



# MEMORIA DEL 34 CONGRESO INTERNACIONAL DE METALURGIA Y MATERIALES

*DIRECCIÓN GENERAL  
DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA*

ISBN: 978-607-7912-24-8



9 786077 912248

*SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO  
24,25 y 26 DE OCTUBRE DEL 2012*

**SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR**  
**DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA**  
**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SALTILLO**

**MEMORIA DEL 34 CONGRESO INTERNACIONAL  
DE METALURGIA Y MATERIALES**

**Editor**

*DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA*

**Compilador**

*Dr. Jaime Enrique Pérez Terrazas*

**Recopiladores**

*M.C. Claudia Yvonne Franco Martínez*  
*M. C. María Luisa Cepeda Tijerina*  
*Dra. Zully Matamoros Veloza*

**Libro Electrónico**  
**ISBN: 978-607-7912-24-8**

**Saltillo, Coahuila, México**

**24, 25 y 26 de Octubre del 2012**

## Evaluación de la Resistencia al Desgaste de los Compósitos Nanoestructurados Al<sub>7075</sub> – Ag-C NP

R. Flores-Campos<sup>a,1</sup>, G.A. Treviño-Rodríguez<sup>a,2</sup>, R.H. Estrada-Ruiz<sup>b,3</sup>, J.M. Herrera-Ramírez<sup>c,4</sup>,  
R. Martínez-Sánchez<sup>c,5</sup>

<sup>a</sup> Tecnológico de Monterrey Campus Saltillo, Departamento de Ingeniería, Tel. (844) 411 8081,  
Prol. Juan de la Barrera No. 1241 Ote., Col. Cumbres, CP 25270, Saltillo, Coah., México

<sup>b</sup> Instituto Tecnológico de Saltillo, Departamento de Mecánica-Mecatrónica, Tel. (844) 438  
9520, Venustiano Carranza No. 2400, Col. Tecnológico, CP 25280, Saltillo, Coah., México

<sup>c</sup> Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), Laboratorio Nacional de  
Nanotecnología, Tel. (614) 439 1146. Miguel de Cervantes No. 120, CP 31109, Chihuahua,  
Chih., México

<sup>1</sup>ruben.flores@itesm.mx, <sup>2</sup>Gtrevin10@gmail.com, <sup>3</sup>rosahilda.estrada@gmail.com,  
<sup>4</sup>martin.herrera@cimav.edu.mx, <sup>5</sup>roberto.martinez@cimav.edu.mx

### Resumen

Se generaron compuestos nanoestructurados de la aleación Aluminio 7075 y nanopartículas de Plata recubiertas con Carbono mediante la técnica de metalurgia de polvos en un molino de alta energía SPEX 8000M. Los polvos obtenidos fueron compactados, sinterizados y extruidos en caliente para producir barras de 1 cm de diámetro. Se realizaron pruebas de resistencia al desgaste en un dispositivo pin-on-disc para comprobar la hipótesis que partículas de segunda fase dúctiles de tamaño nanométrico, distribuidas homogéneamente en la matriz mejoran la resistencia al desgaste del compósito. Ensayos de microdureza fueron realizados para determinar la resistencia mecánica de los compósitos.

### Abstract

Nanostructured composites of Aluminum 7075 alloy and Silver nanoparticles coated with Carbon was generated by powder metallurgy in a high energy mill SPEX 8000M. The obtained powders were compacted, sintered and hot extruded to produce bars of 1 cm diameter. Wear resistance tests were carried out in a pin-on-disc device to corroborate the hypothesis that second phase ductile particles of nanometric size, homogeneously distributed in the aluminum matrix, enhance the wear resistance of the composite. Microhardness tests were conducted to determine the mechanical strength of the composites.

**Palabras clave:** Aleación Al 7075. Desgaste. Compósitos nanoestructurados. Metalurgia de polvos.

## Introducción

Las aleaciones de aluminio son ampliamente utilizadas en la industria automotriz y aeroespacial, debido a su alta relación resistencia – peso, ductilidad y resistencia a la corrosión [1]. Una forma de obtener mejores propiedades es generando compósitos; los compósitos de matriz metálica (MMC) son combinaciones de dos o más metales diferentes, compuestos intermetálicos, o partículas de segunda fase, que tienen un arreglo microestructural particular con la matriz metálica [2]. Los compósitos mejoran algunas propiedades de los materiales como la resistencia mecánica, el esfuerzo de fluencia y la resistencia al desgaste [3], sin presentar cambios significativos en la densidad del material de la matriz.

La molienda mecánica es una técnica de procesamiento de compósitos de matriz metálica reforzada con partículas, el proceso consiste en el soldado y fractura repetida de los polvos que conforman el compósito durante un tiempo determinado en un molino de alta energía [4]. Al generar compósitos con partículas de tamaños nanométricos, se generan compósitos nanoestructurados, que mejoran las propiedades de la aleación base de forma significativa [4]. Entre las propiedades que pueden mejorarse se encuentra la resistencia al desgaste, siendo los compósitos reforzados con partículas duras los que presentan las mejores propiedades al desgaste por deslizamiento; las partículas duras limitan la deformación plástica de la matriz, produciendo una mayor resistencia al desgaste. Algunos estudios sobre el comportamiento de la resistencia al desgaste en compósitos base aluminio reforzados con partículas duras (SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiC, TiB<sub>2</sub>, NiAl<sub>3</sub>, FeAl<sub>3</sub>) han sido realizados y ha sido mostrado que éstos tienen una mayor resistencia al desgaste, en comparación con la aleación base [2, 6, 7, 8].

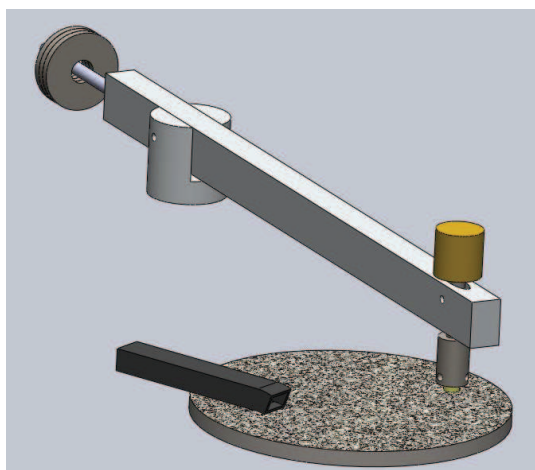
Sin embargo, no existen trabajos previos en donde la matriz sea reforzada con partículas dúctiles, por lo que este artículo está enfocado en la evaluación de la resistencia al desgaste que presenta la aleación de aluminio Al 7075 (Al<sub>7075</sub>) al reforzarla con nanopartículas de plata recubiertas con carbono (Ag-C NP) [9], a fin de determinar si las partículas dúctiles pueden tener un efecto positivo en la matriz.

## Desarrollo.

Barras de aleación de aluminio 7075 (Al<sub>7075</sub>) y compuestos nanoestructurados de Al<sub>7075</sub> y nanopartículas de plata recubiertas con carbono (Ag-C NP) fueron producidos mediante la técnica de metalurgia de polvos, a partir de rebaba de aleación Al<sub>7075</sub> con tamaños promedios de 5 mm, y nanopartículas de plata recubiertas con carbono con un tamaño promedio de 20

nm. Las diferentes barras fueron obtenidas mediante molienda mecánica en un molino de alta energía SPEX 8000M, moliendo los materiales durante 0, 5, 10, y 15 h para determinar el efecto de la molienda mecánica sobre las propiedades de la aleación. Por otra parte, los compósitos nanoestructurados fueron obtenidos mezclando las nanopartículas de plata recubiertas con carbono y la aleación Al<sub>7075</sub> en concentraciones de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 % en peso de nanopartículas de plata, molidas durante 5 h. La carga total fue de 10 g y la relación medio de molienda – peso fue de 4:1. Todas las moliendas se llevaron a cabo con 0.25 ml de metanol como agente de control de proceso (PCA) y en una atmósfera inerte de argón. Una vez obtenida la cantidad necesaria de material, el polvo fue compactado, sinterizado y extruido en caliente [10]. Las barras obtenidas fueron caracterizadas microestructuralmente usando microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM) en un microscopio Jeol 2200FS operado a 200 kV. El análisis químico fue determinado mediante espectroscopía de energía dispersiva (EDS), usando un Oxford Inca X-Ray energy dispersive spectrometer acoplado al sistema del microscopio. La caracterización mecánica fue realizada mediante ensayos de microdureza en un Micro Hardness Tester FM-07, usando un tiempo de indentación de 10 s y una carga máxima de 200 g. La densidad de los compósitos nanoestructurados fue obtenida mediante el método de Arquímedes en una balanza analítica Sartorius CP225D.

Un dispositivo pin-on-disc (Fig. 1) fue utilizado para realizar los ensayos de desgaste de las muestras de la aleación de aluminio Al<sub>7075</sub> y los compósitos nanoestructurados Al<sub>7075</sub> – Ag-C NP. El arreglo consiste de un contenedor perpendicular a un disco giratorio, sobre el cual se colocó papel abrasivo de SiC con una granulometría de 53.5 μm (240 grit). La carga empleada durante los ensayos fue de 1 N y 2 N, aplicada perpendicularmente a la superficie de desgaste de las muestras de ensayo. La distancia lineal total de deslizamiento durante el ensayo fue establecida en 600 m, midiéndose la pérdida de peso de la probeta cada 100 m. Se utilizó una velocidad angular constante del disco rotativo de 100 rpm. Las pruebas se llevaron a cabo a temperatura ambiente, empleando agua como medio lubricante durante toda la prueba. El papel abrasivo fue conservado durante toda la distancia de deslizamiento empleada. La validación de los datos fue obtenida generando dos pruebas para cada condición de análisis. Las muestras fueron limpiadas inmersas en metanol en un baño ultrasónico, secadas y pesadas para determinar la pérdida de peso en cada intervalo.



**Figura 1.** Esquema del dispositivo pin-on-disc empleado para la realización de las pruebas de desgaste.

## Resultados

La tabla 1 muestra el valor de la densidad de las barras de aleación  $Al_{7075}$  obtenidas por molienda mecánica a diferentes tiempos de molienda. Como puede observarse, la variación en densidad es mínima, manteniéndose dentro de un rango promedio de  $2.81 \text{ g/cm}^3$ , la densidad de la aleación  $Al_{7075}$  obtenida por métodos convencionales es de  $2.81 \text{ g/cm}^3$  [11], lo que indica que la aleación obtenida por molienda mecánica a los diferentes tiempos de molienda genera un material homogéneo.

**Tabla 1.** Densidad de las aleaciones  $Al_{7075}$  obtenidas a diferentes tiempos de molienda.

Tiempo (h)	0	5	10	15
Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	$2.806 \pm 0.003$	$2.813 \pm 0.002$	$2.811 \pm 0.008$	$2.828 \pm 0.009$

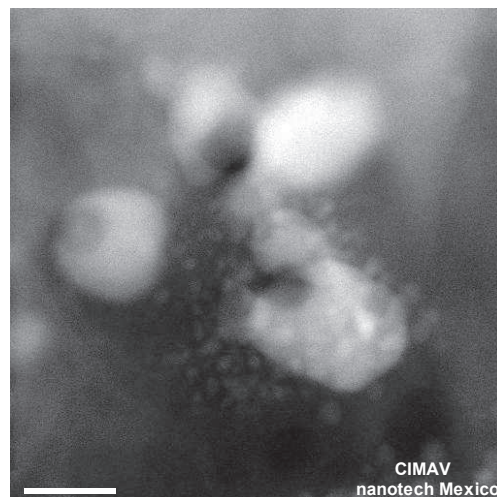
La tabla 2 presenta los valores de densidad para los compósitos nanoestructurados obtenidos durante 5 h de molienda a diferentes concentraciones de nanopartículas, condición de estudio en este trabajo. Como puede observarse, el valor de densidad se incrementa ligeramente conforme se incrementa el contenido de nanopartículas dispersas dentro de la matriz de aluminio hasta 1%, ya que con contenidos mayores de nanopartículas se observa una ligera disminución del valor de la densidad. El incremento en la densidad de los compósitos nanoestructurados se debe a que las nanopartículas de plata, distribuidas homogéneamente dentro de la matriz de aluminio, actúan como centros de nucleación que favorecen la formación

de la fase  $MgZn_2$ , [10], debido a que el zinc y el magnesio salen de solución sólida y forman esta fase. Aunado a la presencia de los compuestos que se forman durante las diferentes etapas de procesamiento del compuesto nanoestructurado i.e.  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $Al_4C$ . Por otro lado, la disminución en los valores de densidad con altos contenidos de nanopartículas se debe a la aglomeración de las nanopartículas de plata, lo que promueve una menor cantidad de formación de la fase  $MgZn_2$ , generando un compuesto más ligero. La densidad de la fase  $MgZn_2$  es de  $5.09 \text{ g/cm}^3$ , valor alto comparado con la de la aleación  $Al_{7075}$ , por lo que al tener mayor o menor cantidad de esta fase en la matriz de aluminio, redundará en un incremento o disminución, respectivamente, de la densidad del compuesto.

**Tabla 2.** Densidad de los compósitos nanoestructurados  $Al_{7075}$  – Ag-C NP obtenidos a 5 h de molienda.

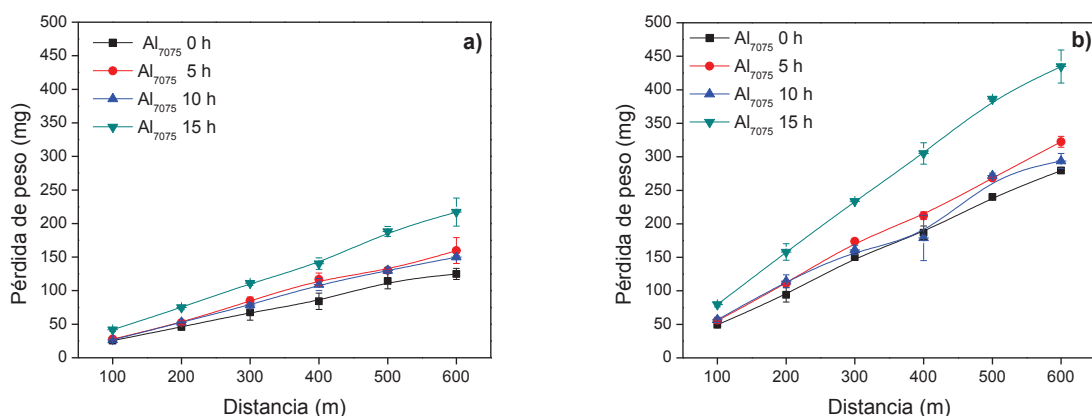
Contenido de nanopartículas	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	$2.813 \pm 0.002$	$2.837 \pm 0.01$	$2.843 \pm 0.003$	$2.829 \pm 0.002$	$2.814 \pm 0.013$

La figura 2 muestra una imagen HRTEM de campo oscuro, en donde se aprecian algunas nanopartículas de plata con tamaños cercanos a los 20 nm, y alrededor de éstas se observan fases de menor tamaño que corresponden al  $MgZn_2$ .



**Figura 2.** Imagen del compuesto nanoestructurado en HRTEM de campo oscuro que muestra nanopartículas de plata y de la fase  $MgZn_2$ .

La figura 3 presenta el comportamiento al desgaste de la aleación  $Al_{7075}$  obtenida a diferentes tiempos de molienda, bajo la acción de dos cargas: 1 (Fig. 3a) y 2 N (Fig. 3b). Como puede observarse, ambas gráficas presentan una tendencia prácticamente lineal: la pérdida de peso se incrementa gradualmente conforme la distancia aumenta. La aleación que presenta una mayor pérdida de peso es la aleación obtenida a mayor tiempo de molienda. Al comparar las curvas con ambas cargas, puede apreciarse que con 1 N la curva es más apaisada que con 2 N. En ambos casos se observa que a mayor tiempo de molienda, mayor es la pérdida de peso; las condiciones 0, 5, y 10 h de molienda presentan una pérdida de peso similar. Sin embargo con 15 h de molienda la pérdida de peso es mayor a las diferentes distancias evaluadas, alcanzando valores de 217.15, y 434.65 mg a 600 m de distancia recorrida con 1 y 2 N de carga, respectivamente. Un 42.48 % y un 35.71 % en pérdida de peso de diferencia entre las condiciones extremas (0 y 15 h) para 1 y 2 N de carga, respectivamente. A distancias cortas la pérdida de peso es similar para las diferentes aleaciones estudiadas, pero conforme el desplazamiento se incrementa la pérdida de peso se vuelve cada vez mayor.

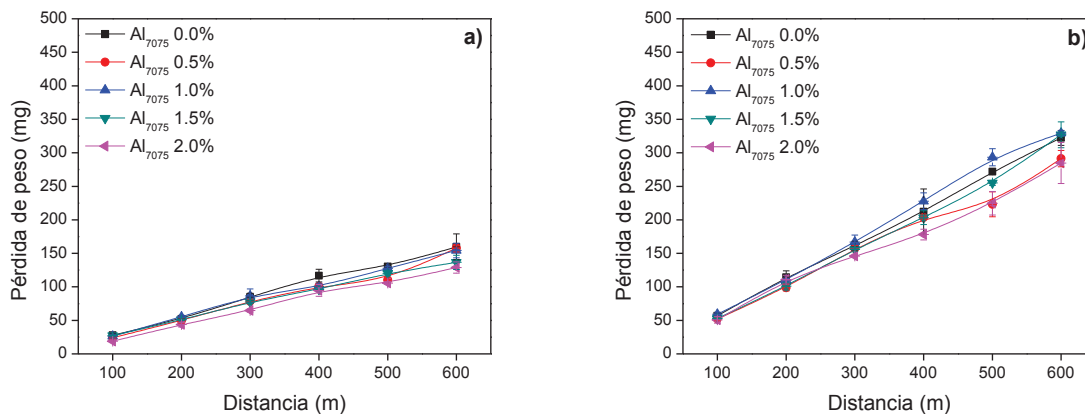


**Figura 3.** Curvas de pérdida de peso en función de la distancia recorrida con una carga de a) 1 N y b) 2 N de la aleación  $Al_{7075}$  obtenida por molienda mecánica a diferentes tiempos de molienda.

La figura 4 muestra el comportamiento al desgaste del compuesto nanoestructurado  $Al_{7075} - Ag-C$  NP obtenido por molienda mecánica con 5 h de molienda y diferentes concentraciones de nanopartículas de plata bajo la acción de dos cargas: 1 (Fig. 4a) y 2 N (Fig. 4b). Como puede observarse en ambas gráficas, la tendencia es similar a la que se presenta en la aleación  $Al_{7075}$  obtenida por molienda mecánica a diferentes tiempos, sin embargo, los valores de desgaste obtenidos son menores. Para una distancia de 600 m, la aleación sin adición de nanopartículas de plata presenta una pérdida de peso, para las dos cargas empleadas, de 159.65 y 293.70



mg, respectivamente, mientras que el compuesto nanoestructurado con 2.0 % de nanopartículas presenta un valor de 128.80 y 284.80 mg de pérdida de peso. Esto representa una disminución en el desgaste del 19.54 % para 1 N de carga y un 11.66 % para 2 N de carga. Estos resultados sugieren que las nanopartículas de plata tienen un efecto positivo sobre la resistencia al desgaste del compuesto Al<sub>7075</sub>-Ag-C NP.



**Figura 4.** Pérdida de peso en función de la distancia recorrida con una carga de a) 1 N y b) 2 N del compuesto nanoestructurado Al<sub>7075</sub> – Ag-C NP obtenido por molienda mecánica a diferentes concentraciones de nanopartículas y 5 h de molienda.

La tabla 3 muestra los resultados de dureza, en donde puede apreciarse que cuando se incrementan los tiempos de molienda se genera una aleación con una dureza mayor. Además puede observarse que la dureza es mayor con tiempos de molienda grandes. Comparando estos resultados con los resultados de desgaste (Fig. 3), puede inferirse que a mayor dureza de las muestras, mayor es el desgaste. Este efecto opuesto puede ser debido a que el incremento en la dureza resulta de la molienda mecánica y los procesos de conformado del material, obteniendo un material con una matriz libre de partículas que limitan el desgaste.

La dureza de la aleación a 0, 5 y 10 h de molienda se encuentra entre 87 y 94 HVN, mientras que a 15 h se genera una dureza de más de 100 HVN. Es decir que con valores de dureza similares, el grado de pérdida de peso también permanece similar, y cuando la dureza se incrementa el grado de desgaste también aumenta (Fig. 3).

**Tabla 3.** Microdureza en función del tiempo de molienda.

Tiempo (h)	0	5	10	15
Microdureza (HVN)	87.65 ± 2.56	88.48 ± 2.30	93.98 ± 2.77	101.27 ± 1.95

La tabla 4 reporta los resultados de dureza en función del contenido de nanopartículas, para el compósito obtenido con 5 h de molienda. Como puede apreciarse, la dureza se incrementa conforme se incrementa el contenido de nanopartículas hasta 1.0%, decayendo ligeramente para contenidos mayores. Los compósitos nanoestructurados que presentan mayor dureza son con 1.0 y 1.5 % de nanopartículas de plata, y a pesar de que con el contenido de nanopartículas se incrementa la dureza, la pérdida de peso permanece por debajo de la condición sin nanopartículas, lo que indica que compósitos con nanopartículas de plata obtenidos por molienda mecánica, generan materiales con una resistencia al desgaste superior.

No obstante que los compósitos nanoestructurados presentan una mayor dureza comparándolos con la aleación sin adición de nanopartículas (a cualquier tiempo de molienda) el grado de desgaste es menor, lo que muestra que las nanopartículas de plata recubiertas con carbono tienen un efecto importante en el mejoramiento en esta propiedad.

**Tabla 4.** Microdureza en función del contenido de nanopartículas y 5 h de molienda.

Contenido de nanopartículas	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
Microdureza (HVN)	88.48 ± 2.30	104.07 ± 5.92	116.50 ± 4.81	111.95 ± 1.14	106.10 ± 1.08

A pesar de que el compósito nanoestructurado está conformado con partículas dúctiles y no duras, que son las que generalmente se emplean para mejorar las propiedades al desgaste [2, 6-8], se obtienen propiedades mejoradas con el incremento de nanopartículas de plata en la aleación Al<sub>7075</sub>, lo que indica que partículas dúctiles pueden mejorar las propiedades del compósito nanoestructurado, al frenar la deformación plástica que se presenta cuando dos superficies en contacto tienen un movimiento relativo entre ellas y, por otro lado, cuando estas partículas se desprenden del material, actúan como lubricante sólido reduciendo el desgaste del material. Como trabajo a futuro se pretende analizar el nivel de desgaste del compósito nanoestructurado Al<sub>7075</sub> – Ag-C NP producidos con tiempos de molienda de 10 y 15 h a fin de determinar si las nanopartículas de plata y el tiempo de molienda tienen un efecto positivo en la resistencia al desgaste del material.

## Conclusiones

Compósitos nanoestructurados obtenidos por molienda mecánica presentan una mayor resistencia al desgaste que la aleación base.

A mayores tiempos de molienda empleados para obtener la aleación Al<sub>7075</sub> se presenta una menor resistencia al desgaste.

Los compósitos nanoestructurados Al<sub>7075</sub> – Ag-C NP obtenidos por molienda mecánica durante 5 h, presentan una mayor resistencia al desgaste conforme el contenido de nanopartículas aumenta.

Los compósitos nanoestructurados Al<sub>7075</sub> – Ag-C NP presentan un incremento en la resistencia al desgaste de más de 19 y 11% cuando se someten a cargas de 1 y 2 N respectivamente, lo que indica que las partículas nanométricas de plata recubiertas con carbono favorecen la resistencia al desgaste.

Partículas dúctiles como las nanopartículas de plata favorecen la resistencia al desgaste ya que actúan como partículas que frenan la deformación plástica durante el deslizamiento relativo.

Partículas dúctiles como las nanopartículas de plata, pueden favorecer la resistencia al desgaste de un material, ya que al desprenderse de la matriz pueden actuar como lubricante sólido.

## Referencias

- [1] N.A. Prakash, R. Gnanamoorthy, M. Kamaraj. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 2010; 224: 1189-1196.
- [2] G.E. Totten, D.S. MacKenzie. Handbook of Aluminum Vol. 2 Alloy Production and Materials Manufacturing. New York: Taylor & Francis Group; 2003.
- [3] M.H. Korkut. Materials Science and Technology 2004; 20: 73-81.
- [4] M.D. Bermúdez, F.J. Carrión, P. Iglesias, G. Martínez-Nicolás, E.J. Herrera, J.A. Rodríguez. Wear 2005; 258: 906–914.
- [5] R. Flores-Campos, D.C. Mendoza-Ruiz, P. Amézaga-Madrid, I. Estrada-Guel, M. Miki-Yoshida, J.M. Herrera-Ramírez, R. Martínez-Sánchez. Journal of Alloys and Compounds 2010; 495: 394–398.
- [6] S.C. Tjong, K.C. Lau. Materials Science and Technology 2000; 16: 99-102.
- [7] A.E. Jiménez, M.D. Bermúdez, J. Cintas, E.J. Herrera. Wear 2009; 266: 255–265.
- [8] F. Velasco, C.E. da Costa, J.M. Torralba. Powder Metallurgy 2002; 45: 247-250.

- [9] R. Flores-Campos, I. Estrada-Guel, M. Miki-Yoshida, R. Martínez-Sánchez, J.M. Herrera-Ramírez. *Materials Characterization* 2012; 63: 39-46.
- [10] R. Flores-Campos, R. Deaquino-Lara, J.M. Herrera-Ramírez, A. Ponce, I. Estrada-Guel, M. Miki-Yoshida, R. Martínez-Sánchez. *Materials Science Forum* 2010; 644: 9-12.
- [11] W.F. Gale. *Smithells metals reference book*. Eighth Edition. Boston: Elsevier/ASM International; 2004.

### **Autorización y renuncia**

Los autores del presente artículo autorizan a los organizadores del 34 Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales para publicar el escrito en el libro electrónico "Memoria del 34 Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales". Los organizadores o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.