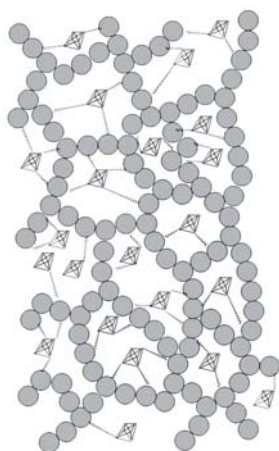


Los materiales híbridos en el desarrollo de sistemas mecatrónicos

Beatriz López-Walle, Edgar Reyes-Melo, Enrique López-Cuéllar
Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales, FIME-UANL
CIIDIT-UANL



RESUMEN

Un sistema mecatrónico se compone, entre otros elementos, de sensores y actuadores. Los sensores permiten detectar variables físicas del medio circundante, convirtiéndolas en señales eléctricas; en tanto, los actuadores generan movimientos o acciones específicas de acuerdo a la señal eléctrica aplicada. La creciente complejidad de los sistemas mecatrónicos demanda el desarrollo de sensores y actuadores cuyos materiales de fabricación sean capaces de realizar más de una función. Para el desarrollo o síntesis de materiales bifuncionales se suele combinar dos materiales con propiedades diferentes. El producto resultante se conoce como material compuesto o “compósito”. Cuando uno de estos materiales es orgánico, y el otro inorgánico, el sistema resultante se conoce como material híbrido. En este artículo se describen las principales características morfológicas y estructurales de estos últimos materiales, con el fin de diferenciarlos, particularizarlos y, principalmente, mostrar su aportación y aplicación en sistemas mecatrónicos.

PALABRAS CLAVE

Material híbrido, orgánico/inorgánico, sensores/actuadores, materiales multifuncionales.

ABSTRACT

A mechatronic system is composed, among different elements, by sensors and actuators. Sensors detect physical variables of the surroundings and transform them into electrical signals; actuators generate movements or specific actions according to the applied electrical signal. The increasing complexity of the mechatronic systems requires the development of sensors and actuators whose manufacturing materials should be able to perform more than only one function (multifunctional). For the development or synthesis of bifunctional materials (two functions), two materials with different properties are usually combined. The resulting product is known as composed material or “composite”. When one of these materials is organic and the other is inorganic, the resulting system is known as hybrid material. This article describes the main morphological and structural characteristics of hybrid materials, in order to differentiate, particularize and, principally, show their contribution and applications in mechatronic systems.

KEYWORDS

Hybrid material, organic/inorganic, sensors/actuators, multifunctional materials.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas mecatrónicos se caracterizan por registrar señales con ayuda de sensores, procesar dichas señales, y emitir respuestas acordes a las mismas por medio de actuadores, ya sea generando movimientos u otras acciones muy específicas. Hoy en día, dichos sistemas son muy importantes para la mayoría de las actividades científicas y para una gran diversidad de procesos industriales.¹⁻⁴ Los robots, las máquinas controladas digitalmente y los vehículos guiados automáticamente, entre otros, son sólo algunos ejemplos de sistemas mecatrónicos. La figura 1 muestra un brazo robótico (sistema mecatrónico) cuyos elementos constituyentes, mecanismos, sensores y actuadores, pueden emular los movimientos de un brazo humano cerca de la perfección.⁴



Fig. 1. Ejemplo de un sistema mecatrónico (brazo robótico).⁴

Las funciones de cada uno de los elementos en los sistemas mecatrónicos se coordinan de manera sinérgica mediante un sistema de control o software, el cual también forma parte del sistema mecatrónico. Los mecanismos son un conjunto de elementos rígidos o móviles unos respecto de otros, unidos entre sí mediante diferentes tipos de uniones llamados pares cinemáticos: pernos, uniones de contacto, pasadores, etc.. Su principal función es la transmisión

de movimientos y fuerzas, razón por la cual para su diseño suelen utilizarse materiales convencionales de tipo metálico, cerámico y/o polimérico. Por otra parte, los sensores son elementos con capacidad para detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación: temperatura, intensidad luminosa, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, pH, etc., y transformarlas en variables eléctricas. Muy comúnmente, los sensores se conectan al sistema de control, aunque también suelen conectarse directamente a un elemento actuador. Finalmente, los actuadores: cilindros neumáticos e hidráulicos, motores eléctricos, electroválvulas, etc., transforman las señales o variables eléctricas provenientes de los sensores, dando inicio a un determinado tipo de movimiento o acción específica. Una característica muy importante en sensores y actuadores es su tiempo de respuesta, el cual se busca sea el menor posible, en el orden de fracciones de segundo. De lo anterior, podemos deducir que las funciones que llevan a cabo tanto los actuadores, como los sensores, son las más complejas y delicadas de todo el sistema mecatrónico. Dichas funciones deben ser exactas y precisas, razón por la cual los materiales de base para su construcción demandan ser bifuncionales o polifuncionales (materiales que pueden desarrollar más de una función), característica que a los materiales convencionales les es difícil ofrecer. Esto se refleja en el elevado costo que puede alcanzar un sistema mecatrónico como el mostrado en la figura 1. Sin embargo, se espera que con el acelerado avance que hoy en día tiene la ciencia e ingeniería de materiales, el desarrollo de dichos sistemas mecatrónicos, en un futuro no muy lejano, sea más rentable y realista.

Ante este reto, se tiene la alternativa de combinar materiales con propiedades diferentes con el fin de obtener “materiales bi o polifuncionales”:⁵⁻¹⁰ por ejemplo, un material bifuncional que presente la elasticidad típica del caucho (material polimérico), pero con una conductividad eléctrica similar a la de los materiales metálicos. El producto que resulta de la combinación de dos o más materiales es una gama muy amplia de “novedosos materiales” que comúnmente se les conoce como materiales compuestos o “compósitos”. Cuando en los materiales a combinar al menos uno es de tipo orgánico, y

otro de tipo inorgánico, al sistema resultante se le conoce como material híbrido. Bajo esta óptica, un material híbrido deberá considerarse como un tipo de material compuesto. Sin embargo, como se verá más adelante, los materiales híbridos resultan ser mucho más que un material compuesto, ya que en la mayoría de los casos son polifuncionales, razón por la cual satisfacen mayormente los requerimientos para su aplicación en sistemas mecatrónicos. Por otra parte, es importante mencionar que los sistemas biológicos están constituidos de materiales híbridos, los cuales han sido sintetizados a través de sus rutas metabólicas, llegando a obtener materiales con propiedades que hasta hoy no es posible reproducir de manera precisa a nivel laboratorio. Este proceso de emular la estructura de los materiales biológicos se conoce como mimetización de materiales.¹¹⁻¹³

Este artículo se enfoca en los materiales híbridos debido a su interés y utilidad en el desarrollo de sistemas mecatrónicos. El objetivo principal reside en describir de una manera clara y sencilla, cuáles son los aspectos estructurales y morfológicos que caracterizan a estos materiales. Lo anterior se considera fundamental para comprender la importante contribución de los materiales híbridos en el funcionamiento, y consecuente optimización, de un determinado sistema mecatrónico.

ESTRUCTURA Y MORFOLOGÍA DE MATERIALES COMPUESTOS Y MATERIALES HÍBRIDOS

Los materiales compuestos y materiales híbridos se caracterizan por tener una fase dispersa en una matriz o fase dispersante. La naturaleza de ambas fases, así como el tipo de interacción entre ellas, definen tanto a la estructura, como a la morfología de estos materiales, definiendo al mismo tiempo sus propiedades. Estructura y morfología pueden diferenciarse si se considera que cada una corresponde a una escala diferente de la distribución espacial de la fase dispersa en la matriz. Bajo este contexto, la estructura corresponde a una escala del tamaño de las interfaces entre fase dispersa y matriz, y está definida por las interacciones físicas y químicas que la conforman. En tanto, la morfología corresponde a una escala tal que permite identificar la manera en cómo se encuentran distribuidas las entidades de la fase dispersa (partículas, fibras, etc.) en la matriz.

Aunque muy comúnmente en la literatura se maneja de manera indistinta el término “material compuesto” y “material híbrido”, en opinión de los autores de este artículo existen diferencias importantes entre ambos, las cuales son función de su estructura y su morfología.

En los materiales compuestos, por lo general, la morfología es tal que la fase dispersa es de un tamaño promedio mayor o igual al orden de algunas decenas de micrómetros. Además, su distribución espacial en la matriz no presenta un ordenamiento de largo alcance, considerándose en este caso como de largo alcance una distancia mayor al tamaño promedio de la fase dispersa. Un ejemplo típico de material compuesto, lo constituye una matriz polimérica que refuerza sus propiedades mecánicas con algún tipo de fibra o partícula que puede ser de tipo orgánico o inorgánico. En lo referente a la estructura de los materiales compuestos, ésta la constituyen fuerzas de Van der Waals y/o puentes de hidrógeno, cuyos valores energéticos de enlace son del orden de 15 kJ/mol o menos, y su radio de acción es menor o igual a 0.5 nm, por lo que las fases son separables mediante algún proceso físico (fusión por zonas, filtrado, centrifugación, etc.). A manera de ejemplo, la figura 2 muestra una imagen obtenida mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) de la superficie de fractura de un material polimérico (nylon) reforzado con fibras de vidrio. En ella se distingue de manera clara la morfología de este material compuesto, la cual está constituida de una distribución aleatoria de las fibras de vidrio en la matriz polimérica de nylon.

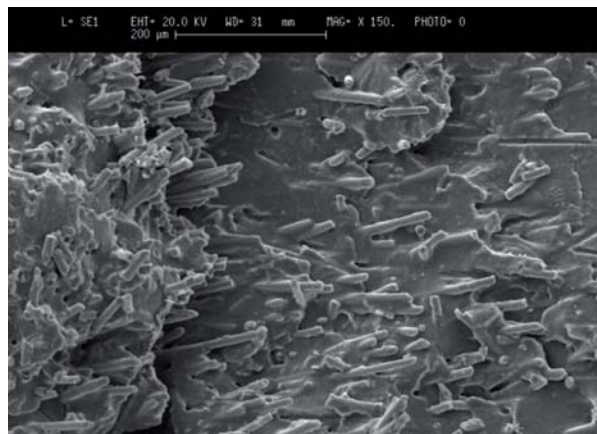


Fig. 2. Imagen obtenida mediante SEM de la superficie de fractura de un material compuesto (nylon reforzado con fibras de vidrio).¹⁴

En lo que respecta a los materiales híbridos, muy comúnmente la morfología es tal que la fase dispersa tiene tamaños inferiores al micrómetro, y la distribución de ésta puede ser carente de ordenamientos a gran distancia, o bien puede llegar a organizarse en niveles discretos en la matriz, dando lugar a materiales con una estructura jerárquica a escala molecular, nanoscópica, microscópica y macroscópica.^{6,14} En lo referente a la estructura de los materiales híbridos, las interacciones que constituyen sus interfaces no solamente son del tipo de Van der Waals o puentes de hidrógeno, también pueden presentarse enlaces covalentes, de coordinación o iónicos, los cuales cuentan con mayor energía (del orden de 400 kJ/mol). En la figura 3 se presenta un esquema de estas interacciones.⁶

A manera de ejemplo, la figura 4 muestra imágenes obtenidas mediante SEM a diferentes escalas de la morfología que puede llegar a tener un material híbrido de tipo biológico como la concha de nácar, también conocida como “madreperla”. Se trata de un material poroso pero resistente, que se encuentra en la concha de ciertos crustáceos. La estructura y morfología del nácar se caracterizan por combinar láminas de carbonato de calcio con una proteína

(matriz polimérica) que funciona como pegamento para la obtención de una estructura y morfología 3000 veces más resistente que el carbonato de calcio y la proteína por separado.¹⁵

En general, la polifuncionalidad y la eficiencia de los materiales híbridos se definen en gran parte por la naturaleza de sus interfaces y de la morfología que de ella se genera, por lo que resulta fundamental determinar el tipo de estructura y morfología de estos materiales. Esto a su vez permite clasificar a los materiales híbridos en dos clases importantes, las cuales se describen en la siguiente sección.

CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES HÍBRIDOS

Tomando como criterio de base a los tipos de interacciones físicas y/o químicas que definen las interfaces en los materiales híbridos, éstos se clasifican en dos grandes grupos: materiales híbridos de clase I y materiales híbridos de clase II.^{6,16} En los de clase I, las interacciones en las interfaces son exclusivamente del tipo de puentes de hidrógeno o de Van der Waals, mientras que en los de clase II, las interacciones son de más alta energía, pudiendo presentarse también enlaces débiles.

Tal como se puede observar en los esquemas de la figura 5, dependiendo de la naturaleza o del tamaño molecular de la fase dispersa, podemos tener dos casos para los materiales híbridos de clase I:

- i) Cuando la fase dispersa es de bajo peso molecular, ésta puede llegar a dispersarse en la matriz en forma de aglomerados de tamaño inferior a los micrómetros (mezcla íntima de dos materiales, figura 5(a));
- ii) Cuando la fase dispersa es de tipo macromolecular, ésta se dispersa de una manera tal que se obtiene una morfología de redes interpenetradas (figura 5(b)).

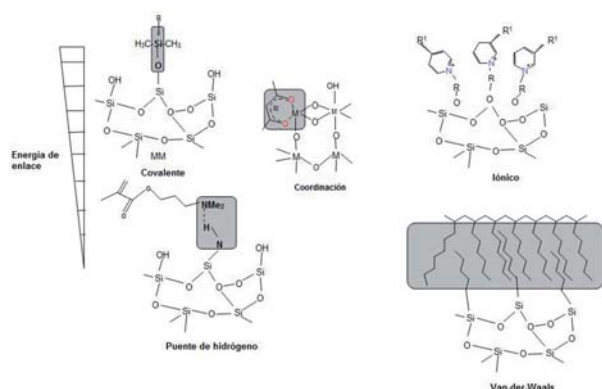


Fig. 3. Diferentes tipos de interacciones que definen la estructura de los materiales híbridos.

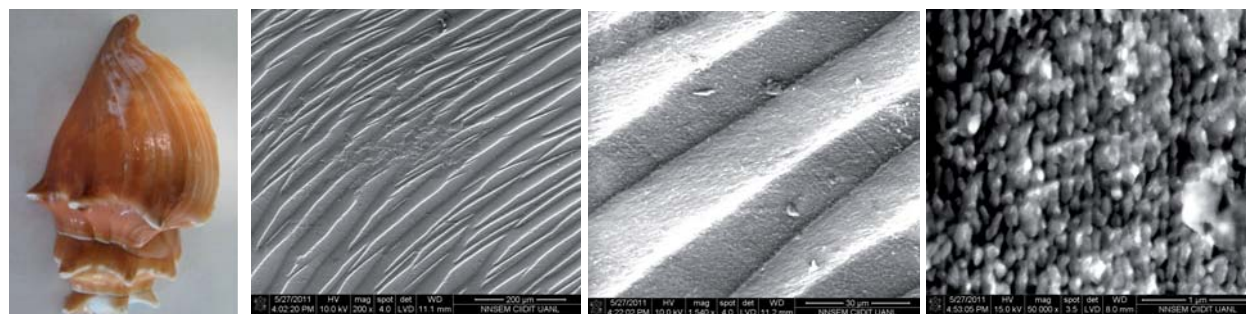


Fig. 4. Material híbrido concha de nácar (madreperla), imagen de SEM.

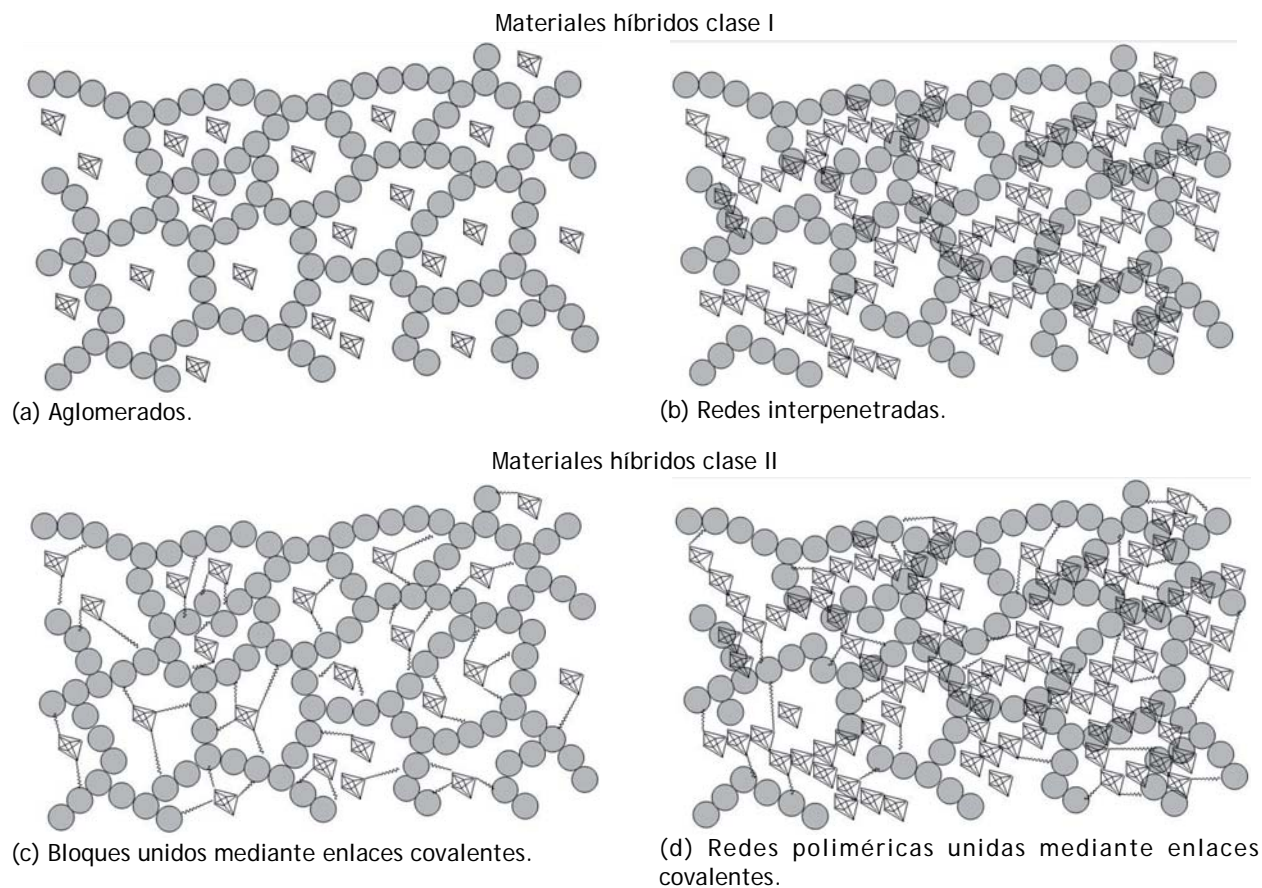


Fig. 5. Esquemas de los materiales híbridos de clase I -(a) y (b)- y clase II -(c) y (d)-.

Tabla I. Comparación de las propiedades generales o típicas de materiales orgánicos y materiales inorgánicos que comúnmente se utilizan como materia prima en la síntesis de materiales híbridos.

Propiedades	Materiales orgánicos (Polímeros)	Materiales inorgánicos (SiO ₂ , óxidos metálicos de transición)
Naturaleza de los enlaces	<ul style="list-style-type: none"> • Covalente • Van der Waals • Puente de hidrógeno 	<ul style="list-style-type: none"> • Iónico • Covalente-iónico
Temperatura de transición vítrea (Tg)	Baja (-120 a 200°C)	Alta (>>200°C)
Estabilidad térmica	Baja (<350-450°C)	Alta (>>100°C)
Densidad relativa	0.9-1.2	2.0-4.0
Índice de refracción	1.2-1.6	1.15-2.7
Propiedades mecánicas	<ul style="list-style-type: none"> • Elasticidad • Plasticidad • Dependiendo de la Tg, pueden presentar comportamiento cauchótico 	<ul style="list-style-type: none"> • Dureza • Tenacidad • Fragilidad
Hidrofobicidad	• Hidrofóbico	• Hidrofílico
Permeabilidad	• Permeabilidad a los gases	• Baja permeabilidad a los gases
Propiedades electrónicas	<ul style="list-style-type: none"> • Aislante eléctrico • Propiedades redox 	<ul style="list-style-type: none"> • Entre aislante eléctrico y semiconductor • Propiedades redox • Propiedades magnéticas
Procesabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Alta (moldeo, fundido, formación de película, control de viscosidad) 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja para polvos • Alta para recubrimientos de tipo sol-gel

Para los materiales de clase II también es posible diferenciar dos casos similares a los de clase I, con la diferencia de que las interfaces están definidas también por enlaces de alta energía (ver figuras 5(c) y 5(d)). La naturaleza tanto de la fase dispersa, como la de la matriz, además del proceso de síntesis utilizado para la obtención del material híbrido define si un material híbrido es de clase I o de clase II.

Es de suma importancia para el diseño de sistemas mecatrónicos, tomar en cuenta que los materiales híbridos más estables son los de clase II, por lo que bajo este contexto la utilización de los de clase I será muy limitada.

Entre los procesos de síntesis más utilizados para la obtención de materiales híbridos se tienen los siguientes: sol-gel, coprecipitación, erosión iónica, etc.^{6,16} No es el objetivo de este trabajo describir a detalle cada uno de estos procesos de síntesis; sin embargo, es importante mencionar que una tendencia actual es la mimetización de materiales. En este sentido, la comunidad científica ha estado intentando mimetizar materiales biológicos que combinen fuerza y resistencia, como el nácar, o madreperla. Para mimetizar “la concha de nácar”, primero se construye una suspensión acuosa de óxido de aluminio,¹⁵ la cual se enfría de manera muy controlada permitiendo obtener micro-estructuras largas y delgadas, parecidas a ladrillos, tras la evaporación del agua mediante calor. Al repetir este proceso, se crea una estructura porosa de capas de óxido de aluminio que se conectan entre sí, semejante a la encontrada en el nácar natural. Después, para imitar la proteína que funciona como pegamento, se propone utilizar un polímero que rellene los huecos entre las distintas capas. Aunque

los resultados obtenidos son muy alentadores, aún quedan muchas interrogantes por resolver, por lo que el proceso de mimetización de materiales se considera fundamental para el desarrollo de nuevos materiales híbridos.

Por otra parte, el gran avance que se tiene hoy en día en lo referente a la síntesis de novedosos materiales con propiedades especiales como fotoluminiscencia,^{6,8} electroluminiscencia,^{6,9,10} memoria de forma,¹⁷ magneto-orgánicos,¹⁰ semiconducción,⁹ etc., abre aun más la posibilidad de síntesis de nuevos materiales híbridos polifuncionales.¹⁸

LA POLIFUNCIONALIDAD DE LOS MATERIALES HÍBRIDOS

Las propiedades individuales que presentan por separado tanto la fase dispersa (inorgánica), como la matriz (orgánica), nos dan una idea de las propiedades o funciones que podría llegar a ofrecer un material híbrido, considerando que éste debe ser bi o polifuncional. Kickelbic G. resume de una manera muy clara (ver tabla I) las propiedades típicas de materiales orgánicos y materiales inorgánicos,⁶ las cuales deben ser tomadas en cuenta en el momento de llevar a cabo el proceso de síntesis de los materiales híbridos.

Aunado a lo anterior, debemos considerar los avances que se tienen hoy en día en lo referente al desarrollo de los denominados materiales avanzados, los cuales pudiesen utilizarse como fase dispersa en el desarrollo de nuevos materiales híbridos, y que tendrían aplicaciones importantes en el desarrollo de nuevos sistemas mecatrónicos. La tabla II muestra diferentes posibles aplicaciones de algunos materiales

Tabla II. Ejemplos de aplicaciones para diferentes alternativas de fase dispersa en los materiales híbridos.

Matriz	Fase dispersa	Aplicación del material híbrido obtenido
Polimérica	Aleaciones metálicas con memoria de forma	Micropinzas, sensores de fuerza, motores DC. ^{19,20,21}
	Materiales con propiedades magnéticas	Micro-relevadores, microválvulas, motores AC-DC, microbombas. ^{19,20,22}
	Materiales conductores de la electricidad	Diodos emisores de luz, transistores a efecto de campo, fotodiodos, celdas solares, sensores de gas. ^{6,23,24}
	Materiales cerámicos	Micro-espejos con reflejo variable y controlable, bioreactores, liberadores de medicamento, microdiscos láser. ^{6,18,25,26}
	Materiales piezoeléctricos	Aparatos de ultrasonido intravascular (IVUS), monitoreo cardíaco, sensores táctiles. ^{27,28,29,30}

que se obtendrían combinando una matriz polimérica con diferentes alternativas de materiales avanzados que podemos encontrar en el mercado hoy en día. Diversas aplicaciones enunciadas en dicha tabla pueden ser elementos constitutivos de un sistema mecatrónico, tales como los motores, los fotodiodos, las microbombas, los diodos emisores de luz, los microelevadores o las microválvulas, entre otros. Algunos otros casos, la aplicación ya constituye, por sí misma, un sistema mecatrónico; por ejemplo, los micro-espejos con reflejo variable y controlable o los aparatos de ultrasonido intravascular (IVUS).

La información presentada en las tablas I y II muestra el enorme potencial que tiene el desarrollo de nuevos materiales híbridos. Sin embargo, el reto a vencer para la obtención de estos nuevos materiales se centra en el proceso de síntesis, ya que en la mayoría de los casos se requiere combinar materiales que no son compatibles mediante procesos de mezcla tradicionales. En este sentido, los avances científicos en la ingeniería de materiales permiten la disponibilidad de técnicas experimentales que permiten que dos componentes inherentemente incompatibles (por ejemplo, polímeros orgánicos y óxidos inorgánicos), se hagan compatibles por pre-mezcla de ambos a escala molecular antes de su conversión en un nuevo material.

En la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME), de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), como parte de las actividades de investigación desarrolladas por el cuerpo académico consolidado de Síntesis y Caracterización de Materiales, se han sintetizado materiales híbridos magnéticos utilizando como matriz polímeros biocompatibles como la carboximetilcelulosa (CMC) o el quitosán, y como fase dispersa se han utilizado nanopartículas de óxido de hierro¹⁰ y nanopartículas de cobalto elemental (Co).³¹ La figura 6 muestra imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM, por sus siglas en inglés) del material híbrido constituido de nanopartículas cuasiesféricas de cobalto elemental en CMC. Los dos tipos de material híbrido desarrollados presentan propiedades de superparamagnetismo, por lo que las películas delgadas de estos materiales sin duda tendrán aplicaciones muy interesantes en el futuro desarrollo de sistemas mecatrónicos.

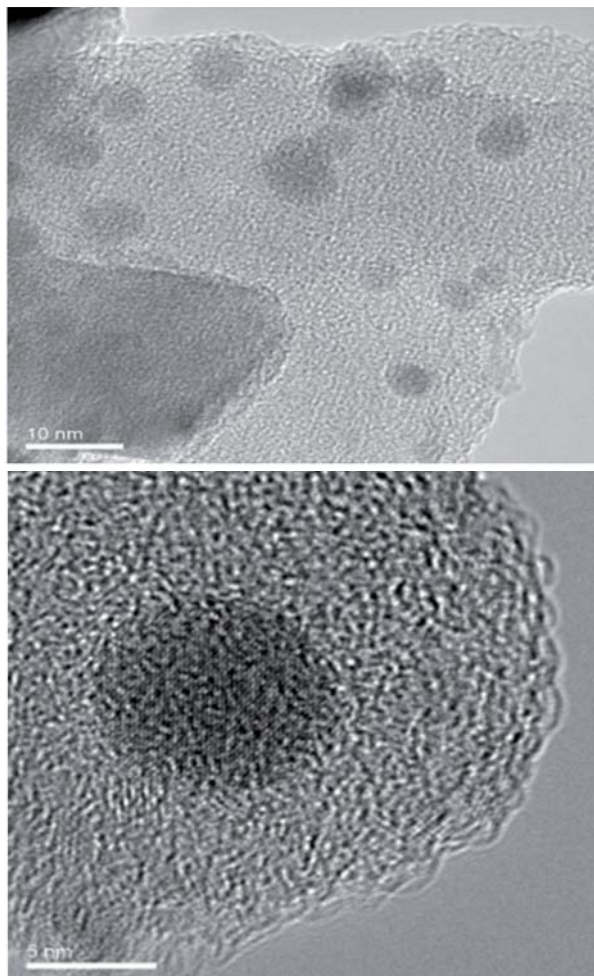


Fig. 6. Nanopartículas de Co dispersas en CMC (imagen obtenida mediante TEM).

CONCLUSIONES

Los materiales híbridos son considerados como un tipo de material compuesto, sin embargo presentan diferencias fundamentales en su estructura y morfología. La fase dispersa de los materiales híbridos tiene un tamaño promedio inferior a algunas decenas de micrómetros; además, la distribución espacial de dicha fase dispersa en la matriz polimérica puede tener un ordenamiento jerarquizado o bien mostrar una morfología amorfa. La posible polifuncionalidad de un material híbrido es función de la naturaleza de su fase dispersa y de su matriz, así como del proceso de síntesis utilizado para su obtención. La polifuncionalidad en un material híbrido es un requisito indispensable para su utilización en el desarrollo de sistemas mecatrónicos y la consecuente optimización de estos últimos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la participación del M.C. Juan Francisco Luna Martínez por su contribución al desarrollo del material híbrido de nanopartículas de óxido de hierro dispersas en una matriz polimérica de carboximetilcelulosa. Igualmente, se agradece al Dr. Alejandro Torres Castro por su amable colaboración para la obtención de las imágenes con el microscopio electrónico de barrido.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ulbrich H., Villgrattner T.; “Dynamics, control and optimization of mechatronic systems in theory and experiment”, Proceedings of International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, 2010, vol. 1281, no. 1, pp. 372-373.
2. López-Walle B., Gauthier M., Chaillet N.; “Dynamic modelling for a submerged freeze microgripper using thermal networks”, Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010, vol. 20, no. 2, 025001 (10pp).
3. Ilyukhin Y.V., Kharchenko A.N., Arfikyan S.A.; “Mechatronic electropneumatic servo drives”, Russian Engineering Research, 2010, vol. 30, no. 9, pp. 964–966.
4. Airic’s arm, Robot arm with fluidic muscles. FESTO Info (2009). Festo AG & Co. KG.
5. Ozaki T., Hosaka H., Morita T.; “Magnetic flux memory effect using a magnetostrictive material-shape memory piezoelectric actuator composite”, Sensors and Actuators A, 2009, vol. 154, pp. 69–72.
6. Hybrid Materials: Synthesis, Characterization, and Applications. Edited by Guido Kickelbick, 2007, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. ISBN: 978-3-527-31299-3.
7. Kim J., Yun S., Mahadeva S.K., Yun K., Yang S.Y., Maniruzzaman M.; “Paper actuators made with cellulose and hybrid Materials”, Sensors, 2010, vol. 10, pp. 1473-1485.
8. Liang Y., Wang H., Sanchez Casalongue H., Chen Z., Dai H.; “TiO₂ nanocrystals grown on graphene as advanced photocatalytic hybrid materials”, Nano Res., 2010, vol. 3, no. 10, pp. 701–705.
9. Petre A., Diaham S., Reyes-Melo E., Saini V., Li Z., Dervishi E., Xu Y., Biris A.S.; “Dielectric behavior of poly(3-hexylthiophene)/carbon nanotube composites by broadband dielectric spectroscopy”, IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, vol. 46, no. 2, pp. 627-633.
10. Luna-Martínez J.F., Reyes-Melo E., González-González V., Torres-Castro A., Guerrero-Salazar C., Sepúlveda-Guzmán S.; “Iron oxide nanoparticles obtained from a Fe(II) - chitosan polymer film”, Materials Science Forum, 2010, vol. 644, pp 51-55.
11. Voita E.O., Veflingstad S.R.; “A review of systems biology as an inspiration for mechatronics”, Journal of Biomechatronics Engineering, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 55-69.
12. Munch E., Launey M.E., Alsem D.H., Saiz E., Tomsia A.P., Ritchie R.O.; “Tough, bio-inspired hybrid materials”, Science, 2008, vol. 322, no. 5907, pp. 1516–1520.
13. Ludwigs S., Steiner U., Kulak A.N., Lam R., Meldrum F.C.; “Bioinspired polymer–inorganic hybrid materials”, Advanced Materials, 2006, vol. 18, pp. 2270–2273.
14. Geka G.T.; “Failure analysis and project work history images”, (September, 2011) <http://geraldjeka.synthasite.com/failure-analysis-and-work-history-images.php>
15. Pastor J.Y., Elices M.; “Comportamiento mecánico de la madreperla”; Anales de Mecánica de la Fractura, 2001, vol. 18, pp. 237-243.
16. Nanko M.; “Definitions and categories of hybrid materials”, Journal of Materials Online, 2009, pp. 2-9.
17. López Cuéllar E., Morin M., Reyes Melo E., Ortiz Méndez U., Guajardo Martínez H., Yereña Cortéz J.; “In situ strained Inconel 718 superalloy studied by thermoelectric power technique” Journal of Alloys and Compounds, 2009, vol. 467, pp. 572–577.
18. Catauro M., Verardi D., Melisi D., Belotti F., Mustarelli P.; “Novel sol-gel organic-inorganic hybrid materials for drug delivery”, Journal of Applied Biomaterials & Biomechanics [serial on the Internet], 2010, vol. 8, no. 1, pp. 42-51.
19. Houston K. et al. Polymer sensoried microgrippers

- using sma actuation. Proceedings of ICRA, 2007, pp. 820-825, Italy, April 2007.
20. Lim T.M., Zhanga D., Yanga J, Chenga S., Lowa S.H., Chuaa L.P., Wu X.; "Design and parameter estimation of hybrid magnetic bearings for blood pump applications", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, vol. 23, pp. 2352-2382.
 21. Rosmarin J.B.. *The Design of a Hybrid DC Motor/SMA Actuated Robotic Hand Based on Physiological and Anatomical Synergies*. Thesis (S.M.), Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering, 2008.
 22. Yanliang X, Yueqin D., Xiuhe W., Yu K.; "Analysis of hybrid magnetic bearing with a permanent magnet in the rotor by FEM," *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, vol. 42, no. 4, pp. 1363-1366.
 23. Huang Y-C.; Yen W-C., Liao Y-C., Yu Y-C., Hsu C-C., Ho M-L., Chou P-T., Su W-F.; "Band gap aligned conducting interface modifier enhances the performance of thermal stable polymer-TiO nanorod solar cell", *Applied Physics Letters*, 2010, vol. 96, no. 12, 123501 (3 pp.).
 24. Park I-S., Jung K., Kim D., Kim S-M., Kim K.J.; "Physical principles of ionic polymer-metal composites as electroactive actuators and sensors", *MRS Bulletin*, 2008, vol. 33, pp. 190-195.
 25. Yuanjing Cui; Jingting Hu; Jiancan Yu; Jingyan Qiu; Liying Liu; Lei Xu; Guodong Qian; "Hybrid inorganic-organic films with Benzaldehyde-based chromophore for electro-optic device," *Nanoelectronics Conference (INEC)*, 2010, pp. 281-282.
 26. Shibata S., Yano T., Segawa H.; "Organic-inorganic hybrid materials for photonic applications", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2008, vol. 14, no. 5.
 27. Chan H.L.W.; "Smart ferroelectric materials for sensors and mechatronic device applications," *Proceedings of IEEE Electron Devices Meeting*, 1999, pp.68-71.
 28. Qing X., Kumar A., Zhang C., Gonzalez I.F., Guo G., Chang F.K., "A hybrid piezoelectric/fiber optic diagnostic system for structural health monitoring", *Smart Materials and Structures*, 2005, vol. 14, no. 3, S98.
 29. Kapuria S., Bhattacharyya M., Kumar A.N.; "Assessment of coupled 1D models for hybrid piezoelectric layered functionally graded beams", *Composite Structures*, 2006, vol. 72, no. 4, pp. 455-468.
 30. Dargahi J., Kahrizi M., Rao N.P., Sokhanvar S.; "Design and microfabrication of a hybrid piezoelectric-capacitive tactile sensor", *Sensor Review*, 2006, vol. 26, no. 3, pp. 186-192.
 31. Luna-Martínez J.F., Reyes-Melo E., González-González V., García-Loera A., Ortíz-Méndez U.; "Obtención de nanopartículas de cobalto a partir de una solución polimérica sólida de Carboximetilcelulosa-CoCl₂", *XI Simposio Latinoamericano y IX Congreso Latinoamericano de Polímeros*, 2008.

Anúnciese en:

Ingenierías

INFORMES:

Tel: (52) (81) 83294020 Ext. 5854 Fax: (52) (81) 83320904

E-mail: revistaingenierias@gmail.mx

Internet: <http://ingenierias.uanl.mx>