

MATERIALES COMPUESTOS INTELIGENTES

RESUMEN

Los compuestos inteligentes son materiales que por su microestructura pueden comportarse como sensores, actuadores y controladores. Este artículo presenta algunos compuestos inteligentes típicos, así como sus funciones y aplicaciones. También, se estudian las tendencias actuales de investigación en este campo.

PALABRAS CLAVES: Aleaciones con memoria de forma, piezoeléctricos.

ABSTRACT

A smart composite is a material that inherently contains actuating, sensing and controlling capabilities built into its microstructure. This article presents some typical smart composites, as well as their functions and applications. Also, the current trends of research in this area are reviewed.

KEYWORDS: Shape memory alloys, piezoelectric materials.

1. INTRODUCCIÓN

Los *compuestos* son materiales que aprovechan las propiedades de dos o más materiales (metales, cerámicos y plásticos) que, al ser combinados (insolublemente) y unidos de ciertas maneras y en proporciones adecuadas, forman un nuevo material con propiedades diferentes a las de los constituyentes. Así, pueden lograrse combinaciones de propiedades que son difíciles de obtener en materiales convencionales, tal como gran tenacidad y alta resistencia a la tracción. Generalmente, los constituyentes se combinan en dos fases tal que las debilidades de uno de ellos se compensan con las fortalezas del otro, mejorando el desempeño global. Por ejemplo, un polímero puede reforzarse con fibras de vidrio para obtener resistencia y rigidez adecuadas, manteniéndose un bajo peso (debido a su baja densidad).

Un compuesto puede ser 'inteligente', para lo cual, es necesario usar materiales 'inteligentes', que se introducen en la estructura como aparatos o en fibras. Un *material* inteligente es un material estructural que intrínsecamente (por su microestructura) tiene la capacidad de actuar, sentir y controlar [1]. Similarmente, un *sistema* (o estructura) inteligente es un ensamble que presenta las mismas características, mediante la combinación de dos o más materiales [1]. Un sistema inteligente incluye sensores y actuadores, los cuales producen cambios de forma, características mecánicas, posición o frecuencia natural cuando hay un cambio de temperatura, de campo magnético o eléctrico, y procesadores de tiempo real, que pueden controlar el sistema. Por lo tanto, los materiales compuestos inteligentes son compuestos capaces de sensar cambios en el medio circundante y responder a ellos de una manera predeterminada.

Fecha de recepción: 27 de mayo de 2004
Fecha de aceptación:

LUZ STELLA ARIAS MAYA

Ingeniera Mecánica
Estudiante de Maestría
School of Engineering
University of Surrey
stellarias@hotmail.com

LIBARDO VANEGAS USECHE

Ingeniero Mecánico, M.Sc.
Profesor Asistente
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
lvanegas@utp.edu.co

En este artículo se describen algunas características, funciones y aplicaciones de materiales compuestos inteligentes. En la sección 2 se describen los materiales inteligentes. Luego se describen los compuestos inteligentes, desde la perspectiva de sus funciones. En la sección 4 se describen con cierto detalle dos casos típicos. Se presenta, también, una revisión de las tendencias actuales de investigación en este campo.

2. MATERIALES INTELIGENTES

Los materiales inteligentes, denominados también multifuncionales, son aquellos que tienen la capacidad de cambiar sus propiedades mecánicas o físicas en presencia de un estímulo concreto [2]. Aunque todavía no existe un consenso sobre los límites exactos entre materiales inteligentes y los que no lo son, se acepta que ellos poseen ciertas características, las cuales se describen en la siguiente definición de sistema inteligente [2]:

Sistema o material que presenta sensores, 'actuadores' y mecanismos de control, intrínsecos o embebidos, por los cuales es capaz de sentir un estímulo, de responder ante él de una forma predeterminada en un tiempo apropiado y de volver a su estado original tan pronto como el estímulo cesa.

Los materiales inteligentes más comunes pueden clasificarse en [2]:

- Materiales con memoria de forma
- Materiales electro y magnetoactivos
- Materiales foto y cromoactivos

2.1. Materiales con memoria de forma

El efecto de memoria de forma consiste en una relación causa-efecto entre la deformación (cambio de forma) y un estímulo externo, por ejemplo, cambio de temperatura o de campo magnético.

Los materiales con memoria de forma pueden ser: aleaciones, polímeros o cerámicas con memoria de forma y aleaciones ferromagnéticas con memoria de forma. De estos materiales, los más comunes parecen ser las aleaciones con memoria de forma (aquí se simplificará como AMF), las cuales son metales que además del efecto de memoria, tienen la propiedad de pseudo-elasticidad. Después de ser deformadas mediante carga, las AMF pueden recuperar su forma o configuración original cuando se someten a un pequeño cambio de temperatura (unos 10°C), el cual produce un cambio de fase de estado sólido (ver figura 1). Aparecen dos fases, la martensita y la austenita. La martensita, que es relativamente suave, existe a bajas temperaturas. La austenita es más dura y aparece a una temperatura más alta. La martensita puede deformarse fácilmente, con lo cual una carga en la pieza con fase martensítica puede producir un cambio significativo en su forma, pero si la pieza se calienta por encima de la temperatura a la cual el material es completamente austenítico, ésta recupera su forma inicial, aún soportando la misma carga.

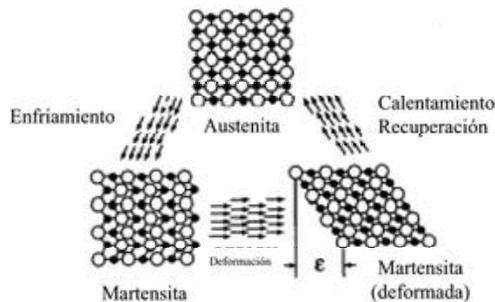


Figura 1. Cambio en la estructura cristalina de las AMF producido por el cambio de fase [2]

Además, para que la austenita se transforme en martensita, basta sólo con cargar la pieza (no se requiere cambio de temperatura). Cuando se reduce la carga, la martensita comienza a transformarse en austenita nuevamente y el alambre o pieza puede recuperar su forma inicial. Este es el fenómeno conocido como pseudo-elasticidad.

2.2. Materiales electro y magnetoactivos

Los materiales electro y magnetoactivos cambian sus propiedades físicas cuando se someten a un campo eléctrico y magnético, respectivamente. Dentro de esta clasificación están los materiales piezoeléctricos, los materiales electro y magnetostrictivos, y los materiales electro y magnetoreológicos.

Los materiales piezoeléctricos adquieren un potencial eléctrico o un campo eléctrico cuando se someten a un esfuerzo mecánico. También, se produce el efecto contrario, ya que estos materiales se deforman cuando se les aplica un voltaje. De acuerdo con esto, el 'efecto piezoeléctrico' es un fenómeno que resulta de una

relación entre las propiedades eléctricas y las mecánicas del material.

Similarmente, los materiales electrostrictivos presentan el efecto de electrostricción, el cual implica un cambio de las dimensiones cuando se aplica un campo eléctrico. Una diferencia de éstos materiales con los piezoeléctricos es que en los primeros existe una dependencia cuadrática de la permisividad sobre el campo eléctrico, mientras que en los últimos existe dependencia lineal. Los materiales magnetostrictivos pueden responder a campos magnéticos como los piezoeléctricos responden a un campo eléctrico.

Los fluidos magnetoreológicos (MR) y electroreológicos (ER) (fluidos inteligentes) pueden cambiar su viscosidad, drásticamente y de manera reversible, cuando se someten a un campo magnético y eléctrico, respectivamente.

2.3. Materiales foto y cromoactivos

Los materiales fotoactivos experimentan cambios de diferente tipo cuando se someten a la acción de la luz, y pueden producir luz bajo ciertos estímulos. En los cromoactivos se generan cambios de color en presencia de un estímulo externo, como por ejemplo la temperatura, la corriente eléctrica y la radiación UV. Ejemplos de materiales fotoactivos son los electroluminiscentes, fluorescentes y fosforescentes, y de materiales cromoactivos, los fotocromicos, termocromicos y electrocromicos.

3. SISTEMAS COMPUESTOS INTELIGENTES

Como se dijo en la sección 2, un sistema inteligente posee sensores, actuadores y controladores. En esta sección se describen los compuestos inteligentes desde el punto de vista de cada una de estas funciones. Se presentan algunos materiales y aplicaciones típicas.

3.1. Sensores

Un material sensor es aquel que detecta una señal (dato de entrada). Algunos materiales o aparatos, como las fibras ópticas, los materiales piezoeléctricos, aparatos microelectromecánicos o alambres de guía de onda acústica, se ubican dentro del compuesto para sensar cambios en el medio circundante. Para ser usados como sensores, algunos compuestos son embebidos en otro compuesto, de matriz polimérica por ejemplo.

La fibra óptica puede sensar temperatura, deformación, campos eléctricos y magnéticos o presión. Puede transmitir señales mediante fotones de radiación electromagnética o de luz, alcanzando altas velocidades, distancias y densidades de transmisión, con un porcentaje de error pequeño. Por estas razones, es altamente usada en telecomunicaciones.

Debido a las características ya mencionadas, los materiales piezoeléctricos pueden sensar deformación, vibraciones o impactos. Por ejemplo un medidor de deformación piezoeléctrico (strain gage) puede adherirse a un elemento estructural, generándose un voltaje que es función de la deformación o de la amplitud de vibración.

Algunos cerámicos y polímeros tienen las propiedades de piezoelectricidad, aunque los últimos son más escasos y muchos de ellos están en una fase de investigación y desarrollo [2]. Los elementos piezoeléctricos se usan en computadores, en los campos automotriz y médico (por ejemplo en bombas de insulina), terapia con ultrasonido y muchas más aplicaciones.

3.2. Actuadores

Los materiales más comúnmente usados como actuadores son las AMF, los cerámicos piezoeléctricos, materiales magnetostrictivos y electrostrictivos y los fluidos magnetoreológicos (MR) y electroreológicos (ER).

Las AMF se usan como instrumental quirúrgico, en el control de vibración de grandes estructuras compuestas flexibles [3] y para aumentar la resistencia y rigidez cuando se usan como refuerzos en compuestos de matriz metálica. Las más usadas son NiTi, CuZnAl y CuAlNi.

Los actuadores piezoeléctricos pueden ser embebidos o adheridos a una estructura compuesta. Pueden ser, por ejemplo, cristales sencillos de polímeros o poli-cristales de cerámicos. En general, estos materiales pueden ser usados simultáneamente como sensores y actuadores, aunque son más usados como sensores.

Los elastómeros electrostrictivos son un ejemplo de material electrostrictivo, y se utilizan como actuadores en robots que trabajan como músculos (se generan grandes deformaciones al aplicar las cargas).

Los fluidos MR se utilizan, por ejemplo, en la amortiguación de las vibraciones de lavadoras o aparatos para hacer ejercicio, y los fluidos ER se utilizan en válvulas y para reducir ruido y vibraciones en vehículos.

De acuerdo a [3], el actuador ideal no existe. Se está investigando un rango de alternativas, ya que la industria y los militares tienen un gran interés en estructuras inteligentes.

3.3. Controladores

Los sensores y actuadores pueden introducirse en otros materiales para formar compuestos inteligentes. Los controladores se usan para acoplar funcionalmente estos dos elementos. Los controladores basados en microprocesadores reciben la señal de los sensores, y luego envían una señal correspondiente a los actuadores para producir la respuesta del material.

Actualmente se están investigando y desarrollando algunos 'cerebros artificiales', que tienen un procesamiento autoadaptivo, para ser usados en algunas aplicaciones como en la industria aeronáutica. Éstos corresponden a las redes neuronales artificiales que pueden procesar y decidir rápidamente y que son similares a las células nerviosas de los seres vivos, las cuales trabajan individualmente y aprenden colectivamente para ejecutar tareas más complejas. Aquí, los aparatos piezoeléctricos pueden tomarse nuevamente como ejemplo.

4. CASOS PARTICULARES

4.1. Compuestos laminados de matriz polimérica reforzada con fibras de carbono

Se han obtenido algunos compuestos de matriz polimérica y matriz de cemento que son llamados estructuras *intrínsecamente* inteligentes, ya que tienen la característica de que no tienen dispositivos que actúen como sensores o actuadores. Como refuerzos se usan fibras cortas conductoras de la electricidad (en matrices de cemento) y fibras continuas de carbono (en matrices poliméricas) para eliminar la necesidad de aparatos adicionales. Estas estructuras tienen ciertas ventajas con respecto a aquellas que requieren dispositivos, ya que cuando éstos se introducen en los elementos, se observa una degradación de las propiedades mecánicas, lo cual reduce la vida de la estructura. Pueden ser usadas para sensar daño mecánico o térmico, temperatura, esfuerzos o deformaciones, y para controlar vibraciones estructurales.

Los compuestos de matriz polimérica intrínsecamente inteligentes pueden hacerse de una matriz epóxica reforzada con carbono (conductor de electricidad), y son muy utilizados en las industrias aeroespacial, automotriz y de la construcción. Estos compuestos de carbono/epoxy pueden sensar su propia deformación. Cuando las fibras se someten a una deformación longitudinal (en la dirección de éstas), las fibras se estiran y tienden a alinearse entre ellas, aumentándose la posibilidad de que las fibras de láminas adyacentes se toquen. Esto hace que la resistencia en la dirección de las fibras se reduzca y que aquella en la dirección perpendicular al plano de las láminas se aumente [4]. Para determinar la deformación, pueden compararse las magnitudes de sensibilidad de deformación (porcentaje de cambio en la resistencia por unidad de deformación) en ambas direcciones.

La resistencia eléctrica puede cambiar también cuando ocurren daños en el compuesto (causados por esfuerzo o temperatura, bajo condiciones estáticas o dinámicas). Si por ejemplo ocurre deslaminación (ver figura 2(a)), la resistencia (resistividad de contacto de la interfaz interlaminar) en la dirección perpendicular a las láminas se incrementa, ya que el número de contactos entre fibras de diferentes láminas se reduce.

Si el daño es más ligero, como una interrupción en el orden de las fibras o un pequeño daño en la matriz, tanto la resistencia en la dirección longitudinal como en la perpendicular a las láminas se reduce, irreversiblemente, debido a que se incrementa el número de contactos entre las fibras. La figura 2 esquematiza estos dos ejemplos.

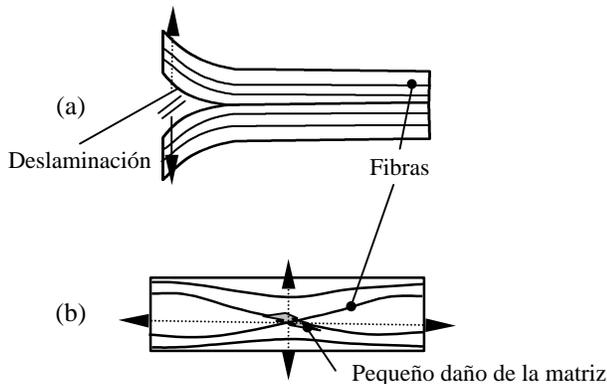


Figura 2. (a) Un compuesto deslaminado. El número de contactos se reduce, por lo que aumenta la resistencia. (b) Un pequeño daño en la matriz conlleva a un mayor contacto entre las fibras, entonces, las resistencias longitudinal y perpendicular a las láminas se reduce. (Las direcciones en las cuales se afecta la resistencia se indican mediante flechas)

Similarmente, los compuestos de carbono/epoxy continuos tienen la capacidad de actuar como termistores y termocuplas (pueden sensar temperatura). Un termistor es un dispositivo sensible a cambios de temperatura, ya que la conductividad eléctrica cambia con ésta. La temperatura afecta la energía (energía de activación) requerida para que un electrón salte de una lámina a otra, por lo que la resistividad se altera con cambios de temperatura. Por otro lado, cuando dos conductores diferentes, a temperaturas diferentes, se usan en dos puntos se genera un voltaje. Esto es una termocupla, y es aplicada en los compuestos mediante la distribución de dos tipos de fibras de carbono en diferentes láminas.

4.2. Compuesto con aleación con memoria de forma

Las AMF pueden ser incorporadas en materiales compuestos, como alambres o en partículas. Los alambres se integran predeformados a la matriz, y se obtiene un compuesto que tiene la capacidad de cambiar de forma, controlar la expansión térmica y, cuando se activan térmicamente, cambiar la frecuencia natural de vibración. Las AMF pueden usarse como sensores, por ejemplo para sensar temperatura, ya que como se dijo anteriormente, un cambio de unos 10°C puede producir un cambio de la forma debido al cambio de fase. Sin embargo, las AMF se prefieren como actuadores.

Desafortunadamente, las aplicaciones de estas aleaciones en estructuras inteligentes tienen un rango limitado, debido a lo siguiente:

- Las AMF tienen una alta densidad ($6 - 8 \text{ g/cm}^3$, para la mayoría de aleaciones).
- Tienen altos costos.
- Éstas no son adecuadas para amortiguar vibraciones de alta frecuencia [3].
- Tienen mala resistencia a la fatiga.
- La estructura debe ser precalentada para activarla.
- El proceso de manufactura es difícil de controlar. Hay que obtener alambres delgados que aseguren una buena adhesión con el compuesto, de tal manera que sobrelleven la misma deformación. El diámetro típico de las AMF puede ser altos gruesos como 1 mm [5], el cual es mayor que los diámetros de las fibras de aramida carbono o vidrio ($\sim 8 - 10 \mu\text{m}$). Esta desventaja se observa también en sensores de fibra óptica, cuyos diámetros típicos oscilan entre 100 y 300 μm . Estos diámetros pueden producir paquetes de resina o una adhesión deficiente en la vecindad de las fibras, produciendo, entre otros factores, interrupciones y concentración de esfuerzos. Estos defectos producidos durante la fabricación de la estructura compuesta usando AMF pueden producir una degradación gradual del comportamiento mecánico del laminado. Además, durante el proceso de fabricación, las fibras de estas aleaciones deben ser preestiradas, lo cual es una labor difícil.
- Como la capacidad de sensar de estos metales inteligentes (AMF) está restringida con la temperatura, deben usarse con otros sensores (de fibra óptica por ejemplo), cuando se desea controlar otros parámetros como el cambio de frecuencia. Las fibras ópticas podrían provocar los problemas acabados de mencionar si no tienen un diámetro compatible con el de las fibras de refuerzo y de la AMF.

Debido a todas estas dificultades, se están estudiando soluciones que hagan viable un uso adecuado y seguro de estos materiales en un campo más amplio, teniendo en cuenta sus ventajas tales como buenas propiedades mecánicas y biocompatibilidad. De manera similar, los investigadores están obteniendo un mejor entendimiento de los efectos de incorporar estas aleaciones en las estructuras compuestas.

En la industria aeronáutica hay una aplicación que está siendo investigada. Los alerones de la mayoría de los aviones funcionan con sistemas hidráulicos complejos conformados por bombas y tuberías, los cuales son difíciles y costosos de mantener. Las AMF están siendo estudiadas como una de las alternativas de operar eficiente y confiablemente estos alerones, sin necesidad de recurrir a los sistemas hidráulicos. La figura 3(a) muestra la configuración común de los alerones, y la figura 3(b) muestra la alternativa que elimina la necesidad de las articulaciones y del complejo sistema hidráulico, utilizando alambres de AMF, los cuales sólo requieren de un calentamiento mediante una corriente eléctrica para deformarse.

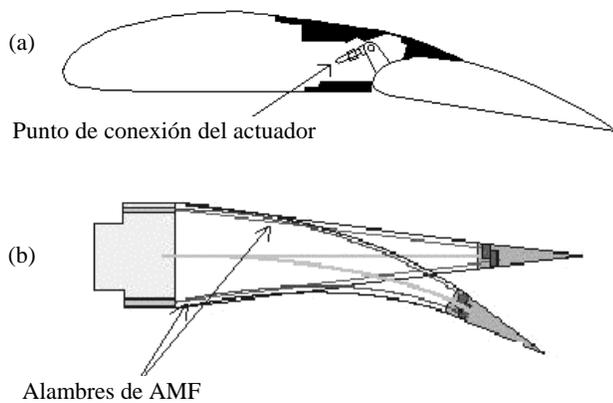


Figura 3. (a) Ala y alerón típicos. (b) Alerón con AMF [6]

5. TENDENCIAS ACTUALES DE INVESTIGACIÓN

Actualmente, los materiales y estructuras inteligentes están creando un gran interés. Éstos ofrecen una serie de capacidades y ventajas que los hacen una promisoría alternativa a materiales convencionales o compuestos no inteligentes. Sin embargo, para que estos materiales sean amplia y exitosamente utilizados en la práctica, deben resolverse una serie de problemas (ver, por ejemplo, la sección 4.2) y efectuarse muchas mejoras.

Actualmente, se están llevando a cabo investigaciones en diferentes frentes. En este artículo se hace una clasificación de las áreas específicas de investigación en compuestos inteligentes. Los artículos citados constituyen una muestra de lo que se está haciendo en cada frente.

La mayor parte de los trabajos de investigación (por ejemplo [5, 7-16]) se enfoca en el análisis, evaluación o modelado de las propiedades y del comportamiento de los compuestos inteligentes. Estos resultados pueden ser utilizados en el diseño de estos materiales. En [5] se evalúa la resistencia a la flexión y la de cortante interlaminar de laminados inteligentes cuasi-isotrópicos con AMF o fibras ópticas. Se concluye que estos materiales inteligentes no afectan la resistencia al cortante, pero sí afectan la resistencia a la flexión, principalmente, cuando se ubican en la zona de compresión. En [7] se investiga la resistencia a la fatiga de compuestos de matriz epóxica con fibras de refuerzo de TiNi (AMF). Una importante conclusión, tanto experimental como teórica, es que al preestirar las fibras, la matriz adquiere un esfuerzo compresivo que aumenta la resistencia al crecimiento de las grietas. Tres trabajos de un par de autores ([8] por ejemplo) presentan modelos (basados en la teoría de placa zigzag o en elementos finitos) para predecir las propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas de laminados compuestos sometidos a estos tres tipos de carga. En [9] se investiga teórica y experimentalmente las frecuencias naturales de vigas laminadas compuestas con fibra de vidrio y alambres de AMF (como actuadores). Se aprecia que la frecuencia natural

depende del número de actuadores y de la fase (martensita o austenita) que presenten. En otros trabajos se desarrollan modelos del comportamiento termomecánico de AMF [10] y de laminados de vigas compuestas usando elementos piezoeléctricos [11-12]. El modelo para las AMF puede usarse en compuestos inteligentes con dichas aleaciones.

Para obtener mejores propiedades en compuestos inteligentes, se han presentado algunos conceptos nuevos (por ejemplo [17-20]). En [17] y [18] se proponen nuevos materiales 'actuadores'. En [17] se presenta un compuesto de matriz polimérica (particularmente matriz epóxica) con partículas de NiMnGa, la cual es una aleación ferromagnética con memoria de forma. Con este diseño se mejora la ductilidad y se obtiene el efecto de memoria de forma, mejorado con la disminución del tamaño de las partículas. En [18] se propone usar, en una matriz de amortiguación viscoelástica, unas barras piezoeléctricas ubicadas oblicuamente a través del espesor de las láminas. Dichas barras mejoran la amortiguación en compresión y en cortante, lo que conlleva a una reducción de las vibraciones. Al igual que [7], [19] y [20] trabajan con compuestos de matriz epóxica con fibras de refuerzo de TiNi (AMF). [19] se enfoca en mejorar la resistencia al crecimiento de grietas (reducción del factor de intensidad de esfuerzo) mediante la activación de la AMF, y en [20] se trabajó torciendo los alambres de TiNi, con lo cual se mejoró la resistencia de la adhesión entre fibras y matriz y la resistencia de las fibras a ser extraídas de ésta (pull-out).

También se ha trabajado en el análisis y control de las vibraciones en estructuras compuestas inteligentes. En [21] a [23] se investiga el comportamiento bajo vibración de laminados compuestos o vigas sándwich, con sensores o actuadores piezoeléctricos. Las probetas utilizadas en [21] contenían varias deslaminaciones con el fin de ser sensadas. Este tipo de estudios tiene utilidad para el control o eliminación de las vibraciones y para el monitoreo de la integridad de las estructuras compuestas.

Unas áreas en las que se observa menor concentración de investigadores incluyen la detección de daño (por ejemplo [24]) y el estudio o mejoramiento de los procesos de manufactura [25].

Finalmente, del estudio de la literatura se pueden mencionar algunas observaciones adicionales:

- Se está investigando principalmente en la incorporación de los materiales inteligentes en los compuestos, y se ha prestado menor atención al estudio de estructuras inteligentes.
- La mayor parte de las investigaciones se enfoca en compuestos laminados, particularmente los de matriz epóxica con fibras de TiNi (AMF).
- Las AMF y los materiales piezoeléctricos son los materiales inteligentes más estudiados.

6. CONCLUSIONES

Los compuestos inteligentes tienen la capacidad de sentir, actuar y controlar. Con éstos se puede mejorar la eficiencia, confiabilidad y durabilidad de las estructuras y aparatos. Gracias a estos materiales, los diseñadores tienen a su disposición nuevas formas de controlar movimiento, forma geométrica, vibraciones, flujo aerodinámico y temperatura, y de ahorrar energía y reducir riesgos.

Las investigaciones actuales están aportando mejoras en las propiedades, modelado y manufactura de los compuestos inteligentes. Sin embargo, la investigación en estos materiales está en sus comienzos, y queda mucho por hacer para que esta tecnología pueda ser aplicada adecuadamente en un amplio rango de estructuras reales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] MICHAUD, V. Can Shape Memory Alloy Be Smart? *Scripta Materialia*, 50(2), 249-253, 2004.
- [2] MATELLANES, L., CUEVAS, J.M., CLEMENTE, R. y ALLUÉ, S. Materiales y Estructuras "Inteligentes". <http://www.plastunivers.com/Tecnica/Hemeroteca/ArticuloCompleto.asp?ID=2971>, 2003 (acceso 8/05/2004).
- [3] KELLY, A., DAVIDSON, R. y UCHINO, K. 5.20 *Smart Composite Materials Systems*, En *Comprehensive Composite Materials*, Vol. 5, Kelly, A. y Zweben, C (eds. en jefe), Pergamon, 2000.
- [4] CHUNG, D.D.L. Composites Get Smart, *Materials Today*, 5(1), 30-35, 2002.
- [5] ZHOU, G., SIM, L.M., BREWSTER, P.A. y GILES, A.R. Through-the-Thickness Mechanical Properties of Smart Quasi-Isotropic Carbon/Epoxy Laminates, *Composites Part A: App Sc & Manufacturing*, 35(7-8), 797-815, 2004.
- [6] SMA/MEMS RESEARCH GROUP, Univ. of Alberta, Canada, *Aircraft Maneuverability*. http://www.cs.ualberta.ca/~database/MEMS/sma_mems/flap.html, 2001 (acceso 23/04/2004).
- [7] SHIMAMOTO, A., ZHAO, H.Y. y ABÉ, H. Fatigue Crack Propagation and Local Crack-Tip Strain Behaviour in TiNi Shape Memory Fiber Reinforced Composites, *Int J of Fatigue*, 26(5), 533-542, 2004.
- [8] CHO, M. y OH, J. Higher Order Zig-Zag Theory for Fully Coupled Thermo-Electric-Mechanical Smart Composite Plates, *Int J of Solids and Structures*, 41(5-6), 1331-1356, 2004.
- [9] LAU, K-T., ZHOU, L.M. y TAO, X-M. Control of Natural Frequencies of a Clamped-Clamped Composite Beam with Embedded Shape Memory Alloy Wires, *Composite Structures*, 58(1), 39-47, 2002.
- [10] LIEW, K.M., KITIPORNCHAI, S., NG, T.Y. y ZOU, G.P. Multi-Dimensional Superelastic Behaviour of Shape Memory Alloys via Nonlinear Finite Element Method, *Engineering Structures*, 24(1), 51-57, 2002.
- [11] KAPURIA, S. An Efficient Coupled Theory for Multilayered Beams with Embedded Piezoelectric Sensory and Active Layers, *Int J of Solids and Structures*, 38(50-51), 9179-9199, 2001.
- [12] HUANG, D. y SUN, B.H. Approximate Solution on Smart Composite Beams by using MATLAB, *Composite Structures*, 54(2-3), 197-205, 2001.
- [13] KALAMKAROV, A.L. y GEORGIADIS, A.V. Modeling of Smart Composites on Account of Actuation, Thermal Conductivity and Hygroscopic Absorption, *Composites Part B: Engineering*, 33(2), 141-152, 2002.
- [14] LEE, W.B., JIE, M. y TANG, C.Y. Constitutive Modeling of Aluminum Matrix NiTi Fiber-Reinforced Smart Composite, *J of Materials Processing Technology*, 116(2-3), 219-223, 2001.
- [15] TSOI, K.A., SCHROOTEN, J. y STALMANS, R. Part I. Thermomechanical Characteristics of Shape Memory Alloys, *Materials Science & Eng A*, 368, 286-298, 2004.
- [16] TSOI, K.A., SCHROOTEN, J., ZHENG, Y. y STALMANS, R. Part II. Thermomechanical Characteristics of Shape Memory Alloy Composites, *Materials Science and Engineering A*, 368, 299-310, 2004.
- [17] HOSODA, H., TAKEUCHI, S., INAMURA, T. y WAKASHIMA, K. Material Design and Shape Memory Properties of Smart Composite Composed of Polymer and Ferromagnetic Shape Memory Alloy Particles, *Science and Tech of Advanced Materials*, en imprenta, 2004.
- [18] BAZ, A. y TEMPIA, A. Active Piezoelectric Damping Composites, *Sensors and Actuators A: Physical*, 112(2-3), 340-350, 2004.
- [19] SHIMAMOTO, A., OHKAWARA, H. y NOGATA, F. Enhancement of Mechanical Strength by Shape Memory Effect in TiNi Fiber-Reinforced Composites, *Engineering Fracture Mechanics*, 71(4-6), 737-746, 2004.
- [20] LAU, K-T., TAM, W-Y., MENG, X-L. y ZHOU, L-M. Morphological Study on Twisted NiTi Wires for Smart Composite Systems, *Materials Letters*, 57(2), 364-368, 2002.
- [21] CHATTOPADHYAY, A., KIM, H.S. y GHOSHAL, A. Non-Linear Vibration Analysis of Smart Composite Structures with Discrete Delamination using a Refined Layerwise Theory, *J of Sound and Vibration*, 273(1-2), 387-407, 2004.
- [22] VALOOR, M.T., CHANDRASHEKHARA, K. y AGARWAL, S. Self-Adaptive Vibration Control of Smart Composite Beams using Recurrent Neural Architecture, *Int J of Solids and Structures*, 38(44-45), 7857-7874, 2001.
- [23] HWU, C., CHANG, W.C. y GAI, H.S. Vibration Suppression of Composite Sandwich Beams, *J of Sound and Vibration*, 272(1-2), 1-20, 2004.
- [24] LENG, J. y ASUNDI, A. Structural Health Monitoring of Smart Composite Materials by using EFPI and FBG Sensors, *Sens & Actuat A: Physical*, 103(3), 330-340, 2003.
- [25] XU, Y., OTSUKA, K., YOSHIDA, H., NAGAI, H., OISHI, R., HORIKAWA, H. y KISHI, T. A New Method for Fabricating SMA/CFRP Smart Hybrid Composites, *Intermetallics*, 10(4), 361-369, 2002.
- [26] CALLISTER, W.D. *Materials Science and Engineering - An introduction*. 6a. ed., Wiley Int. Edition, E.U., 2003.
- [27] SMA/MEMS RESEARCH GROUP, University of Alberta, Canada, *Smart Materials*. http://www.cs.ualberta.ca/~database/MEMS/sma_mems/smr.html, 2001 (acceso 21/04/2004).
- [28] SMA/MEMS RESEARCH GROUP, University of Alberta, Canada, *Shape Memory Alloys*. http://www.cs.ualberta.ca/~database/MEMS/sma_mems/sma.html, 2001 (acceso 21/04/2004).
- [29] SXM PROJECT, Universität Münster, Germany. <http://sxm4.uni-muenster.de/stm-en/piezo.html> (acceso 28/04/04).
- [30] TELCITÉ, France. <http://www.telcite.fr/fiber.htm> (acceso 28/04/2004).