

Aleaciones con memoria de forma

Shape memory alloys

Estefanía Sepúlveda
Dra (c). Ciencia e Ingeniería de Materiales
Universidad de Santiago de Chile
estefania.sepulveda@usach.cl

Resumen

En los últimos años se ha ido incrementando la investigación sobre aleaciones con memoria de forma en diversas áreas, como biomedicina, ingeniería estructural, informática, automoción, aeroespacial, etc. El creciente interés por estas aleaciones se debe a sus propiedades específicas que permiten el desarrollo de microactuadores, motores, sensores, entre otros productos tecnológicos. Este artículo busca explicar el mecanismo del efecto de memoria de forma, sus propiedades, aplicaciones y potencial para el futuro.

Palabras Clave: Aleaciones con memoria; Martensita; Sensores; Fases.

Abstract

In recent years, there has been increasing research on shape memory alloys in various areas, such as biomedicine, structural engineering, computer science, automotive industry, aerospace, etc. The growing interest in these alloys is due to their specific properties that allow the development of microactuators, motors, sensors, among other technological products. This paper seeks to explain the mechanism of the shape memory effect, its properties, applications, and potential for the future.

Keywords: Memory alloys; Martensite; Sensor; Phases.

Introducción

Las aleaciones con memoria de forma (AMF) se descubrieron en el año 1932 por Arne Ölander (Ölander, 1932), no obstante, no fue hasta 30 años más tarde con el descubrimiento del nitinol (NiTi) por William Buehler (Buehler *et al.*, 1963) y Frederick Wangdel (Kauffman & Mayo, 1997), en donde fue reconocido el potencial de las AMF en aplicaciones técnicas y en ingeniería. Las aleaciones con memoria de forma se destacan entre otros materiales por tener la capacidad de cambiar su estructura y propiedades respecto a un cambio de temperatura o campos de tensión aplicados, lo que ha generado una alternativa a soluciones de distintas ramas como son la biomédica, ingeniería de estructuras, informática, industria aeronáutica, automovilística, aeroespacial. En un estudio realizado por la BCC (McWilliams, 2011), el mercado mundial de materiales inteligentes ascendió a unos 26 billones de dólares el 2014 y se espera que para el año 2025 supere los 98.2 billones de dólares, mientras que la aplicación del mercado con mayor demanda son los actuadores y motores, con unas ventas de casi 10.8 billones de dólares el 2010 y un 55% aproximadamente del mercado de AMF. El principio básico de las AMF se observa en la Figura N° 1.

Ahora bien, el aumento en la producción e investigaciones de las AMF no es únicamente por su capacidad de efecto de memoria, si no a otras propiedades como el efecto superelástico, tener una trayectoria de recuperación limitada, el efecto de doble memoria de forma asistido por tensiones aplicadas, histéresis, entre otras (Jani *et al.*, 2014).

Mecanismo del efecto de memoria de forma

Transformación martensítica

El mecanismo de las AMF está relacionado con la transformación martensítica. La transformación martensítica fue descubierta en el acero en los años 1890's por Adolf Martens (Czichos, 1989), sin embargo, la transformación martensítica, tal como se observa en el sistema Fe-C, se estableció como un proceso irreversible. En el año 1949 Kurdjumov y Khandros (1949), desarrollaron el concepto de transformación martensítica termo elástica en aleaciones de CuZn y CuAl, que explica la transformación reversible de la martensita.

La transformación martensítica para cualquier aleación se puede definir como un mecanismo no difusivo donde las fases madre llamada austenita (fase a

alta temperatura) y el producto llamada martensita (fase a baja temperatura) tienen la misma composición. La falta de difusión es reemplazada por el movimiento de los átomos en forma cooperativa. Si analizamos la Figura N° 2, energía libre en función a la temperatura, observamos que a alta temperatura la austenita es más estable que la martensita y al disminuir la temperatura por debajo de T_E podemos observar que la martensita es estable. A la temperatura T_E ambas fases tienen la misma energía libre y en equilibrio termodinámico. Si deseamos generar martensita, será necesario bajar la temperatura por debajo de T_E , esto es debido a que por debajo de esta temperatura existe la fuerza motriz suficiente para la nucleación de la martensita. La transformación sin difusión entrega un producto con relieve en la superficie y la presencia de muchas imperfecciones de la red.

Como se mencionó anteriormente, la transformación martensítica fue descrita por primera vez en el sistema Fe-C. No obstante, hay ciertas características de esta transformación en particular que pueden entenderse como intrínsecas de la transformación que no ocurren en la transformación martensítica de otras aleaciones. Por ejemplo, la alta dureza, la rapidez de transformación, esto es debido a que el

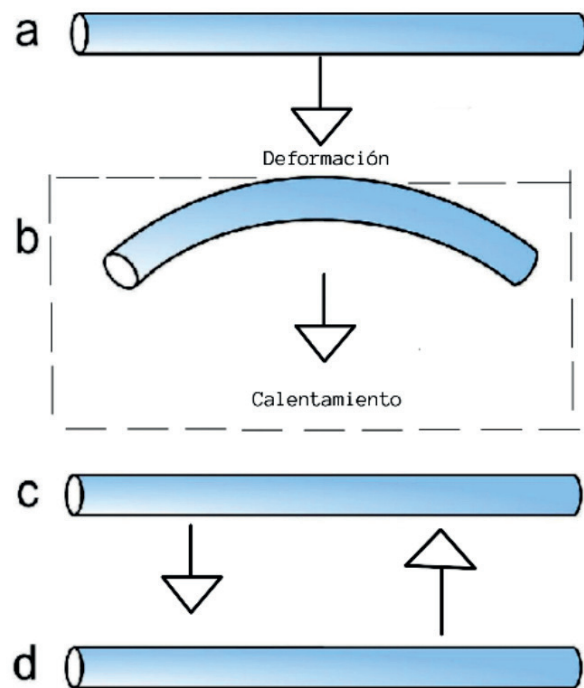


Figura N° 1. Principio de efecto memoria de forma.

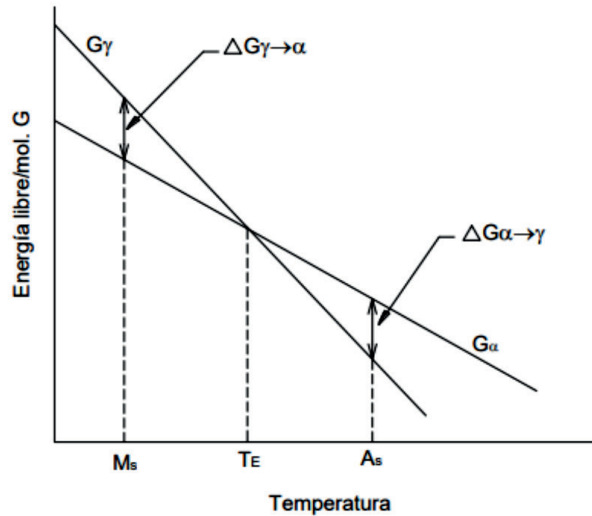


Figura N° 2. Energía libre versus temperatura de la transformación martensítica (Lagoudas, 2008).

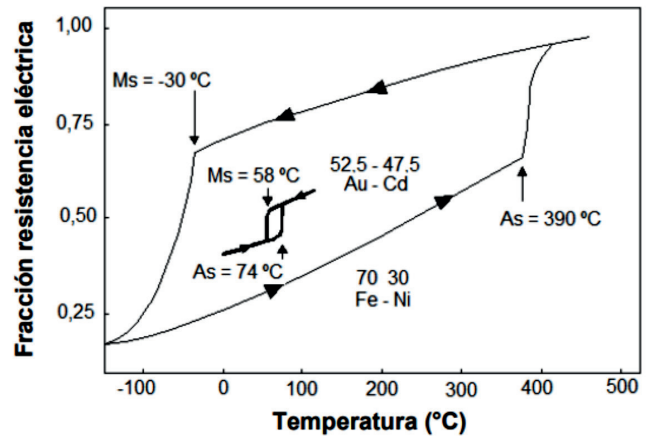


Figura N° 3. Cambio en la resistencia eléctrica durante el calentamiento y enfriamiento en las aleaciones Fe-Ni y Au-Cd (Torres-López *et al.*, 2011).

crecimiento en algunas aleaciones es tan lento que el proceso puede ser seguido con un microscopio; la existencia de un plano de hábito y una relación de orientación ya que no es una consecuencia de la transformación martensítica; en algunos precipitados que definitivamente no se clasifican como martensita también tienen esas características (Nishiyama, 2012).

Martensita termoelástica

Las transformaciones martensíticas termoelásticas han recibido una atención considerable en los últimos años porque el carácter termoelástico del crecimiento y la reversión de la fase martensita es generalmente reconocido como responsable de las interesantes características mecánicas de la pseudoelasticidad y el efecto de memoria de forma. El comportamiento termoelástico es una condición de equilibrio local entre las fuerzas químicas y elásticas (Salzbrenner y Cohen, 1979). Las fuerzas elásticas tienen el origen en dos contribuciones diferentes. La primera es la necesidad de adaptarse a los cambios de volumen y forma de la transformación. Si la acomodación es de forma elástica, la energía elástica asociada se almacena en la aleación durante la transformación de austenita a martensita, y se recupera reversiblemente durante la transformación inversa. Por lo tanto, esta contribución se opone a la transformación (desde austenita a martensita) y fa-

vorece la transformación inversa (desde martensita a austenita). La segunda contribución es la energía disipada en la muestra como trabajo interno durante la transformación. Esta contribución representa la parte irreversible de las energías no químicas y es responsable de la histéresis térmica observada en muchas transformaciones termoelásticas.

En la Figura N° 3 se presentan una transformación martensítica termoelástica correspondiente a la aleación de 70%Fe-30%Ni (lazo externo) y una transformación martensítica no termoelástica correspondiente a la aleación 53,5%Au- 47,5%Cd (lazo interno) (Torres-López *et al.*, 2011). La característica principal de la existencia de la termoelasticidad dentro de una aleación es que la diferencia de volumen entre las dos fases debe ser pequeña, de lo contrario, existirán dislocaciones de ajuste que compactarán la martensita (Mannheim, 1987).

Reversibilidad: Mecanismo del efecto memoria de forma.

En aquellas aleaciones que tengan un gran cambio de volumen en su transformación martensítica, la estabilidad de la transformación martensítica se realiza en conjunto con dislocaciones de ajuste y no ocurre la reversibilidad de la transformación, ya que al aumentar la temperatura, la martensita se transforma por difusión a fases más estables. En las

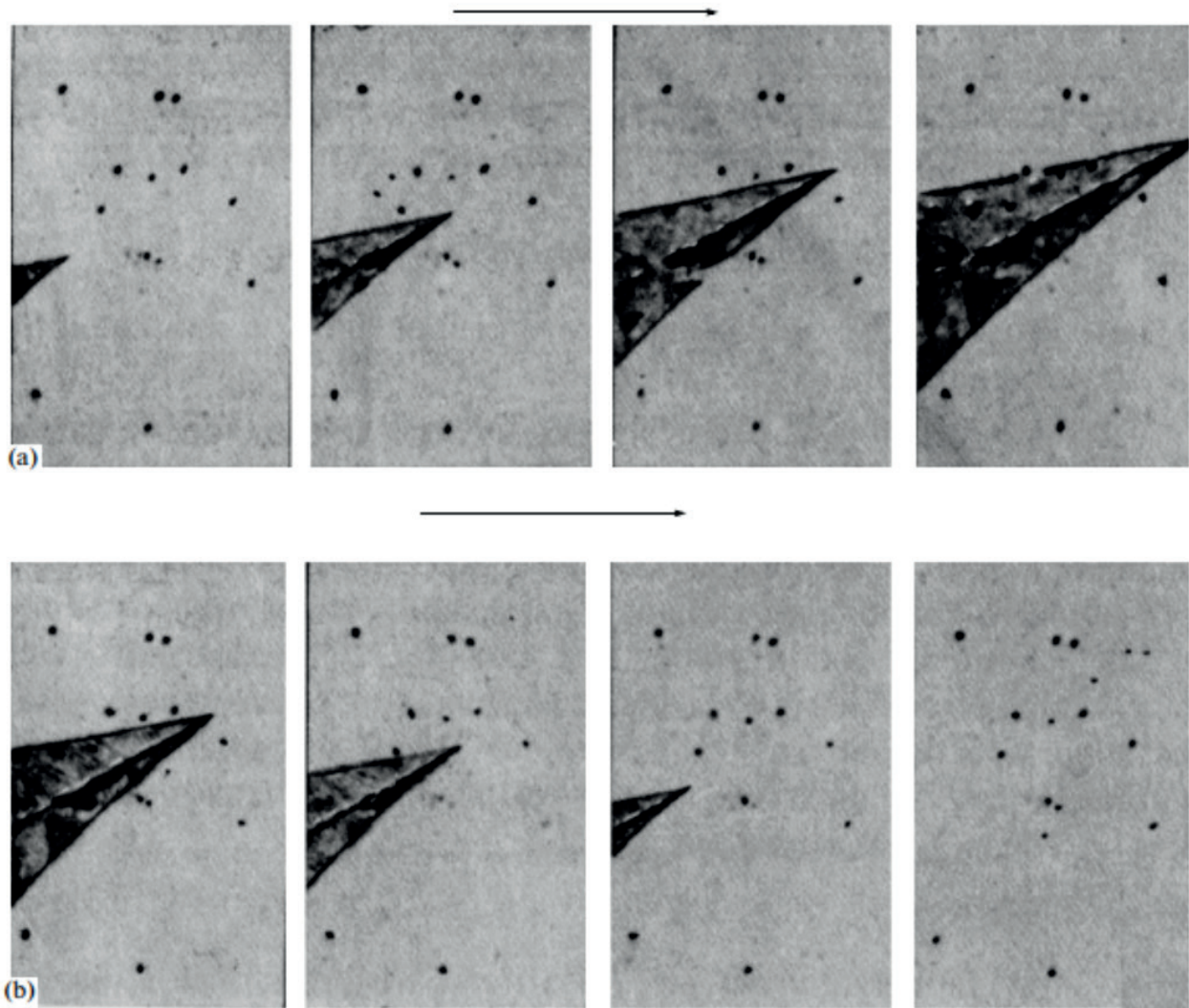


Figura N° 4. (a) Aumento y (b) disminución del tamaño de los cristales de martensita termoelástica en aleaciones de Cu-Al-Ni al enfriar y calentar (Lobodyuk *et al.*, 2011).

transformaciones reversibles, los mismos núcleos se activan siempre; además, en las martensitas termoelásticas, la acomodación de las placas en la matriz es elástica, evitando el anclaje de las dislocaciones, dando vía libre a su desplazamiento tanto en avance como en retroceso, originando el efecto reversible de la transformación (Torres-López *et al.*, 2011). En la Figura N° 4 se observa en la parte (a) el crecimiento de una placa de martensita en una aleación de Cu-Al-Ni, mientras que en la parte (b) el retroceso de la transformación (Lobodyuk *et al.*, 2011).

En resumen, para que una aleación tenga memoria de forma necesita cumplir tres condiciones: sufrir transformación martensítica, el cambio volumétrico entre las dos fases debe ser pequeña y la estructura debe ser ordenada (Mannheim, 1987).

Aplicaciones de las aleaciones con memoria de forma.

Las propiedades de las aleaciones con memoria de forma (Tabla N° 1) a permitido lograr utilizarlas en diversos campos como: Micro actuadores, sistemas microelectromecánicos, robótica, biomédica, aplicaciones industriales, aeroespacial, automovilística, etc (Jani *et al.*, 2014).

En el estudio de la BCC (McWilliams, 2011) se determinó que la mayor aplicación segmento del mercado son los actuadores y motores con casi un 55% del margen total de productos de AMF. Se dará a forma de ejemplo el uso de AMF en la industria automovilística, aeroespacial y biomédica.

Característica de AMF	Consecuencias practicas
Efecto de memoria de forma	El material se puede utilizar como actuador, proporcionando fuerza durante la recuperación de la forma.
Pseudoelasticidad	El material se puede sufrir grandes deformaciones recuperables a niveles de tensión relativamente constantes
Histéresis	Permite la disipación de energía durante la respuesta pseudoelástica.
Alto esfuerzo de actuación (400 a 700 MPa)	Las secciones transversales de componentes pequeños pueden proporcionar fuerzas sustanciales
Alta deformacion de actuación (aprox. 8%)	Las longitudes de componentes pequeñas pueden proporcionar grandes desplazamientos
Alta densidad de energía (aprox. 1200 J / kg)	Se requiere una pequeña cantidad de material para proporcionar un trabajo de actuación sustancial
Actuación tridimensional	Componentes policristalinos de SMA fabricados en una variedad de formas, proporcionando una variedad de configuraciones geométricas útiles
Frecuencia de actuación	La dificultad para lograr altas tasas de enfriamiento de los componentes limita el uso en aplicaciones de alta frecuencia
Eficiencia energética (10-15%)	La cantidad de energía térmica requerida para la actuación es mucho mayor que la producción de trabajo mecánico

Tabla N° 1. Propiedades de las aleaciones con memoria de forma (Jani *et al.*, 2014).

Industria automovilística: En los vehículos modernos, el número de sensores y actuadores está aumentando enormemente debido a la demanda de vehículos más seguros, más cómodos y con mejor rendimiento. En la Figura N° 5 se muestra las principales aplicaciones de las AMF en un automóvil. La mayoría de los componentes seleccionados funcionan ocasionalmente como actuadores lineales (por ejemplo, espejo retrovisor plegable, ajuste de las aletas de control de clima y controles de bloqueo / pestillo) y como actuadores térmicos activos (por ejemplo, control de temperatura del motor, carburación y lubricación del motor y embragues del tren de potencia) (Jani *et al.*, 2014).

Industria aeroespacial: Desde el éxito del acoplamiento AMF para líneas hidráulicas en los aviones de combate F-14 en la década de 1970 (Hartl & Lagoudas, 2007), las propiedades únicas de los AMF han despertado un mayor interés en las aplicaciones aeroespaciales que están sujetas a alta dinámica cargas y limitaciones de espacio geométrico. Algunos ejemplos de estas aplicaciones son actuadores, conectores estructurales, amortiguadores de vibraciones, selladores, mecanismos de liberación o despliegue estructuras inflables manipuladores (Jani *et al.*, 2014; Costanza y Tata, 2020). En la Figura N° 6 se puede observar las principales aplicaciones de las AMF en un avión. Dentro de las investigaciones más recien-

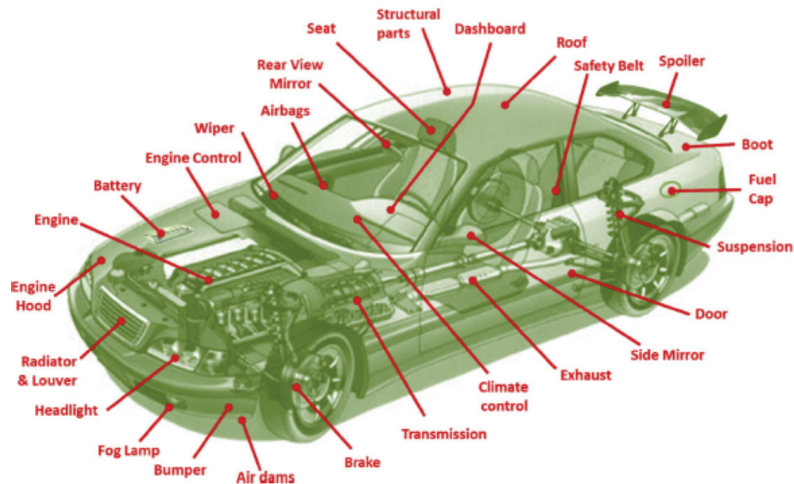


Figura N° 5. Principales aplicaciones en un automóvil de AMF (Jani *et al.*, 2014).

tes apuntan a aplicaciones de amortiguación de vibraciones y aislantes; mientras que dentro de las aplicaciones recientemente patentadas se encuentran sistema de alas telescópicas (Knowles y Bird, 2004), la modificación de la envergadura del ala (Manzo *et al.*, 2005), entre otras (Jani *et al.*, 2014).

Biomédica: El descubrimiento del nitinol inició la fabricación de productos biomédicos. En primera instancia; el nitinol se propuso ser utilizado para implantes de odontología. Posteriormente se desa-

rollaron los brackets superelásticos fabricados con nitinol en el año 1971 (Kauffman y Mayo, 1997). Las AMF se hicieron aún más relevante en la biomedicina tras aplicarse en la cirugía mínimamente invasiva (Song, 2010). Actualmente sus aplicaciones son extensas, como se puede observar en la Figura N° 7, y es un campo de investigación atractivo, debido a que el estudio de la biocompatibilidad, el lograr comprender el comportamiento de AMF y mejorar los diseños de las aplicaciones biomédicas es fundamental para avanzar en la medicina.

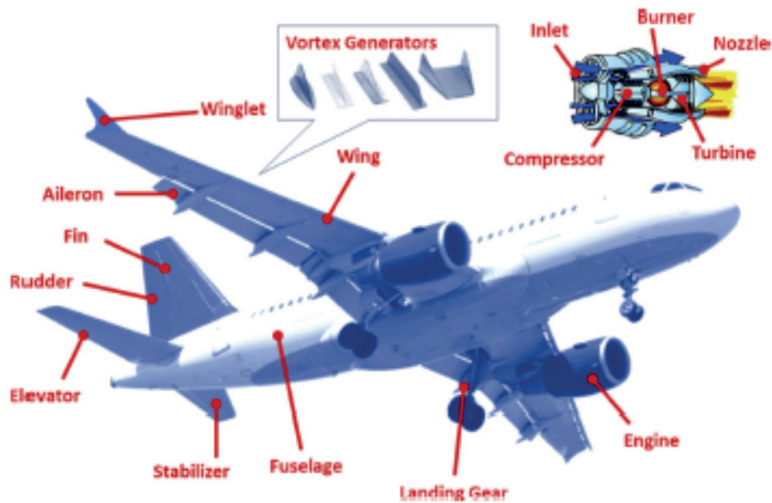


Figura N° 6. Principales aplicaciones de AMF en un avión (Jani *et al.*, 2014).

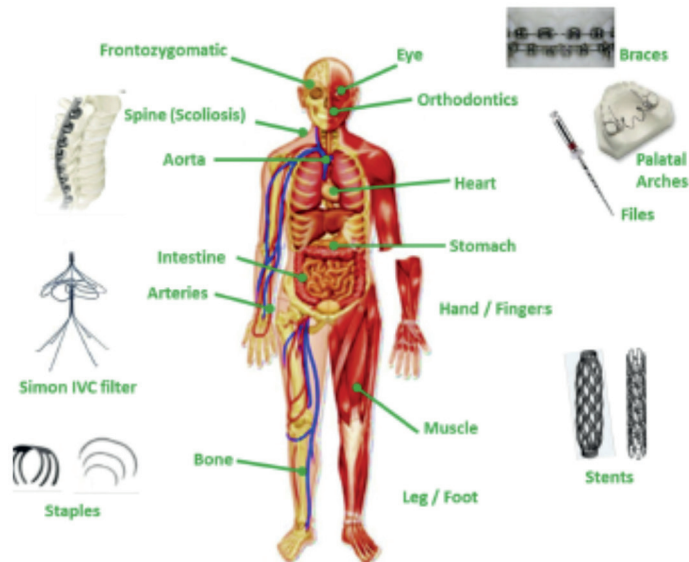


Figura N° 7. Principales aplicaciones de AMF en el campo de la biomedicina (Jani *et al.*, 2011).

Conclusiones

- a. Las aleaciones con memoria de forma han sido un gran avance en tecnologías y aplicaciones industriales, biomedicina, informática, entre otras áreas.
- b. Es relevante considerar los parámetros de diseño como lo son: el rango de temperatura el cual se utilizará el producto, velocidad y fuerza de deformación, forma, tamaño, material, posición, resistencia, entre otros.
- c. Este tipo de aleaciones aún son muy estudiadas.

Se pueden identificar futuros desarrollos para la aplicación de las aleaciones con memoria de forma como:

- i. Desarrollo de nuevos materiales híbridos
- ii. Desarrollo de sistemas de actuadores integrados
- iii. Desarrollo de modelos computacionales robustos que permitan predecir el comportamiento (durabilidad y estabilidad) de las aleaciones con memoria de forma.

Referencias

- Buehler WJ, Gilfrich JV, Wiley RC. 1963. Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi. *J Appl Phys* 34: 1475. <https://doi.org/10.1063/1.1729603>
- Costanza G, Tata ME. 2020. Shape memory alloys for aerospace, recent developments, and new applications: A short review. *Materials* 13: 1856. <https://doi.org/10.3390/MA13081856>
- Czichos H. 1989. Adolf Martens and the research on martensite. *ESOMAT* 1989: 3-14. <https://doi.org/10.1051/esomat/198901001>
- Hartl DJ, Lagoudas DC. 2007. Aerospace applications of shape memory alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 221. <https://doi.org/10.1243/09544100JAERO211>
- Jani JM, Leary M, Subic A, Gibson MA. 2014. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials Design* 56: 1078-1113. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084>

Kauffman GB, Mayo I. 1997. The story of nitinol: the serendipitous discovery of the memory metal and its applications. *Chem Educ* 2: 1-21. <https://doi.org/10.1007/s00897970111a>

Knowles G, Bird RW. 2004. Telescopic wing system. US Patent 6834835B1.

Kurdyumov G, Khandros L. 1949. On thermoelastic equilibrium under martensitic transformations. *Doklady Akademii Nauk SSSR* 66: 211-214.

Lagoudas DC. 2008. *Shape memory Alloys: modeling and engineering applications*. Springer, Germany, 2008.

Lobodyuk VA, Koval YN, Pushin VG. 2011. Crystal-structural features of pretransition phenomena and thermoelastic martensitic transformations in alloys of nonferrous metals. *Physics of Metals and Metallography* 111: 165-189. <https://doi.org/10.1134/S0031918X11010212>

Manzo J, Garcia E, Wickenheiser A, Horner GC. 2005. Design of a shape-memory alloy actuated macro-scale morphing aircraft mechanism. *Smart Structures and Materials 2005: Smart Structures and Integrated Systems* 5764. <https://doi.org/10.1117/12.601372>

McWilliams A. 2011. *Smart materials and their applications: technologies and global markets*. BCC Research, USA.

Nishiyama Z. 2012. *Martensitic transformation*. Elsevier, The Netherlands.

Ölander A. 1932. An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys. *J Am Chem Soc* 54: 3819-3833. <https://doi.org/10.1021/ja01349a004>

Ortín J, Planes A. 1988. Thermodynamic analysis of thermal measurements in thermoelastic martensitic transformations. *Acta Metallurgica* 36: 1873-1889. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(88\)90291-X](https://doi.org/10.1016/0001-6160(88)90291-X)

Salzbrenner RJ, Cohen M. 1979. On the thermodynamics of thermoelastic martensitic transformations. *Acta Metallurgica* 27: 739-748. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(79\)90107-X](https://doi.org/10.1016/0001-6160(79)90107-X)

Song C. 2010. History and current situation of shape memory alloys devices for minimally invasive surgery. *The Open Medical Devices Journal* 2: 24-31.

Torres-López EA, Arbeláez-Toro JJ, Hincapié-Zuluaga DA. 2011. Aspectos generales acerca de la transformación martensítica. *Tecnológicas* 31: 159-171. <https://doi.org/10.22430/22565337.114>

Mannheim R. 1987. Aleaciones con memoria. *Remetallica* 7: 55-61.