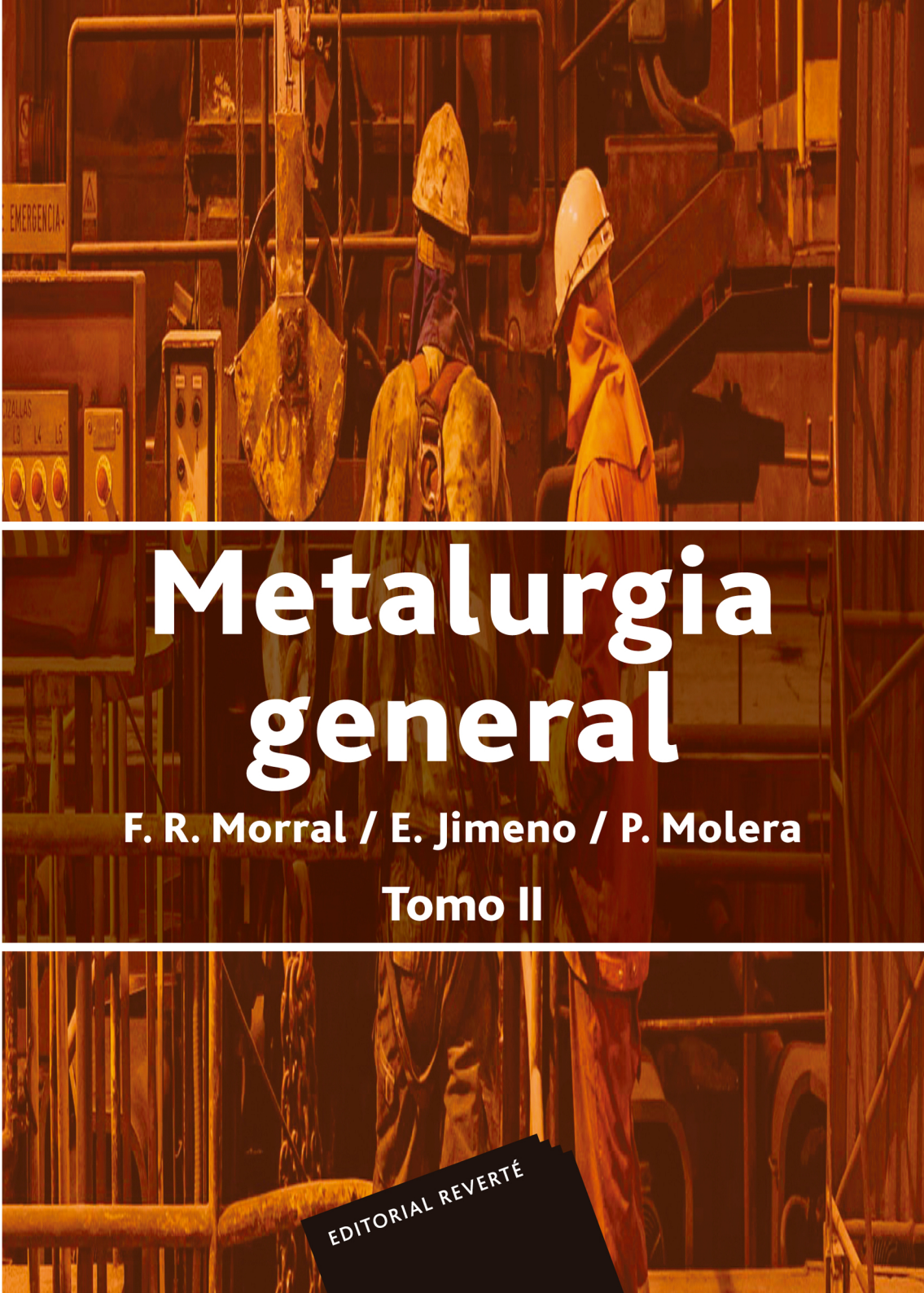


The background of the entire cover is a photograph of an industrial setting, likely a steel mill. Two workers in full-body protective suits and helmets are visible. The worker on the left is wearing a dark suit, while the one on the right is in a bright orange suit. They are standing amidst complex machinery, including metal frames, pipes, and control panels. A sign with the word "EMERGENCIA" is visible on the left. The overall lighting is warm and orange-toned, typical of industrial environments.

Metalurgia general

F. R. Morral / E. Jimeno / P. Molera

Tomo II

EDITORIAL REVERTÉ

Metalurgia general

F. R. Morral / E. Jimeno / P. Molera

Tomo II



**EDITORIAL
REVERTÉ**

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · México

© F. R. Morral, E. Jimeno y P. Molera

Edición en papel

© Editorial Reverté, S. A., 1985

ISBN: 978-84-291-6073-4

Edición ebook (PDF)

© Editorial Reverté, S. A., 2021

ISBN: 978-84-291-9153-0

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15, Local B

08029 Barcelona

Tel: (34) 93 419 33 36

e-mail: reverte@reverte.com

Internet: <http://www.reverte.com>

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas por las leyes.

Índice analítico

Capítulo 18

Métodos metalográficos	695
Microscopia óptica	710
Microscopia electrónica	722
Fractografía	725
Microscopio iónico	726
Difracción	728
Fluorescencia	743
Bibliografía	746

Capítulo 19

Transformaciones en estado sólido	749
Deformación plástica de los metales	749
Recocido	761
Recuperación	763
Recristalización alotrópica	776
Endurecimiento	781
Endurecimiento estructural	782
Transformaciones alotrópicas	791
Transformación martensítica	792
Transformación eutectoide	794
Transformación bainítica	794
Transformación orden-desorden	795
Transformación espinodal	795
Metales endurecidos por óxidos	797
Bibliografía	800

Capítulo 20

Propiedades físicas	801
Capacidad calorífica	802
Propiedades eléctricas	804
Propiedades magnéticas	807
Propiedades ópticas	815
Bibliografía	815

Capítulo 21

Propiedades mecánicas	817
Comportamiento elástico de los metales	818
Comportamiento plástico	820
Ensayos mecánicos	821
Fluencia o termofluencia (Creep)	839
Abrasión	849
Resiliencia	853
Fragilidad	856
Fatiga de los metales	858
Bibliografía	866

Capítulo 22

Ensayos no destructivos	869
Exudación	871
Magnetoscopia	872
Métodos electromagnéticos	875
Métodos eléctricos	878
Ensayo de dureza por magnetoestricción	879
Ultrasonidos	879
Radiografías	886
Bibliografía	892

Capítulo 23

Moldeo	893
Moldes	894
Moldeo con escayola y con cemento	911
Moldeo de precisión o a la cera perdida	913
Moldeo en cáscara o por casquete	917
Moldeo en coquillas	919
Moldeo a presión o por inyección	920
Moldeo por centrifugación	924
Colada continua	926
Galvanoplastia o electroconformación	930

Obtención de metales ultrapuros	931
Nuevas técnicas de moldeo	933
Moldeo de metales amorfos	936
Bibliografía	937

Capítulo 24

Hechurado	939
En caliente	939
En frío	950
Mecanizado	961
Mecanizado electroquímico	970
Bibliografía	973

Capítulo 25

Metalurgia de los polvos (Pulvimetalurgia)	977
Polvos metálicos	979
Propiedades de los polvos	988
Los tratamientos de los polvos	994
Compactación	995
Sinterización	1003
Los acabados	1008
Técnicas especiales	1011
Aplicaciones	1014
Bibliografía	1021

Capítulo 26

Soldadura y corte de los metales	1023
Soldadura blanda	1026
Soldadura dura	1028
Soldadura autógena	1031
Metalurgia de la soldadura	1051
Corte de los metales	1053
Bibliografía	1058

Capítulo 27

Diagrama hierro-carbono	1061
Puntos críticos	1062
Fases del diagrama Fe-C	1065
Aceros	1072
Diagrama Fe-grafito	1084
Bibliografía	1086

Capítulo 28

Tratamiento térmico de los aceros	1087
Transformación de la austenita	1088
Efecto de la temperatura	1091
Curvas transformación-tiempo-temperatura	1092
Temple	1101
Revenido	1112
Tratamientos isotérmicos	1117
Recocido	1119
Tratamientos térmicos superficiales	1126
Endurecimiento superficial por modificación de la composición de la superficie	1126
Endurecimiento superficial por tratamiento térmico	1135
Bibliografía	1137

Capítulo 29

Aceros aleados	1139
Clasificación de los aceros aleados	1139
Elementos de aleación	1147
Aceros rápidos	1163
Aceros maraging	1170
Aceros inoxidables	1173
Bibliografía	1182

Capítulo 30

Fundiciones	1185
Fundición gris	1191
Fundición blanca	1198
Fundición maleable	1200
Fundición esferoidal	1203
Tratamientos térmicos y fundiciones especiales	1205
Bibliografía	1211

Capítulo 31

Metales ligeros	1213
Aluminio	1213
Aleaciones de aluminio	1217
Aleaciones de magnesio	1236
Titanio	1243
Aleaciones de titanio	1245
Bibliografía	1249

Capítulo 32

El cobre y sus aleaciones	1251
Impurezas y elementos de aleación en el cobre	1254
Latones	1262
Bronces	1274
Bronces de aluminio	1281
Bronces de silicio	1285
Bronces de berilio	1287
Bibliografía	1290

Capítulo 33

Níquel y cobalto	1291
Níquel	1291
Aleaciones de níquel	1294
Cobalto	1309
Aleaciones de cobalto	1311
Superalaciones	1312
Bibliografía	1315

Capítulo 34

Plomo, estaño, cinc y mercurio	1316
Plomo	1317
Estaño	1319
Cinc	1320
Mercurio	1323
Aleaciones antifricción	1326
Aleaciones de soldadura	1333
Aleaciones para tipos de imprenta	1335
Aleaciones de bajo punto de fusión	1338
Bibliografía	1339

Capítulo 35

Metales nobles, refractarios y tierras raras	1341
Metales nobles	1341
Metales refractarios	1347
Tierras raras	1355
Bibliografía	1356

Capítulo 36

Corrosión	1357
Tipos	1357

Termodinámica	1358
Mecanismos de corrosión química	1370
Corrosión electroquímica	1374
Factores de la corrosión	1378
Polarización	1386
La corrosión y las propiedades mecánicas	1392
Bibliografía	1398
 Capítulo 37	
Protección	1399
Inhibidores	1399
Protección catódica	1406
Recubrimientos	1411
Bibliografía	1434
 Índice alfabético	1437

Capítulo 18

MÉTODOS METALOGRÁFICOS

En capítulos anteriores se han considerado las fases posibles en las aleaciones y se han expuesto los diagramas de fases binarios y ternarios. Ahora bien, las aleaciones industriales frecuentemente ofrecen mayores complejidades y hasta tienen estructuras que no se encuentran en los diagramas de equilibrio, tal como se ha discutido, si bien las fases y las estructuras encontradas presentan características que permiten separarlas y reconocer las diferencias del comportamiento de las aleaciones. En general, la identificación de la estructura no puede depender de un solo método, y así es corriente emplear dos o más medios para asegurar su reconocimiento. Hay que tener en cuenta que la deformación, tratamientos térmicos y asociaciones de éstos pueden introducir cambios en las fases que es necesario tener presentes. Con frecuencia se observa que los diagramas que se han estudiado por un solo método, y hasta por dos, presentan áreas erróneas: unos tienen demasiados campos y otros presentan deficiencia de éstos. Naturalmente, en el momento en que por la experiencia se conocen las fases presentes, entonces puede ser suficiente un solo método, tal como el microscópico, para el estudio de los sistemas metálicos.

Además de los estudios especulativos propios, la metalografía tiene otra misión básica que llenar, consistente en ser instrumento de regulación, control y verificación de los materiales y procesos metalúrgicos, pues los metales y aleaciones se aplican por sus útiles propiedades, que satisfacen las exigencias tecnológicas del mundo actual. Estas propiedades, que hacen a los metales útiles, son función

de la microestructura. Por este motivo interesa el estudio de la misma: el tamaño de grano, el tamaño, forma y distribución de las diversas fases e inclusiones, características todas íntimamente relacionadas con las propiedades mecánicas de los metales. El examen de la microestructura permite conocer los tratamientos térmicos y mecánicos a que ha estado sometido un metal, y prever su probable comportamiento en unas determinadas condiciones.

El término *metalografía* se ha empleado por muchos en un sentido relativamente limitado, como sinónimo de microscopia de los metales. Sin embargo, en rigor, en él deben incluirse todos los métodos de examen sobre la estructura y propiedades de los metales: el estudio de la estructura de los metales constituye solamente una etapa del examen metalográfico completo de cualquier material. Metalográficamente, es asimismo esencial el estudio de las características intrínsecas de un metal o aleación en relación con sus propiedades físicas y mecánicas, y sus efectos térmicos.

Los medios primeramente empleados para la investigación de las propiedades de los metales y aleaciones han sido el método químico y el ensayo mecánico. Hoy, la metalografía ha implantado nuevos métodos de investigación, que a la vez de explicar algunas de las dificultades no aclaradas sólo por los métodos antiguos, son de una gran importancia para completar e interpretar los resultados del análisis químico de los metales y aleaciones.

Gracias a la metalografía han adquirido la enorme importancia industrial que tienen hoy los aceros ordinarios y especiales y algunos tipos de aleaciones ligeras y de cobre, pues, en general, las propiedades físicas de una aleación están más íntimamente relacionadas con la estructura del material que con la composición química. Para determinar las propiedades de un material metálico son factores de suprema importancia la naturaleza de los distintos microconstituyentes presentes, tamaño relativo y distribución, existencia de sustancias extrañas o inclusiones y los efectos estructurales del tratamiento térmico y mecánico, en unión de otros aspectos revelados por su examen y ensayo.

Examen a visión directa

Este examen es muy útil y debe hacerse siempre. Una persona con experiencia puede identificar el material por su aspecto y peso, y el uso a que se dedica. Desde luego, debe reconocerse si se trata de un producto moldeado, forjado o laminado, u obtenido por otros medios.

La observación de la muestra es a tamaño natural, pero aun así, con frecuencia se hacen análisis de gran valor, sobre todo después de pulir las probetas y tratar la superficie con un agente químico. Particularmente se consigue hacer resaltar los granos y apreciar algunos defectos de interés. Es muy frecuente que en el estudio de la rotura el examen a simple vista por un experto dé, como resultado, un criterio acertado sobre la causa.

Preparación

El éxito del análisis metalográfico depende, en gran parte, del cuidado que se haya tenido en la preparación de la muestra. El camino que se ha de seguir en la preparación de una muestra es sencillo, pero constituye una técnica que se adquiere solamente tras una práctica constante.

Corte

La primera dificultad con que se encuentra el metalógrafo es la elección de la muestra. Si se trata de estudiar el fallo de un material, la muestra se tomará de la zona más próxima posible al punto en que se ha producido el fallo, y se comparará posteriormente con otra obtenida en una sección normal.

Una posibilidad de error se puede producir al cortar el material para preparar la probeta; si, por ejemplo, ésta contiene martensita, al cortar en seco la probeta se destempla aquélla, y el observador no aprecia lo que realmente existía en el material. La probeta se obtiene por corte con una sierra o con disco abrasivo, de carburo de silicio, de diamante, etc., previsto de abundante refrigeración para evitar, durante el corte, el calentamiento de la probeta. Nunca se utiliza el oxi-corte.

Si la técnica de corte no es adecuada, también se puede desordenar el material. Para obtener microfotografías en los bordes con gran aumento, es necesario impedir que aquéllos, durante el pulido, tiendan a redondearse; esto se consigue de varias maneras mediante acoplamiento del borde con otro material adecuado. Si se utilizan montajes con grapas o aros, al realizarse el ataque con el agente químico se pueden producir manchas, que se evitan haciendo el montaje sobre un metal depositado electrolíticamente, o bien separando los distintos metales con una hoja fina de metal.

Se puede decir que para la preparación de las probetas para su examen, y, en realidad, también para las que se han de tomar réplicas para usarlas con el microscopio electrónico, se exige lo siguiente:

- 1) Tener una probeta del metal, que ciertamente sea representativa del mismo. Esto es importantísimo en todo análisis.
- 2) El tamaño de la probeta ha de ser tal que se pueda manejar con facilidad, de unos 2 a 2,5 cm de lado de sección y algo menos de gruesa. Las probetas más pequeñas se acostumbran montar sobre un molde; para ello se emplean formas fijadoras de metal, o bien se las monta en plásticos (resinas) que solidifican por el calor, termoendurecibles, completamente transparentes, cuando se quiere conocer la orientación de la probeta, o en baquelita. Algunos de los plásticos hay que tratarlos térmicamente, otros se endurecen por la acción de un agente químico.

Desbaste

La finalidad del desbaste no es otra que la de preparar la superficie para el pulido, eliminando las capas distorsionadas, y obtener una superficie plana, ya que el microscopio tiene sólo una pequeña profundidad focal. Si la probeta es de material blando, se puede aplanar utilizando una lima fina, la cual debe manejarse mediante movimiento de vaivén sin hacer apenas presión.

Después de un desbaste tosco de la superficie, la cual se examina para estar seguro de que forma un plano, se procede al desbaste fino con papel de esmeril. Se pasan por lijadoras de cinta o, sencillamente, sobre papel de lija apoyado en una superficie plana de vidrio. Estos papeles tienen incrustada una capa de carborundo (CSi) o corindón (Al_2O_3). Se debe determinar la granulometría y se utiliza una serie de lijas, de modo que las primeras sean de grano grueso y las últimas de grano fino. Se pasa de un papel al otro cuando se ha logrado quitar las rayas introducidas en el anterior papel. La manera práctica de hacerlo consiste en frotar la probeta de modo que las rayas del nuevo papel formen con las anteriores ángulo de 90° ; se sabe que se ha llegado al final del desbaste en este papel cuando se ven todas las rayas en una dirección. Luego se insiste un poco, de modo que cuanto menor sea la granulometría, más debe insistirse.

Cada pase no ha de requerir más de dos a tres minutos, y si no se consigue así un buen resultado, es señal de que en dicho pase se emplea un abrasivo demasiado fino y no se hace más que perder el tiempo.

El *balanceo* es la mayor dificultad en el desbaste, pues una vez conseguida una superficie plana, la probeta puede desviar su orientación e iniciarse el desbaste según otro plano ligeramente inclinado con respecto al anterior, y así queda un surco entre los dos, simplemente porque se ha querido mantener la probeta con demasiada rigidez.

Hay que tener sumo cuidado en que las partículas abrasivas de un papel no pasen al papel siguiente, pues entonces se producen huellas profundas que no se eliminarán por el desbaste sucesivo, y, asimismo, se ha de lavar bien la probeta con agua corriente, después de cada pase.

El desbastado de una aleación frágil requiere un gran cuidado, y el mejor método puede ser muy distinto del más conveniente para un material tenaz.

Normalmente se suele emplear el desbaste en húmedo.

Pulido

El pulido se aprende puliendo, sobre todo el mecánico, que es más un arte que una técnica. El pulido mecánico es un *corte* superficial que tiene por finalidad eliminar las rayas del desbaste y la zona de metal deformada por plasticidad.

El pulido se hace sobre un paño húmedo que se ha impregnado con un abrasivo fino de carácter especial: suspensión de alúmina en agua o polvo de diamante.

te en alcoholes grasos. Es corriente que el disco de pulido, provisto del paño y el abrasivo, gire con una velocidad de 550 a 1100 rpm, comprimiendo suavemente la probeta contra él. El paño puede ser de terciopelo, seda, lona, fieltro o lana.

Durante el pulido deben desaparecer las rayas y se obtiene una superficie brillante, análoga a la de un espejo. Se ha de procurar que la profundidad del metal alterado sea mínima.

Cuando en la eficacia del pulido no son factores importantes el rayado y las incisiones, las sustancias más convenientes son siempre las más duras. Si, por el contrario, es necesaria una superficie bien lisa, el pulido se realiza por fusión local, debido a la fricción de los puntos más altos, y son más eficaces los abrasivos de elevado punto de fusión. Si el punto de fusión del abrasivo es inferior al de la superficie, entonces, puesto que las asperezas no se pueden calentar a una temperatura superior a la de fusión del abrasivo, no puede haber pulido.

En las condiciones normales, sobre la superficie está presente una delgada película de óxido, y si se insiste en el pulido, se puede deformar la estructura de las capas superficiales.

Hay que insistir en que no basta conseguir una superficie muy especular adecuadamente lisa, libre de rayas; además, han de preservarse intactas las inclusiones no metálicas para poder juzgar correctamente la limpieza del metal, y lo que es más importante, que la superficie pulida esté libre de cualquier pequeñísima cantidad de metal que haya fluido o esté alterado que impida ver su verdadera estructura. Ha sido manifiesto el rápido progreso alcanzado y extendido entre los metalógrafos de que la estructura observada en las probetas pulidas e inmediatamente atacadas una sola vez, raramente presenta la verdadera estructura del metal.

Con el pulido en seco pueden quedar en relieve los constituyentes más duros, consiguiendo de este modo hacer distintivamente posibles la forma de los mismos. Sin embargo, las indicaciones así obtenidas se han de aceptar con ciertas reservas, debido a la alteración de la superficie durante el pulido.

Para la mayoría de las aleaciones es satisfactorio el procedimiento de desbaste sobre papel esmeril, pulido húmedo y ataque por inmersión o con algodón, pero algunas veces se prefiere un pulido electrolítico, particularmente si existe el temor de que la estructura superficial sea afectada por la deformación durante la operación de pulido mecánico.

El primer uso del pulido electrolítico para el trabajo metalográfico fue el de Jacquet, en 1935. El método consiste, en esencia, en preparar primero sobre la probeta por medios mecánicos una superficie bastante lisa. Entonces, la probeta actúa como ánodo en un electrolito adecuado, en el cual los metales de que se trata sean sólo ligeramente solubles. En estas condiciones, la concentración de los iones metálicos en la superficie aumenta rápidamente hasta el valor de la saturación, después de lo cual el paso de la corriente se regula en gran parte por los

gradientes de concentración de los iones metálicos perpendicularmente a la superficie.

Las variables que intervienen en el pulido electrolítico se pueden resumir en las siguientes:

- a) Naturaleza, concentración, temperatura y agitación del electrolito.
- b) Tensión, densidad de corriente y distancia ánodo-cátodo.
- c) Preparación previa de la superficie que se ha de pulir.
- d) Tiempo de pulido.

Se conocen las condiciones generales del pulido electrolítico, pero para obtener buenos resultados, es indispensable saber elegir un baño de la composición adecuada para el metal o aleación utilizada. Los metales puros y las aleaciones de una sola fase se pueden pulir electrolíticamente, puesto que el efecto de las pequeñas diferencias de potencial debidas a la estructura cristalina desaparecen en las condiciones del pulido. Las aleaciones de dos fases se pueden igualmente pulir satisfactoriamente si entre las fases en contacto con el electrolito empleado no hay una diferencia de potencial demasiado grande. Desde luego, ha de operarse con mayor cuidado.

Con facilidad se descubre la diferencia existente en el pulido de un metal cuando la probeta está montada en baquelita o producto semejante, o bien simplemente sujeta por una grapa o anillo. Asimismo son manifiestas las ventajas de la preservación de las sustancias formadas sobre las superficies metálicas o aplicadas para proteger los metales, cuando se quiere hacer el examen de las mismas y se estudia la formación de grietas. Con frecuencia, la preservación se hace recubriendo electrolíticamente la superficie.

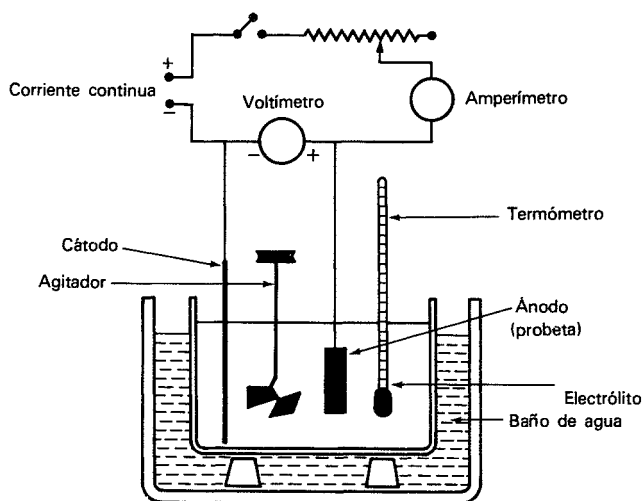


Fig. 18.1. — Circuito de una célula de pulido electrolítico.

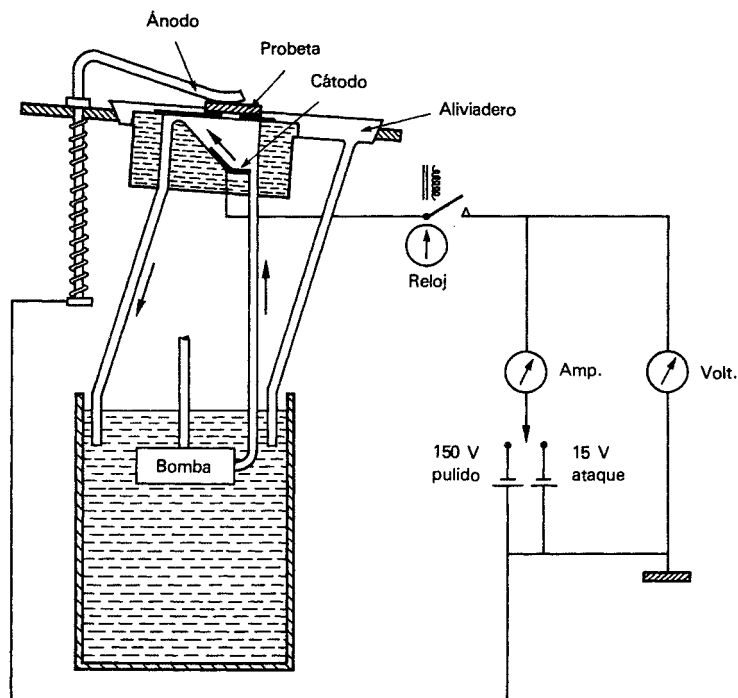


Fig. 18.2. — Pulidor electrolítico comercial.

En la figura 18.1 se presenta un circuito de una célula de pulido electrolítico y en la 18.2 se da el esquema del pulidor electrolítico comercial.

La superficie de un objeto metálico se puede considerar como formada por una sucesión de colinas y valles. La profundidad de los valles y la distancia entre las colinas es función de los métodos de preparación previa. Para obtener una superficie plana, hay que eliminar estas irregularidades. Un mecanismo ideal de pulido se puede imaginar constituido por dos fases:

- 1) Eliminación de las grandes irregularidades: nivelación.
- 2) Superación de las pequeñas irregularidades adquiriendo brillo: abrillantado.

El ataque superficial se distingue del pulido por la distinta intensidad de estas dos funciones. Se eliminan las grandes irregularidades, pero la superficie conserva un acabado mate.

La experiencia indica que, para un baño electrolítico determinado, el objeto anodizado se ataca o se pule según la densidad de corriente. Si en unos ejes car-

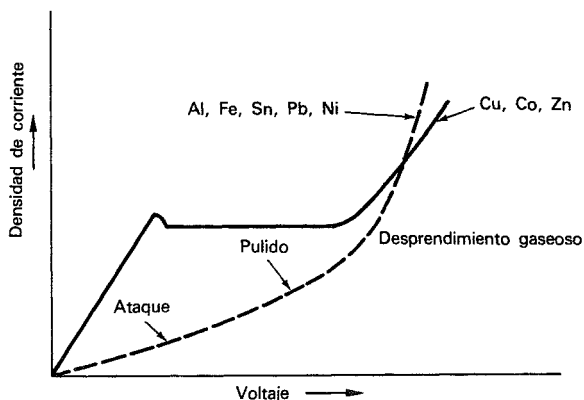


Fig. 18.3. — Densidad de corriente en función del voltaje aplicado.

tesianos se representa la densidad de corriente en función de la fuerza electromotriz aplicada en los bornes, se observa que, al aumentar gradualmente ésta, aquélla se estabiliza durante un intervalo de potencial y, luego, vuelve a aumentar: figura 18.3. El intervalo de potencial que equivale a un valor estable de la densidad de corriente equivale, a su vez, a la formación de una superficie plana y especular.

Al pulir una probeta, experimentalmente se encuentra en su superficie la existencia (fig. 18.4) de:

- 1) *Una película viscosa*, relativamente espesa, de productos de reacción, alrededor del ánodo.
- 2) *Una película delgada*.

La capa viscosa sería la responsable de la nivelación. Se observa a *simple vista*, pero además se puede demostrar, la existencia de una resistencia eléctrica de un modo más palpable: puliendo un pequeño *disco de cobre* provisto de gran velocidad angular; en el centro se pule y en los extremos no, ya que la fuerza centrífuga es mayor y elimina la capa viscosa.

En los primeros estudios sobre pulido electrolítico se atribuía a esta capa, también, el abrillantado. Actualmente parece más acertado atribuirle otra causa a este fenómeno. Entre los motivos que inducen a esta creencia figuran:

- a) La adición de iones cloruro, en un baño de electropulido, no modifica la capa, pero sí modifica el brillo superficial.
- b) Cuando hay fuertes desprendimientos gaseosos, a veces, se logran superficies brillantes, malogrando la capa viscosa.

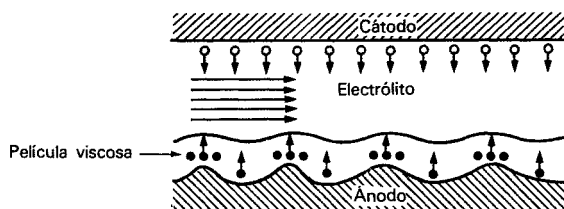


Fig. 18.4. — Película viscosa en el ánodo.

Estas razones pueden inducir a buscar otro fenómeno como responsable del brillo. Por esto no es aventurado postular la existencia de una película delgada, basándose, además, en dos hechos experimentales:

- 1) En trabajos sobre el efecto mercurio-metal se ha observado que el mercurio no moja a las probetas de cobre electropulidas, pero sí a las pulidas mecánicamente. Este hecho se puede explicar admitiendo la existencia de una película procedente del electropulido.
- 2) En la literatura especializada se encuentran trabajos que relacionan la variación de potencial con el tiempo, al abrir el circuito, sacando las probetas del baño. En los sistemas en que se observa pulido, el período de caída de potencial en función del tiempo es corto (del orden de $1/20$ segundos), mientras que en los sistemas donde no se observa pulido, el período de caída de potencial es largo, variando de algunos segundos a varios minutos.

El mecanismo por el que se produce el brillo podría explicarse de la siguiente manera: si el electrolito tiene libre acceso a la superficie anódica, tiene lugar ataque, ya que la disolución del metal se produce en los puntos de mayor energía. Para obtener una superficie brillante, debe prevenirse el ataque preferente. La película que se postula seguirá a los contornos de la superficie y se atacará uniformemente por el electrolito. Para que se mantenga la película, el paso de los iones a través de la intercara metal-película debe producirse a la misma velocidad en todos los puntos. Este fenómeno produciría el brillo.

Según este mecanismo, la variable cinética más importante en los fenómenos de pulido electroquímico es la velocidad con que se disuelve el metal. Éste es el motivo por el cual la mayor parte de los baños de electropulir son viscosos y, por lo general, con un porcentaje más bien bajo de agua.

Ataque

El objetivo del ataque de la superficie pulida es desarrollar la estructura micrográfica y hacerla visible al microscopio. El ataque puede ser químico o térmico.

En el ataque químico de los metales elementales puros se aprovecha la mayor reaccionabilidad de los límites de grano y la distinta reaccionabilidad de los granos según el plano de corte. En las aleaciones compuestas de dos o más fases, el ataque es muy distinto, según los componentes de que se trata, debido a la diferente composición química de las fases. Los reactivos para poner de manifiesto los componentes son varios y dependen de la naturaleza del metal y de la estructura que se desea observar. Para la micrografía es de una gran importancia la profundidad del ataque o grado de contraste producido en la estructura.

Se ha de determinar bien el tiempo de ataque de un reactivo, pues dado que la fase que se disuelve se ataca con velocidades diferentes en direcciones cristalográficas distintas, la acción se ha de suspender cuando se ha producido una rugosidad superficial tal que la luz del microscopio se disperse en vez de volver por reflexión a las lentes y queden gradualmente oscurecidos los granos según su orientación, sin excederse en el ataque. En los latones alfa es donde aparece la diferencia mayor en el oscurecimiento por distintas velocidades de ataque, debido a la orientación cristalográfica.

Para descubrir las estructuras generales de los aceros, es muy conveniente la disolución de ácido nítrico concentrado al 2 % en alcohol metílico absoluto (nital) que pone de manifiesto, preferentemente, los bordes de grano. También se emplea con la misma denominación de nital la disolución de ácido nítrico concentrado en alcohol etílico (2 %). La acción del ácido nítrico parece ser que forma una capa de óxido que es soluble en el ácido. Si la disolución de esta capa de óxido es más rápida que su formación, el acero queda incoloro, pero si ocurre lo contrario, sobre los diferentes granos cristalinos se forman, con diferente velocidad, capas de óxido, que por acción continuada del ácido se hacen cada vez más intensas, y se observa una coloración desde el amarillo claro al pardo oscuro. La velocidad de ataque del ácido nítrico de una concentración dada depende de la naturaleza del disolvente y de la conductividad eléctrica de la solución.

La solución alcohólica de ácido nítrico al 5 % es conveniente para los casos siguientes:

1. Revelar los límites de grano en los aceros.
2. Aumentar el contraste entre la perlita y la ferrita o la cementita.
3. Atacar los aceros especiales al cromo, con poco contenido de éste, que se atacan lentamente con ácido pícrico.
4. Revelar los límites de grano de la ferrita en estructuras que consisten en ferrita y martensita.

Por el contrario, se utiliza la solución alcohólica de ácido pícrico al 4 % en los siguientes casos:

1. Para conseguir la imagen con el máximo detalle de la perlita, martensita y martensita revenida.
2. Para diferenciar la ferrita, la martensita y los carburos masivos por el color que toman los últimos.

3. Para situar las partículas de los carburos en los bordes de grano de los aceros suaves.
4. Para distinguir las diferencias estructurales de transformación en los escalones de perlita y martensita.

En muchos casos, por ataque químico, se pueden fijar las clases existentes de inclusiones no metálicas. Por ejemplo, se pueden poner de manifiesto las diferencias entre los sulfuros entre sí y entre los óxidos y silicatos. Las inclusiones de estos últimos compuestos no son atacables por el ácido crómico ni por el ácido oxálico. En cambio, el sulfuro manganeso es atacado por el ácido crómico al 10 % en un tiempo de cinco minutos, en tanto que el sulfuro ferroso no es atacado. El sulfuro ferroso es atacado intensamente, en 1-2 minutos, por una solución de ácido oxálico al 1 %, mientras que el sulfuro manganeso, en estas condiciones, sólo lo es muy débilmente.

Un procedimiento rápido para el reconocimiento de las pequeñísimas partículas de escoria de los sulfuros es el de Künkele, que utiliza como reactivo una disolución gelatinosa que contiene pequeñas cantidades de ácido sulfúrico y nitrato de plata. Las inclusiones de los sulfuros precipitan sulfuro de plata al ponerse en contacto con el reactivo, por acción del ácido sulfhídrico producido, que se sitúa en forma de película protectora sobre la inclusión y sus contornos próximos. De esta manera se libra la inclusión y sus alrededores de la acción atacante del ácido, y la inclusión de sulfuro aparece rodeada de un contorno claro no atacado, en tanto que se ataca la masa del metal.

Con el reactivo de Künkele no sólo se ponen de manifiesto las pequeñas partículas de sulfuro, sino que a veces se aprecia la diferencia existente entre las mismas inclusiones no oxidadas.

Para atacar los aceros templados, es útil la solución de ácido clorhídrico al 10 %, y para los aceros austeníticos 18-8 se añade a la solución anterior un 2 % de ácido nítrico y una pequeña cantidad de un inhibidor.

El aspecto de la perlita con láminas oscuras de cementita y una fase clara de ferrita puede hacer pensar que la cementita se ataca por la solución de ácido nítrico en alcohol absoluto más rápidamente que la ferrita y, sin embargo, la cementita preeutectoide permanece clara bajo la acción de este reactivo.

La ferrita es la que se ataca con nital cuando está contigua a la cementita en la perlita, produciendo un foso alrededor de aquélla, pero en otras condiciones ninguna de las dos fases se oscurece. Ese foso se ve claramente en la perlita gruesa, si bien el microscopio en la perlita fina no resuelve los fosos paralelos y se ven como una sola línea negra. La cementita preeutectoide se distingue de la ferrita preeutectoide con picrato sódico.

Para poder observar el carburo y el fosfuro de hierro, se emplean disoluciones básicas y neutras, respectivamente, de picrato sódico. La disolución acuosa hirviente de picrato sódico (2 g de ácido pítrico, 24 g de hidróxido sódico y 73 cc de agua) en 10 minutos ataca a la cementita. La disolución neutra calien-

te colorea, después de una hora a hora y media, el fosfuro y deja claros los demás constituyentes estructurales. El picrato alcalino hace tomar color oscuro, además de al fosfuro, a la cementita, pero sólo si su superficie excede de un determinado tamaño. Si las láminas de cementita son muy finas, según aparecen en la perlita, el picrato no tiene acción intensa sobre las láminas sueltas, pero, a pesar de ello, la perlita aparece, en conjunto, oscurecida con respecto a los otros constituyentes estructurales; por ejemplo, la ferrita.

El ataque de los materiales no férreos se hace, en general, con nital. Para los cobres, latones y bronce α se usan también: la disolución acuosa de hidróxido amónico al 25 %, con unas gotas de peróxido de hidrógeno, que es apropiado para los grandes aumentos; la solución acuosa de persulfato amónico al 10 %, recién preparada, y la solución acuosa saturada de ácido crómico. En los bronce, bronce de aluminio, latones con mucho cinc para oscurecer la base beta, y en las aleaciones de cobre con níquel se atacan mejor con una solución acuosa que contiene un 5 % de cloruro férrico y un 10-15 % de ácido clorhídrico.

El aluminio y sus aleaciones se atacan con una disolución acuosa que contiene un 5 % de ácido nítrico y un 2 % de ácido clorhídrico; el magnesio, cinc y metales blancos, con nital; y el plomo y sus aleaciones, con mezclas de ácido acético glacial y peróxido de hidrógeno, y la mezcla de una parte de ácido acético glacial, una parte de ácido nítrico y cuatro partes de glicerina.

Para conseguir un buen ataque, es esencial que toda la superficie sea mojada por el reactivo. Una pequeñísima cantidad de aceite o grasa sobre la superficie impide el mojado y produce anomalías en la estructura. Antes de realizar el ataque, es conveniente limpiar la superficie con un algodón empapado en alcohol absoluto. Una vez comenzado el ataque, se ha de procurar que llegue a todas las partes de la probeta reactivo nuevamente añadido. Si la probeta se frota suavemente con un algodón empapado con el reactivo, no hay que limpiar previamente aquélla.

Cuando la probeta se extrae del reactivo, puede mancharse muy rápidamente, debido a la evaporación de éste, y dejar un precipitado del material disuelto. Para impedir esto, la probeta se somete a la acción instantánea del chorro de agua. La probeta se puede lavar inmediatamente con alcohol absoluto y secar en una corriente de aire caliente. En algunos casos basta con secar las probetas inmediatamente. Si se ha formado una película sobre la probeta, se vuelve a pulir ligeramente y se ataca de nuevo.

El ataque térmico consiste en calentar la probeta encima de una plancha de aluminio, hasta unos 180 °C. Los límites de grano se oxidan con preferencia: figura 18.5. La oxidación de los distintos granos depende de la orientación de los mismos. Por esto aparecen de distintos colores, debido a que las películas superficiales son algo transparentes y cuando el espesor d cumple la condición siguiente:

$$\frac{2d}{\cos \theta} = (2\eta + 1) \frac{\lambda}{2},$$

donde d es el espesor de la película, θ el ángulo de incidencia, λ , la longitud de onda, y η un número entero.

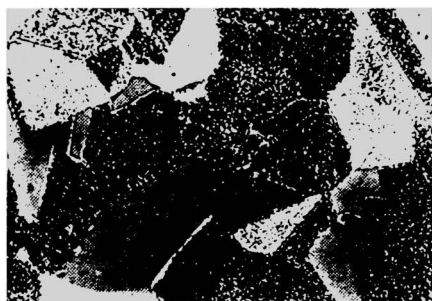


Fig. 18.5. — Ataque térmico del bronce de aluminio ($\times 500$).

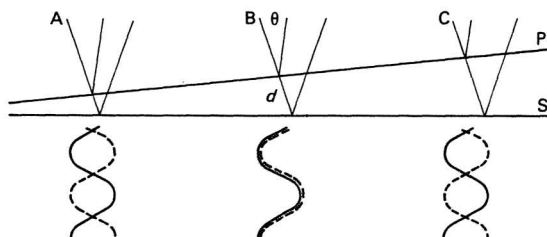


Fig. 18.6. — Origen de interferencias en una cuña de óxido.

En la figura 18.6 se ha representado dicha condición. A medida que aumenta el espesor de la capa de óxido, la primera radiación que se absorbe es la violeta, con lo cual aparece una tonalidad rojiza, pues la longitud de onda de la luz azul es de $4359 \text{ \AA}$, la verde, de $5460 \text{ \AA}$, y la amarilla, de $5780 \text{ \AA}$.

Macroscopia

Examen visual directo hasta aumento de 50 diámetros, bien con una lente de aumento o con un binocular. Este método de examen es rápido y ofrece muchas posibilidades, particularmente en los trabajos de carácter industrial.

Con el estudio macroscópico de la superficie de un lingote se puede apreciar el sentido del enfriamiento, según lo pone de manifiesto la figura 23.19 de un lingote de aluminio puro que se ha preparado por un tipo de moldeo semicontinuo. De este modo se pueden apreciar inmediatamente las diferencias durante el descenso del lingote en la lingotera, cambio del agua de refrigeración y otras modificaciones.

El estudio de la estructura de un metal, en realidad, debe comenzar con el examen macroscópico de la pieza, ya que el análisis químico y el microscópico no son, generalmente, representaciones de la totalidad de la pieza entera, sino que reflejan la situación en un lugar particular, donde se hace el examen. La extensión y carácter de las heterogeneidades de un metal o aleación se revelan mejor por macrografía. Asimismo, es evidente que el conocimiento de la estructura en conjunto de los metales y aleaciones es muy útil para la adecuada comprensión de los aspectos locales revelados por el microscopio.

La macroscopía comprende: a) examen visual de las probetas atacadas; b) examen de las fracturas producidas en los metales en servicio, las cuales pueden revelar muchas de las características de un metal o aleación con respecto a su resistencia mecánica, ductilidad, tamaño de grano, etc., así como las condiciones causantes del accidente, y, en ocasiones, permiten apreciar los defectos responsables del debilitamiento del material; c) las secciones atacadas por los reactivos para macrografía pueden poner de manifiesto:

1. Composición no uniforme, debido a las segregaciones de los elementos de aleación, tales como antimonio, en los metales antifricción, plomo en el bronce y fósforo en el acero.
2. Inclusiones no metálicas, tales como escorias, sulfuros y óxidos.
3. Tamaño de los cristales y mecanismo de crecimiento.
4. Método de hechurado: moldeo, forjado, soldadura y pulvimetalurgia.
5. Defectos físicos debidos a la fabricación, tales como cavidades, venteaduras, costuras, repliegues y fisuras. Tratamiento térmico no uniforme.
6. Deformación del grano.

En el estudio de los aceros moldeados y forjados se utilizan reactivos macroscópicos para descubrir las líneas llamadas fibras, que ponen de manifiesto las condiciones de trabajo.

El reactivo que más se emplea para este fin es la disolución clorhídrica de densidad 1,2. Sin embargo, la presencia en la disolución de ácido sulfúrico de un 12 %, con un 38 % de ácido clorhídrico, mejora y hace más distintivo el ataque.

Para revelar la estructura en los aceros, los más empleados son el ácido nítrico, las disoluciones de cloruro cúprico-amónico y de persulfato amónico. Las disoluciones de ácido nítrico al 5 %, en alcohol, se utilizan, principalmente, para descubrir las grietas y poner de manifiesto la profundidad de la capa carburada o las áreas descarburadas, que quedan claras en relación con las no descarburadas, que son oscuras.

Método electrográfico de análisis superficial

En el método electrográfico, la superficie que se ha de analizar se hace actuar como ánodo de un circuito eléctrico, y bajo la influencia de una diferencia de potencial los iones metálicos dejan la superficie y entran en la capa de gelatina,

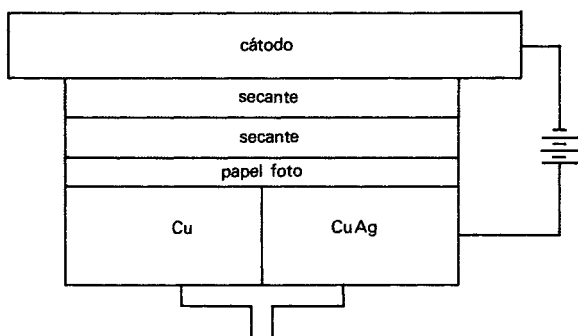


Fig. 18.7. — Aparato de análisis electrográfico.

que contiene un reactivo y un electrólito convenientes, embebida en un papel, al cual transfiere el color. Se produce un precipitado coloreado con el ion deseado en la capa de gelatina en forma de registro permanente de la composición superficial y de la distribución del ion apropiado. En la figura 18.7 se da un sencillo esquema del artificio empleado en el método electrográfico.

El comportamiento de una probeta de acero en el método electrográfico, sirviendo de ánodo con ferrocianuro potásico como electrólito y una cartulina para retener las impresiones, es análogo al que se observa en la macrografía, sólo que las áreas afectadas por los reactivos se atacan más fácilmente y con mayor diferenciación cuando actúan como superficies anódicas, pues incluso el potencial de disolución está influido por las condiciones de las tensiones existentes en el material.

Con este método se ponen de manifiesto irregularidades tales como las inclusiones de escoria, venteaduras, fibrosidades, estructuras de fluencia y, en general, todos los caracteres observados en los exámenes macrográficos. Incluso se consiguen buenos resultados con los aceros especiales, particularmente con los aceros cromo-níquel, que son difíciles de estudiar por otros métodos, a consecuencia de su resistencia a los agentes químicos.

Impresiones de azufre, fósforo y óxidos

Los sulfuros, atacados con ácido diluido, desprenden ácido sulfhídrico gaseoso que ennegrece el papel de bromuro argéntico, y de esta manera se pueden observar fácilmente muchos compuestos en los hierros y aceros: figura 18.8. El papel fotográfico se empapa de 3-4 minutos en una solución acuosa de ácido sulfúrico al 2 % y se adhiere a la superficie metálica preparada que se desea examinar.

De manera análoga se procede para observar la distribución del fósforo: se embebe la hoja de papel en una solución acuosa de molibdato amónico, al 5 %,

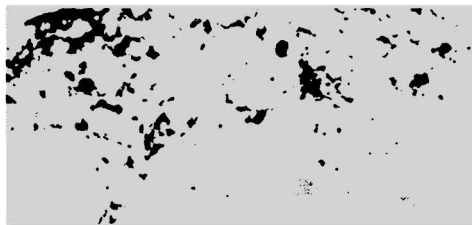


Fig. 18.8. — Impresiones de azufre en una masa de hierro antiguo.

a la que se añaden 35 cc de ácido nítrico, de densidad 1,2. El papel se deja en contacto con el acero unos 5 minutos.

Con una técnica semejante se descubre la mayoría de los tipos de óxido en los aceros. Se emplea una hoja de papel fotográfico, previamente empapada en una solución de ácido clorhídrico al 5 %, puesta en íntimo contacto con la superficie bien preparada de la probeta. Después de un contacto de uno a dos minutos se revela en una solución de ferrocianuro potásico al 2 %, hasta un tinte azulado, se lava en agua corriente y se fija en una solución fijadora fotográfica.

MICROSCOPIA ÓPTICA

En la interpretación de la microestructura se ha de tener presente que se ve una sección de dos dimensiones de un objeto que posee tres, por lo que un grano que ocupa una pequeña área necesariamente no ha de ser pequeño, pues puede ser la esquina de un grano grande. También el aspecto de la probeta puede cambiar notablemente con el aumento empleado, así que se ha de establecer un criterio riguroso para utilizar adecuadamente los aumentos.

El microscopio metalográfico es, en esencia, un instrumento de gran precisión ideado lo mismo para el examen visual que para el registro permanente de las estructuras metálicas por medio de la fotografía. Difiere, en principio, del microscopio biológico en que la imagen del objeto se forma con la luz reflejada en vez de con la luz transmitida. Esta diferencia fundamental obedece al hecho de que prácticamente todos los objetos metálicos son opacos a la luz ordinaria transmitida.

Para conseguir la luz reflejada, se utiliza un tipo especial de iluminador para todos los aumentos, con excepción de los muy pequeños, para los que en ocasiones es útil la iluminación oblicua sencilla. Corrientemente se usa una forma de iluminador vertical que refleja la luz de la probeta a través de las lentes del objetivo del microscopio, con preferencia del tipo de vidrio plano (fig. 18.9). Mucho menos útil, a pesar de emplearse ampliamente, es el tipo de prisma de reflexión total, ya que solamente permite la utilización de un lado de la abertura del objetivo, con lo que se disminuye mucho el poder resolutivo, y también da una iluminación ligeramente oblicua. Se emplea para los pequeños aumentos.

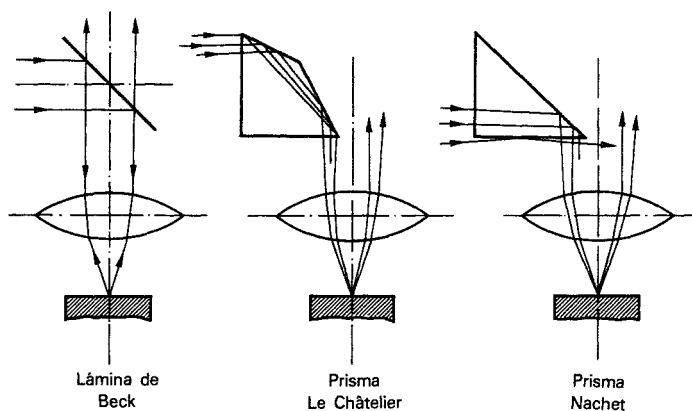


Fig. 18.9. — Tipos de iluminadores para el microscopio metalográfico.

El examen microscópico de todo objeto opaco exige que la superficie de la probeta forme un plano perpendicular al eje óptico del microscopio.

El microscopio corriente revela la estructura de un objeto solamente si existe verdadera diferencia en la luminosidad de la luz que reflejan las distintas partes del objeto. La impresión del relieve de la superficie de la probeta se consigue por variaciones en la iluminación del campo brillante obtenida por el empleo de la iluminación cónica o de media abertura o con un diafragma de abertura descentrada.

La distribución de la luminosidad de una imagen tal como se ve en el microscopio ordinario depende de: 1) la reflexión relativa de las distintas partes de la estructura; 2) las diferencias de color; o, 3) la luz esparcida desde el objetivo por los bordes de la estructura. No depende de las diferencias de nivel en la superficie de la probeta.

Ahora bien, por medio de un sistema de iluminación de contraste de fases, las diferencias de nivel producen una diferencia de fase de la luz reflejada desde las fases metálicas y se convierten en diferencias de luminosidad, y por esta razón se le da el nombre de contraste de fases. Parece que es posible poner de manifiesto diferencias de nivel del orden de $50 \text{ \AA}$ (aproximadamente 20 distancias interatómicas).

En el microscopio metalográfico, el objetivo actúa primero como condensador, para iluminar una porción de la superficie pulida, y después como lente, para formar una imagen del campo iluminado. Así, las oportunidades para las reflexiones son dobles en relación con el microscopio que utiliza luz transmitida, y, como consecuencia, uno de los defectos más corrientes y graves de los objetivos proyectados para metalografía son las excesivas reflexiones internas.

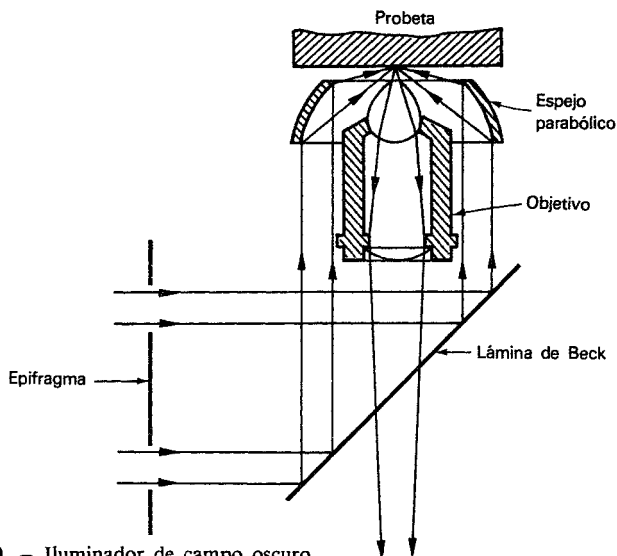


Fig. 18.10. — Iluminador de campo oscuro.

Cuando la iluminación es por luz transmitida, la reflexión no deseable se realiza en la dirección del manantial de luz y solamente puede alcanzar la imagen después de una segunda reflexión, cuando su intensidad es tan pequeña que su efecto sobre el contraste de la imagen es despreciable. Por el contrario, cuando la iluminación es por luz reflejada, la reflexión interior no deseable se origina en la dirección de la imagen, y es de suficiente intensidad para producir un marcado efecto de velo que perjudica mucho al contraste de la imagen, sobre todo cuando es pequeña la reflectividad de la probeta.

Las reflexiones interiores de las lentes se disminuyen aplicando recubrimientos antirreflexión a las intercaras vidrio-aire, y que aplicados a los objetivos microscópicos mejoran notablemente la imagen. El recubrimiento consiste en una película transparente cuyo espesor es, aproximadamente, un cuarto de la longitud de onda de la luz incidente.

Algunos grandes microscopios metalúrgicos invertidos están equipados con un iluminador de campo oscuro que ilumina la probeta oblicuamente desde todos los lados (fig. 18.10). Bajo esta iluminación, la superficie lisa aparece oscura y los bordes de grano claros. En la figura 18.11 se presenta la micrografía de un cobre en campo oscuro con 200 aumentos.

El microscopio de contraste de fases utiliza un artificio para separar la radiación difundida por la probeta, de la reflejada, para hacerlas interferir después de defasar la última con respecto a la primera. Un cambio de fase de un cuarto de la longitud de onda produce una importante diferencia de intensidad en la imagen, y corresponde a pequeñas diferencias de nivel o a variaciones de las propiedades ópticas de la superficie (fig. 18.12).

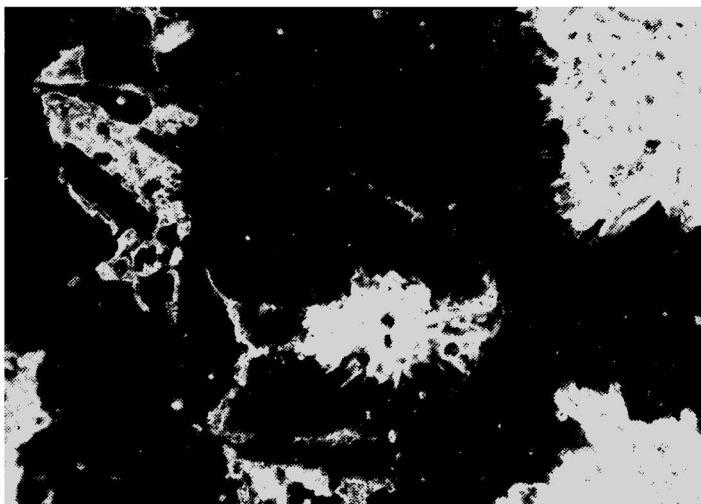


Fig. 18.11. — Cobre con restos de amalgama. Campo oscuro ($\times 500$).

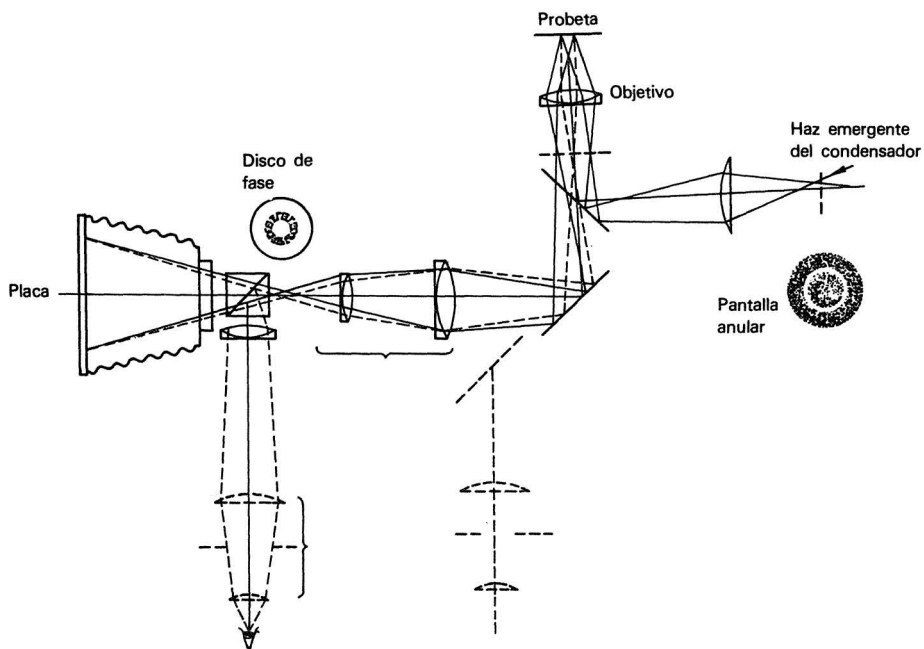


Fig. 18.12. — Microscopio de contraste de fases.

En ocasiones, mediante un obstáculo opaco colocado en el centro del haz que procede del vidrio plano se consigue una iluminación cónica que favorece la estructura de relieve.

La iluminación con luz polarizada se utiliza algunas veces, y con ello se consigue principalmente: determinar la anisotropía, descubrir el efecto de la deformación e identificar algunas inclusiones. El empleo de la luz polarizada en los estudios microscópicos de secciones de minerales transparentes ha contribuido enormemente a la identificación de éstos, pero con los materiales opacos el éxito no ha sido tan grande. Sin embargo, la iluminación con luz polarizada es muy útil para examinar el aluminio y sus aleaciones, con el fin de establecer la anisotropía, la orientación preferida que se desarrolla en la deformación y apreciar cómo se elimina ésta por recristalización.

Los microscopios metalográficos modernos generalmente están equipados con iluminación vertical de vidrio plano, de prisma, de campo oscuro, cónica, luz polarizada y luz coloreada.

Sistema óptico

Las dos partes ópticas más importantes del microscopio son el objetivo, que resuelve y aumenta los detalles de la estructura del metal, y el ocular, que aumenta la imagen formada por el objetivo para su examen visual o para proyectarla sobre una placa o película fotográfica.

Para la visión directa, el ocular más usado es el corriente de Huygens, pues es muy satisfactorio para el examen con objetivos acromáticos. Los objetivos apocromáticos no están corregidos para la diferencia cromática de ampliación, por lo que son necesarios los oculares de compensación para el examen visual con luz blanca con el fin de hacer coincidir las imágenes de varios colores. Para la fotografía se utilizan otros tipos de oculares, como el de compensación, proyección y los tipos conocidos como: hiperplano, periplano, ortoscopio, planoscopio, holoscopio, homal, etc. Se construyen de varios aumentos, tales como $\times 5$, $\times 8$, $\times 10$, $\times 12,5$, marcados en la parte superior y con designaciones que significan el aumento que dan las lentes a la imagen formada por el objetivo.

El objetivo está formado por una asociación de lentes, y la calidad de éstas determina el resultado final. La distancia focal de una lente depende del índice de refracción del material de la misma, pero como éste varía con la longitud de onda de la luz empleada, no es posible enfocar todos los colores a una misma distancia. Este efecto se conoce como aberración cromática: figura 18.13a.

La aberración esférica se produce por el hecho de que el foco de luz depende de la distancia que recorre la luz desde el centro de la lente, por lo que la luz que procede del borde de la lente no enfoca exactamente en la misma posición que la luz procedente del centro.