el servicio a alta temperatura. Entre sus aplicaciones se incluyen los filamentos para los focos de luz, toberas de reactores, generadores de energía nuclear, capacitores electrónicos basados en tantalio y niobio y equipo para procesamiento químicos. Sin embargo, los metales tienen una elevada densidad, lo que limita sus resistencias específicas (tabla 13-10).

TABLA 13-10 ■ Propiedades de algunos metales refractarios

Metal	Temperatura de fusión (°C)	Densidad (g/cm ³)	T = 1000°C		Temperatura de transición (°C)
			Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia de cedencia (psi)	
Nb	2468	8.57	17 000	8 000	-140
Mo	2610	10.22	50 000	30 000	30
Ta	2996	16.6	27 000	24 000	-270
W	3410	19.25	66 000	15 000	300

Oxidación Los metales refractarios empiezan a oxidarse entre 200 y 425 °C y rápidamente se contaminan y fragilizan. En consecuencia, se deben tomar precauciones especiales durante la fundición, el trabajo en caliente, la soldadura o en la metalurgia de polvos. Los metales, además, deben protegerse durante su servicio a altas temperaturas. Por ejemplo el filamento de tungsteno de un foco de luz está protegido por el vacío.

Para ciertas aplicaciones, los metales pueden estar recubiertos con una capa de siliciuro o aluminuro. El recubrimiento debe a) tener una temperatura de fusión elevada, b) ser compatible con el metal refractario, c) actuar como una barrera a la difusión para evitar que los contaminantes lleguen hasta el metal subyacente y d) tener un coeficiente de dilatación térmica similar al del metal refractario. Existen recubrimientos disponibles que protegen el metal hasta aproximadamente 1650 °C. En algunas aplicaciones, como es en capacitores para teléfonos celulares, la formación de óxidos resulta útil, ya que deseamos aprovechar dicho óxido como un material no conductor (capítulo 18).

Características de formado Los metales refractarios, que tienen una estructura cristalina BCC, presentan una temperatura de transición de dúctil a frágil. Dado que las temperaturas de transición del niobio y del tantalio son inferiores a la temperatura ambiente, estos dos metales

GLOSARIO

Aleación no ferrosa Aleación basada en un metal distinto al hierro.

Aleaciones para forja Aleaciones que se conforman mediante un proceso de deformación.

Bioactivo Material que no es rechazado por el cuerpo humano y que finalmente llega a formar parte del mismo (hidroxiapatita).

Biocompatible Material que no es rechazado por el cuerpo humano.

Bronce Generalmente aleaciones de cobre que contienen estaño, aunque pueden contener, además, otros elementos.

Cobre blister Una forma impura del cobre que se obtiene durante el proceso de refinación del mismo.

Colabilidad Facilidad con la cual se puede vaciar un metal en un molde para hacer una pieza fundida sin producir defectos o sin requerir técnicas no usuales o costosas, para evitar problemas de fundición.

Designación de temple Notación abreviada que utiliza letras y números para identificar el procesamiento de una aleación. La designación con H se refiere a aleaciones trabajadas en frío; la designación con T, a tratamientos de endurecimiento por envejecimiento.

Fluidez Capacidad de un metal líquido para llenar la cavidad de un molde, sin solidificarse de manera prematura.

Latón Un grupo de aleaciones basadas en el cobre que, por lo general, contienen zinc como elemento principal de aleación.

Metales refractarios Metales que tienen una temperatura de fusión por arriba de 1925 °C.

Monel La aleación de cobre y níquel que contiene aproximadamente 60% Ni y que logra la resistencia máxima en el sistema de aleación binario.

Proceso Hall-Heroult Proceso electrolítico mediante el cual se extrae el aluminio de su mineral.

Resistencia específica Relación de la resistencia a la densidad, también conocida como relación resistencia a peso.

Superalaciones Grupo de aleaciones basadas en níquel, hierro-níquel y cobalto con una resistencia térmica, a la termofluencia y a la corrosión excepcionales.

Tixotropizado Proceso mediante el cual se agita un material durante su solidificación, produciendo una estructura en parte líquida y en parte sólida que se comporta como un sólido cuando no se le aplica una fuerza externa, pero que fluye como un líquido cuando está a presión.

INFORMACIÓN ADICIONAL

1. HARPER, C.A. *Handbook of Materials Product Design*, 3a. ed., McGraw Hill, 2001.
2. BINCZEWSKI. "The Point of a Monument: A history of the Aluminum Cap of the Washington Monument", *Journal of Metals*, 47 (11), 1995.
3. EVANS, J.W. y L.C. DE JONGHE. *The Production of Inorganic Materials*, Prentice Hall, 1991.
4. GAYLE, F.W. y M. GOODWAY. "Precipitation Hardening in the First Aerospace Aluminum Alloy: The Wright Flyer Crankcase", *Science*, 266(5187), 1994, pp. 1015-1017.
5. SAMPLE, V. ALCOA. *Reconocemos las discusiones técnicas*, 2002.
6. HOSFORD, W.F. y J.L. DUNCAN. "The Aluminum Beverage Can", *Scientific American*, septiembre de 1994, pp. 48-53.
7. BRONOSWIK, J. *The Ascent of Man*, Back Bay Books, 1973, pp. 124-131.
8. DAVENPORT, W.G. et al. *Flash Smelting: Analysis, Control and Optimization*, Warrendale, PA., The Minerals, Metals & Materials Society, 2001.
9. STAITE, J., B. HANN y F. RIZZO. *Crucible Compaction Metals*, Pittsburgh, PA. *Se reconoce la asistencia técnica*, 2002.
10. OTSUKA, K. y T. KAKESHITA. "Science and Technology of Shape-Memory Alloys: New Developments", *MRS Bulletin*, 27(2), 2002.