

MATERIALES MEMORIOSOS

Aleaciones especiales pueden minimizar daños o pérdidas humanas en sismos.

Franco de Castro Bubani, Marcos Sade y Francisco Lovey

FÍSICA

Elasticidad y plasticidad

Al aplicarse una fuerza mecánica a la gran mayoría de los metales o aleaciones ("soluciones sólidas de metales"), éstos sufren una deformación proporcional a la fuerza aplicada, hasta cierto umbral. Al quitarse la fuerza, el material recupera su forma original. Este fenómeno se llama deformación elástica y el umbral mencionado recibe el nombre de límite elástico. La deformación elástica es la base del funcionamiento de los resortes. Una vez superado el límite máximo de deformación elástica, el material empieza a deformarse permanentemente, lo que se conoce como deformación plástica, la que puede continuar hasta la fractura del material. Al quitarse la fuerza en la etapa de deformación plástica (antes de la ruptura), el material no vuelve a su forma original, sino que queda deformado de forma permanente. Si la forma era una propiedad importante del material, la deformación plástica lo daña irremediablemente. ¿Quién no ha defor-

mado algo plásticamente en su vida? También hay metales y aleaciones frágiles que pueden romperse antes del inicio de la deformación plástica, pero no los incluiremos en esta discusión.

La deformación elástica obedece una relación lineal con la fuerza aplicada. En términos de energía, en un caso elástico ideal, todo el trabajo mecánico realizado sobre el material durante su deformación elástica se almacena en forma de energía elástica en el mismo material deformado y es devuelto por éste al quitar la fuerza mecánica. Por lo tanto, no hay disipación de energía en este proceso de carga y descarga. Es así necesario usar un dispositivo específico cuando se requiere disipar cantidades significativas de energía. En el régimen plástico, por otro lado, la mayor parte del trabajo mecánico realizado para deformar un material se convierte en calor, que se termina disipando en el ambiente que rodea al material deformado. Dicha energía entregada al medio en forma de calor no puede ser devuelta por el material al quitarse la carga, porque de hecho en ningún momento quedó almacenada en el material. Digamos que el material deformado plásticamente regaló la mayor parte de la energía que se generó durante su deformación, al ambiente que lo rodea. Este es un buen ejemplo de disipación de energía y de lo difícil o imposible que es devolver lo que ya no se posee.

Palabras clave: aleaciones con efecto memoria, transformaciones martensíticas, disipación de energía, amortiguación.

Franco de Castro Bubani^{a,b}

Magister en Ingeniería Mecánica, Materiales y Procesos de Fabricación.
franco@cab.cnea.gov.ar

Marcos Sade^{a,b,c}

Dr. en Física
sade@cab.cnea.gov.ar

Francisco Lovey^{a,c}

Dr. en Física
lovey@cab.cnea.gov.ar

^a Centro Atómico Bariloche (CNEA), Argentina

^b CONICET, Argentina

^c Instituto Balseiro, Univ. Nac. de Cuyo, Argentina

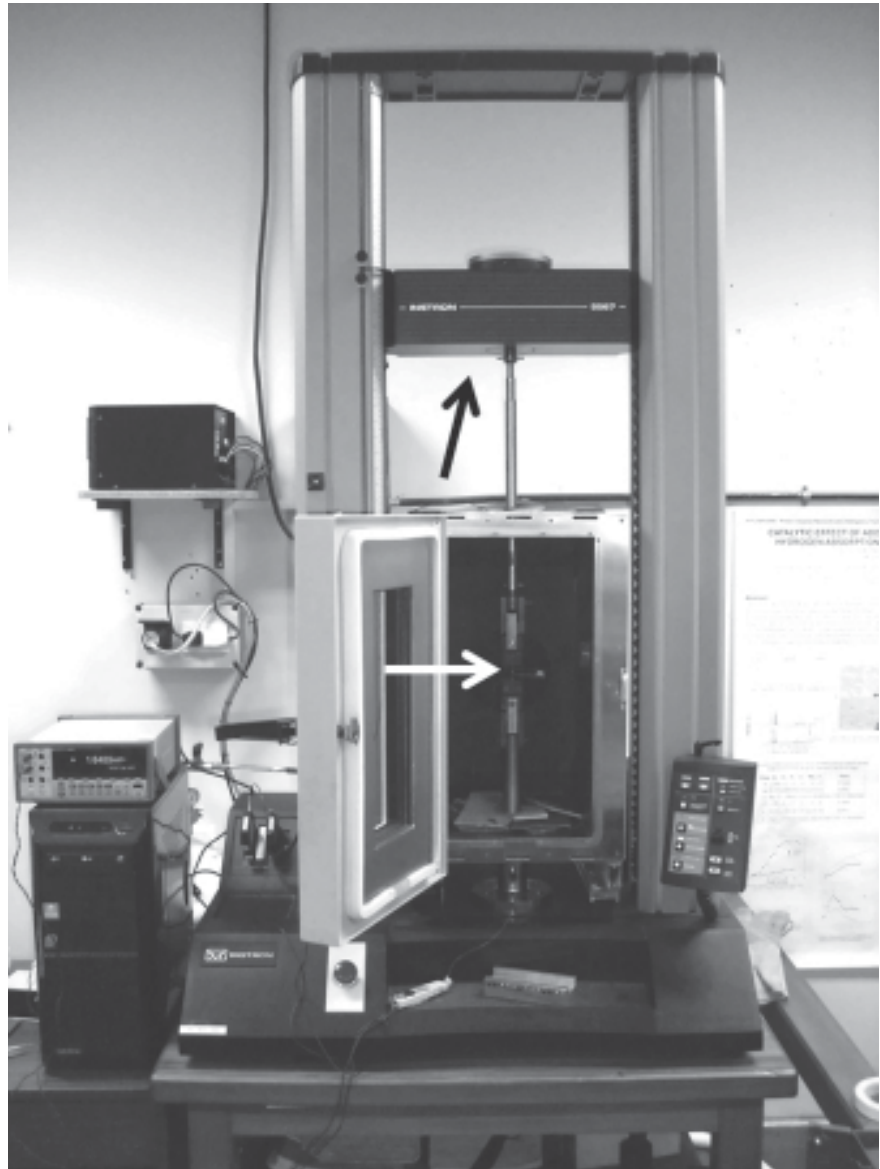
Recibido: 27/09/2013. Aceptado: 30/10/2013.

¿Cómo se mide el comportamiento mecánico de un material?

Se utilizan máquinas de ensayos mecánicos. Al material se le da una forma apropiada al experimento que se desea realizar. Por ejemplo, en el caso de un experimento de tracción se suelen usar probetas, también llamadas muestras, de forma cilíndrica, con la parte central de menor diámetro. A sus extremos se les llama cabezas de la probeta y estas cabezas son utilizadas para colocar la muestra en la máquina de ensayos. En la Figura 1 se puede ver parte de un equipo de ensayos mecánicos utilizado típicamente para estudiar la respuesta mecánica de los materiales sometidos a la aplicación de fuerzas mecánicas. En el ejemplo de

Figura 1. Máquina de ensayos electromecánica. Se indica con una flecha blanca la ubicación de la probeta ensayada y con una flecha negra el travesaño móvil.

la Figura 1, una de las cabezas de la muestra está rígidamente unida a un punto fijo de la máquina, en este caso a la base de la misma, y la cabeza superior está unida mediante mordazas y vástagos al travesaño, que es móvil. Al moverse el travesaño hacia arriba con una velocidad seleccionada por el operador, la muestra así traccionada se deforma. Por otra parte, la muestra se resiste a ser deformada, lo que lleva al incremento de la fuerza mecánica ejercida en este experimento por la propia máquina. Un resultado típico de un ensayo de deformación se puede ver en la Figura 2, donde está indicado en la curva obtenida la zona correspondiente a la deformación elástica y la correspondiente a la deformación plástica.



Sobre autos y sismos

En los autos, por ejemplo, los resortes de la suspensión trabajan en el rango elástico y no son capaces de disipar de manera eficiente la energía de las oscilaciones generadas por irregularidades en el pavimento, como al pasar por una loma de burro, o incluso en caso de curvas o frenadas. Esas oscilaciones son muy peligrosas pues pueden desestabilizar el auto y provocar un accidente. Para disipar esa energía y evitar oscilaciones peligrosas del chasis, los autos están equipados con amortiguadores, que disipan energía básicamente por medio de la fricción de un fluido que se desplaza internamente cuando el amortiguador se extiende o se contrae (esos amortiguadores **no** se deforman plásticamente porque lo que se deforma es un fluido). Los amortiguadores de los autos son eficientes y soportan una alta cantidad de ciclos, pero son costosos.

Los sismos pueden deformar y generar oscilaciones muy fuertes en las estructuras civiles. Mientras se deforme en el rango elástico, la estructura se compor-

ta como un resorte y no hay mucha absorción de energía, por las razones descritas arriba. Si la deformación de la estructura es suficiente para entrar en el rango plástico (o "de deformación plástica"), la absorción de energía es muy significativa, pero la misma deformación plástica puede dañar la estructura. Además, existe un riesgo de fractura de los elementos estructurales como vigas, columnas, etc. por exceso de deformación plástica, resultando en el derrumbe de la estructura y generando pérdidas materiales y de vidas humanas. Afortunadamente, los aceros usados en construcción civil tienen la capacidad de deformarse mucho antes de romperse, pero, aunque las construcciones no se derrumben catastróficamente, los daños ocasionados por la deformación plástica pueden ser severos, inviabilizando permanentemente el uso y reparación de la estructura. En estos casos, la estructura debe ser demolida y reconstruida.

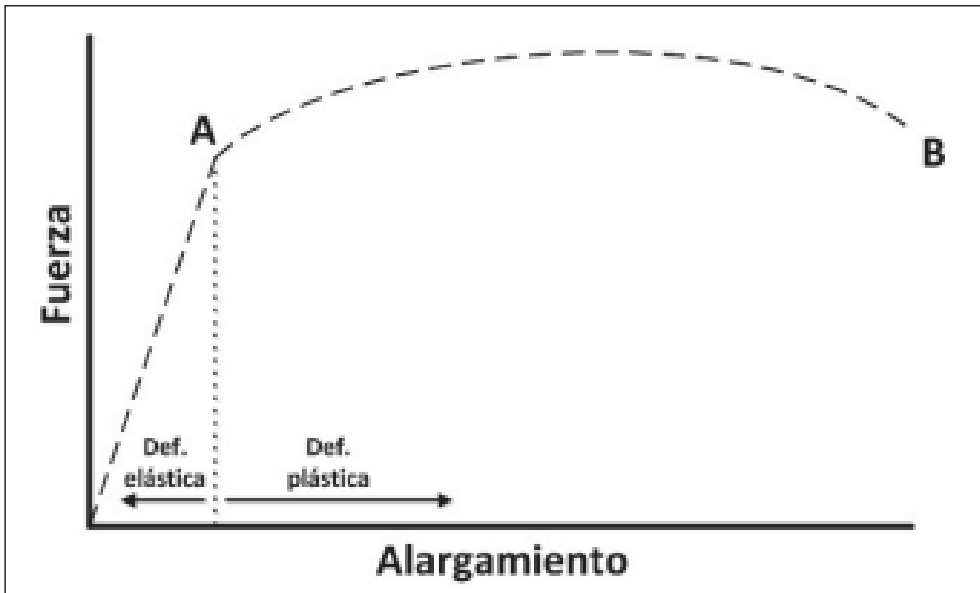


Figura 2. Curva típica de fuerza aplicada versus elongación de la muestra, obtenida en un experimento de tracción. Hasta el punto A, el material se comporta elásticamente. Desde el punto A al B, el material se deforma plásticamente.

Aleaciones con efectos especiales

Las aleaciones con efecto memoria presentan un comportamiento mecánico diferente al de un metal común. Dicho comportamiento se caracteriza por propiedades particulares conocidas como efecto pseudoelástico y efecto memoria de forma.

Pseudoelasticidad o efecto pseudoelástico

Al aplicar una fuerza *F* de tipo mecánico a una aleación con efecto memoria, el material se deforma elásticamente siguiendo la llamada ley de Hooke (fuerza proporcional a la elongación, siendo la constante de proporcionalidad una constante propia del material). A partir de una cierta deformación (o valor de fuerza aplicada), la deformación se incrementa notoriamente,

alejándose del comportamiento elástico. Esta deformación se asemeja a una deformación plástica típica,

diferenciándose por el hecho de que al quitar la fuerza mecánica, la deformación se revierte, llegando en algunos casos a recuperar la forma original del material. A título de ejemplo se puede observar en la Figura 3 un comportamiento pseudoelástico en una aleación monocristalina (ver Glosario) de cobre, zinc y aluminio (Cu-Zn-Al).

En la Figura 3b se aprecia que las curvas de carga y descarga se superponen solamente en el rango elástico del material, mientras que fuera de este rango, el camino de carga no se superpone al de descarga, generándose de esta forma la presencia de *histéresis* en el proceso. Las flechas en el gráfico indican el camino seguido por el material durante la tracción y la descarga. En esta última, la muestra va disminuyendo su deformación hasta que finalmente recupera la forma inicial. El fenómeno mencionado de *histéresis* está presente cuando el camino de ida difiere del camino de retorno. De hecho, aparece en otros fenómenos de la física como el magnetismo, cada vez que el camino

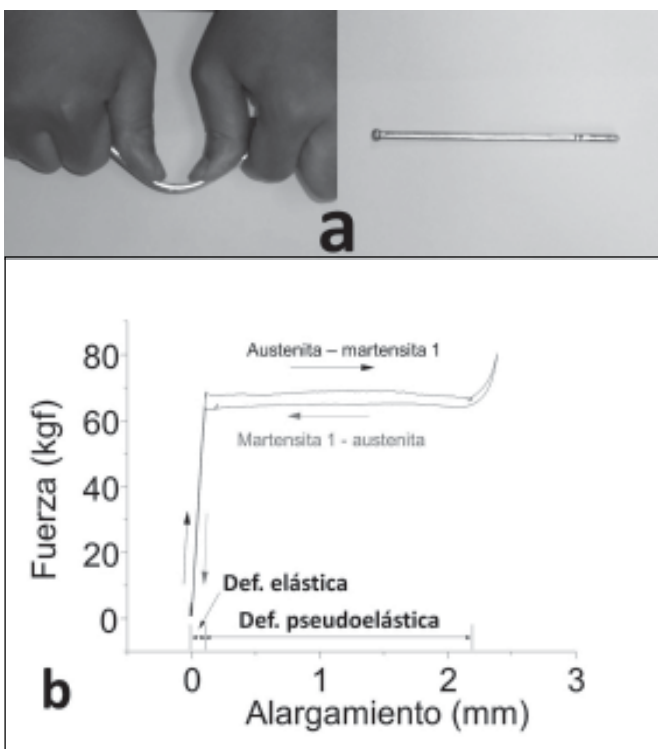


Figura 3. Comportamiento pseudoelástico obtenido en una muestra monocristalina de una aleación de cobre, zinc y aluminio, de composición 75,45% Cu, 16,74% Zn y 7,76% Al (en peso). El material es deformado más allá del límite elástico mediante la aplicación de una fuerza mecánica y al quitar dicha fuerza recupera la forma original.

3.a) En la primera foto, la fuerza es aplicada por una persona y el material utilizado es un monocristal de Cu-Zn-Al. En la siguiente foto, se deja de aplicar la fuerza y el material recupera su forma original.

3.b) La fuerza es aplicada por una máquina de ensayos mecánicos. En el gráfico se muestra la fuerza aplicada versus elongación (o "alargamiento") obtenida. El ensayo fue realizado a una temperatura de 35°C con una velocidad de deformación de 0,1 mm/min. Esta velocidad corresponde a la velocidad de desplazamiento del travesaño indicado en la Figura 1.

recorrido al variar el estado de un material no coincide con el camino recorrido al retornar el material a su estado de partida. La histéresis es una propiedad característica de los fenómenos disipativos de energía.

Efecto memoria de forma

En este caso, al aplicar una fuerza mecánica el material se deforma más allá del rango elástico y queda deformado una vez que se deja de aplicar la fuerza mecánica. Sin embargo, al calentar el material, éste recupera la forma original.

Origen de los fenómenos mencionados

La recuperación de la forma que se observa en el efecto pseudoelástico al quitar la carga mecánica, o en el efecto memoria de forma al calentar el material deformado, es un fenómeno atípico y es poco probable que lo pueda reproducir el lector si deforma un material cualquiera más allá del rango elástico. Tanto el efecto pseudoelástico como el efecto memoria de forma se explican por la presencia de transformaciones de fase martensíticas, que constituyen un caso particular de las transformaciones de fases en sólidos.

Sobre las transformaciones de fases en los sólidos

Buena parte de los sistemas o materiales con los que el ser humano convive no están en su estado de equilibrio termodinámico, y de hecho si pudieran evolucionar hacia su estado de equilibrio lo harían. En muchos casos dicha evolución implica algún desplazamiento de los átomos que conforman al material en estudio. Si el proceso que tiene lugar implica un cambio de estructura, estamos en presencia de una transformación de fases, entendiéndose por fase a una región homogénea en sus propiedades. Las transformaciones de fase en el estado sólido pueden clasificarse en dos grupos: las transformaciones que requieren procesos difusivos para llevarse a cabo y aquellas que tienen lugar sin necesidad de la difusión. La difusión en el sólido es el proceso mediante el cual los átomos dejan su ubicación y se desplazan una o más distancias interatómicas. Estamos habituados a aceptar que las moléculas en un líquido o en un gas se muevan fácilmente. Sin embargo, es menos intuitivo aceptar el movimiento de los átomos en un sólido. A título de ejemplo, cualquier proceso de precipitación de una fase en otra, en el cual la fase precipitada tiene una composición diferente a la de la fase matriz, requiere que los átomos se reacomoden a la nueva composición, lo que no se puede hacer sin difusión. Un ejemplo se puede ver en la Figura 4.

Y las transformaciones martensíticas...

Las transformaciones martensíticas constituyen un ejemplo típico de transformación estructural sin difu-

sión. La estructura de partida suele recibir el nombre de *austenita*, mientras que la estructura que se obtiene por enfriamiento mediante una transformación martensítica recibe el nombre de *martensita*. Estas transformaciones se encuentran en diversos materiales, tanto metálicos como cerámicos. La estructura específica que presentan la austenita o la martensita dependerá del material considerado. Los átomos se mueven coordinadamente distancias más pequeñas que la distancia interatómica, reacomodándose en su nueva estructura. Una consecuencia interesante es que al no haber difusión, la composición de la aleación no varía, y se puede considerar al material como un sistema termodinámico de un solo componente. Estas transformaciones pueden inducirse por cambios en la temperatura o mediante aplicación de fuerzas mecánicas.

Una particularidad de las transformaciones martensíticas es que se puede ir en cualquiera de las dos direcciones, por ejemplo transformar la fase austenita en martensita mediante enfriamiento y retransformar de martensita en austenita calentando. Si al calentar, los átomos vuelven exactamente a las posiciones originales que tenían en la fase austenita previo a la transformación, es fácil entender la recuperación de la forma original. Este razonamiento se puede extender a las transformaciones martensíticas inducidas mecánicamente, es decir mediante aplicación de fuerzas mecánicas. El concepto es el mismo y se puede interpretar ahora la curva fuerza-elongación del efecto pseudoelástico de la Figura 3b de la siguiente forma. El material es deformado mediante la aplicación de una carga mecánica en el rango elástico. A partir de cierta fuerza (o deformación), el rango elástico finaliza, la fuerza deja de subir linealmente y la deformación se incrementa notablemente en un comportamiento que es aparentemente plástico. En realidad se parece pero no es deformación plástica, sino que corresponde a un cambio de forma asociado a una transformación martensítica. Los átomos se acomodan coordinadamente en su nueva estructura. Al quitar la fuerza, los átomos vuelven a las posiciones originales mediante la retransformación inversa, es decir de martensita a austenita. He aquí que el efecto pseudoelástico se explica en general mediante una transformación de fases en el sólido, que al no ser difusiva no implica cambio de composición y que ocurre a ciertas temperatura o fuerza mecánica que dependerán de la composición de la aleación.

Origen de la palabra pseudoelasticidad ("falsa elasticidad")

La *transformación estructural*, también llamada *transformación martensítica*, tiene asociado un cambio de forma que causa la fuerte elongación observada en el gráfico de la Figura 3b. Dicha deformación,

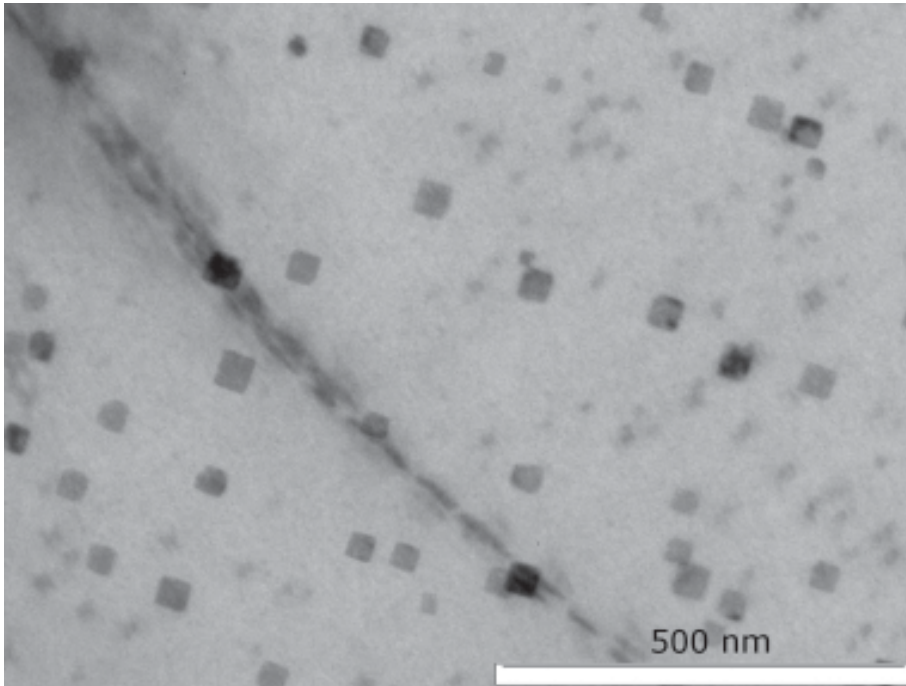


Figura 4. Ejemplo de transformación difusiva (formación de precipitados). La parte más clara de la imagen corresponde a la fase denominada *austenita*. Los cuadrados más oscuros (que, en realidad, son cubos) corresponden a precipitados, que se forman sobre el «fondo» de *austenita* y tienen composición distinta de ésta, lo que requiere que los átomos se desplacen por difusión. La imagen fue obtenida por microscopía electrónica de transmisión.

denominada “deformación pseudoelástica” en la Figura 3b, provocaría una fuerte deformación plástica en un material de propiedades normales. El efecto pseudoelástico se caracteriza entonces por la presencia de una transformación martensítica generada mediante la aplicación de una fuerza mecánica. Al quitar la fuerza, los átomos vuelven a sus ubicaciones originales o, lo que es equivalente, el material recupera su “estructura atómica” de partida. En definitiva, el material va de una estructura a la otra aplicando o quitando una fuerza mecánica. Este proceso “pseudoelástico” se puede repetir una cantidad de veces, lo cual dependerá de varios parámetros, entre ellos la fuerza aplicada. El origen del nombre pseudoelasticidad o “falsa elasticidad” resulta así intuitivo: el material recupera su forma original al quitar la fuerza mecánica de forma similar a lo que ocurre en una deformación elástica, siendo la deformación potencialmente mucho mayor a la correspondiente al rango elástico, sin ser una deformación elástica.

¿Por qué motivo no hay disipación de energía cuando un material se deforma en su rango elástico?

El trabajo realizado al desplazar un cuerpo se puede calcular como el producto del desplazamiento de dicho cuerpo por la fuerza aplicada en la dirección del desplazamiento. El trabajo total realizado será la suma de todos los términos de trabajo realizados hasta llegar a la deformación final. Esto gráficamente queda representado por el área bajo la curva de tracción (Figura 3b). Si el material se deforma mediante una fuerza mecánica de tracción (es decir su longitud aumenta), el trabajo mecánico utilizado se almacena en el material como energía que recibe el nombre de elásti-

ca. Al disminuir la fuerza mecánica aplicada hasta hacerla nuevamente igual a cero, el material se vuelve a acortar hasta su longitud original, lo que se puede decir de dos maneras: a) el material devuelve la energía elástica que acumuló

al ser traccionado o b) el trabajo mecánico realizado al descargar el material tiene igual valor pero signo contrario al realizado al cargar el material. Esto último lleva al concepto de que el trabajo neto realizado al cargar y descargar elásticamente un material cualquiera es cero y por ende no hay “gasto” o disipación de energía en esta situación.

¿Por qué una transformación martensítica podría servir para disipar energía en un evento de la naturaleza como un sismo?

Vimos que las transformaciones martensíticas pueden ser inducidas mecánicamente. Si las fuerzas de carga y descarga son exactamente iguales (lo que ocurre en el rango elástico de un material ideal), no hay trabajo mecánico neto realizado y por lo tanto la disipación de energía es nula. Sin embargo, la fuerza aplicada para deformar al material pseudoelásticamente es mayor que la fuerza que está siendo aplicada cuando el material va recuperando su longitud original. Al traccionar podemos decir que el trabajo mecánico tiene un signo positivo y al descargar, el trabajo mecánico sería negativo (pues si bien la fuerza sigue siendo de tracción el material se va acortando). La diferencia entre ambos trabajos estaría representada por el área encerrada en el ciclo de deformación y dicho trabajo no es “devuelto por el material”. Su existencia es una consecuencia de la existencia de histéresis (ida y vuelta por caminos diferentes) y constituye a la vez la energía que ha sido disipada en un ciclo de transformación-retransformación.

Esta disipación de energía ha sido obtenida en este ejemplo mediante la aplicación de una fuerza en una máquina diseñada a estos efectos (máquina de ensayos mecánicos). Sin embargo una deformación o fuer-

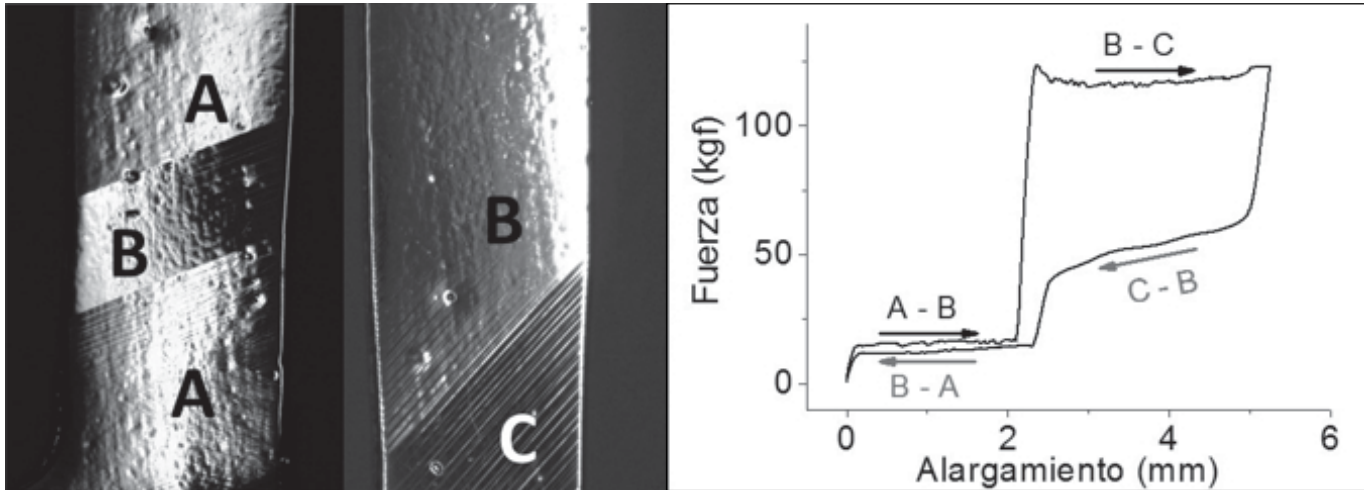


Figura 5. Dos transformaciones sucesivas en monocristales de cobre, zinc y aluminio (Cu-Zn-Al). Las letras A, B y C indican distintas fases del material, que corresponden a distintas estructuras atómicas pero con la misma composición química. En la primera transformación (izquierda), la fase austenítica (A) se transforma en una martensita que aquí llamamos martensita 1 (B). En la segunda transformación (derecha), la martensita 1 (B) se transforma en otra martensita, llamada aquí martensita 2 (C). Todas las fases mostradas tienen la misma composición química.

za podría provenir de un evento natural y la energía de dicho evento podría disiparse mediante la tracción y descarga de un material que sea "portador" del efecto pseudoelástico, es decir, siempre y cuando el material utilizado tenga esa propiedad. Afortunadamente, el efecto pseudoelástico se encuentra en un conjunto de sistemas metálicos razonablemente numeroso.

¿Por qué podría interesar disipar la energía de un evento natural mediante un material con efecto memoria?

Buena parte de los sistemas de transporte que se usan en la actualidad (aéreo, marítimo, terrestre) usan en buena medida sistemas metálicos en sus partes estructurales, aunque en algunos casos específicos, los materiales plásticos e incluso los cerámicos incrementan su participación. Uno de los motivos fundamentales por el cual los metales siguen siendo altamente atractivos es su resistencia a la deformación, y a la vez, su posibilidad de deformarse. Esta aparente paradoja se explica de la siguiente manera: por un lado, no sería atractivo movilizarse en un vehículo que altere su forma fácilmente y a la vez es deseable que, de producirse un choque, la energía asociada a ese encuentro no deseado se use en deformar el vehículo, lo que minimiza las fuerzas y actúa como salvaguarda del individuo que se encuentra en el interior del vehículo. Deformaciones del vehículo muy grandes claramente lastimarían a los pasajeros y de ahí el desarrollo de sistemas de protección adicionales como es el caso de los airbags. Resulta evidente que se descarta totalmente la fabricación de un vehículo con materiales frágiles, donde la energía proveniente de un choque provocaría la rotura de todas las piezas frágiles de manera rápida y con poca disipación de energía, de igual

forma que una taza de material cerámico se rompe ante un golpe, una caída, etc. En este caso, una fracción mucho mayor de la energía asociada al choque terminaría siendo transferida a los ocupantes del vehículo.

Pasemos ahora a considerar un evento natural como podría ser un sismo. Una forma de visualizar lo que sucede cuando un evento de estas características tiene lugar en una región determinada es la propagación de ondas que producen desplazamientos de magnitud significativa. En general se propaga más de una onda en el mismo sismo y la energía asociada a dichas ondas es muy grande. Tener sistemas que permitan disipar parte de esa energía evitaría total o parcialmente que ésta se "gaste" en fenómenos puramente destructivos. Si aceptamos que la histéresis de una transformación martensítica es una opción para disipar energía de manera "deseada", deberíamos buscar sistemas y transformaciones que nos provean de la mayor histéresis posible. Veremos a continuación un ejemplo interesante al respecto.

Transformaciones martensíticas sucesivas

Las transformaciones martensíticas descritas más arriba ocurren entre fases o estructuras que no son las de equilibrio del material. Sin embargo, las fases involucradas no evolucionarán hacia el estado de equilibrio mientras la temperatura sea lo suficientemente baja como para evitar procesos difusivos significativos. Esto no debería sorprendernos demasiado. En general, cualquiera de los materiales que usamos habitualmente está pensado para no ser calentado más allá de una cierta temperatura. La difusión en los metales, caracterizada por el desplazamiento de los átomos una o más distancias interatómicas, suele ocurrir

a temperaturas bastante mayores a las que están expuestos los materiales que utilizamos habitualmente. Es decir que no debemos preocuparnos en exceso por esto, salvo excepciones que omitiremos aquí, o accidentes como podría ser un incendio o un calentamiento desmedido de un material por la falla de un sistema de refrigeración. Un punto relevante es que la fase martensítica, formada a partir de la fase austenítica, puede también sufrir una transformación martensítica, es decir no difusiva, mediante la aplicación de una fuerza mecánica. Un ejemplo se muestra en la Figura 5, donde se puede observar la transformación austenita-martensita₁ y una transformación martensita₁ - martensita₂. Las estructuras martensíticas que aquí llamamos 1 y 2 difieren esencialmente en la forma en que se acomodan los planos atómicos en cada estructura. Salta a la vista del gráfico que la histéresis de la transformación martensita₁ - martensita₂ es notablemente mayor que la asociada a la primera transformación entre la austenita y la martensita₁, lo que incrementa notablemente cualquier proceso disipativo de energía que provoque esta transformación. Es así que la diferencia notoria de histéresis induce a pensar que una potencial aplicación pensada para disipar energía se vería notablemente favorecida si se pudiera usar una transformación martensítica entre fases martensíticas, como lo que aquí presentamos. Sin embargo, algunos problemas subsisten y deberían subsanarse para avanzar en este objetivo.

Problemas en estudio actualmente

En el grupo Física de Metales de la Gerencia de Física (Centro Atómico Bariloche) se están estudiando algunos aspectos cuya comprensión es imprescindible para que el uso de transformaciones martensíticas inducidas mecánicamente sea factible. El comportamiento mecánico del material depende en general de la frecuencia de ciclado mecánico, es decir, de la frecuencia a la cual las cargas son aplicadas y removidas. Se estudia el comportamiento de los materiales con memoria de forma en el rango de frecuencias típico de un sismo. Adicionalmente, es necesario analizar el comportamiento del material en un prototipo a escala reducida de una estructura sencilla para verificar en la práctica el comportamiento de dispositivos amortiguadores desarrollados con aleaciones con efecto memoria. Se han llevado a cabo estudios con aleaciones con efecto memoria comerciales de níquel-titanio (Ni-Ti) y ahora se usará el mismo dispositivo para probar experimentalmente la utilización de monocristales de cobre, zinc y aluminio (Cu-Zn-Al) aprovechando la notable histéresis que presentan las transformaciones entre fases martensíticas.

¿Elige un material su propia estructura?

Las aleaciones metálicas están constituidas por átomos y éstos están ubicados en lugares específicos dando origen a la llamada *estructura* del material. La estructura depende del material y existen diversos métodos experimentales para determinarla y modelos teóricos para predecirla, o intentar hacerlo. El tipo de estructura en que se posicionan los átomos corresponde a la *menor energía libre de Gibbs "G"*, suponiendo que el material tiene la posibilidad de evolucionar hacia dicho estado, a una temperatura y a una presión determinadas. La energía libre de Gibbs se suele definir como $G = U + PV - TS$, donde U es la *energía interna* del sistema en estudio, P y V representan la presión y volumen respectivamente, T la temperatura y por último S es la *entropía* o grado de desorden del sistema. La minimización de la energía libre de Gibbs del sistema en estudio, en este caso una aleación con una composición y una masa determinadas, a temperatura y presión constantes, es una consecuencia del enunciado más general del segundo principio de la termodinámica. Este último plantea que la entropía del universo (sistema + el medio que interactúa con el sistema) tiende a aumentar y deja de hacerlo al llegar al equilibrio. La ventaja de trabajar con la formulación de Gibbs es el poder desentenderse del medio que está en contacto con el sistema. Expresado más informalmente, podemos decir que el segundo principio de la termodinámica sobre el que mucho se ha escrito, describe una característica de la naturaleza: los procesos que tienen lugar tienden a favorecer la menor energía posible (mínima U) y el mayor desorden (máxima S) que se pueda alcanzar. Por último, podemos decir que un material que no evoluciona más ha llegado a su equilibrio, o está imposibilitado de salir de su estado para dirigirse hacia el equilibrio. Son dos alternativas diferentes y no siempre resulta sencillo distinguir una de otra.

Glosario

Aleación: mezcla de metales, generalmente fabricada a altas temperaturas cuando los elementos constituyentes están en estado líquido. Posee propiedades metálicas y aspecto macroscópico homogéneo.

Composición de una aleación: cantidad de cada especie atómica presente en la aleación. Se puede dar en porcentaje en peso o en porcentaje atómico.

Cristal: sólido con un orden atómico que se repite (periódico).

Aleación monocristalina: en general, una aleación metálica solidifica formando una estructura cristalina periódica, la cual se caracteriza por una forma geométrica determinada, con átomos ubicados en sitios bien definidos que generan una estructura mínima, llamada celda unidad, que se repite por traslación en todas las direcciones. Conocer el volumen de la celda convencional y la ubicación de los átomos en la misma permite caracterizar razonablemente la estructura completa. En un proceso típico de solidificación a partir de la fase líquida, se forman varias regiones del sólido (núcleos) en distintas ubicaciones del líquido y van creciendo a medida que la solidificación avanza. El proceso de solidificación finaliza cuando todas las regiones sólidas en crecimiento se encuentran, uniéndose a través de los llamados bordes de grano. Cada región que fue creciendo independientemente posee en el material totalmente solidificado la misma estructura pero orientada de forma diferente, siendo el material resultante un policristal. Si en el proceso de solidificación se permite que se forme un solo núcleo de fase sólida y crezca nada más que uno, el resultado final es un monocristal, es decir, contaríamos con un solo "edificio" orientado de manera bien definida.

Fase: región del material con propiedades homogéneas.

Austenita o fase austenítica: fase que se obtiene mediante un enfriamiento rápido desde temperaturas altas y que es posible de transformar "martensíticamente" mediante enfriamiento o aplicación de fuerzas mecánicas.

Martensita, fase martensítica o estructura

martensítica: estructura atómica que se forma a partir de una fase austenítica mediante una transformación martensítica.

Transformación martensítica: cambio de estructura en un material sólido que se realiza sin difusión. Se puede provocar mediante cambios en temperatura o por aplicación de fuerzas mecánicas.

Difusión: movimiento de átomos en un material que se desplazan al menos una distancia interatómica.

Lecturas sugeridas

Ashby, M. F y Jones, D.R.H. (1996/1998). *Engineering Materials*. Volúmenes 1 y 2. Oxford: Butterworth Heineman. Texto de uso común en cursos de materiales en carreras de ingeniería, que introduce en diversos capítulos conceptos de difusión, de transformaciones de fases, transformaciones martensíticas, propiedades mecánicas, etc..

Callister, W. D., Rethwisch, D. G. (2010). *Materials Science and Engineering: An Introduction*, Wiley.