

Fundamentos de manufactura moderna

Tercera edición

**Mc
Graw
Hill**

Mikell P. Groover

FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA

Materiales, procesos y sistemas
Tercera edición

Mikell P. Groover

Profesor de ingeniería industrial
y de sistemas
Lehigh University

Revisión técnica:

Ing. Antonio Barrientos Morales

*Académico de Ingeniería Mecánica
Universidad Iberoamericana, Ciudad de México*

Ing. Javier León Cárdenas

*Jefe de Ingeniería Mecánica
Universidad La Salle, campus Ciudad de México*

Ing. Rosendo Reyes Rosales

*Coordinador de Talleres y Laboratorios de Ingeniería
Universidad La Salle, campus Ciudad de México*



MÉXICO • BOGOTÁ • BUENOS AIRES • CARACAS • GUATEMALA
LISBOA • MADRID • NUEVA YORK • SAN JUAN • SANTIAGO • SÃO PAULO
AUCKLAND • LONDRES • MILÁN • MONTREAL • NUEVA DELHI
SAN FRANCISCO • SINGAPUR • SAN LUIS • SIDNEY • TORONTO

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

PREFACIO

Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas está diseñado para un primer curso, o una serie de dos, de la materia de manufactura en los primeros años de los planes de estudio de las carreras de ingeniería mecánica, industrial y de manufactura. Dada su cobertura a los materiales de la ingeniería, también es apropiado para los cursos de ciencia e ingeniería de materiales que hacen énfasis en el procesamiento de materiales. Por último, es apropiado para programas de tecnología relacionados con las especialidades mencionadas de la ingeniería. La mayor parte del contenido del libro se relaciona con los procesos de manufactura (alrededor de 65% del texto), pero también da cobertura significativa a los materiales y sistemas de producción de la ingeniería. Los materiales, procesos y sistemas son los fundamentos básicos con los que se estructura la manufactura moderna, y en el libro se estudian esos tres grandes temas.

ENFOQUE

El objetivo del autor es tratar a la manufactura con un enfoque que es más **moderno** y **cuantitativo** que el de los libros de manufactura de otros autores. La afirmación de que es “moderno” se basa en que 1) cubre en forma más balanceada los materiales básicos de la ingeniería (metales, cerámicas, polímeros y materiales compuestos); 2) incluye procesos de manufactura desarrollados recientemente, además de los tradicionales que se han empleado y perfeccionado durante muchos años, y 3) su cobertura más completa de tecnologías de manufactura electrónica. Los libros de texto de otros autores tienden a hacer énfasis en los metales y su procesamiento, sin tomar mucho en cuenta los demás materiales de uso en la ingeniería cuyas aplicaciones y métodos de aprovechamiento han crecido en forma significativa en las últimas décadas. Por ejemplo, el volumen de polímeros que se comercian en el mundo de hoy, excede el de los metales procesados. Asimismo, otros libros cubren mínimamente la manufactura electrónica y sin embargo, la importancia comercial de los productos electrónicos y sus industrias asociadas se ha incrementado de manera sustancial durante las décadas más recientes.

La afirmación de que el libro es más “cuantitativo” que otros libros de texto de manufactura se basa en su énfasis en la ciencia de la manufactura y el gran uso que hace de ecuaciones y problemas cuantitativos (al final de cada capítulo). En el caso de ciertos procesos, fue el primer libro de procesos de manufactura que les dio un tratamiento cuantitativo de ingeniería.

LO NUEVO EN ESTA EDICIÓN

Esta tercera edición es una versión actualizada de la segunda, con un capítulo nuevo sobre procesos de fabricación con nanotecnología, y varias secciones actualizadas. El autor trata de ser exhaustivo en el contenido del libro, sin dejar que su tamaño sea excesivo. Entre los elementos clave de la edición nueva se incluyen los siguientes:

- Un capítulo nuevo sobre los procesos de fabricación con nanotecnología.
- Problemas de tarea nuevos y revisados, que en total suman 565. Casi todos requieren de un análisis cuantitativo.

- Preguntas de repaso nuevas y revisadas, así como cuestionarios de opción múltiple en todos los capítulos. Hay más de 740 preguntas de repaso al final de los capítulos y casi 500 de opción múltiple. Estas últimas se han reformulado para que sean más accesibles para el estudiante.
- En el libro se incluye un DVD para los profesores que así lo soliciten, que muestra videos de las acciones de muchos de los procesos de manufactura. Los capítulos se han actualizado para que incluyan referencias a ellos, y se han añadido preguntas al final de cada capítulo relacionadas con los videos.

Otros elementos clave

1. Secciones acerca de la **Guía del procesamiento** en cada uno de los cuatro capítulos sobre los materiales de ingeniería.
2. Secciones llamadas **Consideraciones sobre el diseño del producto** en muchos de los capítulos que tratan procesos de manufactura.
3. Hay **Notas históricas** en muchas de las tecnologías que se estudian.
4. Como en la segunda edición, en todo el libro se emplea el Sistema Internacional de Unidades (métrico), que más se usa en ingeniería, pero también se utiliza el Sistema de Unidades Tradicionales de Estados Unidos.

MATERIALES DE APOYO PARA LOS MAESTROS

Esta obra cuenta con interesantes complementos que fortalecen los procesos de enseñanza-aprendizaje, así como la evaluación de los mismos, los cuales se otorgan a profesores que adoptan este texto para sus cursos. Para obtener más información y conocer la política de entrega de estos materiales, contacte a su representante McGraw-Hill o envíe un correo electrónico a marketinghe@mcgraw-hill.com

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi agradecimiento a las personas siguientes, que fungieron como revisores técnicos de conjuntos individuales de los capítulos de la primera edición: Iftikhar Ahmad (George Mason University), J. T. Black (Auburn University), David Bourell (University of Texas en Austin), Paul Cotnoir (Worcester Polytechnic Institute), Robert E. Eppich (American Foundryman's Society), Osama Eyeda (Virginia Polytechnic Institute and State University), Wolter Fabricky (Virginia Polytechnic Institute and State University), Keith Gardiner (Lehigh University), R. Heikes (Georgia Institute of Technology), Jay R. Geddes (San Jose State University), Ralph Jaccodine (Lehigh University), Steven Liang (Georgia Institute of Technology), Harlan MacDowell (Michigan State University), Joe Mize (Oklahoma State University), Colin Moodie (Purdue University), Michael Philpott (University of Illinois en Champaign-Urbana), Corrado Poli (University of Massachusetts en Amherst), Chell Roberts (Arizona State University), Anil Saigal (Tufts University), G. Sathyanarayanan (Lehigh University), Malur Srinivasan (Texas A&M University), A. Brent Strong (Brigham Young University), Yonglai Tian (George Mason University), Gregory L. Tonkay (Lehigh University), Chester Van Tyne (Colorado School of Mines), Robert Voigt (Pennsylvania State University) y Charles White (GMI Engineering and Management Institute).

Por sus revisiones valiosas de ciertos capítulos de la segunda edición, agradezco a John T. Berry (Mississippi State University), Rajiv Shivpuri (Ohio State University), James B. Taylor (North Carolina State University). Joel Troxler (Montana State University) y Ampere A. Tseng (Arizona State University).

Por sus consejos y estímulos provechosos para la tercera edición, doy gracias a varios de mis colegas en Lehigh, entre quienes se encuentran John Coulter, Keith Gardiner, Andrew Herzing, Wojciech Misiolek, Nicholas Odrey, Gregory Tonkay y Marvin White. En especial agradezco a Andrew Herzing del Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales, de Lehigh, por la revisión que hizo del capítulo nuevo sobre nanofabricación, así como a Greg Tonkay, de mi propio departamento, por desarrollar muchos de los problemas y preguntas nuevas y actualizadas en esta nueva edición.

Además, es apropiado dar crédito a todos los colegas que participaron con sus consejos en la preparación de esta tercera edición. Las preguntas o comentarios individuales se pueden dirigir personalmente al autor, en la dirección Mikell.Groover@Lehigh.edu

ACERCA DEL AUTOR

Mikell P. Groover es profesor de Ingeniería Industrial y de Sistemas en Lehigh University, donde también funge como Director del Laboratorio de Tecnología de Manufactura, George E. Kane y es miembro del cuerpo docente del Programa de Ingeniería de Sistemas de Manufactura. Obtuvo grados de B.A. en Ciencias y Artes (1961), B.S. en Ingeniería Mecánica (1962), M.S. en Ingeniería Industrial (1966) y Ph. D. (1969), todos en Lehigh. Es Ingeniero Profesional Registrado en Pennsylvania. Su experiencia industrial incluye varios años como ingeniero de manufactura en Eastman Kodak Company. Desde que ingresó a Lehigh ha efectuado trabajos de consultoría, investigación y proyectos para varias compañías industriales.

Sus áreas de investigación y enseñanza incluyen procesos de manufactura, sistemas de producción, automatización, manejo de materiales, planeación de instalaciones y sistemas de trabajo. Ha obtenido varios premios por su enseñanza en Lehigh University, así como el *Albert G. Holzman Outstanding Educator Award*, del Institute of Industrial Engineers (1965) y el *SME Education Award*, de la Society of Manufacturing Engineers (2001). Entre sus publicaciones están 75 artículos técnicos y siete libros (que se mencionan más adelante). Sus textos se emplean en todo el mundo y han sido traducidos al francés, alemán, español, portugués, ruso, japonés, coreano y chino. La primera edición del texto presente, *Fundamentals of Modern Manufacturing*, recibió el *IIE Joint Publishers Award* (1996) y el *M. Eugene Merchant Manufacturing Textbook Award*, de la Society of Manufacturing Engineers (1996).

El Dr. Groover es miembro del Institute of Industrial Engineers, American Society of Mechanical Engineers (ASME), la Society of Manufacturing Engineers (SME), el North American Manufacturing Research Institute (NAMRI) y ASM International. Es miembro del IIE (1987) y del SME (1996).

OTROS LIBROS DEL AUTOR

Automation, Production Systems, and Computer-Aided Manufacturing. Prentice Hall, 1980.

CAD/CAM: Computer-Aided Design and Manufacturing. Prentice-Hall, 1984 (en colaboración con E. W. Zimmers, Jr.).

Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications. McGraw-Hill Book Company, 1986 (en colaboración con M. Weiss, R. Nagel y N. Odrey).

Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing. Prentice Hall, 1987.

Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, publicado originalmente por Prentice Hall en 1996, y después por John Wiley & Sons, Inc, en 1999.

Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing. Segunda edición, Prentice Hall, 2001.

Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. Segunda edición, John Wiley & Sons, Inc., 2002.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN Y PANORAMA DE LA MANUFACTURA	1	6.4	Superalcaciones	122
1.1	¿Qué es la manufactura?	2	6.5	Guía para el procesamiento de metales	123
1.2	Los materiales en la manufactura	8	7	CERÁMICOS	127
1.3	Procesos de manufactura	10	7.1	Estructura y propiedades de los cerámicos	129
1.4	Sistemas de producción	17	7.2	Cerámicos tradicionales	131
1.5	Organización del libro	20	7.3	Nuevos materiales cerámicos	133
Parte I	Propiedades de los materiales y atributos del producto	23	7.4	Vidrio	136
2	LA NATURALEZA DE LOS MATERIALES	23	7.5	Algunos elementos importantes relacionados con los cerámicos	139
2.1	Estructura atómica y los elementos	23	7.6	Guía para el procesamiento de los materiales cerámicos	142
2.2	Enlaces entre átomos y moléculas	26	8	POLÍMEROS	144
2.3	Estructuras cristalinas	28	8.1	Fundamentos de la ciencia y tecnología de los polímeros	147
2.4	Estructuras no cristalinas (amorfos)	34	8.2	Polímeros termoplásticos	156
2.5	Materiales de ingeniería	35	8.3	Polímeros termofijos	163
3	PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES	38	8.4	Elastómeros	167
3.1	Relaciones esfuerzo-deformación	39	8.5	Guía para el procesamiento de polímeros	174
3.2	Dureza	51	9	MATERIALES COMPUESTOS	176
3.3	Efecto de la temperatura sobre las propiedades	55	9.1	Tecnología y clasificación de los materiales compuestos	177
3.4	Propiedades de los fluidos	57	9.2	Compuestos de matriz metálica	185
3.5	Comportamiento viscoelástico de los polímeros	60	9.3	Compuestos de matriz cerámica	188
4	PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES	67	9.4	Compuestos de matriz de polímero	188
4.1	Propiedades volumétricas y de fusión	68	9.5	Guía para el procesamiento de los materiales compuestos	191
4.2	Propiedades térmicas	70	Parte III	Procesos de solidificación	194
4.3	Difusión de masa	72	10	FUNDAMENTOS DE LA FUNDICIÓN DE METALES	194
4.4	Propiedades eléctricas	74	10.1	Panorama de la tecnología de fundición	197
4.5	Procesos electroquímicos	75	10.2	Calentamiento y vertido	199
5	DIMENSIONES, TOLERANCIAS Y SUPERFICIES	79	10.3	Solidificación y enfriamiento	203
5.1	Dimensiones, tolerancias y atributos relacionados	80	11	PROCESOS DE FUNDICIÓN DE METALES	214
5.2	Superficies	81	11.1	Fundición en arena	215
5.3	Efecto de los procesos de manufactura	87	11.2	Otros procesos de fundición con moldes desechables	220
Parte II	Materiales de la ingeniería	90	11.3	Procesos de fundición con moldes permanentes	226
6	Metales	90	11.4	La práctica de la fundición	234
6.1	Aleaciones y diagramas de fase	91	11.5	Calidad del fundido	238
6.2	Metales ferrosos	96			
6.3	Metales no ferrosos	111			

11.6	Los metales para fundición	240
11.7	Consideraciones sobre el diseño del producto	242
12	TRABAJO DEL VIDRIO	247
12.1	Preparación y fundición de las materias primas	247
12.2	Los procesos de conformación en el trabajo del vidrio	248
12.3	Tratamiento térmico y acabado	254
12.4	Consideraciones sobre el diseño del producto	255
13	PROCESOS DE CONFORMADO PARA PLÁSTICOS	257
13.1	Propiedades de los polímeros fundidos	259
13.2	Extrusión	261
13.3	Producción de hojas y película	271
13.4	Producción de fibras y filamentos (hilado o hilandería)	273
13.5	Procesos de recubrimiento	275
13.6	Moldeo por inyección	275
13.7	Moldeo por compresión y transferencia	286
13.8	Moldeo por soplado y moldeo rotacional	288
13.9	Termoformado	293
13.10	Fundición	297
13.11	Procesamiento y formado de espuma de polímero	298
13.12	Consideraciones sobre el diseño del producto	300
14	TECNOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DEL CAUCHO (HULE)	307
14.1	Procesamiento y formado del caucho	307
14.2	Manufactura de llantas y otros productos de caucho	313
14.3	Consideraciones sobre el diseño del producto	316
15	PROCESOS DE FORMADO PARA MATERIALES COMPUESTOS CON MATRIZ POLIMÉRICA	319
15.1	Materias primas para materiales compuestos con matriz polimérica (PMC)	321
15.2	Procesos con molde abierto	324
15.3	Procesos con molde cerrado	327
15.4	Bobinado de filamentos	330
15.5	Procesos de pultrusión	332
15.6	Otros procesos de formado para PMC	333

Parte IV Procesamiento de partículas para metales y cerámicos 337

16	METALURGIA DE POLVOS	337
16.1	Características de los polvos en ingeniería	340
16.2	Producción de polvos metálicos	343
16.3	Prensado convencional y sinterizado	345
16.4	Alternativas de prensado y técnicas de sinterizado	351
16.5	Materiales y productos para metalurgia de polvos	354
16.6	Consideraciones de diseño en metalurgia de polvos	355

17 PROCESAMIENTO DE CERÁMICAS Y CERMETS 362

17.1	Procesamiento de cerámicas tradicionales	363
17.2	Procesamiento de cerámicas nuevas	370
17.3	Procesamiento de cermets	373
17.4	Consideraciones para el diseño de productos	375

Parte V Formado de metal y trabajo de láminas metálicas 378

18 FUNDAMENTOS DEL FORMADO DE METALES 378

18.1	Panorama del formado de metales	378
18.2	Comportamiento del material en el formado de metales	381
18.3	Temperatura en el formado de metales	382
18.4	Sensibilidad a la velocidad de deformación	384
18.5	Fricción y lubricación en el formado de metales	386

19 PROCESOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA EN EL TRABAJO DE METALES 390

19.1	Laminado	391
19.2	Otros procesos de deformación relacionados con el laminado	398
19.3	Forjado	400
19.4	Otros procesos de deformación relacionados con el forjado	412
19.5	Extrusión	416
19.6	Estirado de alambres y barras	427

20 TRABAJADO METÁLICO DE LÁMINAS 440

20.1	Operaciones de corte	441
20.2	Operaciones de doblado	448
20.3	Embutido	452
20.4	Otras operaciones de formado de láminas metálicas	459
20.5	Troqueles y prensas para procesos con láminas metálicas	462
20.6	Operaciones con láminas metálicas no realizadas en prensas	469
20.7	Doblado de material tubular	474

Parte VI Procesos de remoción de material 481

21 TEORÍA DE MAQUINADO DE METALES 481

21.1	Panorama general de la tecnología del maquinado	483
21.2	Teoría de la formación de viruta en el maquinado de metales	486
21.3	Relaciones de fuerza y la ecuación de Merchant	490
21.4	Relaciones entre potencia y energía en el maquinado	495
21.5	Temperatura de corte	498

22 OPERACIONES DE MAQUINADO Y MÁQUINAS HERRAMIENTA 505

- 22.1 Torneado y operaciones afines 508
- 22.2 Taladrado y operaciones afines 518
- 22.3 Fresado 522
- 22.4 Centros de maquinado y centros de torneado 529
- 22.5 Otras operaciones de maquinado 531
- 22.6 Maquinado de alta velocidad 536

23 TECNOLOGÍA DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE 542

- 23.1 Vida de las herramientas 543
- 23.2 Materiales para herramientas 549
- 23.3 Configuración geométrica de las herramientas 558
- 23.4 Fluidos para corte 566

24 CONSIDERACIONES ECONÓMICAS Y PARA EL DISEÑO DEL PRODUCTO EN MAQUINADO 574

- 24.1 Maquinabilidad 574
- 24.2 Tolerancias y acabado superficial 577
- 24.3 Selección de las condiciones de corte 581
- 24.4 Consideraciones para el diseño del producto en maquinado 587

25 ESMERILADO Y OTROS PROCESOS ABRASIVOS 594

- 25.1 Esmerilado 595
- 25.2 Procesos abrasivos relacionados 612

26 PROCESO DE MAQUINADO NO TRADICIONAL Y DE CORTE TÉRMICO 618

- 26.1 Procesos de energía mecánica 619
- 26.2 Procesos de maquinado electroquímico 623
- 26.3 Procesos de energía térmica 627
- 26.4 Maquinado químico 635
- 26.5 Consideraciones para la aplicación 641

Parte VII Operaciones para la mejora de propiedades y el procesamiento superficial 647

27 TRATAMIENTO TÉRMICO DE METALES 647

- 27.1 Recocido 648
- 27.2 Formación de martensita en el acero 648
- 27.3 Endurecimiento por precipitación 652
- 27.4 Endurecimiento superficial 654
- 27.5 Métodos e instalaciones para el tratamiento térmico 655

28 LIMPIEZA Y TRATAMIENTOS SUPERFICIALES 660

- 28.1 Limpieza química 660
- 28.2 Limpieza mecánica y preparación superficial 663
- 28.3 Difusión e implantación iónica 665

29 PROCESOS DE RECUBRIMIENTO Y DEPOSICIÓN 669

- 29.1 Chapeado y procesos relacionados 670
- 29.2 Recubrimientos por conversión 674
- 29.3 Deposición física de vapor 675
- 29.4 Deposición química de vapor 678
- 29.5 Recubrimientos orgánicos 681
- 29.6 Esmaltado en porcelana y otros recubrimientos cerámicos 683
- 29.7 Procesos de recubrimiento térmicos y mecánicos 684

Parte VIII Procesos de unión y ensamble 689

30 FUNDAMENTOS DE SOLDADURA 689

- 30.1 Perspectiva de la tecnología de la soldadura 691
- 30.2 Unión soldada 693
- 30.3 Física de la soldadura 696
- 30.4 Características de una junta soldada por fusión 699

31 PROCESOS DE SOLDADURA 705

- 31.1 Soldadura con arco 706
- 31.2 Soldadura por resistencia 716
- 31.3 Soldadura con oxígeno y gas combustible 723
- 31.4 Otros procesos de soldadura por fusión 726
- 31.5 Soldadura de estado sólido 729
- 31.6 Calidad de la soldadura 734
- 31.7 Soldabilidad 739

32 SOLDADURA DURA, SOLDADURA SUAVE Y PEGADO ADHESIVO 745

- 32.1 Soldadura dura 746
- 32.2 Soldadura suave 751
- 32.3 Pegado adhesivo 755

33 ENSAMBLE MECÁNICO 763

- 33.1 Sujetadores roscados 764
- 33.2 Remaches y ojillos 770
- 33.3 Métodos de ensamble basados en ajustes por interferencia 772
- 33.4 Otros métodos de sujeción mecánica 775
- 33.5 Insertos en moldeado y sujetadores integrales 776
- 33.6 Diseño para ensambles 778

Parte IX Procesamiento especial y tecnologías de ensamble 784

34 CREACIÓN RÁPIDA DE PROTOTIPOS 784

- 34.1 Fundamentos de la creación rápida de prototipos 785
- 34.2 Tecnologías para la creación rápida de prototipos 786
- 34.3 Aspectos de aplicación en la creación rápida de prototipos 794

35 PROCESAMIENTO DE CIRCUITOS INTEGRADOS 798

- 35.1 Panorama del procesamiento de CI 799
- 35.2 Procesamiento del silicio 803
- 35.3 Litografía 807
- 35.4 Procesos de formación de capas en la fabricación de CI 811
- 35.5 Integración de los pasos de fabricación 818
- 35.6 Encapsulado de CI 820
- 35.7 Rendimientos en el procesamiento de CI 825

36 ENSAMBLE Y ENCAPSULADO DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS 830

- 36.1 Encapsulado de dispositivos electrónicos 830
- 36.2 Tableros de circuitos impresos 832
- 36.3 Ensamble de tableros de circuitos impresos 841
- 36.4 Tecnología de montaje superficial 845
- 36.5 Tecnología de conectores eléctricos 850

37 TECNOLOGÍAS DE MICROFABRICACIÓN 855

- 37.1 Productos de microsistemas 855
- 37.2 Procesos de microfabricación 861

38 TECNOLOGÍAS DE NANOFABRICACIÓN 870

- 38.1 Introducción a la nanotecnología 872
- 38.2 Procesos de nanofabricación 877
- 38.3 La national nanotechnology initiative 884

Parte X Sistemas de manufactura 887

39 CONTROL NUMÉRICO Y ROBÓTICA INDUSTRIAL 887

- 39.1 Control numérico 888
- 39.2 Robótica industrial 900

40 TECNOLOGÍA DE GRUPOS Y SISTEMAS FLEXIBLES DE MANUFACTURA 910

- 40.1 Tecnología de grupos 910
- 40.2 Sistemas flexibles de manufactura 915

41 LÍNEAS DE PRODUCCIÓN 922

- 41.1 Fundamentos de las líneas de producción 922
- 41.2 Líneas de ensamble manual 926
- 41.3 Líneas de producción automatizadas 930

Parte XI Sistemas de apoyo a la manufactura 937

42 INGENIERÍA DE MANUFACTURA 937

- 42.1 Planeación de procesos 938
- 42.2 Solución de problemas y mejora continua 946
- 42.3 Ingeniería concurrente y diseño para la manufacturabilidad 946

43 PLANEACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN 953

- 43.1 Planeación agregada y el programa maestro de producción 955
- 43.2 Control de inventarios 956
- 43.3 Planeación de requerimientos de materiales y de capacidad 960
- 43.4 Producción justo a tiempo y ajustada 964
- 43.5 Control de piso del taller 967

44 CONTROL DE CALIDAD 972

- 44.1 ¿Qué es la calidad? 972
- 44.2 Capacidad del proceso 973
- 44.3 Tolerancia estadística 974
- 44.4 Métodos de Taguchi 977
- 44.5 Control estadístico de procesos 980

45 MEDICIÓN E INSPECCIÓN 989

- 45.1 Metrología 990
- 45.2 Principios de inspección 993
- 45.3 Instrumentos de medición y calibradores convencionales 995
- 45.4 Mediciones de superficies 1002
- 45.5 Tecnologías avanzadas de medición e inspección 1004

ÍNDICE 1015

Parte I

Propiedades de los materiales y atributos del producto

2

LA NATURALEZA DE LOS MATERIALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 2.1 Estructura atómica y los elementos
- 2.2 Enlaces entre átomos y moléculas
- 2.3 Estructuras cristalinas
 - 2.3.1 Tipos de estructuras cristalinas
 - 2.3.2 Imperfecciones en cristales
 - 2.3.3 Deformación en cristales metálicos
 - 2.3.4 Granos y límites de grano en metales
- 2.4 Estructuras no cristalinas (amorfas)
- 2.5 Materiales de ingeniería

La comprensión de los materiales es fundamental en el estudio de los procesos de manufactura. En el capítulo 1, se definió la manufactura como un proceso de transformación. Es el material lo que se transforma; y lo que determina el éxito de la operación es cómo éste se comporta cuando cumple con los requerimientos de resistencia a fuerzas, temperaturas y otros parámetros físicos particulares. Se observa que algunos materiales responden bien a ciertos tipos de procesos de manufactura, y mal, o nada, a otros. ¿Cuáles son las características y propiedades de los materiales que determinan su capacidad para transformarse a través de procesos diferentes?

En este capítulo se estudia la estructura atómica de la materia, y los enlaces entre los átomos y las moléculas. También se analiza la manera en que los átomos y moléculas de los materiales de ingeniería se organizan por sí solos en dos formas estructurales: cristalina y no cristalina. Se verá que los materiales básicos de ingeniería —metales, cerámicas y polímeros— existen en cualquier forma, aunque por lo general cada material tiene una tendencia para adoptar alguna forma en particular. Por ejemplo, los metales en estado sólido casi siempre existen como cristales. El vidrio, por ejemplo, el utilizado en las ventanas, y otros cerámicos, adoptan una forma no cristalina.

2.1 ESTRUCTURA ATÓMICA Y LOS ELEMENTOS

La unidad estructural fundamental de la materia es el átomo. Cada átomo está compuesto de un núcleo con carga positiva, rodeado por un número suficiente de electrones con carga

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

FIGURA 2.1 Tabla periódica de los elementos. Los símbolos y números atómicos están listados para los 103 elementos.

negativa de modo que las cargas quedan balanceadas. El número de electrones identifica el número atómico y el elemento del átomo. Hay poco más de 100 elementos (sin contar unos cuantos adicionales que se han sintetizado artificialmente), que constituyen los fundamentos químicos de toda la materia.

Así como existen diferencias entre los elementos, también hay similitudes. Los elementos se agrupan en familias y en relaciones que se establecen entre las familias y dentro de ellas por medio de la tabla periódica, la cual se muestra en la figura 2.1. En dirección horizontal hay cierta repetición o periodicidad en la disposición de los elementos. Los elementos metálicos ocupan la porción izquierda y central de la tabla; los no metálicos se ubican a la derecha. Entre ellos y a lo largo de una diagonal, hay una zona de transición que contiene los elementos llamados *metaloides* o *semimetales*. En principio, cada elemento puede existir como sólido, líquido o gas, dependiendo de la temperatura y la presión. A temperatura y presión atmosféricas ambientes, cada uno de ellos tiene una fase natural; por ejemplo, el hierro (Fe) es un sólido, el mercurio (Hg) es un líquido y el nitrógeno (N) es un gas.

Los elementos en la tabla están dispuestos en columnas verticales y en filas horizontales de tal manera que existen semejanzas entre los elementos que están en la misma columna. En la columna de la extrema derecha, por ejemplo, están los *gases nobles* (helio, neón, argón, kriptón, xenón y radón), todos los cuales presentan gran estabilidad química y una tasa de reacción baja. Los *halógenos* (flúor, cloro, bromo, yodo y astato) ubicados en la columna VIIA, comparten propiedades similares (el hidrógeno no está incluido en los halógenos). Los *metales nobles* (cobre, plata y oro) en la columna IB tienen propiedades semejantes. Por lo general hay correlaciones entre las propiedades de los elementos en una columna dada, en tanto que existen diferencias entre los elementos que están en columnas distintas.

Muchas de las similitudes y diferencias entre los elementos pueden explicarse por sus respectivas estructuras atómicas. El modelo de estructura atómica más simple, que se conoce como modelo planetario, muestra los electrones de los átomos orbitando alrededor del núcleo a ciertas distancias fijas, denominadas capas, como se muestra en la figura 2.2. El átomo de hidrógeno (número atómico 1) tiene un electrón en la órbita más cercana al

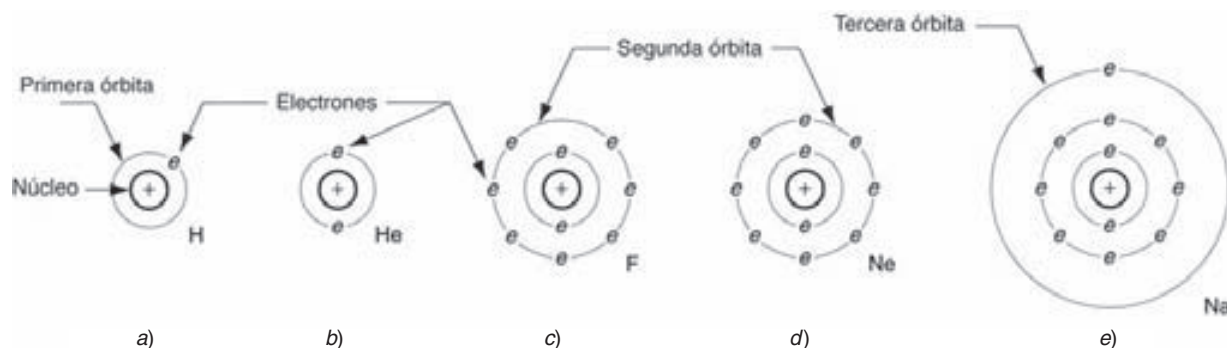


FIGURA 2.2 Modelo simple de la estructura atómica de varios elementos: a) hidrógeno, b) helio, c) flúor, d) neón, y e) sodio.

núcleo. El helio (número atómico 2) tiene dos. En la figura también se aprecian las estructuras atómicas del flúor (número atómico 9), neón (número atómico 10) y sodio (número atómico 11). De estos modelos se infiere que existe un número máximo de electrones que puede estar contenido en una órbita dada. Esto es correcto, y ese máximo está definido por la expresión

$$\text{Número máximo de electrones en una órbita} = 2n^2 \quad (2.1)$$

donde n identifica la órbita, con $n = 1$ la más cercana al núcleo.

El número de electrones en la capa más externa, en relación con el número máximo permitido, determina en gran parte la afinidad química de un átomo con otros. Dichos electrones de la capa externa reciben el nombre de **electrones de valencia**. Por ejemplo, debido a que un átomo de hidrógeno tiene tan sólo un electrón en su única órbita, se combina con facilidad con otro átomo de hidrógeno para formar la molécula del hidrógeno, H_2 . Por esta misma razón, el hidrógeno también reacciona con facilidad con otros elementos (por ejemplo, para formar H_2O). En el átomo del helio, los dos electrones en su única órbita son el máximo permisible ($2n^2 = 2(1)^2 = 2$), por lo que el helio es muy estable. El neón es estable por la misma razón: su órbita exterior ($n = 2$) tiene ocho electrones (el máximo permisible), por lo que el neón es un gas inerte.

En contraste con el neón, el flúor tiene un electrón menos en su capa exterior ($n = 2$) que el máximo permisible, y es atraído con facilidad hacia otros elementos que pueden compartir un electrón para formar un conjunto más estable. El átomo del sodio parece hecho a la perfección para esa situación, con un electrón en su órbita externa. Reacciona con intensidad ante el flúor para formar el compuesto fluoruro de sodio, como se ilustra en la figura 2.3.

Para los números atómicos pequeños que se han considerado, la predicción del número de electrones en la órbita exterior es directa. Conforme el número atómico se incrementa a niveles más altos, la asignación de electrones a las órbitas diferentes se vuelve algo más complicada. Hay reglas y lineamientos, que basados en la mecánica cuántica, que

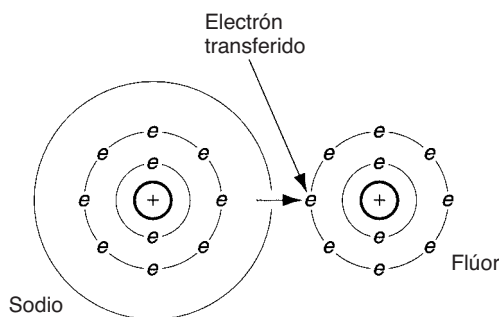


FIGURA 2.3 La molécula de fluoruro de sodio se forma por la transferencia del electrón "sobrante" del átomo del sodio para completar la órbita exterior del átomo del flúor.

se usan para predecir las posiciones de los electrones en las diferentes órbitas y así explicar sus características. El estudio de dichas reglas se encuentra más allá del alcance del estudio de los materiales para la manufactura.

2.2 ENLACES ENTRE ÁTOMOS Y MOLÉCULAS

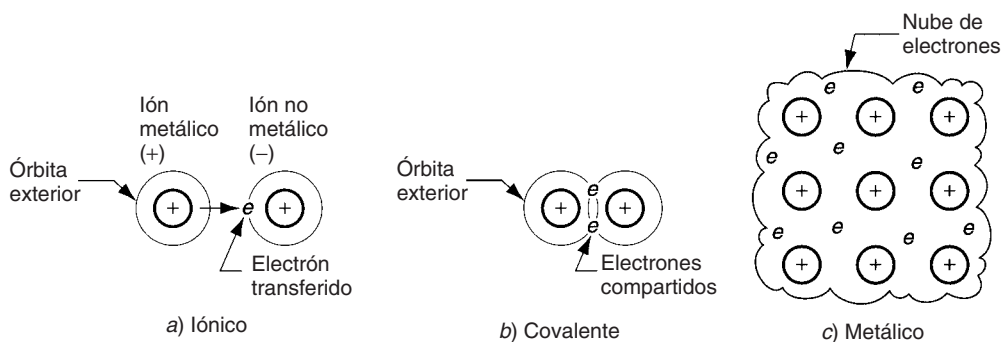
Los átomos se mantienen reunidos en forma de moléculas por medio de varios tipos de enlaces que dependen de los electrones de valencia. Por comparación, las moléculas se atraen unas con otras con enlaces más débiles, que por lo general resultan de la configuración de electrones en las moléculas individuales. Así, se tienen dos tipos de enlaces: 1) enlaces primarios, asociados por lo general con la formación de moléculas, y 2) enlaces secundarios, que se asocian generalmente con la atracción entre moléculas. Los enlaces primarios son mucho más fuertes que los secundarios.

Enlaces primarios Los enlaces primarios se caracterizan por atracciones fuertes de átomos con átomos que involucran el intercambio de electrones de valencia. Los enlaces primarios incluyen las formas siguientes: *a)* iónico, *b)* covalente, y *c)* metálico, como se ilustra en la figura 2.4. Los enlaces iónicos y covalentes se llaman **intramoleculares** debido a que involucran fuerzas de atracción entre los átomos de la molécula.

En el **enlace iónico**, los átomos de un elemento entregan su(s) electrón(es) exterior(es), los que a su vez atraen a los átomos de algún otro elemento para incrementar a ocho su cuenta de electrones en la capa exterior. En general, ocho electrones en la capa exterior es la configuración más estable (excepto para los átomos muy ligeros), y la naturaleza proporciona un enlace muy fuerte entre átomos que adoptan esta configuración. El ejemplo anterior de la reacción del sodio con el flúor para formar fluoruro de sodio (véase la figura 2.3) ilustra esta forma de enlace atómico. El cloruro de sodio (sal de mesa) es un ejemplo más común. Debido a la transferencia de electrones entre los átomos, se forman **iones** de sodio y flúor (o de sodio y cloro), de los que se deriva el nombre de este enlace. Las propiedades de los materiales sólidos con enlaces iónicos incluyen baja conductividad eléctrica y deficiente ductilidad.

El **enlace covalente** es aquel en el que los átomos comparten electrones (a diferencia de los que se transfieren) en sus capas externas a fin de lograr un conjunto estable de ocho. El flúor y el diamante son dos ejemplos de enlaces covalentes. En el flúor, un electrón de cada dos átomos se comparte para formar gas F_2 , como se ilustra en la figura 2.5a). En el caso del diamante, que es carbono (número atómico 6), cada átomo tiene cuatro vecinos con los que comparte electrones. Esto produce una estructura tridimensional muy rígida, que no está adecuadamente representada en la figura 2.5b), y que es responsable de la dureza extrema de este material. Otras formas de carbono (por ejemplo, grafito) no muestran

FIGURA 2.4 Tres formas de enlace primario: *a)* iónico, *b)* covalente, y *c)* metálico.



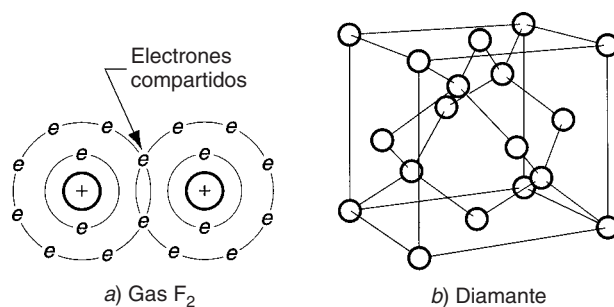


FIGURA 2.5 Dos ejemplos de enlace covalente: a) gas flúor F_2 , y b) diamante.

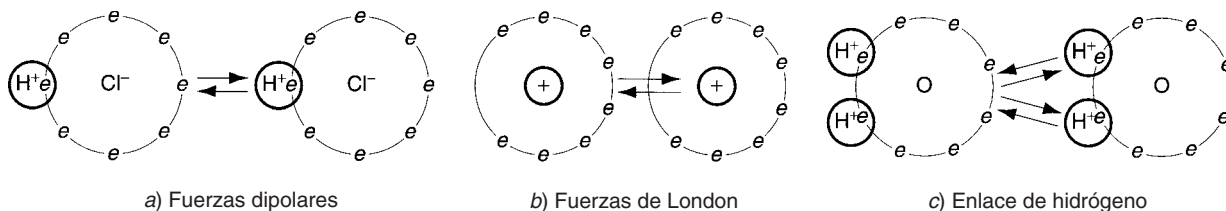
esta estructura atómica rígida. Los sólidos con enlaces covalentes por lo general tienen una dureza grande y conductividad eléctrica baja.

El enlace metálico es, por supuesto, el mecanismo de enlace atómico en los metales puros y sus aleaciones. Por lo general, los átomos de los elementos metálicos poseen muy pocos electrones en sus órbitas externas para completar las capas exteriores de todos los átomos, por decir, un bloque de metal dado. En consecuencia, en lugar de compartir una base de átomo con átomo, el **enlace metálico** involucra compartir los electrones de la capa exterior por medio de todos los átomos para formar una nube de electrones general que abarca al bloque entero. Esta nube proporciona las fuerzas de atracción para mantener juntos a los átomos y formar una estructura rígida y fuerte en la mayoría de los casos. Debido al modo en que comparten electrones y a la libertad que tienen éstos para moverse dentro del metal, el enlace metálico proporciona conductividad eléctrica buena. En contraste, los otros tipos de enlaces primarios involucran compartir localmente electrones sólo entre átomos vecinos, por lo que esos materiales son conductores eléctricos malos. Otras propiedades frecuentes de los materiales con enlace metálico incluyen la buena conducción del calor y una buena ductilidad. (Aunque ya se definieron algunos de estos términos, se espera que los conocimientos generales del lector le permitan entender las propiedades de los materiales.)

Enlaces secundarios Mientras que los enlaces primarios involucran fuerzas de atracción de átomo con átomo, los enlaces secundarios implican fuerzas entre moléculas, o **intermoleculares**. En un enlace secundario no hay transferencia ni se comparten electrones, por lo que dichos enlaces son más débiles que los primarios. Hay tres formas de enlace secundario: a) fuerzas dipolares, b) fuerzas de London, y c) enlace de hidrógeno, los cuales se ilustran en la figura 2.6. Los tipos a y b con frecuencia reciben el nombre de fuerzas de **Van der Waals**, en honor del científico que las estudió y cuantificó por primera vez.

Las **fuerzas dipolares** se presentan en una molécula formada por dos átomos con cargas eléctricas iguales y opuestas. Por tanto, cada molécula forma un dipolo, como se ilustra en la figura 2.6a) para el cloruro de hidrógeno. Aunque el material es eléctricamente neutro en su forma agregada, a escala molecular los dipolos individuales se atraen uno a otro, dando la orientación apropiada de los extremos positivo y negativo de las moléculas. Estas fuerzas dipolares proporcionan un enlace neto intermolecular dentro del material.

FIGURA 2.6 Tres tipos de enlaces secundarios: a) fuerzas dipolares, b) fuerzas de London, y c) enlace de hidrógeno.



Las **fuerzas de London** involucran fuerzas de atracción entre moléculas no polares; es decir, los átomos en la molécula no forman dipolos en el mismo sentido que el párrafo anterior. Sin embargo, debido al rápido movimiento de los electrones en la órbita alrededor de la molécula, cuando ocurre que más electrones quedan en un lado de la molécula que en el otro, se forman dipolos temporales, como se sugiere en la figura 2.6b). Esos dipolos instantáneos proporcionan una fuerza de atracción entre las moléculas del material.

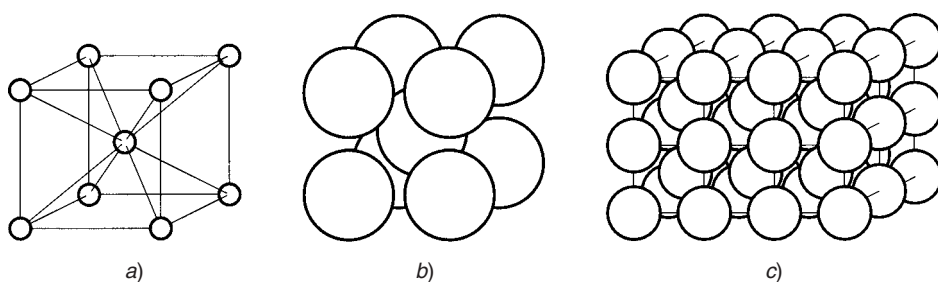
Por último, el **enlace de hidrógeno** sucede en moléculas que contienen átomos de hidrógeno enlazados en forma covalente con otro átomo (por ejemplo, el oxígeno del H_2O). Debido a que los electrones que necesitan completar la capa del átomo de hidrógeno se alinean en un lado de su núcleo, el lado opuesto tiene carga neta positiva que atrae a los electrones de los átomos en las moléculas vecinas. En la figura 2.6c) se ilustra el enlace del hidrógeno para el agua, y generalmente es un mecanismo de enlace intermolecular más fuerte que las otras dos formas de enlace secundario. Éste es importante en la formación de muchos polímeros.

2.3 ESTRUCTURAS CRISTALINAS

Los átomos y moléculas son los bloques de construcción de la mayoría de estructuras macroscópicas de la materia que se considerará en esta sección y la siguiente. Cuando los materiales se solidifican a partir de un estado fundido, tienden a quedar cerca y a empaquearse en forma muy comprimida, en muchos casos se arreglan por sí mismos en una estructura muy ordenada y en otros no tanto. Se distinguen dos estructuras materiales diferentes fundamentales: 1) cristalina y 2) no cristalina. En esta sección se estudian las estructuras cristalinas, y en la siguiente las no cristalinas. El video clip acerca del tratamiento térmico muestra la manera en que los metales se arreglan de modo natural en estructuras cristalinas.

Muchos materiales forman cristales cuando se solidifican a partir de un estado de fusión o líquido. Esto es característico en prácticamente todos los metales, así como de muchas cerámicas y polímeros. Una **estructura cristalina** es aquella en la que los átomos se localizan en posiciones regulares y recurrentes en tres dimensiones. El patrón puede repetirse millones de veces dentro de un cristal dado. La estructura puede verse en forma de una **celda unitaria**, que es el agrupamiento geométrico básico de los átomos y que se repite. Para ilustrar lo anterior, considere el lector la celda unitaria para la estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC) que se muestra en la figura 2.7, una de las más comunes que se encuentra en los metales. En la figura 2.7a) se representa el modelo más simple de la celda unitaria BCC. Aunque este modelo ilustra con claridad las ubicaciones de los átomos dentro de la celda, no indica el empaque tan estrecho de los átomos que tiene lugar en el cristal real, como se ilustra en la figura 2.7b).

FIGURA 2.7 Estructura cristalina centrada en el cuerpo (BCC): a) celda unitaria, con los átomos indicados como ubicaciones puntuales en un sistema de ejes tridimensionales; b) modelo de celda unitaria que muestra a los átomos con un empaque muy estrecho (a veces denominado modelo de bola dura); y c) patrón repetido de la estructura BCC.



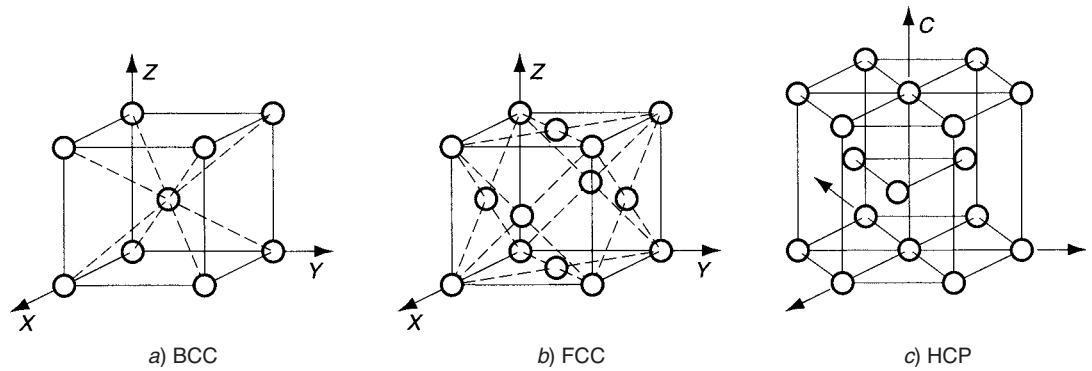


FIGURA 2.8 Tres tipos de estructuras cristalinas en los metales: a) cúbica centrada en el cuerpo y b) cúbica centrada en las caras, y c) hexagonal de empaquetamiento compacto.

En el inciso c) de la misma figura se muestra la naturaleza repetitiva de la celda unitaria dentro del cristal.

2.3.1 Tipos de estructuras cristalinas

En los metales son comunes tres tipos de estructuras de red: 1) cúbica centrada en el cuerpo (BCC), 2) cúbica centrada en las caras (FCC), y 3) hexagonal de empaquetamiento compacto (HCP), como se ilustra en la figura 2.8. En la tabla 2.1 se presentan las estructuras cristalinas de los metales comunes a temperaturas diferentes. Por ejemplo, a temperatura ambiente el hierro es BCC; cambia a FCC por arriba de los 912 °C (1 674 °F) y regresa a BCC a temperaturas superiores a 1 400 °C (2 550 °F). Cuando un metal (u otro material) cambia su estructura según lo descrito, se le conoce como **alotrópico**.

2.3.2 Imperfecciones en cristales

Hasta este momento se han estudiado las estructuras cristalinas como si fueran perfectas, la celda unitaria repetida en el material una y otra vez en todas direcciones. En ocasiones, para satisfacer propósitos estéticos o de ingeniería se prefiere un cristal perfecto. Por ejemplo, un diamante perfecto (sin defectos) es más valioso que otro que tenga imperfecciones. En la producción de chips para circuitos integrados, los cristales grandes y únicos de silicio poseen características de procesamiento deseables para formar los detalles microscópicos del patrón del circuito.

Sin embargo, hay varias razones por las que una estructura de red cristalina puede no ser perfecta. Es frecuente que surjan imperfecciones de manera natural debido a la incapacidad del material que se solidifica para continuar sin interrupción la repetición de

TABLA 2.1 Estructuras cristalinas de los metales comunes (a temperatura ambiente).

Cúbica centrado en el cuerpo (BCC)	Cúbica centrada en las caras (FCC)	Hexagonal de empaquetamiento compacto (HCP)
Cromo (Cr)	Aluminio (Al)	Magnesio (Mg)
Hierro (Fe)	Cobre (Cu)	Titanio (Ti)
Molibdeno (Mo)	Oro (Au)	Zinc (Zn)
Tantalio (Ta)	Plomo (Pb)	
Tungsteno (W)	Plata (Ag)	
	Níquel (Ni)	

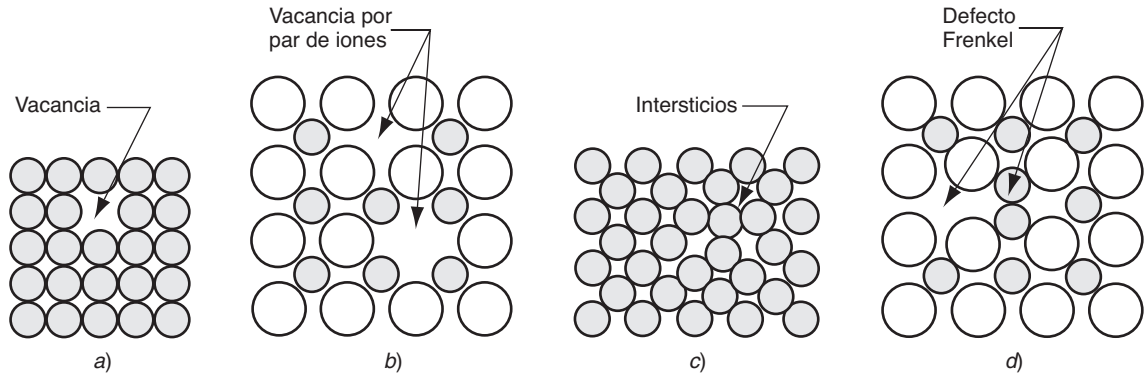


FIGURA 2.9 Defectos puntuales: a) vacancia, b) vacancia por par de iones, c) intersticios, y d) desplazamiento iónico.

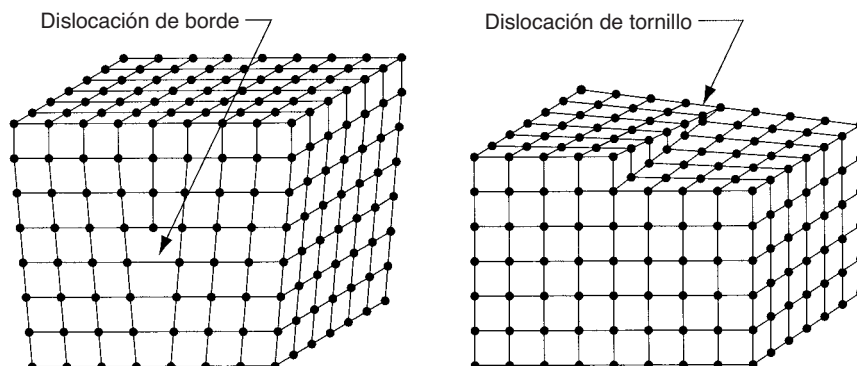
la celda unitaria en forma indefinida. Un ejemplo de esto son los límites de grano de los metales. En otros casos, se introducen imperfecciones a propósito durante el proceso de manufactura, por ejemplo cuando se agrega a un metal un elemento de aleación para incrementar su resistencia.

Las distintas imperfecciones en los sólidos cristalinos también se denominan defectos. Ambos términos, **imperfección** o **defecto**, se refieren a las desviaciones en el patrón regular de la estructura de red cristalina. Se catalogan como 1) defectos puntuales, 2) defectos lineales y 3) defectos superficiales.

Los **defectos puntuales** son imperfecciones en la estructura cristalina que involucran ya sea un solo átomo o varios de ellos. Los defectos adoptan varias formas, entre las cuales están las que se ilustran en la figura 2.9: a) **vacancia**, es el defecto más simple, que involucra la falta de un átomo dentro de la estructura de red; b) **vacancia por par de iones**, también llamado **defecto Schottky**, que incluye un par faltante de iones de carga opuesta en un compuesto que tiene un balance de carga conjunta; c) **intersticios**, distorsión de la red producida por la presencia de un átomo adicional en la estructura; y d) **desplazamiento iónico**, conocido como **defecto Frenkel**, que ocurre cuando un ion se retira de una posición regular en la estructura de red y se inserta en una posición intersticial cuya ocupación no es normal por parte de dicho ion.

Un **defecto lineal** es un grupo conectado de defectos puntuales que forman una línea en la estructura de red. El defecto lineal más importante es la **dislocación**, que adopta dos formas: a) dislocación de borde y b) dislocación de tornillo. Una **dislocación de borde** es la arista de un plano adicional que existe en la red, como se ilustra en la figura 2.10a). Una **dislocación de tornillo**, véase la figura 2.10b), es una espiral dentro de la estructura de red alabeada alrededor de una línea de imperfección, como un tornillo está alabeado alrede-

FIGURA 2.10 Defectos lineales: a) dislocación de borde, y b) dislocación de tornillo.



dor de su eje. Ambos tipos de dislocaciones surgen en la estructura cristalina durante la solidificación (por ejemplo, fundición), o se inician durante un proceso de deformación (por ejemplo, conformado de metales) que se realice sobre el material sólido. Las dislocaciones son útiles para explicar ciertos aspectos del comportamiento mecánico de los metales.

Los **defectos superficiales** son imperfecciones que se extienden en dos direcciones para formar una frontera. El ejemplo más obvio es la superficie externa de un objeto cristalino que define su forma. La superficie es una interrupción de la estructura de red. Las fronteras de la superficie también pueden quedar dentro del material. El mejor ejemplo de estas interrupciones superficiales internas son los límites de grano. Un poco más adelante se estudiarán los granos de los metales, pero primero se considerará la manera en que ocurre la deformación en una red cristalina, y cómo la presencia de dislocaciones favorece este proceso.

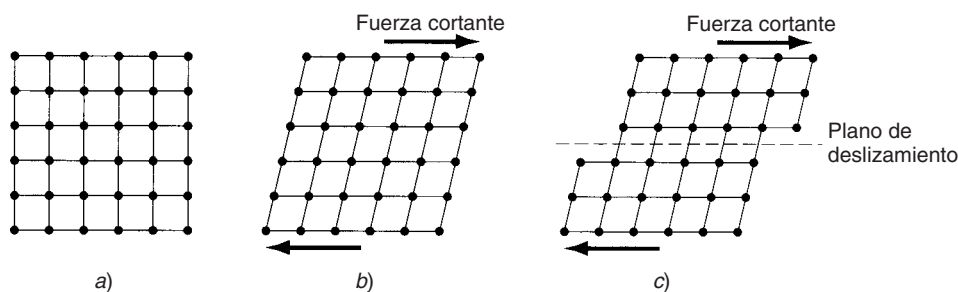
2.3.3 La deformación en cristales metálicos

Cuando un cristal se sujeta a fuerzas mecánicas que se incrementan en forma gradual, su respuesta inicial es deformarse de modo **elástico**. Esto se parece a un alargamiento de la estructura de red sin que haya cambios en la posición de los átomos en la red, en la manera que se ilustra en la figura 2.11a) y b). Si se elimina la fuerza, la estructura de red (y por tanto el cristal), regresa a su forma original. Si el esfuerzo alcanza un valor alto en relación con las fuerzas electrostáticas que mantienen a los átomos en su lugar dentro de la red, ocurre un cambio permanente en la forma denominado **deformación plástica**. Lo que ha sucedido es que los átomos en la red se han movido de manera permanente de las posiciones que ocupaban en forma previa, y se ha establecido un equilibrio nuevo en la red, como se sugiere en la figura 2.11c).

La deformación de la red que se aprecia en el inciso c) de la figura es un posible mecanismo, llamado deslizamiento, con el que puede ocurrir la deformación plástica de una estructura cristalina. El otro se denominan maclas* y se estudiará más adelante.

El **deslizamiento** implica el movimiento relativo de los átomos en los lados opuestos de un plano de la red, por lo que se denomina **plano de deslizamiento**. El plano de deslizamiento debe estar aproximadamente alineado con la estructura red (como se indica en el esquema), por lo que hay ciertas direcciones preferentes a lo largo de las cuales es más probable que ocurra el deslizamiento. El número de estas **direcciones de deslizamiento** depende del tipo de red. Las tres estructuras cristalinas comunes son algo más complicadas, en especial en tres dimensiones, que la red cuadrada que se ilustra en la figura 2.11. Se observa que la HCP es la que tiene menos direcciones de deslizamiento, la BCC es la que más, y la FCC está entre ambas. Los metales HCP tienen mala ductilidad y por lo general son difíciles de deformar a temperatura ambiente. Los metales con estructura BCC tendrían la ductilidad mejor si el único criterio fueran el número de las direcciones de deslizamiento. Sin embargo, la naturaleza no es tan simple. Por lo general, esos metales son más fuertes que los demás, lo que complica la situación, y los metales BCC requieren normalmente esfuerzos mayores para que haya deslizamiento. De hecho, algunos de los metales BCC

FIGURA 2.11 Deformación de una estructura cristalina: a) red original; b) deformación elástica, sin cambio permanente de la posición de los átomos; y c) deformación plástica, en la que los átomos de la red son forzados para moverse a nuevos "lugares".



* El término *macla* o *gemelo* se emplea en la bibliografía de la cristalografía de minerales. (N. del T.)

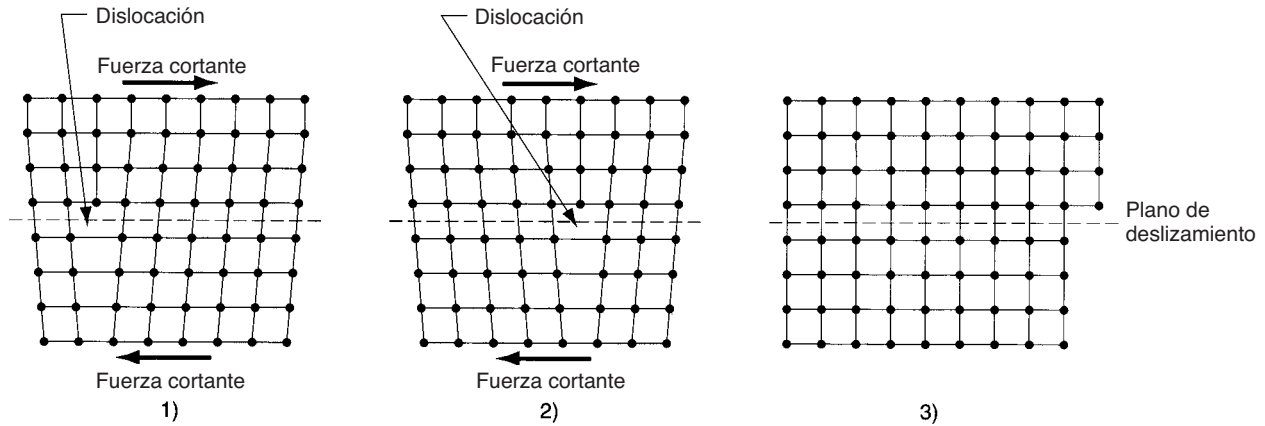


FIGURA 2.12 Efecto de las dislocaciones en la estructura de red bajo esfuerzo. En la serie de diagramas, el movimiento de la dislocación permite que haya deformación en condiciones de esfuerzo menor que en una red perfecta.

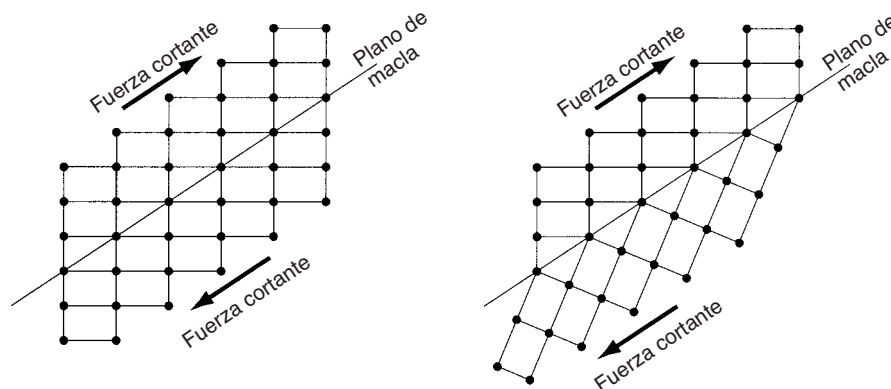
muestran ductilidad mala. Una excepción notable es el acero de bajo carbono aunque es relativamente fuerte, se utiliza mucho con éxito comercial en las operaciones de formado de metal en lámina para las que muestra ductilidad buena. Los metales FCC por lo general son los más dúctiles de las tres estructuras cristalinas, pues combinan un buen número de direcciones de deslizamiento con una resistencia (usualmente) relativamente baja o moderada. A temperaturas elevadas las tres estructuras de los metales se hacen más dúctiles, lo que se aprovecha con frecuencia para darles forma.

Las dislocaciones tienen un papel importante para facilitar el deslizamiento en los metales. Cuando una estructura de red que contiene una dislocación de borde se sujeta a una fuerza cortante, el material se deforma con mucha más facilidad que si se tratara de una estructura perfecta. Esto lo explica el hecho de que la dislocación entra en movimiento dentro de la red cristalina en presencia de la fuerza, como se ilustra en la serie de dibujos de la figura 2.12. ¿Por qué es más fácil mover una dislocación a través de la red de lo que es deformar la red misma? La respuesta es que los átomos en la dislocación de borde requieren un desplazamiento menor dentro de la estructura de red distorsionada a fin de alcanzar una posición nueva de equilibrio. Así, se necesita un nivel de energía menor para volver a alinear los átomos en posiciones nuevas que si la red no tuviera la dislocación. Se requiere entonces un nivel menor de fuerza para realizar la deformación. Debido a que la posición nueva manifiesta una red similar distorsionada, el movimiento de los átomos en la dislocación continúa a un nivel menor de fuerza.

Aquí se han explicado el fenómeno de deslizamiento y la influencia de las dislocaciones sobre una base microscópica. A escala mayor, cuando se somete el metal a una carga deformante el deslizamiento ocurre muchas veces en él, lo que ocasiona el comportamiento macroscópico que nos es familiar. Las dislocaciones representan una situación benéfica y perjudicial. Debido a ellas, el metal es más dúctil y alcanza con más facilidad la deformación plástica (conformado) durante su manufactura. Sin embargo, desde un punto de vista de diseño del producto, el metal no es tan fuerte como lo sería si no hubiera dislocaciones.

El maclado es la otra forma en que los cristales metálicos se deforman plásticamente. El **maclado** se define como el mecanismo de deformación plástica en el que los átomos en un lado del plano (llamado plano de macla) cambian para formar una imagen de espejo en el otro lado del plano. Esto se ilustra en la figura 2.13. Este mecanismo es importante en los metales HCP (por ejemplo, magnesio y zinc) debido a que no se deslizan con facilidad. Además de la estructura, otro factor de las maclas es la tasa de deformación. El mecanismo de deslizamiento requiere más tiempo que el del maclado, el cual puede ocurrir en forma casi instantánea. Así, en situaciones en las que la rapidez de deformación es muy alta, los metales que forman maclas se deslizarían. Un ejemplo que ilustra esta sensibilidad a la ra-

FIGURA 2.13 El maclado involucra la formación de una imagen especular atómica (es decir, un “gemelo”) en el lado opuesto del plano de macla: a) antes, y b) después del maclado.



pidez es el acero al bajo carbono; cuando se somete a rapidezces de esfuerzo elevadas forma maclas, mientras que a rapidezces moderadas se deforma por deslizamiento.

2.3.4 Granos y límites de grano en metales

Un bloque dado de metal contiene millones de cristales individuales, llamados **granos**. Cada grano tiene su propia orientación de red única; pero en forma colectiva los granos se orientan aleatoriamente dentro del bloque. Una estructura como ésta se denomina **policristalina**. Es fácil de entender por qué esa clase de estructura es el estado natural del material. Cuando el bloque se enfría a partir de un estado de fusión y comienza a solidificarse, ocurre la formación de núcleos de cristales individuales en posiciones y orientaciones aleatorias a través del líquido. Conforme estos cristales crecen, acaban por interferir unos con otros, y forman en sus interfaces defectos superficiales —el **límite de grano**. Éste consiste en una zona de transición, quizá con espesor de sólo unos cuantos átomos, en la que los átomos no están alineados con ningún grano.

El tamaño de los granos en el bloque metálico está determinado, entre otros factores, por el número de sitios de formación de núcleos en el material fundido, y por la rapidez de enfriamiento de la masa. En un proceso de fundición, es frecuente que los sitios de formación de núcleos sean creados por las paredes relativamente frías del molde, lo que motiva cierta preferencia de la orientación de los granos en ellas.

El tamaño del grano tiene relación inversa con la rapidez de enfriamiento: el enfriamiento más rápido promueve un tamaño de grano menor, mientras que el enfriamiento lento tiene el efecto opuesto. El tamaño del grano es importante en los metales debido a que afecta las propiedades mecánicas. Desde el punto de vista del diseño, por lo general es preferible un tamaño menor de los granos porque significa resistencia y dureza mayores. También es deseable en ciertas operaciones de manufactura (por ejemplo, conformado de metales), debido a que significa ductilidad mayor durante la deformación y una superficie mejor del producto terminado.

Otro factor que influye en las propiedades mecánicas es la presencia de límites de grano en el metal. Representan imperfecciones en la estructura cristalina que interrumpen el movimiento continuo de las dislocaciones. Esto ayuda a explicar por qué el tamaño menor de los granos —y por tanto mayor abundancia de granos y de sus límites— incrementa la resistencia del metal. Al interferir con el movimiento de dislocación, los límites de los granos también contribuyen con la propiedad característica de un metal de hacerse más fuerte a medida que se deforma. La propiedad a que se hace alusión es el **endurecimiento por deformación**, que se estudiará más de cerca en el análisis de las propiedades mecánicas, en el capítulo 3.

2.4 ESTRUCTURAS NO CRISTALINAS (AMORFAS)

Muchos materiales importantes no son cristalinos —por ejemplo, los líquidos y gases. El agua y el aire no tienen estructuras cristalinas. Un metal pierde su estructura cristalina cuando se funde. A temperatura ambiente, el mercurio es un metal líquido cuyo punto de fusión es de $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-37\text{ }^{\circ}\text{F}$). Varias clases importantes de materiales de ingeniería tienen formas no cristalinas en su estado sólido, es frecuente que se utilice el término **amorfo** para describirlos. El vidrio, muchos plásticos y el caucho pertenecen a esta categoría. Muchos plásticos importantes son mezclas de formas cristalinas y no cristalinas. Incluso los metales pueden ser amorfos en vez de cristalinos, si la rapidez de enfriamiento durante su paso de líquido a sólido es lo suficientemente rápida como para inhibir que los átomos se acomoden por sí mismos en sus patrones regulares preferidos. Por ejemplo, esto ocurre si el metal fundido se vierte entre rodillos giratorios fríos poco espaciados.

Dos características relacionadas con las diferencias de los materiales no cristalinos de los cristalinos: 1) la ausencia de un orden de largo alcance en la estructura molecular de un material no cristalino, y 2) las diferencias entre las características de la fusión y la expansión térmica.

La diferencia en la estructura molecular se puede visualizar con ayuda de la figura 2.14. El empaquetamiento compacto y el patrón de repetición de la estructura cristalina se muestra en el lado izquierdo; y en el derecho aparece el arreglo menos denso y aleatorio de los átomos en el material no cristalino. La diferencia se manifiesta cuando el metal se funde. Uno de los efectos es que en el metal fundido el empaque más espaciado de los átomos muestra un incremento del volumen (reducción de la densidad) en comparación con el estado cristalino sólido del material. Este efecto es característico de la mayoría de los materiales cuando se funden (una excepción notable es el hielo; el agua líquida es más densa que el hielo en estado sólido). Una característica general de los líquidos y los materiales sólidos amorfos es que están ausentes de un orden de largo alcance, como el del lado derecho de la figura.

Ahora se examinará en detalle el fenómeno de la fusión, y al hacerlo se definirá la segunda diferencia importante entre las estructuras cristalinas y las no cristalinas. Como ya se dijo, un metal experimenta un aumento de su volumen cuando se funde y pasa del estado sólido al líquido. Para un metal puro, este cambio volumétrico no ocurre en forma abrupta, a temperatura constante (es decir, la temperatura de fusión T_m), como se indica en la figura 2.15. El cambio representa una discontinuidad desde las pendientes en cada lado de la gráfica. Las pendientes graduales caracterizan la **expansión térmica** del metal —el cambio del volumen como función de la temperatura, que usualmente es diferente en los estados sólido y líquido. Asociado con el incremento súbito del volumen conforme el metal pasa de sólido a líquido en el punto de fusión, está la adición de cierta cantidad de calor, llamada **calor de fusión**, que ocasiona que los átomos pierdan el arreglo denso y regular de la estructura cristalina. El proceso es reversible; opera en ambas direcciones. Si el metal fundido se enfría a través de su temperatura de fusión, ocurre el mismo cambio abrupto en el volumen (excepto que se trata de una disminución), y el metal libera la misma cantidad de calor.

Un material amorfo presenta un comportamiento muy diferente al de un metal puro cuando cambia de sólido a líquido, como se aprecia en la figura 2.15. El proceso es,

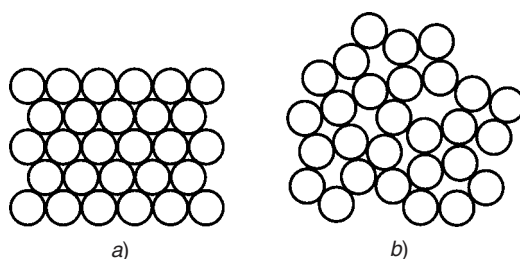


FIGURA 2.14 Ilustración de la diferencia de estructura entre materiales: a) cristalino, y b) no cristalino. La estructura cristalina es regular, repetitiva y más densa, en tanto que la no cristalina tiene un menor empaquetamiento y es aleatoria.

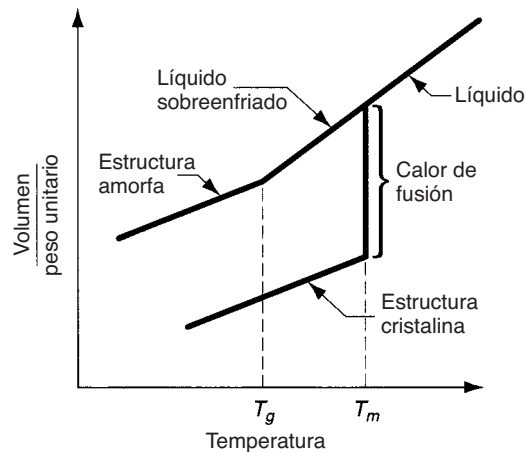


FIGURA 2.15 Cambio característico de volumen para un metal puro (estructura cristalina), en comparación con los mismos cambios volumétricos del vidrio (estructura no cristalina).

otra vez, reversible, y a continuación se analizará el comportamiento del material amorfo sólido, como se hizo antes. Para ilustrarlo se empleará vidrio (sílice, SiO_2). A temperaturas elevadas, el vidrio es un líquido verdadero, y sus moléculas son libres de moverse de acuerdo con la definición usual de un líquido. Conforme el vidrio se enfría, pasa en forma gradual al estado sólido, a través de una fase de transición, llamada **líquido sobreenfriado**, antes de quedar, por fin, rígido. No muestra el cambio volumétrico súbito característico de los materiales cristalinos; en vez de ello cruza su temperatura de fusión T_m sin cambiar su pendiente de expansión térmica. En esa región de líquido sobreenfriado, el material se hace cada vez más viscoso conforme la temperatura disminuye. Al enfriarse aún más, se alcanza un punto en el que el líquido sobreenfriado se convierte en sólido. Esto se denomina **temperatura de transición vítrea**, T_g . En ese momento, hay un cambio en la pendiente de la expansión térmica (es más preciso hablar de pendiente de contracción térmica; sin embargo, la pendiente es la misma para la expansión que para la contracción). La tasa de expansión térmica es más baja para el material sólido que para el líquido sobreenfriado.

La diferencia de comportamiento entre los materiales cristalinos y no cristalinos se debe a la respuesta de sus estructuras atómicas respectivas ante los cambios de temperatura. Cuando un metal puro se solidifica desde el estado de fusión, los átomos se arreglan por sí solos en una estructura regular y recurrente. Dicha estructura cristalina es mucho más compacta que el líquido aleatorio con empaquetamiento holgado del cual se formó. Así, para un material cristalino, el proceso de solidificación produce la contracción volumétrica abrupta que se observa en la figura 2.15. En contraste, a bajas temperaturas los materiales amorfos no alcanzan esa estructura estrechamente empaquetada y repetitiva. La estructura atómica es el mismo arreglo aleatorio que en el estado líquido; así, no hay cambio abrupto del volumen cuando esos materiales pasan de líquido a sólido.

2.5 MATERIALES DE INGENIERÍA

Ahora se hará un resumen de la manera en que la estructura atómica, enlaces y estructura cristalina (o ausencia de ésta), se relacionan con el tipo de material de ingeniería —metales, cerámicas y polímeros—.

Metales En estado sólido, los metales tienen estructuras cristalinas, casi sin excepción. Las celdas unitarias de dichas estructuras cristalinas siempre son BCC, FCC o HCP. Los átomos de los metales se mantienen unidos por medio de un enlace metálico, lo que significa que sus electrones de valencia pueden moverse con libertad relativa (en comparación con

los otros tipos de enlace atómico y molecular). Por lo general, estas estructuras y enlaces hacen que los metales sean fuertes y duros. Muchos de los metales son dúctiles (tienen la capacidad de deformarse, lo que es útil para la manufactura), en especial los metales FCC. Otras propiedades generales de los metales que se relacionan con su estructura y su enlace son las siguientes: conductividad térmica y eléctrica elevadas, opacidad (impenetrables al paso de la luz), y reflectividad (capacidad de reflejar la luz).

Cerámicos Los átomos de los cerámicos se caracterizan por tener enlaces iónicos o covalentes, o ambos. Los átomos metálicos liberan o comparten sus electrones exteriores con los átomos no metálicos, y existe una fuerza de atracción grande dentro de las moléculas. Las propiedades generales que resultan de estos mecanismos de enlace incluyen: dureza y rigidez elevadas (aun a temperaturas elevadas), fragilidad (no son dúctiles), eléctricamente aislantes (no conductores), refractarios (térmicamente resistentes), y químicamente inertes.

Los cerámicos poseen estructura ya sea cristalina o no cristalina. La mayor parte de los cerámicos tienen estructura cristalina, mientras que el vidrio con base en el sílice (SiO_2) son amorfos. En ciertos casos, en el mismo material cerámico puede existir cualquier estructura. Por ejemplo, en la naturaleza el sílice ocurre como cuarzo cristalino. Cuando este mineral se funde y luego se enfría, se solidifica para formar sílice fundido, que tiene estructura no cristalina.

Polímeros Una molécula de polímero consiste en muchos *meros* que forman moléculas muy grandes que se mantienen unidas por medio de enlaces covalentes. Por lo general, los elementos de un polímero consisten en carbono más uno o más elementos tales como el hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y cloro. Un enlace secundario (de Van der Waals) mantiene juntas a las moléculas dentro del material agregado (enlace intermolecular). Los polímeros tienen ya sea una estructura vítrea o una mezcla de vítrea y cristalina. Hay diferencias entre los tres tipos de polímero. En los *polímeros termoplásticos*, las moléculas consisten en cadenas largas de meros con estructura lineal. Estos materiales pueden calentarse y enfriarse sin que se altere sustancialmente su estructura lineal. En los *polímeros termoestables (termofijos)*, las moléculas se transforman en una estructura rígida y tridimensional al enfriarse a partir de su condición de plástico caliente. Si los polímeros termoestables se vuelven a calentar, se degradan químicamente en lugar de suavizarse. Los *elastómeros* tienen moléculas grandes con estructuras engarzadas. Al estirar y volver a engarzar las moléculas cuando se las sujeta a fuerzas cíclicas, se motiva que el material agregado manifieste su comportamiento elástico característico.

La estructura y enlace molecular de los polímeros les da las propiedades comunes siguientes: baja densidad, resistividad eléctrica elevada (algunos polímeros se utilizan como aislantes), y baja conductividad térmica. La resistencia y rigidez de los polímeros varía mucho. Algunos son fuertes y rígidos (aunque no igualan la fuerza y rigidez de los metales o cerámicos), mientras que otros muestran un comportamiento muy elástico.

REFERENCIAS

- | | |
|---|--|
| <p>[1] Dieter, G. E. <i>Mechanical Metallurgy</i>, 3a. ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1986.</p> <p>[2] Flinn, R. A., y Trojan, P. K. <i>Engineering Materials and Their Applications</i>, 5a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.</p> | <p>[3] Guy, A. G., y Hren, J. J. <i>Elements of Physical Metallurgy</i>, 3a. ed., Addison-Wesley Publishing Co., Reading Mass., 1974.</p> <p>[4] Van Vlack, L. H. <i>Elements of Materials Science and Engineering</i>, 6a. ed., Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass. 1989.</p> |
|---|--|

Parte VII

Operaciones para la mejora de propiedades y el procesamiento superficial

27

TRATAMIENTO TÉRMICO DE METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 27.1 Recocido
- 27.2 Formación de martensita en el acero
 - 27.2.1 Curva tiempo-temperatura-transformación
 - 27.2.2 Procesos del tratamiento térmico
 - 27.2.3 Templabilidad
- 27.3 Endurecimiento por precipitación
- 27.4 Endurecimiento superficial
- 27.5 Métodos e instalaciones para tratamiento térmico
 - 27.5.1 Hornos para tratamiento térmico
 - 27.5.2 Métodos de endurecimiento superficial selectivo

Los procesos de manufactura cubiertos en los capítulos anteriores involucran la creación de la geometría de una pieza. Ahora se considerarán procesos que mejoran las propiedades de la pieza de trabajo (capítulo 27) o aplican algún tratamiento superficial a la misma, como limpiarla (capítulo 28) o recubrirla (capítulo 29). Las operaciones para la mejora de superficies se realizan con el fin de perfeccionar propiedades mecánicas o físicas del material de trabajo. Éstos no alteran la geometría de la pieza, al menos no de manera intencional. Las operaciones más importantes para la mejora de propiedades son los tratamientos térmicos. El **tratamiento térmico** involucra varios procesos de calentamiento y enfriamiento para efectuar cambios microestructurales en un material, los cuales modifican sus propiedades mecánicas. Sus aplicaciones más comunes analizadas en este capítulo se realizan sobre metales. Se ejecutan tratamientos similares en vidrio cerámico (sección 7.4.3), vidrios templados (sección 12.3.1) y metales pulverizados y cerámicos (secciones 16.3.3 y 17.2.3).

Pueden realizarse operaciones de tratamiento térmico sobre una pieza de trabajo metálica en varios momentos de su secuencia de manufactura. En algunos casos, el tratamiento se aplica antes del proceso de formado (por ejemplo, para ablandar el metal y así ayudar a formarlo con más facilidad mientras se encuentra caliente). En otros casos, el tratamiento térmico se usa para aliviar los efectos del endurecimiento por deformación que ocurre durante el formado, de manera que el material pueda someterse a una deformación posterior. También, el tratamiento térmico puede realizarse durante la secuencia de manufactura, o casi al finalizar ésta, para lograr la resistencia y dureza requeridas en el producto terminado. Los principales tratamientos térmicos son el recocido, la formación de martensita en el acero, el endurecimiento por precipitación y el endurecimiento superficial.

27.1 RECOCIDO

El **recocido** consiste en calentar el metal a una temperatura adecuada, en la cual se mantiene por un cierto tiempo (llamado **recalentamiento**) y después se enfría lentamente. El recocido se realiza sobre un metal en cualquiera de los siguientes casos: 1) para reducir la dureza y la fragilidad, 2) para alterar la microestructura de manera que puedan obtenerse las propiedades mecánicas deseadas, 3) para ablandar los metales y mejorar su maquinabilidad o formabilidad, 4) para recrystalizar los metales trabajados en frío (endurecidos por deformación) y 5) para aliviar los esfuerzos residuales inducidos por los procesos de formado previos. Se usan diferentes términos para el recocido, dependiendo de los detalles del proceso y de la temperatura usada, relativa a la temperatura de recrystalización del metal que está bajo tratamiento.

El **recocido total** se asocia con metales ferrosos (por lo general, aceros al medio y bajo carbono); el proceso implica calentar la aleación hasta la región austenita seguida de un enfriamiento lento en el horno para producir perlita gruesa. La **normalización** implica ciclos similares de calentamiento y recalentamiento, pero las velocidades de enfriamiento son más rápidas. Se permite que el acero se enfríe en aire, a temperatura ambiente. El resultado es perlita fina con una resistencia y dureza más altas pero con una ductilidad más baja que el tratamiento de recocido total.

Con frecuencia, las piezas trabajadas en frío son recocidas para reducir los efectos del endurecimiento por deformación y para incrementar su ductilidad. El tratamiento permite que el metal endurecido por deformación se recrystalice de manera completa o parcial, dependiendo de las temperaturas, los periodos de recalentamiento y las velocidades de enfriamiento. Cuando el recocido se realiza para permitir trabajos posteriores sobre la pieza se llama **proceso de recocido**. Cuando se realiza en toda la pieza (trabajada en frío) para remover los efectos del endurecimiento por deformación, y ésta no va a someterse a ninguna deformación subsecuente, se llama **recocido**. El proceso en sí es casi el mismo, pero se usan diferentes términos para indicar el propósito del tratamiento.

Si las condiciones de recocido permiten la recuperación total de la estructura de grano original del metal trabajado en frío, entonces ha ocurrido la **recrystalización**. Después de este tipo de recocido, el metal tiene una nueva geometría creada por la operación de formado, pero su estructura de grano y sus propiedades asociadas son esencialmente las mismas que antes del trabajo en frío. Las condiciones que tienden a favorecer la recrystalización son una temperatura más alta, un tiempo más largo manteniendo esta situación y una velocidad más baja de enfriamiento. Si el proceso de recocido sólo permite un retorno parcial a la estructura de grano del estado original, se denomina **recuperación por recocido**. La recuperación permite que el metal retenga la mayoría del endurecimiento por deformación, obtenido durante el trabajo en frío, pero la tenacidad de la pieza se mejora.

Las operaciones de recocido anteriores se ejecutan primordialmente para lograr otras funciones además del alivio de los esfuerzos. Sin embargo, el recocido se realiza algunas veces sólo para aliviar los esfuerzos residuales en la pieza de trabajo causados por los procesos de formado previos. Estos tratamientos, denominados **recocido para el alivio de esfuerzos**, ayudan a reducir la distorsión y las variaciones dimensionales que pudieran resultar en las piezas que fueron sometidas a esfuerzos.

27.2 FORMACIÓN DE MARTENSITA EN EL ACERO

El diagrama de fases hierro-carbono de la figura 6.4 indica las fases del hierro y el carburo de hierro (cementita) presentes bajo condiciones de equilibrio. Se supone que el enfriamiento desde una temperatura alta ha sido lo suficientemente lento para permitir que la austenita se descomponga en una mezcla de ferrita y cementita (Fe_3C) a temperatura ambiente. Esta reacción de descomposición requiere de difusión y otros procesos que

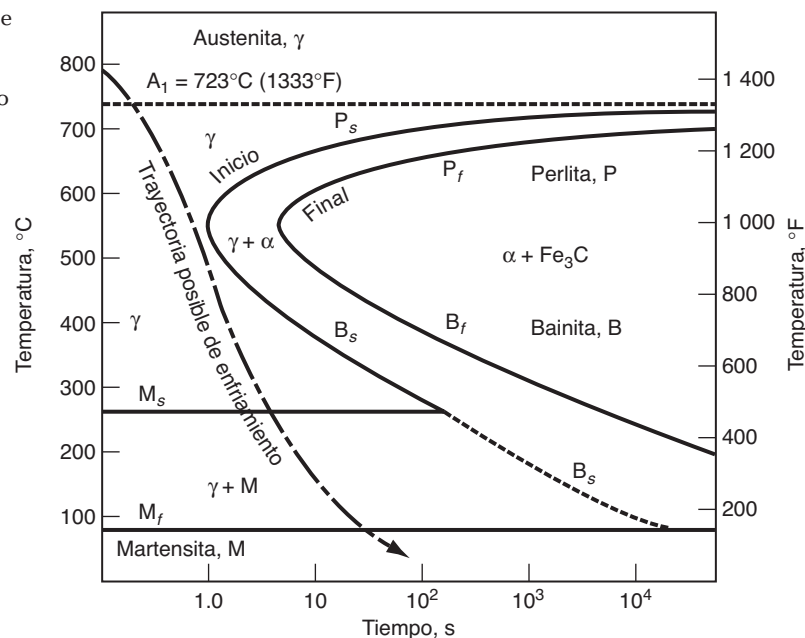
dependen del tiempo y la temperatura para transformar el metal a su forma final preferida. Sin embargo, bajo condiciones de enfriamiento rápido, de manera que se evita el equilibrio de la reacción, la austenita se transforma en una fase de no equilibrio llamada martensita. La ***martensita*** es una fase dura y frágil que da al acero su capacidad única de endurecerse a valores muy altos. El video clip sobre tratamiento térmico proporciona una visión general del tratamiento térmico del acero.

27.2.1 Curva tiempo-temperatura-transformación

La naturaleza de la transformación a martensita puede entenderse mejor usando la curva tiempo-temperatura-transformación (curva TTT) para acero eutectoide ilustrada en la figura 27.1. La curva TTT muestra cómo la velocidad de enfriamiento afecta la transformación de austenita en varias fases posibles. Las fases pueden dividirse en 1) formas alternativas de ferrita y cementita y 2) martensita. El tiempo se representa (logarítmicamente por conveniencia) a lo largo del eje horizontal y la temperatura en el eje vertical. La curva se interpreta a partir del tiempo cero en la región austenita (en un lugar por encima de la línea de temperatura A_1 para una composición dada) y continúa hacia abajo y a la derecha a lo largo de una trayectoria que muestra cómo se enfría el metal en función del tiempo. La curva TTT que se muestra en la figura es para una composición específica de acero (0.80% de carbono). La forma de la curva es diferente para otras composiciones.

A velocidades lentas de enfriamiento, la trayectoria pasa a través de la región, lo que indica una transformación en perlita o bainita que son formas alternativas de mezclas ferrita-carburo. Como estas transformaciones toman tiempo, el diagrama TTT muestra dos líneas: el inicio y el fin de la transformación conforme transcurre el tiempo, indicando las diferentes regiones de fase por los subíndices *s* y *f*, respectivamente. La ***perlita*** es una mezcla de fases ferrita y carburo en la forma de placas delgadas paralelas. Se obtiene por enfriamiento lento de la austenita, de manera que la trayectoria de enfriamiento pase a

FIGURA 27.1 Curva TTT, que muestra la transformación de austenita en otras fases como una función del tiempo y la temperatura para una composición de cerca de 0.80% de acero-carbono. La trayectoria de enfriamiento mostrada aquí produce martensita.



través de P_s arriba de la “nariz” de la curva TTT. La **bainita** es una mezcla alternativa de las mismas fases, que puede producirse mediante un enfriamiento inicial rápido a una temperatura por encima de M_s , de manera que se evite la nariz de la curva TTT; de esto sigue un enfriamiento mucho más lento para pasar a través de B_s y dentro de la región ferrita-carburo. La bainita tiene una estructura en forma de agujas o plumas que consiste en finas regiones de carburo.

Si el enfriamiento ocurre a una velocidad suficientemente rápida (indicada por la línea punteada en la figura 27.1), la austenita se transforma en martensita. La **martensita** es una fase única que consiste en una solución hierro-carbono cuya composición es igual a la de la austenita de donde se deriva. La estructura cúbica centrada en la cara de la austenita se transforma casi instantáneamente en la estructura tetragonal centrada en el cuerpo (BCT) de la martensita, sin que ocurra el proceso de difusión, el cual está en función del tiempo y es necesario para separar la ferrita y el carburo de hierro en las transformaciones precedentes.

Durante el enfriamiento, la transformación de la martensita empieza a cierta temperatura M_s y termina a una temperatura más baja M_f como se muestra en el diagrama TTT. En los puntos entre estos dos niveles, el acero es una mezcla de austenita y martensita. Si se detiene el enfriamiento a una temperatura entre las líneas M_s y M_f , la austenita se transformará en bainita en cuanto la trayectoria tiempo-temperatura cruce el umbral de B_s . El nivel de la línea M_s es influido por los elementos de la aleación, incluido el carbono. En algunos casos, la línea M_s se cae por debajo de la temperatura ambiente, lo que hace imposible para estos aceros la formación de martensita mediante métodos de tratamiento térmico tradicional.

La dureza extrema de la martensita es consecuencia de la deformación reticular creada por los átomos de carbono atrapados en la estructura BCT, que forman una barrera al deslizamiento. En la figura 27.2 se muestra el efecto significativo que tiene la martensita sobre la transformación de la dureza del acero, al incrementar el contenido de carbono.

27.2.2 Procesos del tratamiento térmico

El tratamiento térmico para formar martensita consiste en dos pasos: austenitización y enfriamiento por inmersión. Con frecuencia, después de estos pasos sigue un templeado para producir martensita templada. La **austenitización** implica calentamiento del acero

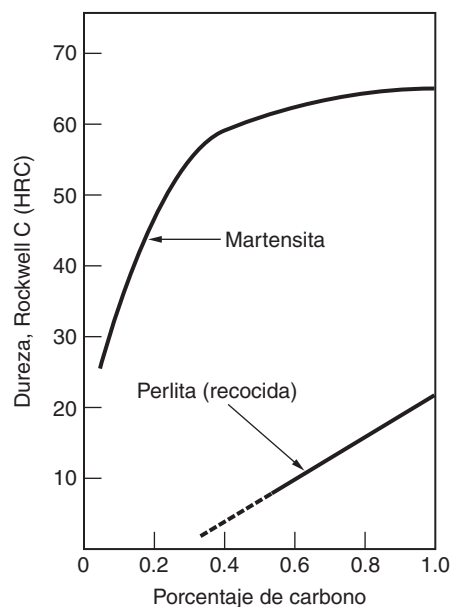


FIGURA 27.2 La dureza del acero al carbono como una función del contenido de carbono en la martensita (endurecida) y la perlita (recocida).

a una temperatura lo suficientemente alta para convertirse entera o de manera parcial en austenita. Esta temperatura puede determinarse por medio del diagrama de fases para la composición particular de la aleación. La transformación a austenita implica un cambio de fase que requiere tiempo y calentamiento. En consecuencia, el acero debe mantenerse a una temperatura elevada por un periodo suficiente de tiempo para permitir que se forme la nueva fase y se logre la homogeneidad de composición requerida.

El paso de **enfriamiento por inmersión** implica que el enfriamiento de la austenita sea lo suficientemente rápido para evitar el paso a través de la nariz de la curva TTT, como se indica en la trayectoria de enfriamiento de la figura 27.1. La velocidad de enfriamiento depende del medio de inmersión y de la velocidad de transmisión de calor dentro de la pieza de acero. Se usan varios medios de inmersión en las operaciones comerciales de tratamiento térmico que incluyen: 1) salmuera —agua salada, generalmente agitada—; 2) agua dulce —destilada, no agitada—; 3) aceite destilado y 4) aire. La inmersión en salmuera agitada proporciona el enfriamiento más rápido de las superficies calentadas de la pieza, mientras que el temple al aire es el más lento. El problema es que mientras más efectivo sea el medio de inmersión en el enfriamiento, es más probable que cause esfuerzos internos, distorsión y grietas en el producto.

La velocidad de transferencia de calor dentro de la pieza depende en gran medida de su masa y su geometría. Una forma cúbica grande se enfriará mucho más despacio que una lámina delgada pequeña. El coeficiente de conductividad térmica k de la composición particular también es un factor en el flujo de calor en el metal. Hay una considerable variación en k para diferentes grados de acero; por ejemplo, el acero al bajo carbono tiene un valor típico de k igual a $0.046 \text{ J/s-mm-}^\circ\text{C}$ ($2.2 \text{ Btu/h-in-}^\circ\text{F}$), mientras que un acero de alta aleación debería tener una tercera parte de este valor.

La martensita es dura y frágil. El **templado** es un tratamiento térmico que se aplica a los aceros endurecidos para reducir su fragilidad, incrementar su ductilidad y tenacidad y aliviar los esfuerzos en la estructura de la martensita. El tratamiento implica calentamiento y mantenimiento a una temperatura por debajo de la eutectoide durante aproximadamente una hora, seguido de un enfriamiento lento. El resultado es la precipitación de partículas muy finas de carburo de la solución martensítica hierro-carbono y la transformación gradual de la estructura cristalina de BCT a BCC. Esta nueva estructura se llama **martensita templada**. Una ligera reducción en resistencia y dureza producen una mejora en ductilidad y tenacidad. La temperatura y el tiempo del tratamiento de templado controlan el grado de suavización del acero endurecido, ya que el cambio de la martensita no templada a la templada implica difusión.

En conjunto, los tres pasos del tratamiento térmico del acero para formar martensita templada pueden representarse como se muestra en la figura 27.3. Hay dos ciclos de calentamiento y enfriamiento, el primero para producir martensita y el segundo para templarla.

FIGURA 27.3 Tratamiento térmico típico del acero: austenización, enfriamiento por inmersión y templado.

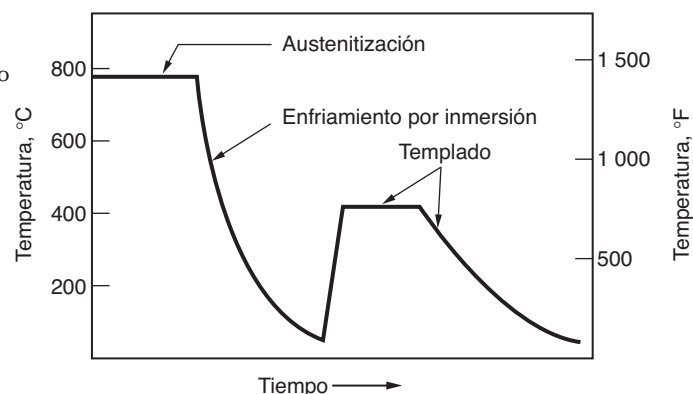
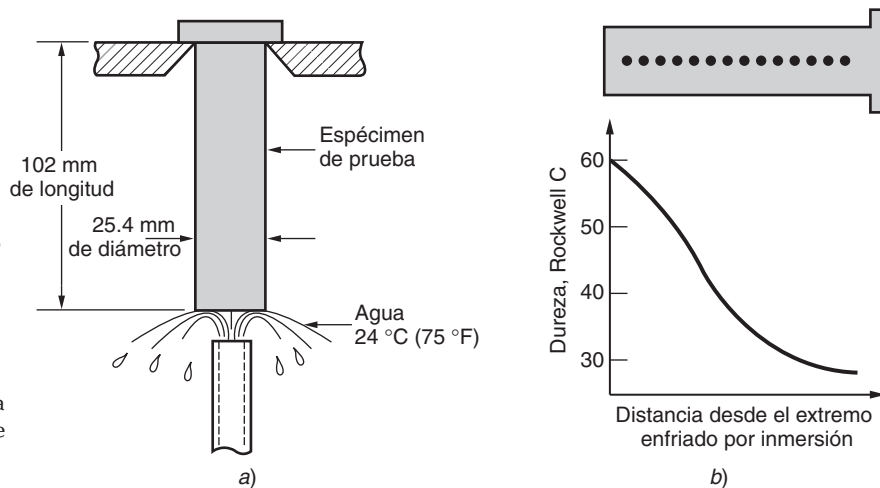


FIGURA 27.4 Prueba de Jominy del extremo enfriado por inmersión; a) instalación de la prueba, que muestra la inmersión del extremo del espécimen de prueba; y b) patrón típico de las lecturas de dureza como una función de la distancia desde el extremo enfriado por inmersión.



27.2.3 Templabilidad

El término **templabilidad** se refiere a la capacidad relativa de un acero de ser endurecido por transformación a martensita. Es una propiedad que determina la profundidad por debajo de la superficie enfriada por inmersión a la cual el acero se endurece o la severidad de la inmersión requerida para lograr una cierta penetración de la dureza. Los aceros con buena templabilidad pueden endurecerse más profundamente debajo de la superficie y no requieren altas velocidades de enfriamiento. La templabilidad no se refiere a la máxima dureza que se puede lograr en el acero; eso depende del contenido de carbono.

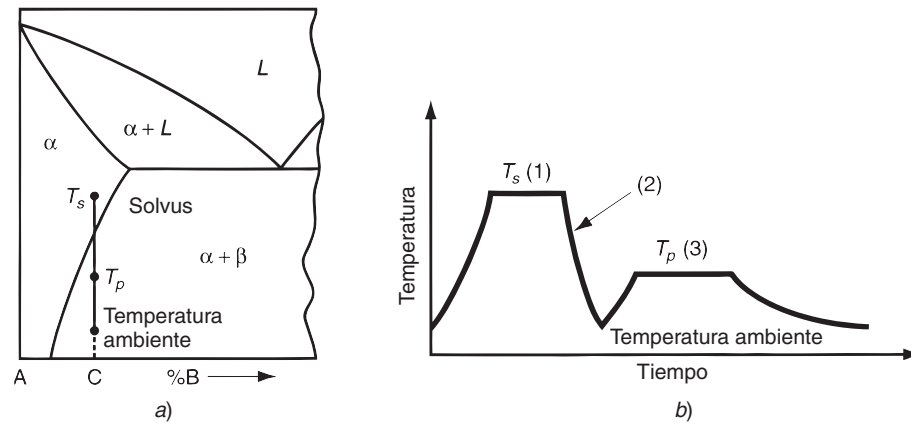
La templabilidad de un acero se incrementa mediante la aleación. Los elementos aleantes que tienen el mayor efecto son el cromo, el manganeso, el molibdeno (y el níquel en menor grado). El mecanismo con el cual operan estos elementos aleantes es el aumento del tiempo antes de que inicie la transformación de austenita a perlita en el diagrama TTT. En efecto, la curva TTT se mueve hacia la derecha, lo que permite velocidades de enfriamiento más lentas durante la inmersión. Por lo tanto, la trayectoria del enfriamiento es capaz de seguir con mayor facilidad una trayectoria más lenta hacia la *línea M_s* , con lo que evita el obstáculo impuesto por la nariz de la curva TTT.

El método más común para medir la templabilidad es la **prueba de Jominy del extremo enfriado por inmersión**. La prueba involucra el calentamiento de un espécimen estándar de diámetro de 25.4 mm (1.0 in) y longitud de 102 mm (4.0 in) dentro del rango de la austenita, y después la inmersión de uno de sus extremos en agua fría mientras se sostiene en posición vertical, como se muestra en la figura 27.4a). La velocidad de enfriamiento en el espécimen de prueba disminuye con el incremento de la distancia desde el extremo que se enfría por inmersión. La templabilidad está indicada por la dureza del espécimen como una función de la distancia desde el extremo enfriado por inmersión, como se muestra en la figura 27.4b).

27.3 ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACIÓN

El **endurecimiento por precipitación** implica la formación de finas partículas (precipitados) que actúan para bloquear el movimiento de las dislocaciones y hacer más resistente y duro al metal. Es el principal tratamiento térmico para hacer resistentes las aleaciones de aluminio, cobre, magnesio, níquel y otros metales no ferrosos. El endurecimiento por precipitación puede usarse también para hacer resistentes las aleaciones de acero que no pueden formar martensita por medio del método usual.

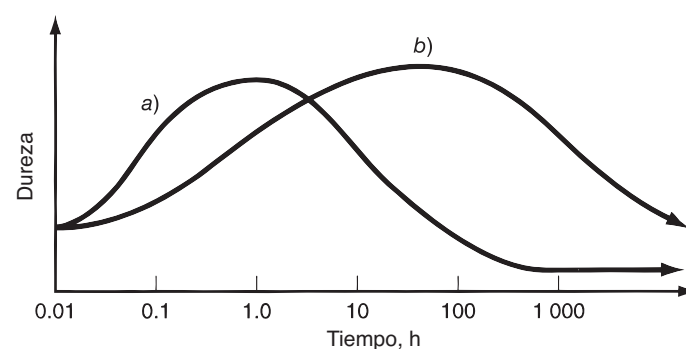
FIGURA 27.5
Endurecimiento por precipitación a) diagrama de fase de un sistema de aleación consistente en los metales A y B que pueden ser endurecidos mediante precipitación; y b) tratamiento térmico: 1) tratamiento de la solución, 2) enfriamiento por inmersión y 3) tratamiento de precipitación.



La condición necesaria que determina si un sistema de aleación puede ser endurecido por precipitación es la presencia de una línea inclinada de solvus, como se muestra en el diagrama de fase de la figura 27.5a). Una composición que puede endurecerse por precipitación es aquella que contiene dos fases a temperatura ambiente, pero que se puede calentar a una temperatura tal que disuelva la segunda fase. La composición C que se muestra en la figura satisface este requerimiento. El proceso de tratamiento térmico consiste en tres pasos, los cuales se ilustran en la figura 27.5b): 1) **tratamiento de la solución**, en el cual se calienta la aleación a la temperatura T_s arriba de la línea solvus dentro de la región de la fase alfa y se sostiene por un periodo suficiente para disolver la fase beta; 2) **enfriamiento por inmersión** a temperatura ambiente para crear una solución sólida sobresaturada y 3) **tratamiento por precipitación**, en el cual se calienta la aleación a una temperatura T_p , por debajo de T_s , para ocasionar la precipitación de partículas finas de la fase beta. Este tercer paso se llama **envejecimiento**, y por esta razón algunas veces se le llama al proceso entero **endurecimiento por envejecimiento**. Sin embargo, el envejecimiento puede ocurrir en algunas aleaciones a temperatura ambiente, y así el término **endurecimiento por precipitación** resulta más adecuado para los tres pasos del proceso de tratamiento térmico que se analiza aquí. Cuando el paso de envejecimiento se realiza a temperatura ambiente se usa el término **envejecimiento natural**. Cuando se realiza a una temperatura elevada, como se muestra en la figura, a menudo se usa el término **envejecimiento artificial**.

Durante el paso de envejecimiento se logra una alta resistencia y dureza en la aleación. La combinación de tiempo y temperatura en el proceso de precipitación (envejecimiento) es crítica para lograr las propiedades deseadas en la aleación. A temperaturas elevadas en el tratamiento por precipitación, como en la figura 27.6a), la dureza se eleva en un tiempo relativamente corto; mientras que a temperaturas más bajas, como en b), se requiere más tiempo para endurecer la aleación, pero su máxima dureza será probablemente más grande que en el primer caso. Como se observa en la gráfica, la continuación del proceso de

FIGURA 27.6 Efecto de la temperatura y el tiempo durante el tratamiento por precipitación (envejecimiento): a) alta temperatura de precipitación y b) baja temperatura de precipitación.



envejecimiento da por resultado una reducción en las propiedades de dureza y resistencia. A esta reducción se le llama **sobrenvejecimiento**. El efecto global es similar al del recocido.

27.4 ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL

El endurecimiento superficial se refiere a cualquiera de los varios tratamientos termoquímicos aplicados al acero en los cuales la composición de la superficie de la pieza se altera por la adición de carbono, nitrógeno u otros elementos. Los tratamientos más comunes son: carburización, nitruración y carbonitruración. Por lo general, estos procesos se aplican a las piezas de acero de bajo carbono para lograr una corteza exterior dura resistente al desgaste al mismo tiempo que se retiene un núcleo tenaz. A menudo, se usa el término **endurecimiento superficial** para denominar este tratamiento.

Carburización La carburización es el tratamiento de endurecimiento superficial más común. Implica el calentamiento de una pieza de acero al bajo carbono en presencia de un medio rico en carbono, de manera que el C se difunda en la superficie. En efecto, la superficie se convierte en un acero al alto carbono, con una dureza más alta que la del núcleo de bajo carbono. El entorno rico en carbono puede crearse de varias formas. Un método consiste en el uso de materiales carbonáceos, como carbón vegetal o coque, que se empaican en un recipiente cerrado junto con las piezas. Este proceso se llama **carburización en caja**, y produce una capa relativamente gruesa en la superficie de la pieza, cuyos valores fluctúan aproximadamente entre 0.6 y 4 mm (0.025 y 0.150 in). Otro método, llamado **carburización gaseosa**, usa hidrocarburos combustibles, como el propano (C_3H_8) dentro de un horno sellado para difundir el carbono dentro de las piezas. El grosor de la corteza en este tratamiento es delgado, de 0.13 a 0.75 mm (0.005 a 0.030 in). Otro proceso es la **carburización líquida**, el cual emplea un baño de sal fundida que contiene cianuro de sodio (NaCN), cloruro de bario ($BaCl_2$) y otros componentes para difundir el carbono en el acero. Este proceso produce un espesor de la capa superficial que fluctúa entre el de los otros dos tratamientos. Las temperaturas típicas de carburización están entre 875° y 925 °C (1 600° y 1 700 °F), dentro del rango de la austenita.

La carburización seguida de un enfriamiento por inmersión produce un endurecimiento de la superficie alrededor de HRC = 60. Sin embargo, debido a que las regiones internas de la pieza consisten en acero al bajo carbono, y a que su templeabilidad es baja, no le afecta la inmersión y permanece relativamente tenaz y dúctil para soportar los impactos y los esfuerzos por fatiga.

Nitruración La nitruración es un tratamiento mediante el cual se difunde nitrógeno en las superficies de los aceros de aleación especial, para producir una delgada capa dura sin enfriar por inmersión. Para una mayor efectividad, el acero debe contener ciertos elementos aleantes tales como aluminio (0.85 a 1.5%) o cromo (5% o más). Estos elementos forman nitruros que precipitan como partículas muy finas en la superficie del acero endurecido. Los métodos de nitruración incluyen: la **nitruración gaseosa**, en la cual las piezas de acero se calientan en una atmósfera de amoníaco (u otra mezcla gaseosa rica en nitrógeno); y la **nitruración líquida** en la cual las piezas se sumergen en sales de cianuro fundidas. Ambos procesos se llevan a cabo a temperaturas de alrededor de 500 °C (950 °F). El espesor de la corteza va desde 0.025 mm (0.001 in) hasta alrededor de 0.5 mm (0.020 in), con durezas de hasta HRC 70.

Carbonitruración Como su nombre lo indica, la carbonitruración es un tratamiento en el que tanto el carbono como el nitrógeno se absorben en la superficie del acero, por lo general mediante calentamiento en un horno que contiene carbono y amoníaco (NH_3). El espesor de la corteza está normalmente entre 0.07 y 0.5 mm (0.003 y 0.020 in), con durezas comparables con las de los otros dos tratamientos.

Cromizado y borizado Son dos tratamientos adicionales de endurecimiento superficial que, de manera respectiva, difunden cromo y boro en el acero para producir capas que tienen un espesor típico de sólo 0.025 a 0.05 mm (0.001 a 0.002 in). El **cromizado** requiere temperaturas más altas y tiempos de tratamiento más largos que los métodos de endurecimiento superficial anteriores, pero la corteza resultante no solamente es dura y resistente al desgaste, sino también resistente al calor y a la corrosión. Por lo general, el proceso se aplica a aceros de bajo carbono. Las técnicas para difundir cromo en la superficie incluyen: el empacado de las piezas de acero con polvos o gránulos ricos en cromo, la inmersión en un baño de sal fundida que contiene Cr y sales de Cr y la deposición de vapores químicos (sección 29.4).

El **borizado** se lleva a cabo en aceros de herramienta, aleaciones basadas en níquel y cobalto, y hierros fundidos; también se ejecuta en aceros al carbono, usando polvos, sales o atmósferas gaseosas que contienen boro. El resultado de este proceso es una capa delgada con alta resistencia a la abrasión y un bajo coeficiente de fricción. Las capas endurecidas alcanzan 70 HRC. Cuando se usa el borizado en aceros al bajo carbono y baja aleación, también mejora la resistencia a la corrosión.

27.5 MÉTODOS E INSTALACIONES PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO

La mayoría de las operaciones de tratamiento térmico se realizan en hornos. Además, hay técnicas que pueden usarse para calentar de manera selectiva la superficie del trabajo o una porción de ella. Por lo tanto, esta sección se divide en dos categorías de métodos e instalaciones para el tratamiento térmico [9]: 1) hornos y 2) métodos selectivos de endurecimiento superficial.

Debe mencionarse que algunos de los equipos descritos aquí se utilizan para otros procesos además de los tratamientos térmicos; éstos incluyen la fundición de metales para colado (sección 11.4.1), calentamiento previo a los trabajos en caliente y medio caliente (sección 18.3), soldadura dura, soldadura blanda y curado de adhesivos (capítulo 32), y procesamiento de semiconductores (capítulo 35).

27.5.1 Hornos para tratamiento térmico

Los hornos varían mucho en cuanto a tecnología, tamaño y capacidad, construcción y control de la atmósfera. Por lo general, calientan las piezas mediante una combinación de radiación, convección y conducción. La tecnología de calentamiento se divide entre los calentados con combustibles y los calentados con electricidad. Los **hornos calentados con combustibles** son generalmente **calentados directamente**, lo cual significa que las piezas de trabajo quedan expuestas directamente a los productos de la combustión. Los combustibles incluyen gases (como el gas natural o el propano) y aceites que pueden atomizarse (como el diesel o el aceite combustible). La química de los productos de combustión puede controlarse al ajustar la mezcla aire-combustible u oxígeno-combustible para minimizar las incrustaciones (formación de óxido) sobre la superficie de trabajo. Los **hornos eléctricos** usan una resistencia eléctrica para calentar; son más limpios, silenciosos y proporcionan un calentamiento más uniforme, pero son más caros tanto en su valor de compra como en su operación.

Un horno convencional es un espacio cerrado diseñado para resistir las fugas de calor y adecuarse al tamaño de las piezas a procesar. Los hornos se clasifican en carga por lotes y continuos. Los **hornos por lotes** son más simples, consisten básicamente en un sistema de calentamiento dentro de una cámara aislada con una puerta para cargar y descargar las piezas. Ejemplos de este tipo general de horno son los **hornos de caja**, que se construyen como cajas rectangulares, disponibles en varios tamaños; **hornos con carro**, que son mucho más grandes y usan carros tipo ferrocarril para mover piezas grandes en la cámara de calentamiento; y **hornos tipo campana**, en los cuales la cubierta o campana del horno se puede elevar por medio de una grúa de puente para cargarlo o descargarlo.

Los **hornos continuos** se usan generalmente para velocidades de producción más altas y proporcionan un medio para mover el trabajo en el interior de la cámara de calentamiento. Los mecanismos alternativos para transportar el trabajo incluyen configuraciones circulares que utilizan soleras giratorias, y del tipo en línea recta en el cual las piezas se mueven mediante transportadores a través de una o varias cámaras de calentamiento colocadas en línea.

En ciertas operaciones de tratamiento térmico se requieren atmósferas especiales, como en algunos de los tratamientos de endurecimiento superficial que se han analizado. Estas atmósferas incluyen ambientes ricos en carbono o nitrógeno para la difusión de estos elementos en la superficie del trabajo. El control de la atmósfera es conveniente en las operaciones de tratamiento térmico convencional para evitar la oxidación excesiva o la descarburización.

Los **hornos al vacío** son capaces de crear un vacío en la cámara de calentamiento y de calentar las piezas por radiación. Una ventaja de estos hornos que se cita frecuentemente es que evitan la oxidación superficial de las piezas de trabajo; esto representa una alternativa atractiva para el control de la atmósfera. La desventaja es el tiempo requerido en cada ciclo para crear el vacío, lo cual reduce la velocidad de producción.

Otros tipos de horno son el de baño de sales y el de cama fluidizada. Los **hornos de baño de sales** son recipientes que contienen sales fundidas como cloruros o nitratos. Las piezas a tratar se sumergen en el medio fundido. Los **hornos de cama fluidizada** tienen un depósito en el que se encuentran pequeñas partículas inertes suspendidas en una corriente de gases calientes a alta velocidad. Bajo condiciones adecuadas, el comportamiento del conjunto de partículas parece el de un fluido, por lo que ocurre un calentamiento rápido de las piezas sumergidas en esta cama de partículas.

27.5.2 Métodos de endurecimiento superficial selectivo

Con estos métodos se calienta sólo la superficie del trabajo o áreas locales de la superficie de trabajo. Difieren de los métodos de endurecimiento superficial (sección 27.4) en que no ocurren cambios químicos. Aquí los tratamientos son exclusivamente térmicos. Los métodos de endurecimiento superficial selectivo incluyen el endurecimiento por flama, el endurecimiento por inducción, el calentamiento por resistencia a alta frecuencia, el calentamiento por haz de electrones y el calentamiento por haz láser.

Endurecimiento por flama Este método implica el calentamiento del trabajo por medio de uno o más sopletes, seguido de un rápido enfriamiento por inmersión. Como proceso de endurecimiento, se aplica en aceros al carbono y aleados, aceros de herramienta y fundiciones de hierro. Los combustibles incluyen el acetileno (C_2H_2), el propano (C_3H_8) y otros gases. El nombre de endurecimiento por flama sugiere una operación muy manual con una falta general de control sobre los resultados; sin embargo, el proceso puede configurarse incluyendo control de temperatura, fijadores para posicionar el trabajo respecto a la flama y dispositivos indicadores que operan durante ciclos precisos de tiempo, todo lo cual proporciona un estrecho control de los resultados del tratamiento térmico. Es un proceso rápido y versátil que se presta para producciones altas y para componentes grandes, como engranes que exceden la capacidad de los hornos. Con un control adecuado, endurecen sólo las superficies externas sin afectar las partes internas. La profundidad del endurecimiento es de alrededor de 2.5 mm (0.10 in).

Calentamiento por inducción Este método implica la aplicación de energía inducida electromagnéticamente por medio de una bobina de inducción en una pieza de trabajo conductora de electricidad. El calentamiento por inducción es un método ampliamente usado en la industria para procesos como la soldadura dura, la soldadura suave y el curado adhesivo, así como en varios tratamientos térmicos. Cuando se usa para endurecimiento de aceros, el siguiente paso es un enfriamiento por inmersión. En la figura 27.7 se ilustra una disposición típica. La bobina inductora de calentamiento conduce una corriente alterna de alta frecuencia que induce una corriente en la pieza de trabajo encerrada para efectuar el

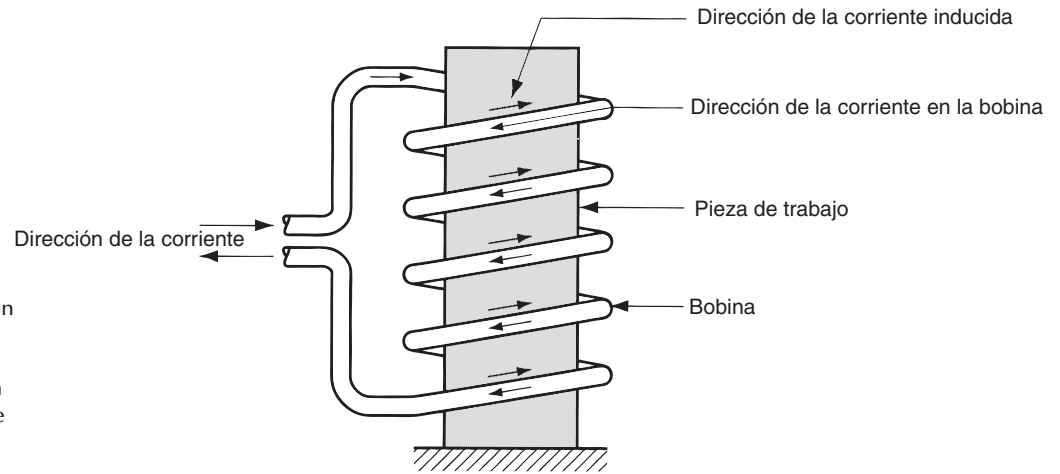


FIGURA 27.7 Configuración típica del calentamiento por inducción. La corriente alterna de alta frecuencia en una bobina induce corriente en la pieza de trabajo para efectuar el calentamiento.

calentamiento. Con este proceso puede calentarse la superficie, una parte de la superficie o la masa entera de la pieza. El calentamiento por inducción proporciona un método rápido y eficiente para calentar cualquier material conductor de la electricidad. Los tiempos del ciclo de calentamiento son cortos; en consecuencia, el proceso se presta para producciones medias o altas.

Calentamiento por resistencia a alta frecuencia (HF, por sus siglas en inglés) Este método se utiliza para endurecer áreas específicas de superficies de trabajo de acero mediante la aplicación de calentamiento por resistencia localizado a altas frecuencias (por lo general 400 kHz). En la figura 27.8 se muestra una configuración típica. El aparato consiste en un conductor de proximidad enfriado por agua que se coloca sobre el área que se desea calentar. Los contactos se aplican a la pieza de trabajo en los bordes exteriores del área. Cuando se aplica la corriente HF, la región por debajo del conductor de proximidad se calienta rápidamente a alta temperatura; se requiere menos de un segundo para alcanzar la escala de la austenita. Cuando la alimentación de corriente se detiene, el área, usualmente una línea estrecha como en la figura, se enfría por transferencia de calor al metal circundante. La profundidad del área tratada es de alrededor de 0.63 mm (0.025 in); la dureza depende del contenido de carbono del acero y puede llegar hasta 60 HRC [9].

Calentamiento por haz de electrones (EB, por sus siglas en inglés) La tecnología del haz de electrones (HE) es relativamente nueva en la manufactura. Sus aplicaciones incluyen el corte (sección 26.3.2), la soldadura por fusión (sección 31.4.1) y el tratamiento térmico (que se analiza aquí). La característica atractiva del procesamiento EB es la concentración de altas densidades de energía en una pequeña pieza localizada. El tratamiento térmico EB implica el endurecimiento de superficies localizadas en el acero. El haz de electrones se genera en un cañón EB que se enfoca sobre una pequeña área, y el resultado es una acumulación rápida de calor. A menudo, las temperaturas de austenitización pueden lograrse en menos de un segundo. Cuando se retira el haz dirigido, el área caliente se enfría por inmersión y endurece inmediatamente por transferencia de calor al metal frío circundante.

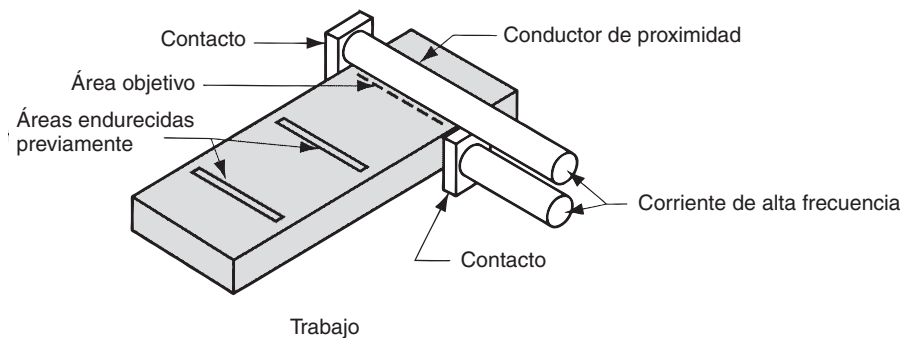


FIGURA 27.8 Disposición típica para el calentamiento por resistencia a alta frecuencia.

Una desventaja del calentamiento por EB (la misma desventaja se aplica a otros usos) es que puede obtenerse mejores resultados cuando el proceso se ejecuta al vacío. Por lo tanto, se necesita una cámara especial de vacío y tiempo para generarlo, de ahí las velocidades lentas de producción. Cuando el endurecimiento por EB se realiza de esta manera se eliminan las incrustaciones de oxidación sobre la superficie de trabajo.

Calentamiento por haz láser (LB, por sus siglas en inglés) Los láseres constituyen otra tecnología nueva, cuyas aplicaciones incluyen corte (sección 26.3.3), soldadura por fusión (sección 31.4.2), medición e inspección (sección 44.5.2) y tratamiento térmico. **Láser** es un acrónimo del nombre en inglés de *light amplification by stimulated emission of radiation* (amplificación luminosa de emisiones de radiación estimulada). En el endurecimiento de acero por LB, se enfoca un haz de luz consistente de alta densidad en un área pequeña; el haz se mueve generalmente a lo largo de una trayectoria definida sobre la superficie de trabajo. Esto causa calentamiento del acero dentro de la región austenita. Cuando el haz se cambia de lugar, el área se enfría de inmediato por transferencia de calor al metal circundante. La ventaja del calentamiento por LB sobre el EB es que los láseres no requieren de vacío para lograr mejores resultados. Los niveles de densidad de energía en el calentamiento con EB y LB son más bajos que en el corte o la soldadura por fusión.

REFERENCIAS

- | | |
|---|---|
| <p>[1] Ostwald, P. F. y Munoz, J., <i>Manufacturing Processes and Systems</i>, 9a. ed., John Wiley & Sons, Nueva York, 1977.</p> <p>[2] Brick, R. M., Pense, A. W. y Gordon, R. B., <i>Structure and Properties of Engineering Materials</i>, 4a. ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1977.</p> <p>[3] Chandler, H. (ed.), <i>Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels</i>, ASM International, Materials Park, Ohio, 1995.</p> <p>[4] Chandler, H. (ed.), <i>Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Nonferrous Alloys</i>, ASM International, Materials Park, Ohio, 1996.</p> <p>[5] Flinn, R. A. y Trojan, P. K., <i>Engineering Materials and Their Applications</i>, 5a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.</p> | <p>[6] Guy, A. G. y Hren, J. J., <i>Elements of Physical Metallurgy</i>, 3a. ed., Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass., 1974.</p> <p>[7] <i>Metals Handbook</i>, 9a. ed., Vol. 4. <i>Heat Treating</i>. ASM International, Materials Park, Ohio, 1981.</p> <p>[8] Vaccari, J. A., "Fundamentals of heat treating", Special Report 737, <i>American Machinist</i>, septiembre de 1981, pp. 185-200.</p> <p>[9] Wick, C. y Veilleux, R. F. (eds.), <i>Tool and Manufacturing Engineers Handbook</i>. 4a. ed. Vol. 3. <i>Materials, Finishing, and Coating</i>; sección 2: Heat Treatment, Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Mich., 1985.</p> |
|---|---|

PREGUNTAS DE REPASO

- | | |
|---|---|
| <p>27.1. ¿Por qué se tratan térmicamente los metales?</p> <p>27.2. Identifique las razones importantes por las que se recuecen los metales.</p> <p>27.3. ¿Cuál es el tratamiento térmico más importante para endurecer aceros?</p> <p>27.4. ¿Cuál es el mecanismo mediante el cual el carbono hace más resistente al acero durante el tratamiento térmico?</p> <p>27.5. ¿Qué información se obtiene de la curva TTT?</p> <p>27.6. ¿Qué función desempeña el templado?</p> | <p>27.7. Defina templabilidad.</p> <p>27.8. Mencione algunos de los elementos que tienen el mayor efecto en la templabilidad del acero.</p> <p>27.9. Indique cómo afecta a la curva TTT la templabilidad de los elementos aleantes del acero.</p> <p>27.10. Defina qué es endurecimiento por precipitación.</p> <p>27.11. ¿Cómo funciona la carburización?</p> <p>27.12. Identifique los métodos de endurecimiento superficial selectivo.</p> |
|---|---|