



Facultat de Ciències

**Universitat de les
Illes Balears**

Memòria del Treball de Fi de Grau

SELECCIÓN DE UNA ALEACIÓN CON MEMORIA DE FORMA PARA UNA APLICACIÓN EN EL CAMPO DE LA AUTOMOCIÓN

Francisco José Tejada Magraner

Grau de Física

Any acadèmic 2016-17

Treball tutelat per María Concepción Seguí Palmer
Departament de Física

S'autoritza la Universitat a incloure aquest treball en el Repositori Institucional per a la seva consulta en accés obert i difusió en línia, amb finalitats exclusivament acadèmiques i d'investigació	Autor		Tutor	
	Sí	No	Sí	No
	X		X	

Paraules clau del treball:

Aleación, memoria de forma, temperatura, material, automoción.

Índice

1. Objetivo.....	pag.1
2. Introducción teórica.....	pag.1-2
2.1. La transformación martensítica.....	pag.2-7
2.2. Aleaciones con memoria de forma como aplicación en la automoción.....	pag.7-8
3. Aplicación.....	pag.8
3.1. Inyector.....	pag.8
3.1.1. Tipos de inyector.....	pag.9-10
3.1.2. Medición del tiempo de inyección.....	pag.10-11
4. Diseño y funcionamiento.....	pag.11-12
4.1. Descripción.....	pag.12-14
5. Condiciones de trabajo.....	pag.14-18
6. Selección de la aleación con memoria de forma.....	pag.18-21
6.1. Comparativa de las propiedades entre NiTi y aleaciones con base Cu.....	pag.21
6.2. Comparativa de las propiedades necesarias para la aplicación y las de NiTi y aleaciones con base Cu.....	pag.22
7. Conclusión.....	pag.22
8. Bibliografía.....	pag.22-23

1. Objetivo:

Seleccionar una aleación con memoria de forma la cual se utilizará para una aplicación en el campo de la automoción. La selección de la aleación se hará en base a las condiciones de trabajo que debe soportar la aleación seleccionada.

2. Introducción teórica:

Los materiales activos son materiales que ofrecen una respuesta mecánica cuando se les aplica un campo no mecánico (en general). La respuesta mecánica de estos materiales suele ser de uno o dos órdenes de magnitud superior a la respuesta resultante de un material convencional. Algunos ejemplos de materiales activos son los llamados piezoeléctricos, piezomagnéticos y materiales con memoria de forma. (Kumar & Lagoudas,2008)

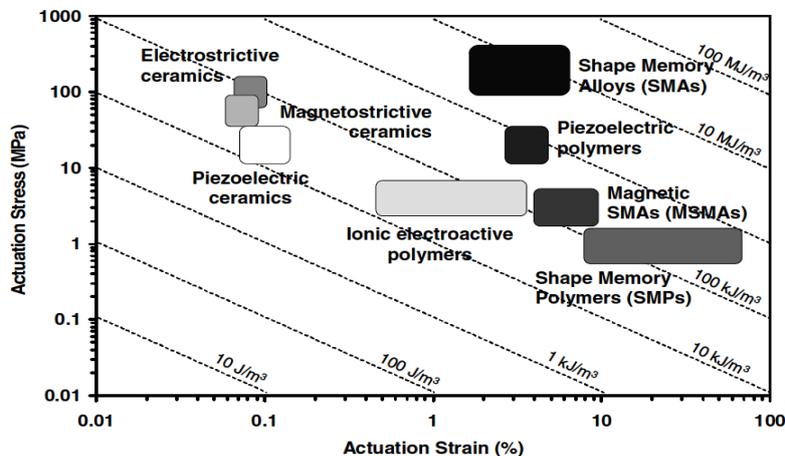


Figura 2.1. Diagrama en el que se indican los rangos típicos de densidad de energía, esfuerzo de actuación y deformación de actuación para diferentes materiales activos. (Kumar & Lagoudas,2008)

El material activo ideal es aquel que tiene alta densidad de energía de actuación y alta frecuencia de actuación.

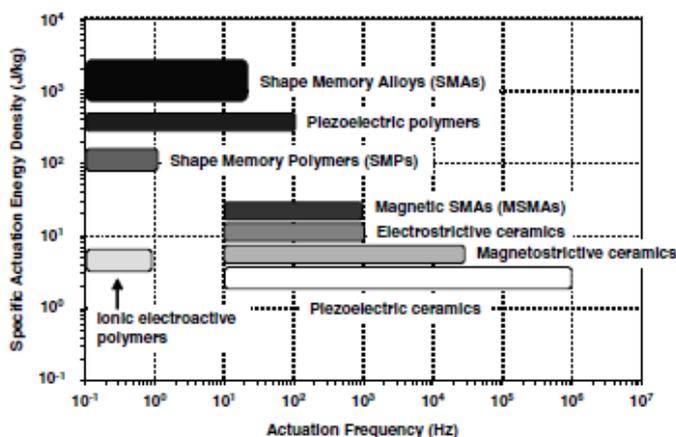


Figura 2.2. Diagrama en el que aparece la frecuencia de actuación y la densidad de energía de diferentes materiales activos. (Kumar & Lagoudas,2008)

En este trabajo nos centraremos en un tipo de materiales activos que son los denominados aleaciones con memoria de forma (SMA).

Las aleaciones con memoria de forma son aleaciones metálicas que, después de una deformación aparentemente plástica, vuelven a su forma original tras un calentamiento. Los mismos materiales, dentro de un determinado rango de temperaturas, pueden ser deformados hasta casi un 10% volviendo a recuperar su forma original al ser descargados. Estos inusuales efectos son llamados memoria de forma térmica (o efecto de memoria de forma) y memoria de forma elástica (o superelasticidad) respectivamente. Ambos efectos son debidos a un cambio de fase llamada transformación martensítica termoelástica. Las aplicaciones potenciales de estos dos principales comportamientos son enormes, pudiendo ser para generar fuerza o movimiento (mediante el efecto de memoria de forma) o almacenar energía (superelasticidad).

Una vez deformada a bajas temperaturas, estos materiales permanecerán deformados hasta que sean calentados, entonces volverán espontáneamente a la forma original que tenían antes de la deformación.

2.1 La Transformación Martensítica:

2.1.1 Martensita: perspectiva microscópica

Las transformaciones de estado de los sólidos son de dos tipos: de difusión y de desplazamiento. Las transformaciones por difusión son aquellas en las que solo se puede formar una nueva fase moviendo átomos a distancias relativamente grandes. Se requiere un amplio rango de difusión porque la nueva fase es de diferente composición química que la matriz de la que se forma. Dado que se requiere una migración atómica, la evolución de este tipo de transformación depende del tiempo y la temperatura. Sin embargo, las transformaciones por desplazamiento no requieren un amplio rango de movimientos y en este caso los átomos se reordenan para llegar a una nueva estructura cristalina más estable pero sin cambiar la naturaleza química de la matriz. Dado que no es necesario una migración atómica, estas transformaciones por desplazamiento generalmente son independientes del tiempo y el movimiento de la interfase entre las dos fases puede ser rápido, estando limitado solo por la velocidad del sonido. Se suelen llamar transformaciones atérmicas, dado que la cantidad de nueva fase creada depende solamente de la temperatura y no del tiempo a esa temperatura. Las transformaciones martensíticas (fase de baja temperatura) son generalmente de este segundo tipo, y se producen enfriando desde una fase a alta temperatura llamada fase austenita. Son, además, transformaciones sin la difusión, que se produce de modo instantáneo y manteniendo una relación de orientación entre la fase austenita y la martensítica. Son transformaciones de primer orden en el sentido de que se libera calor en su formación, hay una histéresis asociada a esa transformación y hay un rango de temperatura en el que coexisten austenita y martensita.

Resumiendo, podemos ver que la martensita se forma enfriando, con una fracción de volumen de martensita aumentando a medida que la temperatura se va reduciendo pero independiente del tiempo y heredando la composición y la ordenación atómica de la fase austenita (debido a la ausencia de difusión).

Desde el punto de vista cristalográfico, la transformación de austenita a martensita puede explicarse separada en dos partes: deformación de la red cristalina y cizalladura invariante de la red y, aunque cristalográficamente este proceso es más complicado, podemos hacer una aproximación cualitativa en dos dimensiones bastante simple: la primera parte, deformación de la red cristalina, consiste en todos los movimientos atómicos necesarios para producir la nueva estructura a partir de la antigua. (Jani & Leary, *et al.*, 2014)

La segunda parte de la transformación martensítica, cizalladura invariante de la red, es un paso de acomodación: la estructura martensítica producida por el paso anterior es de diferente forma que la austenita circundante.

Tanto la forma de la nueva fase, como la austenita circundante, deben ser alteradas para acomodarse a una nueva estructura. Hay dos mecanismos generales por los cuales esto puede pasar: por deslizamiento o por maclado. El deslizamiento es un proceso permanente y es un mecanismo común en la mayoría de martensitas. El maclado es incapaz de acomodar cambios de volumen (debería ser necesario) pero puede acomodar cambios de formas en un modo reversible. Para que la memoria de forma ocurra de un modo significativo, se requiere que la acomodación sea completamente reversible, en otras palabras, el maclado debe ser el proceso de acomodación predominante.

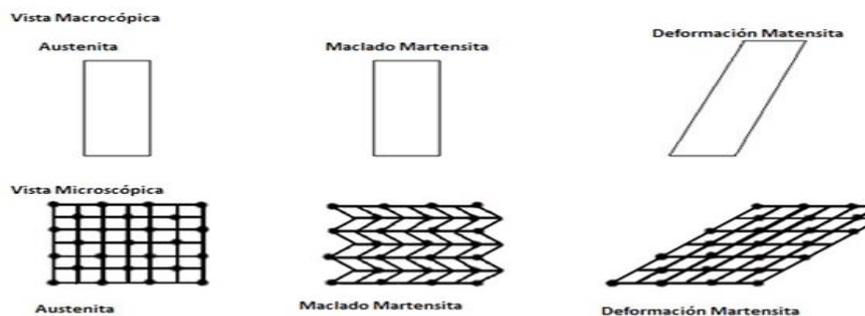


Figura 2.1.1. Vistas macroscópica y microscópica de las fases austenita y martensita por maclado.

2.1.2 Martensita: perspectiva macroscópica

Desde un punto de vista macroscópico, prácticamente todas las propiedades físicas de la austenita y martensita son diferentes, y por ello a medida que atravesamos el punto de transformación mediante una variación de las temperaturas, aparecen una gran variedad de cambios en las propiedades significativas.

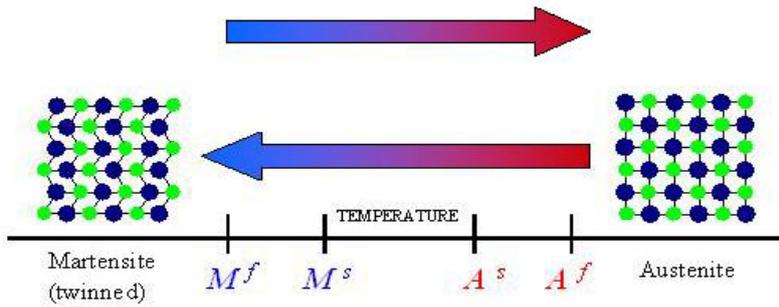


Figura 2.1.2.1. Temperaturas de inicio y final de las fases austenita y martensita.

Las temperaturas que se indican en el gráfico se refieren a las temperaturas a las cuales la transformación martensítica comienza y acaba, y la temperatura a la cual la transformación inversa empieza y termina. No existe, pues, una determinada temperatura, sino un rango de temperaturas en el que se produce la transformación, denominadas Temperaturas características o Temperaturas de transformación, fundamentales en la caracterización de estas aleaciones. En el proceso de enfriamiento, la primera de esas temperaturas es la Temperatura de inicio de la Transformación Martensítica (M_s), a partir de la cual se empieza a formar martensita por temperatura. Esta transformación termina a medida que decrece la temperatura a una temperatura cercana a M_f o Temperatura final de la Transformación Martensítica. El siguiente conjunto de temperaturas características de transformación es la Temperatura de inicio de la transformación austenítica y la final de austenita, A_s y A_f respectivamente. La formación de la fase austenítica comienza a medida que la aleación en el proceso de calentamiento, alcanza la temperatura A_s . Se comienza a formar entonces una estructura cristalina cúbica centrada en las caras, rígida y dura, que se termina de formar alrededor de A_f . Cuando el elemento se calienta más allá de A_f , la deformación se recupera completamente obteniendo el efecto memoria de forma.

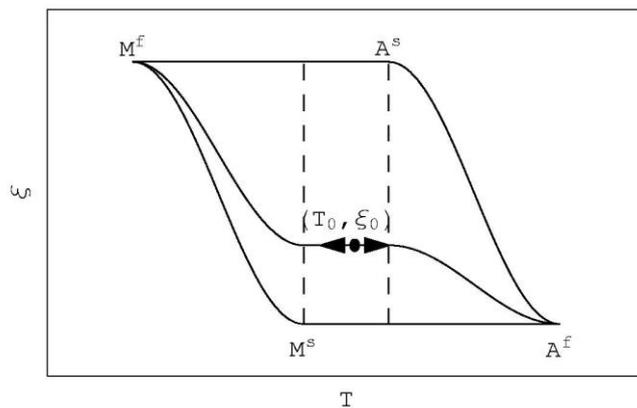


Figura 2.1.2.2. Curva de histéresis de la transformación termo elástica martensítica. ξ denota la fracción de martensita en el material. ξ_0 y T_0 indican las condiciones iniciales. Esto representa la condición de que el material contenga parte de martensita (ξ_0) y parte de austenita ($1 - \xi_0$) a una temperatura T_0 .

De esta figura se puede observar que los procesos de transformación de austenita a martensita y viceversa siguen diferentes caminos como consecuencia de la histéresis de la transformación. Microscópicamente, esta histéresis se puede asociar al rozamiento debido al movimiento de las fronteras relativas de maclado de la martensita y se suele caracterizar por el ancho de histéresis o diferencia entre el pico de martensita y el pico de austenita.

Se define pico de austenita (A_p) y de martensita (M_p) como aquella temperatura donde el 50% del material ya ha transformado. La magnitud de la histéresis depende de la aleación, pero son típicos los rangos de valores entre 10-40°C para materiales con memoria de forma.

Existen muchas propiedades de las SMA que varían con la transformación martensítica, pero una de las que cambia de modo más significativo es el límite elástico. La estructura martensítica puede deformarse moviendo fronteras de maclado, que son bastante móviles. Por ello, el límite elástico es mucho más bajo que el de la austenita, que debe deformarse por generación de dislocaciones y movimiento. Sólo una cierta cantidad de deformación martensítica puede ser acomodada por este proceso de movimiento de maclado y, una vez excedido, el material se deformara de nuevo elásticamente y, eventualmente, cederá por segunda vez, esta vez de modo irreversible (movimiento de dislocaciones).

2.1.3 El origen de la memoria de forma

El concepto geométrico del Efecto de memoria de forma se resume esquemáticamente en la siguiente figura:

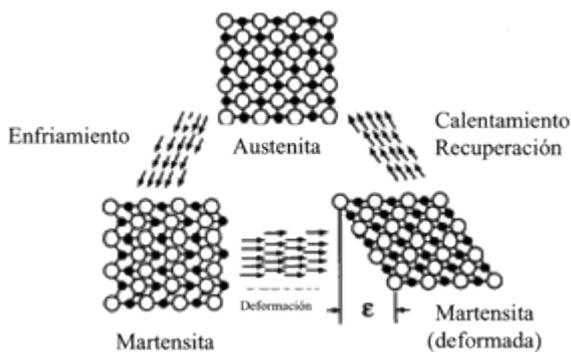


Figura 2.1.3.1. Descripción microscópica del efecto de memoria de forma.

Esta figura nos presenta una descripción microscópica del proceso de memoria de forma: la austenita es enfriada para formar martensita maclada sin sufrir cambio en la forma. Posteriormente se deforma moviendo las fronteras de maclado. Finalmente calentando se volverá a la estructura y forma original austenítica.

De forma macroscópica el efecto de memoria de forma también puede describirse esquemáticamente en la siguiente figura:

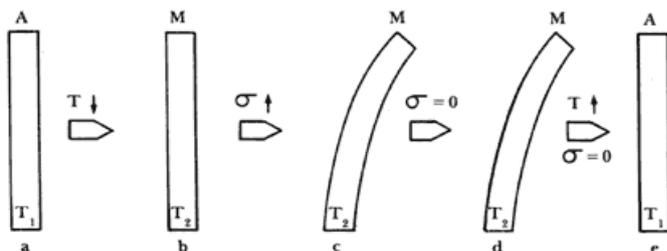


Figura 2.1.3.2. Descripción macroscópica del efecto de memoria de forma.

No hay cambio en la forma de un elemento enfriado desde por encima de A_f a por debajo de M_f . Cuando el elemento es deformado por debajo de M_f permanece con esa deformación hasta que se calienta. La recuperación de la forma comienza en A_s y es completada en A_f . En el punto de inflexión entre A_s y A_f , cerca del 50% de la forma original ya está recuperada. Una vez que la forma se ha recuperado en A_f , no hay más cambios en la forma cuando el elemento es enfriado hasta por debajo de M_f y la memoria de forma puede solo ser reactivada deformando la martensita otra vez. En otras palabras, el efecto memoria de forma ocurre solo una vez y por eso se suele llamar memoria de forma simple, en contraste con el doble efecto memoria de forma, que se describirá más tarde. Las deformaciones de recuperación son del orden del 7% en las aleaciones de SMA, aunque algunas llegan al 10%. (Stoeckel, 1990)

2.1.4 Martensita inducida por tensión: Superelasticidad

Las explicaciones anteriores demuestran que el efecto memoria de forma es tanto térmico como mecánico. La martensita se forma inicialmente enfriando y deformando por debajo de M_f y luego calentando por encima de A_f para producir la recuperación de la forma, esto es, el efecto memoria de forma causada por calentamiento. Consideraremos ahora otro tipo de memoria de forma que no necesita cambio de temperatura: la superelasticidad.

La formación de martensita es un proceso termoelástico, lo que quiere decir que un descenso incremental de la temperatura entre M_s y M_f produce un ligero crecimiento de las láminas de martensita existentes y la nucleación de algunas nuevas. Pero, cuando la temperatura asciende incrementalmente, las nuevas láminas nucleadas desaparecen y aquellas que crecieron ligeramente en el enfriamiento, se reducen un poco. Dicho de otra forma, hay una equivalencia entre la temperatura y la tensión: un decrecimiento en la temperatura es equivalente a un crecimiento de la tensión, ambas estabilizando la martensita. Normalmente, en el enfriamiento, la martensita puede formarse en M_s sin tensión. Pero en el mismo material, la martensita puede formarse por encima de M_s si se le aplica una tensión, y la martensita así formada se le llama martensita inducida por tensión (SIM). La fuerza impulsora para la transformación es ahora mecánica, y opuesta a la térmica.

Por encima de M_s , la tensión requerida para producir SIM incrementa al incrementar la temperatura. De hecho, la variación en la tensión necesaria para producir SIM incrementa linealmente con la temperatura por encima de M_s y si extrapolamos la tensión, ésta disminuirá hasta cero para el valor de M_s . La variación lineal de la tensión para inducir martensita en función de la temperatura, obedece la ecuación de Clausius-Clapeyron, expresada usualmente como:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H}{\Delta V}$$

Donde P es la presión, T la temperatura, ΔH es el calor latente de transformación y ΔV el cambio de volumen en la transformación. Esta ecuación generalmente se expresa de forma:

$$\frac{d\sigma}{dM_s} = -\frac{\Delta H}{\varepsilon_0}$$

Donde σ , M_s y ε_0 son respectivamente, la tensión aplicada, la temperatura M_s y la deformación de transformación a lo largo de la tensión aplicada. El incremento de dificultad para inducir martensita por tensión continúa incrementando con la temperatura hasta M_d , por encima de la cual la tensión crítica para inducir martensita es mayor que la necesaria para mover dislocaciones. Esto hace que M_d sea la temperatura más alta a la cual es posible obtener martensita. Por ello el rango de temperaturas para SIM es de M_s hasta M_d .

La superelasticidad aparece cuando el material es deformado por encima de A_s , pero aún por debajo de M_d . En este rango, la martensita puede hacerse estable con la aplicación de la tensión, pero se vuelve inestable otra vez cuando la tensión se elimina.

2.1.5 Efecto doble memoria de forma

Imaginemos un elemento totalmente comprimido de SMA que se deforma por extensión por debajo de M_f . La forma original del elemento (contraído) se recupera calentando por encima de A_f . La forma contraída permanece cuando el elemento es enfriado de nuevo por debajo de M_f . Este es el fenómeno de memoria de forma simple que ya hemos mencionado anteriormente y recordemos que se realiza una sola vez.

En el caso en que el elemento comprimido se extiende calentado, por encima de A_f , pero se contrae espontáneamente cuando se vuelve a enfriar por debajo de M_f , repitiéndose indefinidamente, esto se le conoce con el nombre de efecto doble de memoria de forma.

Para producir el doble efecto de memoria de forma, se necesita un tratamiento térmico especial. Aunque hay varios tratamientos que pueden usarse (llamados tratamientos de adiestramiento), todos inducen micro tensiones en el material que tienden a perjudicar la nucleación y el crecimiento del grano de la martensita, causando que algunas variantes se deformen preferencialmente.

Tal y como hemos dicho este efecto de doble memoria se logra haciendo muchas veces el ciclo de memoria simple. Es un proceso que se llama de educación o adiestramiento del material. Con este proceso se puede conseguir que el material recuerde sucesivamente y de forma cíclica tanto la forma caliente como la forma fría.

2.2. Aleaciones con memoria de forma como aplicación en la automoción:

En los vehículos más modernos, el número de sensores y actuadores ha incrementado de una forma asombrosa como demanda de más seguridad y vehículos más confortables. Estas exigencias dan la oportunidad a los actuadores SMA a ser una alternativa a los actuadores electromagnéticos en aplicaciones de la automoción. Estos actuadores SMA pueden formar parte de la zona interior del coche como puede ser el sistema de cierre o el retrovisor interior, también pueden ser actuadores térmicos como por ejemplo para controlar la temperatura del motor y la lubricación de este, etc.

La simplicidad mecánica, las dimensiones tan pequeñas de estos actuadores, el bajo peso y coste hacen que los actuadores SMA sean beneficiosos en comparación a los actuadores convencionales. (Rottiers, Van den Broeck, *et al.*, 2011)

Como ejemplo real de una aplicación dentro de la automoción que se ha llevado a cabo con éxito ha sido una válvula de control de presión en la transmisión automática de la Mercedes-Benz (para el control del fluido de la transmisión en el calentamiento del motor) y para el control de los cierres de protección de las luces de niebla.

3. Aplicación:

Introducida la parte teórica sobre las aleaciones con memoria de forma (SMA), vamos a estudiar la posibilidad de modificar la estructura de un componente del automóvil introduciendo una aleación con memoria de forma. En este trabajo se ha escogido el inyector de combustible como componente al cual se tratará de cambiar su estructura interna con un elemento de una aleación con memoria de forma y ver si es capaz de funcionar correctamente.

Lo primero será introducir que es un inyector y cuál es su función y posteriormente definir el diseño de nuestro material y sus condiciones de trabajo.

3.1 Inyector:

Los inyectores forman parte del sistema de inyección de un automóvil y se encarga de, como su nombre indica, inyectar el combustible directamente en la cámara de combustión (inyección directa) o en el colector de admisión (inyección indirecta). El inyector es una parte muy delicada del funcionamiento del automóvil ya que tienen la tarea de inyectar la cantidad correcta de combustible calculada por la computadora, en todas las condiciones de manejo para una mejor atomización y una menor condensación del combustible.

Los inyectores son electroválvulas capaces de abrirse y cerrarse millones de veces con una reacción muy precisa al pulso eléctrico que los acciona, sin fugas ni escapes de carburante. En su interior hay una bobina, una armadura, un resorte y una válvula. Cuando una corriente eléctrica pasa a través de la bobina, se crea un campo magnético que hace que la válvula se abra.

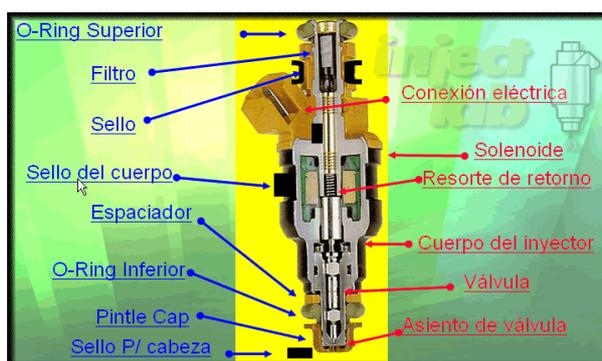


Figura 3.1. Componentes de un inyector.

3.1.1 Tipos de inyectores:

Los inyectores utilizados en sistemas de inyección de gasolina son de dos tipos:

1) Inyector electrónico

Utilizados en todos los vehículos que en la actualidad se fabrican en el mundo; son electromagnéticos y se activan por un pulso electrónico, controlado por la ECU (unidad de control electrónico).

Debido a excelentes técnicas de desarrollo, se ha estado produciendo durante más de 25 años y aún es posible adaptar este inyector para que se ajuste a una variedad de sistemas por inducción de aire y de alimentación de gasolina, siendo necesarios distintos tipos de atomización y de caudal para satisfacer las necesidades de los distintos fabricantes de vehículos.



Figura 3.1.1.1. Diferentes tipos de inyectores.

La diferencia que se encuentra en los inyectores controlados electrónicamente está en el diseño de la válvula de alimentación de combustible. Existen tres tipos de válvulas: de aguja, de bola y de disco.

Consta adicionalmente de una resistencia eléctrica que es el principal factor del retardo en la respuesta de los inyectores. Es la autoinducción que aparece al principio y al final de cada pulso de corriente. Al fin de reducir al mínimo la autoinducción, numerosos tipos de inyección contienen solenoides de baja resistencia (4,8,12,16 ohms a 20°C). Los mismos que logran una baja resistencia ya que disponen de un número reducido de menos espiras en su arrollamiento.

2) Inyectores mecánicos.

Son inyectores que se abren por la propia presión del combustible (no tienen bobina). Al no tener bobina son más sencillos. Están formados por un cuerpo con su paso interior de combustible y su filtro; en su exterior va montado un casquillo de acoplamiento al colector de admisión.

La tobera cierra el extremo inferior del cuerpo del inyector. Un disco perforado que permite el paso del combustible va unido a la aguja de cierre, desplazándose con ella dentro del cuerpo.

Un muelle empuja el disco separándolo de la tobera y, como la aguja de cierre va unida al disco, obtura la salida del combustible en la parte externa de la tobera, al ser la cabeza de la aguja de cierre de mayor diámetro que el agujero de salida. Cuando la presión del combustible es suficiente para vencer la fuerza del muelle gracias a su empuje sobre la chapa perforada, la aguja se separa de la tobera permitiendo la salida de la gasolina. El mayor diámetro de la cabeza de cierre de la aguja produce un efecto de dispersión del chorro de gasolina que favorece su emulsión con el aire de admisión. (Cabrera & Pilatuña, 2012)

3.1.2 Medición del tiempo de inyección

El tiempo de inyección es un parámetro de funcionamiento importante. Como en toda bobina la intensidad de corriente no alcanza su máximo en forma instantánea sino que para alcanzar ese nivel le demanda un tiempo determinado. La intensidad del campo magnético formado en la bobina del inyector, al fluir corriente eléctrica por ella, debe alcanzar un determinado nivel para atraer la aguja venciendo la fuerza de oposición del resorte que empuja a ésta para mantenerla en su asiento, cerrando el pase de combustible. Esto permite vislumbrar que los inyectores no abren el paso de combustible en el instante en el que se le aplica a su bobina la tensión de la batería, sino que su apertura demanda un cierto tiempo. A continuación se describe un ejemplo de mediciones realizadas en inyectores de uso común. Estas mediciones se han efectuado para distintas tensiones de batería pero manteniendo un tiempo de inyección constante de 2 milisegundos medido con osciloscopio. (Cabrera & Pilatuña, 2012)

Tabla 3.1.2.1. Características inyector Bosch 0280 150 962.

Inyector Bosch 0280 150 962	
Tipo	Válvula de inyección
Marca de autos	OMEGA 3.0 / VECTRA 2.0 / SANTANA 2.0
País de origen	Fujian, China (Mainland)
Fabricación	Hecho en china
N° de parte	0280 150 962
Caudal	187cc/min
Resistencia eléctrica	16 ohmios
Presión	3bar
Intensidad de apertura	0,3 A
Intensidad de cierre	0,14 A

Tabla 3.1.2.2. Parámetros inyector Bosch 0280 150 962 para distintas tensiones de batería.

Parámetros		Tiempo retardo de apertura (ms)	Tiempo nominal de inyección (ms)	Tiempo real de inyección (ms)	% tiempo de inyección perdido
Tensión de batería	13.8V	0,44	2	$2 - 0,44 = 1,56$	22%
Intensidad máxima		0,87A			
Tensión de batería	12 V	0,53	2	$2 - 0,53 = 1,47$	26,5%
Intensidad máxima		0,65A			
Tensión de batería	10 V	0,64	2	$2 - 0,64 = 1,46$	32%
Intensidad máxima		0,46A			

El inyector que usaremos como referencia para nuestra aplicación será el inyector **Bosch 0280 150 962** cuyas características están indicadas en la **Tabla 3.1.2.1.** y en la **Tabla 3.1.2.2.**

4. Diseño y funcionamiento

Esta aplicación trata de incorporar un elemento de SMA a un inyector de combustible. La temperatura del elemento de SMA se controla por calentamiento eléctrico.

Este control puede ser de bucle cerrado (basado en una señal de retroalimentación relacionado con el parámetro que se controla) o de bucle abierto (basado en características determinadas experimentalmente).

Se usará la resistencia del elemento de SMA como parámetro para poder controlar la temperatura del elemento de SMA ya que las aleaciones de SMA presentan un cambio característico en la resistividad durante su transformación de forma.

La función del elemento de SMA será la de abrir y cerrar el paso de combustible.

Para abrir el inyector y comenzar la inyección de combustible, se aplica un voltaje relativamente alto a un elemento de SMA del inyector para calentar rápidamente el elemento hasta su estado de alta temperatura (austenita), abriendo rápidamente la válvula.

El nivel de corriente se controla como una medida de la resistividad del elemento, y cuando la resistividad del material indica que la transición al estado de alta temperatura está completa, el voltaje se reduce a un valor de retención; suficiente para continuar la medición de resistividad. Cuando la resistividad del material indica que el elemento está comenzando a transitar de vuelta al estado de temperatura ambiente (martensita), se vuelve a aplicar un voltaje relativamente alto para comenzar nuevamente el ciclo. Para cerrar el inyector, se interrumpe el calentamiento eléctrico y el combustible que circula a través del inyector enfría el elemento hasta su estado de temperatura ambiente. La variabilidad en la respuesta de apertura se reduce porque el alto voltaje es significativamente mayor que un voltaje que dañaría térmicamente el elemento SMA si se mantiene, y la realimentación de resistividad durante la aplicación de la alta tensión se utiliza para controlar la temporización de la reducción de corriente. La variabilidad en la respuesta de cierre se reduce por el cambio repetido entre alto y bajo voltaje que controla la temperatura del elemento, y de este modo mantiene el elemento en un estado de preparación para volver al estado de temperatura ambiente. Adicionalmente, la conmutación repetida entre la alta y baja tensión limita la temperatura máxima del elemento SMA y evita daños al elemento si el combustible circulante no logra enfriar adecuadamente el elemento. Finalmente, el uso de la medición de corriente en el circuito de control permite una determinación fiable de la resistividad del elemento SMA sin necesidad de sensores térmicos externos. El siguiente diseño está basado en la patente US6019113 (Allston & Knebel *et al.*, 2000) y la patente US6691977 (Knebel & Salemi, 2004), ambas americanas.

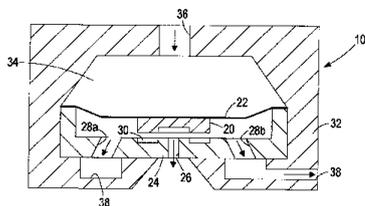


FIGURE 1A

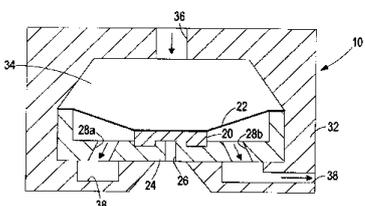


FIGURE 1B

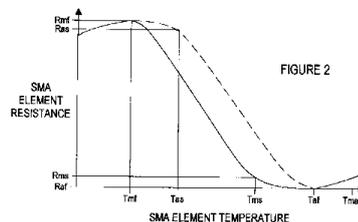


FIGURE 2

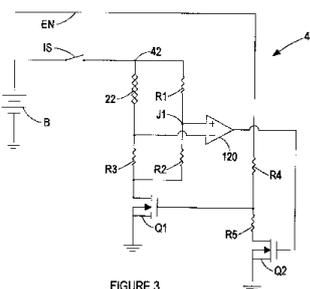


FIGURE 3

4.1 Descripción:

Breve descripción de los dibujos

Las Figuras 1A y 1B son diagramas en sección transversal de un accionador de inyector de combustible que tiene un elemento SMA enfriado por combustible de acuerdo con esta invención. FIG. 1A muestra el actuador en un estado abierto, y la FIG. 1B muestra el actuador en un estado cerrado.

La Figura 2 es un gráfico que ilustra una relación característica de resistividad frente a temperatura del elemento SMA.

La Figura 3 es un diagrama de circuito de un circuito excitador para el actuador de la Figura 1.

La Figura 4 contiene cuatro gráficos A-D, representan el funcionamiento del actuador de la Figura 1 a tres temperaturas diferentes del combustible.

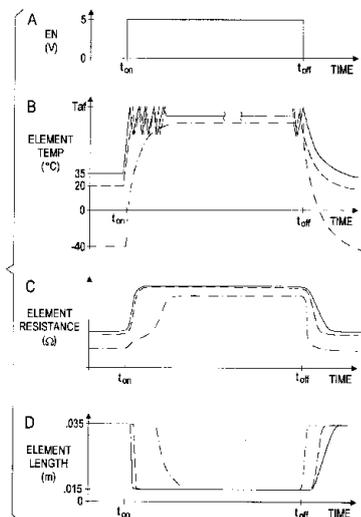


FIGURE 4

Descripción del funcionamiento a partir de las figuras:

Las figuras 1A y 1B nos muestran como es el actuador que implantaremos en el inyector **Bosch 0280 150 962**. La única diferencia entre estas dos figuras es que una está en posición de circuito abierto (figura 1A) y la otra en circuito cerrado (1B).

Básicamente, estas figuras nos indican una entrada de combustible que vendría del depósito hasta el inyector (36), nuestro elemento de SMA (22) que esta acoplado a una válvula (20) que es la que hace de tapón para cerrar el circuito y a los laterales unas salidas (28a y 28b) por donde siempre circula el combustible, el cual vuelve a entrar por la entrada (36). En pocas palabras, el combustible siempre está circulando a través del elemento de SMA. Este paso continuo de combustible a través del elemento de SMA nos proporcionará una refrigeración de este.

Inicialmente el circuito está cerrado, es decir no hay paso de combustible hacia la cámara de combustión. Para abrir el circuito aplicamos una cantidad de voltaje para que el elemento de SMA se caliente (hasta A_f) y sea capaz de contraerse. Una vez abierto se deja de aplicar el voltaje y el combustible que circula a través de elemento de SMA lo enfría. Una vez enfriado (forma martensítica), la presión que ejerce el combustible sobre el elemento de SMA lo deforma hasta que el circuito vuelve a cerrarse. Y este ciclo se iría repitiendo continuamente.

En la Figura 2 se observa la resistencia del SMA en función de la temperatura. La relación de temperatura – resistencia del paso de M_f a A_f se muestra en el trazado discontinuo, mientras que para el paso de A_f a M_f se muestra en el trazado continuo.

Como hemos dicho anteriormente la medida de la resistencia será muy importante a la hora del control de la temperatura del elemento SMA.

La Figura 3 hace referencia a un circuito electrónico que tiene la función de controlar el calentamiento del elemento de SMA. Cuando la señal del inyector pasa de un cero lógico a un uno lógico se produce un paso de corriente máxima a través del elemento de SMA. La intensidad disminuye a medida que la resistencia del elemento de SMA aumenta.

En la Figura 4 tenemos cuatro gráficos, los cuales hacen referencia a un ciclo completo. El gráfico A representa una señal de inyección de nivel lógico, el gráfico B representa la temperatura del elemento de SMA, el Gráfico C representa la resistencia del elemento de SMA y el Gráfico D representa la longitud del elemento de SMA. En los gráficos B,C,D aparecen varios trazos para ilustrar la variabilidad asociada con tres temperaturas de combustible diferentes: 35 °C (trazas sólidas), 20 °C (trazas discontinuas) y -40 °C (trazas con puntos). Se observa que la aplicación de un alto voltaje provoca un aumento rápido de la temperatura del elemento de SMA, minimizando la variabilidad de apertura de la válvula, incluso a temperaturas de combustible muy frías. A temperaturas de combustible más altas, el circuito electrónico controla la temperatura del elemento de SMA para poder enfriarlo rápidamente para cerrar la válvula.

En resumen, el control descrito anteriormente permite el funcionamiento de un inyector de combustible con un elemento de SMA. Mediante el uso de retroalimentación de resistencia, el elemento de SMA puede calentarse rápidamente sin daño térmico para abrir rápidamente el

inyector y mantenerse en un estado de preparación térmica para que el inyector pueda enfriarse rápida y consistentemente al final del período de inyección. (Robinson & Kilgore, 2000)

5. Condiciones de trabajo

Las condiciones de trabajo constituyen un factor muy importante a la hora de escoger una aleación con memoria de forma, la cual tiene que cumplir las funciones deseadas de forma correcta. Si el elemento con memoria de forma no es capaz de soportar correctamente las condiciones de trabajo a las que está expuesto, se producirá un fallo en el material en un periodo corto de tiempo o de forma inmediata. Las condiciones de trabajo son:

1) Temperaturas de trabajo:

Recordemos que la aleación con memoria de forma hay que variarle la temperatura para poder pasar de su forma de estado sólido de austenita a martensita y viceversa, y así cíclicamente. La temperatura más baja (la de su forma de estado sólido martensítica) es la temperatura ambiente a la que se encuentra el combustible, ya que como dijimos anteriormente el combustible es el encargado de refrigerar el material. En cuanto a la temperatura elevada, eso dependerá de que aleación en concreto escojamos, ya que depende de la aleación tiene una temperatura u otra de transformación a su fase de estado sólido austenítica (recordemos que para llegar a tal temperatura hacemos pasar un cierto voltaje a través del material para calentarlo). Igualmente podemos estimar una temperatura que sería asequible para poder calentar y que no fuera excesiva, esta temperatura sería la temperatura a la que trabaja un motor de combustión interna cuando trabaja de forma óptima, que es una temperatura de entre 90°C y 100°C.

Estos ciclos de cambios de temperatura originan un problema, el cual es irremediable, que es la fatiga térmica del material.

El cambio de temperatura induce una expansión térmica en el material:

$$\epsilon_T = \alpha \Delta T \quad (10.2)$$

donde:

ΔT = cambio de temperatura que causa la expansión térmica [K]
 α = Coeficiente de expansión lineal [K⁻¹]
 ϵ_T = Expansión térmica [mm / mm]

Cuanto mayor sea el cambio de volumen del material mayor será la fatiga en este. Por tanto cuanto menor sea la expansión térmica del material menor fatiga tendrá este.

Bajo idénticas condiciones de servicio, las aleaciones con bajo coeficiente de dilatación medio se comportarán mejor que aquellas aleaciones con coeficientes térmicos de expansión levemente mayores.

Las grietas que aparecen a causa de la fatiga térmica son las causantes de que el material sea más propenso a tener corrosión (hablamos de la corrosión a continuación).

2) Corrosión:

La corrosión es el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. De manera más general, puede entenderse como la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma de mayor estabilidad o de menor energía interna. La velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, de la salinidad del fluido en contacto con el metal y de las propiedades de los metales en cuestión.

Como hemos mencionado en el apartado de diseño del actuador, la aleación con memoria de forma siempre está en contacto con combustible, tanto si el elemento está en su posición de cerrado (no hay paso de combustible hacia la cámara de combustión) como si está en su posición de abierto (sí hay paso de combustible hacia la cámara de combustión). Hemos visto que la fatiga térmica también es un factor muy importante que incrementa la corrosión en la aleación y además es algo que es inevitable, por tanto es importante para esta aplicación escoger una aleación que tenga una alta resistencia a la corrosión para tener una alta vida útil de trabajo.

3) Presión:

La presión es un factor también muy importante a tener en cuenta, ya que el material debe soportar dicha presión para no dañarse (lo cual produciría grietas en dicho material favoreciendo a la corrosión) o incluso romperse. La presión que debe soportar la aleación con memoria de forma es la presión con la que llega el combustible al actuador. Dicha presión viene determinada por la bomba del combustible que es la encargada de llevar el fluido desde el depósito de combustible hasta el sistema de inyección. Esta presión depende del fabricante, no hay un valor fijo común para todos, pero sí que podemos dar un rango de valores de presión. Este rango va de unos 35 psi a 65 psi.

En este caso, como habíamos mencionado en el apartado de inyectores nos centraremos en el inyector Bosch 0280 150 962. En sus especificaciones aparece que la presión ejercida en dicho inyector es de 3 bar que equivalen a unos 44 psi, por tanto nuestra aleación con memoria de forma tiene que ser capaz de soportar una presión de 44 psi.

4) Frecuencia de actuación:

Esta aplicación necesita una alta frecuencia de actuación por parte de la aleación con memoria de forma ya que se debe abrir y cerrar muchas veces en muy poco tiempo. Además es algo que no es constante, sino que depende de cómo este de revolucionado el motor.

Para un motor de 4 tiempos, si nos fijamos en un único cilindro, cuando se ha hecho un ciclo completo el cigüeñal ha dado dos vueltas, por tanto si por ejemplo revolucionamos el motor a 2000 rpm nuestro actuador tiene que hacer el ciclo abrir-cerrar 1000 veces por minuto, posicionándonos en una frecuencia del orden del KHz. Los SMA convencionales no tienen frecuencias de actuación tan altas (ver **Figura 2.2.**). Lo que se puede hacer para solucionar este problema es incorporar un sistema adicional (por ejemplo un muelle) el cual ayude a

nuestro material a cambiar su forma. Alternativamente podrían usarse otro tipo de material que son las aleaciones con memoria de forma ferromagnética (FSMA) que tienen una frecuencia de actuación más alta.

5) Deformación:

Sabemos que la aleación que vayamos a escoger debe deformarse para poder realizar correctamente su función, por tanto debemos saber cuánto debe ser la deformación del material para poder escoger una aleación que pueda deformarse la cantidad necesaria.

Para ello tenemos que definir las dimensiones del material para poder hacer una estimación de la deformación que debe sufrir dicho material.

Las dimensiones de un inyector típico son los que se presentan en la siguiente figura:

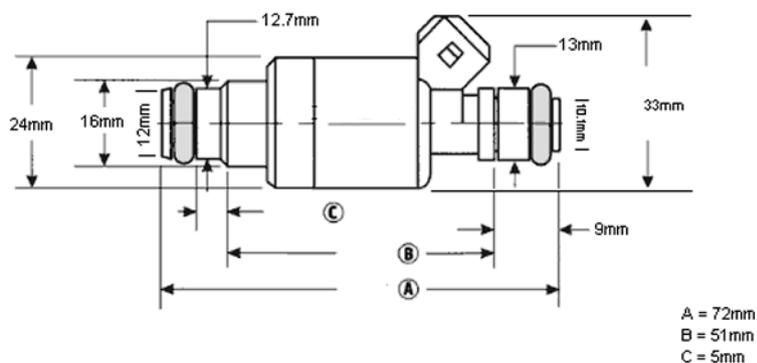
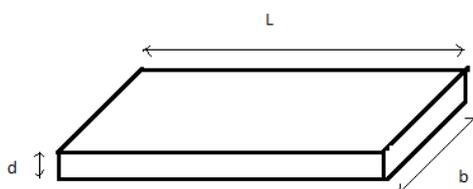


Figura 5.1. Dimensiones de un inyector típico.

Hemos visto anteriormente que nuestro material es el encargado de dejar pasar combustible a la cámara de combustión, por tanto este material se debe encontrar en la salida del inyector que se puede observar en la **Figura 5.1.** que tiene un tamaño de 16mm, por tanto nuestra aleación tiene que tener esa longitud como máximo. El material estará sometido a una presión continua y supondremos que uniforme en toda la placa causada por el flujo de combustible.

Primero vamos a definir las dimensiones del elemento de SMA:



La longitud del elemento de SMA cuando está en posición abierto: $L = 15mm$

La anchura del elemento de SMA: $b = 5mm$

La altura del elemento de SMA: $d = 0.3mm$

Para cerrar bien el circuito, la longitud de la flecha tiene que ser: $\delta = 1mm$

Por tanto podemos encontrar la longitud aproximada del elemento de SMA (ya que δ es pequeño) cuando está flexionado (circuito cerrado): $L' = \sqrt{L^2 + 4\delta^2} = 15.13mm$

Para calcular la deformación que tendrá que sufrir el material utilizamos la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = 8.67 \times 10^{-3} \sim 0.87\%$$

donde ΔL es la variación de longitud de la barra y L es la longitud inicial de la barra.

6) Trabajo en contra:

El material, a la hora de abrir el circuito para que el combustible pueda continuar hacia la cámara de combustión, deberá hacer un trabajo para poder llegar a esa posición. Si el material no es capaz de hacer este trabajo significa que no es capaz de superar la presión que le está ejerciendo el combustible y por tanto no podrá realizar su función.

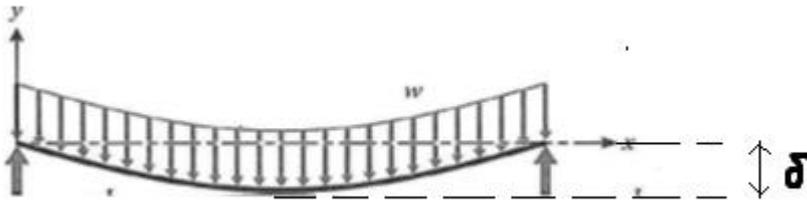


Figura 5.2. Representación gráfica del material flexionado.

Sabemos que la expresión matemática del trabajo viene dado por la siguiente expresión:

$$W = F\delta$$

Donde F es la fuerza ejercida por el fluido y δ la longitud de la flecha.

La fuerza la podemos expresar en función de la presión de la siguiente manera: $F = P \cdot S$ donde S es la superficie perpendicular al flujo de combustible $S = b \times L$. Por tanto:

$$\frac{W}{V} = P \frac{\delta}{d} = 100 \times 10^4 \frac{J}{m^3} = 1 \frac{J}{cm^3}$$

Las condiciones de trabajo anteriormente expuestas se pueden resumir en el siguiente cuadro:

Tabla 5.1. Condiciones de trabajo

Temperatura de trabajo	25°C – 100°C
Resistencia Corrosión	Alta – muy alta
Presión soportada	0.3 MPa
Frecuencia de actuación	Muy alta
Deformación	0.87%
Trabajo por unidad de volumen (work output)	$1 \frac{J}{cm^3}$
Longitud flecha (δ)	1mm

6. Selección de la aleación con memoria de forma:

Existen muchas aleaciones que presentan los mecanismos de memoria de forma y superelasticidad anteriormente explicados, pero solo unos pocos han sido desarrollados comercialmente, como las de NiTi, NiTi-X (donde X es un elemento ternario) y CuZnAl.

Una vez hemos definido las condiciones de trabajo que debe soportar el material y la función que debe realizar, es el momento de elegir el tipo de material más adecuado para dicha función. La selección del material es una decisión muy importante, ya que una mala elección de este material producirá un mal funcionamiento del dispositivo e incluso la inutilidad de este. Es posible que un material no cumpla todos los requisitos que hemos expuesto anteriormente pero tenemos que ser capaces de elegir una aleación que pueda cumplir su función eficazmente reduciendo al máximo los defectos de dicho material. (Butera, 2008)

Aleación NiTi (nitinol)

El SMA más conocido y más fácilmente disponible es una aleación de níquel y titanio (comúnmente llamado nitinol), el cual es también el más usado en el ámbito de la automoción. El nitinol se ha investigado extensamente como uno de los materiales más prometedores para sistemas micro electromecánicos (MEMS) tales como micro válvulas y micro actuadores. El nitinol ofrece las ventajas principales de tener una fuerza de salida grande por unidad de volumen, y la capacidad de servir como componentes estructurales, así como componentes activos. El rendimiento ventajoso de los micro actuadores se atribuye al hecho de que el efecto de memoria de forma puede producir trabajo sustancial por unidad de volumen. Por ejemplo, la producción de trabajo de aleación de memoria de forma de níquel-titanio es del orden de 1 julio por gramo por ciclo. Se estima que una película de esta aleación con memoria de forma que mide un milímetro cuadrado y diez micrómetros de espesor ejerce aproximadamente 64 microjulios de trabajo por ciclo. Con un cambio de temperatura de tan

sólo 10 °C, esta aleación puede ejercer una presión o tensión de hasta 415 MPa. (NITINOL, FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTILÁN)

El nitinol presenta unas temperaturas de transformación que se encuentran entre -200°C y +120°C. Las aleaciones binarias NiTi tienen un ancho de histéresis de entre 25°C y 40°C.

Estrictamente la aleación que se comercializa más en la actualidad es la de NiTi, esto es debido a múltiples razones: las aleaciones NiTi tienen mayor capacidad de memoria (hasta un 8%), son mucho más estables térmicamente, tienen una excelente resistencia a la corrosión comparadas con las del cobre, tienen mayor resistividad eléctrica (siendo pues su activación eléctrica más simple), pueden ser aleadas y extruidas con facilidad y tienen un mayor rango de posibles temperaturas de transformación.

La parte negativa de las aleaciones de NiTi es que son mucho más caras y más difíciles de mecanizar. Además, el ciclo de histéresis de las aleaciones NiTi suele ser muy pronunciado (grandes cambios en la deformación con pequeños cambios de T), lo que suele ser útil si se desea una aplicación en la que se realice una función al alcanzar una T. (Ghassemieh, 2011)

Podemos resumir las propiedades mecánicas de la aleación TiNi en la siguiente tabla:

Tabla 6.1.1. Propiedades mecánicas de la aleación NiTi. A y M significan austenita y martensita respectivamente; f.a. se refiere al término "totalmente recocido" (fully annealed) y w.h. "trabajado en frío" (work hardened).

Propiedad	NiTi SMA
Deformación recuperable (%)	8
Resistencia a la cedencia (MPa)	200-700 (a); 70-140 (M)
Resistencia última a tracción (MPa)	900 (f.a.); 5-10 (w.h.)
Elongación a rotura (%)	24-50 (f.a.); 5-10 (w.h.)
Resistencia a la corrosión	Excelente

Tabla 6.1.2. Propiedades de funcionalidad para el SMA NiTi.

Actuator type	Stress (MPa)	Strain (%)	Efficiency (%)	Bandwidth (Hz)	Work per Volume (J/cm ³)	Power per Volume (W/cm ³)
NiTi SMA	200	10	3	3	10	30

Ahora podemos calcular la longitud de la flecha que sufrirá la placa de nitinol aplicando la siguiente fórmula correspondiente a la flexión de una barra causada por una fuerza homogénea en toda la barra:

$$\delta = \frac{5PL}{32E} \left(\frac{L}{d}\right)^3 = 2.93mm$$

donde E es el módulo de Young (típico de cada material). En la **Tabla 6.1.2** se observa un rango de posibles valores del módulo de Young (E). En el cálculo anterior se ha escogido un valor de $E = 30GPa$ ya que en el momento de deformarse, el elemento está en su forma martensítica.

Las aleaciones con memoria de forma NiTi son compuestos intermetálicos basados en la composición equiatómica (50% atómico de Ti y de Ni). Estas aleaciones siguen presentando propiedades de memoria de forma en un rango aproximado de entre 49% hasta 52% atómico de Ni. Dependiendo de la historia termomecánica del material, este porcentaje puede aumentar un poco más.

La dependencia de M_s (temperatura de transformación martensítica) según la composición tiene importantes consecuencias prácticas. Se exige un control de composición muy preciso cuando se funden las aleaciones. Dependiendo del valor de M_s requerido, el control necesario se sitúa entre una décima y una centésima del % atómico. Consecuentemente, para realizar el control de calidad, en la mayoría de los casos se caracteriza la temperatura de transformación en lugar de la composición química.

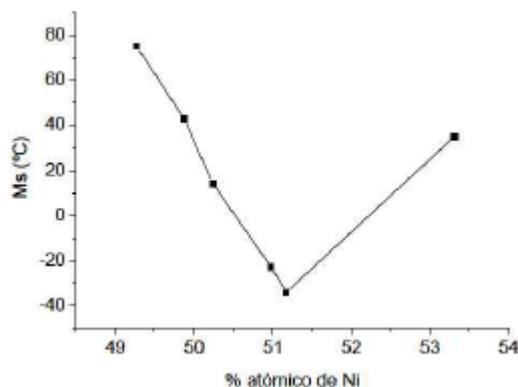


Figura 6.1.3. Curva experimental de la variación de M_s en función del contenido de Ni de aleaciones de NiTi

La temperatura de transformación a austenita la podemos fijar a unos $90^{\circ}C$, por tanto sabiendo que el ancho del ciclo de histéresis esta entre unos $25^{\circ}C - 40^{\circ}C$ podría ser recomendable tener una temperatura M_s de $60^{\circ}C$ lo que equivale a una composición de Ni (en tanto % atómico) de un 49.5% y por tanto el porcentaje atómico del Ti será de 50.5%

Aleación con base de cobre

Como hemos dicho con anterioridad, otra de las aleaciones que más se comercializa es la aleación ternaria de CuZnAl. Esta tiene unas temperaturas de transformación de entre $-200^{\circ}C$ y $+200^{\circ}C$.

Existen aleaciones con mayor rango de temperatura, como las de CuAlNi que llegan a los $200^{\circ}C$ pero no son estables en el ciclado.

Las aleaciones en base de Cu tienen una capacidad de memoria que solo alcanza un 4-5%, la resistencia a la corrosión no es tan grande como la de la aleación de NiTi.

Por otro lado, las aleaciones base cobre (básicamente CuZnAl y CuAlNi) pueden sufrir fallos intergranulares debido a que su estructura granular intrínseca es muy basta, lo que favorece la fatiga del material y por tanto a la corrosión.

Al igual que para el nitinol, podemos calcular la longitud de la flecha si la placa utilizada fuera de una aleación con base de Cu. Aplicamos la misma fórmula que en el caso del nitinol:

$$\delta = \frac{5PL}{32E} \left(\frac{L}{d}\right)^3 = 1.26mm$$

Fijémonos que todos los valores se mantienen igual que en el caso del nitinol (presión ejercida por el fluido (P) y las dimensiones del material (L,d)) excepto el módulo de Young(E) ya que este es un parámetro propio de cada material. En el caso del cálculo anterior se ha escogido un valor de: $E = 70GPa$.

6.1. Comparativa de las propiedades entre NiTi y aleaciones con base Cu

	NiTi	Cu-based Alloys		NiTi	Cu-based Alloys
Density [g/cm^3]	6.4 – 6.5	7.1 – 8.0	Young's modulus [$\times 10^9 N/m^2$]		
Melting point [$^{\circ}C$]	1250	950 – 1050	<i>martensite</i>	28 – 41	70
Thermal conductivity [W/mK]			<i>parent phase</i>	70 – 97	70 – 100
<i>martensite</i>	8.6 – 10.0	–	Yield strength [$\times 10^6 N/m^2$]		
<i>parent phase</i>	18	79 – 120	<i>martensite</i>	70 – 140	80 – 300
Electrical resistivity [$\times 10^{-6} \Omega m$]			<i>parent phase</i>	195 – 690	150 – 350
<i>martensite</i>	0.5 – 0.6	0.14	Ultimate tensile strength [$\times 10^6 N/m^2$]		
<i>parent phase</i>	0.82 – 1.1	0.07	<i>martensite</i>	895	400
Co. thermal expansion [$\times 10^{-6} K^{-1}$]			<i>parent phase</i>	1900	1000
<i>martensite</i>	6.6	16. – 18.0	Elongation at failure [%]		
<i>parent phase</i>	10.0 – 11.0	–	<i>Fully annealed</i>	25 – 50	8 – 15
Specific heat capacity [J/kgK]	470 – 620	390 – 440	<i>Work hardened</i>	5 – 10	8 – 15
Enthalpy of transformation [J/kg]	19.0 – 28.0	7.0 – 9.0	Hot workability	Poor-fair	Very good
Transformation temperature range [$^{\circ}C$]	–200 – 120	–200 – +200	Cold workability	Poor	Good
Corrosion performance	Excellent	Poor	Machinability	Poor	Very good
Bio-compatibility	Excellent	Assumed poor			

Tabla 6.1.1. Comparativa de las propiedades físicas de las SMA.

Tabla 6.1.2. Comparativa de las propiedades mecánicas de las SMA.

6.2. Comparativa de las propiedades necesarias para la aplicación y las de NiTi y aleaciones con base Cu

	Aplicación	NiTi SMA	Base Cu SMA
Temperatura de trabajo	25°C – 100°C	-200°C – +120°C	-200°C – +200°C
Resistencia Corrosión	Alta – muy alta	Excelente	Pobre
Presión soportada	0.3 MPa	200 MPa	400 MPa
Frecuencia de actuación	Muy alta	Baja	Baja
Deformación	0.87%	8%	4-5%
Trabajo por unidad de volumen (workout)	$1 \frac{J}{cm^3}$	$10 \frac{J}{cm^3}$	$\sim 10 \frac{J}{cm^3}$
Longitud flecha (δ)	1 mm	2.93 mm	1.26 mm

7. Conclusión

Ahora que ya hemos visto la función que debe realizar la aleación, las condiciones de trabajo que debe soportar y las características de la aleación binaria NiTi y las características de las aleaciones en base de cobre podemos afirmar que la mejor aleación entre las seleccionadas para realizar la función de inyector de combustible es el nitinol (aleación de NiTi).

La aleación NiTi es una buena elección para dicha aplicación en cuanto a sus temperaturas de transformación, ya que son temperaturas asequibles que se pueden obtener relativamente fácil (en este caso las aleaciones de base Cu también cumplirían esta función ya que tienen las mismas temperaturas de transformación que las del nitinol), una alta resistencia a la corrosión (una propiedad importantísima para esta aplicación ya que recordemos que nuestra aleación está en contacto continuo con el combustible), el ancho del ciclo de histéresis es pequeño lo que provoca “grandes” deformaciones con un pequeño cambio de temperatura y la resistividad eléctrica es bastante alta lo que provoca que al calentarla por corriente eléctrica llegue rápido a su temperatura de transformación de austenita.

La inconveniencia de usar esta aleación es la frecuencia de actuación, pero este no es un problema insalvable ya que podemos añadir un dispositivo adicional que empuje al elemento de SMA.

8. Bibliografía:

Kumar, P. K., & Lagoudas, D. C. (2008). Introduction to shape memory alloys. *Shape memory alloys*, 1-51.

Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M. A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design*, 56, 1078-1113.

Stoeckel, D. (1990). Shape memory actuators for automotive applications. *Materials & Design*, 11(6), 302-307.

Rottiers, W., Van den Broeck, L., Peeters, C., & Arras, P. (2011, January). Shape Memory Materials and their applications. In *Korolev's readings: conference proceedings* (pp. 250-251). Samara State Aerospace University.

Cabrera Montenegro, P. A., Pilatuña, N., & David, E. (2012). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para inyectores gasolina programado y activado vía Wi-Fi* (Bachelor's thesis, LATACUNGA/ESPE/2012).

Allston, B. K., Knebel, A. M., & Salemi, M. R. (2000). *U.S. Patent No. 6,019,113*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Knebel, A. M., & Salemi, M. R. (2004). *U.S. Patent No. 6,691,977*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Robinson, B. S., & Kilgore, J. T. (2000). *U.S. Patent No. 6,039,030*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Butera, F. (2008). Shape memory actuators. *Advanced Materials & Processes*, 166(3), 37-40.

NITINOL, U. B. B. B. C., & DE FORMA, M. D. F. M. FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN.

Ghassemieh, E. (2011). Materials in automotive application, state of the art and prospects. In *New trends and developments in automotive industry*. InTech.