

Una introducción a las aleaciones con memoria de forma

Parte II

Enrique López Cuéllar*

ABSTRACT

Shape Memory Alloys (SMA) present a very different behavior from usual materials. These metallic alloys have the remarkable property for recuperate its original shape by simple heating after being «plastically» deformed. Other properties such as superelastic effect, rubber-like effect and a high damping capacity are exhibited in these alloys. For these reasons, SMAs are considered in the new generation materials, as «smart» materials. However they are not well known to the engineering public. The aim of this second part of this paper is to give to the engineering public an introduction to their different thermomechanical properties and their actual applications.

Keywords: SMA, shape memory alloys, smart materials, thermomechanical properties.

INTRODUCCIÓN

Como ya se mencionó en la parte I de este artículo publicada en la edición N° 16,¹ las aleaciones con memoria de forma (AMF) presentan propiedades completamente distintas a las de los materiales usuales como: el efecto memoria de forma, el efecto superelástico, el efecto cauchótico y una capacidad de amortiguamiento elevada. En este artículo se describen los distintos comportamientos termomecánicos que las AMF pueden presentar y se hace mención de los sectores de aplicación actuales. Esta segunda parte del artículo pretende ayudar al lector a comprender de una manera simple los campos de aplicación que estas aleaciones pueden tener (figura 1).

PROPIEDADES TERMOMECAÑICAS DE LAS ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA

Las aleaciones con memoria de forma tienen un comportamiento que depende fuertemente de la temperatura. Por ejemplo, se puede caracterizar a una

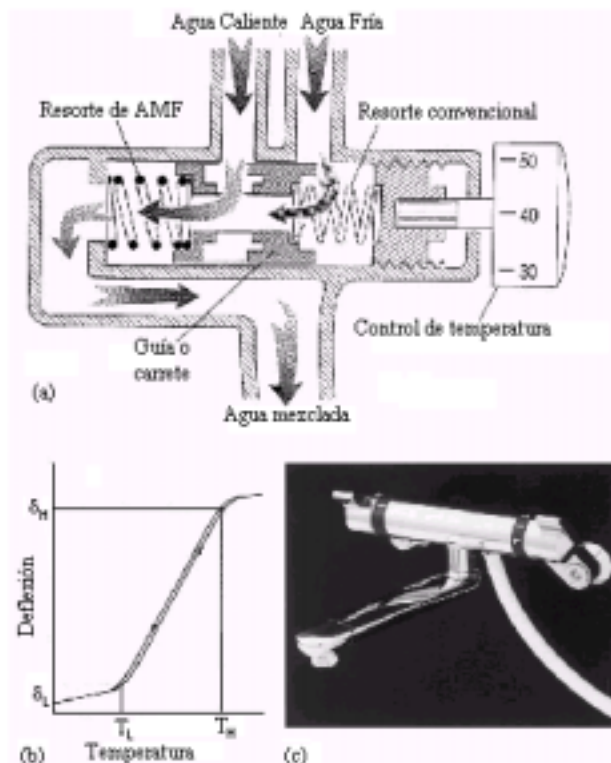


Fig. 1. Válvula mezcladora utilizando resortes de AMF y convencionales. (a) La posición de la guía y la temperatura del agua mezclada se controlan variando la longitud total del activador linealmente, a partir del ajuste de temperatura en la perilla de control. (b) Representación esquemática del comportamiento lineal de la curva característica de temperatura-deflexión de la AMF empleada en la válvula. (c) Aspecto de la válvula. (Imagen a partir de Otsuka² y él, a su vez, de Ohkata H.³).

AMF por su diagrama de estado (σ , T), como el que se mostró en la figura 6 de la parte I. En éste se indica, en función del esfuerzo y la temperatura, si la aleación se encuentra en dominio austenítico, martensítico o bien en una zona de coexistencia de ambas fases. La deformación (ϵ) de la aleación es afectada también

* Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, UANL
E-mail: enlopez_73@yahoo.com.

por la temperatura y el esfuerzo aplicado. Las respuestas obtenidas de $\epsilon(\sigma)$ o $\epsilon(T)$ son completamente distintas según la trayectoria de carga que la aleación sufra en función de la frontera definida por la línea del esfuerzo crítico de transformación, indicada en la figura 6 parte I.⁴ Lo anterior se traduce en diferentes comportamientos termomecánicos que pueden agruparse en cinco clases. Los cuales se explican a continuación.

Efecto Cauchótico

Cuando una AMF es solicitada a una temperatura inferior a M_f como se ilustra en la figura 2, la deformación que se obtiene después de la primera aplicación de un esfuerzo (1→2) es parcialmente reversible cuando el esfuerzo es retirado (2→3). Si nuevamente se aplica un esfuerzo, la deformación esta vez sí es reversible (2↔3). Este comportamiento es llamado efecto cauchótico o en ciertos casos por analogía con supertermoelasticidad es llamado efecto pseudoelástico por reorientación. La recuperación parcial de la forma se debe a un movimiento reversible de las interfaces martensita-martensita, constituidas esencialmente por los contornos de maclas.⁵

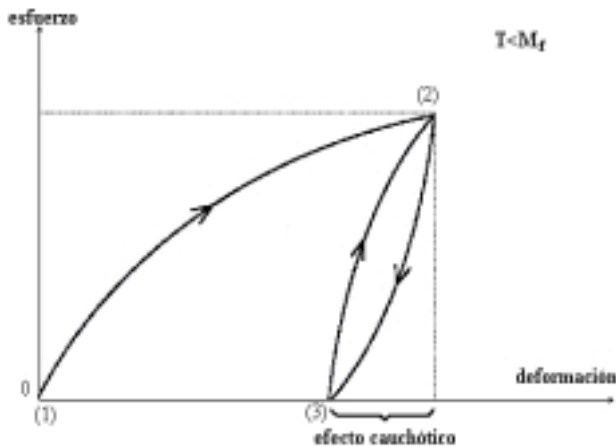


Fig. 2. Esquema esfuerzo-deformación correspondiente al efecto cauchótico.

Efecto Superelástico

Esta propiedad se obtiene cuando se le aplica a una AMF un esfuerzo a una temperatura constante y superior a A_f . En la figura 3 se muestra este comportamiento. La sección AB corresponde solamente a la deformación elástica de la fase austenítica. El punto B corresponde al esfuerzo necesario ($\sigma^{\beta-m}$) para iniciar la introducción de las primeras variantes de martensita. Las variantes introducidas entre B y C, son aquellas a las que el cizallamiento favorece en el sentido del esfuerzo. Se puede observar una deformación importante de aproximadamente 8% ($\epsilon^{\beta-m}$) como máximo. En C la transformación finaliza. La pendiente de la línea BC refleja la facilidad del proceso de transformación completa. Para un monocristal favorablemente orientado, la inclinación es pequeña, en tanto que para un policristal, debido a los problemas de compatibilidad en los límites de grano se obtienen pendientes más grandes. Pero este comportamiento depende también de la dirección del esfuerzo (tensión o compresión) y de la dirección cristalina. El punto D es el límite elástico de la martensita transformada (σ_p), si el esfuerzo aplicado sigue aumentando, la martensita

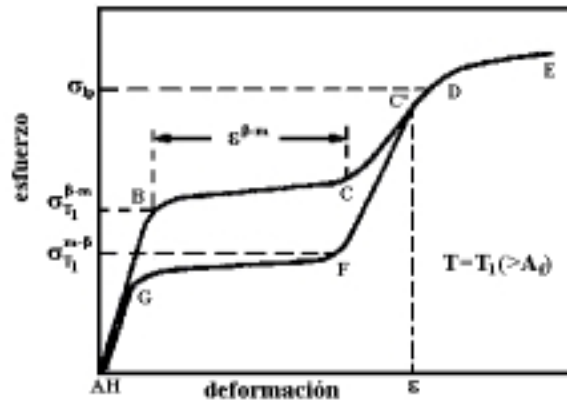


Fig. 3. Representación esquemática de la curva esfuerzo-deformación del comportamiento superelástico.

se deforma plásticamente y posteriormente se produce la fractura en E.⁶

Si el esfuerzo es retirado de la muestra antes del punto D, por ejemplo en el punto C, la muestra recuperará su forma inicial en varias etapas. La sección C'F corresponde a la descarga elástica de la martensita. En F ($\sigma^{m-\beta}$), comienza la transformación inversa martensita-austenita. La fracción de martensita disminuye hasta que la fase austenítica sea completamente restaurada (G). La sección GH representa la descarga elástica de la austenita. La deformación total puede en algunos casos no ser completamente recuperada, sobre todo durante los primeros ciclos de utilización.

Se puede decir entonces, que el efecto superelástico es la traducción macroscópica de la transformación termoelástica inducida por esfuerzo a una temperatura superior a A_f . La verificación de este comportamiento a distintas temperaturas $T > A_f$ permite trazar los diagramas de tipo σ -T, como el ilustrado en la figura 6 de la parte I.³

Efecto memoria de forma de sentido simple (EMSS)

El efecto memoria de forma puede ser definido como el regreso mediante calentamiento a una forma predefinida a alta temperatura a partir de una forma a baja temperatura obtenida por deformación. Lo anterior está detallado en la figura 4. La forma predefinida es la forma en estado austenítico o en alta temperatura (1). Durante un simple enfriamiento hasta el estado martensítico (2) la forma no se modifica, esto se debe al fenómeno de autoacomodamiento. Si se le aplica un esfuerzo a la muestra (3) y después se descarga (4), se produce una deformación permanente. El regreso a la forma inicial se obtiene mediante un simple calentamiento a una $T > A_f$ durante la transformación martensita-austenita (1). Finalmente, si se lleva a cabo otro enfriamiento sin esfuerzo aplicado la forma no cambiará. A lo anterior se le

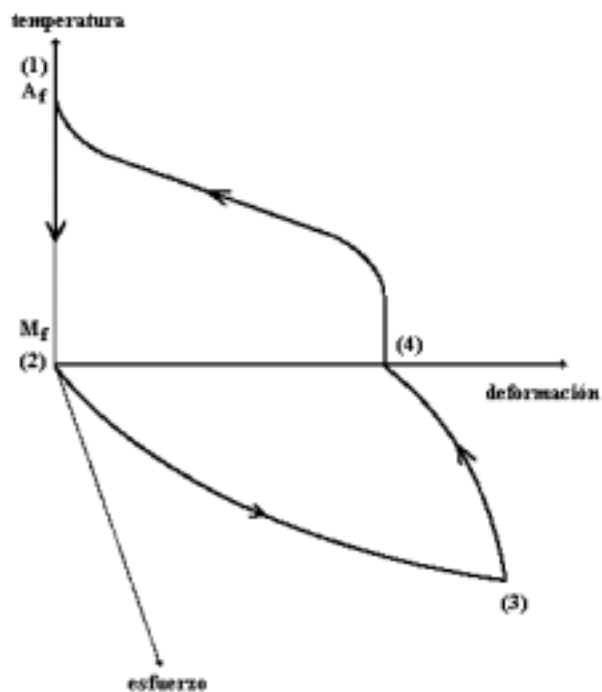


Fig. 4. Esquematización del efecto memoria de forma de sentido simple (EMSS).

conoce como efecto memoria de forma de sentido simple (EMSS).^{5 y 7}

Efecto memoria de forma de doble sentido asistido (EMDSA).

Si el efecto memoria de forma de sentido simple es repetido varias veces y la carga aplicada es mantenida constante durante todo el ciclo de enfriamiento y calentamiento de la muestra, entonces se dice que se ha llevado a cabo el proceso para producir el efecto memoria de forma de doble sentido asistido (EMDSA). La carga aplicada debe de ser lo suficientemente grande para poder estirar la muestra en estado martensítico y debe de ser también limitada para no introducir una deformación plástica que pueda bloquear la transformación.⁸

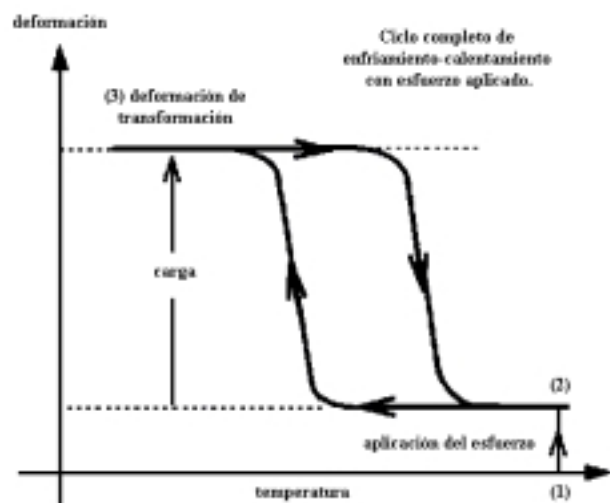


Fig. 5. Esquemática del efecto memoria de forma doble sentido asistido (EMDSA).

La figura 5 muestra la esquematización del EMDSA. Como para el caso del EMSS, la forma predefinida es la forma que se tiene al estado austenítico (1). La aplicación de un esfuerzo inferior al límite elástico de la austenita provoca una pequeña deformación elástica (2). Durante el enfriamiento hasta el estado martensítico (3) la muestra sufre una deformación macroscópica gracias a la aparición de las variantes de martensita mejor orientadas en el sentido del esfuerzo. Si después, la muestra es calentada hasta el estado austenítico ($T > A_p$) se provoca el regreso a la forma inicial durante la transformación inversa (2). Esto es el efecto memoria de forma doble sentido asistido. Con el aumento del esfuerzo aplicado se observa un aumento de las temperaturas de transformación o un desplazamiento de la curva mostrada en la figura 5 hacia su derecha. Este incremento, por lo general, sigue un patrón lineal con respecto al esfuerzo, en donde la pendiente corresponde a la ley de Clausius-Clapeyron modificada.

Efecto memoria de forma de doble sentido (EMDS) o reversible

Las aleaciones con memoria de forma pueden también ser capaces de memorizar una forma en alta temperatura y otra a baja sin necesidad de alguna sollicitación mecánica exterior. Este comportamiento puede ser obtenido mediante diferentes tratamientos termomecánicos especiales llamados de “educación”. Los tratamientos pueden consistir por ejemplo, en repetir ciclos térmicos bajo un esfuerzo constante aplicado, o en repetir ciclos superelástico o bien simplemente en introducir una verdadera deformación plástica en el material. Estos tratamientos permiten la creación de sitios privilegiados (precipitación orientada, dislocaciones) que favorecen la nucleación y el crecimiento espontáneo de variantes orientadas de martensita.

La figura 6 describe este comportamiento de las AMF: el material es fuertemente deformado al estado martensítico (1), esto introduce dislocaciones que van a estabilizar configuraciones de plaquetas de martensita. Durante el calentamiento de la muestra hasta el estado austenítico (2), ya sin esfuerzo aplicado, las variantes desaparecen pero las dislocaciones se quedan. Durante el enfriamiento (3), las dislocaciones favorecen, mediante su campo de esfuerzo, la misma configuración de variantes de martensita orientadas. Esto provoca un cambio en la forma macroscópica entre las fases a alta y baja temperatura y se le llama efecto memoria de forma doble sentido (EMDS). En tanto que las dislocaciones no desaparezcan por algún otro tratamiento, el EMDS aparecerá de manera repetida durante los ciclos térmicos.^{5 y 8}

APLICACIONES DE LAS AMF

Como se ha visto en los 5 puntos anteriores, las AMF poseen propiedades completamente distintas a las de las aleaciones metálicas comunes, además de

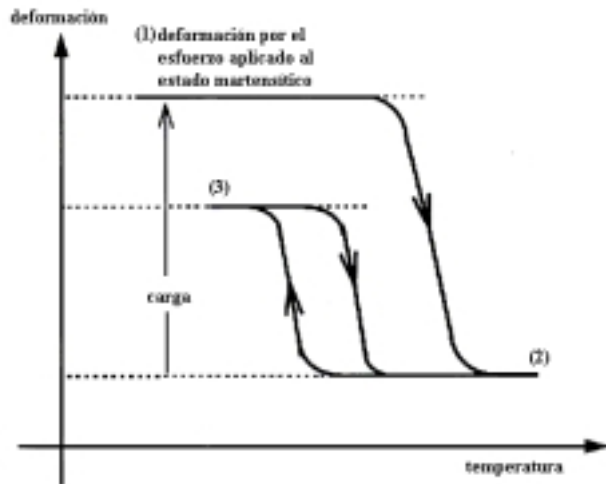


Figura 6. Esquematación del efecto memoria de forma doble sentido (EMDS) después de sufrir una educación mediante deformación.

su capacidad de amortiguamiento. Por esto, las AMF tienen un alto potencial de aplicaciones. Pero su alto costo de fabricación y las bajas temperaturas de transformación o de degradación limitan su campo de aplicación. A pesar de esto, más de 10,000 patentes han sido presentadas en el pasado.¹ Esto hace muy difícil su clasificación. A continuación se hace un esfuerzo en este artículo por agrupar los sectores de aplicación^{7 y 9} existentes de las AMF:

- Conectores
- Activadores Térmicos o Eléctricos
- Productos Superelásticos
- Amortiguadores
- Materiales Inteligentes

Cada sector de aplicación utiliza una propiedad termomecánica distinta, por ejemplo, en el sector de los conectores se utiliza el efecto memoria doble sentido. Siendo este sector el primero en incursionar. Su primera aplicación fue un conector en el sistema hidráulico de los aviones de combate F-14. El mismo efecto ha sido utilizado en los activadores térmicos o

eléctricos, como por ejemplo en las válvulas mezcladoras de agua (figura 1) o en el control de temperatura para el apagado y encendido de freidoras eléctricas o cafeteras. En este mismo sector se utiliza también el EMDSA en ciertas micro-pinzas o en funciones de robótica para realizar algún tipo de trabajo. El sector superelástico ha sido aprovechado en el campo de la medicina como en el alambre guía de catéteres y en los arcos para los frenos utilizados en la ortodoncia. Las antenas en los teléfonos celulares y el armazón en algunos sostenes para damas utilizan esta propiedad. Por último, las AMF son consideradas materiales inteligentes porque cuando son utilizadas como activadores, además de ésta actividad funcionan como sensores. Un ejemplo de aplicación de materiales inteligentes es un material compuesto de pequeñas fibras de Ti-Ni introducidas en una matriz polimérica utilizado para el control de vibraciones en vehículos espaciales ya que la constante elástica de las AMF sufre un importante cambio dentro de los rangos de las temperaturas de transformación.¹

Lo visto anteriormente da una perspectiva general al ingeniero sobre las propiedades que pueden ser explotadas de las AMF y los actuales sectores de aplicación. La investigación científica, el mejoramiento de las propiedades y la búsqueda de nuevas aplicaciones de estas aleaciones han sido constantes en algunos países como Japón, Estados Unidos y Suiza. En general se puede concluir que para que una aplicación de este tipo de aleaciones tenga éxito, además de cumplir con los requisitos de dicha demanda, la ganancia encontrada en la aplicación, ya sea económica o de condiciones de operación, debe amortiguar el costo de la aleación.

RECAPITULACIÓN

En esta segunda parte del artículo se definió cada uno de los cinco comportamientos termomecánicos que presentan las aleaciones con memoria de forma.

Además se presentó una clasificación de los sectores de aplicación de estas aleaciones y se vieron algunos ejemplos de aplicaciones.

REFERENCIAS

1. López Cuellar E. Una introducción a las aleaciones con memoria de forma. *Ingenierías*, Julio-Septiembre 2002, Vol. V, No. 16, p. 5-11.
2. Otsuka, K., Ren, X. Recent developments in the research of shape memory alloys. *Intermetallics* 7, 1999, p. 511-528.
3. Ohkata, H., Tamura H. *MRS Symp. Proc.* 1997, 459, 345.
4. Berveiller M., Patoor E. Comportement thermomécanique des matériaux usuels et des alliages à mémoire de forme. Patoor, E., Berveiller. *Technologie des alliages à mémoire de forme*. Paris: Hermès, 1994. 43-59p. ISBN 2-86601-426-X.
5. Federzoni L. Etude d'un acier inoxydable à mémoire de forme. Thèse d'Etat, INSA de Lyon , Lyon I, 1993, 266p.
6. Krishnan R., Delaey H., Tash., Warlimont H. Thermoplasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations. *Journal of Materials Science* 1974, Vol. 9. p.1536-1544.
7. López-Cuellar Enrique. Fatigue par cyclage thermique sous contrainte de fils à mémoire de forme Ti-Ni-Cu après différents traitements thermomécaniques. Thèse d'Etat, INSA de Lyon , Lyon I, 2002, 180p.
8. De Araujo, C. J. Comportement cyclique de fils en alliage à mémoire de forme Ti-Ni-Cu : analyse electro-thermomécanique, dégradation et fatigue par cyclage thermique sous contrainte. Thèse d'Etat, INSA de Lyon , Lyon I, 1999, 177p.
9. Olier P. Alliages à mémoire de forme : Influence du mode de fabrication, de la teneur en oxygène et de l'ajout de zirconium ou d'hafnium sur les caractéristiques métallurgiques et les propriétés thermomécaniques. Thèse d'Etat, Université de Paris-Sud, U.F.R. Scientifique d'Orsay. 1995, p. 21, 230p.