

Fundamentos de manufactura moderna

Tercera edición

**Mc
Graw
Hill**

Mikell P. Groover

Director Higher Education: Miguel Ángel Toledo Castellanos
Director editorial: Ricardo A. del Bosque Alayón
Editor sponsor: Pablo E. Roig Vázquez
Editora de desarrollo: Lorena Campa Rojas
Supervisor de producción: Zeferino García García

Traducción: Carlos Roberto Cordero Pedraza
Javier Enríquez Brito
Jesús Elmer Murrieta Murrieta

Diseño de portada: Círculodiseño

FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA

Tercera edición

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra,
por cualquier medio, sin la autorización escrita del editor.



**McGraw-Hill
Interamericana**

DERECHOS RESERVADOS © 2007 respecto a la tercera edición en español por
McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

A Subsidiary of The McGraw-Hill Companies, Inc.

Edificio Punta Santa Fe
Prolongación Paseo de la Reforma 1015, Torre A
Piso 17, Colonia Desarrollo Santa Fe,
Delegación Álvaro Obregón
C.P. 01376, México, D. F.
Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana, Reg. Núm. 736

ISBN-13: 978-970-10-6240-1

ISBN-10: 970-10-6240-X

Traducido de la tercera edición en inglés de la obra *FUNDAMENTALS OF MODERN MANUFACTURING. Materials, Processes and Systems*. Copyright © 2007 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

ISBN-10: 0-471-74485-9

ISBN-13: 978-0-471-74485-6

1234567890

0986543217

Impreso en México

Printed in Mexico

gris cuando se fractura, de donde adquiere su nombre. La dispersión de las escamas de grafito es responsable de dos propiedades atractivas: 1) buen amortiguamiento a la vibración, que es deseable en los motores y otra clase de maquinaria, y 2) cualidades de lubricación interna, lo que hace maquinable al metal fundido.

La resistencia del hierro colado gris abarca un rango significativo. La American Society for Testing of Materials (ASTM) usa un método de clasificación para el hierro colado gris hecho para proporcionar una especificación para la resistencia a la tensión (TS) mínima de varias clases: el hierro colado gris de Clase 20 tiene una TS de 20 000 lb/in², la Clase 30 tiene una TS de 30 000 lb/in², y así sucesivamente, hasta llegar a 70 000 lb/in² (véase la tabla 6.6 para la TS equivalente en unidades métricas). La resistencia a la compresión del hierro colado gris es significativamente mayor que a la tensión. Las propiedades de la pieza fundida se pueden controlar hasta cierto grado por medio del tratamiento térmico. La ductilidad del hierro colado gris es muy baja; es un material relativamente frágil. Los productos hechos de hierro colado gris incluyen bloques y cárteres de motores automotrices, carcasas de motor y bases para máquinas herramientas.

Hierro dúctil Este es un hierro con la composición del gris en el que el metal fundido recibe tratamiento químico antes de vaciarlo para ocasionar la formación de esferoides de grafito en lugar de escamas. Esto da como resultado un hierro más dúctil y fuerte, de ahí su nombre. Las aplicaciones incluyen componentes de maquinaria que requieren resistencia elevada y buena resistencia al desgaste.

Hierro colado blanco Este hierro colado tiene menos carbono y silicio que el gris. Se forma por un enfriamiento más rápido del metal fundido después del vertido, lo que hace que el carbono permanezca en combinación química con el hierro en forma de cementita (Fe_3C), en vez de precipitarse de la solución en forma de escamas. Cuando se fractura, la superficie adquiere una apariencia cristalina blanca que le da su nombre al hierro. Debido a la cementita, el hierro fundido blanco es duro y frágil, y su resistencia al desgaste es excelente. La resistencia es buena, con un valor común de TS de 276 MPa (40 000 lb/in²). Estas propiedades hacen que el hierro colado blanco sea apropiado para aplicaciones en las que se requiere resistencia al desgaste. Un buen ejemplo son las zapatas de los frenos de un ferrocarril.

Hierro maleable Cuando las piezas fundidas de hierro colado blanco se tratan térmicamente para separar el carbono de la solución y formar agregados de grafito, el metal que resulta se llama hierro maleable. La microestructura nueva posee ductilidad sustancial (hasta 20% de elongación), una diferencia significativa con el metal a partir del cual se transformó. Los productos comunes hechos de hierro colado maleable, incluyen ajustes y bisagras para tubos, ciertos componentes de máquina y piezas de equipo ferroviario.

Hierros de aleaciones fundidas Los hierros colados pueden estar aleados para buscar propiedades y aplicaciones especiales. Estas aleaciones de hierro colado se clasifican como sigue: 1) tipos tratables térmicamente que pueden endurecerse por medio de la formación de martensita; 2) tipos resistentes a la corrosión, cuyos elementos de aleación incluyen níquel y cromo, y 3) tipos resistentes al calor que contienen proporciones elevadas de níquel para tener dureza en caliente y resistencia a la oxidación por alta temperatura.

6.3 METALES NO FERROSOS

Los metales no ferrosos incluyen elementos y aleaciones metálicas que no se basan en el hierro. Los metales más importantes de la ingeniería en el grupo de los no ferrosos son el aluminio, el cobre, el magnesio, el níquel, el titanio y el zinc, así como sus aleaciones.

Aunque los metales no ferrosos como grupo no igualan la resistencia de los aceros, ciertas aleaciones no ferrosas tienen resistencia a la corrosión o relaciones resistencia/peso que las hacen competitivas ante los aceros para aplicaciones con esfuerzos moderados a

TABLA 6.1 (continuación); b) Aluminio.

Símbolo:	Al	Mineral principal:	Bauxita (mezcla impura de Al_2O_3 y $\text{Al}(\text{OH})_3$).
Número atómico:	13	Elementos de aleación:	Cobre, manganeso, silicio y zinc.
Gravedad específica:	2.7	Aplicaciones comunes:	Contenedores (latas de aluminio), láminas para envolturas, conductores eléctricos, vajillas y cacerolas, piezas para construcción, aeroespaciales automotrices y otros usos en los que el poco peso es importante.
Estructura cristalina:	FCC		
Temperatura de fusión:	660 °C (1 220 °F)		
Módulo de elasticidad:	69 000 MPa (10×10^6 lb/in ²)		

altos. Además, muchos de los metales no ferrosos tienen propiedades adicionales a las mecánicas que los hacen ideales para aplicaciones en las que el acero sería inapropiado. Por ejemplo, el cobre tiene una de las resistividades más bajas entre los metales, y se usa ampliamente para fabricar conductores eléctricos. El aluminio es un conductor térmico excelente, y sus aplicaciones incluyen intercambiadores de calor y trastos de cocina. También es uno de los metales a los que se le da forma con mayor facilidad y por esa razón se le valora mucho. El zinc tiene un punto de fusión relativamente bajo, por lo que se le utiliza de manera amplia en las operaciones de fundición a troquel. Los metales no ferrosos comunes tienen su propia combinación de propiedades que los hacen atractivos para una variedad de aplicaciones. En las siguientes nueve secciones se estudian aquellos que son los más importantes en lo comercial y tecnológico.

6.3.1 El aluminio y sus aleaciones

El aluminio y el magnesio son metales ligeros y por esta característica es frecuente que se les especifique en aplicaciones de ingeniería. Ambos elementos abundan en nuestro planeta, el aluminio en la tierra y el magnesio en el mar, aunque ninguno se extrae con facilidad de su estado natural.

En la tabla 6.1b) se enlistan las propiedades y otros datos del aluminio. Entre los metales principales es un recién llegado relativamente hablando, pues data apenas de fines del siglo XIX (véase la nota histórica 6.2). El estudio en esta sección incluye lo siguiente: 1) una descripción breve de la forma en que se produce el aluminio, y 2) un análisis de las propiedades y sistema de nomenclatura para el metal y sus aleaciones.

Nota histórica 6.2 Aluminio

En 1807, el químico inglés Humphrey Davy, en la creencia de que el mineral **alúmina** (Al_2O_3) tenía una base metálica, trató de extraer el metal. No tuvo éxito, pero, de cualquier modo, estaba convencido lo suficiente como para dar al metal el nombre de **aluminium**, el que después cambió por **aluminio**. En 1825, el físicoquímico danés Hans Orsted finalmente tuvo éxito en separar el metal. Observó que “parecía estaño”. En 1845, el físico alemán Friedrich Wohler fue el primero en determinar la gravedad específica, ductilidad y varias otras propiedades del aluminio.

El proceso electrolítico moderno para producir aluminio se basa en el trabajo concurrente pero independiente de

Charles Hall, en Estados Unidos, y de Paul Heroult, en Francia, alrededor de 1886. En 1888, Hall y un grupo de empresarios iniciaron la empresa Pittsburgh Reduction Co. Ese mismo año se produjo el primer lingote de aluminio con el proceso de fusión electrolítica. La demanda de aluminio creció. La necesidad de cantidades grandes de electricidad en el proceso de producción llevó a la compañía a reubicarse en las cataratas del Niágara, en 1895, donde se disponía de energía hidroeléctrica a costo muy bajo. En 1907, la compañía cambió su nombre por el de Aluminum Company of America (Alcoa). Fue el único productor de aluminio en Estados Unidos hasta la Segunda Guerra Mundial.

Producción de aluminio El mineral principal de aluminio es la **bauxita**, que consiste por mucho en óxido de aluminio hidratado ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y otros óxidos. La extracción del aluminio a partir de la bauxita se resume en tres pasos: 1) lavado y trituración del mineral

TABLA 6.7a) Nomenclatura de aleaciones de aluminio forjado y fundido.

Grupo de aleación	Código para forjado	Código para fundido
Aluminio, pureza de 99,0% o mayor	1XXX	1XX.X
Aleaciones de aluminio, por elemento(s) principal(es)		
Cobre	2XXX	2XX.X
Manganeso	3XXX	
Silicio + cobre o magnesio		3XX.X
Silicio	4XXX	4XX.X
Magnesio	5XXX	5XX.X
Magnesio y silicio	6XXX	
Zinc	7XXX	7XX.X
Estaño		8XX.X
Otros	8XXX	9XX.X

para obtener polvos finos; 2) proceso Bayer, en el que la bauxita se convierte en alúmina pura (Al_2O_3); y 3) electrólisis, en el que la alúmina se separa en aluminio y oxígeno gaseoso (O_2). El **proceso Bayer**, llamado así en honor del químico alemán que lo creó, involucra una solución de polvo de bauxita en sosa cáustica acuosa (NaOH) a presión, seguida de precipitación de Al_2O_3 puro de la solución. La alúmina es importante en el comercio por sí misma, como material cerámico de uso en la ingeniería (véase el capítulo 7).

La **electrólisis** para separar el Al_2O_3 en sus elementos constitutivos requiere de disolver el precipitado en un baño de fundición de criolita (Na_3AlF_6) y sujetar la solución a una corriente directa entre las placas de un horno electrolítico. El electrolito se disocia para formar aluminio en el cátodo y oxígeno gaseoso en el ánodo.

Propiedades y esquema de nomenclatura El aluminio tiene mucha conductividad eléctrica y térmica, y su resistencia a la corrosión es excelente debido a la formación de una película superficial de óxido, delgada y dura. Es un metal muy dúctil y es notable la capacidad que tiene para adquirir la forma deseada. El aluminio puro tiene resistencia relativamente baja, pero se puede alea y tratar térmicamente para competir con ciertos aceros, en especial cuando el peso es una consideración importante.

El sistema de nomenclatura para el aluminio es un código numérico de cuatro dígitos. El sistema tiene dos partes, una para el aluminio forjado y otra para los aluminios fundidos. La diferencia es que para estos últimos se emplea un punto decimal después del tercer dígito. En la tabla 6.7a) se presentan las designaciones.

Debido a que en las propiedades de las aleaciones de aluminio influyen mucho el endurecimiento por trabajo y el tratamiento térmico, además del código de composición, debe designarse el templado (tratamiento para dar resistencia, si lo hubiera). En la tabla 6.7b) se presentan las designaciones principales de templado. Esta designación se agrega al número precedente de cuatro dígitos, separado por un símbolo como superíndice, para indicar el tratamiento o la ausencia de él; por ejemplo, 1 060 °F. Por supuesto, los tratamientos de templado que especifican endurecimiento por deformación no se aplican a las aleaciones fundidas. En la tabla 6.8 se dan algunos ejemplos de las diferencias notables en las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio que resultan de los distintos tratamientos.

6.3.2 El magnesio y sus aleaciones

El magnesio (Mg) es el más ligero de los metales estructurales. Su gravedad específica y otros datos básicos se presentan en la tabla 6.1c). El magnesio y sus aleaciones se encuentran disponibles tanto en forma forjada como fundida. Es relativamente fácil de maquinar. Sin embargo, en todo procesamiento del magnesio, las partículas pequeñas del metal (tales como astillas metálicas pequeñas procedentes del corte) se oxidan con rapidez, por lo que debe tenerse cuidado para evitar el peligro de incendio.

TABLA 6.7b) Nomenclatura del templado para aleaciones de aluminio.

Templado	Descripción
F	Como se fabrica, sin tratamiento especial.
H	Endurecido por deformación (aluminios forjados). La H va seguida de dos dígitos, el primero de los cuales indica un tratamiento térmico, si lo hubiera; y el segundo, el grado de endurecimiento por trabajo restante; por ejemplo: H1X No hubo tratamiento térmico después del endurecimiento por deformación, y X = 1 a 9, que indica el grado de endurecimiento por trabajo. H2X Recocido parcialmente, y X = grado de endurecimiento por trabajo remanente en el producto. H3X Estabilizado, y X = grado de endurecimiento por trabajo remanente. Estabilizado significa calentar ligeramente por arriba de la temperatura de uso que se prevé.
O	Recocido para liberar el endurecimiento por deformación y mejorar la ductilidad; reduce la resistencia a su nivel mínimo.
T	Tratamiento térmico para producir templados estables diferentes de F, H u O. Va seguido de un dígito para indicar un tratamiento específico; por ejemplo: T1 = enfriado a partir de una temperatura elevada, envejecido en forma natural. T2 = enfriado desde una temperatura elevada, trabajado en frío, envejecido en forma natural. T3 = solución tratada térmicamente, trabajada en frío, envejecida de modo natural. T4 = solución tratada térmicamente y envejecida naturalmente. T5 = enfriado desde una temperatura alta, envejecido en forma artificial. T6 = solución tratada térmicamente y envejecida en forma artificial. T7 = solución tratada térmicamente y sobrenvejecida o estabilizada. T8 = solución tratada térmicamente, trabajada en frío, envejecida de modo artificial. T9 = solución tratada térmicamente, envejecida artificialmente y trabajada en frío. T10 = enfriada desde una temperatura elevada, trabajada en frío y envejecida artificialmente.
W	Solución con tratamiento térmico, aplicada a aleaciones que se endurecen por el envejecimiento en su uso; es un templado inestable.

TABLA 6.8 Composiciones y propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio seleccionadas.

Código	Composición normal, % ^a						Templado	Resistencia a la tensión		Elongación
	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si		MPa	lb/in ²	
1050	99.5		0.4			0.3	O	76	11 000	39
							H18	159	23 000	7
1100	99.0		0.6			0.3	O	90	13 000	40
							H18	165	24 000	10
2024	93.5	4.4	0.5	1.5	0.6	0.5	O	185	27 000	20
							T3	485	70 000	18
3004	96.5	0.3	0.7	1.0	1.2	0.3	O	180	26 000	22
							H36	260	38 000	7
4043	93.5	0.3	0.8			5.2	O	130	19 000	25
							H18	285	41 000	1
5050	96.9	0.2	0.7	1.4	0.1	0.4	O	125	18 000	18
							H38	200	29 000	3
6063	98.5		0.3	0.7		0.4	O	90	13 000	25
							T4	172	25 000	20

Recopilado a partir de la referencia [10].

^a Además de los elementos que se enlistan, la aleación puede contener indicios de otros elementos tales como el cobre, magnesio, manganeso, vanadio y zinc.

TABLA 6.1 (continuación) c) Magnesio.

Símbolo: Mg	Se extrae de: MgCl ₂ del agua marina, por electrólisis.
Número atómico: 12	Elementos de aleación: Véase la tabla 6.9.
Gravedad específica: 1.74	Aplicaciones comunes: Aeroespacial, misiles, bicicletas, sierras de cadena domésticas, equipajes y otras aplicaciones en las que el peso ligero es un requerimiento principal.
Estructura cristalina: HCP	
Temperatura de fusión: 650 °C (1 202 °F)	
Módulo de elasticidad: 48 000 MPa (7 × 10 ⁶ lb/in ²)	

TABLA 6.9 Letras del código para identificar los elementos en las aleaciones de magnesio.

A	aluminio (Al)	H	torio (Th)	M	manganeso (Mn)	Q	plata (Ag)	T	estaño (Sn)
E	metales de las tierras raras	K	zirconio (Zr)	P	plomo (Pb)	S	silicio (Si)	Z	zinc (Zn)

Producción del magnesio El agua de mar contiene alrededor de 0.13% de MgCl_2 y es la fuente de la mayor parte del magnesio que se produce en forma comercial. Para extraerlo, se mezcla una cantidad de agua marina con una lechada de cal, es decir, hidróxido de calcio (Ca(OH)_2). La reacción resultante precipita el hidróxido de magnesio (Mg(OH)_2) que se asienta y se retira como pasta aguada. Después, se filtra esta pasta aguada a fin de incrementar el contenido de Mg(OH)_2 para luego mezclarlo con ácido clorhídrico (HCl), que reacciona con el hidróxido para formar un concentrado de MgCl_2 , mucho más concentrado que el del agua marina original. Se utiliza electrólisis para descomponer la sal en magnesio (Mg) y cloro gaseoso (Cl_2). Después se funde el magnesio en lingotes para su procesamiento posterior. El cloro se recicla para formar más MgCl_2 .

Propiedades y esquema de nomenclatura Como metal puro, el magnesio es relativamente suave y carece de la resistencia suficiente para la mayor parte de las aplicaciones de la ingeniería. Sin embargo, se puede alea y tratar térmicamente para que alcance resistencias comparables a las de las aleaciones del aluminio. En particular, su relación resistencia-peso es una ventaja en los aviones y componentes de misiles.

El esquema de nomenclatura del magnesio usa un código alfanumérico de tres a cinco caracteres. Los primeros dos son letras que identifican los elementos principales de la aleación (pueden especificarse hasta dos elementos en el código, en orden decreciente de porcentaje, o en forma alfabética si los porcentajes son iguales). En la tabla 6.9 se enlistan dichas letras del código. Las letras van seguidas de un número de dos dígitos que indican, respectivamente, las cantidades de dos ingredientes de aleación al porcentaje más cercano. Finalmente, el último símbolo es una letra que indica cierta variación en la composición, o tan sólo el orden cronológico en el que se estandarizó para su disponibilidad comercial. Las aleaciones de magnesio también requieren la especificación del templado, y para ellas se emplea el mismo esquema básico que para el aluminio que se presentó en la tabla 6.7b).

En la tabla 6.10 se dan algunos ejemplos de aleaciones de magnesio, que ilustran el esquema de nomenclatura e indican su resistencia a la tensión y ductilidad.

6.3.3 El cobre y sus aleaciones

El cobre (Cu) es uno de los metales más antiguos que se conocen (véase la nota histórica 6.3). Los datos básicos del elemento cobre se presentan en la tabla 6.1d).

TABLA 6.10 Composiciones y propiedades mecánicas de aleaciones de magnesio seleccionadas.

Código	Composición normal, %						Proceso	Resistencia a la tensión		Elongación
	Mg	Al	Mn	Si	Zn	Otro		MPa	lb/in ²	
AZ10A	98.0	1.3	0.2	0.1	0.4		Trabajado	240	35 000	10
AZ80A	91.0	8.5			0.5		Forjado	330	48 000	11
HM31A	95.8		1.2			3.0 Th	Trabajado	283	41 000	10
ZK21A	97.1				2.3	6 Zr	Trabajado	260	38 000	4
AM60	92.8	6.0	0.1	0.5	0.2	0.3 Cu	Fundido	220	32 000	6
AZ63A	91.0	6.0			3.0		Fundido	200	29 000	6

Recopilado a partir de la referencia [10].

Nota histórica 6.3 Cobre

El cobre fue uno de los primeros metales que usaron las culturas humanas (el oro fue el otro). Es probable que el descubrimiento del metal ocurriera alrededor de 6000 a.C. En esa época, el cobre se encontró en estado metálico libre. Los antiguos pueblos fabricaron implementos y armas por medio del golpeo del metal (forja en frío). Al ser golpeado, el cobre se hacía más fuerte (endurecimiento por deformación); esto y su color rojo atractivo lo hacían valioso para las primeras civilizaciones.

Alrededor de 4000 a.C, se descubrió que el cobre podría fundirse para que adoptara formas útiles.

Después se vio que mezclado con estaño podía fundirse y trabajarse con más facilidad que como metal puro. Esto llevó a que se extendiera el uso del bronce y posteriormente se diera el nombre de Edad de Bronce, a la época que transcurrió aproximadamente desde 2000 a.C. al periodo de Cristo.

Para los romanos antiguos, la isla de Chipre era casi la única fuente de cobre. Llamaban al metal **aes cyprium** (mineral de Chipre). Este nombre se abrevió a **Cyprium** y después a **Cuprium**. De ahí deriva el símbolo químico Cu.

Producción de cobre En los tiempos antiguos, el cobre existía en la naturaleza como elemento libre. Hoy día, esos depósitos naturales son más difíciles de encontrar y el metal se extrae de minerales que en su mayoría son sulfuros, como la **calcopirita** (CuFeS_2). El mineral se tritura (véase la sección 17.1.1), se concentra por flotación y después se **aparta** (se derrite o funde, con frecuencia con una reacción química para separar el metal del mineral). El cobre resultante se denomina **cobre ampollado**, que tiene una pureza de 98% y 99%. Se emplea electrólisis para obtener niveles de pureza más elevados apropiados para el uso comercial.

Propiedades y esquema de nomenclatura El cobre puro tiene un color rojizo o rosa distintivo, pero su propiedad de ingeniería más notable es su resistividad eléctrica baja, uno de los elementos con la más baja. Debido a esta propiedad, y a su abundancia relativa en la naturaleza, el cobre puro comercial se usa mucho como conductor eléctrico (aquí se debe decir que la conductividad del cobre disminuye de manera significativa si se agregan elementos de aleación). El Cu también es un conductor térmico excelente. El cobre es uno de los metales nobles (el oro y la plata también lo son), por lo que es resistente a la corrosión. Todas esas propiedades se combinan para que el cobre sea uno de los metales más importantes.

En contraparte, la resistencia y dureza del cobre son relativamente bajas, en especial si se toma en cuenta el peso. En consecuencia, para mejorar la resistencia (así como por otras razones), es frecuente que el cobre se alee. El **bronce** es una aleación de cobre y estaño (es común el 90% de Cu y 10% de Sn), que hoy se usa todavía a pesar de su antigüedad. Se han desarrollado aleaciones de bronce adicionales, con base en otros elementos distintos del estaño; entre éstos se hallan bronce de aluminio, y bronce de silicio. El **latón** es otra aleación de cobre que resulta familiar, compuesta de cobre y zinc (es común que contenga 65% de cobre y 35% de zinc). La aleación de cobre con mayor resistencia es la del berilio-cobre (con sólo el 2% de berilio). Puede tratarse térmicamente para obtener resistencias a la tensión de 1 035 MPa (150 000 lb/in²). Las aleaciones de Be-Cu se usan para hacer resortes.

La nomenclatura de las aleaciones de cobre se basa en el Unified Numbering System for Metals and Alloys (UNS), que emplea un número de cinco dígitos precedido de la letra

TABLA 6.1 (continuación); d) Cobre.

Símbolo:	Cu	Mineral del que se extrae:	Varios: por ejemplo, calcopirita (CuFeS_2).
Número atómico:	29	Elementos de aleación:	Estaño (bronce), zinc (latón), aluminio, silicio, níquel y berilio.
Gravedad específica:	8.96	Aplicaciones comunes:	Conductores y componentes eléctricos, municiones (latón), vasijas y cacerolas, joyería, plomería, aplicaciones marinas, intercambiadores de calor, resortes (Be-Cu).
Estructura cristalina:	FCC		
Temperatura de fusión:	1 083 °C (1 981 °F)		
Módulo de elasticidad:	110 000 MPa (16×10^6 lb/in ²)		

TABLA 6.11 Composición y propiedades mecánicas de aleaciones de cobre seleccionadas.

Código	Composición normal, %					Resistencia a la tensión		Elongación, %
	Cu	Be	Ni	Sn	Zn	MPa	lb/in ²	
C10100	99.99					235	34 000	45
C11000	99.95					220	32 000	45
C17000	98.0	1.7	a			500	70 000	45
C24000	80.0				20.0	290	42 000	52
C26000	70.0				30.0	300	44 000	68
C52100	92.0			8.0		380	55 000	70
C71500	70.0		30.0			380	55 000	45
C71500 ^b	70.0		30.0			580	84 000	3

Recopilada a partir de la referencia [10].

^a Cantidades pequeñas de Ni y Fe + 0.3 Co.

^b Tratado térmicamente para dar más resistencia.

C (de cobre). Las aleaciones se procesan en formas fraguadas y fundidas, y el sistema de nomenclatura incluye ambas. En la tabla 6.11 se presentan algunas aleaciones de cobre con sus composiciones y propiedades mecánicas.

6.3.4 El níquel y sus aleaciones

En muchos aspectos, el níquel (Ni) es similar al hierro. Es magnético y su módulo de elasticidad es virtualmente el mismo que el del hierro y el acero. Sin embargo, es mucho más resistente a la corrosión y las propiedades de alta temperatura de sus aleaciones por lo general son superiores. Debido a sus características de resistencia a la corrosión, se usa mucho como elemento de aleación en el acero, como en los aceros inoxidable, y como metal de recubrimiento de otros metales, como el acero al carbono.

Producción de níquel El mineral de níquel más importante es la *pentlandita* ((Ni,Fe)₉S₈). Para extraer el níquel, primero se tritura el mineral mezclado con agua. A fin de separar los sulfuros de los demás minerales de la mena se utilizan técnicas de flotación. Después, se calienta el sulfuro de níquel para quemar algo del azufre, y luego se funde con el fin de eliminar hierro y silicio. Se refina más en un convertidor del tipo Bessemer para obtener sulfuro de níquel (NiS) de alta concentración. Después se aplica electrólisis para recuperar níquel de alta pureza a partir del compuesto. En ocasiones, los minerales de níquel se mezclan con otros de cobre, en cuyo caso la técnica de recuperación que se acaba de describir también produce cobre.

Aleaciones de níquel Las aleaciones de níquel tienen importancia comercial por sí mismas, y son notables por su resistencia a la corrosión y desempeño a altas temperaturas. En la tabla 6.12 se dan la composición, resistencia a la tensión y ductilidad de algunas aleaciones de níquel. Además, cierto número de superaleaciones se basan en el níquel (véase la sección 6.4).

TABLA 6.1 (continuación); e) Níquel.

Símbolo:	Ni	Mineral del que se extrae:	Pentlandita ((Fe, Ni) ₉ S ₈).
Número atómico:	28	Elementos de aleación:	Cobre, cromo, hierro, aluminio.
Gravedad específica:	8.90	Aplicaciones comunes:	Ingrediente de las aleaciones del acero inoxidable, metal para recubrir acero, aplicaciones que requieren resistencia a las temperaturas elevadas y a la corrosión.
Estructura cristalina:	FCC		
Temperatura de fusión:	1 453 °C (2 647 °F)		
Módulo de elasticidad:	209 000 MPa (30 × 10 ⁶ lb/in ²)		

TABLA 6.12 Composición y propiedades mecánicas de aleaciones de níquel.

Código	Composición normal, %							Resistencia a la tensión		
	Ni	Cr	Cu	Fe	Mn	Si	Otro	MPa	lb/in ²	Elongación, %
270	99.9		a	a				345	50 000	50
200	99.0		0.2	0.3	0.2	0.2	C, S	462	67 000	47
400	66.8		30.0	2.5	0.2	0.5	C	550	80 000	40
600	74.0	16.0	0.5	8.0	1.0	0.5		655	95 000	40
230	52.8	22.0		3.0	0.4	0.4	b	860	125 000	47

Recopilada a partir de la referencia [10].

^a Indicios.

^b Otros ingredientes de aleación en grado 230: 5% Co, 2% Mo, 14% W, 0.3% Al, 0.1% C.

6.3.5 El titanio y sus aleaciones

El titanio (Ti) es abundante en la naturaleza, constituye cerca del 1% de la corteza terrestre (el 8% corresponde al aluminio, el que abunda más). La densidad del titanio está entre la del aluminio y la del hierro; éste y otros datos se presentan en la tabla 6.1f). En las últimas décadas su importancia ha crecido debido a sus aplicaciones aeroespaciales, en las que se aprovechan su peso ligero y razón resistencia-peso buena.

Producción de titanio Los minerales principales del titanio son el **rutilo**, que está formado por 98% a 99% de TiO_2 , y la **ilmenita**, que es una combinación de FeO y TiO_2 . El rutilo es preferible como mena debido a su mayor contenido de Ti. En la recuperación del metal a partir de sus minerales, el TiO_2 se convierte en tetracloruro de titanio (TiCl_4) por medio de hacer reaccionar al compuesto con cloro gaseoso. A esto sigue una secuencia de etapas de destilación para eliminar las impurezas. Luego se reduce el TiCl_4 muy concentrado a titanio metálico, con una reacción con magnesio; esto se conoce como **proceso Kroll**. Como agente reductor también puede usarse sodio. En cualquier caso, debe mantenerse una atmósfera inerte para impedir que el O_2 , N_2 o H_2 contaminen al Ti por su gran afinidad con esos gases. El metal resultante se emplea para fundir lingotes del metal y sus aleaciones.

Propiedades del titanio El coeficiente de expansión térmica del titanio es relativamente bajo entre los metales. Es más rígido y fuerte que el aluminio, y a altas temperaturas conserva buena resistencia. El titanio puro es reactivo, lo que da problemas durante el procesamiento, en especial en estado fundido. Sin embargo, a temperatura ambiente forma una película delgada de óxido (TiO_2) adhesivo que recubre y proporciona una resistencia excelente contra la corrosión.

Estas propiedades han dado lugar a dos áreas principales de aplicación del titanio: 1) en estado puro comercial, el Ti se emplea para hacer componentes resistentes a la corrosión, tales como elementos marinos e implantes ortopédicos; y 2) las aleaciones de titanio se emplean como componentes de resistencia elevada en temperaturas que van de la del ambiente a 550 °C (1 000 °F), en especial en las que se aprovecha su excelente razón resis-

TABLA 6.1 (continuación); f) Titanio.

Símbolo:	Ti	Minerales principales	
Número atómico:	22	de los que se extrae:	Rutilo (TiO_2) e ilmenita (FeTiO_3)
Gravedad específica:	4.51	Elementos de aleación:	Aluminio, estaño, vanadio, cobre y magnesio.
Estructura cristalina:	HCP	Aplicaciones comunes:	Componentes de motores a reacción, otras aplicaciones aeroespaciales, implantes ortopédicos.
Temperatura de fusión:	1 668 °C (3 034 °F)		
Módulo de elasticidad:	117 000 MPa (17×10^6 lb/in ²)		

TABLA 6.13 Composición y propiedades mecánicas de aleaciones de titanio seleccionadas.

Código ^a	Composición normal, %						Resistencia a la tensión		Elongación, %
	Ti	Al	Cu	Fe	V	Otro	MPa	lb/in ²	
R50250	99.8			0.2			240	35 000	24
R56400	89.6	6.0		0.3	4.0	^b	1 000	145 000	12
R54810	90.0	8.0			1.0	1 Mo, ^b	985	143 000	15
R56620	84.3	6.0	0.8	0.8	6.0	2 Sn, ^b	1 030	150 000	14

Recopilada a partir de las referencias [1] y [10].

^a United Numbering System (UNS).

^b Indicios de C, H, O.

tencia-peso. Estas aplicaciones recientes incluyen componentes de aeronaves y misiles. Algunos de los elementos de aleación que se utilizan con el titanio incluyen aluminio, manganeso, estaño y vanadio. En la tabla 6.13 se presentan algunas composiciones y propiedades mecánicas de varias de sus aleaciones.

6.3.6 El zinc y sus aleaciones

En la tabla 6.1g) se enlistan los datos básicos del zinc. Su punto de fusión bajo lo hace atractivo como metal de fundición. También da protección contra la corrosión cuando se le usa como recubrimiento del acero o hierro; el **acero galvanizado** es acero recubierto con zinc.

Producción de zinc La blenda de zinc o **esfalerita** es el mineral principal del zinc; contiene sulfuro de zinc (ZnS). Otras menas importantes de zinc incluyen la **smithsonita**, que es carbonato de zinc (ZnCO₃), y **hemimorfato**, que es silicato hidroso de zinc (Zn₄Si₂O₇OH·H₂O).

La esfalerita debe concentrarse (o **beneficiarse**, en el argot metalúrgico) debido a la cantidad tan pequeña de sulfuro de zinc que contiene. Esto se lleva a cabo por medio de triturar, en primer lugar, al mineral, luego se muele con agua en un molino de balines (véase la sección 17.1.1) para crear una pasta aguada. En presencia de un agente espumante, la pasta aguada se agita de modo que las partículas de mineral flotan en la superficie y se pueden retirar (se separan de los minerales pesados de la parte inferior). Después, el sulfuro de zinc más concentrado se calienta a 1 260 °C (2 300 °F), de modo que con la reacción se forma óxido de zinc (ZnO).

Hay varios procesos termoquímicos para recuperar el zinc de ese óxido, todos los cuales lo reducen por medio de carbono. El carbono se combina con el oxígeno del ZnO para formar CO y CO₂, lo que libera Zn en forma de vapor que se condensa para producir el metal deseado.

También se usa mucho un proceso electrolítico, responsable de alrededor de la mitad de la producción mundial de zinc. Dicho proceso también comienza con la preparación de ZnO, que se mezcla con ácido sulfúrico diluido (H₂SO₄), seguido de electrólisis para separar la solución de sulfato de zinc (ZnSO₄) resultante y producir el metal puro.

TABLA 6.1 (continuación); g) Zinc.

Símbolo:	Zn	Módulo de elasticidad:	90 000 MPa (13 × 10 ⁶ lb/in ²) ^a .
Número atómico:	30	Mineral principal:	Esfalerita (ZnS).
Gravedad específica:	7.13	Elementos de aleación:	Aluminio, magnesio y cobre.
Estructura cristalina:	HCP	Aplicaciones comunes:	Acero y hierro galvanizados, fundición a troquel, elemento de aleación del latón.
Temperatura de fusión:	419 °C (786 °F)		

^a El zinc se agrieta, por lo cual es difícil de medir su módulo de elasticidad; por esta razón, algunas tablas de propiedades omiten el valor de E para el zinc.

TABLA 6.14 Composición, resistencia a la tensión y aplicaciones de aleaciones de zinc seleccionadas.

Código ^a	Composición normal, %					Resistencia a la tensión		Aplicación
	Zn	Al	Cu	Mg	Fe	MPa	lb/in ²	
Z33520	95.6	4.0	0.25	0.04	0.1	283	41 000	Fundición a troquel
Z35540	93.4	4.0	2.5	0.04	0.1	359	52 000	Fundición a troquel
Z35635	91.0	8.0	1.0	0.02	0.06	374	54 000	Aleación de fundición
Z35840	70.9	27.0	2.0	0.02	0.07	425	62 000	Aleación de fundición
Z45330	98.9		1.0	0.01		227	33 000	Aleación rolada

Recopilada a partir de la referencia [10].

^a UNS – United Numbering System para metales.

Aleaciones y aplicaciones del zinc Las aleaciones de zinc se utilizan mucho en fundición a troquel para producir componentes en masa para las industrias automotriz y de aparatos. Otra aplicación mayor del zinc se tiene en el acero galvanizado. Como el nombre lo sugiere, se crea una celda galvánica en el acero galvanizado (el Zn es el ánodo y el acero el cátodo) que lo protege del ataque de la corrosión. Por último, el tercer uso importante del zinc es para producir latón. Como ya se dijo, esa aleación consiste en cobre y zinc, en la razón de 2/3 de Cu y 1/3 de Zn, aproximadamente. El latón se estudió en el análisis del cobre. En la tabla 6.14 se enlistan varias aleaciones de zinc, con datos sobre su composición, resistencia a la tensión y aplicaciones.

6.3.7 El plomo y el estaño

Es frecuente que el plomo (Pb) y el estaño (Sn) se estudien juntos debido a sus temperaturas de fusión bajas, y porque forman aleaciones para soldar que se emplean para hacer conexiones eléctricas. En la figura 6.3 se presenta el diagrama de fase del sistema estaño-plomo. Los datos básicos para ambos metales se enlistan en la tabla 6.1h).

El plomo es un metal denso con punto de fusión bajo; otras de sus propiedades son resistencia baja, poca dureza (la palabra “suave” es apropiada para describirlo), ductilidad alta y buena resistencia a la corrosión. Además de su empleo como soldadura, las aplicaciones del plomo y sus aleaciones incluyen las siguientes: tubos para plomería, rodamientos, municiones, metales tipográficos, protección contra rayos X, baterías de almacenamiento y amortiguamiento de vibraciones. También se utiliza mucho en productos químicos y pinturas. Los elementos de aleación principales para el plomo son estaño y antimonio.

El estaño tiene un punto de fusión aún más bajo que el del plomo; otras propiedades incluyen resistencia baja, poca dureza y ductilidad buena. El uso más temprano del estaño fue para hacer bronce, aleación que consistía en cobre y estaño creada alrededor de 3000 a.C. en Mesopotamia y Egipto. El bronce aún es una aleación de importancia comercial (aunque su importancia relativa ha declinado a lo largo de 5 000 años). Otros usos del estaño son para recubrir contenedores de lámina de acero (“latas de estaño”) para almacenar comida y, por supuesto, como metal de soldadura.

TABLA 6.1 (continuación); h) Plomo y estaño.

	Plomo	Tin = Estaño
Símbolo:	Pb	Sn
Número atómico:	82	50
Gravedad específica:	11.35	7.30
Estructura cristalina:	FCC	HCP
Temperatura de fusión:	327 °C (621 °F)	232 °C (449 °F)
Módulo de elasticidad:	21 000 MPa (3×10^6 lb/in ²)	42 000 MPa (6×10^6 lb/in ²).
Mineral del que se extrae:	Galena (PbS)	Casiterita (SnO ₂).
Elementos comunes de aleación:	Estaño, antimonio	Plomo, cobre
Aplicaciones comunes:	Véase el texto	Bronce, soldadura, latas de estaño.

TABLA 6.1 (continuación); i) metales refractarios.

	Molibdeno	Tungsteno
Símbolo:	Mo	W
Número atómico:	42	74
Gravedad específica:	10.2	19.3
Estructura cristalina:	BCC	BCC
Temperatura de fusión:	2 619 °C (4 730 °F)	3 400 °C (6 150 °F)
Módulo de elasticidad:	324 000 MPa (47×10^6 lb/in ²)	407 000 MPa (59×10^6 lb/in ²).
Minerales principales:	Molibdenita (MoS ₂)	Scheelita (CaWO ₄), wolframita ((Fe,Mn)WO ₄).
Elementos de aleación:	Véase el texto	^a
Aplicaciones:	Véase el texto	Filamentos luminosos, piezas para motores a reacción, equipos para WC.

^a El tungsteno se emplea como metal puro e ingrediente de aleaciones, pero pocas de éstas se basan en el W.

6.3.8 Metales refractarios

Los **metales refractarios** son aquellos capaces de soportar temperaturas elevadas. Los más importantes de este grupo son el molibdeno y el tungsteno; véase la tabla 6.1i). Otros metales refractarios son el columbio (Cb) y el tantalio (Ta). En general, estos metales y sus aleaciones pueden conservar una resistencia y dureza elevadas a temperaturas altas.

El molibdeno tiene un punto de fusión alto y es relativamente denso, rígido y fuerte. Se usa como metal puro (99.9% + % Mo) y como aleación. La aleación principal es TZM, que contiene cantidades pequeñas de titanio y zirconio (menos de 1% del total). El Mo y sus aleaciones poseen buena resistencia a alta temperatura, y a esto se deben sus tantas aplicaciones, que incluyen escudos contra el calor, elementos de calefacción, electrodos para soldadura por resistencia, troqueles para trabajos a altas temperaturas (por ejemplo, moldes para fundición a troquel) y piezas para motores de cohete y a reacción. Además de estas aplicaciones, el molibdeno también se emplea mucho como ingrediente de aleación de otros metales, como aceros y superaleaciones.

El tungsteno (W) tiene el punto de fusión más alto de todos los metales puros y es uno de los más densos. Es también el más rígido y duro de todos los metales puros. Su aplicación más conocida es el filamento de los focos incandescentes. Es común que las aplicaciones del tungsteno se caractericen por temperaturas de operación elevadas, tales como elementos para cohetes y motores a reacción, y electrodos de soldadura con arco. También se utiliza mucho como elemento de aleaciones de aceros para herramientas, resistentes al calor, y para el carburo de tungsteno (véase la sección 7.3.2).

Una desventaja grande tanto del Mo como del W es su propensión a oxidarse a temperaturas elevadas, por arriba de los 600 °C (1 000 °F), con lo que se perjudican sus propiedades de alta temperatura. Con el fin de superar esta deficiencia, deben emplearse recubrimientos protectores para estos metales en las aplicaciones de alta temperatura, o bien operar las piezas metálicas en un vacío. Por ejemplo, el filamento de tungsteno debe energizarse en el vacío interior de los focos.

6.3.9 Metales preciosos

Los metales preciosos, también llamados **metales nobles** debido a que son inactivos en cuanto a la química, incluyen el oro, platino y plata. Son metales atractivos, disponibles en cantidades limitadas, y a través de la historia de las civilizaciones se han empleado para acuñar monedas y respaldar el papel moneda. También se les usa mucho en joyería y aplicaciones similares que aprovechan su alto valor. Como grupo, los metales preciosos poseen densidad elevada, ductilidad buena, conductividad eléctrica alta, resistencia a la corrosión y temperaturas de fusión moderadas; véase la tabla 6.1j.

TABLA 6.1 (continuación); j) los metales preciosos.

	Oro	Platino	Plata
Símbolo:	Au	Pt	Ag
Número atómico:	79	78	47
Gravedad específica:	19,3	21,5	10,5
Estructura cristalina:	FCC	FCC	FCC
Temperatura de fusión:	1 063 °C (1 945 °F)	1 769 °C (3 216 °F)	961 °C (1 762 °F)
Minerales principales:	^a	^a	^a
Elementos de aleación:	^b	^b	^b
Aplicaciones:	Véase el texto	Véase el texto	Véase el texto

^a Todos los metales preciosos se obtienen de depósitos en los que el metal puro está mezclado con otros minerales y metales. La plata también se extrae del mineral *argentita* (Ag₂S).

^b Los metales preciosos por lo general no se alean.

El **oro** (Au) es uno de los metales más pesados; es suave y se le da forma con facilidad, y posee un color amarillo distintivo que le agrega valor. Además de la moneda y joyería, sus aplicaciones incluyen contactos eléctricos (debido a su buena conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión), trabajos dentales y recubrimiento de metales comunes para fines decorativos.

El **platino** (Pt) es el único metal (entre los comunes) cuya densidad es mayor que la del oro. Aunque no se usa tanto como éste, sus aplicaciones son diversas e incluyen la joyería, termopares, contactos eléctricos y equipo catalítico para el control de la contaminación de los automóviles.

La **plata** (Ag) es menos cara por unidad de peso que el oro o el platino. No obstante, su atractivo lustre “plateado” la hace un metal muy valioso para monedas, joyería y vajillas (que incluso adoptan el nombre del metal: “platería”). También se emplea como relleno en trabajos dentales. La plata tiene la conductividad eléctrica más elevada que cualquier metal, lo que la hace útil para contactos en aplicaciones electrónicas. Por último, debe mencionarse que el cloruro de plata y otros haluros del metal sensibles a la luz son la base de la fotografía.

6.4 SUPERALEACIONES

Las superaleaciones constituyen una categoría que encuadra a los metales ferrosos y no ferrosos. Algunas de ellas están basadas en el hierro, mientras otras lo están en el níquel y el cobalto. En realidad, muchas de las superaleaciones contienen cantidades sustanciales de tres o más metales, en lugar de un solo metal base más elementos de aleación. No obstante que el tonelaje de estos metales no es significativo en comparación con la mayoría de los demás metales que se han estudiado en este capítulo, tienen importancia comercial porque son muy caros; y también la tienen en cuanto a tecnología por lo que hacen.

Las **superaleaciones** son un grupo de aleaciones de alto rendimiento diseñadas para satisfacer requerimientos muy exigentes de fortaleza y resistencia a la degradación de su superficie (corrosión y oxidación) a varias temperaturas de uso. Para estos metales, la resistencia a la temperatura ambiente convencional no es un criterio importante, y la mayoría de ellos tiene propiedades al respecto que son buenas pero no extraordinarias. Lo que los distingue es su desempeño ante temperaturas elevadas; las propiedades mecánicas de interés son su resistencia a la tensión, dureza en caliente, resistencia al agrietamiento, y a la corrosión a temperaturas muy elevadas. Es frecuente que las temperaturas de operación estén en la cercanía de los 1 100 °C (2 000 °F). Estos metales se emplean mucho en sistemas de turbinas de gas, motores a reacción y de cohetes, turbinas de vapor, y plantas de energía nuclear, en los que la eficiencia de operación se incrementa con las temperaturas elevadas.

TABLA 6.15 Algunas composiciones comunes de las superaleaciones.

Superalación	Análisis químico, % ^a							
	Fe	Ni	Co	Cr	Mo	W	Nb	Otros ^b
Basada en el hierro								
Incoloy 802	46	32		21				< 1
Haynes 556	29	20	20	22	3			6
Basada en el níquel								
Incoloy 807	25	40	8	21		5		1
Inconel 718	18	53		19	3		5	1
Rene 41		55	11	19	1			3
Hastelloy S	1	67		16	15			1
Nimonic 75	3	76		20				< 1
Basada en el cobalto								
Stellite 6B	3	3	53	30	2	5		4
Haynes 188	3	22	39	22		14		
L-605		10	53	20		15		2

Recopilada a partir de la referencia [10].

^a Composición dada al porcentaje más cercano; los porcentajes menores que 1 se indican como <1.

^b Otros elementos incluyen: carbono, tungsteno, manganeso y silicio.

Por lo general, las superaleaciones se dividen en tres grupos, de acuerdo con su constituyente principal: hierro, níquel o cobalto.

- **Aleaciones basadas en el hierro.** Como ingrediente principal tienen hierro, aunque en ciertos casos éste es menor de 50% de la composición total.
- **Aleaciones basadas en el níquel.** Por lo general tienen mejor resistencia a las temperaturas altas que los aceros aleados. El níquel es el metal base. Los elementos principales de la aleación son el cromo y el cobalto; otros menores son el aluminio, titanio, molibdeno, niobio (Nb) y hierro. Algunos nombres familiares en este grupo son los de Inconel, Hastelloy y Rene 41.
- **Aleaciones basadas en el cobalto.** Tienen al cobalto (alrededor del 40%) y cromo (quizá el 20%) como sus componentes principales. Otros elementos de la aleación incluyen al níquel, molibdeno y tungsteno.

En prácticamente todas las superaleaciones, inclusive las basadas en hierro, el darle resistencia se lleva a cabo mediante endurecimiento por precipitación. Las superaleaciones con base en el hierro no usan la formación de martensita para obtener su resistencia. En la tabla 6.15 se presentan las composiciones comunes para algunas de las aleaciones, en tanto que las propiedades de resistencia de ellas a temperaturas ambiente y elevada se muestran en la tabla 6.16.

6.5 GUÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE METALES

Se dispone de una variedad amplia de procesos de manufactura para dar forma a los metales, mejorar sus propiedades, ensamblarlos y darles un acabado estético y protector.

Dar forma, ensamblar y procesos de acabado Los metales reciben su forma por medio de todos los procesos básicos, inclusive fundición, metalurgia de polvos, procesos de deformación y remoción de material. Además, las piezas metálicas se unen para formar ensambles por procesos tales como soldadura autógena, soldadura dura y soldadura suave, y sujeción mecánica. El tratamiento térmico se lleva a cabo para mejorar las propiedades. Y es común que los procesos de acabado se utilicen para mejorar la apariencia de las piezas metálicas o para dar protección contra la corrosión. Estas operaciones de acabado incluyen

TABLA 6.16 Propiedades de resistencia de las superaleaciones a temperatura ambiente y a 870 °C (1 600 °F).

Superaleación	Resistencia a la tensión a temperatura ambiente		Resistencia a la tensión a 870 °C (1 600 °F)	
	MPa	lb/in ²	MPa	lb/in ²
Basada en el hierro				
Incoloy 802	690	100 000	195	28 000
Haynes 556	815	118 000	330	48 000
Basada en el níquel				
Incoloy 807	655	95 000	220	32 000
Inconel 718	1 435	208 000	340	49 000
Rene 41	1 420	206 000	620	90 000
Hastelloy S	845	130 000	340	50 000
Nimonic 75	745	108 000	150	22 000
Basada en el cobalto				
Stellite 6B	1 010	146 000	385	56 000
Haynes 188	960	139 000	420	61 000
L-605	1 005	146 000	325	47 000

Recopilada a partir de la referencia [9].

la galvanoplastia y la pintura. En la tabla 6.17 se da un resumen de las muchas tecnologías de procesamiento que se describen en este libro.

Mejoramiento de las propiedades mecánicas de los metales Las propiedades mecánicas de los metales se alteran por medio de cierto número de técnicas. En el estudio de los distintos metales se ha hecho referencia a algunas de éstas. Los métodos para mejorar las propiedades mecánicas de los metales se agrupan en tres categorías: 1) aleación, 2) trabajo en frío, y 3) tratamiento térmico. La **aleación** se ha estudiado en todo el capítulo presente y es una técnica importante para dar resistencia a los metales. Al **trabajo en frío** se había hecho referencia como endurecimiento por deformación; su efecto es incrementar la resistencia y reducir la ductilidad. El grado en que estas propiedades mecánicas se ven afectadas depende de la cantidad de deformación y del exponente de endurecimiento por deformación en la curva de flujo, descrita por la ecuación (3.10). El trabajo en frío se utiliza tanto en metales puros como en aleaciones. Se realiza durante la deformación del elemento de trabajo a través de uno de los procesos para dar forma, por ejemplo rolado, forjado o extrusión. Entonces, el dar resistencia a los metales ocurre como subproducto de la operación de darles forma.

El **tratamiento térmico** se refiere a varios tipos de ciclos de calentamiento y enfriamiento que se ejecutan sobre un metal para cambiar en forma benéfica sus propiedades. Operan con la alteración de la microestructura básica del metal, que a su vez determina las propiedades mecánicas. Algunas de las operaciones de tratamiento térmico sólo son apli-

TABLA 6.17 Procesos de la manufactura de metales.

Proceso	Capítulo	Proceso	Capítulo
Fundición	10 y 11	Tratamiento térmico	27
Metalurgia de polvos	16	Limpieza y tratamientos superficiales	28
Procesos de formado:	18	Procesos de recubrimiento	29
Forjado	19	Procesos de ensamblado	
Laminado	20	Soldadura autógena	30 y 31
Procesos de remoción de material:		Soldadura dura y soldadura suave	32
Maquinado convencional	21 y 22	Ensamblado mecánico	33
Procesos abrasivos	25		
Procesos no tradicionales	26		

cables a cierto tipo de metales; por ejemplo, el tratamiento térmico del acero para formar martensita es algo especializado, toda vez que la martensita es exclusiva del acero. En el capítulo 27 se describen los tratamientos térmicos.

REFERENCIAS

- [1] Baucchio, M. (ed.). *ASM Metals Reference Book*, 3a. ed. ASM International, Materials Park, Ohio, 1993.
- [2] Brick, R. M., Pense, A. W. y Gordon, R. B. *Structure and Properties of Engineering Materials*, 4a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1977.
- [3] Carnes, R. y Maddock, G., "Tool Steel Selection", *Advanced Materials & Processes*, junio de 2004, pp. 37-40.
- [4] *Encyclopaedia Britannica*, vol. 21, *Macropaedia*. Encyclopaedia Britannica, Inc., Chicago, 1990, en la sección: Industries, Extraction and Processing.
- [5] Flinn, R. A. y Trojan, P. K. *Engineering Materials and Their Applications*, 5a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.
- [6] Guy, A. G. y Hren, J. J. *Elements of Physical Metallurgy*, 3a. ed. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts, 1974.
- [7] Hume-Rothery, W., Smallman, R. E. y Haworth, C. W. *The Structure of Metals and Alloys*. Institute of Materials, Londres, Inglaterra, 1988.
- [8] Lankford, W. T., Jr., Samways, N. L., Craven, R. F. y McGannon, H. E. *The Making, Shaping, and Treating of Steel*, 10a. ed. United States Steel Co., Pittsburgh, Pennsylvania, 1985.
- [9] *Metals Handbook*, 10a. ed., vol. 1, *Properties and Selection: Iron, Steels, and High Performance Alloys*. ASM International, Metals Park, Ohio, 1990.
- [10] *Metals Handbook*, 10a. ed., vol. 2, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*, ASM International, Metals Park, Ohio, 1990.
- [11] Moore, C. y Marshall, R. I. *Steelmaking*. The Institute for Metals, The Bourne Press, Ltd., Bournemouth, U. K., 1991.
- [12] Wick, C. y Veilleux, R. F. (eds.). *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., vol. 3, *Materials, Finishing, and Coating*. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1985.

PREGUNTAS DE REPASO

- 6.1. ¿Cuáles son algunas de las propiedades generales que distinguen a los metales de los materiales cerámicos y polímeros?
- 6.2. ¿Cuáles son los dos grupos principales de metales? Defínalos.
- 6.3. ¿Qué es una aleación?
- 6.4. ¿Qué es una solución sólida en el contexto de las aleaciones?
- 6.5. Diga la diferencia entre una solución sólida sustitucional y otra intersticial.
- 6.6. ¿Qué es una fase intermedia en el contexto de las aleaciones?
- 6.7. El sistema cobre-níquel es un sistema de aleación sencillo, como lo indica su diagrama de fase. ¿Por qué es tan sencillo?
- 6.8. ¿Cuál es el rango de los porcentajes de carbono que definen como acero a una aleación de hierro-carbono?
- 6.9. ¿Cuál es el rango de los porcentajes de carbono que definen como hierro colado a una aleación de hierro-carbono?
- 6.10. Identifique algunos de los elementos comunes de aleación, además del carbono, en los aceros de baja aleación.
- 6.11. ¿Cuáles son algunos de los mecanismos por medio de los que los elementos de aleación diferentes del carbono dan resistencia al acero?
- 6.12. ¿Cuál es el mecanismo por el que el carbono da resistencia al acero en ausencia de tratamiento térmico?
- 6.13. ¿Cuál es el elemento de aleación predominante en todos los aceros inoxidables?
- 6.14. ¿Por qué se llama así el acero inoxidable austenítico?
- 6.15. Además del alto contenido de carbono, ¿qué otros elementos de aleación son característicos del hierro colado?
- 6.16. Identifique algunas de las propiedades por las que es notable el aluminio.
- 6.17. ¿Cuáles son algunas de las propiedades más destacadas del magnesio?
- 6.18. ¿Cuál es la propiedad del cobre más importante para la ingeniería y que determina la mayor parte de sus aplicaciones?
- 6.19. ¿Cuáles elementos se alean por tradición con el cobre para formar a) bronce, y b) latón?
- 6.20. ¿Cuáles son las aplicaciones más importantes del níquel?
- 6.21. ¿Cuáles son las propiedades más notables del titanio?
- 6.22. Mencione algunas de las aplicaciones importantes del zinc.
- 6.23. ¿Cuál es la aleación importante que se forma con plomo y estaño?
- 6.24. a) Mencione los metales refractarios importantes. b) ¿Qué significa el término refractario?
- 6.25. a) Diga los cuatro metales nobles principales. b) ¿Por qué se les llama metales nobles?
- 6.26. Las superaleaciones se dividen en tres grupos básicos, de acuerdo con el metal base que se utiliza en la aleación. Mencione los grupos.
- 6.27. ¿Qué es lo que tienen de especial las superaleaciones? ¿Qué las distingue de las demás?
- 6.28. ¿Cuáles son los tres métodos básicos por medio de los cuales puede darse resistencia a los metales?