

eman ta zabal zazu



Universidad del
País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

OCW
OpenCourseWare

2018

INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DE LOS MATERIALES Y SUS PROPIEDADES (I)

Ane Miren García Romero
Nuria Monasterio Guisasola

TEMA 4: IMPERFECCIONES DE LA RED CRISTALINA

OBJETIVOS

- Describir los distintos tipos de imperfecciones en la red cristalina
- Determinar el número de tamaño de grano y el diámetro medio de tamaño de grano según la ASTM y describir la importancia del tamaño de grano y la densidad de límite de grano sobre la conducta de los materiales cristalinos.
- Explicar, en términos generales, por qué las aleaciones son materiales que se prefieren sobre los metales puros para aplicaciones estructurales
- Conocer los fundamentos de la observación microestructural mediante microscopía

La autoría de las imágenes que contiene este documento, así como las referencias bibliográficas, se incluyen en la última página.

ÍNDICE

- 4.1- Imperfecciones de la red cristalina:
- 4.2- Los átomos sustitucionales : las aleaciones
- 4.3- Los átomos intersticiales: las aleaciones
- 4.4- Las imperfecciones de línea: las dislocaciones
- 4.5- Las dislocaciones y la deformación plástica
- 4.6- Los límites de grano y las maclas
- 4.7- Observación de la microestructura
- 4.8- Microscopios ópticos
- 4.9- Preparación para la observación microestructural
- 4.10- Microscopios electrónicos

RECURSOS ADICIONALES RECOMENDADOS

<http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dislocations/index.php>

<http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/slip/index.php>

4.1 IMPERFECCIONES DE LA RED CRISTALINA

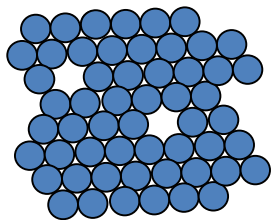
Los cristales perfectos no existen. En 1m^3 de un metal con una pureza de 99,9999% contiene del orden de 10^{22} a 10^{23} átomos de impurezas. Muchas propiedades son sensibles a las imperfecciones, que **no siempre son negativas**:

LAS IMPERFECCIONES DE LA RED CRISTALINA SON POSITIVAS PARA EL USO INGENIERIL DE LOS MATERIALES

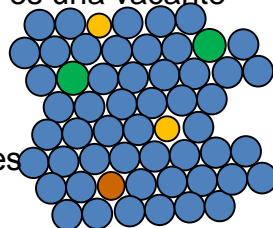
Este tema muestra las principales imperfecciones clasificadas de acuerdo a su naturaleza, pero no se detendrá en qué características influyen. Eso irá desvelándose a lo largo del curso.

DEFECTOS “DE PUNTO” EN LA RED CRISTALINA

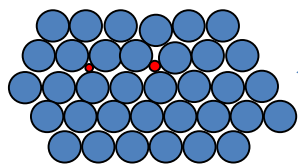
Hay tres tipos principales: vacantes, átomos sustitucionales y átomos intersticiales



← **VACANTES:** son huecos de la red cristalina. Falta un átomo en una posición de la red, eso es una vacante



→ **ÁTOMOS SUSTITUCIONALES:** Átomos distintos del “anfitrión”, ocupando posiciones de la red



← **ÁTOMOS INTERSTICIALES:** Átomos que se insertan en huecos que quedan entre los átomos de la red cristalina regular

TIPOS DE DEFECTOS o IMPERFECCIONES

Defectos en la red cristalina	Defectos de punto	Vacantes
	Defectos de línea	Átomos sustitucionales
		Átomos intersticiales
Defectos de volumen	Defectos superficiales	Dislocaciones
		Maclas
	Poros	Superficies libres
Rechupes	Límites de grano	
	Grietas	
	Inclusiones	

DEFECTOS EN LAS REDES IÓNICAS

Además de los defectos anteriores, en las redes iónicas hay defectos de Schottky y Frenkel:

-**Defectos de Frenkel:** movimiento de iones de la red a huecos intersticiales, creando una vacante

-**Defectos de Schottky:** vacantes de dos iones de carga opuesta

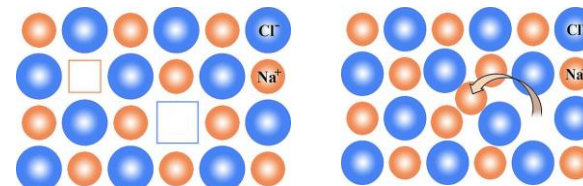


Figura 4.1: Defectos de schottky, izda., y de Frenkel, dcha. (Autoría, ver última página)

Cuando los cristales contienen enlaces iónicos, donde la diferencia de electronegatividad es grande, la sustitución y las vacantes tienen lugar respetando el balance de cargas eléctricas.

4.2 LOS ÁTOMOS SUSTITUCIONALES: LAS ALEACIONES

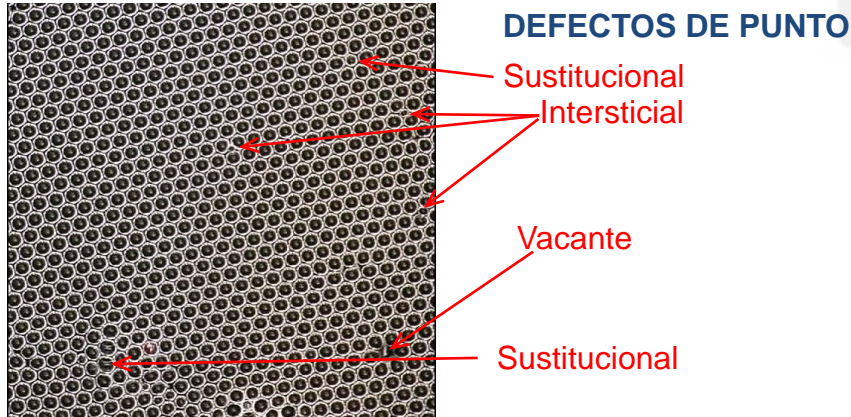


Figura 4.2: "The bubble raft". La imagen corresponde a una fotografía de un experimento realizado con pequeñas pompas de jabón apiladas juntas en una caja transparente. Se emplea como modelo que simula las redes cristalinas atómicas. En ella se pueden apreciar distintos tipos de imperfecciones tales como vacantes, átomos sustitucionales y átomos intersticiales, señalados con flechas rojas. (Autoría, ver última página)

ALEACIÓN

Es una disolución de elementos metálicos de un metal "invitado" en otro metal "anfitrión". Los defectos sustitucionales son muy importantes y "positivos": dan lugar a las aleaciones

Cuando todos los átomos que se añaden del metal "invitado" son capaces de incorporarse a la red anfitriona la aleación es monofásica, tal como se esquematiza en la figura 4.3. Cuando no es así, se forman nuevas fases y la aleación es multifásica.

ALEACIONES MONOFÁSICAS

Las aleaciones monofásicas son disoluciones sólidas en las que: Si se parte del metal **A** y se le añade la impureza **B** → **B** es capaz de ocupar posiciones de la red cristalina que normalmente ocupa **A**.

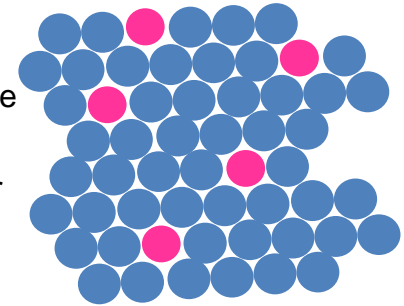


Figura 4.3: Átomos sustitucionales (Autoría, ver última página)

Las aleaciones monofásicas se componen de granos que corresponden a la misma fase, es decir, a la misma red cristalina, en la cual algunas posiciones de la red anfitriona han sido ocupadas por átomos de un elemento diferente del de la red. Se dice que se forma una **DISOLUCIÓN SÓLIDA** de **B** en **A**. Será una distribución al azar de defectos sustitucionales en la red. Un ejemplo industrial habitual son las aleaciones de Cu en Ni.

Dado que los átomos sustitucionales tienen distinto tamaño que el átomo original, distorsionan la red cristalina. Ello hace que la deformación del metal cuando se aplica una tensión sea más difícil y se requiera aplicar tensiones mayores para deformarlo y/o romperlo. Es decir, aumentan la resistencia a la deformación →

La fabricación de aleaciones sustitucionales es un modo de **ENDURECIMIENTO DE LOS METALES (hacerlos más fuertes, más resistentes)**.

4.2 LOS ÁTOMOS SUSTITUCIONALES: LAS ALEACIONES

LAS REGLAS DE HUME – ROTHERY

La facilidad con la que un átomo puede sustituir al original en su red es tanto mayor cuanto:

TAMAÑO: La diferencia de sus radios es menor que **+/- 15%**. Si es mayor esos átomos no entran en la red cristalina, y generalmente se forma una nueva red.

ELECTRONEGATIVIDAD: Similar. Si las electronegatividades son muy diferentes, se forman nuevas fases.

RED CRISTALINA: Mismo sistema de cristalinidad para los metales puros, “anfitrión e invitado”

VALENCIA: Igual valencia. De otro modo, la sustitución es más fácil si el anfitrión tiene mayor valencia.

Cuando los átomos sustituyentes no cumplen completamente las reglas de Hume/Rothery en una red anfitriona, la solubilidad en dicha red es limitada y si se añade una cantidad de átomos del aleante superior a la que es capaz de admitir la red, se forman nuevas fases en su seno.

La mayoría de aleaciones industriales tienen solubilidad limitada y se conforman por más de una fase.

ALEACIONES MULTIFÁSICAS

Las aleaciones multifásicas son disoluciones sólidas en las que cuando hay más cantidad de átomos sustitucionales de los que la red anfitriona es capaz de acomodar, se forma una (o varias) nueva fase.

La Figura 4.3 representa una aleación multifásica: Se añade la impureza (**B**) al anfitrión (**A**) y se forma una disolución sólida de **B** en **A** + **partículas de una nueva fase**.

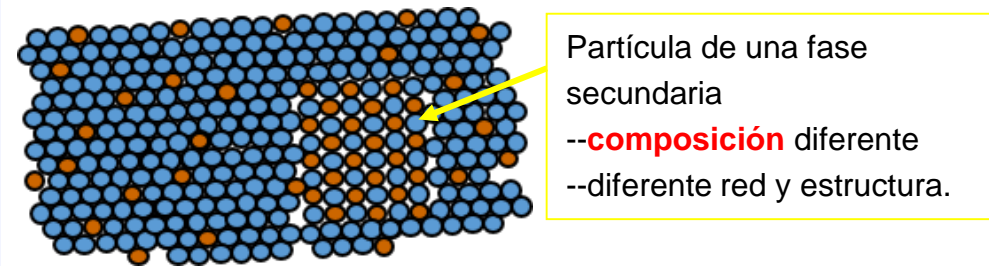


Figura 4.4: Esquema de una aleación sustitucional con una partícula de fase secundaria formada en su seno. (Autoría, ver última página)

Si **B** tiene unas características que impiden la disolución sólida en **A**, se formará una nueva fase desde el principio.

La formación de fases secundarias es un mecanismo de endurecimiento, mucho más fuerte e importante que la formación de una disolución sólida → **ENDURECIMIENTO DE LOS METALES**.

4.3 LOS ÁTOMOS INTERSTICIALES: LAS ALEACIONES

ÁTOMOS INTERSTICIALES → ALEACIONES

Se denomina intersticio al hueco que queda entre los átomos empacados formando una red cristalina. Los átomos capaces de situarse dentro de los intersticios ellos deben ser extremadamente pequeños.

Los huecos intersticiales son tan pequeños que la máxima concentración intersticial que suele encontrarse en el mejor de los casos es **inferior al 10%**.

➤ El “elemento intersticial” por excelencia es el **Carbono**: es tan pequeño (radio = 0,71 Å) que es capaz de incorporarse en huecos de la red de muchos metales. Especialmente importante en las del hierro ($r = 1,24 \text{ Å}$). Sin embargo, en este caso, la máxima concentración posible de C intersticial en Hierro BCC es sólo del 0,022%, y del 2,14% en hierro FCC.

Disolución sólida Intersticial
(por ejemplo: C en Fe)

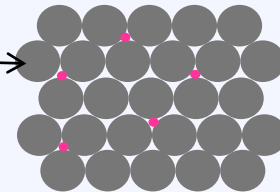
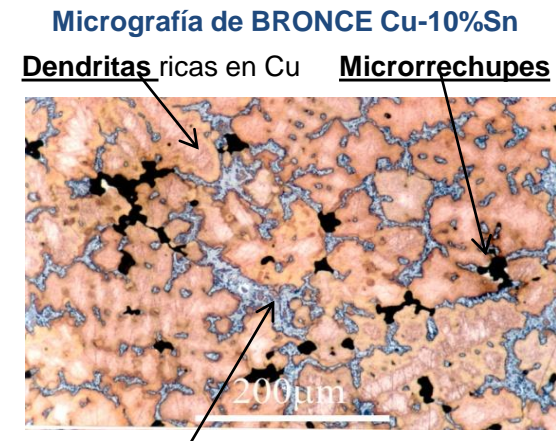


Figura 4.5: Esquema de una disolución sólida intersticial. (Autoría, ver última página)

Las Disoluciones sólidas Intersticiales (por ejemplo C en Fe) también son ALEACIONES. La resistencia a la deformación de estas aleaciones es muy superior a la del mismo metal sin los elementos intersticiales. El acero es una aleación de Fe con C intersticial

ALEACIONES Y FASES SECUNDARIAS

La figura 4.6 corresponde a una micrografía de BRONCE. Los bronce son aleaciones de Cu con Sn. El Estaño no es capaz de sustituir al Cobre en su red cristalina, por lo cual al añadir estaño al cobre siempre se forma una nueva fase. En la micrografía se ve una fase rojiza, que corresponde a las dendritas de la estructura cúbica FCC del Cobre. La fase grisácea es la nueva fase que se ha formado, que contiene el Estaño. Esta fase secundaria se forma en los límites de grano de las dendritas. Las zonas negras corresponden a huecos, denominados rechupes.



Las fases secundarias se forman en los límites de grano

Figura 4.6: Micrografía de una aleación bifásica de Bronce mostrando la fase principal, Cobre FCC, y la fase secundaria Cu-Sn que se forma. (Autoría, ver última página)

4.3 LAS IMPERFECCIONES DE LÍNEA: LAS DISLOCACIONES

DISLOCACIONES: Las **dislocaciones** son defectos que provocan una distorsión de la red centrada en torno a una línea. Las dislocaciones se crean durante la solidificación de los sólidos cristalinos. También se pueden formar en la deformación plástica o permanente de los metales, por condensación de vacantes, por desajuste atómico en las disoluciones sólidas e incluso por tensiones térmicas. Se visualizan como una línea imperfecta en un cristal, tal como muestra la figura 4.7. Hay tres tipos de dislocaciones.

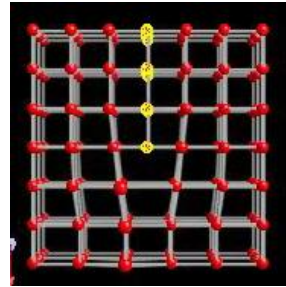
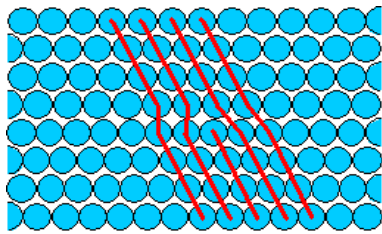


Figura 4.7: Representación de una dislocación de cuña (Autoría, ver última página)

- **Dislocación de cuña**- Se trata de un “plano extra” de átomos que se termina dentro del cristal, “en medio de ninguna parte”, sin llegar de principio a fin del cristal. La figura 4.7 esquematiza este tipo de dislocación.
- **Dislocación helicoidal** – Es un cristal con una “torcedura” en su interior, de modo que un plano atómico produce una rampa espiral entorno a un eje: la dislocación
- **Dislocación Mixta** – Es una dislocación que combina las dos anteriores. Es lo habitual en cristales

DISLOCACIONES de CUÑA: La distorsión que genera la cuña de átomos obliga a que parte de los enlaces adyacentes se encuentren sometidos a compresión, mientras que la otra parte se encuentra traccionada. Esta distorsión generada decrece conforme nos alejamos de la arista. La línea de la dislocación de la figura 4.8 es perpendicular al plano del papel.

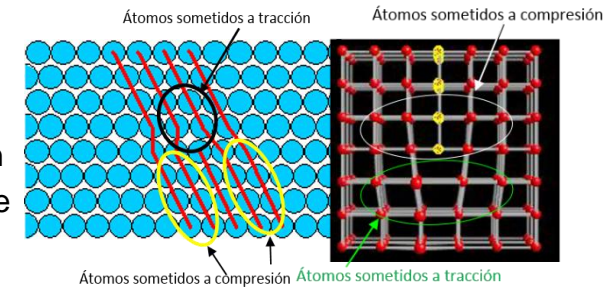


Figura 4.8: Zonas a tracción y a compresión dentro de un cristal por efecto de una dislocación de cuña (Autoría, ver última página)

DISLOCACIONES HELICOIDALES

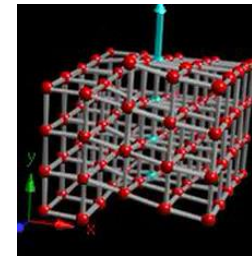
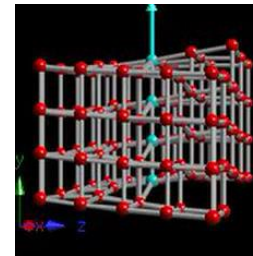


Figura 4.9: Dos vistas de un modelo realizado para representar una dislocación helicoidal (Autoría, ver última página)

Se forman en los cristales cuando se les somete a esfuerzos de cizalla. Al aplicar el esfuerzo de cizalla una parte del cristal se desliza respecto a la otra parte a partir de la línea de aplicación del esfuerzo, o línea de dislocación. El resultado es una “hilera” de átomos que están rodeados y enlazados a más átomos de los que les corresponde en una red regular perfecta. La Figura 4.9 muestra dos vistas de un modelo de este tipo de dislocación.

4.4 LAS DISLOCACIONES Y LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA

DISLOCACIONES MIXTAS

En la mayoría de los cristales hay ambos tipos de dislocaciones, que se suman y producen lo que se conoce como **Dislocación mixta: de cuña + helicoidal** → En estos casos, la línea de dislocación para ambas es la misma.

Densidad de dislocaciones – La distancia total que ocupan las líneas de dislocación en un centímetro cúbico de material.

DEFORMACIÓN PLÁSTICA

La presencia de dislocaciones en redes metálicas es importante porque ello permite que exista la deformación plástica. Las dislocaciones crean tensiones a su alrededor, tal como se ha mostrado en la página anterior. Estas tensiones se traducen en un incremento de la energía de los átomos situados en esas zonas, los cuales se encuentran energéticamente activados frente a los átomos en posiciones “perfectas”, libres de distorsiones. Por ello, estos átomos son capaces de moverse y buscar posiciones estables, libres de tensión, si se les suministra suficiente energía para ello. Esta energía se obtiene en forma de tensión mecánica: Cuando se aplica una tensión suficiente los átomos en la dislocación rompen los enlaces con átomos adyacentes a la vez que crean enlaces con los nuevos “vecinos”. Ello produce un movimiento neto. Este movimiento se realiza de un modo concreto, similar a como se mueve un ciempiés: átomo tras átomo, no toda la hilera de una vez, de manera que la

dislocación va desapareciendo tal como muestra la figura 4.10. Se denomina “deslizamiento” de las dislocaciones. Se recomienda ver los videos denominados: [true-glide](#) , [false glide](#) , [shear-stresses](#) y [c-t-stresses](#) disponibles en la página web <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dislocations-> © 2004-2015 University of Cambridge.

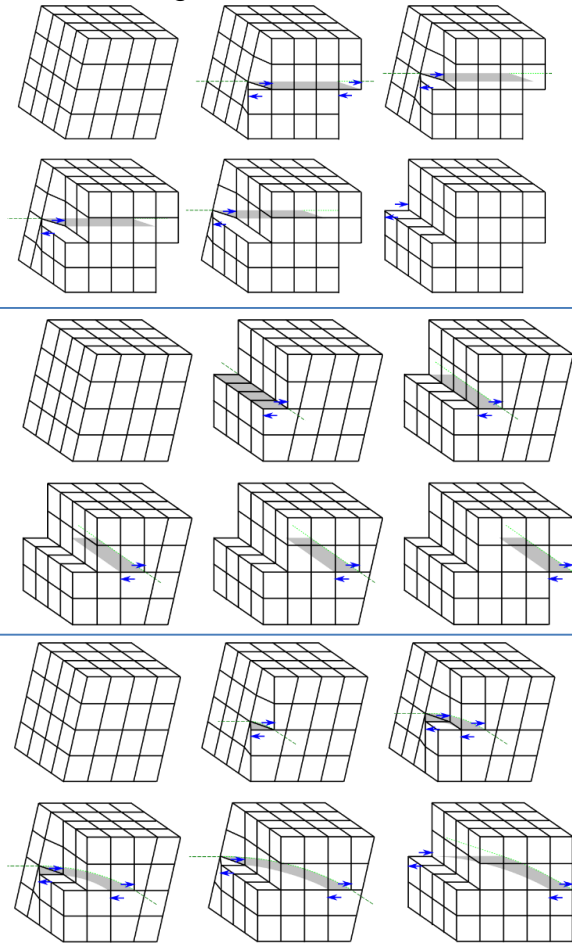


Figura 4.10: Deslizamiento de dislocaciones bajo la aplicación de una tensión mecánica

Arriba: Deslizamiento de una dislocación helicoidal

En medio: Deslizamiento de una dislocación de cuña

Abajo: Deslizamiento de una dislocación mixta

(Autoría, ver última página)

4.4 LAS DISLOCACIONES Y LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA

Es decir, las dislocaciones en redes con enlace metálico pueden moverse cuando se aplica una tensión mecánica suficientemente grande → Ello dan lugar a que los átomos cambien de posición. Cuando la tensión mecánica cesa, los átomos no retornan a su posición inicial, sino que se quedan en sus nuevas posiciones → Esto se denomina **DEFORMACIÓN PLÁSTICA**.

La deformación plástica se da únicamente en los metales debido a que son enlaces en los cuales los electrones se comparten entre todos los átomos participantes, de manera deslocalizada. En enlaces iónicos o covalentes este deslizamiento de las dislocaciones no puede tener lugar.

El deslizamiento de las dislocaciones no sigue direcciones al azar. Las dislocaciones de cuña, cuando se les aplica una fuerza suficiente, se deslizan a través de la red en una dirección perpendicular a la dislocación. Las dislocaciones helicoidales se deslizan en una dirección paralela a la línea de dislocación. Si se tiene una dislocación mixta, ambas direcciones son la misma, tal como se puede apreciar en la figuras 4.10.

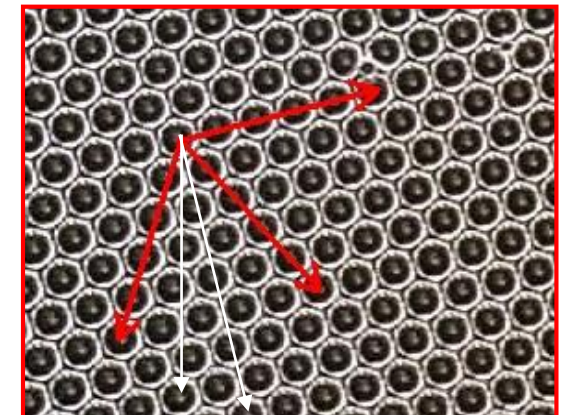
Además, las direcciones de deslizamiento de las dislocaciones siempre tienen lugar en planos de empaquetamiento compacto de la red cristalina, y dentro de estos planos, en direcciones de empaquetamiento compacto. Ello se debe a que en esos planos y direcciones las dislocaciones pueden moverse con la mínima distorsión atómica. El conjunto de planos y direcciones compactas de la red cristalina se denomina **SISTEMA DE DESLIZAMIENTO**.

Deformación elástica es la deformación reversible que experimenta un sólido cuando se le somete a un esfuerzo mecánico. Cuando se retira el esfuerzo mecánico que la causó, la deformación elástica desaparece. Esta deformación tiene lugar en todo tipo de sólidos, bajo tensiones inferiores a las necesarias para la deformación permanente o la rotura

Deformación Plástica es la deformación irreversible que experimenta un sólido bajo un esfuerzo mecánico. Se produce por deslizamiento de dislocaciones en metales, no en cerámicas. Es permanente, cuando se retira el esfuerzo que causó la deformación, ésta permanece. A la capacidad de experimentar deformación plástica sin romperse se le denomina **DUCTILIDAD**

Este tipo de deslizamiento en planos y direcciones concretas se aprecia muy bien en los videos recomendados en la página precedente ([true-glide](#), [false glide](#), [shear-stresses](#) y [c-t-stresses](#) disponibles en <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dislocations>). El movimiento de las dislocaciones podrá tener lugar en las direcciones indicadas con flechas rojas en la figura 4.11, pero no en las direcciones indicadas con flechas blancas, las cuales no son compactas

Figura 4.11: Direcciones de deslizamiento (flechas rojas) y no deslizamiento en una red cristalina (Autoría, ver última página)



4.4 LAS DISLOCACIONES Y LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA

SISTEMAS DE DESLIZAMIENTO

Las direcciones de deslizamiento son siempre las de mayor densidad lineal de átomos: direcciones compactas donde los átomos se tocan unos a otros

Los planos de deslizamiento son siempre los de mayor densidad planar de átomos (los más compactos)

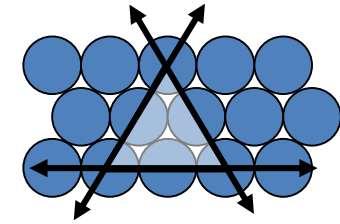
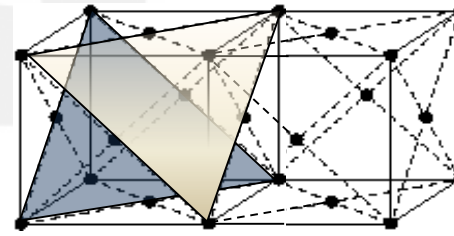


Figura 4.12: Planos compactos en estructuras FCC. A la izda, dos de los 4 planos compactos que hay en una estructura FCC enmarcados en una celdilla unidad. A la dcha., plano compacto en una estructura FCC, marcando las tres direcciones compactas existentes en dicho plano (Autoría, ver última página).

SISTEMAS FCC Y BCC: muchos planos y direcciones compactos

SISTEMA HCP: Sólo un plano de deslizamiento, y 3 direcciones

Cuanto mayor es el número de sistemas de deslizamiento, más dúctil es el material: Mayor deformación podrá soportar antes de romperse.

Red Cristalina	Sistemas de deslizamiento en la red	Representación gráfica	Ejemplos
BCC	6 planos Cada plano 2 direcciones → 12 sistemas de deslizamiento		α -Fe, Mo, W
FCC	4 planos cada plano 3 direcciones → 12 sistemas de deslizamiento		Al, Cu, Ni
HCP	2 planos compartidos por dos celdillas = equivalente de 1 solo plano. En cada plano hay 3 direcciones (también compartidas) → 3 sistemas de deslizamiento		Mg, Zn, α -Ti

Figura 4.13: Esquema del tipo de fractura que se obtiene cuando se ensayan a tracción probetas metálicas de un metal con estructura FCC (elevada ductilidad) y otro con estructura HCP (escasa ductilidad) (Autoría, ver última página).

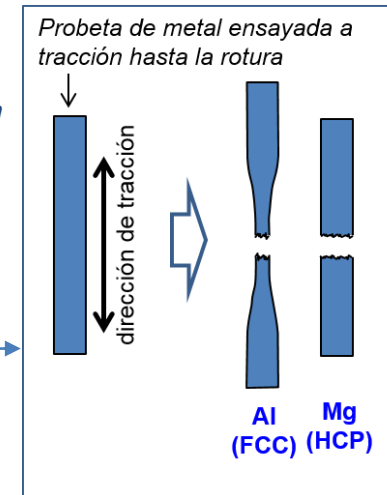


Figura 4.14: Sistemas de deslizamiento en las redes cristalinas principales de los metales (Autoría, ver última página)

4.5 LOS LÍMITES DE GRANO Y LAS MACLAS

Hasta este punto se han expuesto las imperfecciones que se forman dentro de los cristales y se ha explicado la gran importancia que tienen en el comportamiento de los materiales: átomos sustitucionales y átomos intersticiales → endurecimiento y formación de aleaciones, dislocaciones → deformación plástica, la relevancia de las vacantes se verá en el capítulo siguiente → difusión. Sin embargo, la mayoría de los materiales no están formados por un solo cristal, sino que son **policristalinos**. Ello se debe a que la mayoría de los sólidos cristalinos se forman **partiendo del estado líquido**, solidificando cuando contactan con una superficie a temperatura muy inferior a la suya. La figura 4.15 esquematiza el proceso que tiene lugar en estos casos.

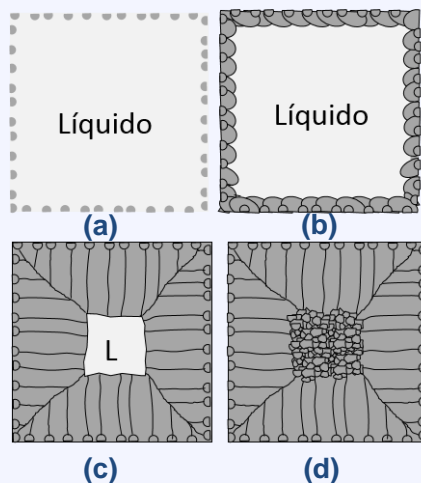


Figura 4.15: Esquema de la formación de cristales cuando un líquido toca las paredes de un molde: (a) Formación de núcleos cristalinos en contacto con la superficie fría del molde. (b) Los cristales crecen desde los núcleos. Los alineados en direcciones preferentes crecen. (c) Los granos crecen siguiendo el gradiente térmico, formando granos columnares. (d) La zona final es el centro del componente, que cristaliza equiaxialmente por no existir gradiente. (Autoría, ver última página).

Primero se forman pequeños núcleos sólidos (pequeños cristallitos, Figura 4.15, a). Los núcleos crecen formando grandes estructuras cristalinas de miles o millones de átomos.

Cada estructura es un cristal. Cada cristal crece según una orientación preferente, y aquellos que alinean una orientación de crecimiento compacto con el gradiente térmico prosperan, mientras que los demás crecen hasta “chocar” con otro cristal (Fig. 4.15, b), donde no puede seguir creciendo en esa dirección. Cuando los cristales que se encuentran, ocasionalmente, han crecido con orientaciones muy cercanas, es posible que se unan formando un solo cristal (Fig. 4.16, izda.). Generalmente, cada cristal finaliza donde se encuentra con otro cristal. A cada uno de estos cristales se les llama **GRANO**. A la frontera entre los granos se le llama **LÍMITE DE GRANO** (Fig. 4.16, dcha.)

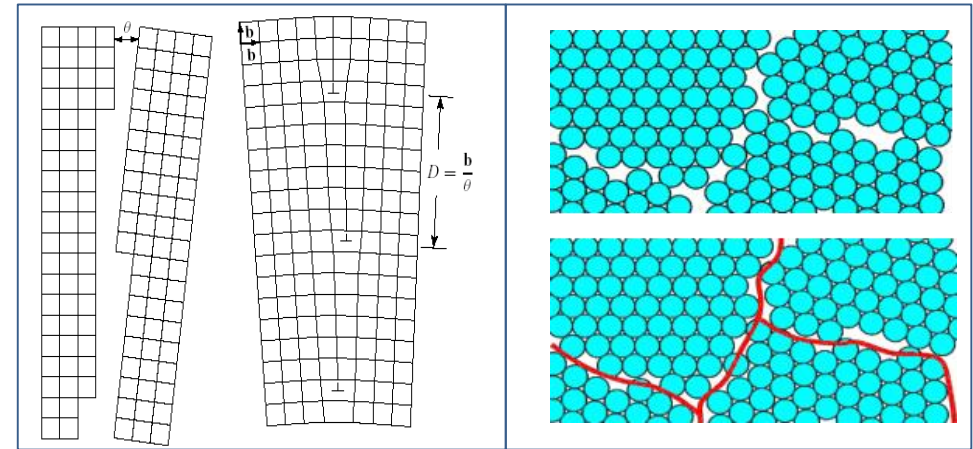


Figura 4.16: Izda., dos cristales que crecen con orientaciones cercanas pueden unirse para formar un solo cristal, lo cual ocurre formando dislocaciones. Dcha., Dos cristales que crecen en direcciones muy diferentes no pueden unirse, crecen hasta chocar, formando dos granos separados por EL LÍMITE GRANO. (Autoría, ver última página).

4.5 LOS LÍMITES DE GRANO Y LAS MACLAS

En aleaciones y en cerámicas industriales y naturales, los granos y los límites de grano tienen tamaños observables en microscopios ópticos, tal como muestra la imagen en la figura 4.17.

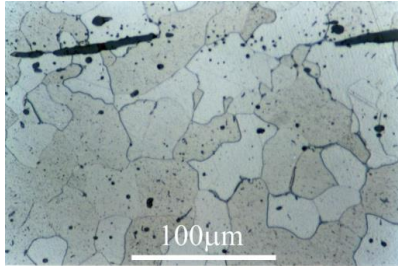


Figura 4.17: Micrografía mostrando los granos y límites de grano de un acero bajo en carbono. (Autoría, ver última página).

LOS LÍMITES DE GRANO tienen las siguientes características:

- ▣ Energía superior en los límites de grano porque los átomos no están formando todos los enlaces posibles.
- ▣ Los límites de grano son por ello más reactivos que los granos
- ▣ Además, las impurezas y elementos “no solubles” en la red del metal se segregan a los límites de grano durante la solidificación.
- ▣ Los materiales policristalinos son extremadamente estables y resistentes, presentando densidades virtualmente iguales a las de los monocristales
- ▣ Cuanto mayores son los granos menor es el perímetro total de límites de grano, y por tanto más estable es el material (menos reactivo).....

Sin embargo, en ingeniería interesa tener componentes fabricados de materiales policristalinos de pequeño tamaño de grano... ¿porqué?

▣ Los límites de grano actúan como barrera al movimiento de las dislocaciones, por lo cual para deformar en igual cantidad un material con granos pequeños que uno con granos grandes debemos hacer más fuerza: los límites de grano endurecen el material.

▣ Un material de **grano fino** es más resistente que uno de grano grueso porque las dislocaciones dentro de los granos tienen menor trayectoria de deslizamiento. Esto conduce a una **GRAN RESISTENCIA MECÁNICA**

▣ A pesar de que la resistencia aumenta, la deformación total que el material puede alcanzar no suele reducirse por el hecho de tener muchos límites de grano → **se gana en resistencia perdiendo sólo una pequeña parte de su ductilidad**

Los monocristales de gran tamaño rara vez se fabrican en la industria. Son difíciles de producir, requiriendo condiciones muy costosas de obtener. Sin embargo, hay algunas aplicaciones para las cuales se emplean monocristales. La más importante son probablemente los grandes monocristales de silicio producidos para la industria de semiconductores. Para este material se necesitan condiciones de solidificación especiales y silicio de elevada pureza. Otra aplicación singular es la fabricación de álabes de turbina de primera etapa en superaleaciones base Níquel. Actualmente se producen estos componentes monocristalinos.

4.5 LOS LÍMITES DE GRANO Y LAS MACLAS

LAS MACLAS: Las maclas son un tipo especial de límite de grano. En un límite de macla existe una simetría especular de los granos que separa, tal como indica el esquema de la figura 4.18, izda. Las maclas, generalmente no se producen durante la solidificación, sino que se producen por desplazamientos atómicos al aplicar algún tipo de tensión sobre el material sólido, bien como tensión mecánica directa, bien como tratamiento térmico que genera tensiones debido a contracción/dilatación.:

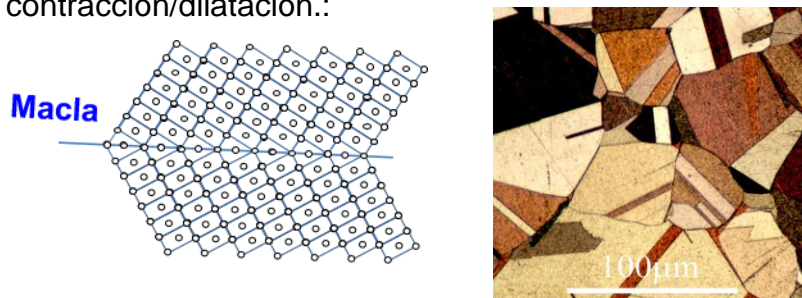


Figura 4.18: A la izda., esquema de una macla. A la dcha., micrografía de un latón tipo alfa tras un tratamiento de recocido. Las rayas lineales que se han formado dentro de los granos originales son las maclas. (Autoría, ver última página).

Las Maclas son producidas por cizalla en tratamientos de deformación (en los metales BCC y HCP)

Las Maclas son producidas por tratamientos térmicos de recocido tras deformación (forja, laminación,...) en estructuras FCC.

Las maclas frenan los deslizamientos de las dislocaciones e incrementan la resistencia del material

SUMARIZANDO: Las imperfecciones de la red cristalina son “obstáculos” que dificultan el deslizamiento de las dislocaciones, requiriéndose realizar mayor fuerza para ello. El resultado es un material que tiene mayor resistencia:

- **Átomos sustitucionales** → Son las Aleaciones monofásicas. Los átomos de distinto tamaño distorsionan la red dificultando el deslizamiento de las dislocaciones

- **Fases secundarias** → Son las Aleaciones multifásicas. Endurecen más que las monofásicas ya que las fases secundarias son un obstáculo insalvable para el deslizamiento de las dislocaciones

- **Límites de grano** → las dislocaciones no son capaces de “saltar” de un grano a otro. Cuanto mayor es el grano más se deforma bajo un esfuerzo dado. Por tanto, cuanto menor es el grano (mayor cantidad de límites de grano), mayor es la resistencia del material.

- **Maclas** → Son un tipo especial de límite de grano. Frenan a las dislocaciones. Son un obstáculo insalvable para el deslizamiento de las dislocaciones

OTRO TIPO DE IMPERFECCIONES: Las Superficies Externas. Los átomos de la superficie no están enlazados por esa cara a ningún átomo, por lo tanto su estado energético es muy superior al de los átomos en el interior. La solidificación desde el estado líquido conduce a cuerpos esféricos porque en esa configuración la relación superficie / volumen es la mínima posible.

4.6 OBSERVACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA

Los diversos elementos que existen en la naturaleza, presentan tamaños, formas y composiciones distintas. Algunos aspectos son distinguibles a simple vista, otros mediante instrumentos sencillos, como los microscopios ópticos, algunos requieren de sofisticados instrumentos debido a su pequeño tamaño (hasta nanómetros) y algunos no somos capaces de poder diferenciarlos por el momento con ningún tipo de instrumento (interior del átomo). Los microscopios son aparatos que, en virtud de las leyes de formación de imágenes ópticas aumentadas a través de lentes convergentes, permiten la observación de pequeños detalles de una muestra dada que a simple vista no se percibirían.

Para observar la microestructura de los materiales, ver sus granos y las fases secundarias, se requiere usar microscopios ópticos o electrónicos. Para observar materiales opacos, tales como los metales, las cerámicas o los composites se emplean microscopios de luz reflejada. En ellos, la luz se refleja de modo diferente dependiendo de las variaciones topográficas o de la distinta reflectividad de las fases o de la orientación de los granos, tal como se indica en la figura 4.19.

Para poder observar la microestructura en un microscopio es necesario preparar los materiales, tal como se explica sucintamente en las páginas siguientes. Las superficies a observar deben ser muy planas para que el microscopio pueda enfocarlas. Para ello se cortan probetas que deben ser desbastadas y pulidas.

Ejemplo de cómo se produce la reflexión e imagen que se visualiza en el microscopio

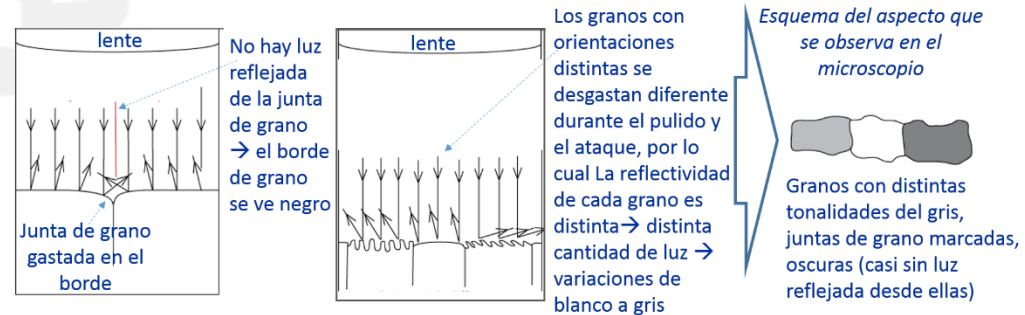


Figura 4.19: Esquema del modo en que se producen las imágenes de microestructuras en un microscopio óptico (Autoría, ver última página).

Para poder ver la microestructura se deben desgastar los granos creando un pequeño relieve que permita que la luz se refleje de distinta manera en distintas zonas microestructurales.

Generalmente requiere etapas de pulido y ataques químicos específicos. Más información puede consultarse en <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/optical-microscopy/preparation.php>

MICROSCOPIOS ÓPTICOS

Básicamente están constituidos por un sistema óptico y uno mecánico que permite operar el óptico y las muestras. **EL SISTEMA MECÁNICO** está constituido por una serie de piezas en las que van instaladas las lentes que permiten el movimiento para el enfoque. **EL SISTEMA ÓPTICO** comprende un conjunto de lentes dispuestas de tal manera que produce el aumento de las imágenes que se observan a través de ellas.

4.7 MICROSCOPIOS ÓPTICOS

El microscopio óptico monocular: Es una pequeña lupa que sirve únicamente para determinar con mayor precisión algunas medidas macroscópicas (macrodurezas, etc).

Microscopio estereoscópico: El óptico de visión estereoscópica se encuentra entre 2 y 40X. Se les conoce como “lupa estereoscópica” y son extremadamente útiles para realizar una primera evaluación de superficies de fractura.

Microscopio Binocular: Son los más usados para observar la microestructura de los materiales. Tienen varias lentes, tanto en el objetivo como en los oculares con el fin de reducir las aberraciones, concretamente la aberración cromática y la aberración esférica. Estos microscopios se utilizan para estudiar muestras planas porque su profundidad de campo es muy limitada. En cambio, tienen muy buena resolución, lo que permite observar detalles muy pequeños:

Resolución: La distancia mínima entre dos puntos próximos que pueden verse separados.

- El ojo normal no puede ver separados dos puntos cuando su distancia es menor a 0,1 mm.
- En el microscopio óptico, el poder separador máximo conseguido es de 0,2 μm
- En el microscopio electrónico, el poder separador llega hasta 10 \AA .

- (1) Oculares
- (2) Revolver con objetivos de distintos aumentos
- (3) Objetivos
- Ruedas de enfoque: mueven la pletina hacia arriba y hacia abajo para enfocar la luz sobre la superficie del material:
- (4) Enfoque grueso
- (5) Enfoque fino
- (6) Pletina (sobre ella se pone la probeta a observar)
- (7) Iluminación
- (8) Ruedas para movimiento de la pletina en el plano x-y

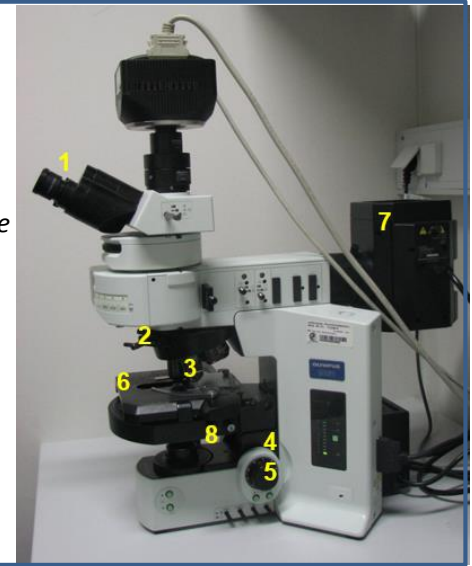


Figura 4.20 Partes principales de un microscopio óptico (Autoría, ver última página).

Resolución y Profundidad de Campo:

La resolución de los microscopios ópticos está limitada por la difracción de la luz, y por el sistema óptico. Normalmente, si el medio es el aire, **incluso el mejor microscopio óptico está limitado a una resolución entorno a 0,2 μm** , y para ello es necesaria una excelente preparación metalográfica, un excelente microscopio, y mucha experiencia en su manejo.

La profundidad de campo es muy pequeña. Ello implica que para enfocar la muestra y poder visualizarla necesitamos un plano sin rugosidades ni irregularidades en el eje z (vertical): Las muestras deben ser cortadas y pulidas

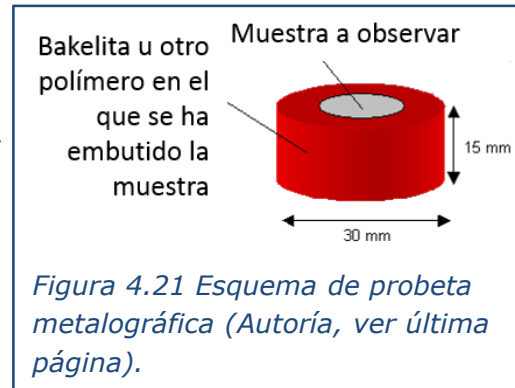
4.8 PREPARACIÓN PARA LA OBSERVACIÓN MICROESTRUCTURAL

Para observar las probetas al microscopio normalmente se requiere cortar una pequeña zona del material.

La zona cortada debe a continuación ser embutida en un polímero para poder ser manipulada con facilidad en la etapa de pulido, así como para garantizar que la superficie a observar estará perpendicular al haz de luz. Para ello se usan moldes cilíndricos en los cuales se inserta la muestra, con la superficie a observar en la zona inferior del mismo, tocando el fondo. A continuación se rellena el molde con el polímero (una resina termoestable, ver el tema de polímeros) y se procede a su curado. Un esquema del aspecto final que tiene la probeta se muestra en la figura 4.21.

Cuando el polímero ha solidificado la probeta metalográfica está producida y lista para proceder al lijado y pulido que se requieren para poder ser observada en el microscopio. La mayoría de los materiales metálicos

requieren de un paso adicional al pulido, denominado ataque. El ataque consiste en “mojar” la superficie del metal durante unos segundos con una mezcla de reactivos químicos, generalmente ácidos, los cuales atacan preferentemente las zonas menos resistentes del material, o algunas fases específicas que reaccionan con los reactivos usados. Hay ataques específicos para reaccionar con unas fases y no con otras.



Algunos aspectos básicos para distinguir las características microestructurales en un microscopio óptico:

- **Los metales** tienen un gran índice de reflexión de la luz: Son muy brillantes porque reflejan casi toda la luz sin prácticamente dispersarla.
- **Las cerámicas** reflejan la luz, pero debido a su menor compacidad a escala atómica y a las limitaciones de su preparación metalográfica, producen una gran dispersión. Se ven grisáceas.
- **Los polímeros** tienen un gran porcentaje de transmisión y dispersión de la luz, por lo cual la reflexión es muy pequeña y se ven muy oscuros.

La micrografía de la figura 4.22 muestra claramente lo aquí descrito, y que en ella se ve un metal, una cerámica y un polímero,

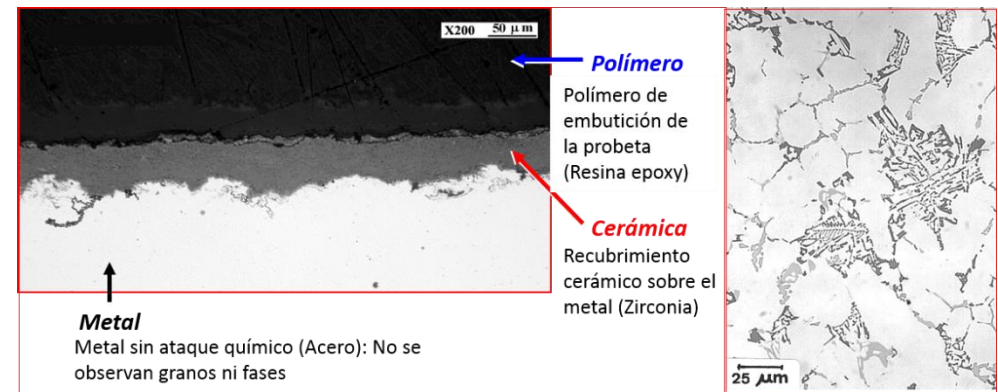


Figura 4.22 A la izda., micrografía de un recubrimiento de zirconia proyectado por plasma atmosférico sobre un acero. Dcha., Aleación de Aluminio AS12UNG (12%Si, 1%Cu, 1%Ni, 0,6%Mg, 1%Fe, balance Al). Se aprecian las numerosas fases secundarias que se han formado en la matriz de aluminio, cada una con una reflexión lumínica diferente. (Autoría, ver última página).

4.9 MICROSCOPIOS ELECTRÓNICOS

Un microscopio electrónico usa electrones en lugar de fotones o luz visible para formar imágenes de objetos diminutos. Los microscopios electrónicos permiten alcanzar ampliaciones mayores antes que los mejores microscopios ópticos, debido a que la longitud de onda de los electrones es bastante menor que la de los fotones "visibles".

TIPOS DE MICROSCOPIOS ELECTRÓNICOS

Microscopio electrónico de transmisión:

El microscopio electrónico de transmisión se basa en enfocar con un haz de electrones sobre una rodaja muy fina del material a estudiar, no más gruesa de unos 200 nm, ya que los electrones deben atravesarlo. Una parte de los electrones rebotan o son absorbidos por el objeto y otros lo atraviesan formando una imagen aumentada de la muestra.

Los microscopios electrónicos de transmisión pueden aumentar la imagen hasta un millón de veces.

Microscopio electrónico de barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido se basa en enfocar con un haz de electrones la superficie de un material. La interacción del haz con la muestra produce tres tipos de emisiones que se pueden usar para obtener distinto tipo de información: Por un lado, parte de los electrones son retrodispersados. Otra parte de los electrones alcanzan electrones de los átomos del material, arrancándolos. A estos electrones emitidos por el material se les llama electrones secundarios. Finalmente, los electrones arrancados de la capa más interna de los átomos, provoca la emisión de rayos X característicos de cada átomo. Estos microscopios tienen detectores para estos tres tipos de emisión y permiten obtener no sólo imágenes de la microestructura, sino también la composición de los distintos microconstituyentes que se observen. Su resolución se encuentra entorno a 5-20 nm.

REFERENCIAS Y AUTORÍA DE IMÁGENES

Figura 4.1: Defectos de chottky, izda., y de Frenkel, dcha.

Imágenes de la izda. de VladVD (Own work) [CC BY-SA 3.0]

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NaCl_-_Schottky_defect.jpg Imagen de

la dcha. de VladVD (Own work) [CC BY-SA 3.0]

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NaCl_-_Frenkel_defect.jpg

Figura 4.2: "The bubble raft". La imagen corresponde a una fotografía de un experimento realizado con pequeñas pompas de jabón apiladas juntas en una caja transparente. Se emplea como modelo que simula las redes cristalinas atómicas. En ella se pueden apreciar distintos tipos de imperfecciones tales como vacantes, átomos sustitucionales y átomos intersticiales, señalados con flechas rojas. (Autoría, ver última página)

Imagen extraída de <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dislocations/index.php> - © 2004-2015 University of Cambridge. Except where otherwise noted, content is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License.

Figura 4.3: Átomos sustitucionales

Imagen de Ane Miren García Romero.

Figura 4.4: Esquema de una aleación sustitucional con una partícula de fase secundaria formada en su seno.

Imagen de Ane Miren García Romero.

Figura 4.5: Esquema de una disolución sólida intersticial.

Imagen de Ane Miren García Romero.

Figura 4.6: Micrografía de una aleación bifásica de Bronce mostrando la fase principal, Cobre FCC, y la fase secundaria Cu-Sn que se forma.

Imagen "Phosphor bronze exhibiting cored dendrites. Micrografía nº 524" de Dr

R F Cochrane, disponible en

https://www.doitpoms.ac.uk/miclib/full_record.php?id=524

(13/11/2016) © 2004-2015 University of Cambridge. [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License.](#)

Figura 4.7: Representación de una dislocación de cuña

Imágenes extraídas de <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dislocations/printall.php>:

© 2004-2015 University of Cambridge.

[Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License.](#)

Figura 4.8: Representación de las zonas sometidas a tensiones de tracción y compresión dentro de una red cristalina por efecto de una dislocación de cuña

Imágenes extraídas de <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dislocations/printall.php>:

© 2004-2015 University of Cambridge.

[Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License.](#)

Figura 4.9: Dos vistas de un modelo realizado para representar una dislocación helicoidal

Imágenes extraídas de <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dislocations/printall.php>:

© 2004-2015 University of Cambridge.

[Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License.](#)

Figura 4.10: Deslizamiento de dislocaciones bajo la aplicación de una tensión mecánica

Imagen superior de Cdang (Own work) [GFDL

(<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>) or CC BY-SA 3.0]

https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ADislocation_vis_et_deformation_3d.svg

REFERENCIAS Y AUTORÍA DE IMÁGENES

Imagen intermedia de Cdang (Own work) [CC BY-SA 3.0],
https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ADislocation_coin_et_deformation_3d.svg

Imagen inferior de Cdang (Own work) [GFDL
 (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html) or CC BY-SA 3.0]
https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ADislocation_mixte_et_deformation_3d.svg

Figura 4.11: Direcciones de deslizamiento (flechas rojas) y no deslizamiento en una red cristalina

Imagen derivada de <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dislocations/printall.php>
 © 2004-2015 University of Cambridge. Except where otherwise noted, content is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License.

Figura 4.12: Planos compactos en estructuras FCC.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 4.13: Esquema del tipo de fractura que se obtiene cuando se ensayan a tracción probetas metálicas de un metal con estructura FCC (elevada ductilidad) y otro con estructura HCP (escasa ductilidad)

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 4.14: Sistemas de deslizamiento en las redes cristalinas principales de los metales (Autoría, ver última página)

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 4.15: Esquema de la formación de cristales cuando un líquido toca las paredes de un molde, solidificando

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 4.16: Izda., dos cristales que crecen con orientaciones cercanas pueden unirse para formar un solo cristal, lo cual ocurre formando dislocaciones. Dcha., Dos cristales que crecen en direcciones muy diferentes no pueden unirse, crecen hasta chocar, formando dos granos separados por EL LÍMITE GRANO.

Imagen izda.: <http://slideplayer.com/10914537/39/images/13/3.3.1%20Low-Angle%20and%20High-Angle%20Boundaries.jpg>

Imagen dcha. derivada de <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/atomic-scale-structure/defects.php> - © 2004-2015 University of Cambridge. Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License.

Figura 4.17: Micrografía mostrando los granos y límites de grano de un acero bajo en carbono . (Autoría, ver última página).

Imagen de [Dr R F Cochrane](#) Micrograph 217: Low carbon steel normalised at 950°C (400 µm) © 2004-2015 University of Cambridge. Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License.
<https://www.doitpoms.ac.uk/miclib/micrograph.php?id=218>

Figura 4.18: A la izda., esquema de una macla. A la dcha., micrografía de un latón tipo alfa tras un tratamiento de recocido. Las rayas lineales que se han formado dentro de los granos originales son las maclas.

Imagen de la izda. De Ane Miren García Romero. Imagen de la derecha de Dr R F Cochrane: Department of Materials, University of Leeds. Micrografía nº 430: Annealing twins in alpha brass.

https://www.doitpoms.ac.uk/miclib/full_record.php?id=430 © 2004-2015 University of Cambridge. Content licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License.

REFERENCIAS Y AUTORÍA DE IMÁGENES

Figura 4.19: Esquema del modo en que se producen las imágenes de microestructuras en un microscopio óptico.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 4.20 Partes principales de un microscopio óptico

Figura derivada de a imagen de Masur - Own work, CC BY-SA 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1043179>

Figura 4.21 Esquema de probeta metalográfica

Imagen derivada de la imagen extraída de

<https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/optical-microscopy/preparation.php>

.University of Cambridge. Content licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License](#).

Figura 4.23 A la izda., micrografía de un recubrimiento de zirconia proyectado por plasma atmosférico sobre un acero. Dcha., Aleación de Aluminio AS12UNG (12%Si, 1%Cu, 1%Ni, 0,6%Mg, 1%Fe, balance Al). Se aprecian las numerosas fases secundarias que se han formado en la matriz de aluminio, cada una con una reflexión lumínica diferente. (Autoría, ver última página).

Imagen y micrografías de Ane Miren García Romero

ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO

BILBOKO INGENIERITZA ESKOLA



Esta obra está bajo una licencia Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 4.0 Internacional de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite: https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es_ES.

Imagen de la Portada y contraportada: Detalle de una fachada de composite de fibra de vidrio con resina polimérica degradada por exposición a la intemperie cercano al mar (Hondarribia, España, 2014). Propiedad de Ane Miren García Romero.