

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 952 966**

51 Int. Cl.:

F03G 7/06

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.08.2018 PCT/IB2018/056595**

87 Fecha y número de publicación internacional: **07.03.2019 WO19043599**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.08.2018 E 18770089 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.07.2023 EP 3676494**

54 Título: **Actuador basado en memoria de forma**

30 Prioridad:

31.08.2017 EP 17188787

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

07.11.2023

73 Titular/es:

**ALMATECH SA (100.0%)
EPFL Innovation Park Bâtiment D
1015 Lausanne, CH**

72 Inventor/es:

**BLECHA, LUC y
PACIOTTI, GABRIEL**

74 Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 952 966 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Actuador basado en memoria de forma

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere en general a un actuador que comprende un filamento de material con memoria de forma (SMM) y que tiene una longitud variable entre una primera longitud correspondiente a un estado no deformado del filamento de SMM y una segunda longitud correspondiente a un estado que implica una deformación longitudinal predeterminada desde el estado no deformado, en el que el filamento de SMM está dispuesta para volver al estado no deformado desde el estado que implica una deformación longitudinal predeterminada cuando se calienta a una temperatura predeterminada, el filamento de SMM comprende un extremo fijo unido a una interfaz mecánica fija de 10 una estructura de soporte y un extremo móvil unido a una interfaz móvil entre la primera y la segunda posición de tal manera que la interfaz móvil puede moverse de una a otra de las posiciones primera y segunda cuando la longitud variable del filamento de SMM cambia de uno al otro de los tramos primero y segundo, y comprende el actuador además medios eléctricos que incluyen al menos un alambre de calefacción enrollado alrededor del filamento para calentar el filamento.

15 Antecedentes de la invención

Los actuadores son necesarios para una amplia variedad de aplicaciones. Los diseñadores de naves espaciales en particular buscan actuadores de uso único o múltiple que sean altamente confiables, livianos y eficientes.

20 Los materiales con memoria de forma (SMM) en general, y las aleaciones con memoria de forma (SMA) en particular, son materiales que pueden deformarse pseudoplásticamente a una temperatura relativamente baja y volverán a su forma original al exponerse a una temperatura más alta. Aunque se sabe que una variedad relativamente amplia de materiales exhiben el efecto de memoria de forma, en los actuadores solo se usan comúnmente aquellos que pueden recuperar cantidades sustanciales de tensión o que generan una fuerza significativa al cambiar de forma.

25 Se persigue activamente el desarrollo de nuevos dispositivos SMA, en particular actuadores. A diferencia de lo que ocurre con los actuadores bimetálicos o dispositivos que funcionan en función del CTE (Coeficiente de Expansión Térmica) del material, en los actuadores SMA la recuperación de un estado a otro se produce en un rango de temperatura estrecho (aproximadamente 10 °C). Esto es análogo a la ebullición del agua cuando llega a 100 °C (es decir, hay un "cambio de estado" que ocurre de manera relativamente abrupta cuando el material alcanza una temperatura crítica). Además, el uso de tecnologías SMA puede ser una forma eficaz de reducir la complejidad de un sistema en comparación con el mismo sistema que utiliza tecnología estándar. De hecho, una ventaja de los SMA es 30 que el mismo componente puede desempeñar una función tanto estructural como activo en el sistema. Además, algunos actuadores SMA conocidos pueden activarse varias veces, a cámara lenta (evitando así golpes) y son muy fiables.

35 Los SMA más utilizados son las aleaciones de níquel-titanio (Ni-Ti), también conocidas como aleaciones de "Nitinol". Una característica notable de las aleaciones de Nitinol es su temperatura de transición relativamente baja (típicamente alrededor de 70 °C). Otra característica notable es que el Nitinol es eléctricamente resistivo con una resistividad entre 70 y 100 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$. Una ventaja de la resistividad comparativamente alta es que permite elevar la temperatura de una pieza de Nitinol simplemente pasando una corriente eléctrica a través de ella. De hecho, la resistencia eléctrica de un objeto es directamente proporcional a la resistividad del material del que está hecho e inversamente proporcional a la sección transversal del objeto. Por lo tanto, se comprenderá que, en el caso de una pieza de Ni-Ti en forma de alambre, 40 la resistencia eléctrica puede ser bastante grande; incluso lo suficientemente grande como para que una corriente eléctrica moderadamente intensa provoque que la temperatura del alambre de Nitinol se eleve por encima de su temperatura de transición de memoria de forma. Por el contrario, cuando la pieza de Nitinol no tiene forma de alambre, o incluso cuando tiene forma de alambre pero tiene una gran sección transversal, la intensidad de la corriente eléctrica necesaria para elevar la temperatura de la pieza de Nitinol por encima de su temperatura de transición a menudo supera la capacidad de la infraestructura eléctrica a bordo de una nave espacial. En estas circunstancias, se necesitan 45 otros métodos de calentamiento.

50 Se conocen métodos de calentamiento alternativos. Por ejemplo, documento de patente US 5,312,152 divulga un actuador construido alrededor de un tubo Ni-Ti SMA con una longitud (memoria) sin deformar de 154.9 mm. Si el elemento tubular se alarga pseudoplásticamente en primer lugar unos 10 mm, puede volver a encogerse hasta su longitud de memoria al calentarse hasta su temperatura de transición. El tubo SMA tiene un diámetro exterior de 8.13 mm y un diámetro interior de 7.11 mm. Su sección transversal efectiva es, por lo tanto, de aproximadamente 12.2 mm². En tal caso, calentar el elemento SMA por encima de su temperatura de transición, pasando corriente eléctrica a través de él, puede ser demasiado exigente en términos de la intensidad mínima requerida para la corriente eléctrica.

55 Para elevar la temperatura del tubo SMA, el documento de patente mencionado anteriormente enseña a disponer dos calentadores de resistencia eléctrica termolamina flexibles contra la pared exterior cilíndrica del tubo. El documento de la técnica anterior enseña además a mantener los dos calentadores en su lugar utilizando una envoltura de cinta térmicamente contraíble. La figura 1 de dicho documento de la técnica anterior muestra un actuador con su tubo SMA

en estado deformado (es decir, alargado). A juzgar por el dibujo, el manguito formado por los dos calentadores de termolámina ensamblados es lo suficientemente largo para cubrir entre el 75 y el 80 % de la porción central cilíndrica del tubo SMA. Cuando el tubo se calienta hasta su temperatura de transición, recupera su forma previa al estiramiento. En el proceso, la longitud del tubo se reduce en aproximadamente un 6.5 %. Como no hay adhesivo entre la lámina
5 térmica y la superficie del tubo, partes del tubo pueden deslizarse longitudinalmente dentro del manguito de lámina térmica, adaptándose así al cambio de longitud.

Se comprenderá que una disposición de este tipo sólo es posible siempre que el manguito de termolámina no esté fuertemente atado alrededor del cilindro. Un problema con esta construcción de la técnica anterior es que, dado que el manguito de lámina térmica debe ajustarse con holgura alrededor del tubo SMA, el contacto térmico directo entre
10 los calentadores de lámina térmica y el SMA es limitado. El contacto térmico limitado implica una transferencia de calor por conducción limitada y, por lo tanto, un calentamiento más lento del tubo SMA. Una forma de evitar este problema es utilizar calentadores de termoláminas elásticamente deformables. Al ser la lámina elástica, en principio es capaz de adaptarse a cualquier cambio de forma del SMA. El manguito de lámina térmica puede así disponerse para ajustarse firmemente alrededor, e incluso para adherirse al tubo SMA. Un inconveniente de esta solución es el ciclo
15 de vida relativamente limitado de la termolámina elásticamente deformable en condiciones reales de funcionamiento.

Como se mencionó anteriormente, la temperatura de transición de las aleaciones de Nitinol suele ser tan baja como 70 °C. Por un lado, esta característica hace que sea bastante fácil calentar un componente SMA de un actuador por encima de su temperatura de transición. Por otro lado, en las condiciones operativas particulares a bordo de una nave espacial, la baja temperatura de transición puede dificultar el mantenimiento de la temperatura de un componente
20 SMA por debajo de su temperatura de transición y también puede dificultar el enfriamiento del componente SMA. después de calentar. De hecho, el enfriamiento por convección no tiene lugar en el vacío. Además, la refrigeración activa no suele ser una alternativa práctica debido a la limitada energía eléctrica disponible.

Además de las aleaciones de níquel-titanio (Ni-Ti) que acabamos de analizar, los SMA que se consideran con más frecuencia para aplicaciones espaciales son las aleaciones con base de cobre, en particular las aleaciones con base
25 de Cu-Al como Cu-Al-Ni, por ejemplo. La temperatura de transición de estas aleaciones con base de cobre puede oscilar entre la temperatura ambiente y los 200 °C en ciclos, e incluso hasta los 250 °C en el modo de una sola aplicación. A diferencia de las aleaciones de Ni-Ti, las aleaciones de Cu-Al-X son buenas conductoras eléctricas (por ejemplo, se informa que la resistividad de Cu-Al-Ni está entre 11 y 13 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$). Una consecuencia de la baja resistividad es que el simple paso de una corriente eléctrica moderadamente intensa a través de una pieza de aleación de Cu-Al-Ni
30 en general no logrará elevar la temperatura por encima de la temperatura de transición, incluso en el caso de una pieza de alambre relativamente pequeña conformada de aleación de Cu-Al-Ni. Por otro lado, una ventaja de usar aleaciones de Cu-Al-Ni como SMA en lugar de las aleaciones de Ni-Ti más habituales es que hace que sea mucho más fácil mantener la temperatura de un SMA por debajo de su temperatura de transición.

El documento de patente US 4 790 624 A divulga varias realizaciones de un actuador SMA. La realización que se muestra en la Figura 16 comprende un resorte 110 helicoidal hecho de SMA. Los segmentos de arco seleccionados de los bucles del resorte helicoidal están rodeados por un alambre de calentamiento por resistencia, de tal manera que forman bobinas de calentamiento por resistencia. Como se muestra, las bobinas 111A a 115A de calentamiento están envueltas alrededor de segmentos de arco alineados verticalmente de bucles adyacentes del resorte 110 helicoidal, y las bobinas adyacentes están interconectadas en serie mediante alambres 121A puente flexibles. Cuando
35 se suministra suficiente corriente a las bobinas 111A a 114A de calentamiento mediante una fuente 131A de corriente controlable para calentar los segmentos del arco del resorte del articulador SMA a la temperatura de transición de la aleación, el resorte se desviará hacia la zona longitudinal definida por las bobinas del calentador alineadas longitudinalmente.

El documento de patente JP S59 10789 A divulga un actuador SMA que permite controlar la cantidad de cambio de forma del SMA. El actuador SMA descrito comprende tres módulos térmicos anulares 2, 3 y 4 dispuestos coaxialmente uno tras otro. Dado que el área de calentamiento del SMA se puede cambiar seleccionando los módulos térmicos a los que se suministra corriente, la cantidad de cambio de forma del SMA se puede controlar minuciosamente.

Resumen de la invención

Por lo tanto, un objeto de la presente invención es resolver los problemas mencionados anteriormente de los actuadores de la técnica anterior al proporcionar un actuador basado en SMA con medios de calentamiento que sean
50 eficientes y disfruten de una mayor vida útil. La presente invención logra este objeto y otros al proporcionar un actuador basado en memoria de forma de acuerdo con la reivindicación 1 adjunta.

De acuerdo con la invención, el alambre de calefacción que se enrolla alrededor del filamento forma una hélice circular. Una definición de hélice circular es una curva que se puede trazar en un cilindro mediante la rotación de un punto que cruza secciones rectas del cilindro en un ángulo oblicuo constante (<https://www.merriam-webster.com/dictionary>). Se comprenderá por tanto que, de acuerdo con la invención, el alambre de calefacción enrollado sigue una curva que puede superponerse a la curva trazada sobre un cilindro por la rotación de un punto que cruza sus tramos rectos con un ángulo oblicuo constante. Dicho ángulo oblicuo constante es también el ángulo medido entre una recta tangente en cualquier punto de la hélice circular y un plano perpendicular al eje de la hélice. Las hélices en general tienen la

propiedad de que el ángulo oblicuo es constante o, en otras palabras, es el mismo en cualquier punto de una hélice en particular (es decir, el ángulo oblicuo es uniforme).

En matemáticas, una hélice circular es una curva en un espacio tridimensional. La siguiente parametrización en coordenadas cartesianas define una hélice circular de radio a y pendiente b/a :

- 5 $t \rightarrow (a \cos t, a \sin t, bt)$ Se entenderá que la parametrización viaja a lo largo de una vuelta de hélice completa cuando el parámetro t va de $t = 0$ a $t = 2\pi$. Además, la altura de una vuelta de hélice completa (es decir, el "paso" de la hélice) es igual a $2\pi b$ y la "longitud de arco" de la misma vuelta completa es igual a $2\pi \sqrt{a^2 + b^2}$. Finalmente, si denotamos

$$\alpha = \tan^{-1}(b/a).$$

α el ángulo oblicuo de la hélice, la pendiente b/a es igual a $\tan \alpha$ y

- 10 De acuerdo con la reivindicación 1 anexa, la "primera longitud" corresponde a un estado contraído del filamento de SMM y la "segunda longitud" corresponde a un estado extendido del filamento. Por lo tanto, debe entenderse que la primera longitud es más pequeña que la segunda longitud. De hecho, la extensión y la contracción son tipos de deformación lineal, y las dos expresiones "contraído" y "extendido" en las reivindicaciones deben entenderse como una referencia a la contracción y extensión longitudinales (o axiales).

- 15 Los inventores observaron una serie de particularidades de los actuadores SMM en comparación con los actuadores que funcionan en función del CTE (coeficiente de expansión térmica) del material. Específicamente, una de estas particularidades, que generalmente se pasa por alto, es que la tensión axial asociada con el cambio de estado de los materiales con memoria de forma es casi siempre mucho mayor que la relación de cambio de volumen asociada. Una consecuencia de esta particularidad es que un filamento hecha de SMM normalmente exhibe deformación transversal y axial de tipos opuestos durante el cambio de estado. En otras palabras, cuando el filamento de SMM se deforma de tal manera que se vuelve más corta, también se ensancha y, a la inversa, cuando el filamento se alarga, también se vuelve más delgada.

- 25 Cuando un alambre de calefacción se enrolla alrededor de un filamento de SMM de forma que forme una hélice circular, la coexistencia de tensiones transversales y axiales de tipos opuestos puede tener implicaciones útiles. En efecto, cuando por ejemplo, el filamento se extiende desde su primera longitud hasta su segunda longitud, por un lado, se vuelve más delgado y la consiguiente disminución del perímetro (o circunferencia) del filamento contribuye a aflojar las vueltas del alambre de calefacción. Por otro lado, el filamento se alarga simultáneamente y el consiguiente aumento del paso (o altura) de la hélice contribuye a apretar las vueltas del alambre de calefacción. En vista de lo anterior, los inventores lograron verificar que, si la pendiente uniforme de la hélice se elige correctamente, los efectos de la deformación axial y transversal sobre la longitud del arco de la hélice se pueden cancelar, evitando que cualquier exposición significativa del alambre de calefacción se tense y, por lo tanto, se esfuerce.

- 30 De acuerdo con la invención, el ángulo oblicuo uniforme se selecciona para evitar cualquier cambio sustancial de la longitud del arco de la hélice circular causado por el filamento de SMM que se extiende desde la primera longitud a la segunda longitud o se contrae desde la segunda longitud a la primera longitud. Una ventaja que ofrece esta característica es que el alambre de calefacción no sufre una tensión significativa sea cual sea el cambio de longitud del filamento de material con memoria de forma (SMM). Esta ausencia de tensiones significativas aumenta considerablemente la vida útil del sistema de calefacción.

De acuerdo con la invención, la magnitud de la pendiente uniforme de la hélice circular está comprendida entre 0.62 y 0.76 cuando la longitud variable del filamento de SMM es igual a la primera longitud.

Breve descripción de los dibujos

- 40 Otras características y ventajas de la presente invención aparecerán con la lectura de la siguiente descripción, dada únicamente a título de ejemplo no limitativo, y realizada con referencia a los dibujos anexos, en los que:
- la figura 1A es una vista en perspectiva desde el lateral del interior de un actuador SMM de acuerdo con una primera realización particular de la invención;
 - la figura 1B muestra el actuador SMM de la figura 1A en sección transversal longitudinal;
 - 45 – la figura 2 es una vista en perspectiva que muestra una barra de SMA y cuatro alambres de calefacción conectados en paralelo y enrollados alrededor de la barra de manera que formen una hélice cuádruple;
 - las figuras 3A y 3B son dos diagramas que ilustran cómo los efectos conjugados de la deformación axial de un tipo y de la deformación transversal del tipo opuesto pueden dar como resultado que la longitud del arco de la hélice permanezca constante;
 - 50 – las figuras 4A y 4B son ilustraciones esquemáticas que muestran cómo se puede conectar el alambre de calefacción a una fuente de alimentación de acuerdo con una segunda realización particular de la invención;
 - la figura 5A es una vista parcial en perspectiva que muestra la interfaz mecánica y eléctrica entre los extremos fijos de una pluralidad de barras de SMA y una estructura de soporte de acuerdo con una tercera realización particular de la invención;

- la figura 5B es una vista en perspectiva que muestra la interfaz mecánica y eléctrica de la figura 5A con la capa superior de aislante térmico y eléctrico retirada para mostrar el circuito impreso;
- la figura 6A es una vista en perspectiva del extremo anterior del tubo impulsor del mecanismo biestable de un actuador SMM de acuerdo con una cuarta realización particular de la invención;
- 5 – la figura 6B es una vista en perspectiva de la tapa del bastidor del mecanismo biestable de un actuador SMM de acuerdo con la cuarta realización particular;
- la figura 6C es una vista en perspectiva del rotor del mecanismo biestable de un actuador SMM de acuerdo con la cuarta realización particular;
- 10 – las figuras 7A a 7H muestran ocho configuraciones tomadas sucesivamente por un mecanismo biestable durante su funcionamiento cíclico, siendo el mecanismo biestable parte de un actuador de acuerdo con la cuarta realización particular de la invención.

Descripción detallada de una realización ejemplar

15 Las Figuras 1A y 1B son ilustraciones de un actuador de acuerdo con un ejemplo de realización de la invención. De acuerdo con la invención, el actuador comprende al menos un filamento de material con memoria de forma (SMM) que tiene una deformación predeterminada desde un estado sin deformar y que vuelve al estado sin deformar cuando se calienta a una temperatura predeterminada. En el ejemplo ilustrado, el actuador (generalmente denominado 100) en realidad consta de ocho filamentos de SMM, y cada filamento consiste en una barra cilíndrica de 1 mm de diámetro hecha de un solo cristal de aleación con memoria de forma (SMA) de Cu-Al-Ni. En la presente descripción, las barras de SMA generalmente se denominan 10, y las barras individuales se distinguen entre sí mediante el uso de una letra adjunta. De acuerdo con lo anterior, las seis barras individuales visibles en la figura 1A se denominan 10a, 10b, 10c, 20 10d, 10e y 10f respectivamente. Las ocho barras de SMA del actuador están dispuestas en paralelo y se mantienen en su lugar en cada extremo mediante dos interfaces mecánicas en forma de anillo (referenciadas 12 y 14 respectivamente). Los extremos de las barras están unidos a las dos interfaces en forma de anillo de tal manera que definen dos círculos primitivos, a lo largo de los cuales los extremos de las barras están separados regularmente.

25 Una primera 12 de las dos interfaces mecánicas está fijada a un bastidor de soporte del actuador. De acuerdo con lo anterior, los extremos de las barras 10 que están unidos a la primera interfaz 12 mecánica se denominan extremos fijos de las barras. En el extremo opuesto, la segunda interfaz 14 mecánica es móvil, y forma parte de un mecanismo dispuesto para ser accionado por las barras de SMA (dicho mecanismo se describirá más adelante). Los extremos de las barras que se unen a la interfaz 14 mecánica móvil se denominan extremos móviles de las barras.

30 La segunda interfaz 14 mecánica lleva un tubo 20 impulsor cilíndrico referenciado. El tubo impulsor se fija rígidamente a la interfaz 14 móvil y se extiende hacia la interfaz 12 mecánica fija, en paralelo con las barras 10 SMA. El eje longitudinal del tubo 20 impulsor está alineado con los centros de los dos círculos de paso. Las barras 10 de aleación con memoria de forma están dispuestas para accionar el tubo 20 impulsor cuando recuperan su estado sin deformar. En el presente ejemplo, las barras son más cortas en su estado no deformado que en su estado deformado. La transición de forma térmica del SMA hace que el tubo 20 impulsor se mueva axialmente hacia el extremo frontal de la carcasa 110 del actuador (el extremo frontal está en el lado derecho en las figuras 1A y 1B). Una vez que las barras de SMA se han utilizado por primera vez para accionar el tubo 20 impulsor, deben someterse a tensión para que recuperen su deformación predeterminada antes de que puedan utilizarse una segunda vez. Esta operación se llama "Reinicio". El esfuerzo necesario para el reinicio lo proporciona un resorte 38 de reinicio. Refiriéndonos más particularmente a la figura 1B, se puede observar que el resorte de reinicio es un resorte helicoidal que rodea el tubo 40 20 impulsor y se mantiene en su lugar en el extremo frontal por un tope anular fijo proporcionado por una tapa 42 de bastidor en forma de cubo, y lleva contra la interfaz 14 mecánica en su extremo posterior. La tapa 42 del bastidor comprende una abertura axial a través de la cual puede pasar el tubo 20 impulsor.

45 De acuerdo con la invención, el actuador 100 comprende además medios eléctricos para calentar dicho al menos un filamento. Los medios eléctricos comprenden al menos un alambre de calefacción que se enrolla alrededor del filamento de forma que forma una hélice circular. En el ejemplo ilustrado, cuatro alambres 16a, 16b, 16c, 16d de calefacción (figura 2) están enrollados alrededor de cada una de las barras 10 SMA. La figura 2 es una vista en perspectiva que muestra una de las barras de SMA (referencia 10) del actuador 100. De acuerdo con la realización ilustrada, los cuatro alambres de calefacción están conectados en paralelo y están dispuestos para formar un conjunto de hélices circulares congruentes que tienen el mismo eje. El uso de cuatro alambres de calefacción conectados en paralelo en lugar de utilizar un único alambre de calefacción pretende aumentar la redundancia de los medios de calefacción. De hecho, si sólo se enrollara un único alambre de calefacción alrededor de cada barra 10 SMA, la rotura del alambre de calefacción daría como resultado que la barra de SMA quedara fuera de servicio. Por el contrario, el actuador 100 ilustrado puede sobrevivir a la rotura de varios alambres de calefacción. En el presente ejemplo, los alambres 16a, 16b, 16c, 16d, de calefacción enrollados alrededor de las barras de SMA están hechos de NiCr de alta resistencia. 55

60 Como la aleación Cu-Al-Ni de las barras 10 tiene una alta conductividad, es necesario proporcionar aislamiento eléctrico entre los alambres 16a, 16b, 16c, 16d de calefacción y la barra de SMA. De acuerdo con lo anterior, en el presente ejemplo, los alambres de calefacción están aislados entre sí, así como de la barra de SMA, por medio de películas delgadas de poliimida. Las películas de poliimida también sirven para fusionar los cuatro alambres de calefacción en una cinta 16 de calefacción. De acuerdo con lo anterior una realización preferida, se utiliza además un

elastómero térmicamente conductor y eléctricamente aislante para mejorar el contacto térmico y mecánico entre las cintas de calefacción y las barras de SMA (el elastómero se muestra en las figuras 4A y 4B en las que se hace referencia a 18). Con referencia nuevamente a la figura 2, se puede observar que la barra 10 SMA ilustrada está equipada con piezas 22 de extremo provistas para unir cada extremo de la barra a una de las dos interfaces 12, 14 mecánicas. Como se muestra, las piezas 22 de extremo pueden tener la forma de pequeños cubos con una cabeza ancha y una proyección cilíndrica de menor diámetro en la que se inserta un extremo de una barra de SMA.

Las Figuras 3A y 3B son dos pares de diagramas esquemáticos que muestran una vuelta de la hélice circular formada por el alambre de calefacción enrollado alrededor del filamento de SMM del actuador de acuerdo con la invención, en el que el segundo diagrama esquemático de cada par representa la hélice desenrollada en un plano tangencial. Como se puede observar, al desenvolver una vuelta de una hélice circular sobre un plano tangente de la hélice se obtiene una línea recta (ángulo constante o uniforme).

De acuerdo con la invención, la longitud del filamento de SMM alrededor del cual se enrolla el alambre de calefacción es variable entre una primera longitud correspondiente a un estado contraído y una segunda longitud correspondiente a un estado extendido. Se entenderá además que cualquier extensión longitudinal del filamento de SMM hará que aumente el paso de la hélice, mientras que cualquier contracción longitudinal hará que el paso de la hélice disminuya. La Figura 3A muestra una vuelta de la hélice circular cuando el filamento de SMM está en su estado contraído y la Figura 3B muestra la misma vuelta de la hélice circular cuando el filamento de SMM está en su estado extendido.

Como se mencionó anteriormente, la hélice circular formada por el alambre de calefacción enrollado se puede describir matemáticamente mediante la siguiente parametrización en coordenadas cartesianas:

$$t \rightarrow (a \cos t, a \sin t, bt)$$

donde a es el radio de la hélice circular y b/a es su pendiente uniforme.

La altura de una vuelta de hélice completa (es decir, el "paso" de la hélice) es igual a $2\pi b$ y la "longitud de arco" de la misma vuelta completa es igual a

$$2\pi \cdot \sqrt{a^2 + b^2}.$$

Los inventores se inspiraron para tratar de encontrar un ángulo oblicuo uniforme para una hélice, o de manera equivalente, una pendiente uniforme para una hélice, de modo que las deformaciones transversales y axiales se cancelen de tal manera que la longitud del arco de la hélice después de la deformación del filamento de SMM es igual a la longitud del arco de la hélice antes de la deformación. La siguiente expresión da el valor de la pendiente de equilibrio para la cual no hay cambio de la longitud del arco en función tanto del alargamiento del filamento de SMM como de su cambio de volumen:

$$b/a = \sqrt[2]{\frac{\epsilon + 1 - \delta}{\epsilon(\epsilon + 1)(\epsilon + 2)}}$$

Donde ϵ es la tensión de alargamiento del filamento de SMM y δ es la relación de cambio de volumen ($\delta = V_{final}/V_{inicial}$).

La derivación de la expresión matemática para la pendiente de equilibrio se da en el Anexo. Además, debe tenerse en cuenta que la pendiente de equilibrio definida anteriormente existe solo si $\delta < \epsilon + 1$, es decir, si la relación de cambio de volumen es menor que la correspondiente relación de contracción o extensión axial.

Con referencia una vez más a las figuras 3A y 3B, se observará que el radio de la hélice que se muestra en la figura 3A es sustancialmente mayor que el radio de la hélice que se muestra en la figura 3B. En otras palabras, el SMM, a partir del cual se fabrica el filamento, es un SMM que exhibe deformación transversal y axial de tipos opuestos. Ahora, refiriéndose simultáneamente a las figuras 3A y 3B, uno puede captar intuitivamente cómo los efectos conjugados de la deformación axial de un tipo y de la deformación transversal del tipo opuesto pueden dar como resultado que la longitud del arco de la hélice permanezca constante.

De acuerdo con la invención, el SMM, a partir del cual se fabrica el filamento, es un SMM que presenta deformación transversal y axial de tipos opuestos durante el cambio de estado, o en otras palabras, la relación de cambio de volumen es menor que la correspondiente relación de contracción o extensión axial ($\delta < \epsilon + 1$). Esta limitación no es problemática ya que la magnitud de la deformación volumétrica en los SMM suele ser considerablemente menor que la magnitud de la deformación axial. Por ejemplo, en el caso del nitinol, se informa que la tensión de transformación volumétrica es de aproximadamente 0.16 %, mientras que la tensión de transformación axial puede llegar al 8.5 %. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la "memoria de forma" se refiere a la propiedad de los SMM de volver a su forma original cuando se calientan a una temperatura predeterminada. Como la transición de forma de SMM es una transición térmica, y el regreso de SMM a su estado no deformado va acompañado de un aumento de la temperatura. La expansión térmica ordinaria también tendrá lugar e influirá en la cantidad real de cambio de volumen.

De acuerdo con la realización de la invención descrita actualmente, en el que el SMM consiste en un SMA basado en Cu-Al (Cu-Al-Ni en particular). En este caso particular, la deformación por transformación volumétrica puede despreciarse y la siguiente expresión da el valor de la pendiente de equilibrio:

$$b/a = \sqrt[2]{\frac{1}{(\epsilon + 1)(\epsilon + 2)}}$$

5 Se comprenderá en particular que la expresión anterior también se aplica al caso en el que el filamento de SMM está hecha de Ni-Ti.

Exactamente cuánta tensión es aceptable para el alambre de calefacción depende del material del que está hecho el alambre de calefacción y, en particular, del coeficiente de expansión térmica del material. El solicitante ha observado que una deformación del 0.2 % es aceptable en el caso de un alambre de calefacción de Ni-Cr. De acuerdo con lo anterior, la magnitud de la pendiente uniforme de la hélice circular formada por el alambre de calefacción debe estar comprendida entre 0.62 y 0.76 cuando la barra de SMA se encuentra en su estado más corto sin deformar.

Los alambres de calefacción deben recibir corriente eléctrica para elevar la temperatura de la barra de SMA por encima de la temperatura de transición. Las figuras 4A y 4B muestran esquemáticamente cómo se pueden conectar los alambres de calefacción a una fuente de alimentación eléctrica. Como se explicó anteriormente, de acuerdo con la realización ilustrada, la cinta 16 de calefacción, que comprende los alambres 16a, 16b, 16c, 16d de calefacción enrollados en películas de poliimida, se envuelve apretadamente alrededor de la barra 10 SMA y, opcionalmente, se une a la superficie de la barra por medio de elastómero termoconductor. En cada uno de sus extremos, la cinta de calefacción comprende una porción terminal corta en la que los alambres 16a, 16b, 16c y 16d de NiCr están expuestos y retorcidos para formar un terminal utilizado para conectar la cinta de calefacción. Como se muestra en la figura 4A, uno de los terminales (referencia 24a) está ubicado cerca del extremo fijo de la barra 10, mientras que el otro alambre (referencia 24b) está ubicado cerca del extremo móvil de la barra.

La conexión del terminal 24a ubicado cerca del extremo fijo a la fuente de alimentación puede ser sencilla. Sin embargo, conectar el terminal 24b ubicado cerca del extremo móvil podría, en principio, requerir el uso de alambres eléctricos móviles. Se comprenderá que tales conexiones flotantes pueden ser perjudiciales para la vida útil de un actuador. Para evitar este problema, el sistema de calefacción del presente ejemplo utiliza la barra 10 SMA como bucle de retorno dispuesto para conducir la corriente eléctrica de vuelta al extremo fijo. De acuerdo con lo anterior, un engarce metálico 26 está ubicado cerca del extremo móvil de la barra y está dispuesto para proporcionar la conexión eléctrica necesaria entre el terminal 24b y la barra 10 SMA. Por otro lado, como se muestra en la figura 4B, el extremo fijo de la barra de SMA está conectado a una de las terminales de la fuente de alimentación, mientras que el terminal 24a está conectado a la otra terminal de la fuente de alimentación. Una disposición de este tipo permite suministrar electricidad a los alambres de calefacción únicamente a través del extremo fijo de la barra.

Cuando la corriente eléctrica pasa a través de los alambres de calefacción, el calor generado por la corriente fluye hacia la barra de SMA a través de la película de poliimida termoconductor. A medida que la temperatura de la barra de SMA comienza a aumentar, una fracción del calor que fluye hacia la barra de SMA no se retiene en la barra, sino que se pierde a través de la disipación térmica. En el espacio, las pérdidas térmicas pueden ser solo de dos tipos, radiativas y conductivas. Las pérdidas térmicas por radiación deben ser sustancialmente las mismas en toda la longitud de la barra. Por el contrario, las pérdidas conductivas deben limitarse a los puntos de contacto mecánico entre las barras de SMA y el resto del actuador. Volviendo una vez más a las figuras 1A y 1B, se puede observar que las barras de SMA están sujetas por sus dos extremos. El contacto mecánico en cualquier extremo es, por lo tanto, el único camino a lo largo del cual puede tener lugar la transferencia de calor por conducción. Con tal disposición, las pérdidas conductivas tienen el potencial de reducir significativamente la temperatura de los extremos de la barra de SMA. Tal gradiente térmico inducirá una reducción de la carrera neta de la barra. De acuerdo con el presente ejemplo, para mejorar la uniformidad de la temperatura a lo largo de la barra, los extremos de la barra están térmicamente aislados del resto del actuador. Este resultado se obtiene disponiendo al menos una capa de material termoaislante entre las barras y la interfaz mecánica.

Las Figuras 5A y 5B muestran cómo una placa de circuito impreso (PCB) de doble capa 28a (hecha de Arlon, por ejemplo) se puede colocar en el extremo fijo de las barras 10 de SMA para proporcionar una capa de material térmicamente aislante para separar térmicamente una pieza 22 final de cada barra de SMA desde la interfaz mecánica fija. El borde exterior de la placa de circuito impreso generalmente en forma de disco 28a comprende ocho muescas 32 separadas regularmente que están adaptadas para recibir la proyección cilíndrica de menor diámetro de una de las piezas 22 de extremo de una barra 10 SMA. En la figura 5B, la capa superior de la placa de circuito impreso de doble capa 28a se ha eliminado para mostrar las pistas 30 conductoras de la placa de circuito impreso. Como se ilustra, cada muesca 32 está rodeada por una pista 30 conductora. Cuando las barras 10 se introducen con sus extremos 22 en las muescas 32 de la PCB, la cabeza de cada uno de los extremos 22 entra en contacto con una de las pistas 30 conductoras. Se puede observar además que el contorno de las pistas 30 conductoras no es simétrico, y que cada pista conductora se extiende una distancia considerable desde un lado de una muesca a lo largo del borde de la PCB en forma de disco. De hecho, cada pista 30 conductora que rodea una muesca 32 particular se detiene justo antes de

unirse con la pista conductora que rodea la siguiente muesca. Cada pista 30 conductora asimétrica que rodea una particular de las muescas 32 está dispuesta para conectar la cabeza de la pieza 22 final que se inserta en esa particular muesca con el terminal 24a de la cinta de calefacción enrollada alrededor de la siguiente barra de SMA. Las cintas de calefacción enrolladas alrededor de las diferentes barras de SMA están así conectadas en serie. Esta disposición reduce la cantidad de corriente eléctrica necesaria para calentar las barras de SMA. Una ventaja de cubrir el exterior de la interfaz 12 mecánica fija con la placa de circuito impreso de doble capa 28a es que proporciona una solución tres en uno. La PCB sirve para aislar térmicamente las barras de SMA del resto del actuador, también sirve para conectar los alambres de calefacción enrollados alrededor de las diferentes barras de SMA al resto de los medios de calefacción, y finalmente la PCB también sirve para posicionar las barras de SMA a lo largo el círculo de tono. Debe entenderse además que, aunque no se muestra en detalle, una capa de material 28b termoaislante (también de Arlon por ejemplo) está dispuesta preferentemente en el extremo móvil de las barras de SMA para separar térmicamente la otra pieza 22 de extremo de cada barra de SMA de la interfaz 14 mecánica móvil. La capa de material 28b aislante sirve para aislar térmicamente las barras de SMA del resto del actuador, y también sirve para posicionar las barras de SMA a lo largo del círculo primitivo en el lado móvil.

Volviendo nuevamente a las figuras 1A y 1B, se puede observar que el actuador 100 comprende una carcasa 110 cilíndrica con un extremo 112 frontal y un extremo 114 posterior. El extremo frontal comprende una abertura central a través de la cual se extiende un extremo de un eje 51 deslizante axial. El extremo sobresaliente del eje 51 deslizante lleva una interfaz 140 de salida mecánica. El extremo 114 posterior de la carcasa también comprende una abertura central y un eje 146 roscado corto se extiende axialmente a través de esta abertura. El eje 146 roscado está unido rígidamente por un extremo al lado posterior de la interfaz 14 mecánica móvil. Por lo tanto, se comprenderá que cualquier cambio en la longitud de las barras de SMA provoca un movimiento del eje 146 roscado en la dirección axial. Todavía con referencia a las figuras 1A y 1B, se puede ver una caja 142 de interruptores eléctricos que está montada en el extremo 114 posterior. Una palanca de interruptor en la caja 142 de interruptores se mantiene en una posición baja mediante un resorte 144 elástico. Se forma un agujero a través de la tira-resorte cerca de un extremo, y la tira doblada se dispone de modo que el eje 146 roscado se extienda a través del agujero. El otro extremo de la tira de resorte doblada está unido a la extremo 114 posterior de la carcasa. Una tuerca 148 ajustable se enrosca adicionalmente en el eje 146.

Cuando la corriente eléctrica fluye a través de los alambres de calefacción, la temperatura de las barras 10 de SMA se eleva por encima de la temperatura de transición, haciendo que el SMA vuelva a su forma original antes del estiramiento. Este proceso hace que las barras de SMA se acorten. Como el eje 146 roscado está rígidamente conectado a los extremos móviles de las barras de SMA, el eje roscado y la tuerca 148 se tiran axialmente en dirección al interior de la carcasa 110. Cuando las barras de SMA se aproximan a su forma de memoria original, la tuerca 148 choca contra el resorte 144 doblado y hace que se doble de tal manera que libere la palanca del interruptor de la caja 142 de interruptor. Al soltar la palanca del interruptor, se interrumpe el flujo de corriente eléctrica a través de los alambres de calefacción. De esta forma, el interruptor puede cortar la alimentación eléctrica cuando el SMA haya completado su cambio de forma.

El actuador del presente ejemplo también está equipado con un tope mecánico dispuesto para evitar el estiramiento excesivo de las barras 10 de SMA durante el reinicio. De acuerdo con el ejemplo ilustrado, el tope mecánico es un anillo 152 de acero inoxidable templado encajado en la abertura central en el extremo 114 posterior de la carcasa. El anillo de acero inoxidable endurecido y la interfaz mecánica móvil tienen forma complementaria. Cuando las barras del SMA se han estirado hasta su longitud deformada predeterminada por la acción del resorte 38 de reinicio, la interfaz mecánica se apoya contra el tope mecánico, protegiendo así al SMA contra la sobretensión.

Los elementos del actuador 100 que se han descrito hasta ahora constituyen en su conjunto un actuador SMA monoestable, es decir, capaz de operar en empuje cuando se alimenta eléctricamente, pero no capaz de mantener la posición alcanzada una vez que se corta la alimentación. La siguiente sección describe un mecanismo biestable que está dispuesto para ser accionado por el tubo 20 impulsor y para accionar el eje 51 deslizante mencionado anteriormente, cuyo extremo frontal está equipado con la interfaz 140 de salida mecánica. El eje deslizante tiene una forma generalmente cilíndrica y se extiende a lo largo del eje geométrico principal del actuador. Por lo tanto, uno comprenderá que el eje 51 deslizante y el tubo 20 impulsor están ambos alineados concéntricamente con los centros de los círculos de paso en las interfaces 12, 14 mecánicas. Con referencia en particular a la vista en sección transversal de la figura 1B, se puede ver que el tubo 20 impulsor es hueco y que una porción posterior del eje 51 deslizante se inserta de forma deslizante en el tubo hueco.

Todavía con referencia a la figura 1B, se observará que el eje 51 deslizante comprende un tope 55 anular dispuesto para cooperar con un extremo de un resorte 56 de compresión helicoidal que rodea una parte frontal del eje deslizante y se apoya en su otro extremo contra un tope 57 anular fijo en forma de cubo enchufado en la abertura central del extremo 112 anterior de la carcasa del actuador 100. El tope anular fijo comprende una abertura axial a través de la cual el eje 51 deslizante puede pasar con poco juego. Como se explicará con más detalle más adelante, el mecanismo biestable está adaptado para controlar el eje deslizante de tal manera que lo desplace axialmente en cualquier dirección entre dos posiciones estables. Para distinguir entre las dos posiciones axiales estables, nos referiremos a aquella en la que la interfaz 140 de salida mecánica está más alejada de la carcasa 110 como la "posición extendida", y nos referiremos a la otra posición como la "posición retraída". El desplazamiento del eje 51 deslizante a la posición

extendida se efectúa contra la acción del resorte 56 de compresión, y el desplazamiento del eje deslizante de regreso a la posición retraída se realiza bajo la acción de la presión del resorte 56.

El mecanismo biestable comprende además un rotor 65 (mostrado con más detalles en la figura 6c). El rotor consiste en un cilindro hueco que está montado concéntricamente sobre el eje 51 deslizante y está dispuesto para apoyarse contra la porción posterior del tope 65 anular. La cara exterior cilíndrica del rotor 65 está provista de seis ranuras 67 que se extienden longitudinalmente separadas regularmente alrededor del eje del rotor. Además, la cara de extremo posterior del rotor 65 está formada por doce dientes 79 triangulares, cada uno de los cuales tiene un flanco delantero inclinado más pronunciadamente que un flanco posterior. Cabe señalar finalmente que cada una de las ranuras 67 coincide con el extremo inferior del flanco delantero de uno de los dientes.

El diámetro del rotor 65 es tal que teóricamente el rotor puede pasar a través de la abertura cilíndrica en la tapa 42 del bastidor con poco juego. Sin embargo, la abertura cilíndrica está provista internamente de seis chavetas radiales o nervaduras 82 colocadas a 60° entre sí. Estas chavetas tienen una altura tal que pueden impedir que el rotor 65 se deslice dentro de la abertura cilíndrica. Sin embargo, cuando las chavetas 82 están alineadas con las ranuras 67 del rotor, el rotor puede deslizarse hacia la abertura y se apreciará que las ranuras 67 se extienden desde los extremos inferiores de los flancos delanteros de los dientes 79 alternos.

El extremo delantero del tubo 20 impulsor tiene el mismo diámetro que el rotor 65. Además, la cara del extremo delantero del tubo 20 impulsor está formada con dientes que son iguales en número y del mismo carácter que los dientes formados en la cara del extremo posterior del rotor, y la cara exterior cilíndrica de una parte del extremo del tubo 20 impulsor está provisto de seis ranuras 86 que se extienden longitudinalmente del mismo carácter que las ranuras 67 formadas en los lados del rotor 65. Al cooperar con las chavetas 82, las ranuras 86 que se extienden longitudinalmente del tubo 20 impulsor permiten que este último se deslice dentro de la tapa 42 del bastidor, pero evitan que la tapa del bastidor gire con respecto al tubo impulsor.

A continuación se describirá el funcionamiento del mecanismo biestable con referencia a las figuras 7A a 7H. Cuando las chavetas 82 de la tapa 42 del bastidor se enganchan en las ranuras 67 del rotor 65, mientras que las barras de SMA no aplican tracción a la interfaz 14 mecánica móvil y al tubo 20 impulsor, la presión del resorte 56 de compresión helicoidal insta el eje 51 deslizante axialmente hasta que los flancos posteriores de los dientes del rotor 65 lleguen finalmente a descansar sobre los flancos de los dientes del tubo 20 impulsor. En esta posición (Figura 7A), el mecanismo biestable se encuentra en su estado estable que corresponde a la posición retraída del eje 51 deslizante. Si ahora las barras de SMA se calientan por encima de la temperatura de transición, el cambio de forma hará que el tubo 20 impulsor se mueva axialmente hacia adelante. Como el rotor descansa sobre los flancos de los dientes del tubo impulsor, el rotor 65 y el eje 51 deslizante serán empujados axialmente hacia adelante, contra la acción del resorte 56 de compresión helicoidal (Figura 7B). El movimiento hacia adelante del rotor 65 finalmente hace que las ranuras 67 se desprendan completamente de las chavetas 82. En esta posición (Figura 7C), el mecanismo biestable se encuentra en un estado transitorio que corresponde a la posición de carrera máxima del eje deslizante 51. Entonces, el rotor puede girar libremente, y los flancos inclinados de los dientes del rotor pueden deslizarse contra los flancos posteriores de los dientes del tubo 20 impulsor mientras el rotor pivota hasta que los dos juegos de dientes opuestos están en una posición completamente anidada. En este punto (figura 7D), la posición angular del rotor 65 es tal que las chavetas 82 miran hacia las porciones superiores de los flancos posteriores de sus dientes. Si ahora se apagan los medios de calentamiento para las barras de SMA, las barras se enfriarán gradualmente y se restablecerán a su estado de deformación predeterminado mediante el resorte 38 de restablecimiento. El nuevo cambio de forma hará que el tubo 20 impulsor se mueva axialmente hacia atrás. A medida que el tubo impulsor se retrae, la presión del resorte 56 de compresión helicoidal empuja al rotor en la misma dirección. Sin embargo, las ranuras 67 ya no están en línea con las chavetas 82 y, por lo tanto, el rotor se apoya contra la tapa 42 del bastidor con los flancos posteriores de sus dientes apoyados contra las chavetas 82. Como el rotor aún puede girar libremente, los flancos de arrastre de los dientes del rotor pueden deslizarse contra las chavetas de la tapa del bastidor mientras el rotor pivota una vez más, hasta que las chavetas descansan en la parte inferior de los flancos. En esta posición (Figura 7E), el mecanismo biestable se encuentra en su estado estable que corresponde a la posición extendida del eje 51 deslizante. Si ahora las barras de SMA se calientan de nuevo por encima de la temperatura de transición, el cambio de forma hará que el tubo 20 impulsor se mueva axialmente hacia adelante una vez más, y los flancos de los dientes del tubo impulsor eventualmente descansen sobre los flancos posteriores de los dientes del rotor 65 (Figura 7F). A partir de ahí, los flancos de salida de los dientes del rotor pueden deslizarse contra los flancos inclinados de los dientes del tubo 20 impulsor mientras el rotor pivota hasta que los dos dientes opuestos vuelven a estar completamente anidados (Figura 7G). Si ahora se desconectan los medios de calentamiento para las barras de SMA, las barras se enfriarán gradualmente haciendo que el tubo 20 impulsor se mueva axialmente hacia atrás. A medida que el tubo impulsor se retrae, la presión del resorte 56 de compresión helicoidal empuja al rotor en la misma dirección. Sin embargo, las ranuras 67 aún no están alineadas con las chavetas 82 y el rotor está retenido con los flancos posteriores de sus dientes apoyados contra las chavetas 82 (Figura 7H). Como el rotor todavía puede girar libremente, los flancos de arrastre de los dientes pueden deslizarse contra las chavetas de la tapa del bastidor mientras el rotor pivota una vez más, hasta que las chavetas 82 estén nuevamente alineadas con las ranuras 67 del rotor (Figura 7A).

Se entenderá que se podrían realizar diversas alteraciones y/o mejoras evidentes para los expertos en la materia a las realizaciones objeto de esta descripción sin apartarse del alcance de la presente invención definido por las reivindicaciones adjuntas.

Anexo:

Derivación de la expresión matemática

La hélice circular formada por el alambre de calefacción enrollado se puede describir matemáticamente mediante la siguiente parametrización en coordenadas cartesianas:

$$5 \quad t \rightarrow (a \cos t, a \operatorname{sen} t, bt)$$

donde a es el radio de la hélice circular y b/a es su pendiente uniforme.

La altura de una vuelta de hélice completa (es decir, el "paso" de la hélice) es igual a $2\pi b$ y la "longitud de arco" de la misma vuelta completa es igual a

$$2\pi \cdot \sqrt{a^2 + b^2}.$$

10 Los inventores se inspiraron para tratar de encontrar un ángulo oblicuo uniforme para una hélice, o de manera equivalente, una pendiente uniforme para una hélice, de modo que las deformaciones transversales y axiales se cancelen de tal manera que la longitud del arco de la hélice después de la deformación del filamento de SMM es igual a la longitud del arco de la hélice antes de la deformación.

Si ε es la deformación por alargamiento del filamento de SMM, podemos escribir:

$$15 \quad L_{final} = L_{inicial}(1 + \varepsilon) \quad (i)$$

donde L es la longitud del filamento de SMM;

y si V es el volumen del filamento de SMM, podemos escribir:

$$V_{inicial} = L_{inicial} \cdot 2\pi r_{inicial}^2 \quad (ii)$$

y si δ es la relación de cambio de volumen ($\delta = V_{final}/V_{inicial}$), también podemos escribir:

$$20 \quad V_{final} = V_{inicial} \cdot \delta = L_{inicial} \cdot (1 + \varepsilon) \cdot 2\pi r_{final}^2 \quad (iii)$$

Ahora, la combinación de (ii) y (iii) conduce a:

$$r_{final}^2 = \frac{\delta}{1 + \varepsilon} \cdot r_{inicial}^2 \quad (iv)$$

Si el radio de la hélice circular aumenta y disminuye junto con el radio del filamento de SMM, (iv) implica que:

$$a_{final}^2 = \frac{\delta}{1 + \varepsilon} \cdot a_{inicial}^2 \quad (v)$$

25 y si el paso de la hélice circular aumenta y disminuye junto con la longitud L del filamento de SMM, (i) implica que:

$$b_{final}^2 = (1 + \varepsilon)^2 \cdot b_{inicial}^2 \quad (vi)$$

Ahora, si la longitud del arco de la hélice circular permanece constante,

$$2\pi \cdot \sqrt{a_{inicial}^2 + b_{inicial}^2} = 2\pi \cdot \sqrt{a_{final}^2 + b_{final}^2} \quad (vii)$$

lo que implica que:

$$30 \quad a_{inicial}^2 + b_{inicial}^2 = a_{final}^2 + b_{final}^2 \quad (viii)$$

Combinando (viii) con (v) y (vi), podemos escribir además:

$$a_{inicial}^2 + b_{inicial}^2 = \frac{\delta}{1 + \varepsilon} \cdot a_{inicial}^2 + (1 + 2\varepsilon + \varepsilon^2) \cdot b_{inicial}^2 \quad (ix)$$

Finalmente, (ix) se reduce a:

$$b/a = \sqrt[2]{\frac{\varepsilon + 1 - \delta}{\varepsilon(\varepsilon + 1)(\varepsilon + 2)}}$$

35 donde b/a es la pendiente uniforme de la hélice circular

REIVINDICACIONES

1. Un actuador (100) que comprende:

- 5 al menos un filamento (10a, 10b, 10c, 10d, 10e, 10f) de material con memoria de forma (SMM) y de longitud variable entre una primera longitud correspondiente a un estado contraído del filamento de SMM y una segunda longitud correspondiente a un estado extendido del filamento de SMM, uno de los estados contraído y extendido es un estado no deformado y el otro implica una deformación longitudinal predeterminada del filamento de SMM desde el estado no deformado, en el que el filamento de SMM está dispuesto para volver al estado no deformado desde el estado que implica una deformación longitudinal predeterminada cuando se calienta a una temperatura predeterminada, el filamento de SMM comprende un extremo fijo unido a una interfaz (12) mecánica fija de una estructura de soporte, y un extremo móvil unido a una interfaz (14) mecánica móvil entre la primera y la segunda posiciones de tal manera que la interfaz móvil puede moverse desde una de las posiciones primera y segunda hasta la otra cuando la longitud variable del filamento de SMM cambia de una de las longitudes primera y segunda a la otra del mismo, medios (16a, 16b, 16c, 16d, 24a, 24b, 26) eléctricos para calentar dicho filamento (10a, 10b, 10c, 10d, 10e, 10f) que comprende al menos un alambre (16a, 16b, 16c, 16d) de calefacción enrollado alrededor del filamento;
- 15 caracterizado porque el alambre (16a, 16b, 16c, 16d) de calefacción enrollado forma una hélice circular, cuyo paso está dispuesto para aumentar junto con la longitud del filamento cuando la longitud del filamento cambia desde la primera longitud hasta la segunda longitud, y está dispuesto para disminuir junto con la longitud del filamento cuando la longitud del filamento cambia desde la segunda longitud hasta la primera longitud, y porque la hélice circular tiene una pendiente uniforme (b/a) comprendida en el rango entre 0.62 y 0.76, preferentemente en el rango entre 0.625 y 0.73, cuando la longitud del filamento (10a, 10b, 10c, 10d, 10e, 10f) de SMM es la primera longitud, de manera que cualquier cambio de la longitud del arco de la hélice circular causada por el filamento (10a, 10b, 10c, 10d, 10e, 10f) de SMM que se extiende desde la primera longitud hasta a la segunda longitud, o se contrae desde la segunda longitud hasta la primera longitud, asciende a no más de 0.2 %.
- 25 2. El actuador de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el filamento (10a, 10b, 10c, 10d, 10e, 10f) está hecho de una aleación de metal con memoria de forma (SMA) conductora de electricidad, en el que un primer extremo (24b) del alambre (16a, 16b, 16c, 16d) de calefacción está conectado eléctricamente al filamento cerca del extremo móvil, el extremo fijo del filamento está conectado a uno de los polos de una fuente de alimentación, y en el que el segundo extremo (24a) del alambre de calefacción está conectado al otro polo de la fuente de alimentación.
- 30 3. El actuador de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en el que los medios (16a, 16b, 16c, 16d, 24a, 24b, 26) de calefacción eléctrica comprenden una pluralidad de alambres (16a, 16b, 16c, 16d) de calefacción conectados en paralelo y forman un conjunto de hélices circulares congruentes que tienen el mismo eje.
4. El actuador de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1, 2 y 3, en el que comprende una pluralidad de filamentos (10a, 10b, 10c, 10d, 10e, 10f) SMM dispuestos en paralelo, cada filamento comprende un extremo fijo unido a la interfaz (12) mecánica fija y un extremo móvil unido a la interfaz (14) mecánica móvil.
- 35 5. El actuador de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que comprende un mecanismo biestable dispuesto para convertir los movimientos hacia atrás y hacia adelante de la interfaz (14) mecánica móvil entre la primera y la segunda posición en desplazamientos de una interfaz (140) mecánica de salida en una u otra dirección entre dos posiciones estables distintas.
- 40 6. El actuador de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los medios (16a, 16b, 16c, 16d, 24a, 24b, 26) eléctricos para calentar el filamento (10a, 10b, 10c, 10d, 10e, 10f) comprenden un interruptor (142) dispuesto de tal manera que apague los medios eléctricos una vez que el filamento de SMM ha vuelto al estado no deformado desde el estado de deformación longitudinal predeterminada.
- 45 7. El actuador de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que comprende un tope (152) mecánico contra el cual se dispone un elemento de tope de la interfaz (14) mecánica móvil para apoyarse cuando el filamento de SMM ha alcanzado su deformación longitudinal predeterminada desde el estado no deformado cuando la hebra SMM ha alcanzado su deformación longitudinal predeterminada desde el estado no deformado.
8. El actuador de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que una primera pieza de material (28a) térmicamente aislante está intercalada entre el extremo fijo del filamento (10) de SMM y la interfaz (12) mecánica fija, y una segunda pieza de material (28b) térmicamente aislante se intercala entre el extremo móvil y la interfaz (14) mecánica móvil.
- 50 9. El actuador de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el SMM es Cu-Al-Ni.
10. El actuador de acuerdo con la reivindicación 9, en el que el filamento SMA está hecha de un solo cristal de Cu-Al-Ni.
11. El actuador de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que el SMM es Ni-Ti.

12. El actuador de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el alambre de calefacción está hecho de Ni-Cr.

Fig. 1A

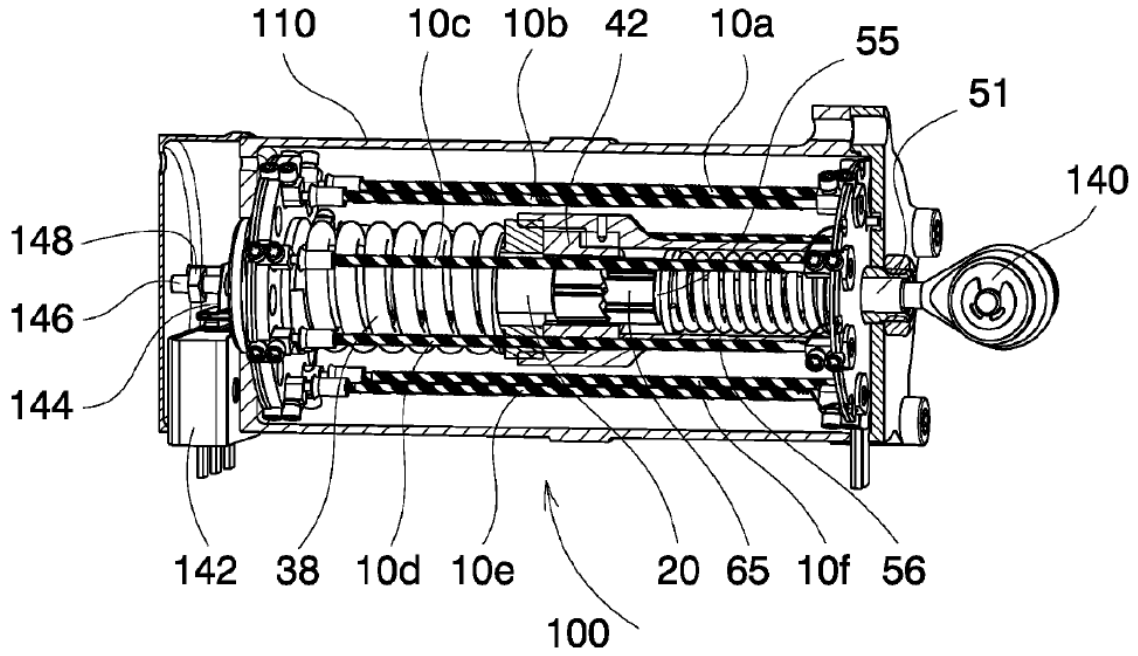
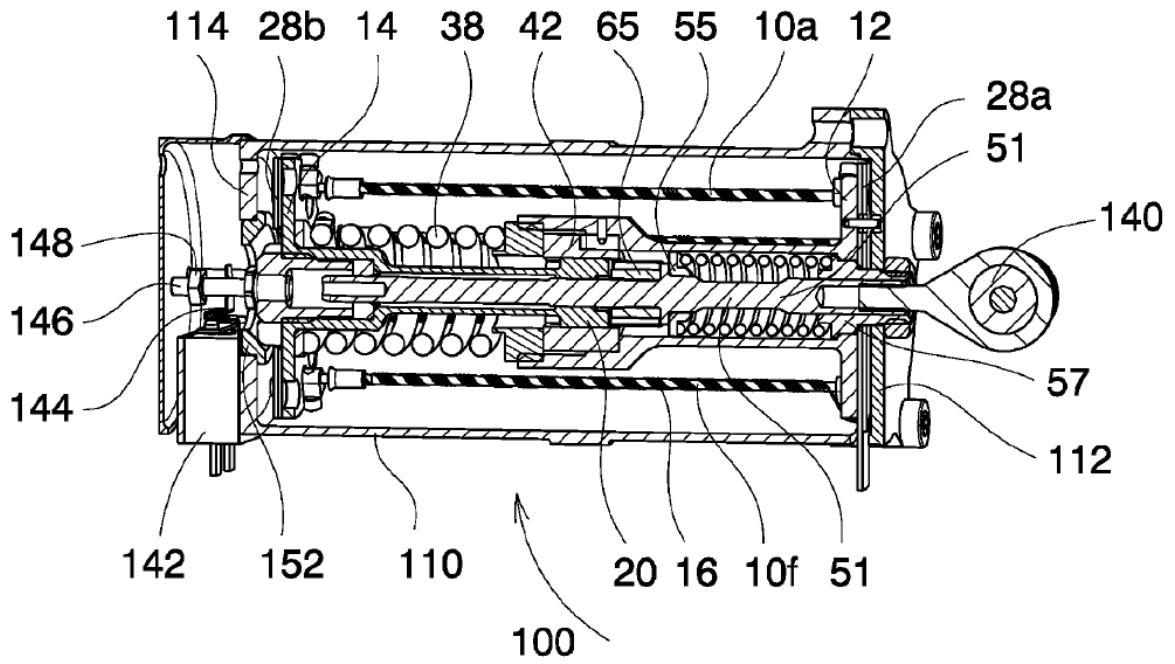


Fig. 1B



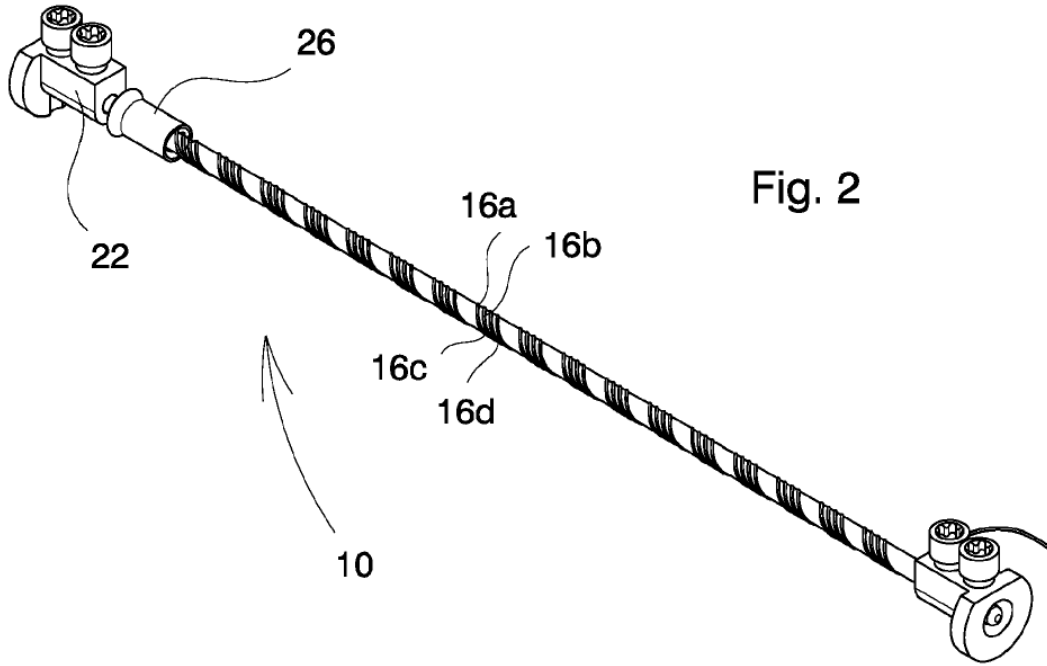


Fig. 3A

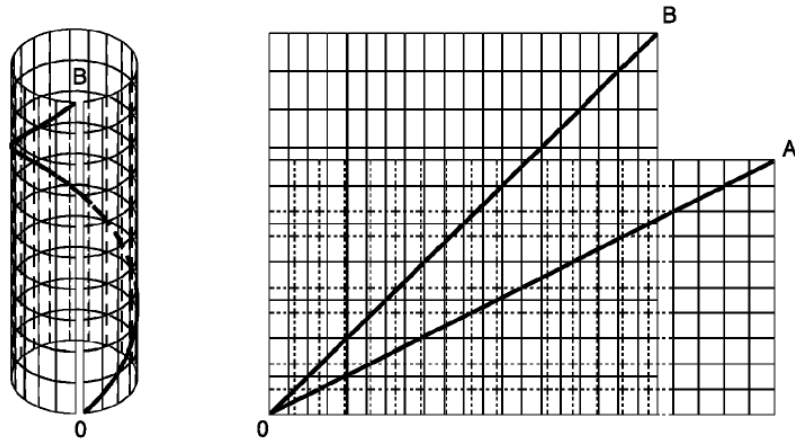
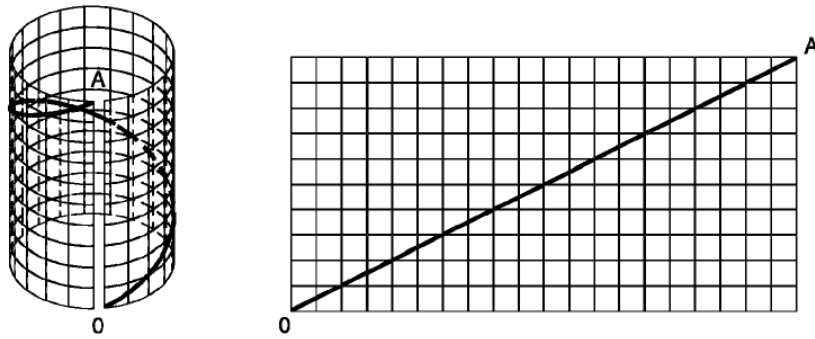


Fig. 3B

Fig. 4A

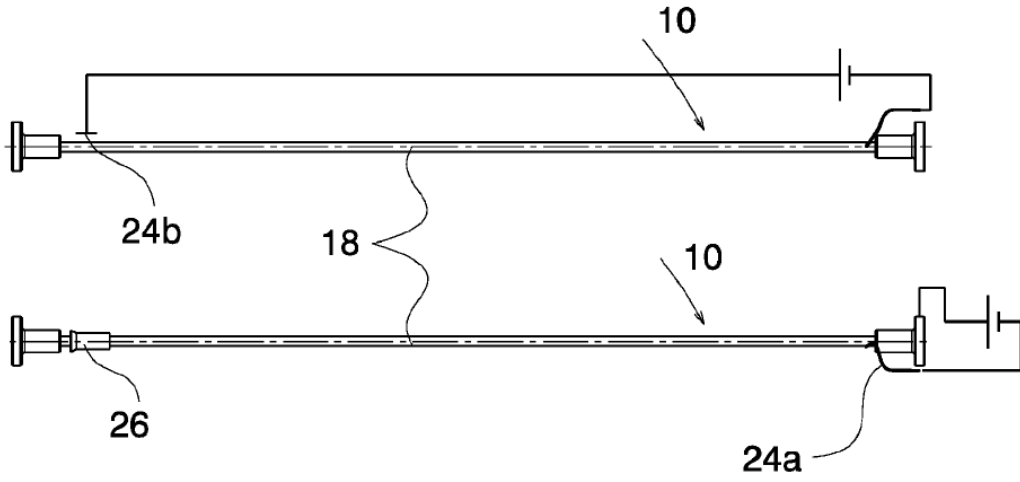


Fig. 4B

Fig. 5A

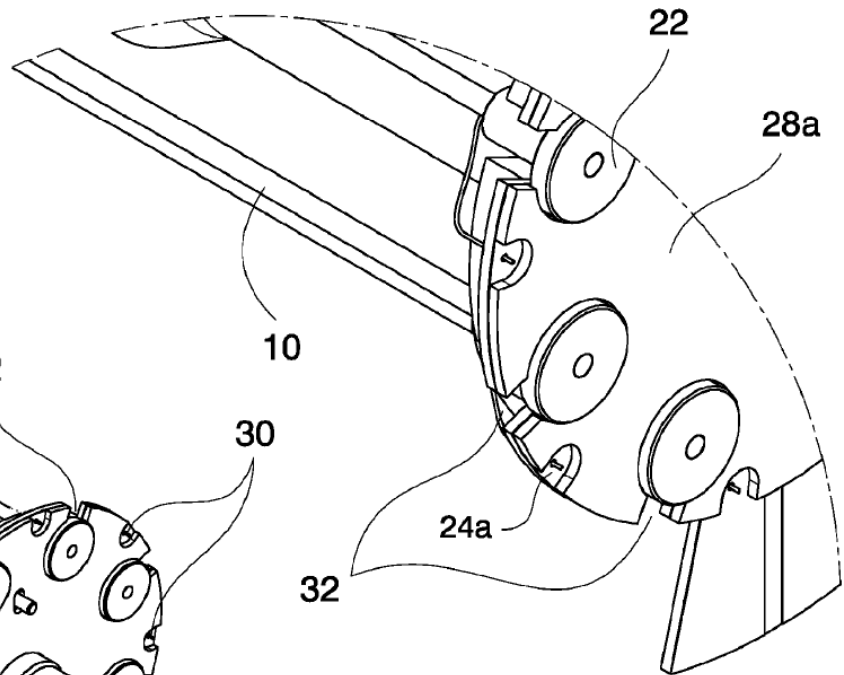


Fig. 5B

