

FABRICACIÓN DE METALES CELULARES BASE ALUMINIO

Fabrication of aluminium base cellular metals

RESUMEN

Los metales celulares-MC (espumas y esponjas), dada su especial estructura y extrema ligereza se han convertido en un tópico de gran interés en la investigación sobre nuevos materiales a nivel mundial. La combinación de sus propiedades físicas, mecánicas y morfológicas permiten que estos materiales tengan un enorme potencial de aplicación en diversos sectores industriales.

En este trabajo se reporta una ruta viable y económica aplicada conjuntamente entre el IIM-UNAM y el GINUMA-UPB, para obtener esponjas de aluminio a bajos costos y con buenas propiedades mecánicas. De esta manera, se espera contribuir al desarrollo de dicha temática en el ámbito Latinoamericano.

PALABRAS CLAVES: Aluminio, Esponjas metálicas, Infiltración, Materiales celulares, NaCl, Preformas solubles.

ABSTRACT

Due to the special structure and extreme light weight, cellular metals (foams and sponges) have become of great interesting in new materials researching in the whole world. Physical, mechanical and morphological properties allow these materials to have a great potential of application in several industrial sectors.

A viable and economical route, being applied by IIM-UNAM and GINUMA-UPB, to obtain aluminum sponges at low costs with good mechanical properties is reported in this paper, which is expected to contribute with the development of this thematic in Latinamerica.

KEYWORDS: Aluminum, Cellular Materials, Infiltration, Metallic Sponges, NaCl, Soluble Preforms

1. INTRODUCCIÓN

Se ha observado como a partir de los años 80's, los metales celulares (MC) han cobrado gran interés debido primordialmente a que su estructura porosa; ya sea abierta (esponjas) o cerrada (espumas), les brinda a estos materiales una combinación excepcional de propiedades mecánicas, físicas y químicas. De igual manera, estos materiales poseen estructuras que les permite tener densidades de solo fracciones con respecto al material sólido, además de algunas características como son su alta capacidad de absorción de energía de impacto, de vibración y de sonido, así como de aislamiento térmico entre otras [1-4]. Todo esto ha permitido que los MC sean identificados como un nuevo tipo de materiales que pueden ser empleados en aplicaciones de tipo funcional y estructural; tales como en intercambiadores de calor, soportes de catálisis, filtros, partes de automóvil para resistencia al impacto, y paneles para aislamiento acústico [1-5].

Se han reportado además un amplio número de métodos para la fabricación de MC [6-27], los cuales en general pueden ser agrupados en 3 categorías de acuerdo al estado en que sea procesado el metal matriz. Estos son: pulvimetalurgia, deposición metálica y fundición. Aún así, los altos precios de los MC radican precisamente en los elevados costos de producción y en la mala calidad debida al control deficiente de la estructura celular [28-29], por lo que hoy día éste último se considera un problema a resolver en la producción comercial de las espumas metálicas. Adicionalmente, el rápido incremento en la demanda de MC base aluminio, de alta calidad; demuestra una creciente necesidad para el desarrollo de tecnologías de un costo efectivo.

En particular, debido a que es una ruta muy económica para crear MC, la infiltración de metales y aleaciones alrededor de materiales de relleno, ha tenido un creciente interés en los últimos años [30-31]. En este caso, es

PATRICIA FERNÁNDEZ*

Ingeniera. Metalúrgica, M. Sc.
Est. Doctorado

Grupo de Investigación Sobre
Nuevos Materiales (GINUMA)
Universidad Pontificia Bolivariana
patricia.fernandez@upb.edu.co

GABRIEL TORRES V.

Físico, M. Sc. Ph.D.

Profesor Emérito

IIM-UNAM, México D.F.

gtorres@servidor.unam.mx

JAVIER CRUZ R.

Ingeniero Mecánico. Ph.D.

Grupo de Investigación Sobre

Nuevos Materiales (GINUMA)

Universidad Pontificia Bolivariana

luis.cruz@upb.edu.co

SEBASTIÁN GAVIRIA G.

Estudiante Ing. Aeronáutica

Universidad Pontificia Bolivariana

juanbatian@gmail.com

EDGAR OCHOA

Estudiante Ingeniería Mecánica

IIM-UNAM, México D.F.

eochoa@gmail.com

preciso pensar en las principales ventajas ofrecidas por este proceso, tales como la posibilidad de utilizar un amplio rango de aleaciones y su buen control de tamaño de poro. En este artículo se describe el proceso de infiltración-disolución (PID) para la fabricación de esponjas de aluminio utilizando preformas solubles de sal. A las esponjas obtenidas, se les caracterizó la porosidad, la densidad y las propiedades de compresión. Los resultados indican que el proceso PID es útil para la obtención de esponjas metálicas con propiedades mecánicas interesantes en combinación con la alta ligereza del material. Finalmente se discuten algunas de las posibilidades de este proceso en lo referente al futuro de su desarrollo tecnológico.

2. METODOLOGIA

2.1. Fabricación de esponjas de Al

Para la fabricación de las esponjas metálicas fue seleccionada la aleación de aluminio A356 con 6.76 % Si y 0.45% Mg en composición. Se utilizaron cristales de NaCl de grado comercial con morfología poliedral, los cuales fueron tamizados y separados los tamaños de malla entre 2 y 3 mm de diámetro promedio. El tamaño de grano de los cristales de sal y su morfología, determinaran finalmente el tamaño y forma del poro de las esponjas obtenidas [32].

El NaCl seleccionado fue pesado para posteriormente ser tratado térmicamente a diferentes valores de temperatura, con el fin de eliminar la humedad propia del material y evitar el choque térmico con el metal al momento de la infiltración, mejorando a la vez la fluidez del metal a través de los granos. De esta manera, se obtuvo como resultado una temperatura óptima de 450°C con un sostenimiento por un período de dos horas. El punto de fusión de la aleación utilizada fue determinado mediante una curva de enfriamiento, obteniéndose una temperatura de 620°C. A partir de este resultado, se realizaron una serie de pruebas variando la temperatura de vaciado con el fin de determinar la temperatura con mejor colabilidad durante la infiltración. Se obtuvo una buena fluidez de la aleación a una temperatura de 680°C.

Una vez la sal fue tratada térmicamente y el aluminio fue fundido, se procedió a introducir los cristales de sal en un molde. A continuación, el metal líquido fue depositado directamente sobre el molde que contiene la preforma de NaCl.

La infiltración procede por efecto de la gravedad de manera similar al proceso de Casolco *et al.* [33]. Una vez el molde se ha enfriado y el conjunto Al/NaCl ha solidificado, se obtiene la esponja metálica mediante disolución de la sal, utilizando agua caliente y agitación. La Figura 1 describe esquemáticamente el proceso llevado a cabo y mediante el cual se obtuvieron esponjas

de 50 mm de altura y 70 mm de diámetro. Se seleccionaron dos muestras provenientes de coladas diferentes (pruebas P3 y P4), a partir de las cuales se maquinaron probetas para la caracterización morfológica, el cálculo de densidad y los ensayos de compresión.

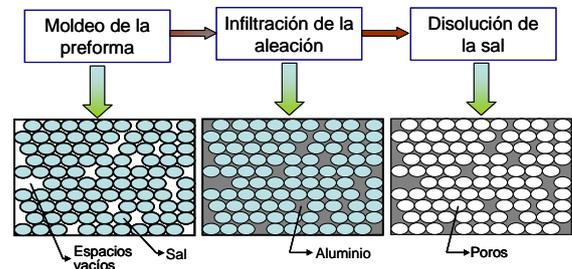


Figura 1. Esquema del proceso de infiltración de preformas

2.2. Caracterización morfológica

La estructura celular fue inspeccionada mediante un analizador de imágenes por microscopía óptica. El tamaño de poro, el tipo de porosidad y los poros de puntos de contacto intergranular fueron también caracterizados.

2.3. Determinación de la densidad

La densidad de las esponjas se determinó de manera directa, para lo cual fueron utilizadas un total de 18 probetas, 9 de cada prueba P3 y P4, respectivamente. Se obtuvo un valor promedio para cada prueba y un valor general de densidad promedio y densidad relativa. Para ello, a cada una de las probetas se les midió la masa y se les calculó el volumen respectivo. Con los resultados obtenidos se realizó el cálculo de la densidad. En la tabla 1 se reportan las medidas de las probetas utilizadas para determinar la densidad. Se comprobaron los datos obtenidos para la densidad relativa mediante la ecuación propuesta (1).

$$\rho = \frac{f_{Al} \rho_{NaCl}}{f_{Al} \rho_{NaCl} + (1 - f_{Al}) \rho_{Al}} \quad (1)$$

Donde f_{Al} es la fracción del Al, ρ_{Al} y ρ_{NaCl} corresponden a la densidad del Al y el NaCl, respectivamente [34].

2.4. Ensayo de compresión

Un total de 18 probetas fueron sometidas a esfuerzos de compresión en una máquina universal de ensayos Instron 5582, a una velocidad de cabezal de 0.5 mm/min y bajo condiciones normales de laboratorio. Se utilizaron probetas con formas geométricas de paralelepípedo y cubo, cuyas relaciones de forma de altura con respecto al

lado de la base fueron de 1:1, 2:1 y 3:1, empleando tres probetas por cada medida (Tabla 1).

Probeta	Medidas	Forma
1:1 – P4	13x13x13	Cúbica
2:1 – P4	10x10x20	Paralelepípedo
3:1 – P4	12x12x36	Paralelepípedo
1:1 – P3	13x13x13	Cúbica
2:1 – P3	12x12x25	Paralelepípedo
3:1 – P3	13,3x13,x40	Paralelepípedo

Tabla 1. Medidas de probetas utilizadas para ensayos

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con las muestras obtenidas se estableció la posibilidad de obtener esponjas de aluminio mediante el proceso de infiltración utilizando preformas elaboradas con sal. La resistencia a la alta temperatura y la fácil remoción hacen del NaCl uno de los materiales más útiles para la elaboración de preformas a pesar de la morfología del grano, ya que en general se prefieren materiales con formas de grano esféricas que al final dan como resultado esponjas con porosidades más uniformes [35].

Debe tenerse especial cuidado con la temperatura de colado del metal, ya que no debe ser muy cercana al punto de fusión del NaCl (~800°C), de otro modo se puede presentar sinterización de los granos de sal, dando lugar a la formación de aglomerados, los cuales causarán la aparición de agujeros indeseables en la esponja. Sin embargo, aún sin alcanzar dicha temperatura, es posible que se presente algo de aglomeración de los granos de sal. Este fenómeno ha sido reportado por Marchi et-al. [36], aludiendo dicha ocurrencia a la evaporación-condensación durante el período de secado de la sal, resaltando así la importancia del ciclo de tratamiento térmico de la sal, previo a la infiltración.

3.1. Microscopía óptica

El análisis por microscopía óptica mostró una esponja con estructura de porosidad abierta, lo que en su momento permitió la disolución de la sal. Aunque en este caso no se realizó ningún análisis de la sal residual, se han reportado métodos para determinar los valores de esta a partir de relaciones matemáticas [34]. En general, el tamaño de poro promedio estuvo entre 2 y 3mm, acorde con el tamaño de los cristales de sal utilizados para la preforma. Sin embargo, se han encontrado algunos poros cuya medida ha superado estos valores alcanzando hasta los 5mm de diámetro promedio. Esto puede ser debido a pequeños puntos de aglomeración entre dos granos adyacentes, en cuyo caso estos aparecen como un solo grano durante la infiltración y quedando un poro del doble de su tamaño al ser disuelta la sal.

En la Figura 2 se muestra la macrofotografía de un corte transversal de las esponjas fabricadas. Adicionalmente, se ha observado la existencia de poros muy pequeños correspondientes a puntos de contacto intergranular tal como lo reportan Depois et-al. [37] en un esquema hipotético de puntos de contacto entre granos de sal, los cuales permiten la interconexión entre los poros mayores, facilitando así la disolución de la sal [38].

Adicionalmente, se midieron los puntos de contacto más pequeños obteniéndose medidas en un intervalo de 591 a 827 micras. Las imágenes obtenidas mediante el analizador de imágenes del microscopio óptico se muestran en la Figura 3. La reglilla muestra una medida de 200 μm .

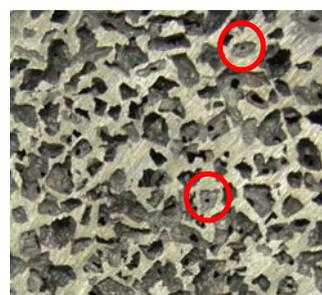


Figura 2. Macroestructura de las esponjas de Al obtenidas

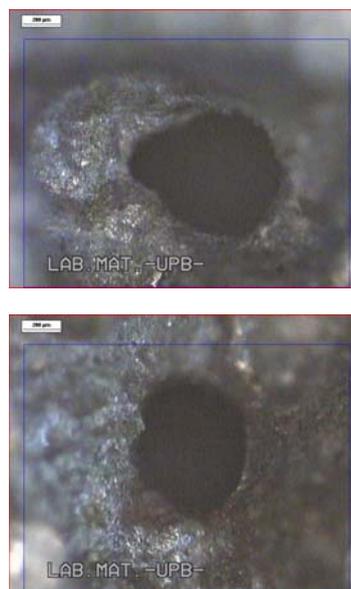


Figura 3. Microscopía óptica de puntos de contacto intergranular (puntos encerrados en círculos rojos en Fig. 2).

3.2. Densidad

La Figura 4 muestra un conjunto de 9 probetas utilizadas para el cálculo de densidad y el ensayo de compresión. La densidad relativa se encontró en un intervalo entre 46% – 55%, lo que significa densidades de las esponjas elaboradas entre 1,25 – 1,48 g/cm^3 . Uno de los aspectos a

tener en cuenta en este caso, es la posibilidad de que queden cristales de sal remanente, atrapados en la matriz metálica o no disueltos por completo, con lo cual la densidad relativa se incrementa. De lo anterior, se asume que es posible disminuir estos valores de densidad relativa mediante mejoras en el proceso.



Figura 4. Probetas utilizadas para el cálculo de densidad y los ensayos de compresión

3.3. Resistencia mecánica a compresión

Los resultados obtenidos en el ensayo de compresión se muestran en las curvas de la Figura 5. La resistencia a la compresión estuvo entre un mínimo de 18 MPa y un máximo de 40 MPa, con un promedio general de 29, 27 MPa. Estos valores son muy similares a los reportados por otros autores para esponjas metálicas de aluminio obtenidas tanto por infiltración como por otros métodos [32, 39].

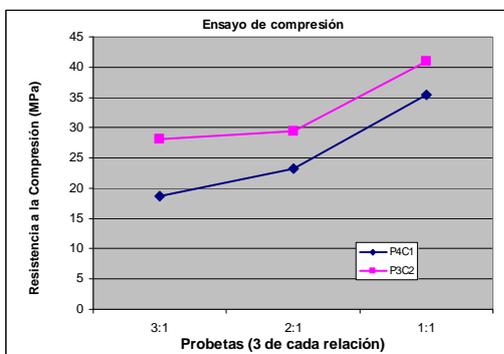


Figura 5. Valores promedio de compresión de esponjas de Al obtenidos de pruebas P3 y P4

Las curvas de compresión obtenidas presentaron en general una etapa inicial de respuesta elástica, seguida por una etapa de deformación hasta alcanzar un punto de falla, luego del cual se observa una etapa de densificación por acomodamiento de la estructura porosa, similar a lo reportado por Brothers y Dunand [40] (Figura 6).

De otra parte, se observó un comportamiento a la fractura generalizado en la mayoría de las probetas, donde una vez comienza el inicio de falla, la esponja realiza una acomodación de de la estructura, lo cual se evidencia

en un nuevo incremento del esfuerzo durante el ensayo, quedando prácticamente en un valor constante por un largo periodo sin presentar el daño total de la probeta.

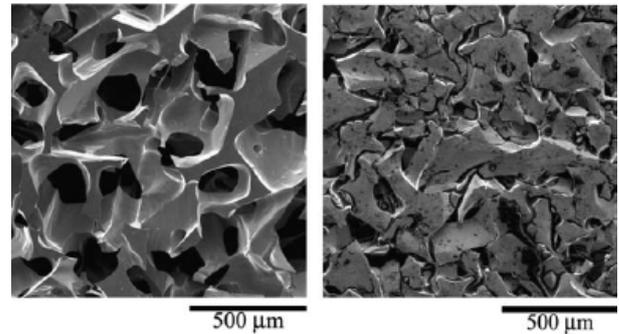


Figura 6. Macroestructura de esponjas de Al [40]

Finalmente, resulta claro el incremento en la resistencia mecánica con el incremento en la densidad de las esponjas, lo que evidencia la densidad relativa como un parámetro influyente en las propiedades mecánicas de las esponjas. Este comportamiento ha sido reportado de igual manera para esponjas de Zinalco obtenidas mediante infiltración por gravedad [41].

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A pesar de la existencia de un vasto número de métodos para la fabricación de esponjas metálicas, en este primer acercamiento al proceso de infiltración de preformas solubles se ha observado que es una técnica que brinda la posibilidad de obtener a muy bajo costo; esponjas con porosidad relativamente uniforme con buenas propiedades mecánicas y físicas.

Este proyecto es tan solo el inicio de una serie de trabajos de una labor conjunta IIM-UNAM y GINUMA-UPB, en los que se espera incursionar en la implementación del proceso mediante presión de vacío. Adicionalmente, se pretende estudiar el comportamiento de preformas sinterizadas y preformas compactadas a presión. A futuro, se espera disminuir la densidad relativa de las esponjas de aluminio y mejorar la estructura porosa, para de esta manera establecer una relación más exacta entre las propiedades mecánicas y la estructura celular de la esponja.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Banhart. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, vol. 46, pp. 559-632, 2001.
- [2] L.J. Gibson and M.F. Ashby. *Cellular solids*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.

- [3] J. Banhart Manufacturing routes for metallic foams. *JOM*, vol. 52 (12), pp. 22-27, 2000.
- [4] M.F. Ashby, A. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson; J. W. Hutchinson and H.N.G. Wadley. *Metal foams: a design guide*: Butterworth-Heinemann, Oxford, UK. 2000. p. 6-38.
- [5] J. Banhart. Metallic foams: challenges and opportunities. In Proc. *Eurofoam2000*, MIT-Verlag Bremen, pp. 13-20.
- [6] E.M.A. Maine and M.F. Ashby. Applying the investment methodology for materials (IMM) to aluminium foams. *Materials & Design*, vol. 23, pp. 307-319, 2002.
- [7] J. Banhart Aluminium Foam Technology towards Industrial implementation. *Indian Foundry Journal*, vol. 51, pp. 36-41, 2005.
- [8] J. Baron. Aluminum foam technology applied to automotive design. *Cymat*. 2001.
- [9] A. E. Simone and L. J. Gibson. Aluminum Foams Produced by Liquid-State Processes. *Acta materialia*, vol. 46, No. 9, pp. 3109-3123, 1998.
- [10] C. Kammer. Aluminium foam. *TALAT*, Lecture 140. Germany, 1999.
- [11] A. G. Evans; J. W. Hutchinson and M. F. Ashby. Cellular metals. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 3, pp. 288-303, 1998.
- [12] K. Stöbener et al. Composites Based on Metallic Foams: Phenomenology; Production; Properties and Principles. In Proc (Nov. 2003), *International Conference "Advanced Metallic Materials"*. Fraunhofer IFAM, Institute for Manufacturing and Advanced Materials, Smolenice, Slovakia.
- [13] D. Leitlmeier, H.P. Degischer and H. J. Flankl. Development of a foaming process for particulate reinforced aluminum melts. *Advance Engineering Materials*, vol. 4, N°10, pp. 735-740, 2002.
- [14] J. Banhart et al. Development of Advanced Foams under Microgravity. In Proc. (2000) *1st International Symposium on Microgravity Research & Applications in Physical Sciences & Biotechnology*, Sorrento, Italy.
- [15] N. Babcsán, D. Leitlmeier and H. P. Degischer, Foamability of particle reinforced aluminium melt. *Mat-wiss. u. Werstofftech*, vol. 34, pp. 22-29, 2003.
- [16] V. N. Antsiferov, A. M. Makarov and V. D. Khrantsov. High porosity permeable cellular metals and alloys in catalytic processes of gas cleaning. *Advanced Engineering Materials*, vol. 7, N°1-2, 2005.
- [17] J. Banhart and F. Baumgärtner. Industrialisation of powder compact foaming technique. [Online]. Available: <http://www.hmi.de/people/banhart/B-Conferences/b051_banhart2002.pdf>
- [18] N. Babcsán, J. Banhart and D. Leitlmeier. Metal foams Manufacture and Physics of foaming. In Proc. (Nov. 2003) *International Conference "Advanced Metallic Materials"*, Smolenice, Slovakia. p. 5-15.
- [19] M. Weber, J. Banhart and J. Baumeister. Metallic Foams. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Sixth Edition, 2000.
- [20] J. Banhart. Production Methods for Metallic Foams. p. 3-11. [Online]. Available: http://www.hmi.de/people/banhart/B-Conferences/b021_banhart1998.pdf
- [21] Amigó, Busquets, Cárcel. Obtención por vía PM de precursores de espumas metálicas a partir de compuestos de matriz de aluminio. En *Mem. (2005) Actas del VI Congreso Nacional de Materiales Compuestos. AEMAC-UPV*, Valencia, p. 247-254.
- [22] H. Wadley. Cellular metals manufacturing *Advanced Engineering Materials*, vol. 4, pp. 726-733, 2002.
- [23] J. Coletto, J. Goñi, J. Maudes and I. Leizaola. Applications and Manufacture of open and closed cell metal foams by foundry routes. In Proc. (Jun. 2004) *International Congress Eurofond*. La Rochelle, France.
- [24] V. Gergely, D.C. Curran and T.W. Clyne. Advances in the melt route production of closed cell aluminium foams using gas-generating agents. In Proc. (Feb. 2002) *Global Symposium on Materials Processing and Manufacturing Processing & Properties of Lightweight Cellular Metals and Structures*. TMS Annual Meeting, Seattle, Washington.
- [25] K. Chou and M.A. Song. A novel method for making open-cell aluminum foams with soft ceramic balls. *Scripta Materialia*, vol. 46, pp. 379-382, 2002.
- [26] A. M. Harte and S. Nichol. Scale-up issues related to producing Cymat stabilized aluminum foam. In Proc. (2001) *Cellular metals and metal foaming technology*. Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Bremen: MIT-Verlag. pp. 49-54.
- [27] Ch-J. Yu; H. Eifert; J. Banhart and J. Baumeister. Metal Foams. *Advances Materials and Processes*, vol. 11, pp. 45-47, 1998.
- [28] F. Simancik. Introduction: The strange world of cellular metals. *Handbook of Cellular Materials - Production, Processing, Applications*, H.P. Degischer Ed., Wiley-VCH, Weinheim, pp.1-4, 2002.
- [29] D. Leitlmeier and H. Flankl. Development of a new processing technique for near net shape foams parts based on the melt route. In Proc. (2001) *Cellular metals and metal foaming technology*. Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Bremen: MIT-Verlag. pp. 171-174.
- [30] A. Pollien; Y. Conde; L. Pambaguian and A. Mortensen. Graded open-cell aluminium foam core sandwich beams. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 404, pp. 9-18, 2005.
- [31] A.H. Brothers, R. Scheunemann; J. D. DeFouw and D.C. Dunand. Processing and structure of open-celled amorphous metal foams. *Scripta Materialia*, vol. 52, pp. 335-339, 2005.

- [32] C. Gaillard, J.F. Despois and A. Mortensen. Processing of NaCl powders of controlled size and shape for the microstructural tailoring of aluminium foams. *Materials Science and Engineering A*, vol. 374, pp. 250–262, 2004.
- [33] S. Casolco; G. Torres V.; A. Gómez, y P. López. Influencia del tamaño de grano del NaCl en el procesamiento de espumas de Zn-Al-Cu. En *Mem. (2005) XI Congreso Internacional Anual SOMIM, IV Congreso Bolivariano de Ingeniería Mecánica*. Morelia, México.
- [34] Y.Y. Zhao and D.X. Sun. A novel sintering-dissolution process for manufacturing Al foams. *Scripta Materialia*, vol. 44, pp. 105-110, 2001.
- [35] B. Jiang; N. Zhao; C. Shi; X. Du; J. Li and H. Man. A novel method for making open cell aluminum foams by powder sintering process. *Materials Letters*, vol. 59, pp. 3333-3336, 2005.
- [36] C. San Marchi and A. Mortensen. Infiltration and the replication process for producing metal sponges. *Handbook of Cellular Materials, Production, Processing, Applications*. H.P. Degischer Ed., Wiley-VCH, Weinheim, pp.43-55, 2002.
- [37] J.F. Despois et al. Influence of the infiltration pressure on the structure and properties of replicated aluminium foams. *Materials Science and Engineering A*, vol. 462, pp. 68–75, 2007.
- [38] Ch. Feng and H. Deping. Preparation, structure control and acoustic properties of porous aluminium with open cells. In *Proc. (June 1999) Metal foams and porous metal structures*. Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Bremen: MIT Press–Verlag, pp. 163-166.
- [39] J. Banhart. Properties and applications of cast aluminium sponges. In *Proc. (June 1999) Metal foams and porous metal structures*. Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Bremen: MIT Press–Verlag, p. 159-162.
- [40] A.H. Brothers, D.C. Dunand. Plasticity and damage in cellular amorphous metals. *Acta Materialia*, vol. 53, pp. 4427–4440, 2005.
- [41] E. Ochoa; P. López; G. Torres V. y S. Casolco. Esfuerzo de compresión en espumas de zinalco. En *Mem. (2006) XII Congreso Internacional Anual SOMIM*, Acapulco, México.
- [42] F. Han, H. Cheng, J. Wang and Q. Wang. Effect of pore combination on the mechanical properties of an open cell aluminum foam. *Scripta Materialia*, vol. 50, pp. 13–17, 2004.
- [43] H. Deping et al. Simulation of the infiltration process of molten aluminum into porous medium by a model system. In *Proc. (2001) Cellular metals and metal foaming technology*. Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Bremen: MIT–Verlag., pp. 187-192.
- [44] U. Mohr; P. F. Scholz and W. Bleck. Production of SlipReactionFoam (SRF) and influence of production parameters on the mechanical properties. In *Proc. (2001) Cellular metals and metal foaming technology*. Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Bremen: MIT–Verlag., pp. 209-214.
- [45] Y. Yamada et al. Processing of cellular magnesium materials. In *Proc. (June 1999) Metal foams and porous metal structures*. Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Bremen: MIT Press–Verlag, pp.147-152.
- [46] R.L. Centeno, A.R. Kennedy and J. V. Wood. Study of liquid-gas interactions during the foaming of compacted Al-TiH₂ powders. In *Proc. (2001) Cellular metals and metal foaming technology*. Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Bremen: MIT–Verlag. pp. 69-76.
- [47] B-L. Matijašević, “Characterisation and Optimisation of Blowing Agent for Making improve metal foams”. PhD. Dissertation, Technischen Universität Berlin, 2006.
- [48] Y. Zhao; T. Fung; L. Zhang and F. Zhang. Lost carbonate sintering process for manufacturing metal foams. *Scripta Materialia*, vol. 52, pp. 295-298, 2005.
- [49] U. Waag; L. Schneider; P. Löthman and G. Stephani. Metallic hollow spheres – materials for the future. *MPR*, vol. 29, January 2000.
- [50] Inco Ltd., Canada, Product data sheet of “Incofoam” [Online]. Available: <http://www.inco.com>, 1998.
- [51] Duocel Aluminium Foam: A basic design material for the imagination. [Online]. Available: <http://www.ergaerospace.com/>
- [52] Z. Song, S. Kishimoto and N. Shinya. A Novel Pulse-Current-Assisted Sintering Method for Fabrication of Metal Cellular Structures. *Advanced Engineering Materials*, vol. 6, pp. 211-214, 2004.
- [53] C. Körner and R. F. Singer. Processing of Metal Foams–Challenges and Opportunities. *Advanced Engineering Materials*, vol. 2, pp. 159-165, 2000.