

01-Cristalografía

02-Propiedades

Las distintas propiedades de los materiales se suelen clasificar atendiendo a la utilización o el principio que las rige, y así podemos tener propiedades químicas (acidez, reactividad, resistencia a la corrosión,...), físicas (color, densidad,...) o decorativas (calidez, tacto agradable,...). Pero lo que se analiza para la utilización técnica de los materiales son las propiedades mecánicas. Veamos algunas de estas propiedades:

La cohesión es la resistencia a la separación de los átomos o moléculas de un material. Es la propiedad que determina el resto de propiedades mecánicas.

Un material es elástico cuando recupera su forma inicial después de someterlo a una deformación. Lo contrario de elasticidad es la rigidez.

La plasticidad es una propiedad ligada con la elasticidad, sin llegar a ser opuesta. Cuando se deforma un material elástico, éste puede recuperar su forma, pero si se rebasa un cierto límite, el material quedará deformado. Entonces decimos que el material se ha comportado de forma plástica. Esta propiedad es muy característica de los metales, pues sus átomos pueden aplastarse para transformarse en chapas o alambres. En el primer caso se habla de maleabilidad y en el segundo de ductilidad.

Aunque en lenguaje común decimos que algo es duro cuando se resiste a ser deformado, el concepto físico de dureza es la resistencia a hacer rayas sobre el material. Esto se traduce en que un material duro presenta dificultad para clavar algo sobre él.

Por último, cabe destacar la resistencia a la fatiga, la cual significa que el material soporta muchas deformaciones repetidas sin romperse, como cuando se dobla muchas veces un alambre hasta conseguir que se rompa.

Para determinar estas propiedades se hacen unas pruebas que se denominan ensayos, con los cuales se analiza el comportamiento del material y se obtienen valores numéricos para comparar distintos materiales y elegir el más adecuado a cada aplicación. Los ensayos se clasifican atendiendo al rigor, al método o al uso de la muestra, y tenemos:

Por su rigor, los ensayos científicos se realizan en laboratorios especializados y someten al material a pruebas precisas y normalizadas para obtener valores precisos, mientras que los ensayos técnicos se realizan en los lugares de trabajo para obtener la calidad del material y tomar decisiones de su utilización.

Los ensayos se denominan destructivos cuando el material queda roto y desechado tras el estudio, o no destructivos cuando sólo se verifica algo sin afectar al estado del material.

Por último, en cuanto al método usado, se puede estudiar la composición o la respuesta ante reacciones químicas (ensayos químicos), los ensayos físicos obtienen propiedades físicas, el método metalográfico consiste en mirar por microscopio la disposición de las redes de un metal.

En este curso se van a introducir los siguientes:

- Ensayos de dureza
- Ensayos de deformación
- Ensayos de resiliencia
- Ensayos de resistencia a fatiga

03-Ensayo de tracción

Cuando sobre un cuerpo actúa una fuerza pequeña que trata de deformarlo se produce una deformación elástica, que se recupera al desaparecer esa fuerza. Pero superado un cierto valor, la deformación que sufre el cilindro es permanente, o plástica.

La respuesta de un material ante la deformación está influenciada por la relación entre la fuerza aplicada y el tamaño del objeto. Por lo tanto, no se analiza la fuerza sino ésta dividida entre el área que debe soportarla. A este valor se le denomina esfuerzo, y la unidad del Sistema Internacional es el N/m² o Pa (pascal), un valor muy pequeño, por lo que es más corriente su múltiplo el MPa o el kp/mm²:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

Así mismo, la deformación que sufre el material debe ser considerada en relación con la longitud total del objeto, y se analiza la deformación unitaria, obtenida al dividir la deformación total entre la longitud del objeto. A veces se habla de elongación como el tanto por ciento de deformación, y que se obtiene al multiplicar la deformación unitaria por 100:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell_0}$$

Con estas premisas, el ensayo de tracción de un material consiste en someter un cilindro o una placa con dimensiones normalizadas de ese material a un estiramiento creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Con ésto se obtienen gráficas como la del dibujo, de un ensayo de tracción, en el que se observan varias zonas características de los materiales elásticos:

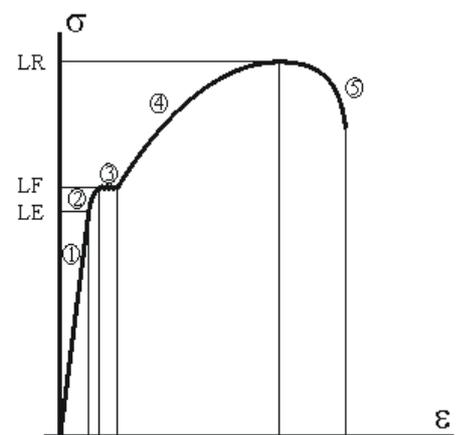
1 - Es la zona elástica del material hasta un esfuerzo denominado límite elástico (LE). En buena parte de la curva se mantiene la proporcional y a la pendiente de la curva se le llama módulo elástico o módulo de Young, y la recta responde a una ecuación llamada Ley de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

2 - Esta es también una zona elástica, aunque en ella no se cumple la proporcionalidad.

3 - Esta zona se denomina de fluencia, en la cual el material cede sin aumentar el esfuerzo, que recibe el nombre de esfuerzo de fluencia (LF). Es el inicio de las deformaciones plásticas.

4 - Cuando se sigue aumentando el esfuerzo de tracción el material



sigue alargandose de forma plástica.

5 - A partir de un cierto límite llamado esfuerzo de rotura (LR) el estiramiento es tan grande que se produce la estricción de la sección, es decir, el material adelgaza, y acaba rompiéndose.

Los diseños técnicos se realizan para que las piezas trabajen siempre en la zona elástica. Incluso se trabaja con un coeficiente de seguridad n , que limita un esfuerzo máximo de trabajo σ_T :

$$\sigma_T = \frac{LE}{n}$$

Ya sabemos que cuando se somete un material a un esfuerzo superior al límite de fluencia, éste se estira, y al desaparecer la fuerza, aunque el material deja de estar estirado, no recupera su tamaño original y se queda deformado permanentemente. Si ahora se vuelve a cargar ese material, resulta que su límite elástico es el valor del esfuerzo alcanzado anteriormente. A este efecto se le denomina provocar acritud en el material, y es una forma de mejorar sus propiedades.

Cuando se alarga un metal por efecto de la tracción, a la vez sufre un estrechamiento que se puede calcular mediante el volumen de la pieza:

$$V = S_0 \cdot l_0$$

volumen que se mantiene cuando la pieza se alarga y se estrecha. Por este motivo, en la expresión del esfuerzo sería aconsejable indicar que se usa la sección inicial S_0 , aunque las ínfimas variaciones de la misma hacen despreciable ser tenidas en cuenta para los cálculos.

Sin embargo, como se puede ver en la animación, en la rotura sí se produce un estrechamiento considerable. Al igual que ocurría con la deformación unitaria ?, se puede analizar el valor de estricción como la diferencia de secciones en relación con la sección original:

$$\text{Estricción} = (S_0 - S_{\text{ROTURA}}) / S_0$$

04-Ensayos de dureza

La dureza es la resistencia de un material a ser rayado o penetrado, por lo cual estamos midiendo la cohesión entre los átomos del material. Ésto, por tanto, guarda relación con la resistencia a la deformación y a la rotura, y cuanto más duro sea un material, más resistente será también.

Con los metales se utiliza el método Martens que consiste en medir el surco que deja una punta de diamante de forma piramidal que se desplaza sobre la superficie. Sin embargo, es más frecuente hablar de otro tipo de ensayos en los que se mide la marca que se deja en un material cuando se intenta clavar en él otra pieza de formas definidas, llamada penetrador.

El método consiste en aplicar una fuerza, que suele ser proporcional al cuadrado del tamaño del penetrador ($F = k \cdot D^2$) y medir la huella que queda. Según la forma del penetrador y la forma de aplicar la fuerza tenemos varios ensayos de dureza, entre los que destacan tres: el método Brinell, el método Vickers y los métodos Rockwell.

DUREZA BRINELL

Este método consiste en aplicar una fuerza a una bola de acero y calcular el cociente entre la fuerza y la superficie de la huella, que viene dada por la expresión $S = \pi \cdot D \cdot f$

El diámetro d de la huella se mide fácilmente con un microscopio, pero la profundidad f no es sencilla. Por lo tanto, se busca la relación matemática entre los valores:

$$f = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

Ahora se divide la fuerza entre la superficie de la huella y se obtiene el valor de la dureza Brinell, que se expresa mediante una expresión normalizada, en la que se escribe el valor de dureza en kp/mm^2 , las letras HB (Hardness Brinell), el diámetro en mm de la bola, la fuerza en kp y el tiempo que dura la aplicación de la fuerza en segundos:

$$100 \text{ HB } 5 \text{ 250 } 30$$

DUREZA VICKERS

Este ensayo se utiliza cuando el grosor del material es pequeño o cuando su dureza es muy grande para que una bola de acero deje marca. En este caso el penetrador es una pirámide de diamante con base cuadrada y ángulo en el vértice de 136° .

Al igual que en el caso anterior, se divide el valor de la fuerza entre la superficie dejada por el penetrador, expresada en función de las distancias dejadas en una superficie formada por cuatro triángulos, que se calcula así:

$$S = \frac{d^2}{2 \cdot \text{sen}68^\circ}$$

De forma idéntica que en la dureza Brinell, en la escala Vickers también se indica el valor resultante de dividir la fuerza entre la superficie en kp/mm^2 , y la expresión normalizada consiste en escribir este valor, las iniciales HV (Hardness Vickers) y luego la fuerza aplicada en kp:

$$700 \text{ HV } 30$$

DUREZA ROCKWELL

En los ensayos anteriores no se tiene en cuenta que el material penetrado tiene una cierta recuperación elástica tras la desaparición de la carga. Para obviar este punto se desarrollaron los métodos Rockwell, en los que además se mide la profundidad de la huella mediante máquinas de precisión llamadas durómetros.

Se usan penetradores y fuerzas normalizadas para cubrir un amplio espectro de materiales, y cada combinación recibe una letra, de las cuales las más frecuentes son las escalas Rockwell B (con una bola de acero) y la Rockwell C (con un cono de diamante). El proceso es el siguiente:

1º Se aplica al penetrador una precarga baja de 10 kp para provocar una deformación elástica, y se

obtiene una profundidad h_0 .

2º A continuación se aplica una carga adicional de 60 kp (HRB) o de 100 kp (HRC), con lo cual el penetrador se introduce hasta una profundidad h_1 produciendo una deformación plástica.

3º Por último se retira esta carga adicional y se mantiene la precarga, con lo cual el penetrador se queda a una profundidad h_2 .

La diferencia entre la profundidad inicial y la final $d = h_2 - h_0$ elimina la componente elástica de la deformación. A continuación se comprueba cuántas veces cabe en esta diferencia "d" la unidad Rockwell de 0,002 mm y éste es el valor de penetración.

$$e = \frac{d}{0,002}$$

Este valor es tanto menor cuanto más duro sea el material. Para que los materiales más duros tengan valores de dureza más altos, se resta la penetración Rockwell de 100 (en la escala HRB) o de 130 (en la HRC).

$$\text{HRC} = 130 - e$$

$$\text{HRB} = 100 - e$$

05-Resiliencia

Cuando un objeto recibe un impacto, absorbe la energía, llegando incluso a romperse. Esta propiedad es lo que hemos denominado tenacidad. El ensayo de resiliencia más ampliamente utilizado es el método Charpy, que consiste en medir la energía que pierde un péndulo cuando choca en su trayectoria contra una probeta tipo Mesnager del material, que tiene sección cuadrada de 1 cm de lado con una entalla o ranura de 2 mm de profundidad en el centro.

Por tanto, la tenacidad ya se puede cuantificar mediante un valor denominado resiliencia (ρ o KVC) que se mide en J/cm^2 (aunque la unidad en el SI es el J/m^2)

ENSAYO DE FATIGA

El principio de la rotura por fatiga estriba en que con un esfuerzo muchísimo menor que el de rotura pero aplicado de forma reiterada se consigue que el material acabe por romperse mostrando una superficie muy típica: un punto de inicio o incubación, una zona de playas o propagación por la que se va extendiendo la grieta hasta que la sección efectiva del material es muy pequeña.

Los ensayos de fatiga consisten en someter a una probeta a una serie de esfuerzos de forma repetida hasta producir la rotura. Los valores se tabulan y se construyen gráficas llamadas curvas de Woehler, en las que se compara el número de ciclos con el valor del esfuerzo.

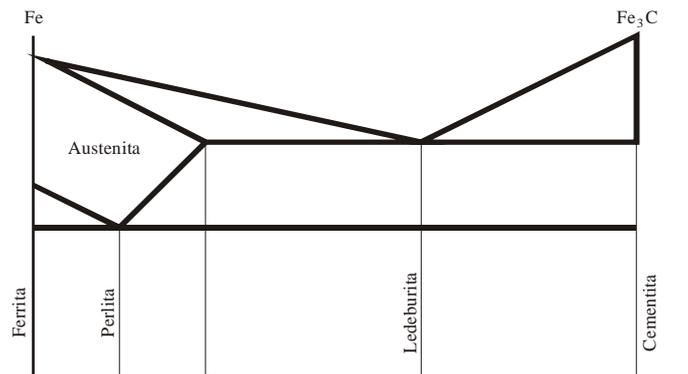
06-Diagrama Fe-C

El hierro y el carbono constituyen aleaciones únicamente hasta un 6,67% en peso de carbono. Con

esta concentración y con concentraciones superiores se crea un compuesto químico denominado cementita (Fe_3C) que no tiene propiedades metálicas. Por lo tanto, únicamente se estudia el diagrama hasta esa proporción.

En la solidificación aparece una solución sólida llamada austenita para proporciones inferiores al 1,76% de carbono, y con un 4,30% se crea un eutéctico llamado ledeburita. Ésto provoca la primera clasificación del sistema hierro-carbono: se habla de aceros si la proporción de carbono es inferior a 1,76%, y de fundiciones para proporciones entre 1,76 y 6,67%.

La austenita también se llama hierro- γ , y tiene una red cúbica centrada en las caras (FCC) que en su interior admite átomos de carbono. Pero cuando se contrae la red al disminuir la temperatura, disminuye la solubilidad como ya sabemos, y se expulsa el carbono sobrante en forma de cementita. Cuando la temperatura baja hasta 723°C el hierro sufre un cambio alotrópico y su red se transforma en cúbica centrada en el cuerpo (BCC), que no acepta apenas átomos de carbono en su seno; entonces el hierro se denomina ferrita o hierro- α . Este cambio de solubilidad en estado sólido conlleva la formación de un eutectoide llamado perlita con una concentración de 0,89% de carbono que está formado por láminas de ferrita y de cementita.



A los aceros que tienen una proporción menor que 0,89% de carbono se les denomina hipoeutectoides, y si tienen entre 0,89 y 1,76% de carbono, hipereutectoides. Recopilando todo, el diagrama del sistema hierro-carbono tiene este aspecto:

07- Los aceros

En el diagrama del acero se distinguen dos temperaturas: A1, de aparición de la perlita y A3 o temperatura de austenización completa, que varía con el contenido en carbono del acero. La temperatura A2 (768°C) se conoce como temperatura de Curie y en ella el hierro pasa de ser una sustancia fácilmente magnetizable a temperatura ambiente a perder esas propiedades magnéticas.

Cuando el enfriamiento de un acero eutectoide es muy lento, la austenita se transforma en perlita. Para un acero hipoeutectoide, un enfriamiento lento significa obtener una estructura perlítica rodeada de ferrita. A esto se le conoce como matriz ferrítica. Para aceros hipereutectoides la cementita tiende a formar nódulos o pequeños granos en el seno de la austenita, a ésto se le denomina cementita proeutectoide, que se mantendrá cuando la austenita se transforme en perlita.

Cuando se hace un estudio de la microestructura de un metal, se pule la superficie y se la ataca con sustancias ácidas que resaltan los límites de grano. A continuación se fotografía el aspecto, y se obtiene la micrografía del metal.

08-Tratamientos térmicos

Las estructuras que se han visto hasta ahora sólomente se obtienen cuando el enfriamiento es muy lento. En particular, para conseguir que un acero eutectoide se quede como perlita es necesario que transcurran muchas horas para que se desplacen los átomos de las redes y la cementita y la ferrita acaben formando las consabidas capas alternadas.

Cuando la austenita se enfría más rápidamente se obtiene un material similar a la perlita pero con una microestructura menos definida, que se llama bainita.

Cuando el enfriamiento de la austenita es muy rápido, el carbono disuelto no tiene tiempo de salir de la red y la estructura se queda "congelada"; al material resultante se le denomina martensita, que tiene una gran resistencia mecánica y una elevada tenacidad. Este proceso de congelación se llama temple o templado.

En realidad, el carbono de la austenita se queda bloqueado dentro de la red, pero la contracción y la tendencia a que la estructura se transforme en la red BCC de la ferrita es tan fuerte, que los átomos de carbono deforman el cristal, creando una red centrada en el cuerpo pero tetragonal (BCT).

Con objeto de analizar las distintas estructuras que se obtienen al variar la temperatura y el tiempo de enfriamiento, se lleva a cabo un ensayo que consiste en calentar un gran número de placas de acero (digamos 100) de una determinada composición por encima de su temperatura A₃, a fin de que todas las placas se transformen en austenita. A continuación se introduce una serie de placas (por ejemplo 10) en un baño de sales cuya temperatura se mantiene constante. Otra serie (otras 10, por ejemplo) se introducen en otro baño que se mantiene a temperatura diferente, y así sucesivamente. De cada baño se extrae una placa cada cierto tiempo, para templarla y ver su microestructura. De esta forma se anota el tiempo que ha tardado en empezar la transformación, así como el instante en que la transformación se ha completado, y se obtienen los diagramas tiempo-temperatura-transformación, conocidos simplemente como curvas TTT.

Al representar un enfriamiento en el diagrama TTT, se puede analizar qué estructura se obtendrá, estudiando si ha comenzado la transformación de la austenita, si se ha completado la transformación, hasta qué proporción, etc.

Los tratamientos térmicos básicos del acero se pueden resumir como:

- **Temple:** Su finalidad es aumentar la dureza y la resistencia del acero. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que A₃ y se enfría luego rápidamente en un medio como agua o aceite. Las contracciones que conlleva el enfriamiento dan lugar a que las piezas queden con tensiones internas y hasta se agrieten.
- **Revenido:** Sólo se aplica a aceros previamente templados, para eliminar las tensiones creadas en el temple, conservando parte de la dureza y mejorando la tenacidad. Consiste en calentar hasta temperaturas inferiores a A₃ para permitir una ligera expulsión del carbono de la martensita y después enfriar el material.
- **Recocido:** Consiste básicamente en un calentamiento hasta temperatura de austenitización (800-925°C) seguido de un enfriamiento muy lento para anular totalmente el temple. Se realiza para facilitar el mecanizado de las piezas al ablandar el material.

- Normalizado: Tiene por objeto dejar un material en estado normal, es decir, ausencia de tensiones internas y con una distribución uniforme del carbono. Es un tratamiento idéntico al recocido, con una velocidad de enfriamiento algo más rápida. Se suele emplear como tratamiento previo al temple y al revenido.

09-Tratamientos superficiales

Cuando se trabaja con un material, es deseable que sea muy tenaz para aguantar impactos, pero que su superficie sea muy dura para evitar el desgaste. Ésto se consigue obteniendo las propiedades deseadas para toda la pieza mediante tratamientos térmicos adecuados y después variar las propiedades de la superficie someténdola a otro tratamiento diferente, que puede ser térmico, termoquímico o mecánico.

El tratamiento térmico superficial consiste en calentar únicamente la superficie de una pieza de acero por inducción o con soplete, para después enfriar rápidamente y así producir un temple en la superficie.

En el caso de tratamientos termoquímicos se añaden diferentes productos químicos a aceros de bajo contenido en carbono mediante el calentamiento y enfriamiento de las piezas a tratar en atmósferas especiales. Los dos casos más corrientes son:

- Cementación: Aumenta la dureza superficial aumentando la concentración de carbono en la superficie. Se consigue cubriendo el metal con carbón vegetal o en atmósfera de metano durante y manteniéndolo por encima de la temperatura A3, con lo que se logra que se difunda carbono únicamente en la zona exterior. Posteriormente se obtiene, por medio de temples y revenidos, una gran dureza superficial y resistencia al desgaste, manteniendo una buena tenacidad en el núcleo.
- Nitruración: Al igual que la cementación, aumenta la dureza superficial por aparición de un compuesto de mayor dureza que la cementita (Fe_4N), al incorporar nitrógeno en la composición de la superficie. Se logra calentando el acero dentro de una corriente de gas amoníaco con nitrógeno y manteniendo una temperatura de unos 500° C.

El tratamiento mecánico superficial por excelencia es el granallado o shot-peening, que consiste en lanzar un chorro de pequeñas bolas de acero contra la pieza, con objeto de rebasar el límite elástico en la superficie y provocar acritud. Además, con este tratamiento se cierran las posibles microgrietas que dan origen a la rotura por fatiga.

Merecen especial atención los tratamientos anticorrosión. El proceso de la corrosión consiste en la reacción del metal con el oxígeno o con otros elementos del entorno. Aunque comunmente a ésto se le llama oxidación, se reserva este término para la reacción del acero con el oxígeno a elevadas temperaturas. La corrosión se produce por alguno de los siguientes efectos:

- por erosión con materiales abrasivos
- por ataque químico de sustancias corrosivas
- por reacciones galvánicas entre metales de distinta electronegatividad en contacto con un electrolito conductor
- por reacción con el oxígeno del aire en presencia de humedad
- corrosión intergranular de eutécticas

Para evitar la corrosión se utilizan varios métodos, los más importantes son:

- diseño adecuado, evitando lugares propicios a acumulaciones
- selección adecuada del material, procurando usar aceros pasivados, es decir aleados con materiales protectores
- recubrimiento superficial, que puede ser fundido (recubrimiento de estaño para formar hojalata o galvanizado con cinc), plaqueado (con láminas de aluminio por ejemplo) o pintado
- protección catódica, mediante baterías que evitan las reacciones galvánicas o, más frecuentemente, con ánodos de sacrificio más electronegativos aún que el material a proteger. En la imagen inferior se puede ver el típico ánodo de cinc para proteger el casco de la embarcación, que es de acero y se corroe ante el bronce de la hélice, puesto que el hierro es más electronegativo que el cobre (a veces se dice que el hierro es menos noble).